

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO

LUAN RAFAEL DOS SANTOS WANDERLEY

**CRESCIMENTO, PRODUTIVIDADE E USO DO N-FERTILIZANTE
PELA CANA-DE-AÇÚCAR FERTIRRIGADA POR GOTEJO
SUBSUPERFICIAL**

RECIFE

2023

Luan Rafael dos Santos Wanderley
Engenheiro Agrônomo

**Crescimento, produtividade e uso do N-fertilizante pela cana-de-açúcar
fertirrigada por gotejo subsuperficial**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciência do Solo.

Orientador: Emídio Cantídio Almeida de Oliveira

**Recife
2023**

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

LUAN RAFAEL DOS SANTOS WANDERLEY

**Crescimento, produtividade e uso do N-fertilizante pela cana-de-açúcar
fertirrigada por gotejo subsuperficial**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciência do Solo.

Aprovada em 30 de agosto de 2023

Prof. Dr. Emídio Cantídio Almeida de Oliveira
Orientador
Universidade Federal Rural de Pernambuco

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Fernando José Freire
Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE

Prof. Dr. Mário Andrade Lira Júnior
Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE

Dra. Jane Kelly Silva Araújo
Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE

Dr. Djalma Euzébio Simões Neto
Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE

DEDICATÓRIA

A minha esposa Williane, a todos familiares e amigos que sempre me fizeram acreditar que seria possível, me dando forças no dia a dia para superar os desafios. À Antônio Wanderley (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pela graça que é nossa vida e por todas as bênçãos ao longo desse período de pós-graduação e início de carreira profissional. *“Dele, por ele e para ele são todas as coisas. A ele a glória por toda a eternidade! Amém”* (Romanos, 11:36).

À minha esposa Williane Diniz, por todo apoio, cobranças e estímulos proporcionados nesses 11 anos juntos. À nossa Aurora.

Aos meus pais, Ana e Mário, pela educação que me proporcionaram, por sempre acreditarem em mim, por entenderem meus sacrifícios e me apoiarem nos momentos difíceis.

À minha família pelos exemplos de dignidade, humildade e dedicação, em especial minha avó Maria do Carmo, por todo carinho e cuidado, e ao meu Tio Walmir Wanderley pelo incentivo desde a infância.

Ao Professor Emídio por sempre acreditar em mim desde o início da graduação e sempre incentivar e contribuir no meu crescimento profissional.

A todos os membros da minha banca examinadora pelas contribuições e sugestões.

A todos do Grupo de Pesquisa Nutrição de Plantas e Fertilidade do Solo – GNAF, pela entrega e auxílio na realização de coletas e análises, em especial Amanda Lima e José Júnior, e todos que me auxiliaram: Ana Carolina, Arielena, Eduardo, Elson, Douglas, Larissa, Marcelo, Nathália e Pedro. Sem o trabalho em grupo não teríamos concluído essa etapa.

Aos amigos da pós-graduação pela contribuição nos trabalhos e pela amizade, em especial José Valdo Ribeiro.

A todos do Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, em especial Maria do Socorro por toda a dedicação e a coordenação do programa pela compreensão.

À equipe da EECAC, em especial Dr. Djalma Euzébio e Evanilson Luís, por toda ajuda e amizade, e a todos os funcionários administrativos e trabalhadores de campo pela entrega.

A todos os parceiros e amigos que acreditaram e financiaram essa pesquisa, a Japungu Agroindustrial, Estreito Agropecuária e a Netafim Brasil.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Enfim, a todos que direta e indiretamente contribuíram para a conclusão do meu doutoramento, contribuindo para meu crescimento pessoal e profissional.

Meu mais sincero, muito obrigado.

“...Eu vou crer em Ti, preciso esperar
Que o Teu melhor, em breve está por vir
Sei que Tua Mão sempre me guiará

Eu vou crer em Ti, não vou desanimar
A fé coroa quem não vacilar
Um passo na fé hoje eu quero dar

Vou esperar, vou confiar
Minha fé está no nosso Deus
Jesus”

Frei Gilson

Som do Monte

Crescimento, produtividade e uso do N-fertilizante pela cana-de-açúcar fertirrigada por gotejo subsuperficial

RESUMO

A cana-de-açúcar é uma das principais culturas no mundo. A relevância dessa cultura está associada à importância econômica e socioambiental originada da produção de alimentos, energias renováveis e geração de empregos diretos e indiretos do setor sucroenergético. No Brasil, a produtividade média da cana-de-açúcar encontra-se abaixo do potencial produtivo. O déficit hídrico e disponibilidade de nutrientes estão entre os principais fatores restritivos ao desenvolvimento da cultura. O nitrogênio (N) é um dos nutrientes com maior impacto na produtividade da cana-de-açúcar devido a participação nos processos metabólicos ligados ao desenvolvimento. No entanto, a eficiência de uso do N derivado do fertilizante é baixa. A fertirrigação por gotejo subsuperficial permite a distribuição de fertilizantes ao longo do ciclo produtivo, aumentando a disponibilidade e aproveitamento do nutriente. Objetivou-se quantificar a recuperação do N-fertilizante e os ganhos no desenvolvimento e rendimento agroindustrial da cana-de-açúcar sob fertirrigação por gotejo subsuperficial. O delineamento experimental utilizado foi blocos casualizados com quatro repetições. Foram avaliadas as doses de 0, 100, 200 e 300 kg ha⁻¹ de N via sistema de fertirrigação e a aplicação em cobertura de 100 kg ha⁻¹ de N. Nos tratamentos com adubação nitrogenada via fertirrigação (100, 200 e 300 kg ha⁻¹ de N) foram instaladas microparcelas com aplicação de fertilizante enriquecido para a determinação da abundância de átomos de ¹⁵N na planta, na solução do solo e para avaliação da recuperação do N-fertilizante no período anterior e posterior à taxa máxima de acúmulo de N. Foram realizadas biometrias para determinação do crescimento da cultura, amostragens destrutivas para a determinação da produção de biomassa, índice SPAD, teor de N no tecido vegetal e acúmulo de N. Aos 308 dias após o corte (DAC) foi realizada a colheita e a determinação do rendimento agroindustrial. Foram realizadas análises de contrastes entre os tratamentos para os parâmetros biométrico, produção dos compartimentos vegetais e rendimento agroindustrial. No período anterior à taxa máxima de acúmulo de N, as maiores doses de N proporcionaram maior enriquecimento de N no solo e na planta. O acúmulo de biomassa e de N apresentaram um comportamento gaussiano. A aplicação de N via fertirrigação resultou em maior produtividade. Os maiores resultados de produção de biomassa foram obtidos com 300 kg ha⁻¹ de N via fertirrigação, porém sem diferença significativa para a dose de 200 kg ha⁻¹. O maior aproveitamento do N-fertilizante ocorre no período de maior crescimento de colmos. O período de maior precipitação pluviométrica quando associado a fase de redução do acúmulo de N, reduziram a eficiência da adubação nitrogenada a 8,9 %. A fertirrigação beneficia o manejo da adubação nitrogenada para a cana-de-açúcar proporcionando o maior desenvolvimento e rendimento agroindustrial.

Palavras-chave: Adubação nitrogenada. Eficiência de utilização de nutrientes. Nutrição de plantas. Rendimento agroindustrial. *Saccharum spp.*

Growth, yield and N-fertilizer recovery of sugarcane under drip fertigation

ABSTRACT

Sugarcane is one of the main crops in the world due to the economic and socio-environmental importance linked to food production, renewable energy, and the generation of direct and indirect jobs in the sugar-energy sector. In Brazil, the average yield of sugarcane is below potential yield. Water deficit and nutrient availability are among the main restrictive factors for crop development. N is one of the nutrients with the greatest impact on sugarcane productivity due to its participation in metabolic processes linked to development. However, the use efficiency of N-fertilizer is low. Subsurface drip fertigation allows the distribution of fertilizers throughout the production cycle, increasing the nutrient availability and uptake. The objective was to quantify the N-fertilizer recovery and the gains in the development and agro-industrial yield of sugarcane under subsurface drip fertigation. The experimental design used was randomized blocks with four replications. Doses of 0, 100, 200 and 300 kg ha⁻¹ of N via fertigation system and application of 100 kg ha⁻¹ of N were evaluated. In treatments with nitrogen fertilization via fertigation (100, 200 and 300 kg ha⁻¹ of N) microplots were installed in those with enriched fertilizer application to determine the abundance of ¹⁵N atoms in the plant and in the soil solution and to evaluate the recovery of N-fertilizer in the period before and after the maximum rate of N-accumulation N. Biometrics and destructive sampling were performed to determination of plant growth and biomass production respectively, beyond determination of SPAD index, N content in plant tissue and N accumulation. At 308 days after harvest (DAH) the harvest was performed, and the agro-industrial yield was determined. Analyzes of contrasts between treatments were carried out for biometric parameters, production of plant compartments and agro-industrial yield. In the period before the maximum rate of N accumulation, the highest doses of N provided greater N enrichment in the soil and in the plant. The accumulation of biomass and N showed a Gaussian behavior. N application by fertigation resulted in higher yield. The highest biomass production results were obtained with 300 kg ha⁻¹ of N by fertigation, however without significant difference for the dose of 200 kg ha⁻¹. The greatest use of N-fertilizer occurs in the period of greatest stem growth. The period of greatest precipitation, when associated with the reduction phase of N accumulation, reduced the efficiency of N fertilization to 8.9%. Fertigation benefits the management of N fertilization for sugarcane leading to the highest development and agroindustrial yield of sugarcane.

Keywords: Nitrogen fertilization. Nutrient use efficiency. Plant Nutrition. Agro-industrial yield. *Saccharum* spp.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Área experimental (vermelho) da EECAC-UFRPE, localizada no município de Carpina – PE, coordenadas 7° 85' S e 35° 23'O (https://goo.gl/maps/4sE4egC1tXtxBNrF6)..	25
Figura 2 – Parcela experimental, com detalhamento para tubos gotejadores entre linhas de cultivo e área útil (vermelho).....	28
Figura 3 – Distribuição mensal de N nos tratamentos via fertirrigação (100, 200, 300 kg ha ⁻¹), e na aplicação em cobertura (100 kg ha ⁻¹).....	28
Figura 4 – Balanço hídrico diário (A) e acúmulos mensais no experimento de campo (B)....	30
Figura 5 – Detalhamento da microparcela em que foi aplicado fertilizante enriquecido e linhas adjacentes.....	32
Figura 6 – Sequência cronológica de avaliações no experimento de campo.	34
Figura 7 – Análises de contrastes ortogonal para perfilhamento em função das doses de N aplicadas via fertirrigação por gotejo subsuperficial (0, 100, 200, 300 kg ha ⁻¹ de N) e adubação em cobertura (100 kg ha ⁻¹).	39
Figura 8 – Análises de contrastes ortogonal para diâmetro de colmos em função das doses de N aplicadas via fertirrigação por gotejo subsuperficial (0, 100, 200, 300 kg ha ⁻¹ de N) e adubação em cobertura (100 kg ha ⁻¹).	39
Figura 9 – Análises de contrastes ortogonal para estatura média de colmos (EMC) em função das doses de N aplicadas via fertirrigação por gotejo subsuperficial (0, 100, 200, 300 kg ha ⁻¹ de N) e adubação em cobertura (100 kg ha ⁻¹).	40
Figura 10 – Análises de contrastes ortogonal para produção de biomassa total em função das doses de N aplicadas via fertirrigação por gotejo subsuperficial (0, 100, 200, 300 kg ha ⁻¹ de N) e adubação em cobertura (100 kg ha ⁻¹).....	40
Figura 11 – Análises de contrastes ortogonal para produção de biomassa de colmos em função das doses de N aplicadas via fertirrigação por gotejo subsuperficial (0, 100, 200, 300 kg ha ⁻¹ de N) e adubação em cobertura (100 kg ha ⁻¹).	41
Figura 12 – Análises de contrastes ortogonal para produção de biomassa de folhas secas em função das doses de N aplicadas via fertirrigação por gotejo subsuperficial (0, 100, 200, 300 kg ha ⁻¹ de N) e adubação em cobertura (100 kg ha ⁻¹).....	41
Figura 13 – Análises de contrastes ortogonal para produção de biomassa de folhas verdes em função das doses de N aplicadas via fertirrigação por gotejo subsuperficial (0, 100, 200, 300 kg ha ⁻¹ de N) e adubação em cobertura (100 kg ha ⁻¹).....	42

Figura 14 – Análises de contrastes ortogonal para produção de biomassa de ponteiro em função das doses de N aplicadas via fertirrigação por gotejo subsuperficial (0, 100, 200, 300 kg ha ⁻¹ de N) e adubação em cobertura (100 kg ha ⁻¹).....	42
Figura 15 – Análises de contrastes ortogonal para produtividade em função das doses de N aplicadas via fertirrigação por gotejo subsuperficial (0, 100, 200, 300 kg ha ⁻¹ de N) e adubação em cobertura (100 kg ha ⁻¹).....	43
Figura 16 – Análises de contrastes ortogonal para ATR em função das doses de N aplicadas via fertirrigação por gotejo subsuperficial (0, 100, 200, 300 kg ha ⁻¹ de N) e adubação em cobertura (100 kg ha ⁻¹).....	43
Figura 17 – Análises de contrastes ortogonal para PC em função das doses de N aplicadas via fertirrigação por gotejo subsuperficial (0, 100, 200, 300 kg ha ⁻¹ de N) e adubação em cobertura (100 kg ha ⁻¹).....	44
Figura 18 – Análises de contrastes ortogonal para produtividade de açúcar (TAH) em função das doses de N aplicadas via fertirrigação por gotejo subsuperficial (0, 100, 200, 300 kg ha ⁻¹ de N) e adubação em cobertura (100 kg ha ⁻¹).....	44
Figura 19 – Efeito das doses de N via fertirrigação no perfilhamento, em número de perfilhos industrializáveis por metro (NPI m ⁻¹), (A), e no diâmetro médio de colmos, em cm, (B).	46
Figura 20 – Efeito das doses de N via fertirrigação na estatura média de colmos, em cm, em função do tempo (A) e da dose de N via fertirrigação (B).....	46
Figura 21 – Efeito das doses de N via fertirrigação em função da dose e do tempo na produção de biomassa total (A e B), biomassa de colmos (C e D), biomassa de folhas secas (E e F), e biomassa de folhas verdes (G e F).....	48
Figura 22 – Efeito das doses de N via fertirrigação na produção de biomassa de ponteiro em função do tempo.....	49
Figura 23 – Proporções entre os compartimentos vegetais ao 98 DAC (A), 141 DAC (B), 204 DAC (C), 272 DAC (D) e 308 DAC (E).	50
Figura 24 – Produtividade agrícola (A) e de açúcar da cana-de-açúcar (B) em função de doses de N via fertirrigação (0, 100, 200, e 300 kg ha ⁻¹) e na aplicação em cobertura (100 kg ha ⁻¹) - Linha tracejada cinza.	51
Figura 25 – Teor de N no tecido Vegetal ao longo do tempo em função das doses de N aplicada via fertirrigação por gotejo subsuperficial (0, 100, 200, 300 kg ha ⁻¹ de N) e adubação em cobertura (100 kg ha ⁻¹).....	52
Figura 26 – Índice SPAD no tempo para doses de N aplicada via fertirrigação por gotejo subsuperficial (0, 100, 200, 300 kg ha ⁻¹ de N) e adubação em cobertura (100 kg ha ⁻¹).	53

Figura 27 – Índice SPAD no do tempo para doses de N aplicada via fertirrigação por gotejo subsuperficial (0, 100, 200, 300 kg ha ⁻¹ de N) e adubação em cobertura (100 kg ha ⁻¹).....	54
Figura 28 – Acúmulo (A); Taxa de acúmulo (B), e Ganho mensal (C) de biomassa seca total ao longo do ciclo em função de doses de N aplicadas via fertirrigação por gotejo subsuperficial (0, 100, 200, 300 kg ha ⁻¹ de N) e adubação em cobertura (100 kg ha ⁻¹).	56
Figura 29 – Acúmulo total de N (A); Taxa de acúmulo de N (B); e Ganho mensal de N (C) ao longo do ciclo em função de doses de N aplicadas via fertirrigação por gotejo subsuperficial (0, 100, 200, 300 kg ha ⁻¹ de N) e adubação em cobertura (100 kg ha ⁻¹).....	57
Figura 30 – Abundância de átomos de ¹⁵ N em função de doses de N aplicadas via fertirrigação 17,5 (100), 35 (200) e 52,5 kg ha ⁻¹ de N (300) e do local de avaliação no período anterior a máxima taxa de acúmulo de N (A) e em função do local de avaliação no período posterior à máxima taxa de acúmulo de N, em % (B).....	58
Figura 31 – Nitrogênio derivado do fertilizante – NDDF, em percentagem, (A e B); Nitrogênio total derivado do fertilizante – NDDF _{tot} , em kg ha ⁻¹ de N, (C e D); e Recuperação do N-fertilizante, em percentagem, (E e F) no período anterior e posterior a taxa máxima de acúmulo de N para as doses de N aplicadas via fertirrigação 17,5 (100), 35 (200) e 52,5 kg ha ⁻¹ de N (300).	60
Figura 32 – N solução do solo derivado do fertilizante – NSSDF (A e C) e teor de N na solução do solo (B e D) nas profundidades de 30 e 60 cm, e na interação dose época de aplicação, em função de doses de N aplicadas via fertirrigação 17,5 (100), 35 (200) e 52,5 kg ha ⁻¹ de N (300).	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Caracterização química e física do solo da área experimental.....	27
Tabela 2 – ATR e PC da cana-de-açúcar em função de doses de N via fertirrigação (0, 100, 200, e 300 kg ha ⁻¹) e na aplicação em cobertura (100 kg ha ⁻¹).	52

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Hipóteses.....	16
1.2 Objetivos.....	16
1.2.1 Objetivo Geral.....	16
1.2.2 Objetivos Específicos	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1 História, botânica e taxonomia vegetal da cana-de-açúcar	17
2.2 Cenário atual do setor sucroenergético mundial e nacional.....	18
2.3 Desenvolvimento e demanda nutricional da cana-de-açúcar.....	20
2.4 Nitrogênio como nutriente e adubação nitrogenada da cana-de-açúcar	21
2.5 Impacto da irrigação na cana-de-açúcar	22
2.6 Fornecimento de N via fertirrigação para a cana-de-açúcar	23
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	25
3.1 Descrição e caracterização da área experimental.....	25
3.2 Caracterização química e físico-hídrica do solo	26
3.3 Descrição pesquisa.....	27
3.4 Descrição sistema de fertirrigação	29
3.5 Análises isotópicas.....	31
3.6 Produção de biomassa vegetal	33
3.7 Avaliações biométricas	33
3.8 Teor de N no tecido vegetal e acúmulo N	35
3.9 Avaliação do Índice SPAD	35
3.10 Colheita e rendimento agroindustrial.....	35
3.11 Processamento de dados e análises estatísticas.....	35
4 RESULTADOS	37
4.1 Análises de contrastes.....	37

4.2 Análise fatorial tratamento fertirrigados	45
4.2.1 Parâmetros biométricos	45
4.2.2 Produção de biomassa	47
4.2.3 Rendimento agroindustrial	51
4.2.4 Teor de N no tecido vegetal	52
4.2.5 Índice SPAD.....	53
4.2.6 Produção de biomassa seca e acúmulo de N	55
4.2.7 Abundância de ¹⁵ N	58
4.2.8 NDDF e Recuperação do N-Fertilizante	59
4.4.9 N-fertilizante e teor de N na solução do solo	61
5 DISCUSSÃO	62
5.1 Efeito da aplicação de N via fertirrigação no desenvolvimento da cana-de-açúcar.....	62
5.2 Aproveitamento do N fertilizante e rendimento agroindustrial da cana-de-açúcar.....	66
6 CONCLUSÕES	68
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	69
APÊNDICE A – Resumo dos resultados análises estatísticas	80

1 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é uma cultura de importância mundial por ser a principal fonte de açúcar no mundo. Além disso, é uma das principais matérias-primas do etanol, combustível renovável alternativo ao uso de combustíveis fósseis. No Brasil, maior produtor mundial da cultura, a cana-de-açúcar apresenta importância econômica e socioambiental devido a produção de alimentos, energia renovável e movimentar uma cadeia que gera milhares de empregos diretos e indiretos.

A produção da cana-de-açúcar vem sendo estimulada pela busca por fontes sustentáveis para a produção de energia. O sistema de produção da cana-de-açúcar apresenta balanço energético positivo e superior ao de outras culturas sucroenergéticas, com alta eficiência fotossintética e rendimento industrial, reutilização dos subprodutos da industrialização e baixo revolvimento do solo. Por isso, a cultura tem destaque dentro da política nacional RenovaBio, que incentiva a produção de etanol de cana-de-açúcar, e a implementação de práticas de manejo que aumentem a eficiência dos recursos e minimizem as causas do efeito estufa.

Apesar da relevância da cana-de-açúcar no país, a sua produtividade média encontra-se abaixo do potencial produtivo. Entre os principais fatores limitantes à produtividade estão o déficit hídrico, tanto pela insuficiência durante os períodos crítico de desenvolvimento da cultura quanto pela má distribuição de chuvas ao longo do ciclo em todo o Brasil. Somado a isso, tem-se a baixa disponibilidade e/ou baixo aproveitamento de nutrientes principalmente nas novas fronteiras agrícolas onde os ambientes produtivos são menos favoráveis ao desenvolvimento da cana-de-açúcar.

O uso da irrigação possibilita o incremento da produtividade da cana-de-açúcar. Entre os diferentes sistemas de irrigação, a irrigação por gotejo permite maiores respostas no desenvolvimento da cana-de-açúcar devido a aplicação de água diretamente no sistema radicular, bem como pela distribuição de água ao longo do ciclo produtivo, possibilitando também o fornecimento de nutrientes.

Entre os nutrientes, o nitrogênio (N) é o nutriente mineral que tem o maior impacto na produção de biomassa da cana-de-açúcar. Isso ocorre devido a participação desse nutriente nos processos metabólicos ligados ao ganho de biomassa, no desenvolvimento vegetativo e crescimento radicular. No entanto, a eficiência de uso do N derivado do fertilizante é baixa. Além disso, práticas de manejo que aumentem a eficiência do fertilizante nitrogenado são necessárias para aumentar a rentabilidade da cultura e para um sistema de produção mais sustentável.

O manejo da adubação convencional (tradicional) é marcado por um desencontro entre a demanda do nutriente e sua disponibilidade no solo. Enquanto a demanda pela planta é crescente, principalmente durante a fase de crescimento de colmos, o fornecimento do fertilizante ocorre apenas no início do ciclo, conduzindo a uma disponibilidade de N derivado do fertilizante reduzida no decorrer do ciclo.

A cana-de-açúcar apresenta uma demanda de N reduzida no início do ciclo produtivo durante a fase de perfilhamento. Conforme a cultura se desenvolve, ocorre a fase crescimento de colmos, momento no qual acontece a maior produção de biomassa e extração de N. Ao final do ciclo, ocorre uma estabilização na produção de biomassa e incremento no acúmulo de sacarose, acentuando a maturação da cana-de-açúcar e proporcionando uma redução na exigência de N.

O uso de fertirrigação por gotejo subsuperficial permite a distribuição de fertilizantes ao longo do ciclo através da irrigação de acordo com a demanda nutricional da cultura. Contudo, é necessário avaliar o potencial de resposta da aplicação do N através desse sistema nas diferentes fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar.

A crescente demanda por fontes de energia limpa e produção sustentável de alimentos estimula a produção da cana-de-açúcar. O caminho para incrementar a produtividade da cultura em conjunto com a preservação dos recursos naturais é a busca pelo aumento na eficiência de usos de insumos. Dessa forma, identificar o adequado manejo nutricional que promova o aumento da eficiência de utilização do fertilizante nitrogenado irá possibilitar uma produção de cana-de-açúcar mais sustentável.

1.1 Hipóteses

- O fornecimento de N pela fertirrigação na quantidade adequada em cada fase de desenvolvimento da cana-de-açúcar promoverá maior eficiência da adubação nitrogenada.
- A maior eficiência da nutrição nitrogenada pela fertirrigação incrementará o crescimento e a produtividade da cana-de-açúcar.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

- Quantificar o desenvolvimento e o rendimento agroindustrial da cana-de-açúcar cultivada sob fertirrigação por gotejo subsuperficial.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Identificar a recuperação da adubação nitrogenada pela cana-de-açúcar nas fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar quando cultivada sob fertirrigação por gotejo subsuperficial;
- Avaliar o crescimento da cana-de-açúcar sob fertirrigação com nitrogênio por gotejo subsuperficial;
- Determinar a produção de biomassa e a nutrição nitrogenada nas fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar cultivada sob fertirrigação por gotejo subsuperficial;
- Identificar o rendimento agroindustrial da cana-de-açúcar adubada com nitrogênio na fertirrigação por gotejo subsuperficial;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 História, botânica e taxonomia vegetal da cana-de-açúcar

A história da cana-de-açúcar e do Brasil estão diretamente ligadas. O Reino de Portugal implantou o sistema de capitanias hereditárias e optou pelo cultivo da cana-de-açúcar como maneira viável de fixar o colono na nova terra, em função da existência de um mercado de açúcar em franca atividade e expansão na Europa, bem como pelas condições edafoclimáticas propícias ao cultivo e pela experiência obtida na Ilha da Madeira. No ano de 1532, Martim Affonso de Souza trouxe oficialmente a primeira muda de cana ao Brasil e iniciou seu cultivo na Capitania de São Vicente. Assim, os engenhos de açúcar se multiplicaram efetivamente no Nordeste do Brasil, principalmente na Capitania de Pernambuco (FAUSTO, 2014).

A cana-de-açúcar é conhecida desde 7.000 a.C, quando começou a ser cultivada por agricultores neolíticos. O provável centro de origem e diversificação da cana-de-açúcar é na região entre a Oceania, mais especificamente na região da Nova Guiné e Indonésia, e Sudeste Asiático, onde ocorreu sua domesticação. No passado, *S. barberi* se destacou na Índia, enquanto *S. officinarum* e *S. sinensis* foram destaque na Nova Guiné e sudeste da China, respectivamente. A dispersão da cana-de-açúcar na Ásia está ligada a emigração dos povos Austronésios. A partir disto, a cultura foi espalhada pelo mediterrâneo e região ocidental da Eurásia (RAM et al., 2022). Quanto a taxonomia, a cana-de-açúcar é pertencente à divisão Magnoliophyta, classe Liliopsida, ordem Cyperales, família Poaceae, tribo Andropogoneae, gênero *Saccharum* (CRONQUIST, 1981).

A cana-de-açúcar atualmente cultivada é formada pelo complexo híbrido interespecífico do gênero *Saccharum*. Entre elas estão as plantas domesticadas *S. officinarum* L., predominante devido ao alto teor de sacarose, e espécies que se destacam devido a rusticidade, *S. sinensis*, *S. barberi* e *S. edule*, e as selvagens *S. spontaneum* e *S. robustum*. Dessa forma, a cana-de-açúcar encontrada nas áreas comerciais é caracterizada como *Saccharum* spp. (MOORE; PATERSON; TEW, 2013).

Entre as plantas que apresentam a sacarose como reserva de energia, apenas na cana-de-açúcar e na beterraba os teores são encontrados em altas concentrações, que justifiquem o cultivo agrícola (MUKHERJEE; GANTAIT, 2023). A cana-de-açúcar apresenta elevada eficiência de conversão de energia solar em energia química, podendo ser armazenada na forma de sacarose e biomassa vegetal (VASANTHA et al., 2022). Essa cultura destaca-se como uma das principais culturas mundiais, com histórico de sucesso em sua exploração e desenvolvimento de pesquisas (VANDENBERGHE et al., 2022).

2.2 Cenário atual do setor sucroenergético mundial e nacional

A cana-de-açúcar é uma importante cultura alimentícia e energética em diversos países do mundo, com uma produção total de mais 1,8 bilhões de toneladas (FAOSTAT, 2023). A cana-de-açúcar é a principal fonte de açúcar mundial, representado cerca de 70 %, e de etanol, uma fonte de energia renovável (CERVI et al., 2019; VANDENBERGHE et al., 2022). O volume de cana-de-açúcar cultivado é justificado pela amplitude de produtos originados pela cultura. Estes produtos estão entre os principais componentes da economia de países tropicais e subtropicais (BARBOSA et al., 2021; COSTA et al., 2022).

O setor sucroenergético possui um papel importante para Brasil devido ao impacto socioeconômico através da geração de renda direta e indireta de empregos. O cultivo da cana-de-açúcar gerou um PIB de aproximadamente 75,2 bilhões de reais no ano de 2021, um incremento de aproximadamente 24 % em relação ao ano anterior, ficando atrás apenas da soja e milho (IBGE, 2023).

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, com cerca de 30% de toda a produção mundial, seguido pela Índia e China (FAOSTAT, 2023). Além disso, o país destaca-se como maior produtor mundial de açúcar e de etanol, com safra 2021/2022 de 35 milhões de toneladas de açúcar e 26 bilhões de litros de etanol (CONAB, 2022a).

O acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar entre abril de 2021 e março de 2022 demonstrou produção de 585,2 milhões de toneladas, o que representa redução de 10% em relação à safra anterior (CONAB, 2022a). A menor produção está ligada a reduções na área de cultivo e na produtividade do canavial. Na safra 2021/22, a cana-de-açúcar foi cultivada em 8.317 mil ha com produtividade média de 70 t ha⁻¹, o que correspondeu a reduções de 3,5 % e 7,4 % respectivamente (CONAB, 2022a). As anomalias climáticas de secas e baixa temperatura no inverno na região Centro-Sul foram os principais fatores que contribuíram para a queda na produtividade. De maneira semelhante, em outros anos o cultivo da cana-de-açúcar tem sido prejudicado por fatores ligados ao clima ao longo de todo o Brasil (DIAS; SENTELHAS, 2018).

A previsão para a safra 2022/23 aponta para uma redução de 0,5 % na área cultivada, totalizando em 8.307 mil ha, devido a contínua competitividade econômica de culturas mais lucrativas como milho e soja. Já para produtividade, a média estimada é de 72 t ha⁻¹, e o total de produção de 598.345,4 mil toneladas, cujos aumentos são superiores a 3 % em relação à safra anterior. A estimativa positiva se deve à projeção de melhor cenário climático na maior parte do país devido principalmente a maior disponibilidade hídrica observada durante o período de desenvolvimento da cultura (CONAB, 2022b).

O contínuo crescimento da população global em conjunto com a demanda crescente por fontes energéticas alternativas estimulam o aumento na produção da cana-de-açúcar também estimulará o aumento na produção da cana-de-açúcar no Brasil e em outros países produtores (BORGES et al., 2019; CARDOZO et al., 2016; Kerdan; GIAROLA; HAWKES, 2020). A cultura apresenta alta eficiência no balanço energético, além de maior capacidade de produção de combustível em relação a outras culturas sucroenergéticas (BORDONAL et al., 2018).

O sistema produtivo moderno da cana-de-açúcar contribui para uma maior sustentabilidade do setor sucroenergético (PICOLI; MACHADO, 2021; ROSSETO et al., 2022). A baixa frequência de revolvimento do solo (necessário apenas na renovação do canavial), e o crescimento da colheita de cana crua contribuem para a qualidade do solo, preservação de recursos e a redução na emissão de CO₂ (SOUSA JUNIOR et al., 2018; WEILER et al., 2019). Essas características associadas à utilização dos subprodutos da industrialização (vinhaça, bagaço, cinzas de caldeira e torta de filtro) reduzem o impacto ambiental da cultura, aumentam a rentabilidade e mantêm o balanço energético positivo na produção de cana-de-açúcar no Brasil (BULLER et al., 2021; Kerdan; GIAROLA; HAWKES, 2020).

As características da cana-de-açúcar agregam destaque a essa cultura na Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), instituída pelo Ministério de Minas e Energia em dezembro de 2017, que estimula a produção de energia renovável através de políticas públicas. O principal instrumento da RenovaBio são os créditos de descarbonização (CBIOS) que podem proporcionar benefícios financeiros para o cultivo da cana-de-açúcar e aumentar sua participação na matriz energética nacional (PICOLI; MACHADO, 2021; VANDENBERGHE et al., 2022).

A adubação nitrogenada é um dos focos do RenovaBio, devido grande quantidade utilizada, consumo de combustíveis fósseis na fabricação e às perdas que ocorrem no sistema solo-planta atmosfera (BORGES et al., 2019; OTTO et al., 2022). As tecnologias que aumentem a eficiência de utilização de recursos contribuem para a sustentabilidade do sistema de produção, possibilitando a geração de CBIOS (PICOLI; MACHADO, 2021; VANDENBERGHE et al., 2022). A redução da emissão de gases do efeito estufa durante o processo produtivo da cana-de-açúcar é um dos focos da RenovaBio (BORGES et al., 2019). Nesse contexto, o melhor aproveitamento do N nos canaviais e o aumento da conversão de biomassa é uma estratégia de interesse econômico e ambiental no Brasil (BORGES et al., 2019; OTTO et al., 2022a).

2.3 Desenvolvimento e demanda nutricional da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é uma cultura semi-perene, com ciclos de cultivos superiores a um ano. O primeiro ciclo após o plantio (cana planta) dura de 12 a 18 meses, os ciclos nos anos seguintes originados do rizoma (rebrotas) duram de 12 a 14 meses e são caracterizados como cana soca ou socaria. A longevidade da cana-de-açúcar (quantidade de ciclos sucessivos como produção economicamente viável) sob condições de sequeiro (sem irrigação) é de cerca de 5 anos, quando então é necessário realizar a renovação do canavial com um novo plantio (TENELLI et al., 2021). Sob condições edafoclimáticas favoráveis e de manejo adequado, a longevidade é aumentada, podendo superar 10 anos de cultivos sem renovação (DLAMINI; ZHOU, 2022).

A fenologia da cana-de-açúcar é separada por fases com demandas nutricionais e processos fisiológicos distintos: Brotação/Emergência; Perfilhamento; Crescimento de colmos; e maturação (BONNET, 2013). A fase de brotação e emergência da cana-de-açúcar ocorre após o plantio ou o corte da socaria. Nessa fase, ocorre o enraizamento inicial da cultura e a emissão de perfilhos primários a partir da gema (BONNET, 2013; PIERRE; PERROUX; RAE, 2021).

O desenvolvimento inicial da cana-de-açúcar está ligado às condições ambientais adequadas e à reserva nutricional armazenada no colmo semente, na cana planta, e no rizoma na socaria (OTTO et al., 2022b). Ao longo dos primeiros meses de cultivo, o perfilho primário emite em sua base um perfilho secundário e esse por sua vez, emite um terciário, e assim sucessivamente, caracterizando o processo de perfilhamento (BONNET, 2013). Esse processo resulta na formação da touceira da cana-de-açúcar e é intensificado do 3º ao 5º mês de desenvolvimento. Nesse período, ocorre a senescência daqueles mais vigorosos e expostos a luz, reduzindo a densidade de colmos na touceira final (ENDRES et al., 2019).

A fase de crescimento de colmos, iniciada logo após o pico do perfilhamento, é caracterizada pelo maior ganho de biomassa pela planta. Nessa fase, ocorre um acúmulo exponencial, atingindo 75 % de toda a biomassa produzida ao longo do ciclo (SANTANA et al., 2020). Nessa fase ocorre também o maior acúmulo de nutrientes devido a maior necessidade nutricional relacionado aos processos metabólicos vegetais como a fotossíntese (GUO et al., 2021).

Ao final do ciclo produtivo, ocorre a fase de maturação, marcada pela estabilização da produção de biomassa vegetal e redução drástica no acúmulo de nutrientes pela cana-de-açúcar (WANDERLEY et al., 2021). Nessa fase, a redução no crescimento dá lugar ao incremento no acúmulo de sacarose no colmo (VASANTHA et al., 2022).

2.4 Nitrogênio como nutriente e adubação nitrogenada da cana-de-açúcar

O nitrogênio (N) é componente de vitaminas, aminoácidos e ácidos nucleicos. Esse nutriente está envolvido diretamente no processo de fotossíntese, participando da síntese e estrutura da molécula de clorofila (KÖLLN et al., 2021). Na cana-de-açúcar, o N está diretamente relacionado com o crescimento radicular (OTTO et al., 2014), o perfilhamento (VALE et al., 2011), o crescimento, e o acúmulo de biomassa (BOSCHIERO et al., 2020; LEITE et al., 2016; MARIANO et al., 2016; OLIVEIRA et al., 2011). A omissão completa de N pode diminuir em até 91 % a produção de biomassa da cultura (VALE et al., 2011).

O N é um dos nutrientes mais extraídos pela cana-de-açúcar, e dentre os nutrientes minerais está atrás apenas do K (LEITE et al., 2016). Dessa forma, o manejo da adubação nitrogenada é um dos principais fatores que possibilitam o aumento do rendimento agroindustrial da cultura (BOSCHIERO et al., 2020). O N é absorvido principalmente pelo sistema radicular, por meio da solução do solo, nas formas de nitrato (NO_3^-) e amônio (NH_4^+) (BOSCHIERO et al., 2019; KÖLLN et al., 2022; KOLTUN et al., 2022).

As principais fontes de N para a cana-de-açúcar são a mineralização da matéria orgânica do solo, a decomposição da palhada, e íons em solução oriundos de fertilizantes (JORIS et al., 2020). Outras fontes de N para a cana-de-açúcar são os compostos orgânicos do solo e a fixação biológica de nitrogênio (ANTUNES et al., 2019; FARZADFAR et al., 2021; GAVA et al., 2019).

A adubação nitrogenada ocorre convencionalmente na ocasião do plantio e após a emissão do perfilhos na socaria, com doses que variam no Brasil de 60 a 120kg ha⁻¹ nos ciclos de cana planta e cana soca (CASTRO et al., 2023; OTTO et al., 2020; SILVA et al., 2019). No entanto, o maior acúmulo de N é observado ao longo da fase de crescimento de colmos (LEITE et al., 2016; WANDERLEY et al., 2021). Essa incompatibilidade entre a disponibilidade do nutriente e a demanda nutricional contribui para a baixa eficiência de utilização do N do fertilizante (BRACKIN et al., 2015). Na cana-de-açúcar, a recuperação do fertilizante nitrogenado varia de 20 a 40 % (FRANCO et al., 2011; VIEIRA-MEGDA et al., 2015). O N que não é recuperado pelas plantas está sujeito a transformações e perdas de N no sistema solo-planta-atmosfera que reduzem a disponibilidade de N para a cana-de-açúcar (OTTO et al., 2016).

A ureia é um dos fertilizantes nitrogenados mais utilizados no cultivo da cana-de-açúcar. Isso ocorre principalmente devido ao seu menor custo por unidade de N em relação à outras fontes (SILVA et al., 2019). Em sistemas de adubação convencional, a ureia é depositada no fundo do sulco e homogeneizada com o solo e irrigação após a finalização do plantio. Em

socaria, quando a adubação ocorre em superfície, a ureia tem alto potencial de perda por volatilização, sobretudo na presença de palhada. Para aumentar a eficiência, a ureia deve ser solubilizada antes da aplicação, ou aplicada antes de eventos de precipitação mínima que permita a incorporação dos grânulos no solo (PAN et al., 2016). Em sistemas irrigados, a ureia apresenta ainda como vantagem a alta solubilidade e compatibilidade com outras fontes. E uma vez solubilizada antes da aplicação (sistemas de fertirrigação), a incorporação ao solo é facilitada e as perdas por volatilização são minimizadas (PAN et al., 2016).

2.5 Impacto da irrigação na cana-de-açúcar

O cultivo da cana-de-açúcar é realizado em todas as regiões do Brasil. Ao longo de todo o país, a cultura convive com irregularidades de disponibilidade hídrica, tanto pela má distribuição, quanto pela quantidade de água abaixo da demanda hídrica (CONAB, 2022a; DIAS; SENTELHAS, 2019; LIU et al., 2016).

O cultivo da cana-de-açúcar tem crescido nos últimos 20 anos em ambientes de produção menos favoráveis, nos quais os solos apresentam menor capacidade de armazenamento de água (OLIVEIRA et al., 2019). A irregularidade na disponibilidade de água promove déficit hídrico que irá comprometer o desenvolvimento da cultura e, conseqüentemente, a produtividade (SANTOS et al., 2019a). Os prejuízos causados em um ciclo, irão afetar a rebrota no ciclo seguinte, resultando na redução da longevidade do canavial (ENDRES et al., 2019; LIU et al., 2016). Esse cenário aumenta os custos produtivos e reduz o estoque de carbono do solo pelo revolvimento mais frequente (CARDOZO et al., 2016).

A cana-de-açúcar apresenta uma demanda hídrica que varia de 1.500 a 2.000 mm distribuídos ao longo do ciclo produtivo (DINGRE; GORANTIWAR, 2020; DOORENBOS; KASSAM, 1994; SANTOS et al., 2019b). No entanto, o período de maior demanda hídrica é a fase de crescimento de colmos, período em que o déficit hídrico tem maior impacto sobre o desenvolvimento da cultura (QIN et al., 2023).

A irrigação na cana-de-açúcar é uma tecnologia crescente e que possibilita maior exploração do potencial produtivo da cultura. Por meio dela ocorre o fornecimento de água nos períodos críticos e o atendimento a demanda hídrica total da cana-de-açúcar. Em levantamento realizado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA (2021), aproximadamente 3,66 milhões de hectares cultivados com cana-de-açúcar são equipados para a utilização de irrigação. Dentro desse montante, 76% são destinados à irrigação de salvamento, quando as plantas recebem água apenas em períodos mais críticos do crescimento, principalmente na brotação. Assim, a maior parte da área é cultivada em déficit hídrico, o que

faz com o que a água seja o principal fator limitante à produtividade da cana-de-açúcar no Brasil (DIAS; SENTELHAS, 2019).

Entre os diferentes sistemas de irrigação, o gotejamento apresenta diferentes benefícios para a cultura da cana-de-açúcar. O fornecimento de água em diferentes frequências e diretamente no sistema radicular resulta em maior absorção de água, possibilitando maior desenvolvimento da cultura, e ganhos na produtividade. Dessa forma, o sistema de gotejamento tem maior eficiência de uso da água (WONPRASAID et al., 2023).

A irrigação localizada por gotejo apresenta maior custo para a implantação do sistema. Dessa forma é necessário maior investimento em tecnologias e sistema de manejo que aumentem os ganhos com esse sistema produtivo. Apesar disso, o retorno financeiro do canavial é também expressivo, podendo ocorrer lucro líquido desde o primeiro ciclo de cultivo (ESPERANCINI et al., 2015). Em ambientes de condição favorável, a produtividade média das áreas com irrigação por gotejamento se aproxima do potencial produtivo da cultura (NASCIMENTO et al., 2018).

2.6 Fornecimento de N via fertirrigação para a cana-de-açúcar

A irrigação localizada, principalmente através de gotejo subsuperficial, possibilita o fornecimento de nutrientes através da água de irrigação. A fertirrigação é caracterizada como a técnica de fornecimento de nutrientes para uma cultura através do sistema de irrigação, podendo ser utilizada em diferentes sistemas de irrigação (BAR-YOSEF, 1999).

A fertirrigação permite que água e fertilizantes sejam fornecidos ao longo do ciclo, sendo possível atender as demandas desses recursos em cada fase fenológica da cultura (CHEN et al., 2012). A utilização da adubação nitrogenada em conjunto com a irrigação tem proporcionada ganhos significativos no rendimento agroindustrial da cana-de-açúcar (MENDONÇA et al., 2020). De maneira semelhante, o aumento da frequência de fertirrigação utilizando fontes nitrogenadas tem resultado no aumento na eficiência de uso do N e no incremento da produtividade na cultura (RHEIN et al., 2016; WANDERLEY et al., 2021). Nesse sistema a ureia pode ser utilizada sem riscos de perda, uma vez que é aplicada depois da solubilização em água. Isso possibilita a redução do custo de adubação e aumenta a eficiência econômica e ambiental da adubação.

Devido à grande extensão das áreas e mecanização dos tratos culturais, o sistema de gotejamento subsuperficial é mais indicado para a cultura da cana-de-açúcar. Os ganhos observados são expressivos no crescimento (CUNHA et al., 2016), na eficiência de uso de água

e nutrientes (ANDRADE JUNIOR et al., 2012; ESPERANCINI et al., 2015), e no rendimento agroindustrial, com ganhos de até 67% na produtividade da ressoca (DALRI; CRUZ, 2008).

A aplicação de N de acordo com o período de requerimento possibilita uma maior produtividade da cana-de-açúcar (CASTRO et al., 2019). A distribuição adequada de fertilizantes possibilita maiores taxas de absorção de N e de acúmulo de biomassa, e reduz as perdas por lixiviação, resultando em maior eficiência de uso do fertilizante (AZAD et al., 2020; RAVIKUMAR et al., 2011), e estimativas de ganhos de 217 Mg ha⁻¹ (NASCIMENTO et al., 2018). Na ressoca, os ganhos podem ser de até 67% na produtividade (DALRI; CRUZ, 2008).

O aumento das doses de N via fertirrigação na cana-de-açúcar tem demonstrado que a cultura responde a aportes maiores do que os atualmente recomendados (ANDRADE JUNIOR et al., 2012; DALRI; CRUZ, 2008; ESPERANCINI et al., 2015; NASCIMENTO et al., 2018; RHEIN et al., 2016). No entanto, Rhein et al. (2016) observaram que a utilização de 200 kg ha⁻¹ de N via fertirrigação diminuiu significativamente o BRIX, POL e ATR na socaria da variedade SP80-3280, o que resultou em menor rendimento industrial.

O uso da fertirrigação por gotejo encontra-se entre as principais técnicas com potencial para aumentar o aproveitamento do fertilizante, tanto pelo fornecimento direto no sistema radicular e distribuição ao longo ciclo, quanto pela diminuição na dose aplicada sem redução na produtividade das culturas (ANAS et al., 2020; CHALCO VERA et al., 2022). A redução da dose pode ser possível pela aplicação de N parcelado, superando o aproveitamento do fertilizante em comparação com aplicação dos grânulos via solo (manejo sob sequeiro), como também em cultivos sob outros sistemas de irrigação (KÖLLN et al., 2023).

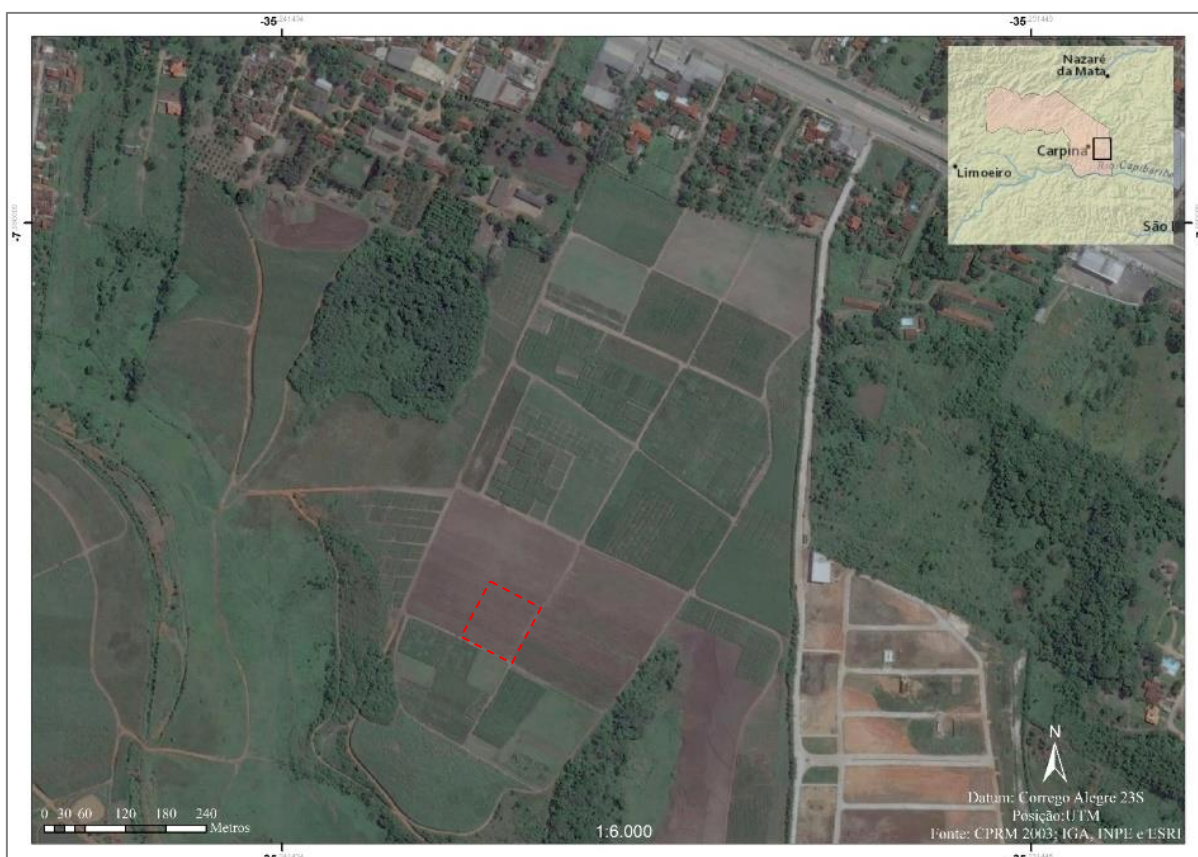
Assim, se faz necessário estudar o manejo de doses e frequência de aplicação do fertilizante nitrogenado via fertirrigação. A avaliação de concentrações ideais do fertilizante na solução, que viabilize a taxa máxima de influxo de nutrientes, nas diferentes fases de desenvolvimento da planta pode levar a identificação das doses adequadas na fertirrigação por gotejo (AZAD et al., 2018).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Descrição e caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido de novembro de 2020 a setembro de 2021 na área agrícola da Estação Experimental de Cana-de-açúcar do Carpina – EECAC, campus avançado da Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE, localizada no município de Carpina, zona da mata Setentrional de Pernambuco (**Figura 1**). A área experimental está localizada no lote 6 da área agrícola da EECAC (7° 85' S; 35° 23' O; 180 m a.n.m). No experimento foi utilizado o quinto ciclo produtivo, ressoça, da variedade RB92579.

Figura 1 – Área experimental (vermelho) da EECAC-UFRPE, localizada no município de Carpina – PE, coordenadas 7° 85' S e 35° 23'O (<https://goo.gl/maps/4sE4egC1tXtxBNrF6>).



O solo da área experimental é classificado como Argissolo Amarelo distrófico (PAD) de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação do Solo – SiBCS (SANTOS et al., 2018). O relevo predominante é suave ondulado a ondulado, com inclinação aproximada de 2%. O clima dominante na região é do tipo As', tropical chuvoso com verão seco, de acordo com a classificação de Köppen. A precipitação média anual é 1.053 mm de acordo com os dados dos últimos 30 anos da estação meteorológica da EECAC/UFRPE.

3.2 Caracterização química e físico-hídrica do solo

A caracterização das propriedades químicas e físico-hídricas do solo da área experimental foi realizada anteriormente ao início do período experimental, utilizando amostras deformadas e indeformadas, coletadas no mês de junho de 2020. A caracterização dos parâmetros químicos e da granulometria foi realizada em amostragens deformadas nas camadas de 0 a 0,2 m, 0,2 a 0,4 m e 0,4 a 0,6 m coletando 15 amostras simples, em zigue-zague, utilizando trado holandês. As combinações das amostras simples de cada camada de solo formaram as amostras compostas (SANTOS et al., 2015). As amostras compostas foram secas ao ar livre e sombra até atingirem peso constante, determinado diariamente através balança analítica de mesa.

As amostras secas foram destorroadas à mão, e peneiradas em malha 2,0 mm (10 mesh) para a obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA). A caracterização granulométrica foi realizada por meio da dispersão das partículas minerais com solução de NaOH (1 mol L⁻¹) com homogeneização em agitador tipo Wagner. A fração areia total foi determinada por peneiramento com peneira de malha 0,053 (270 mesh) mm e com a peneira de malha 0,212 mm (70 mesh) foi separada a fração areia fina e grossa. A frações silte e argila foram determinadas pelo método do densímetro (TEIXEIRA et al., 2017). A partir da quantificação das frações granulométricas, foi determinada a classe textural de cada camada do solo com o uso do triangulo textural (SANTOS et al, 2015).

A caracterização química avaliou: pH em água (1:2,5) com potenciômetro de mesa; cálcio (Ca²⁺), magnésio (Mg²⁺) e alumínio (Al³⁺) trocáveis extraídos com KCl (1 mol L⁻¹) e o Ca²⁺ e Mg²⁺ determinados por absorção atômica, enquanto o Al³⁺ por titulação com NaOH (0,025 mol L⁻¹); O potássio (K⁺), sódio (Na⁺) trocáveis e fósforo disponível (P-disp) extraídos com solução extratora de Mehlich-1 e dosados por fotometria de chama e por espectrofotometria, respectivamente; O H+Al extraído com uso de acetato de cálcio (0,5 mol L⁻¹) e determinado por titulação com NaOH (0,025 mol L⁻¹) (TEIXEIRA et al., 2017). A partir desses resultados foram calculados a saturação por base (V%), CTC total (T) e a saturação por alumínio (m%). A amostras indeformadas foram utilizadas na determinação da densidade do solo (D_s), com o método do anel volumétrico e densidade de partículas (D_p) pelo método do balão volumétrico (**Tabela 1**).

Tabela 1. Caracterização química e física do solo da área experimental

Prof. (cm)	pH (água)	Al ³⁺ ----- cmol _c dm ⁻³ -----	H+Al cmol _c dm ⁻³	CTC ----- cmol _c dm ⁻³ -----	SB	V% ----- %-----	m% -----	P _{disp} mg dm ⁻³
0 – 20	5,5	0,1	4	7,28	3,28	45	2,96	9,0
20 – 40	5,4	0,8	6,6	8,16	1,56	19	33,90	5,0
40 – 60	5,5	0,1	6,2	8,5	2,30	27	4,17	10,0

Prof. (cm)	K ⁺ ----- cmol _c dm ⁻³ -----	Ca ²⁺ ----- cmol _c dm ⁻³ -----	Mg ²⁺ ----- cmol _c dm ⁻³ -----	M.O	Fe ----- mg dm ⁻³ -----	Cu ----- mg dm ⁻³ -----	Zn ----- mg dm ⁻³ -----	Mn ----- mg dm ⁻³ -----
0 – 20	0,08	0,02	2,84	1,72	126	0,25	7,7	9,64
20 – 40	0,03	0,02	1,49	1,69	196	0,33	3,63	2,15
40 – 60	0,04	0,02	2,07	1,71	148	0,21	6,6	4,00

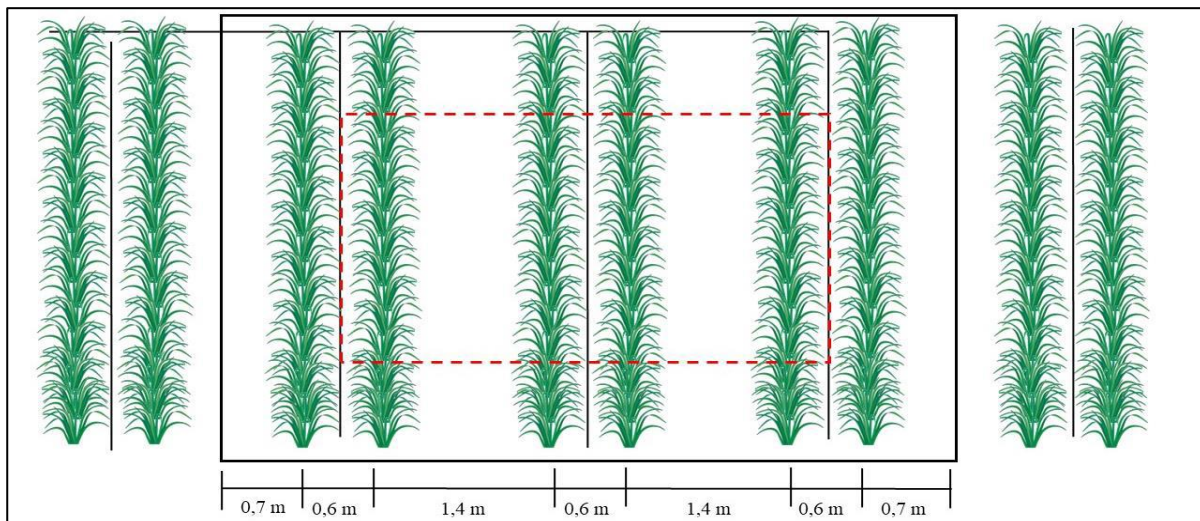
Prof. (cm)	Areia Total	Areia grossa	Areia fina g kg ⁻¹	Silte	Argila	Classe Textural	Ds kg m ⁻³	Dp kg m ⁻³
0 – 20	70,9	56,8	14,06	12,0	17,1	F.A.	1,36	2,63
20 – 40	71,0	56,9	14,06	9,9	19,1	F.A.	1,31	2,56

Obs: CTC – Capacidade de troca catiônica; V% – Saturação por bases; m% – Saturação por alumínio; M.O.= Matéria orgânica do solo; Ds= Densidade do solo; Dp= Densidade de partículas; F.A. – Franca arenosa;

3.3 Descrição pesquisa

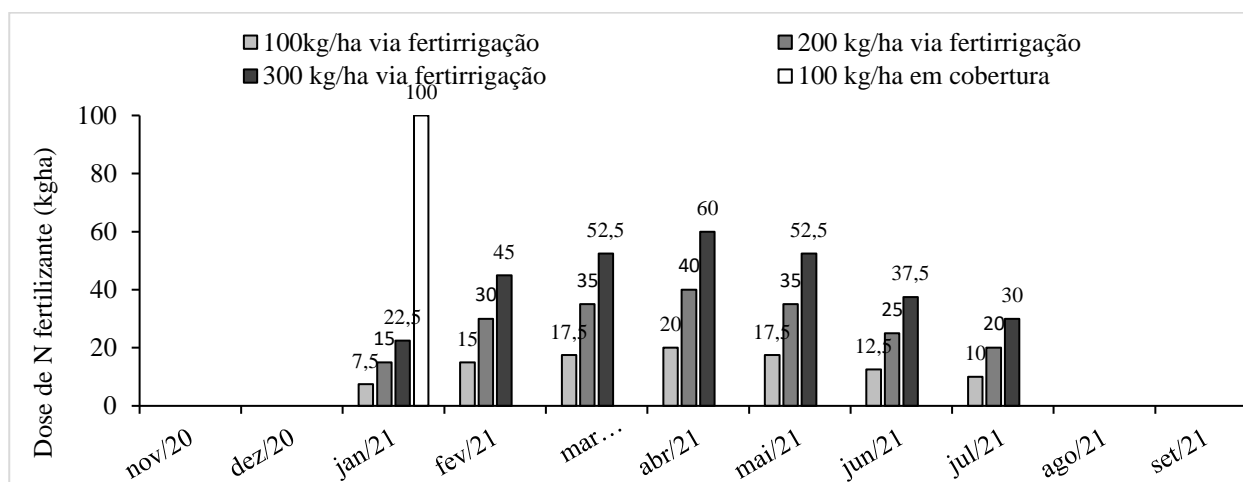
A parcela experimental foi formada por 3 linhas duplas, em espaçamento combinado de 1,4 m entre linhas duplas e 0,6 m entre linha simples (1,4 m x 0,6 m) e 10 m de comprimento totalizando 60,0 m². A área útil foi formada por duas linhas simples centrais e uma linha simples em cada extremidade, destacando 1,0 m de linha em cada extremidade da parcela resultando em uma área total de 32,0 m² (**Figura 2**). Em toda área do experimento foi realizado uniformemente a aplicação de 1,5 t ha⁻¹ de calcário dolomítico (PRNT de 71%) em superfície após a colheita do ciclo anterior. A aplicação da solução fertilizante via sistema de fertirrigação foi iniciada aos 69 DAC, devido a atrasos no sistema de injeção de fertilizantes. Através do sistema de fertirrigação foram aplicados em toda a área experimental 45,0 e 324 kg ha⁻¹ de P₂O₅, seguindo as exigências obtidas por Oliveira et al. (2010a), além de 5.000, 900, 180, 1.000 e 180 g ha⁻¹ de Mn, Zn, Cu, B e Mo respectivamente.

Figura 2 – Parcela experimental, com detalhamento para tubos gotejadores entre linhas de cultivo e área útil (vermelho).



Os tratamentos foram formados pelos níveis 0, 50, 100 e 150% da adubação nitrogenada requerida para a produtividade potencial de 200 toneladas de colmos por hectare, seguindo uma exigência de $1,02 \text{ kg ton}^{-1}$ (OLIVEIRA et al., 2010a). As doses aplicadas foram de 0, 100, 200 e 300 kg ha^{-1} de N utilizando como fertilizante nitrogenado a ureia (**Figura 3**). Foi utilizado um tratamento com a aplicação convencional (sólido) aplicado via superfície do solo utilizando como fonte o sulfato de amônio, em que a distribuição da fertirrigação foi realizada de acordo Wanderley (2018). O delineamento experimental utilizado na pesquisa foi blocos casualizados com quatro repetições.

Figura 3 – Distribuição mensal de N nos tratamentos via fertirrigação ($100, 200, 300 \text{ kg ha}^{-1}$), e na aplicação em cobertura (100 kg ha^{-1}).



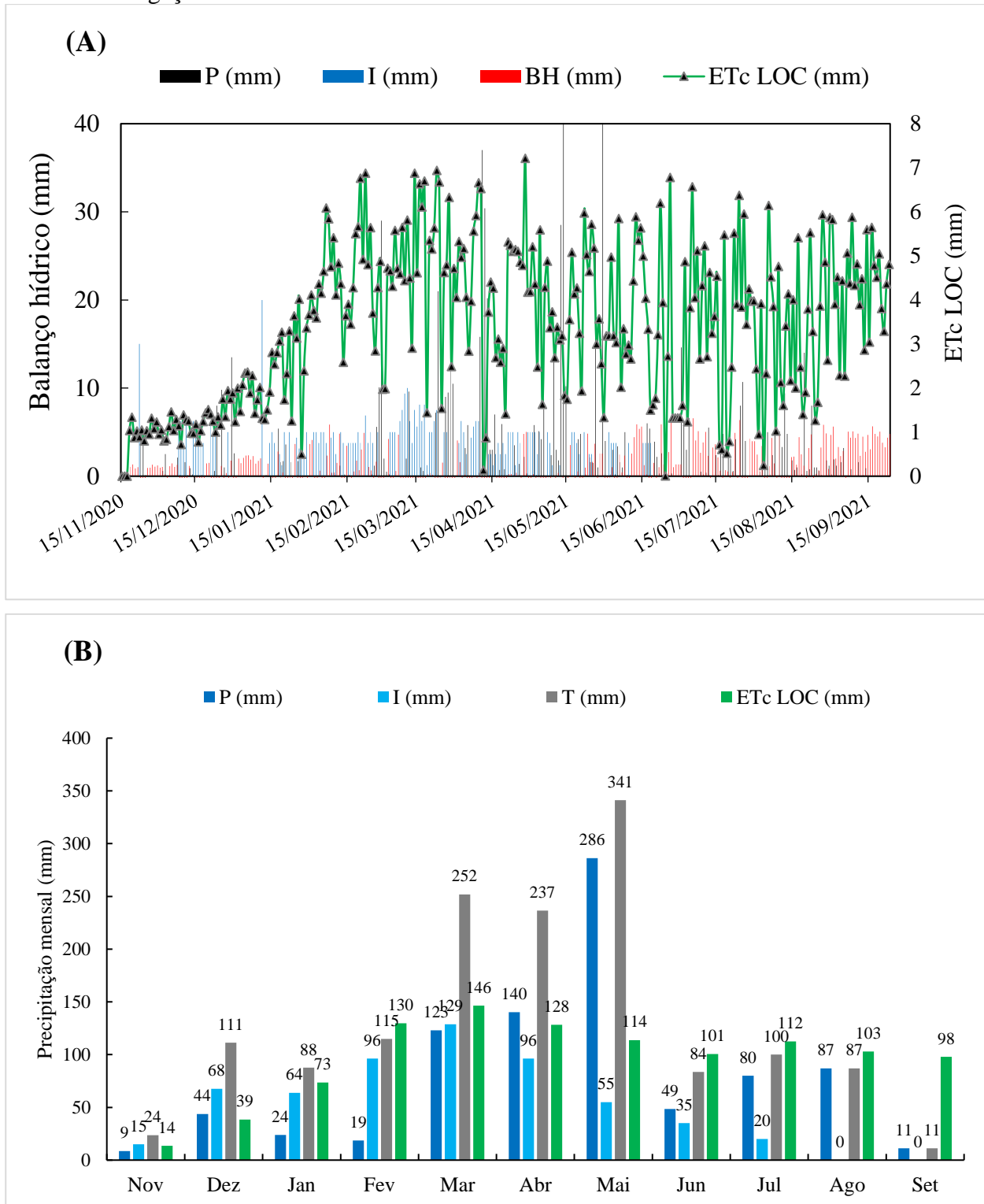
3.4 Descrição sistema de fertirrigação

O experimento foi realizado em condições de irrigação plena por gotejo subsuperficial utilizando tubos gotejadores DRIPNET PC AS 16150, fabricante Netafim, instalados a 0,2 m de profundidade, constando de um tubo gotejador por linha dupla, com espaçamento entre emissores de 0,4 m, vazão nominal de 1,0 L h⁻¹, totalizando uma taxa de precipitação de 1,25 mm h⁻¹ e pressão de serviço de 0,5 a 2,5 BAR.

O manejo da irrigação foi realizado com reposições da demanda hídrica diária determinada a partir da evapotranspiração da cultura (ET_c) estimada pela evapotranspiração de referência (ET_o) determinada diariamente utilizando-se a metodologia do tanque classe A, e coeficiente da cultura (K_c), utilizando o K_c da variedade RB92579 com valores de 0,65; 0,85; 1,10 e 0,85 na fase I, II, III e IV respectivamente (SILVA et al., 2012). A partir da ET_c foi determinada a lâmina líquida excluindo a precipitação do dia anterior avaliada em pluviômetro e adotando uma eficiência de aplicação de 0,9% em decorrência do uso da irrigação por gotejo (SILVA et al., 2015). Os parâmetros climáticos (evaporação, temperatura, velocidade do vento, umidade relativa do ar e precipitação) foram determinados na estação meteorológica da EECAC/UFRPE localizada a cerca de 1,0 km da área experimental. O balanço hídrico sequencial foi realizado a partir da metodologia de Thornthwaite e Mather (1955).

A irrigação após a colheita foi realizada através de sistema de aspersão, haja visto que o sistema de irrigação por gotejo subsuperficial no primeiro mês de cultivo passou por manutenção para reparos dos danos causados durante a colheita. Dessa forma, um dia após o término do carregamento da cana cortada, foi aplicado uma lâmina de 15 mm para o estímulo a rebrota da socaria. A irrigação através do sistema de gotejo subsuperficial foi iniciada no dia 08 de dezembro de 2021, aos 21 DAC. O sistema de injeção de fertilizantes iniciou no dia 26 de janeiro, aos 60 DAC (**Figura 4**).

Figura 4 – Balanço hídrico diário (A) e acúmulos mensais durante o experimento de campo (B). **Obs:** Acumulado total aos 308 DAC = 1448mm. P= Precipitação pluvial; I = Irrigação; BH=Balanço hídrico; T= Lâmina total (P+I); ETc LOC = Evapotranspiração da cultura em sistema de irrigação localizada.



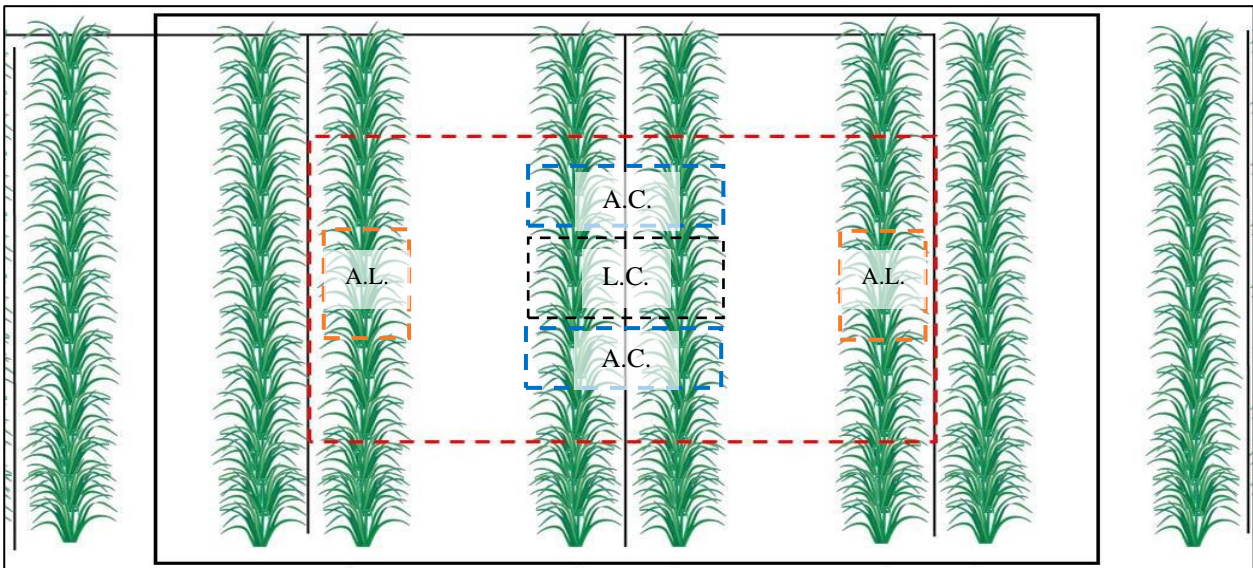
As soluções fertilizantes foram produzidas e armazenadas individualmente em caixas d'água de polietileno de 150,0 L. A injeção da solução fertilizante foi realizada por dosador hidráulico com taxa de injeção de 10%. O tempo de funcionamento do sistema de fertirrigação foi dividido em três etapas. Na primeira foi realizada apenas a irrigação para a pressurização do sistema. Em seguida foi iniciada a injeção de fertilizante, e ao final foi realizada apenas a irrigação para limpeza do sistema. Ao longo do experimento foram realizadas avaliações da uniformidade de pressurização e vazão, além de limpezas do sistema com a abertura dos finais de linhas.

3.5 Análises isotópicas

Em cada parcela experimental foi instalada uma microparcela na linha central (L.C.) com 1,0 m de comprimento e 0,6 m de largura na qual foi aplicada ureia enriquecida a 2% de átomos do isótopo ^{15}N (**Figura 5**). Na microparcela da L.C. foi aplicado o equivalente a dose mensal que correspondeu a 17,7; 35,0; e 52,5 kg ha⁻¹ de N, respectivamente dos tratamentos 100, 200 e 300 kg ha⁻¹ de N.

O fertilizante enriquecido foi diluído e aplicado na microparcela da L.C. Para incorporação da solução nitrogenada no solo foi aplicada água em superfície equivalente a lâmina diária aplicada nos demais linhas de cultivo. O procedimento foi realizado semanalmente, totalizando 4 vezes no decorrer do mês. Após a última aplicação, foram realizadas coletas de 10 folhas diagnóstico (F+1) dentro da L.C, e mais 10 folhas diagnóstico a 50 cm na adjacente Central (A.C.) e, mais 10 folhas diagnóstico na linha adjacente lateral (A.L.) a esquerda e direita da linha central (**Figura 5**).

Figura 5 – Detalhamento da microparcela em que foi aplicado fertilizante enriquecido e linhas adjacentes.



A partir da determinação de abundância isotópica ($\delta^{15}\text{N}$) das amostras de tecido vegetal e da solução do solo foram determinados o N derivado do fertilizante (NDDF) e a eficiência de utilização de N do fertilizante usando as expressões abaixo (VIEIRA-MEGDA et al., 2015):

$$Ndf (\%) = \left(\frac{a - b}{c - b} \right) \times 100$$

$$NDDF_{LC} (kg \text{ ha}^{-1} \text{ de N}) = 2 \times \left(\frac{Ndf_{LC}(\%)}{100} \right) \times N(\text{total})$$

$$NDDF_{AC} (kg \text{ ha}^{-1} \text{ de N}) = 2 \times \left(\frac{Ndf_{AC}(\%)}{100} \right) \times N(\text{total})$$

$$NDDF_{AL} (kg \text{ ha}^{-1} \text{ de N}) = 2 \times \left(\frac{Ndf_{AL}(\%)}{100} \right) \times N(\text{total})$$

$$NDDF_{TOTAL} (kg \text{ ha}^{-1} \text{ de N}) = Ndf_{LC} + Ndf_{AC} + Ndf_{AL}$$

$$\text{Recuperação} (\%) = \left(\frac{Ndf_{TOTAL}}{\text{dose de N aplicada}} \right) \times 100$$

Em que a =abundância de átomos de ^{15}N na amostra; b = abundância natural de átomos de ^{15}N (0,366%); c = Abundância de átomos de ^{15}N no fertilizante enriquecido; $\%Ndf$ = N na planta derivado do fertilizante; LC= Linha central; AC = Adjacente lateral; AL = Adjacente lateral; NDDF = N acumulado derivado do fertilizante; e EUNF = eficiência de utilização de N do fertilizante.

3.6 Produção de biomassa vegetal

A coleta da biomassa foi realizada através de amostragens destrutivas aos 98, 141, 204, 272 e 308 DAC (**Figura 6**). Em cada coleta foi amostrada toda a biomassa vegetal da parte aérea em um metro na área útil. Em seguida o material vegetal foi separado nos compartimentos vegetais colmo, folha seca, folha verde e ponteiro. O componente folha seca correspondia as folhas em total processo de senescência, tanto aquelas ainda na planta como aquelas que já foram destacadas. O ponteiro correspondia a região do cartucho e pseudocaule delimitado a partir do ponto de quebra do colmo. Todas as folhas a partir da folha diagnóstica +1 era considerada como folha verde até atingir as folhas secas (MARAFON, 2012).

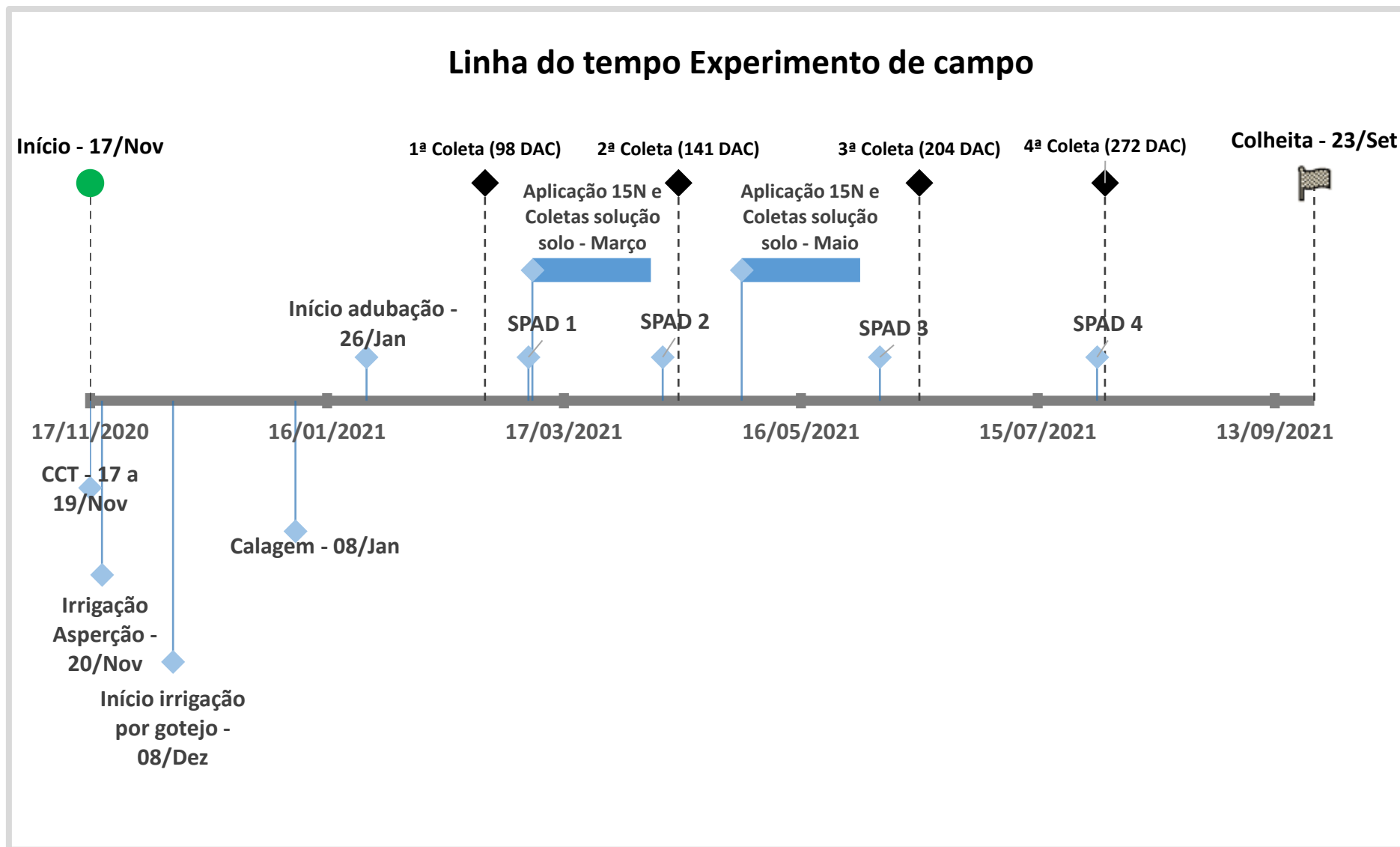
A determinação da produção de biomassa úmida de cada compartimento das parcelas experimentais foi realizada ainda em campo com auxílio de balança eletrônica digital com capacidade para 40,0 kg e precisão de 0,1 g. No laboratório de fertilidade do solo da EECAC, as amostras de cada compartimento foram trituradas em farrageira agrícola para a homogeneização do material. Em seguida, subamostras úmidas foram retiradas e acondicionadas em sacos de papel, ou no caso do colmo em recipientes metálicos devido a umidade do material.

As subamostras foram pesadas (peso úmido) em balança analítica com capacidade de 3000,0 g e precisão de 0,01 g, e colocadas em estufas de circulação forçada de ar em temperatura constante de 65° C até o material atingir o peso constante, avaliado com a pesagem diária de uma mesma amostra de cada compartimento. A partir da diferença de massa das subamostras úmidas e subamostras secas foi obtida a umidade na base de massa, o que possibilitou a estimativa do percentual de massa seca das amostras e a massa seca acumulada. O material seco foi posteriormente processado em moinho de facas e direcionado para análise nutricional.

3.7 Avaliações biométricas

As avaliações biométricas foram realizadas aos 100, 149, 210, 257 e 308 DAC através da avaliação de todas as plantas identificadas na linha central das parcelas experimentais. Foi determinado o número de perfilhos industrializáveis por m linear (NPI m^{-1}); o diâmetro médio do colmo (DMC), em cm; e a estatura média dos colmos (EMC), em cm, de acordo com a metodologia de Marafon (2012). O NPI foi obtido pela contagem manual de todos os colmos. O DMC foi determinado na base de todos os colmos utilizando paquímetro analógico. Já a EMC foi avaliada na distância entre o colo da planta e a inserção da folha +1 com a utilização de trena metálica.

Figura 6 – Sequência cronológica de avaliações no experimento de campo.



3.8 Teor de N no tecido vegetal e acúmulo N

As subamostras secas foram processadas em moinho de facas, tipo Willey, com peneira de 2 mm. Para a análise de N foi utilizada a digestão com ácido sulfúrico (H_2SO_4), adicionando peróxido de hidrogênio (H_2O_2) como catalizador para a extração do nutriente, segundo a metodologia descrita por Neto e Barreto (2011). A determinação do teor de N no tecido vegetal foi realizada por destilação utilizando o método de Kjeldahl e com titulação utilizando ácido clorídrico (NETO; BARRETO, 2011).

3.9 Avaliação do Índice SPAD

A determinação do teor de clorofila no limbo foliar foi realizada indiretamente através do Índice SPAD utilizando determinador portátil de clorofila modelo SPAD-502 Plus, fabricante Konica Minolta Optics, Japão. O índice SPAD foi determinado aos 111, 145, 195 e 255 DAC realizando 3 leituras na folha diagnóstica +1 de três plantas da linha central em cada parcela experimental.

3.10 Colheita e rendimento agroindustrial

A produtividade agrícola, em toneladas de colmo por hectare (TCH), foi realizada no dia 23 de setembro de 2021, aos 308 DAC, através da determinação do peso de biomassa fresca de colmos da área útil de cada parcela experimental com a utilização de dinamômetro analógico ao final do ciclo. Na colheita foram determinados o percentual de falhas nas linhas de plantio para a correção da estimativa de produtividade. O TCH de cada tratamento foi obtido pela extrapolação para um hectare a partir da produção obtida em cada parcela experimental.

A avaliação dos parâmetros industriais foi realizada através da amostragem aleatória de dez colmos para a formação de feixes que foram encaminhados para a determinação das características industriais e atributos tecnológicos: Sólidos solúveis totais (°BRIX), Açúcar polarizável da cana (PC), Açúcar polarizável (Pol), e Açúcares Totais Recuperáveis (ATR). A partir do produto do ATR com a produtividade de colmos foi calculado a produtividade de açúcar por hectare (TAH).

3.11 Processamento de dados e análises estatísticas

Foram realizados testes de normalidade e homocedase para verificar se os dados atendiam aos pressupostos da análise de variância e quando necessário realizadas as transformações. Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância, utilizando o PROC MIXED do SAS OnDemand. Onde, para abundância de N, nitrogênio derivado do fertilizante (NDDF) e na solução do solo (NSSDF), recuperação do N-Fertilizante e teor de N na solução

do solo, os efeitos fixos incluíram doses, períodos de aplicação de N, profundidade e suas interações.

Os tratamentos foram inicialmente comparadas a partir do desdobramento da soma dos quadrados dos contrastes ortogonais ($p < 0,05$) realizando os seguintes contrastes: *sem adubação* (0 kg ha⁻¹ de N) x *com adubação* (100, 200 e 300 kg ha⁻¹ de N via fertirrigação e 100 kg ha⁻¹ de N em cobertura); *sem adubação* (0 kg ha⁻¹ de N) x *Adubação convencional* (100 kg ha⁻¹ de N em cobertura); e *Adubação convencional* (100 kg ha⁻¹ de N em cobertura) x *Fertirrigação* (100, 200 e 300 kg ha⁻¹ de N via fertirrigação).

Para teor de N e índice SPAD foram considerados como efeitos fixos as doses e épocas de avaliação (dias após a colheita). Os blocos foram considerados como efeitos aleatórios. As médias foram comparadas utilizando o procedimento PDIFF ajustado pelo teste de Tukey. Para todas as variáveis, as diferenças foram consideradas significativas quando $P \leq 0,05$.

A partir do teor de N e a biomassa seca (Mg ha⁻¹) foi determinado o acúmulo de N em cada compartimento, em kg ha⁻¹. O acúmulo total de N em cada coleta foi determinado pela soma do acúmulo de N nos compartimentos vegetais. O acúmulo de biomassa seca e de N ao longo ciclo foi estimado usando a função Gaussiana, conforme abaixo:

$$Y = a^* \times \exp \left\{ -0,5 \times \left[\left[\frac{DAC - x0}{b} \right]^2 \right] \right\}$$

Onde: Y é o acúmulo de N estimado, em kg ha⁻¹, a partir dos parâmetros da função; DAC representa dias após a colheita; a é o maior valor de Y , maior acúmulo de N estimado, usando esse modelo matemático; b é o parâmetro de ajustamento do modelo Gaussiano; e $x0$ é o dia em que ocorre a maior taxa de acúmulo de N.

4 RESULTADOS

4.1 Análises de contrastes

A análise de contraste dos parâmetros biométricos e produção de biomassa nos componentes vegetais apresentou diferenças estatisticamente significativas entre os diferentes grupos de tratamentos, com exceção do *sem adubação* x *adubação convencional*. No perfilhamento foi observado que no contraste *sem adubação* x *com adubação*, não foram observadas diferenças significativas, exceto aos 257 DAC (**Figura 7**). Para o contraste *adubação convencional* x *fertirrigação*, os maiores resultados foram obtidos para o manejo sob fertirrigação nas avaliações aos 100, 210 e 257 DAC com médias de 24,0; 15,9; e 14,9 colmos m⁻¹, respectivamente.

Para análise de contraste do diâmetro de colmos, observou-se diferença significativa apenas aos 149 DAC na avaliação *sem adubação* x *com adubação* (**Figura 8**). Nas demais análises, *sem adubação* x *adubação convencional* e *adubação convencional* x *fertirrigação*, não foram observadas diferenças significativas.

A estatura média do colmo na avaliação *sem adubação* x *com adubação*, apresentou diferenças significativas em todas as épocas avaliadas, com exceção da avaliação aos 100 DAC (**Figura 9**). No entanto, na análise entre *adubação convencional* x *fertirrigação*, a adubação via fertirrigação apresentou maiores médias com diferenças significativas em todas as avaliações.

Para a produção de biomassa total, no contraste *sem adubação* x *com adubação*, observou-se maiores resultados *com adubação* aos 272 DAC (**Figura 10**). Por outro lado, o tratamento *fertirrigação* apresentou maiores média, com diferenças significativas em todas as avaliações, exceto aos 141DAC.

Para a produção de biomassa de colmos o tratamento *com adubação* apresentou maiores resultados em relação ao *sem adubação* aos 272 e 308 DAC (**Figura 11**). Já na avaliação *adubação convencional* x *fertirrigação*, o tratamento *fertirrigação* apresentou maiores resultados, com diferenças significativas em todas as coletas, com exceção da coleta aos 204 DAC.

Para biomassa de folhas secas, no contraste *sem adubação* x *com adubação*, foram observados maiores médias para *sem adubação* aos 98 DAC (**Figura 12**). Nas avaliações seguintes, o tratamento *com adubação* possibilitou maiores resultados, com diferenças significativas apenas aos 272 DAC. Por outro lado, na avaliação *adubação convencional* x *fertirrigação* só foram observadas diferenças significativas na última avaliação aos 272 DAC.

Para biomassa de folhas verdes, o tratamento *com adubação* apresentou maiores médias em relação ao *sem adubação*, exceto na última avaliação, com diferenças significativas apenas aos 204 DAC (**Figura 13**). No entanto, na análise entre *adubação convencional* x *fertirrigação* foram observadas diferenças significativas os 98 e 204 DAC, e em todas as épocas avaliadas foram observados maiores médias no tratamento *fertirrigação*.

Na avaliação da produção do compartimento ponteiro, a análise de contraste entre *sem adubação* x *com adubação* foram observados maiores resultados no tratamento *com adubação*, mas sem diferenças significativas (**Figura 14**). Já na avaliação entre *adubação convencional* x *fertirrigação* foram obtidas maiores médias no tratamento *fertirrigação*. No entanto, só foi observado diferenças significativas aos 98 DAC.

Para os parâmetros agroindustriais, no contraste *sem adubação* x *com adubação*, o tratamento *com adubação* foi estatisticamente superior no TCH e no TAH (**Figura 15 e 18**). Por outro lado, nas avaliações *sem adubação* x *adubação convencional* e *adubação convencional* x *fertirrigação* foram obtidas diferenças significativas nas variáveis agroindustriais (**Figura 16 e 17**).

Figura 7 – Análises de contrastes ortogonal para perfilamento em função das doses de N aplicadas via fertirrigação por gotejo subsuperficial (0, 100, 200, 300 kg ha⁻¹ de N) e adubação em cobertura (100 kg ha⁻¹).

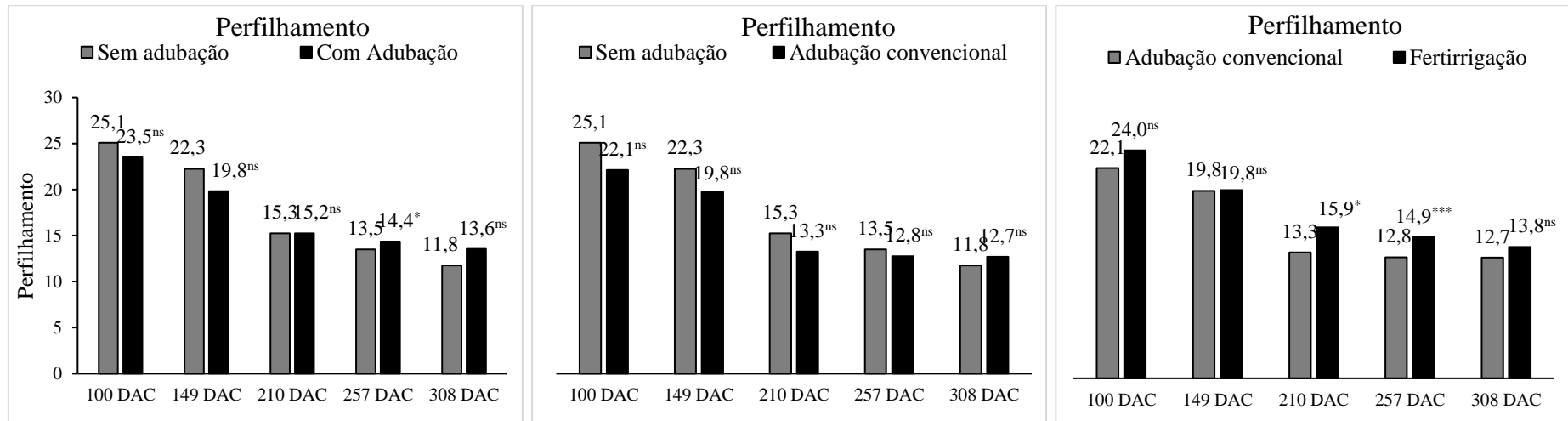


Figura 8 – Análises de contrastes ortogonal para diâmetro de colmos em função das doses de N aplicadas via fertirrigação por gotejo subsuperficial (0, 100, 200, 300 kg ha⁻¹ de N) e adubação em cobertura (100 kg ha⁻¹).

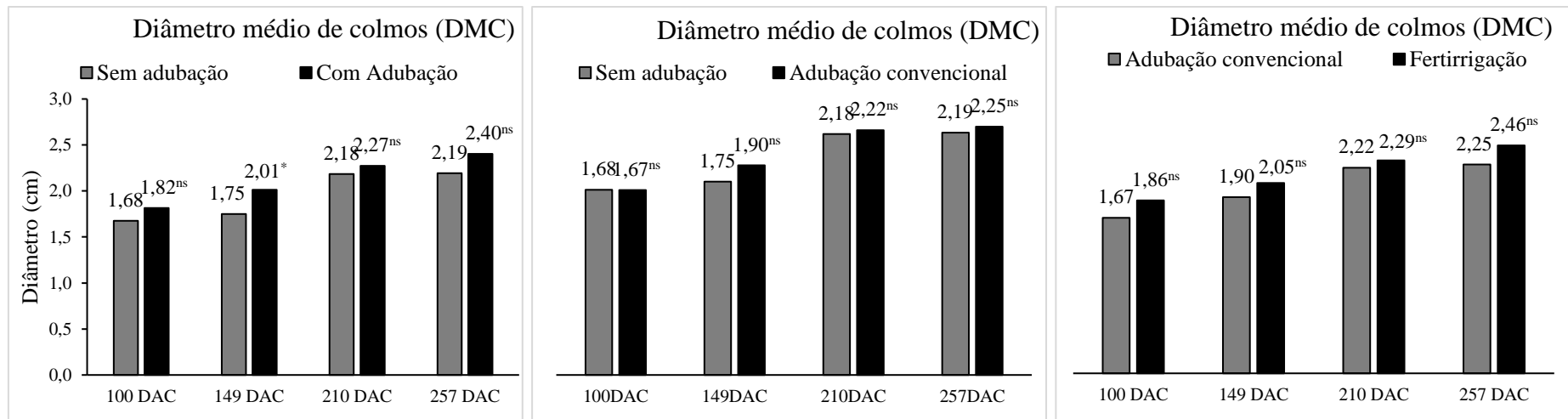


Figura 9 – Análises de contrastes ortogonal para estatura média de colmos (EMC) em função das doses de N aplicadas via fertirrigação por gotejo subsuperficial (0, 100, 200, 300 kg ha⁻¹ de N) e adubação em cobertura (100 kg ha⁻¹).

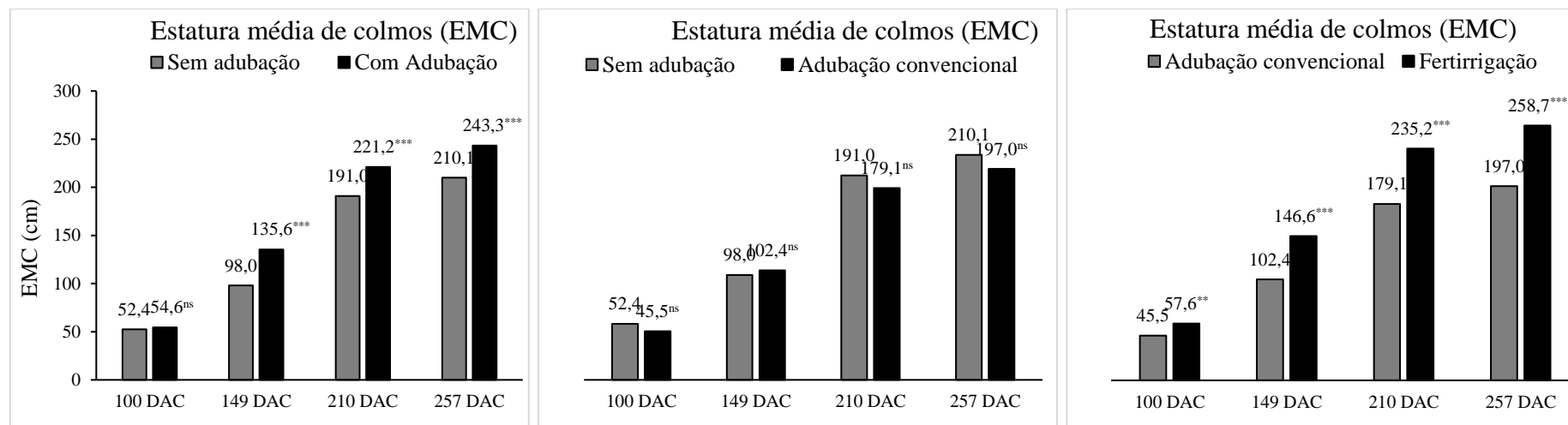


Figura 10 – Análises de contrastes ortogonal para produção de biomassa total em função das doses de N aplicadas via fertirrigação por gotejo subsuperficial (0, 100, 200, 300 kg ha⁻¹ de N) e adubação em cobertura (100 kg ha⁻¹).

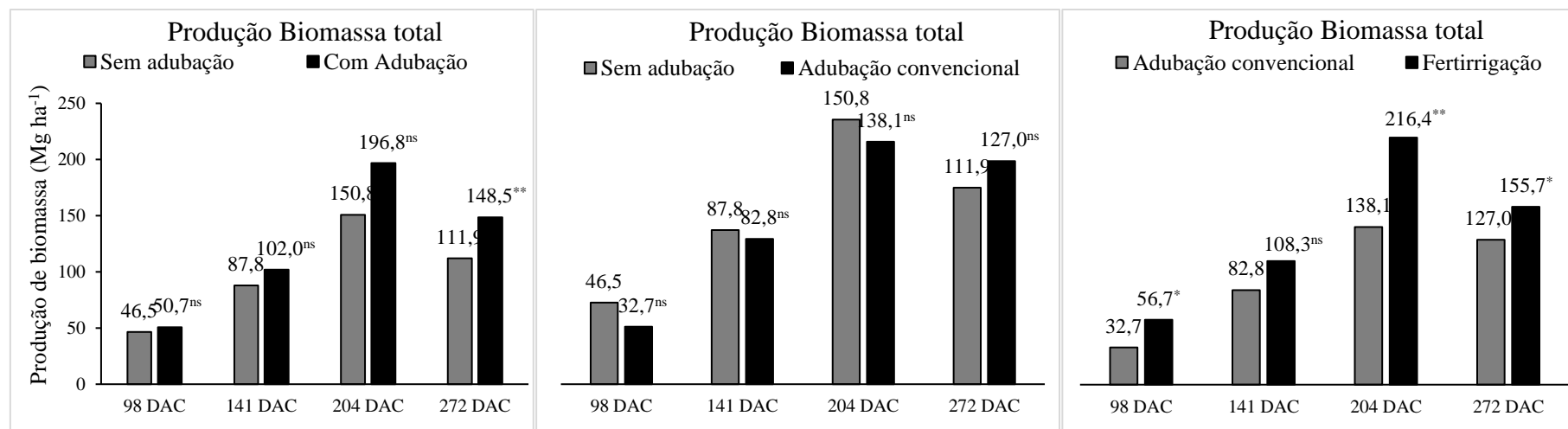


Figura 11 – Análises de contrastes ortogonal para produção de biomassa de colmos em função das doses de N aplicadas via fertirrigação por gotejo subsuperficial (0, 100, 200, 300 kg ha⁻¹ de N) e adubação em cobertura (100 kg ha⁻¹).

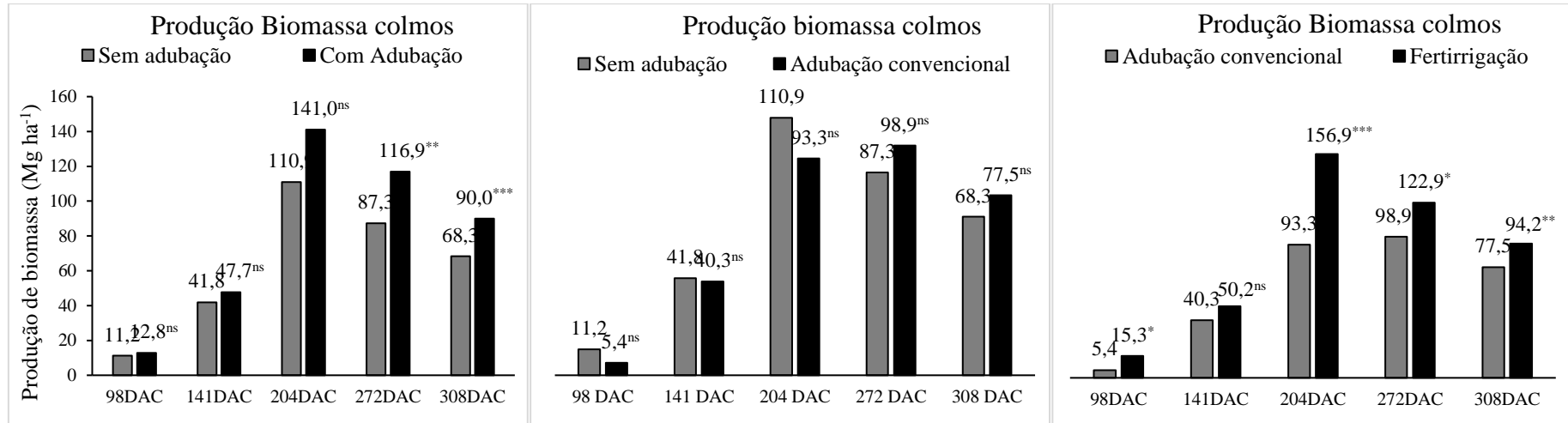


Figura 12 – Análises de contrastes ortogonal para produção de biomassa de folhas secas em função das doses de N aplicadas via fertirrigação por gotejo subsuperficial (0, 100, 200, 300 kg ha⁻¹ de N) e adubação em cobertura (100 kg ha⁻¹).

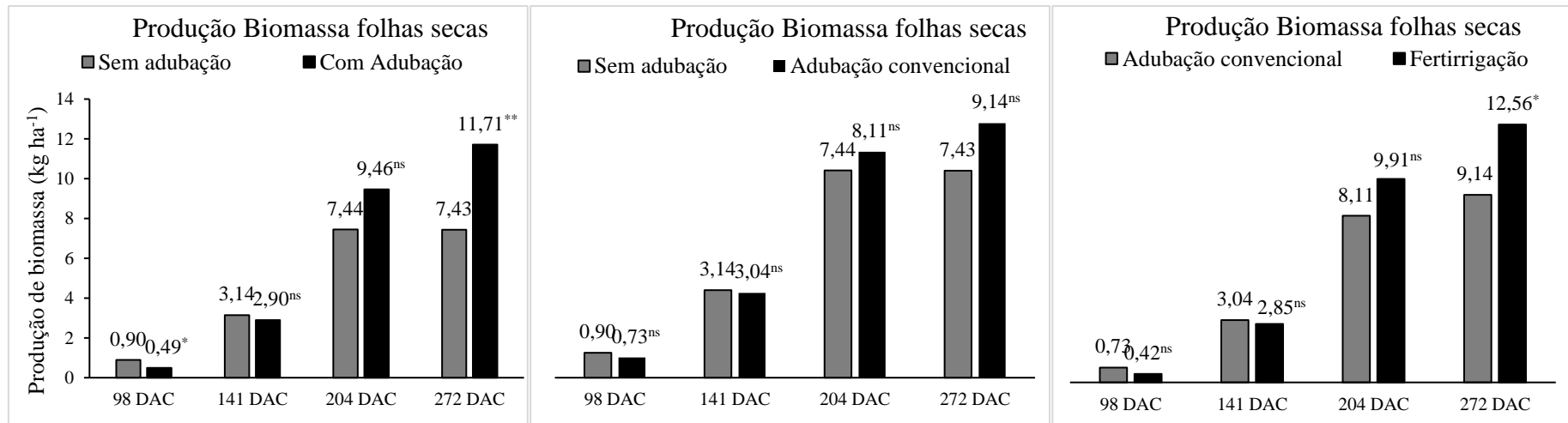


Figura 13 – Análises de contrastes ortogonal para produção de biomassa de folhas verdes em função das doses de N aplicadas via fertirrigação por gotejo subsuperficial (0, 100, 200, 300 kg ha⁻¹ de N) e adubação em cobertura (100 kg ha⁻¹).

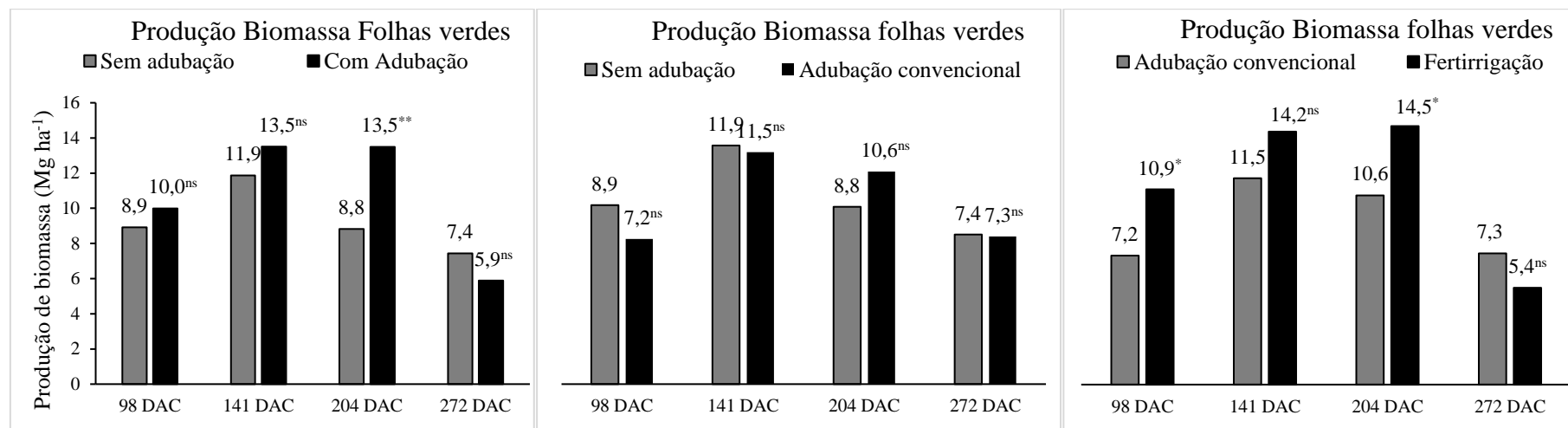


Figura 14 – Análises de contrastes ortogonal para produção de biomassa de ponteiro em função das doses de N aplicadas via fertirrigação por gotejo subsuperficial (0, 100, 200, 300 kg ha⁻¹ de N) e adubação em cobertura (100 kg ha⁻¹).

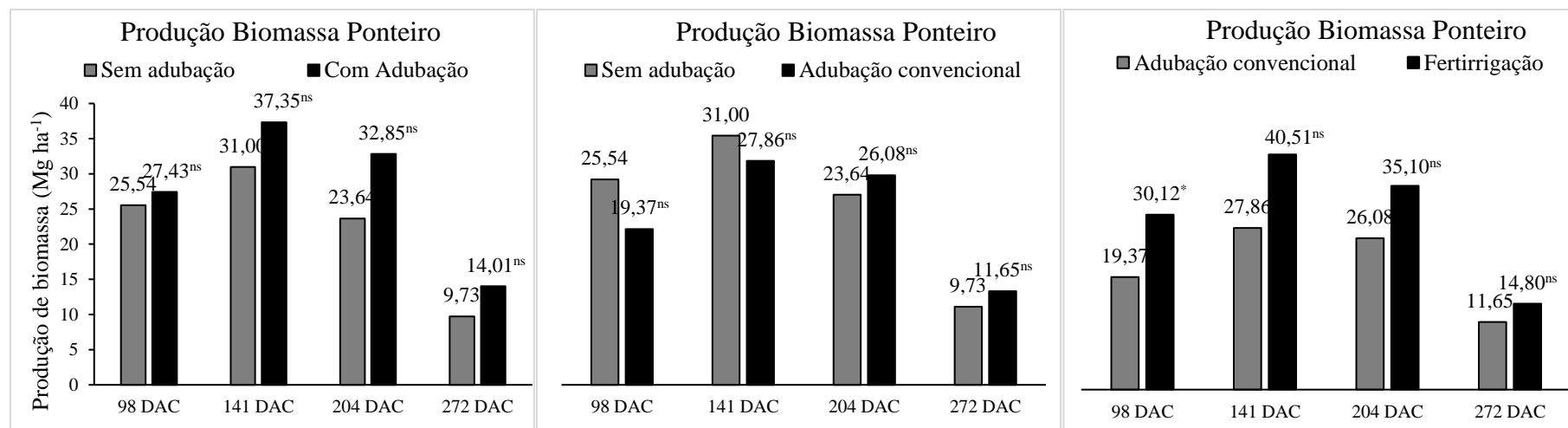


Figura 15 – Análises de contrastes ortogonal para produtividade em função das doses de N aplicadas via fertirrigação por gotejo subsuperficial (0, 100, 200, 300 kg ha⁻¹ de N) e adubação em cobertura (100 kg ha⁻¹).

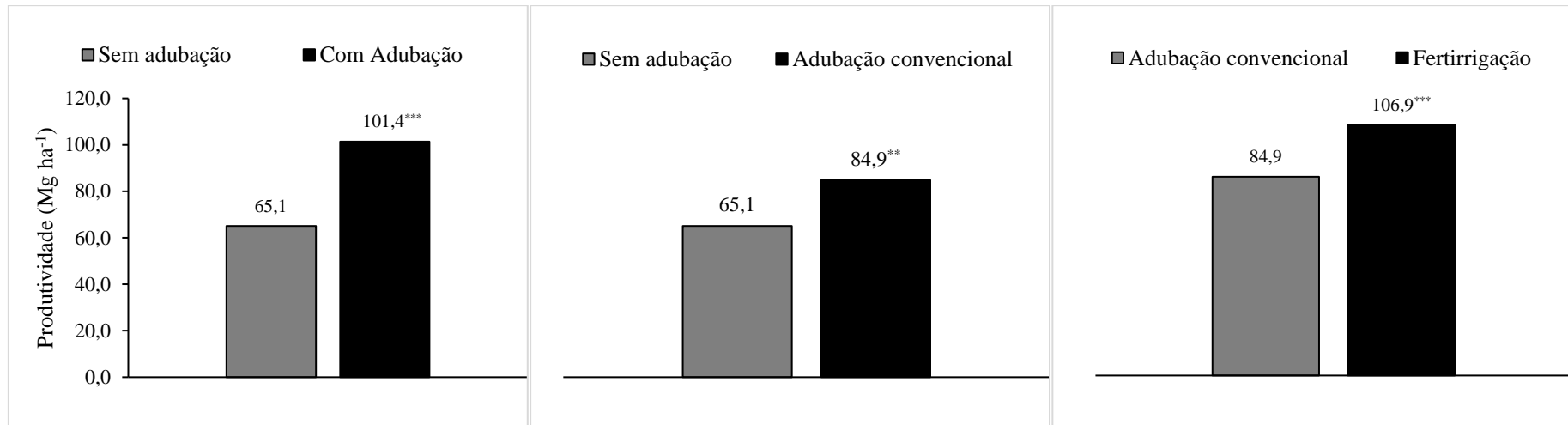


Figura 16 – Análises de contrastes ortogonal para ATR em função das doses de N aplicadas via fertirrigação por gotejo subsuperficial (0, 100, 200, 300 kg ha⁻¹ de N) e adubação em cobertura (100 kg ha⁻¹).

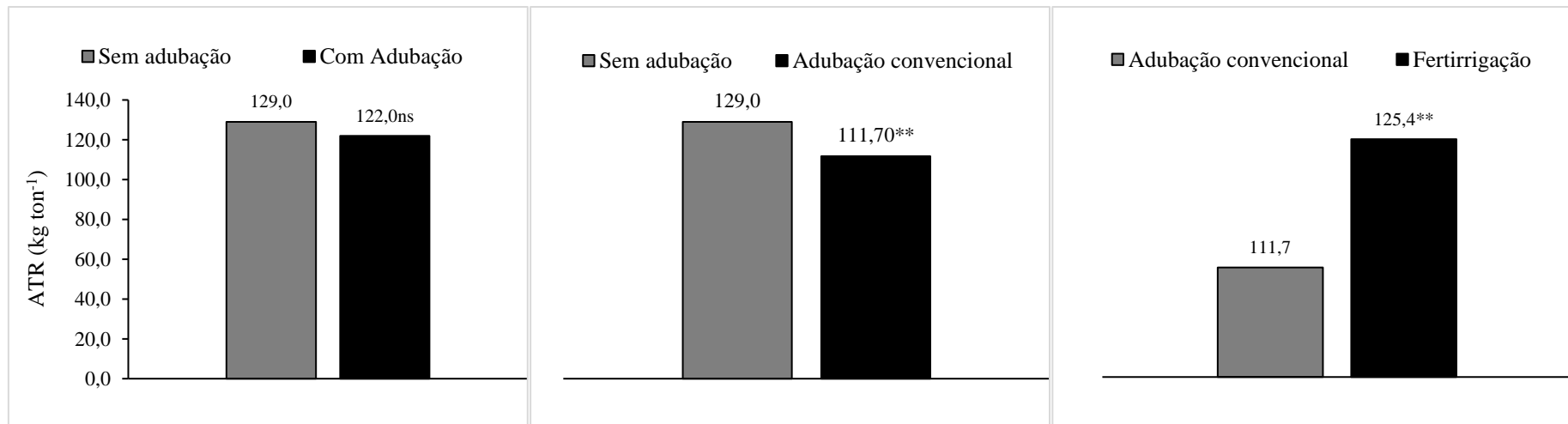


Figura 17 – Análises de contrastes ortogonal para PC em função das doses de N aplicadas via fertirrigação por gotejo subsuperficial (0, 100, 200, 300 kg ha⁻¹ de N) e adubação em cobertura (100 kg ha⁻¹).

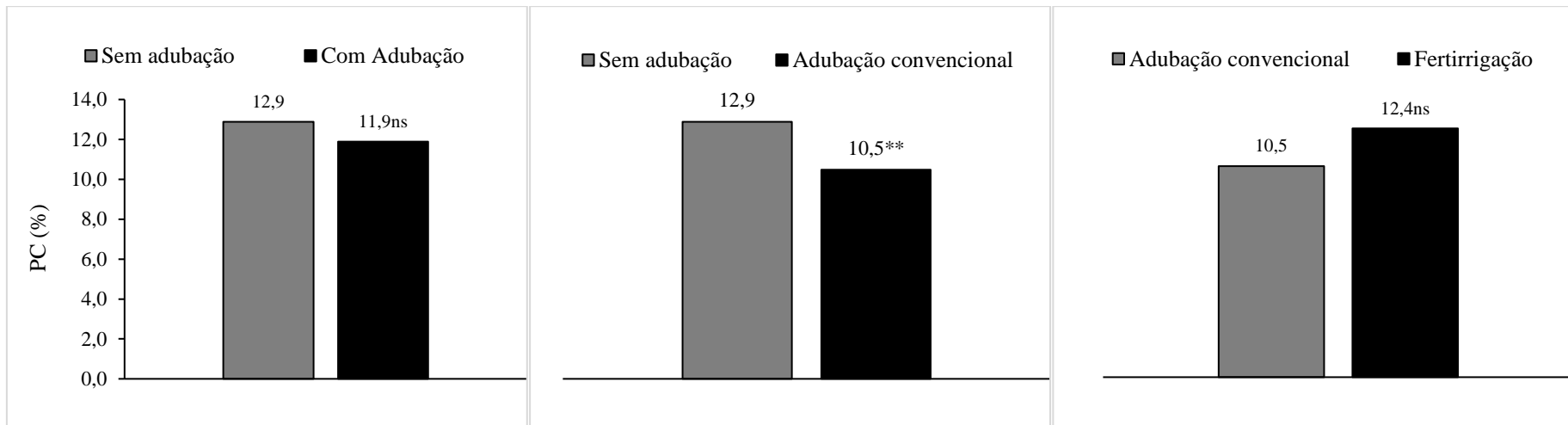
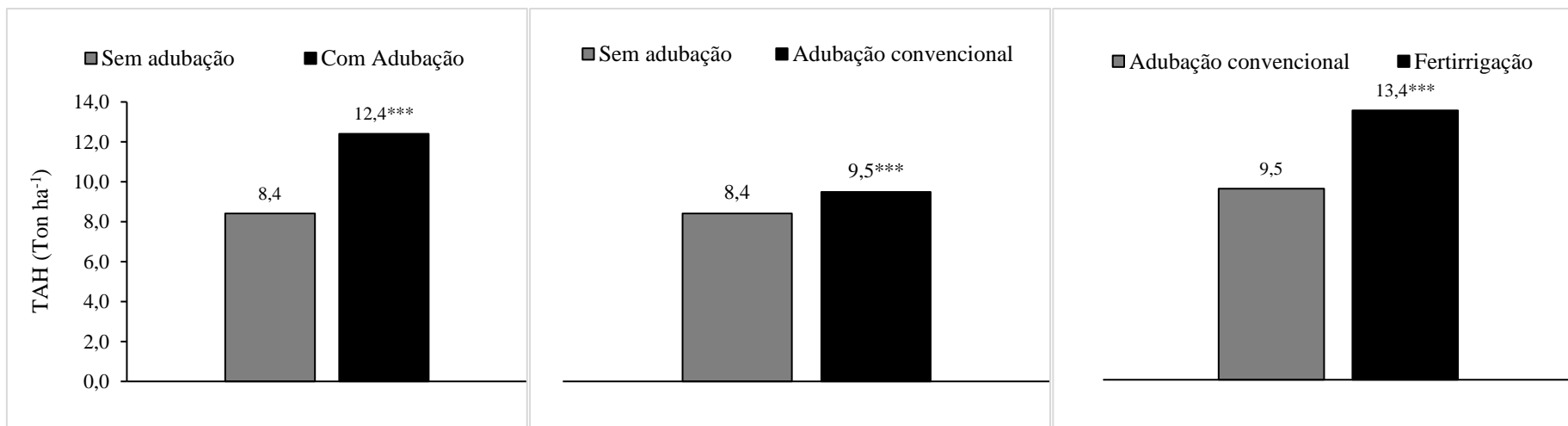


Figura 18 – Análises de contrastes ortogonal para produtividade de açúcar (TAH) em função das doses de N aplicadas via fertirrigação por gotejo subsuperficial (0, 100, 200, 300 kg ha⁻¹ de N) e adubação em cobertura (100 kg ha⁻¹).



4.2 Análise fatorial tratamento fertirrigados

4.2.1 Parâmetros biométricos

A análise de variância do fatorial (tempo x tratamento) para a variável perfilhamento permitiu observar diferenças significativas entre os períodos de coleta, sem diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos (**Figura 19A**). Aos 98 DAC observou-se maior perfilhamento médio (24 colmos m^{-1}). Na avaliação seguinte, aos 149 DAC foi observada uma queda de aproximadamente 15 % no perfilhamento. Nas últimas coletas (210 aos 308 DAC) foram observadas maiores reduções no perfilhamento e posterior estabilização em 14 NPI m^{-1} . Quanto a dispersão dos dados, observou elevada variabilidade ao longo das coletas, com valores de CV médio de 17,35 %, com exceção da avaliação realizada aos 257 DAC na qual é observado uma maior proximidade entre os valores máximos e mínimos.

De maneira semelhante ao observado no perfilhamento, o diâmetro médio de colmos apresentou diferenças estatísticas para épocas de coleta ($p \leq 0,05$). Foi observado aumento no diâmetro ao longo do ciclo, com valores médios de 1,79 cm aos 98 DAC, e os maiores resultados observados aos 272 DAC, com diâmetro médio de colmo de aproximadamente 2,36 cm (**Figura 19B**).

A estatura média de colmos (EMC) apresentou efeitos significativos ($p \leq 0,05$) isolados dos tratamentos e época de coleta (**Figura 20**). Observou-se menor diferença entre os tratamentos na primeira coleta realizada aos 100 DAC. Nas avaliações posteriores, foi observado que a fertirrigação proporcionou maiores ganhos em altura das plantas. A maior dose de N (300 kg ha^{-1}) proporcionou o maior resultado, com uma média de 180 cm, enquanto na avaliação por tempo, o maior resultado foi obtido aos 257 DAC com uma média de 258 cm.

Figura 19 – Efeito das doses de N via fertirrigação no perfilhamento, em número de perfilhos industrializáveis por metro (NPI m^{-1}), (A), e no diâmetro médio de colmos, em cm, (B).

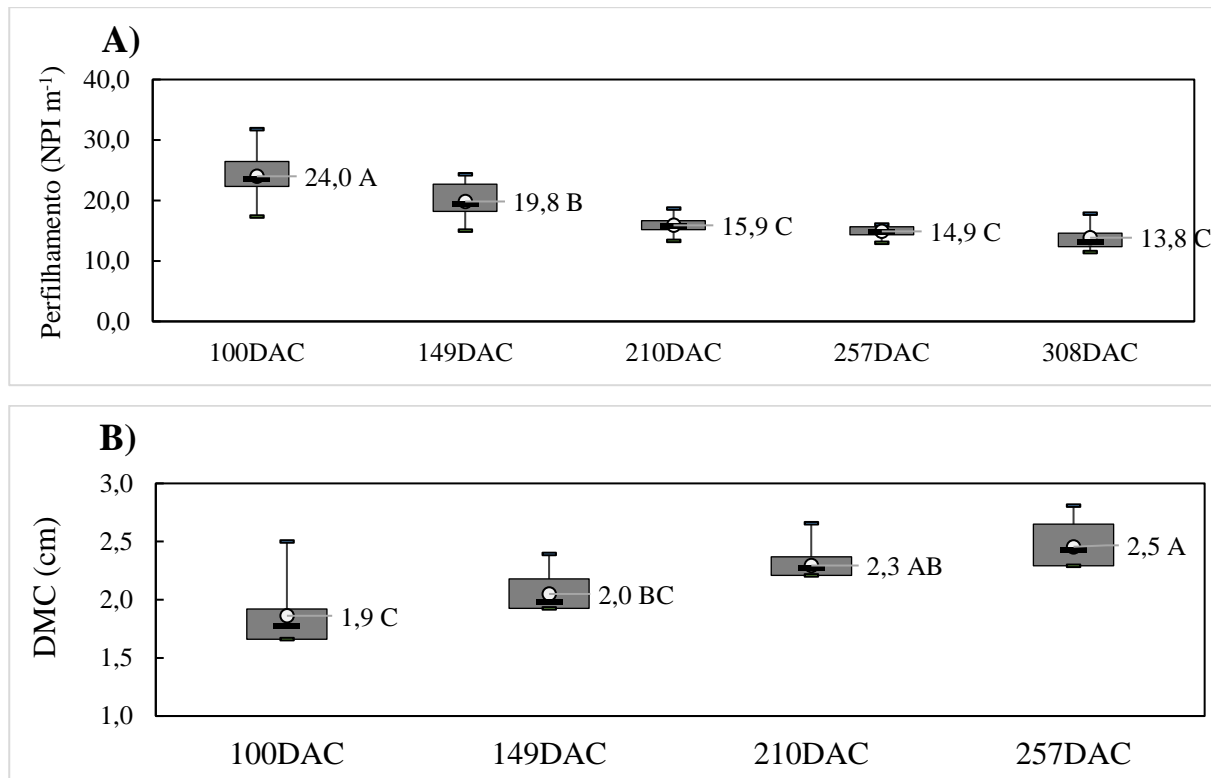
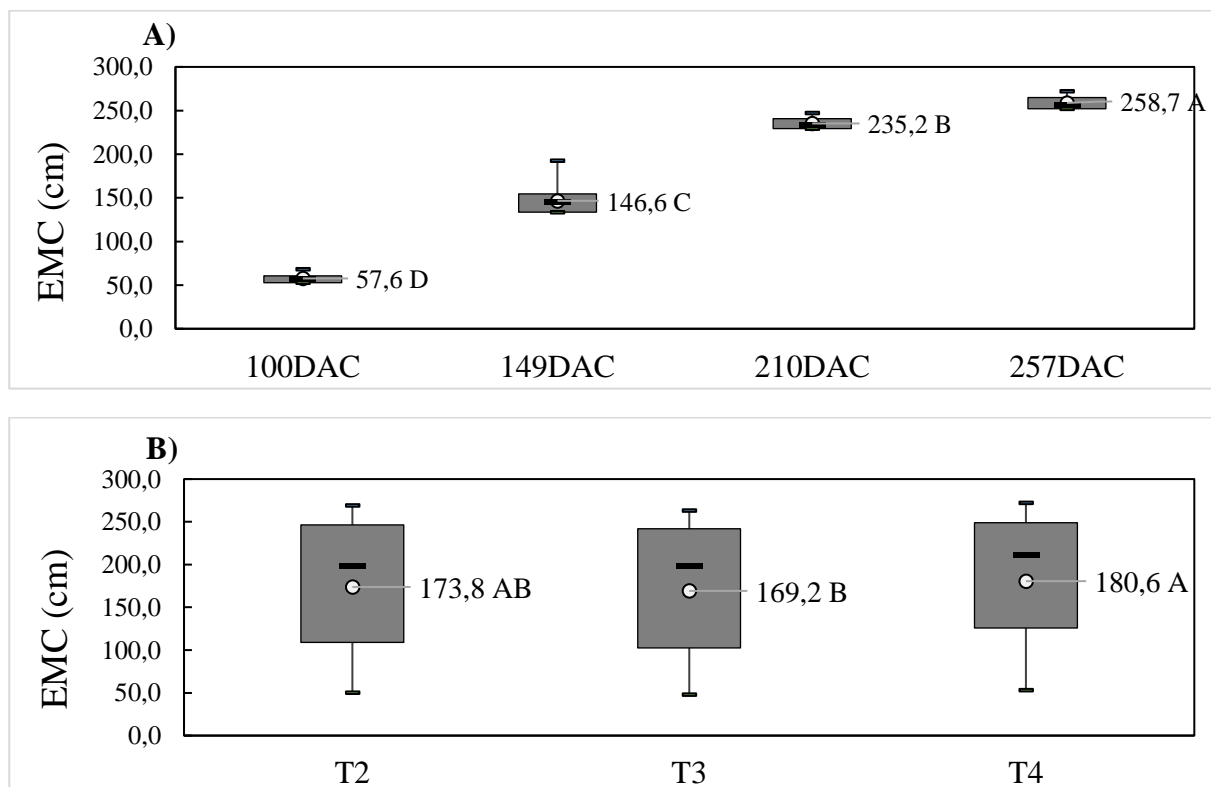


Figura 20 – Efeito das doses de N via fertirrigação na estatura média de colmos, em cm, em função do tempo (A) e da dose de N via fertirrigação (B).



4.2.2 Produção de biomassa

A produção de biomassa dos compartimentos apresentou efeito significativo isolado de tratamento e tempo, com exceção do componente ponteiro em que só foi observada diferença no tempo (Anexo A). O uso de 300 kg ha^{-1} apresentou o maior resultado de produção de biomassa fresca em todos os componentes, enquanto na avaliação dos tempos, maiores resultados foram observados aos 204 DAC, exceto para a produção de folhas secas em que a maior média foi obtidas aos 272 DAC (**Figura 21**).

A produção de biomassa total com 300 kg ha^{-1} de N foi de $152,9 \text{ Mg ha}^{-1}$, valor cerca de 22 % maior que os obtidos com demais tratamentos. Na avaliação no tempo, foi observado aumento linear até 204 DAC, cuja média foi de $216,4 \text{ Mg ha}^{-1}$. Na coleta seguinte, foi observada redução na biomassa verde total. Para a produção de biomassa de colmos, as maiores médias também ocorreram para a dose de 300 kg ha^{-1} com produção de $97,7 \text{ Mg ha}^{-1}$ aos 204 DAC.

A dose de 300 kg ha^{-1} possibilitou produção de 7,5 e $13,1 \text{ Mg ha}^{-1}$ de biomassa de folhas secas e verdes, respectivamente, médias 20 % maiores que os demais tratamentos. Ao longo do tempo, a produção de biomassa de folhas secas foi linear e crescente, atingindo $12,6 \text{ Mg ha}^{-1}$ aos 272 DAC. A produção de biomassa de folhas verdes atingiu os maiores resultados aos 141 DAC e se manteve até 204 DAC, com média de $14,3 \text{ Mg ha}^{-1}$. Aos 272 DAC foi observada uma drástica redução, resultando em média inferior a produção inicial.

No componente ponteiro foi observada produção crescente até 141 DAC que se manteve até 204 DAC, com média de $37,8 \text{ Mg ha}^{-1}$, e pequena redução sem diferença estatística aos 204 DAC. Em seguida ocorreu redução de aproximadamente 60 % na avaliação aos 272 DAC (**Figura 22**).

Para a relação entre os compartimentos de biomassa vegetal, houve predominância de biomassa de ponteiro na primeira coleta, correspondendo a mais de 50 % da biomassa total (**Figura 23**). Com a adubação em cobertura (100 kg ha^{-1} de N), a biomassa de ponteiro apresentou o maior percentual com 59 %. Nas coletas seguintes foi observada uma predominância da biomassa de colmos. Ao longo do tempo ocorreu uma redução nos componentes *ponteiro* e *folhas* verdes, enquanto a biomassa de folhas secas se manteve próximo de 5 % da biomassa total.

Figura 21 – Efeito das doses de N via fertirrigação em função da dose e do tempo na produção de biomassa total (A e B), biomassa de colmos (C e D), biomassa de folhas secas (E e F), e biomassa de folhas verdes (G e F).

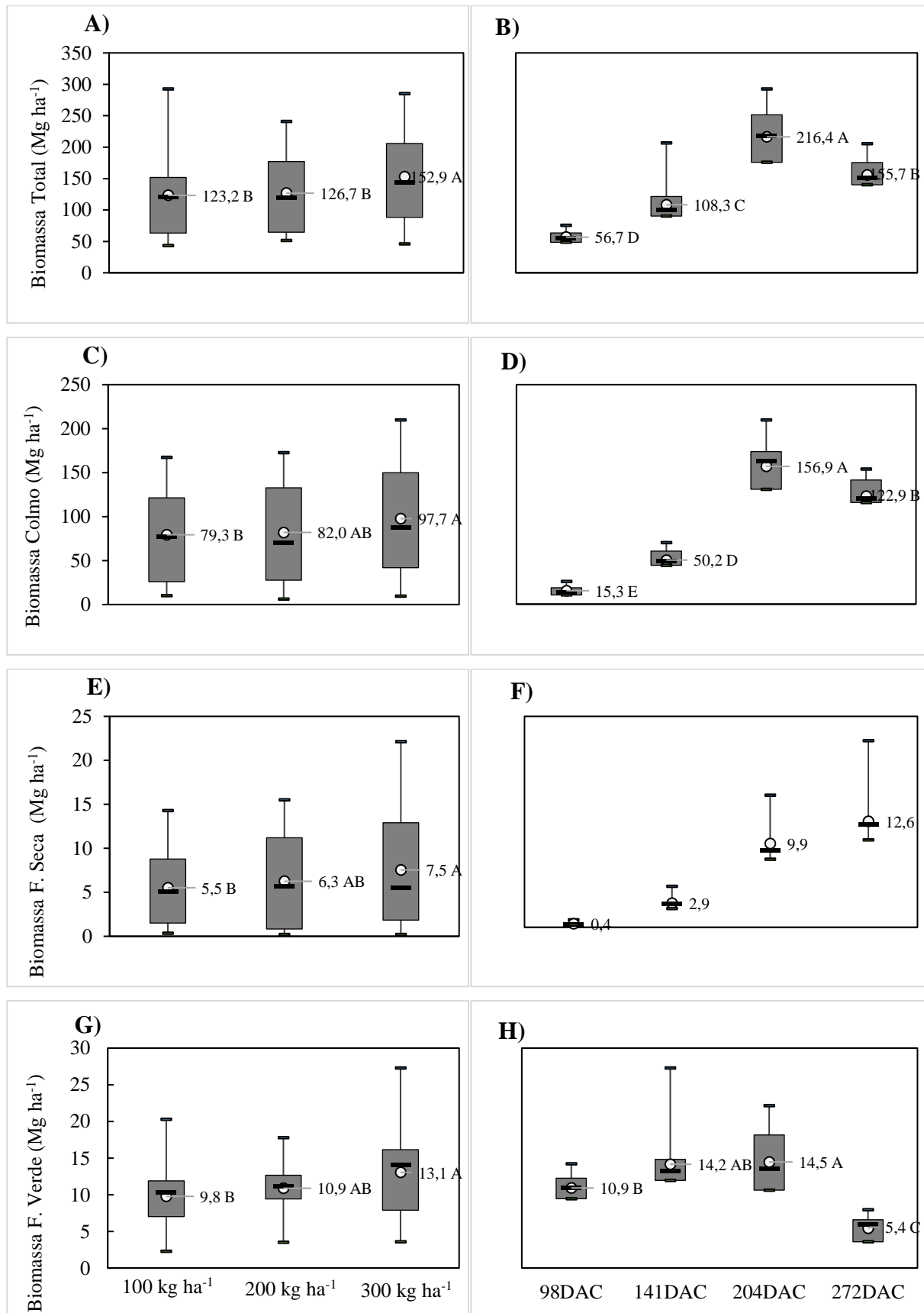


Figura 22 – Efeito das doses de N via fertirrigação na produção de biomassa de ponteiro em função do tempo.

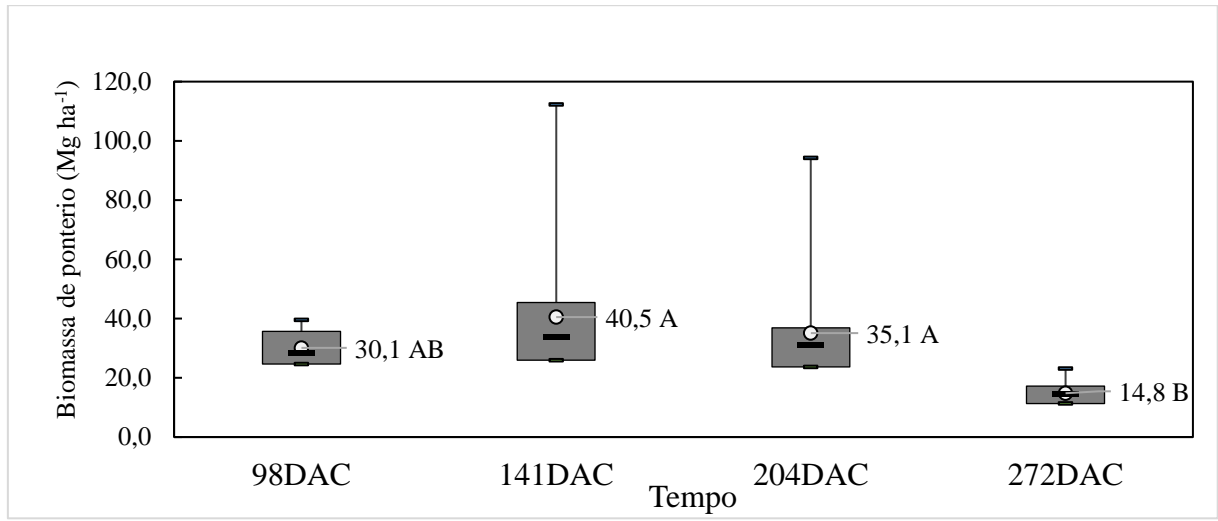
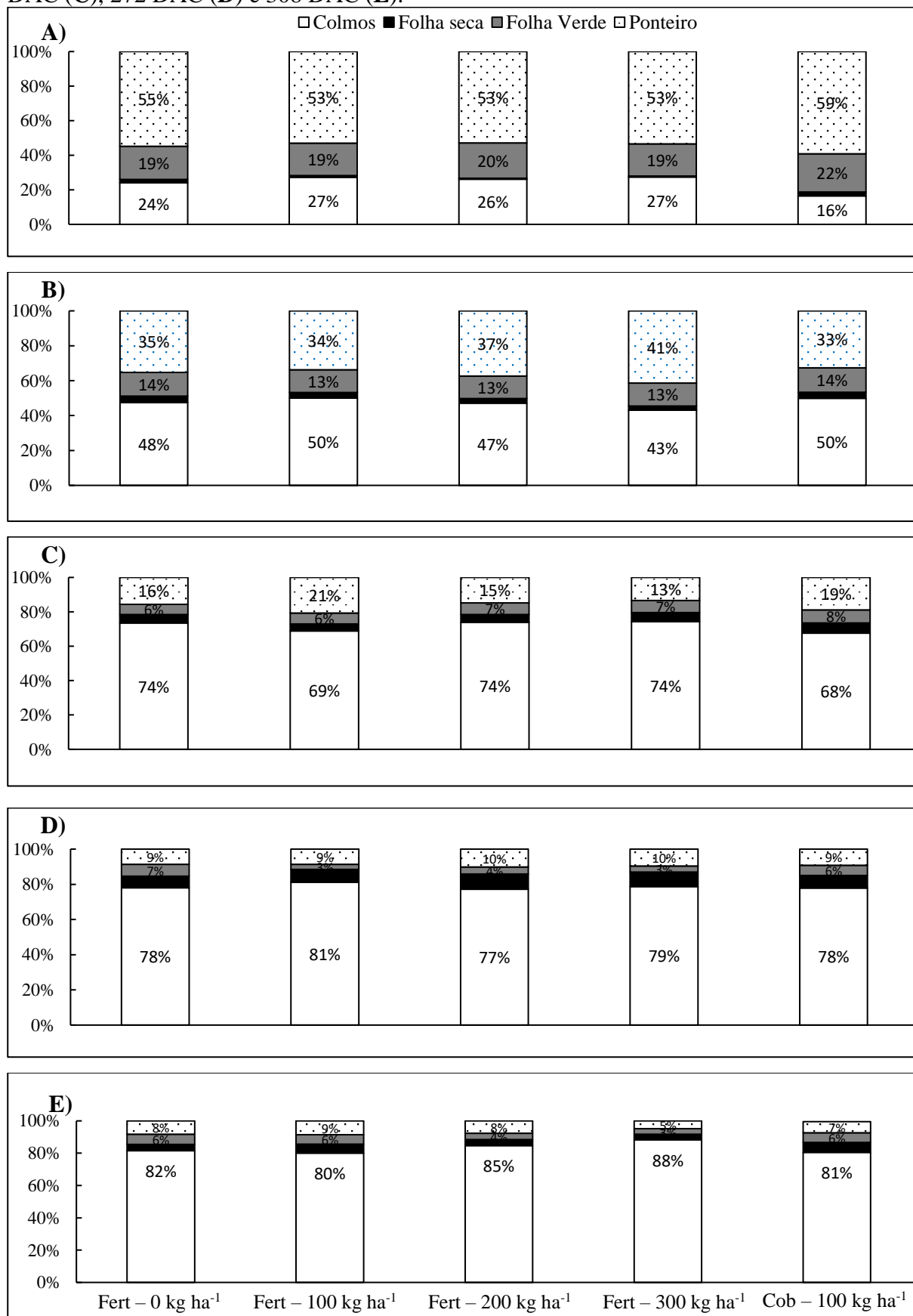


Figura 23 – Proporções entre os compartimentos vegetais ao 98 DAC (A), 141 DAC (B), 204 DAC (C), 272 DAC (D) e 308 DAC (E).



4.2.3 Rendimento agroindustrial

No final do ciclo de avaliação, as doses de 200 e 300 kg ha⁻¹ de N obtiveram as maiores produtividades de colmo, com médias de 110,75 Mg ha⁻¹, respectivamente, mas sem diferenças estatísticas entre si (**Figura 24**). Logo em seguida, a aplicação de 100 kg ha⁻¹ de N via fertirrigação, produziu 95,9 Mg ha⁻¹, diferenciando estatisticamente dos demais tratamentos. Com a aplicação de 100 kg ha⁻¹ de N em cobertura, foi obtida produtividade de 84,9 Mg ha⁻¹, uma redução de 11 % em relação a dose de 100 kg ha⁻¹ de N. Por outro lado, sem a utilização de fertilizante nitrogenado, foi obtida a menor produtividade com média de 65,1 Mg ha⁻¹.

Para a produtividade de açúcar (TAH), o maior resultado foi observado com o uso de 300 kg ha⁻¹, no qual foi obtido uma média de 14,3 Mg ha⁻¹, mas sem diferença significativa para a dose de 200 kg ha⁻¹ em que foi observado uma média 13,6 de TAH (**Figura 24**).

Nos parâmetros agroindustriais, a adubação em cobertura apresentou os menores resultados nos diferentes atributos (**Tabela 2**). Na variável ATR, a ausência de adubação resultou nos maiores resultados com 129 kg t⁻¹, enquanto os demais tratamentos não diferiram entre si. Os tratamentos com dose 0 e 300 kg ha⁻¹ de N obtiveram os maiores resultados de PC, com média de 12,9 e 12,6 respectivamente, mas sem diferenças significativas as doses 100 e 200 kg ha⁻¹, que por sua vez não foram diferentes da aplicação em cobertura, que obteve uma média de 10,5 %.

Figura 24 – Produtividade agrícola (A) e de açúcar da cana-de-açúcar (B) em função de doses de N via fertirrigação (0, 100, 200, e 300 kg ha⁻¹) e na aplicação em cobertura (100 kg ha⁻¹) - Linha tracejada cinza.

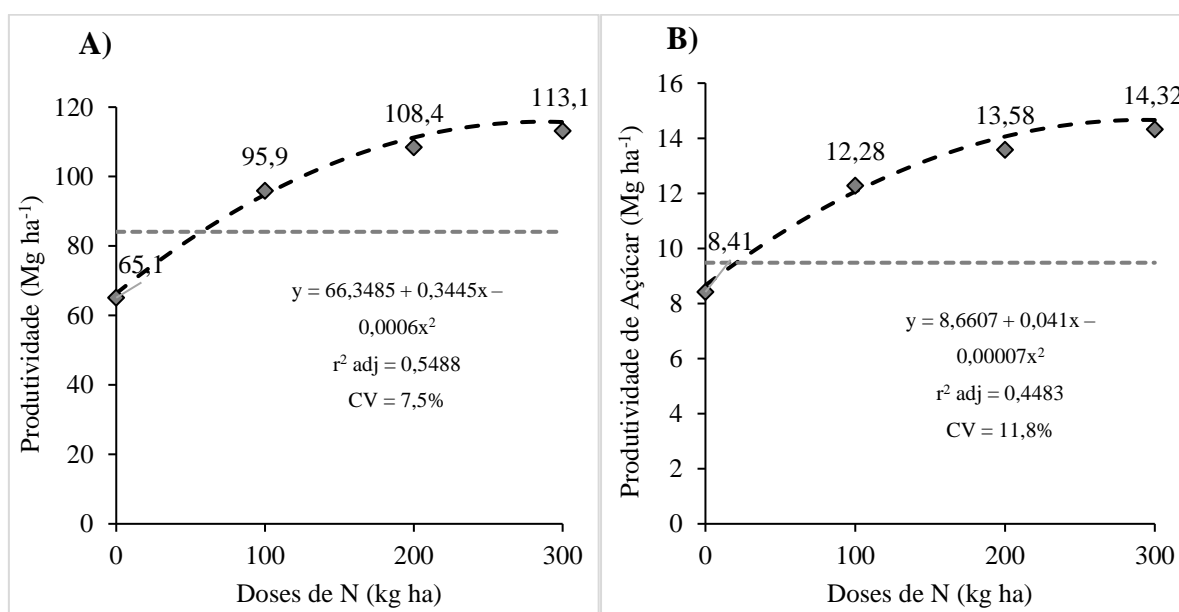


Tabela 2 – ATR e PC da cana-de-açúcar em função de doses de N via fertirrigação (0, 100, 200, e 300 kg ha⁻¹) e na aplicação em cobertura (100 kg ha⁻¹).

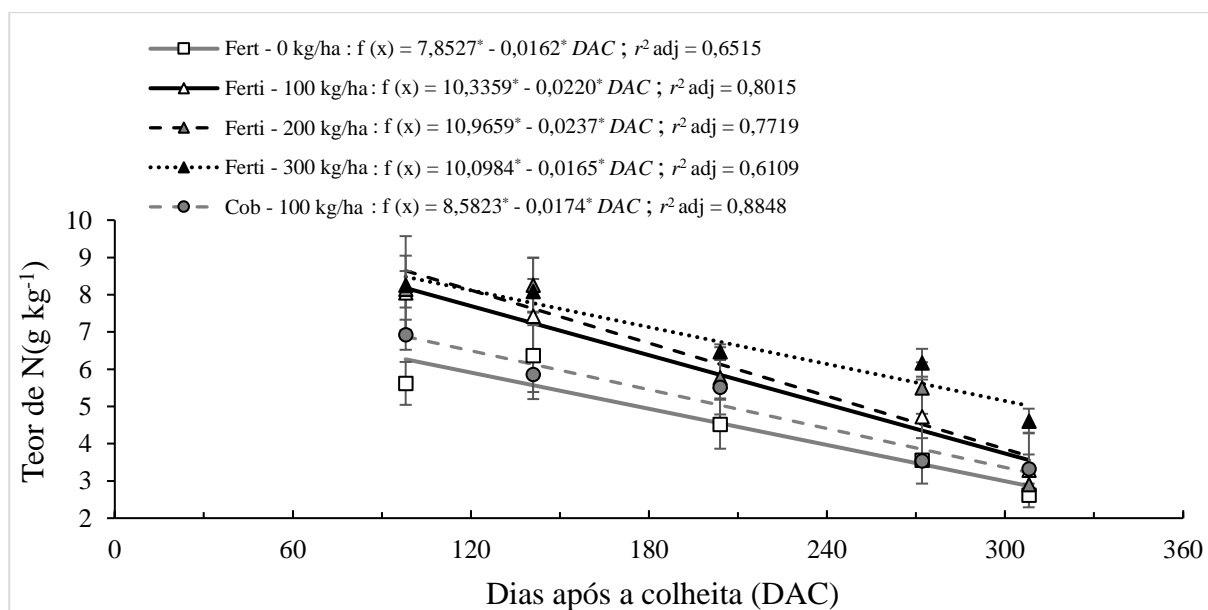
Tratamento	ATR (kg t ⁻¹)	PC (%)
0 kg ha ⁻¹ via fertirrigação	129,0 A	12,9 A
100 kg ha ⁻¹ via fertirrigação	128,3 AB	12,5 AB
200 kg ha ⁻¹ via fertirrigação	125,2 AB	12,4 AB
300 kg ha ⁻¹ via fertirrigação	127,0 AB	12,6 A
100 kg ha ⁻¹ em cobertura	111,7 B	10,5 B
DMS	16,66	2,02
CV (%)	8,3	10,3

4.2.4 Teor de N no tecido vegetal

A adubação nitrogenada via fertirrigação aumentou o teor de N no tecido vegetal, com redução linear ao longo do tempo (**Figura 25**). Nas avaliações aos 98 e 141 DAC, os tratamentos fertirrigados apresentaram menor diferença entre si, e maior diferença em relação aos tratamentos não fertirrigados. Nas demais coletas, 300 kg ha⁻¹ de N obteve os maiores teores.

Não aplicar o N resultou em menores teores de N (**Figura 25**). Ao final do ciclo, a maior dose (300kg ha⁻¹ de N) apresentou a menor redução (45 %) em relação ao teor inicial, atingindo média de 4,6 g kg⁻¹. Nos demais tratamentos, as reduções foram superiores a 50 %, resultando em teor médio de 3,0 g kg⁻¹.

Figura 25 – Teor de N no tecido Vegetal ao longo do tempo em função das doses de N aplicada via fertirrigação por gotejo subsuperficial (0, 100, 200, 300 kg ha⁻¹ de N) e adubação em cobertura (100 kg ha⁻¹).



4.2.5 Índice SPAD

Em todas as fases a fertirrigação promoveu ganhos crescentes com as doses de N, sendo sempre superiores e com ganhos lineares ao longo do ciclo. Nas fases iniciais de crescimento (111 e 145 DAC) a adubação nitrogenada pela fertirrigação aumentou os índices SPAD, porém a partir dos 195 DAC apenas nas doses maiores de 200 e 300 kg obteve ganhos no índice em relação a fazer adubação convencional superficial (**Figuras 26 e 27**).

Figura 26 – Índice SPAD ao longo do tempo para doses de N aplicada via fertirrigação por gotejo subsuperficial (0, 100, 200, 300 kg ha⁻¹ de N) e adubação em cobertura (100 kg ha⁻¹).

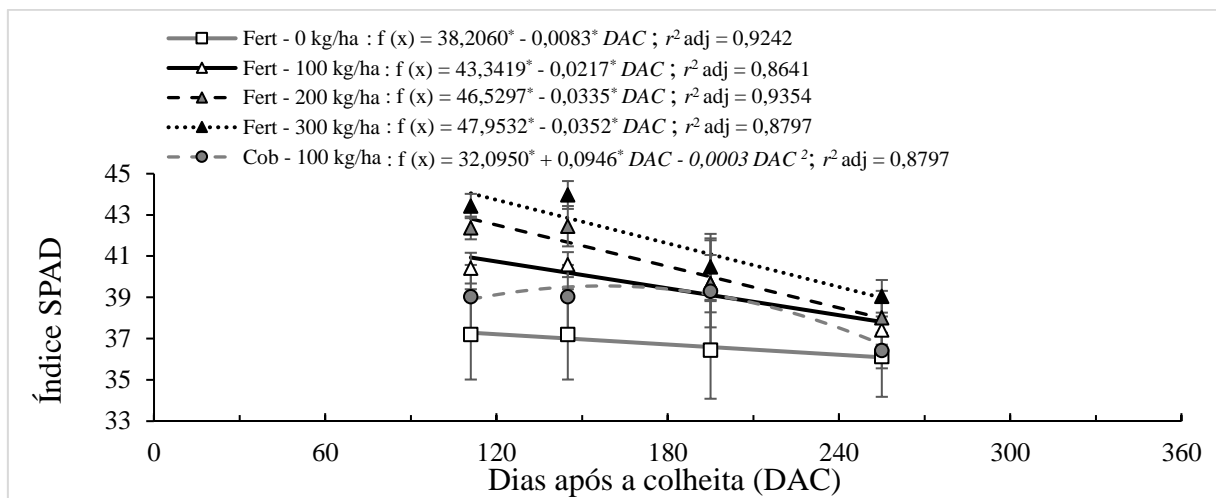
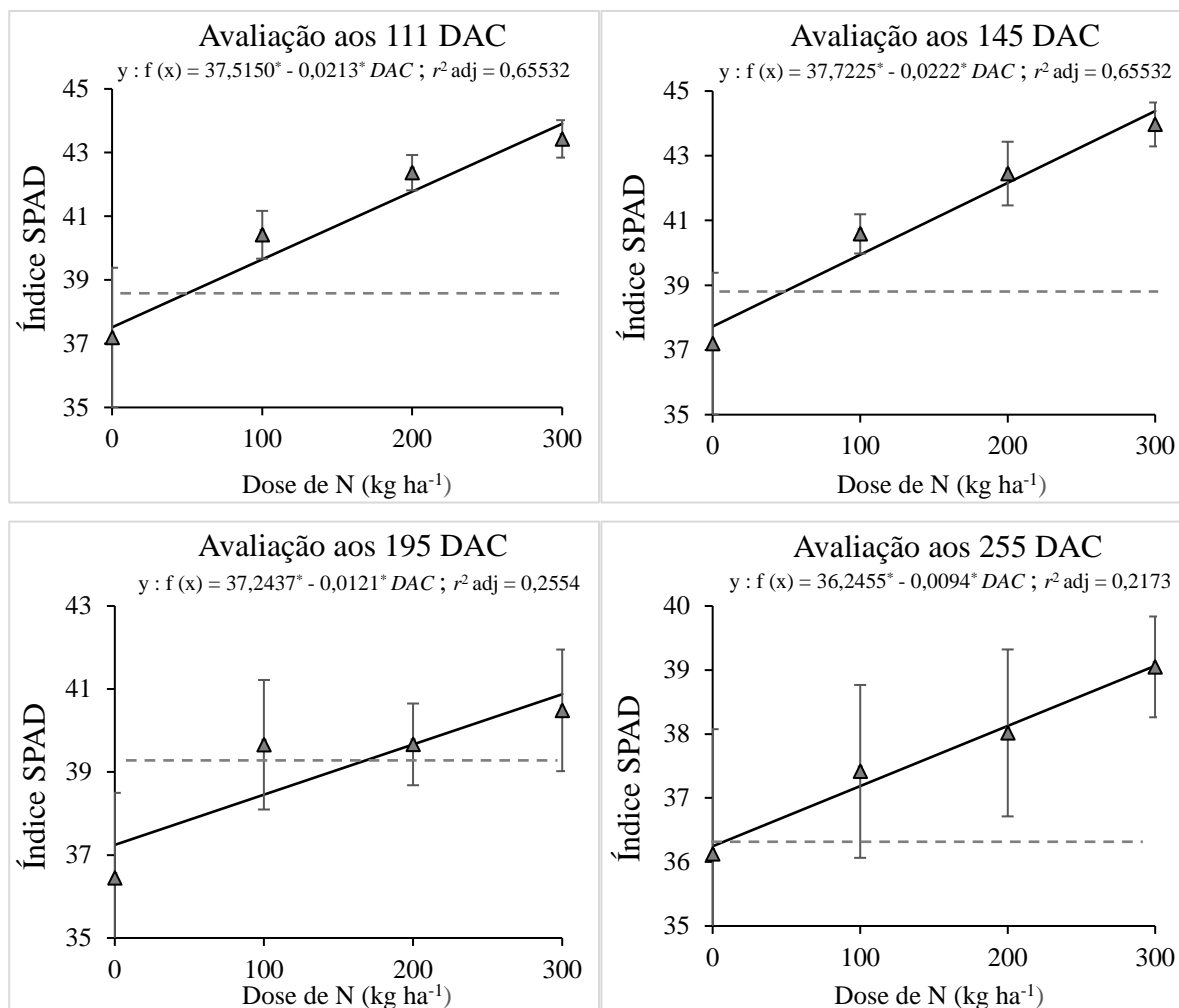


Figura 27 – Índice SPAD ao longo do tempo para doses de N aplicada via fertirrigação por gotejo subsuperficial (0, 100, 200, 300 kg ha⁻¹ de N) e adubação em cobertura (100 kg ha⁻¹). Linha tracejada – médias para 100 kg ha⁻¹ de N em cobertura.



4.2.6 Produção de biomassa seca e acúmulo de N

A produção de biomassa seca e acúmulo de N apresentaram comportamento gaussiano com crescimento inicial lento, seguido de crescimento acelerado e posterior redução (**Figura 28**). Ao longo do ciclo, as maiores médias foram observadas com a maior aplicação das doses de N, e os menores resultados quando o N foi aplicado superficial na fase inicial, exceto aos 272 e 308 DAC em que a menores produções foram obtidas também sem aplicação de N.

Os maiores acúmulos de biomassa foram obtidos aos 233 dias, com valores médios de 68,8 Mg ha⁻¹ com a aplicação de 300 kg ha⁻¹ de N. Os acúmulos máximos com as doses 100 e 200 kg ha⁻¹ de N foram em média de 59 Mg ha⁻¹, enquanto as médias com a ausência de N e adubação em cobertura (100 kg ha⁻¹ de N) foram de 46,8 e 40,9 Mg ha⁻¹, respectivamente.

As maiores taxas de produção diária foram obtidas, durante o mês de abril, aos 148 DAC (0,37 Mg ha⁻¹), 160 DAC (0,53 Mg ha⁻¹), 159 DAC (0,51 Mg ha⁻¹), 167 DAC (0,63 Mg ha⁻¹) para as doses 0, 100, 200 e 300 kg ha⁻¹ de N via fertirrigação, respectivamente. Com a aplicação em cobertura, a taxa máxima de acúmulo atingida aos 158 DAC com 0,29 Mg ha⁻¹. Quanto aos ganhos mensais, não aplicar N e a aplicação em cobertura resultaram em maiores médias no período entre 121-150 DAC, o que corresponde à segunda metade de março e à primeira metade de abril. Por outro lado, os tratamentos fertirrigados obtiveram maiores ganhos mensais no período entre 151-180 DAC (abril/maio).

Após os 220 DAC, ocorreu uma redução média de 37% no final do ciclo, em relação à produção máxima observada. A aplicação em cobertura apresentou a menor perda (17 %). Na última coleta, aos 308 DAC, a aplicação de 300 kg ha⁻¹ de N resultou em 35,9 Mg ha⁻¹, e os tratamentos sem aplicação de N e aplicação em cobertura obtiveram as menores produções, que foram de 26 e 30,1 Mg ha⁻¹, respectivamente.

A aplicação de N via fertirrigação aumentou o acúmulo de N no decorrer do ciclo, com destaques a partir dos 141 DAC quando foi observado uma maior diferença entre os tratamentos fertirrigados e os demais (**Figura 29**). Ao final do ciclo, não aplicar N e aplicar em cobertura resultou em 72,2 e 98,7 kg ha⁻¹, respectivamente, enquanto foi obtido 162,8 kg ha⁻¹ na dose de 300 kg ha⁻¹ de N e 107,7 kg ha⁻¹ nos demais tratamentos fertirrigados.

As maiores taxas de acúmulo diário de N foram obtidas pelos tratamentos fertirrigados, com médias de 2,87 kg ha⁻¹ (148 DAC); 3,24 kg ha⁻¹ (149 DAC); 3,88 kg ha⁻¹ (155 DAC) para as doses de 100, 200 e 300 kg ha⁻¹ de N, respectivamente. A ausência de N na fertirrigação e a aplicação em cobertura resultaram em 1,76 kg ha⁻¹ (aos 130DAC) e 1,52 (aos 137 DAC). A taxa de acúmulo mensal apresentou comportamento similar ao ganho mensal de massa seca total.

Figura 28 – Acúmulo (A); Taxa de acúmulo (B), e Ganho mensal (C) de biomassa seca total ao longo do ciclo em função de doses de N aplicadas via fertirrigação por gotejo subsuperficial (0, 100, 200, 300 kg ha⁻¹ de N) e adubação em cobertura (100 kg ha⁻¹).

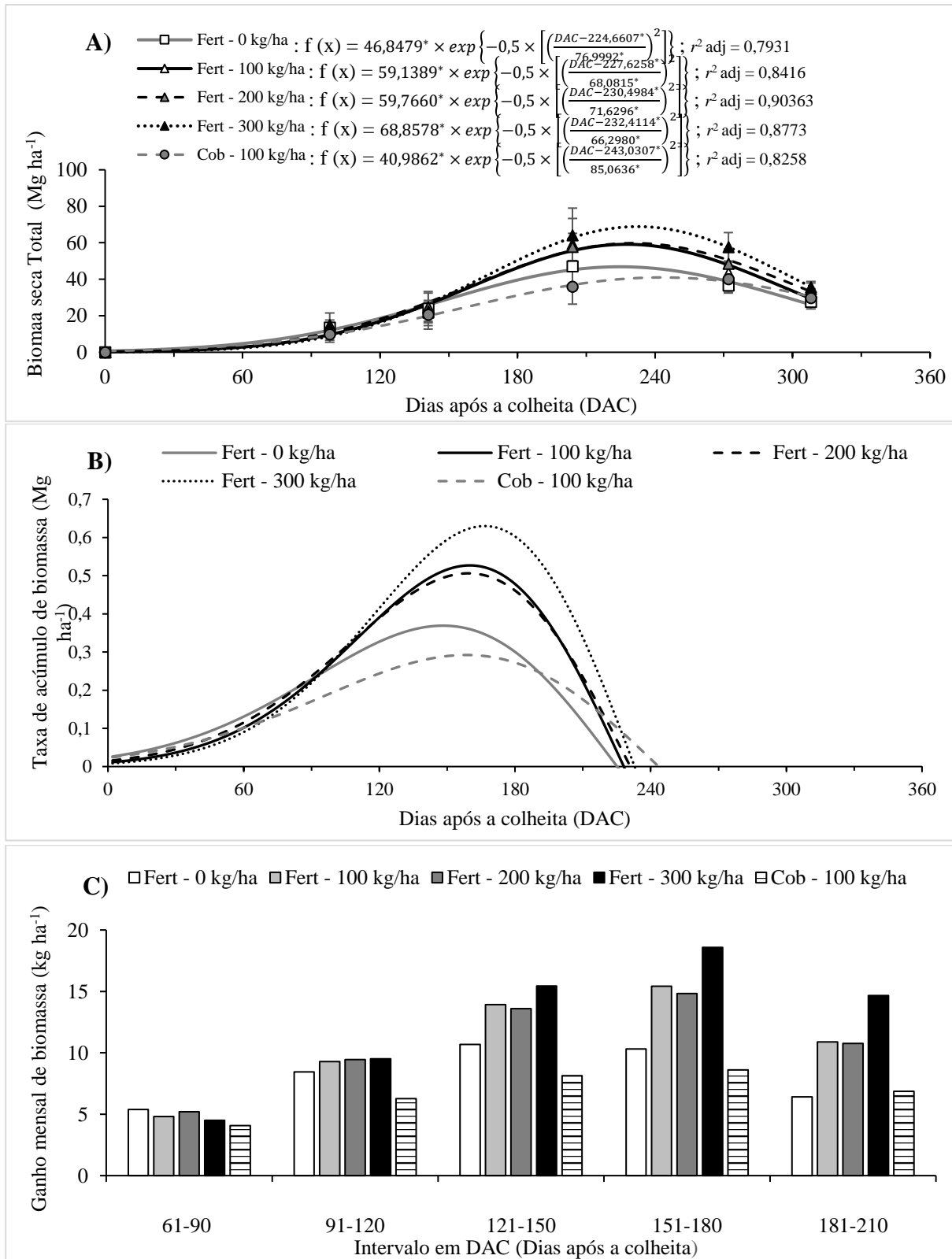
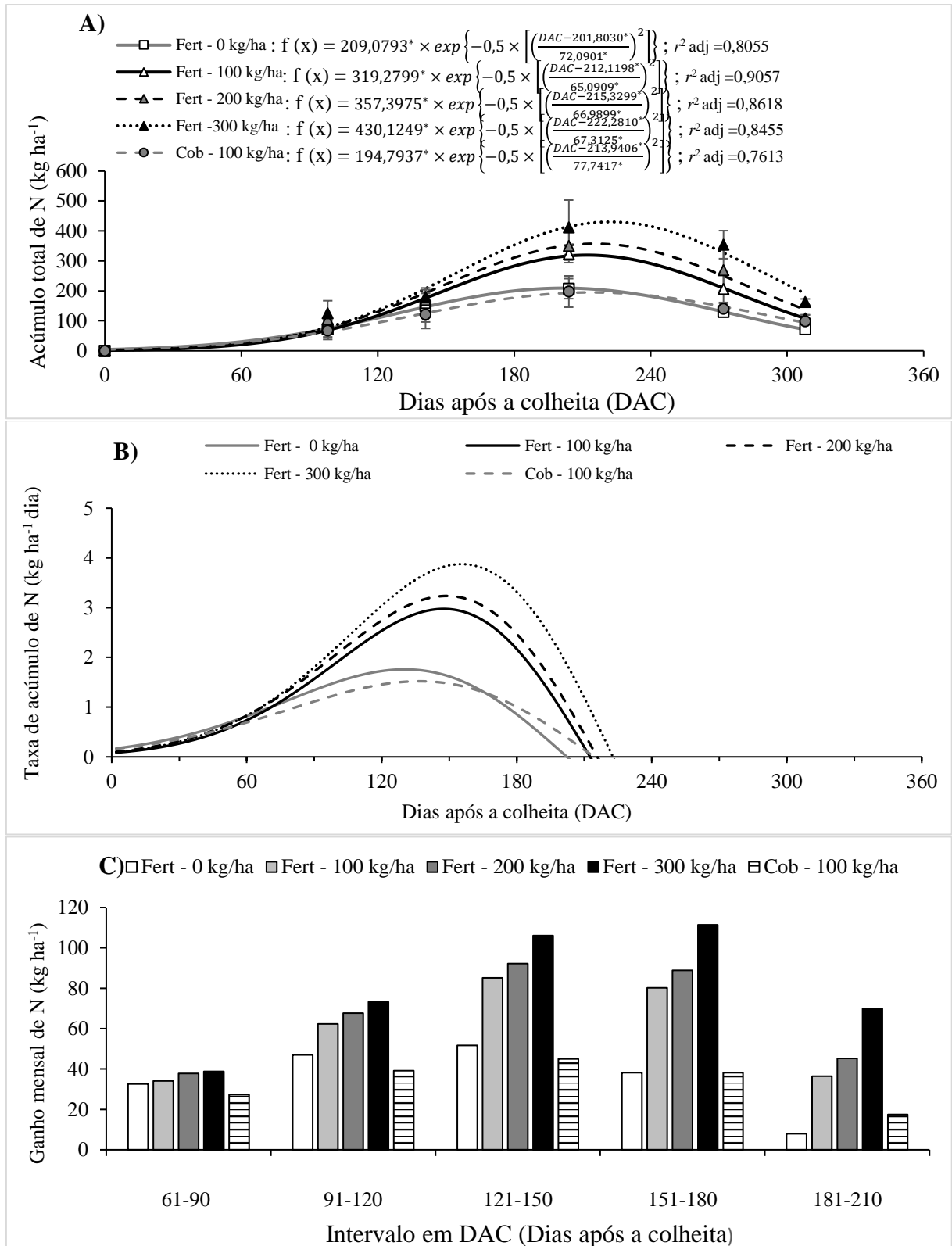


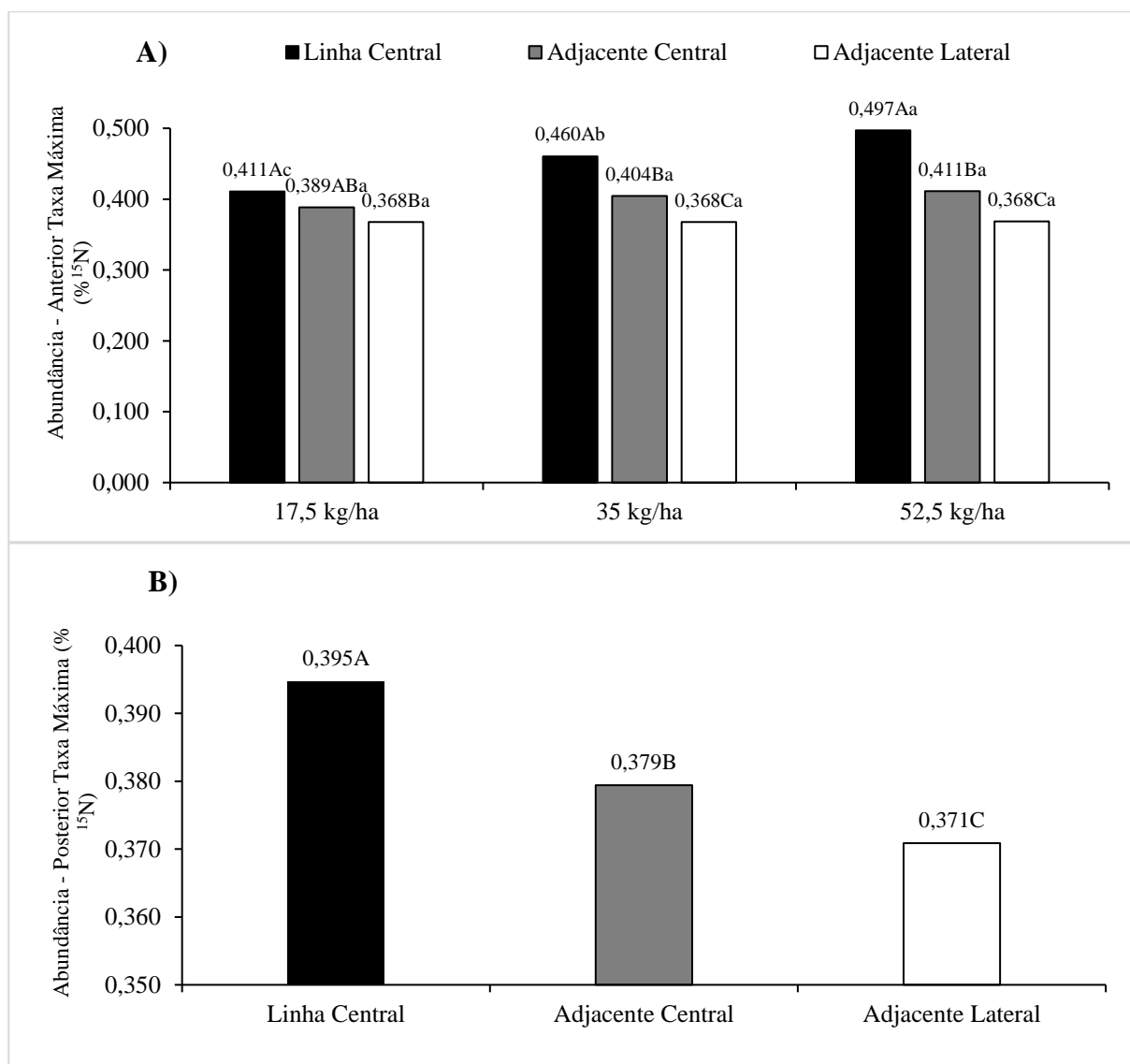
Figura 29 – Acúmulo total de N (A); Taxa de acúmulo de N (B); e Ganho mensal de N (C) ao longo do ciclo em função de doses de N aplicadas via fertirrigação por gotejo subsuperficial (0, 100, 200, 300 kg ha⁻¹ de N) e adubação em cobertura (100 kg ha⁻¹).



4.2.7 Abundância de ^{15}N

A abundância de átomos de ^{15}N foi maior na linha central e linha adjacente central e reduziu na adjacente lateral. Na linha adjacente lateral, os valores de abundância natural foram próximos ao natural e apresentaram baixo enriquecimento. Apenas antes da taxa máxima acúmulo de N (114 - 142 DAC), as doses de N apresentaram diferença na abundância, resultando em aumentos de 17,3 e 7,4 % com o uso de 300 kg ha⁻¹ de N em relação a 100 e 200 kg ha⁻¹ de N, respectivamente (**Figura 30**). Após a taxa máxima de acúmulo de N, o aumento da dose de N não aumentou a abundância.

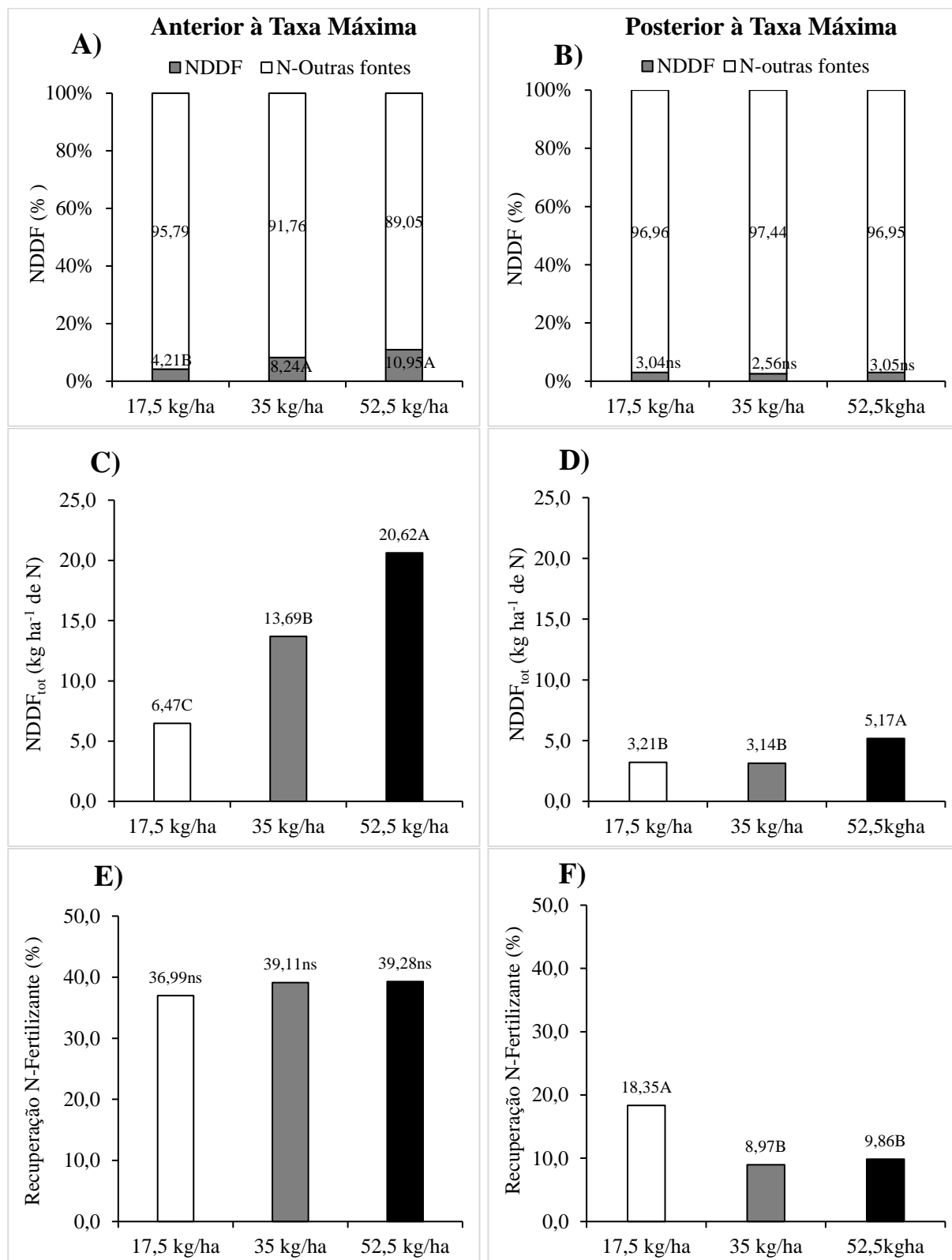
Figura 30 – Abundância de átomos de ^{15}N em função de doses de N aplicadas via fertirrigação 17,5 (100), 35 (200) e 52,5 kg ha⁻¹ de N (300) e do local de avaliação no período anterior a máxima taxa de acúmulo de N (**A**) e em função do local de avaliação no período posterior à máxima taxa de acúmulo de N, em % (**B**). Letras maiúsculas comparam os locais de coleta por tratamento e letras minúscula compara tratamentos por local pelo teste de Tukey a nível de 5% de probabilidade.



4.2.8 NDDF e Recuperação do N-Fertilizante

No período anterior a taxa máxima de acúmulo de N, as maiores doses de N proporcionaram o maior NDDF percentual (**Figura 31A**), e o aumento da dose de N incrementou o NDDF total em 14,1 kg ha⁻¹ de N na dose de 300 kg ha⁻¹ em relação menor dose (**Figura 31C**). Nesse período não houve diferença na recuperação do N-fertilizante (**Figura 31E**). Na avaliação posterior à taxa máxima de acúmulo de N, os resultados foram inferiores aos obtidos no período anterior, o NDDF_{tot} aumentando em 61% com o uso de 300 kg ha⁻¹ (**Figura 31D**). A adubação nitrogenada obteve diferente recuperação do N-fertilizante após a taxa máxima de acúmulo de N, com a dose de 100 kg ha⁻¹ de N atingindo uma recuperação 94 % superior a demais doses (**Figura 31F**).

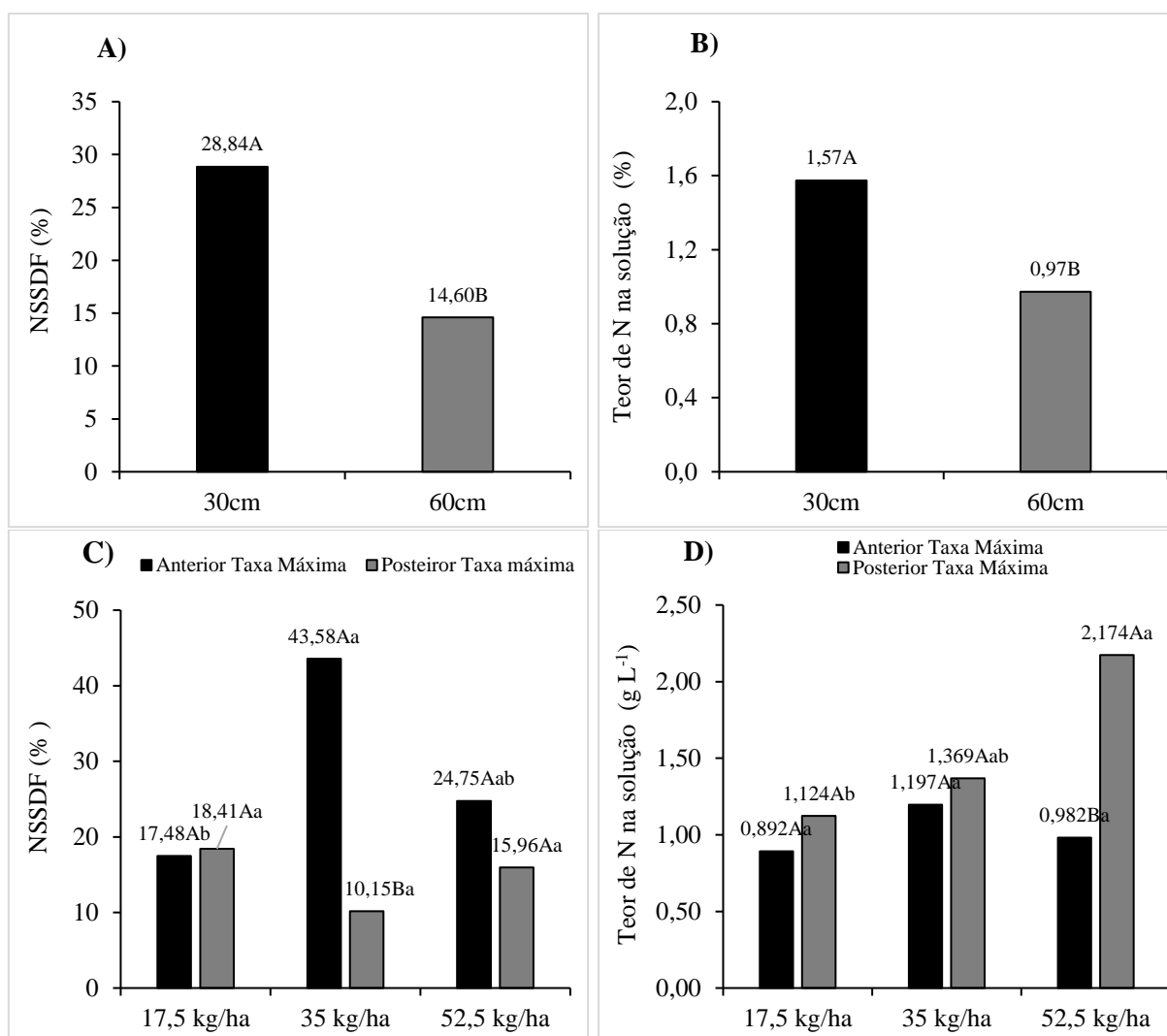
Figura 31 – Nitrogênio derivado do fertilizante – NDDF, em percentagem, (A e B); Nitrogênio total derivado do fertilizante – NDDF_{tot}, em kg ha⁻¹ de N, (C e D); e Recuperação do N-fertilizante, em percentagem, (E e F) no período anterior e posterior a taxa máxima de acúmulo de N para as doses de N aplicadas via fertirrigação 17,5 (100), 35 (200) e 52,5 kg ha⁻¹ de N (300). Letras maiúsculas comparam os locais de coleta por tratamento e letras minúscula compara tratamentos por local pelo teste de Tukey a nível de 5% de probabilidade.



4.4.9 N-fertilizante e teor de N na solução do solo

A aplicação de N via fertirrigação resultou em maior N na solução do solo derivado do fertilizante – NSSDF e teor de N na solução do solo na profundidade de 30 cm (**Figura 32**). Na interação dose x época de avaliação, a dose intermediária de N (35 kg ha^{-1}) apresentou o maior NSSDF no período anterior a taxa máxima de acúmulo de N (**Figura 32C**). Na avaliação seguinte, posterior à taxa máxima de acúmulo de N, não houve diferenças entre as doses. O aumento da dose de N aumentou o teor de N na solução do solo no período posterior à máxima taxa de acúmulo de N (**Figura 32D**).

Figura 32 – N solução do solo derivado do fertilizante – NSSDF (**A** e **C**) e teor de N na solução do solo (**B** e **D**) nas profundidades de 30 e 60 cm, e na interação dose época de aplicação, em função de doses de N aplicadas via fertirrigação $17,5$ (100), 35 (200) e $52,5 \text{ kg ha}^{-1}$ de N (300). Letras maiúsculas comparam as épocas de coleta por tratamento e letras minúsculas comparam tratamentos por época pelo teste de Tukey a nível de 5% de probabilidade.



5 DISCUSSÃO

5.1 Efeito da aplicação de N via fertirrigação no desenvolvimento da cana-de-açúcar

A adubação nitrogenada promove o crescimento da cana-de-açúcar por atuar em diferentes processos metabólicos e em diferentes fases fenológicas da cultura (BOSCHIERO et al. 2020; JORIS et al., 2020). O entendimento das fases de crescimento da cana-de-açúcar auxilia na tomada de decisão do manejo visando aumentar a produtividade e uma melhor utilização de recursos (KÖLLN et al., 2023).

A utilização de adubação nitrogenada possibilitou resultados positivos nos parâmetros biométricos da cana-de-açúcar, com exceção da primeira avaliação aos 100 DAC (**Figuras 7 a 9 e Figuras 19 e 20**). Nessa fase, o curto período entre a primeira aplicação dos tratamentos e a avaliação pode explicar a ausência de diferença no crescimento de plantas adubadas e não adubadas (*sem adubação x com adubação*).

A primeira avaliação coincidiu com a fase de máximo perfilhamento, resultando em menor densidade de plantas nas avaliações posteriores. A redução do número de perfilhos no ciclo é um processo natural, presente nos diferentes manejos, já observado em outros trabalhos realizados na região (Oliveira et al. 2010b; Oliveira et al., 2016). Segundo Bonnet (2013), após o pico na densidade de plantas, ocorre a senescência dos perfilhos menores, resultando na diminuição da quantidade de plantas por touceira. Na mesma região, Oliveira et al. (2010b) observaram o perfilhamento máximo da RB92579 aos 60 DAC, com média de 30 plantas m⁻¹, quando conduzida por irrigação plena. Assim, na primeira avaliação (100 DAC) o número de perfilhos estava em declínio. Nas avaliações subsequentes, a redução da variabilidade do perfilhamento indica uniformidade e estabilização no número de colmos entre os tratamentos na fase de crescimento. Por outro lado, a utilização da fertirrigação aumentou o perfilhamento, devido à disponibilidade de água e nutrientes aos 100 DAC e na manutenção de maior densidade de colmos no período de crescimento, ente 210 e 257 DAC (Figura 5). De forma semelhante, Kölln et al. (2023) observaram maior produção de perfilhos aos 38 DAC em cana-de-açúcar cultivada sob diferentes doses de N via fertirrigação em relação ao tratamento controle sem utilização de fertilizante nitrogenado.

A adubação nitrogenada proporcionou ganhos na altura de colmos sem modificar o diâmetro das plantas. Segundo Botha et al. (2023), a altura de colmo é um dos principais fatores ligados a produtividade. O destaque da fertirrigação é evidenciado por superar a adubação convencional e pela ausência diferença entre *sem adubação x adubação convencional*. A

ausência de efeito no diâmetro está ligada a aplicação uniforme de P via fertirrigação em todo o campo, nutriente que promove o aumento do diâmetro do colmo (Albuquerque et al., 2016).

Na primeira avaliação não é observada diferença na altura de colmo entre os tratamentos porque nesse momento a cultura está direcionando a energia para a formação de novos perfilhos (BONNET, 2013). É na fase de crescimento de colmos que ocorre o crescimento exponencial em altura, e maior resposta em função dos tratamentos (LEITE et al., 2016; OLIVEIRA et al., 2010b).

A ausência de efeito da adubação convencional (100 kg ha^{-1} em cobertura) em relação à não aplicação de N no início do ciclo pode ser explicada pelas condições climáticas locais. No período da aplicação dos tratamentos, via cobertura e via fertirrigação, não houve precipitação que possibilitasse dissolução e incorporação do N no solo do fertilizante sólido aplicado em cobertura. Nesse período, o fornecimento de água de acordo com a demanda da cultura ocorreu pelo sistema de irrigação por gotejo. A partir do mês de março, foram observadas precipitações mensais superiores à 100 mm, se estendendo até o mês de maio, o que possibilitou a resposta da adubação em cobertura superior ao controle.

O manejo *com adubação* incluiu a adubação de cobertura e os tratamentos fertirrigados. Como a adubação de cobertura apresentou valores baixos, a média do *com adubação* é reduzida, o que reduz a sensibilidade para identificação de diferenças no contraste entre os tratamentos com e sem adubação. Isso é evidenciado no contraste *adubação convencional* e o *fertirrigação*, em que os tratamentos fertirrigados superam a adubação sólida, devido a maior disponibilidade de N e água (ZAMBROSI; MESQUITA; TANAKA, 2023).

As avaliações aos 149 e 308 DAC, realizadas no mês de abril e setembro respectivamente, mostram maior resposta da adubação convencional em relação aos tratamentos fertirrigados. Após a primeira coleta houve aumento na precipitação, possibilitando maior disponibilização do nutriente aplicado em cobertura e o estímulo à produção de perfilhos. Ao final do ciclo ocorre a estabilização da densidade de plantas (BONNET, 2013).

A ausência de diferenças entre o controle (sem N) e a adubação convencional está ligado a disponibilidade de N natural do solo (BOSCHIERO et al., 2020). Joris et al. (2020) demonstraram que em condições de ausência de adubação ocorre a mineralização da matéria orgânica do solo e disponibilização de N. O solo da área experimental apresenta teor de matéria orgânica no solo ligado as colheitas sucessivas de cana crua, o que pode explicar o desempenho do controle semelhante à adubação convencional. A disponibilização de água via sistema de irrigação (gotejo sem fertirrigação) pode ter favorecido o fornecimento do N através da

mineralização da matéria orgânica do solo, bem como com o estímulo ao crescimento radicular, permitindo que a planta explore mais o solo (EMDE et al., 2021).

O manejo nutricional em conjunto com a irrigação através da fertirrigação possibilita maior desenvolvimento da cana-de-açúcar em relação à adubação convencional, em que o fertilizante é aplicado na superfície do solo no início do ciclo (CASTRO et al., 2019).

A ausência de significância no contraste *adubação convencional x fertirrigação* na produção da biomassa total e de colmos aos 141 DAC pode estar relacionado ao início do período chuvoso. Entre a aplicação dos fertilizantes e primeira avaliação (98 DAC) foram registrados apenas 11 mm de precipitação, enquanto da primeira para a segunda avaliação (141 DAC) foram observados 258 mm, volume capaz de solubilizar o fertilizante aplicado em superfície. Segundo Melland et al., (2022), a dissolução do fertilizante granular aplicado em superfície promove o aumento do N inorgânico dissolvido na solução do solo somente após a chuva.

A maior dose de N via fertirrigação (300 kg ha^{-1} de N) proporcionou maior produção de biomassa de colmos e biomassa total. Resultado semelhante foi observado por Kölln et al. (2023) com o aumento da dose de N aplicada via gotejamento, que resultou em aumentos na produção de biomassa seca pela cana-de-açúcar.

No decorrer do ciclo produtivo, a maior produção de biomassa dos componentes foi atingida aos 204 DAC, ainda na fase de crescimento de colmos. Nesse período ocorre acúmulo mais acelerado de N e de biomassa de colmos pela cana-de-açúcar, com uma posterior estabilização (LEITE et al., 2016). A queda de produção observada aos 272 DAC pode estar ligada ao florescimento e isoporização da cana-de-açúcar observada desde o mês anterior (maio/2021). O florescimento é um fenômeno complexo determinado pela interação de fatores ambientais, como fotoperíodo e temperatura, e fatores internos ao vegetal, como fase fenológica, balanço hormonal e estado nutricional. É comum que a isoporização ocorra junto com o florescimento, uma vez que para o desenvolvimento do pendão floral ocorre inibição do crescimento em altura e consumo da sacarose acumulada. Assim, tem-se perda de qualidade industrial da cana-de-açúcar, com redução do açúcar e do peso do colmo (ARALDI et al., 2010; ENDRES et al., 2016; PAVANI; MALHOTRA; VERMA, 2023). A perda estimada da produção de biomassa foi de aproximadamente 40 %, entre a fase de maior produção e a colheita.

A produção de biomassa de folhas secas foi acentuada ao final do ciclo, o que é explicado pelo processo de senescência foliar. No final do ciclo esse aumento é natural, uma vez que a maior parte da biomassa de folhas verdes vai sendo convertida em biomassa de folhas

secas durante o ciclo, e esse processo é intensificado no período de maturação da cultura (GUO et al., 2021; MARTINS et al., 2016). Leite et al. (2016) também observaram o crescimento contínuo de produção de folhas secas na cana-de-açúcar. Esse processo foi ainda mais acentuado devido ao florescimento (BONNET, 2013; ZHOU, 2022).

O menor efeito da utilização da fertirrigação durante o mês de maio está ligado a fenologia da cana-de-açúcar bem como às condições edafoclimáticas. Nesse período, a cana-de-açúcar apresentava redução no acúmulo de N, o que é representado pela redução da taxa de acúmulo do nutriente após 150 DAC, e decréscimo nos resultados de teor de N no tecido vegetal e Índice SPAD. O nutriente que não é absorvido pela cultura irá interagir com o solo, ficando ligado as cargas negativas ou positivas, no caso do amônio e do nitrato, respectivamente. Formas que não estão associadas a CTC do solo, permanecem em solução, onde estarão susceptíveis à lixiviação após chuvas intensas que promovam a percolação da água infiltrada (CAMERON; DI; MOIR, 2013). Takeda et al. (2021) identificaram que o aumento de dose de N promoveu incremento nas perdas do nutriente.

A solubilização da ureia para aplicação via fertirrigação irá originar íons NH_4^+ , que na solução do solo serão nitrificados, formando NO_3^- . O nitrato é uma forma de N mais susceptível a perdas devido à alta solubilidade e baixa interação desse íon com as cargas do solo. Solos agrícolas, em que houve a correção do pH, a predominância de cargas é negativa, favorecendo a lixiviação do NO_3^- (WANG et al., 2019). Bryla e Machado (2011) demonstraram que o uso de ureia na fertirrigação resultou em aumento imediato nos teores de amônio do solo, com posterior enriquecimento na concentração de nitrato, demonstrando o efeito da nitrificação.

A aplicação contínua de solução desde o início do ciclo produtivo pode ter promovido a saturação da CTC do solo com nutrientes. Wang et al. (2019) destaca que ocorre aumento acentuado na lixiviação do N quando a disponibilidade desse nutriente excede o requerimento pela cultura. O N permanece na solução do solo, sujeito a perdas por lixiviação. Nesse processo, os principais fatores que contribuem com o movimento de N em profundidade são a dose do fertilizante (WALLMAN; DELIN, 2022), o tipo de solo (WANG et al., 2019), e quantidade de precipitação pluviométrica (ZHENG et al., 2020). No mês de maio foram registrados 286 mm, o que somado aos dos meses anteriores, resulta em excesso de umidade no solo. Isso pode ter contribuído para o fluxo gravitacional da solução e lixiviação do N no solo. O que pode explicar a ausência de efeitos entre doses nesse período.

5.2 Aproveitamento do N fertilizante e rendimento agroindustrial da cana-de-açúcar

O uso de fertilizante enriquecido na adubação nitrogenada possibilita avaliar a recuperação do N pela cana-de-açúcar, bem como o movimento dos íons no solo, de forma precisa (TAKEDA et al., 2021). A aplicação de N via fertirrigação aumentou a disponibilidade do nutriente na solução do solo, elevando o enriquecimento do N-fertilizante. Bryla e Machado (2011) observaram que o uso de N via fertirrigação aumentaram os teores de N na solução do solo, como efeitos imediatos após a aplicação. Takeda et al. (2021) demonstraram o efeito do aumento das doses de fertilizantes no aumento da absorção de N pela cana-de-açúcar.

O aumento da dose de N resultou em maior marcação isotópica da solução após a primeira aplicação (março). De maneira semelhante, Vieira-Megda et al. (2015) observaram a elevação da abundância, principalmente na linha central. Na linha adjacente lateral, mais distante do ponto de aplicação do fertilizante marcado, os valores de $\delta^{15}\text{N}$ foram próximos aos valores de referência de abundância natural 0,366 %, demonstrando menor movimentação do N entre as linhas de cultivo.

Os maiores acúmulos de N durante o período próximo à primeira avaliação das análises isotópicas estão ligados a demanda nutricional da cultura. Na primeira avaliação, a cana-de-açúcar encontrava-se no período de crescimento de colmos, fase em que ocorrem as maiores extrações de N (LEITE et al., 2016). Nessa fase, aplicação de N via fertirrigação tem o potencial de obter maiores respostas. Nesse mesmo período (121 a 150 DAC) foram observados os maiores ganhos mensais no acúmulo de N. No mês seguinte, os tratamentos sob fertirrigação obtiveram o maior aumento mensal no ganho de biomassa. Em sistema fertirrigado, Kölln et al. (2023) observaram que na aplicação de N via fertirrigação, a taxa de acúmulo de N era crescente entre 100 e 200 DAC.

A redução no teor de N no tecido vegetal ao longo do ciclo ocorre devido a diluição na concentração do nutriente em função do aumento de biomassa total pela planta. Esse processo é natural e ocorre à medida que a planta cresce, influenciado pelo incremento da produção de biomassa promovido pelo manejo adotado (SANTANA et al., 2020). Isso irá influenciar o índice SPAD, que é correlacionado com o teor de N na folha (SHIBAEVA; MAMAEV; SHERUDILO, 2020). De forma semelhante, Rhein et al. (2017) observaram a redução do índice SPAD ao longo do ciclo de produção na cana-de-açúcar cultivada sob fertirrigação por gotejo.

A produtividade média dos tratamentos foi abaixo do projetado para a cana-de-açúcar nas condições estudadas. Ainda assim, a diferença de produtividade observada na fertirrigação e na aplicação convencional, considerando a mesma dose, demonstrou o potencial produtivo da fertirrigação. O manejo do N via fertirrigação possibilita maior produtividade porque o N entra

em contato com o sistema radicular através do processo de fluxo de massa (KÖLLN et al., 2023). Dessa forma, quando aplicado via fertirrigação, próximo do sistema radicular e em doses fracionadas no tempo, o aproveitamento do N do fertilizante é mais bem aproveitado pela cana-de-açúcar.

6 CONCLUSÕES

O fornecimento de N através da fertirrigação no período de maior acúmulo do nutriente possibilitou um incremento na disponibilidade do nutriente para a planta, resultando em maior absorção pela planta e maior produção de biomassa seca total, mesmo sem diferença na recuperação do N-fertilizante pela planta. Por outro lado, na fase de menor acúmulo de N e maior precipitação houve ausência de diferenças no efeito enriquecimento na solução do solo e na planta pelos tratamentos, conduzindo a uma maior recuperação pela menor dose.

Ao longo do ciclo produtivo, o uso da fertirrigação resultou em maior fornecimento de N para a cana-de-açúcar, refletindo em maior acúmulo do nutriente e ganho de biomassa. O resultado foi mais nítido na fase de crescimento de colmos, período no qual a planta apresenta a maior demanda nutricional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBUQUERQUE, A. W.; SÁ, L. A.; RODRIGUES, W. A. R.; MOURA, A. B.; OLIVEIRA FILHO, M. S. O. Growth and yield of sugarcane as a function of phosphorus doses and forms of application. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, p. 29-35, 2016. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n1p29-35>
- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. Atlas Irrigação: Uso de água na agricultura irrigada. 2 ed. Brasília: ANA, 2021. Disponível em: <http://www.ana.gov.br>
- ANAS, M.; LIAO, F.; VERMA, K. K.; SARWAR, M. A.; MAHMOOD, A.; CHEN, Z.; LI, Q.; ZENG, X.; LIU, Y.; LI, Y. Fate of nitrogen in agriculture and environment: agronomic, eco-physiological and molecular approaches to improve nitrogen use efficiency. **Biological Research**, v. 53, 2020. <https://doi.org/10.1186/s40659-020-00312-4>
- ANDRADE JUNIOR, A. S.; BASTOS, E. A.; RIBEIRO V. Q.; DUARTE, J. A. L.; BRAGA, D. L.; NOLETO, D. H. Níveis de água, nitrogênio e potássio por gotejamento subsuperficial em cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, p. 76-84, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2012000100011>
- ANTUNES, J. E. L.; FREITAS, A. D. S. de; OLIVEIRA, L. M. S.; LYRA, M. do C. C. P. de; FONSECA, M. A. C.; SANTOS, C. E. R. S.; OLIVEIRA, J. de P.; ARAÚJO, A. S. F. de; FIGUEIREDO, M. V. B. Sugarcane inoculated with endophytic diazotrophic bacteria: effects on yield, biological nitrogen fixation and industrial characteristics. **Annal of the Brazilian Academy of Sciences**, v. 91, p. 1-12, 2019. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201920180990>
- ARALDI, R.; SILVA, F. M. L.; ONO, E. O.; RODRIGUES, J. D.; Florescimento em cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, v. 40, p. 694-702, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782010005000033>
- AZAD, N.; BEHMANESH, J.; REZAVERDINEJAD, V.; ABBASI, F.; NAVABIAN, M. An analysis of optimal fertigation implications in different soils on reducing environmental impacts of agricultural nitrate leaching. **Scientific Reports**, v. 10, 7797, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64856-x>
- AZAD, N.; BEHMANESH, J.; REZAVERDINEJAD, V.; ABBASI, F.; NAVABIAN, M. Developing an optimization model in drip fertigation management to consider environmental issues and supply plant requirements. **Agricultural Water Management**, v. 208, p. 334-356, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.06.030>
- BAR-YOSEF, B. Advances in fertigation. **Advances in Agronomy**, Delaware, v. 65, p. 1-77, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60910-4](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60910-4)
- BARBOSA, A. M.; ZILLIANI, R. R.; TIRITAN, C. S.; SOUZA, G. M.; SILVA, M. A. Energy conversion efficiency in sugarcane cultivars as a function of production environments in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 150, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111500>

BONNET, G. D. Developmental stages (phenology). In: Moore, P.; Botha, F. C. **Sugarcane: Physiology, biochemistry, and functional biology**. Jonh Wiley & Son, New Delhi, India: Wiley Online Library, 2013. Chap 3, p. 35-53. <https://doi.org/10.1002/9781118771280.ch3>

BORDONAL, R. O.; CARVALHO, J. L. N.; LAL, R.; FIGUEIREDO, E. B.; OLIVEIRA, B. G.; La SCALA JR, N. Sustainability of sugarcane production in Brazil. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 38, 2018. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0490-x>

BORGES, C. D.; CARVALHO, J. L. N.; KÖLLN, O. T.; SANCHES, G. M.; SILVA, M. J.; CASTRO, S. G. Q.; CASTRO, S. A. Q.; SOUSA, L. L.; OLIVEIRA, J. V. C.; CANTARELLA, H.; VARGAS, V. P.; TSAI, S. M.; FRANCO, H. C. J. Can alternative N-fertilization methods influence GHG emissions and biomass production in sugarcane fields? **Biomass and Bioenergy**, v. 120, p. 21-27, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.10.017>

BOSCHIERO, B. N.; MARIANO, E.; TORRES-DORANTE, L. O.; SATTOLO, T. M. S.; OTTO, R.; GARCIA, P. L.; DIAS, C. T. S.; TRIVELIN, P. C. O. Nitrogen fertilizer effects on sugarcane growth, nutritional status, and productivity in tropical acid soils. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.117, p. 367-382, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10705-020-10074-w>

BOSCHIERO, B. N.; CASTRO, S. G. Q.; ROCHA, A. E. Q.; FRANCO, H. C. J.; CARVALHO, J. L. N.; SORIANO, H. L.; SANTOS, J. A.; BRESSIANI, J. A.; KÖLLN, O. T. Biomass production and nutrient removal of energy cane genotypes in Northeastern Brazil. **Crop Science**, v. 59, p. 379-391, 2019. <https://doi.org/10.2135/cropsci2018.07.0458>

BRACKIN, R.; NÄSHOLM, T.; ROBINSON, N.; GUILLOU, S.; VINALL, K.; LAKSHMANAN, P.; SCHMIDT, S.; INSELSBACHER, E. Nitrogen fluxes at the root-soil interface show a mismatch of nitrogen fertilizer supply and sugarcane root uptake capacity. **Scientific Reports**, v. 5, 2015. <https://doi.org/10.1038/srep15727>

BRYLA, D.; MACHADO, R. M. A. Comparative effects of nitrogen fertigation and granular fertilizer application on growth and availability of soil nitrogen during establishment of highbush blueberry. **Frontiers in Plant Science**, v. 2, 2011. <https://doi.org/10.3389/fpls.2011.00046>

BOTHA, F. C.; SCALIA, G.; MARQUARDT, A.; WATHEN-DUNN, K. Sink strength during sugarcane culm growth: size matters. **Sugar Tech**, 2023. <https://doi.org/10.1007/s12355-023-01273-0>

BULLER, L. S.; ROMERO, C. W. S.; LAMPARELLI, R. A. C.; FERREIRA, S. F.; BORTOLETO, A. P.; MUSSATO, S. I.; FORSTER-CARNEIRO, T. A spatially explicit assessment of sugarcane vinasse as a sustainable by-product. **Science of The Total Environment**, v. 15, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142717>

CAMERON, K.C.; DI, H. J.; MOIR, J. L. Nitrogen losses from the soil/plant system: a review. **Annals of Applied Biology**, v. 162, p. 145-173, 2013. <https://doi.org/10.1111/aab.12014>

CARDOZO, N. P.; BORDONAL, R. O.; La SCALA Jr., N. Greenhouse gas emission estimate in sugarcane irrigation in Brazil: is it possible to reduce it, and still increase crop yield? **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 3988-3997, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.040>

CASTRO, S. G. Q.; COELHO, A. P.; CASTRO, S. A. Q.; CHIACHIA, T. R. S.; CASTRO, R. A.; LEMOS, L. B. Fertilizer source and application method influence sugarcane production and nutritional status. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, 2023. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1099589>

CASTRO, S. G. Q.; ROSSI NETO, J.; KÖLLN, O. T.; BORGES, B. M. M. N.; FRANCO, H. C. J. Decision-making on the optimum timing for nitrogen fertilization on sugarcane ratoon. **Scientia Agricola**, v. 76, p. 236-242, 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/1678-992X-2017-0365>

CERVI, W. R.; LAMPARELLI, R. A. C.; SEABRA, J. E. A.; JUNGINGER, M.; van der HILST, F. Bioelectricity potential from ecologically available sugarcane straw in Brazil: A spatially explicit assessment. **Biomass and Bioenergy**, v. 122, p. 391-399, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.02.001>

CHALCO VERA, J.; PORTOCARRERO, R.; PIÑEIRO, G.; ACRECHE, M. M. Increases in nitrogen use efficiency decrease nitrous oxide emissions but can penalize yield in sugarcane. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 122, p. 41-57, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10705-021-10180-3>

CHEN, G.; TANG, Q.; LI, Y.; HUANG, Y.; LIN, B.; XU, L.; HUANG, H. Effects of sub-soil drip fertigation on sugarcane in field conditions. **Sugar Tech**, v. 14, p. 418-421, 2012. <https://doi.org/10.1007/s12355-012-0173-x>

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**, Brasília, DF, v.8, n.4, Abril de 2022a. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>. Acesso em fevereiro de 2023.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**, Brasília, DF, v.9, n.3, dezembro de 2022b. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>. Acesso em fevereiro de 2023.

COSTA, G. G.; SANTOS, I. F. S.; BARROS, R. M.; TIAGO FILHO, G. L.; MACHADO, G. O., BARBEDO, M. D. G. Mapping and energy analysis of Brazilian bioenergy power potential for three agricultural biomass byproducts. **Journal of Cleaner Production**, v. 349, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131466>

CRONQUIST, A. An integrated system of classification of flowering plants. **Columbia University Press**, New York, USA, 1981.

CUNHA, F. N.; SILVA, N. F.; SOUSA, A. E. C.; TEIXEIRA, M. B.; SOARES, F. A. L.; VIDAL, V. M. Yield of sugarcane submitted to nitrogen fertilization and water depths by subsurface drip irrigation. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, p. 841-846, 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n9p841-846>

DALRI, A. B.; CRUZ, R. L. Produtividade da cana-de-açúcar fertirrigada com N e K via gotejamento subsuperficial. **Engenharia Agrícola**, v. 28, p. 516-524, 2008.

<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162008000300012>

DIAS, H. B.; SENTELHAS, P. C. Dimensioning the impact of irrigation on sugarcane yield in Brazil. **Sugar Tech**, v. 21, p. 29-37, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12355-018-0619-x>

DIAS, H. B.; SENTELHAS, P. C. Sugarcane yield gap analysis in Brazil – A multi-model approach for determining magnitudes and causes. **Science of the Total Environment**, vs. 637-638, p. 1127-1136, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.017>

DINGRE, S. K.; GORANTIWAR, S.D. Determination of the water requirement and crop coefficient values of sugarcane by field water balance method in semiarid region.

Agricultural Water Management, v.232, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106042>

DLAMINI, N. E.; ZHOU, M. Soils and seasons effect on sugarcane ratoon yield. **Field Crops Research**, v. 284, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108588>

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. Efeito da água no rendimento das culturas. Campina Grande: UFPB, 1994. 306p. Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 33.

EMDE, D.; HANNAM, K. D.; MOST, I.; NELSON, L. M.; JONES, M. D. Soil organic carbon in irrigated agricultural systems: A meta-analysis. **Global Change Biology**, v. 17, p.3898-3910, 2021. <https://doi.org/10.1111/gcb.15680>

ENDRES, L.; SANTOS, C. M.; SILVA, J. V.; BARBOSA, G. V. S.; SILVA, A. L. J.; FROEHLICH, TEIXEIRA, M. M. Inter-relationship between photosynthetic efficiency, $\Delta^{13}\text{C}$, antioxidant activity and sugarcane yield under drought stress in field conditions. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 205, p. 433-446, 2019. <https://doi.org/10.1111/jac.12336>

ESPERANCINI, M. S.; AFONSO, P. F.; GAVA, G. J.; VILLAS BOAS, R. L. Economically optimal dose of nitrogen in sugar cane applied by dripping fertigation. **Brazilian Journal of Irrigation and Drainage**, v. 1, p. 28-39, 2015. <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2015v1n1>

FAOSTAT. Food and Agriculture organization of the United Nations, 2023. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#home>. Acesso em 01 fevereiro de 2023.

FARZADFAR, S.; KNIGHT, J. D.; CONGREVES, K. A.; Soil organic nitrogen: an overlooked but potentially significant contribution to crop nutrition. **Plant and Soil**, v. 462, p. 7-23, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11104-021-04860-w>

FRANCO, H. C. J.; OTTO, R.; FARONI, C. E.; VITTI, A. C.; OLIVEIRA, E. C. A.; TRIVELIN, P. C. O. Nitrogen in sugarcane derived from fertilizer under Brazilian field conditions. **Fields Crops Research**, v.121, p. 29-41, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.11.011>

FAUSTO, B. A concise history of Brazil. Cambridge University Press, 2 ed., 2014.

<https://doi.org/10.1017/CBO9781139567060>

GAVA, G. J. C.; SCARPARE, F. V.; CANTARELLA, H.; KÖLLN, O. T.; RUIZ-CORRÊA, S. T.; ARLANCH, A. B.; TRIVELIN, P. C. O. Nitrogen source contribution in sugarcane-inoculated plants with diazotrophic bacterias under urea-N fertigation management. **Sugar Tech**, v. 21, p. 462-470, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12355-018-0614-2>

GUO, Y.; REN, G.; ZHANG, K.; LI, Z.; MIAO, Y.; GUO, H. Leaf senescence: progression, regulation, and application. **Molecular Horticulture**, v. 1, 2021. <https://doi.org/10.1186/s43897-021-00006-9>

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Painel de Indicadores – Indicadores Agropecuários. Disponível em: <https://ibge.gov.br/indicadores>. Acesso em 05 abril de 2023.

JORIS, H. A. W.; VITTI, A. C.; FERRAZ-ALMEIDA, R.; OTTO, R.; CANTARELLA, H. Long-term N fertilization reduces uptake of N from fertilizer and increases the uptake of N from soil. **Scientific Reports**, v. 10, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75971-0>

KERDAN, I. G.; GIAROLA, S.; HAWKES, A. implications of future natural gas demand on sugarcane production, land use change and related emissions in Brazil. **Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems**, v. 8, p. 304-327, 2020. <https://doi.org/10.13044/j.sdewes.d7.0300>

KÖLLN, O. T.; GAVA, G. J. C.; MARIANO, E.; CANTARELLA, H.; PANUTTI, L. E.; URIBE, R. M.; ARLANCH, A. B.; PALUDETTO, A.; PEREIRA, C. D.; TRIVELIN, P. C. O. Biomass accumulation and growth curve in sugarcane fertigated with nitrogen doses. **Australian Journal of Crop Science**, v. 17, p. 244-253, 2023. <https://doi.org/10.21475/ajcs.23.17.03.p3079>

KÖLLN, O. T.; BOSCHIERO, B. N.; FRANCO, H. C. J.; SOLDI, M. C. M.; SANCHES, G. M.; CASTRO, S. G. Q.; TRIVELIN, P. C. O. Preferential mineral N form uptake by sugarcane genotypes contrasting in nitrogen use efficiency. **Experimental Agriculture**, v. 58, 2022. <https://doi.org/10.1017/S0014479722000229>

KÖLLN, O. T.; GAVA, G. J. C.; CANTARELLA, H.; SILVA, S. R.; TRIVELIN, P. C. O. Sugarcane yield loss due to water and nitrogen deficiencies evaluated by carbon isotopic discrimination method. **Emirates Journal of Food and Agriculture**, v. 33, p. 751-763, 2021. <https://doi.org/10.9755/ejfa.2021.v33.i9.2756>

KOLTUN, A.; MANIERO, R. A.; VITTI, M.; SETTA, N.; GIEHL, R. F. H.; LIMA, J. E.; FIGUEIRA, A. Functional characterization of the sugarcane (*Saccharum* spp.) ammonium transporter AMT2;1 suggests a role in ammonium root-to-shoot translocation. **Frontiers in Plant Science**, v. 18, 2022. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1039041>

LEITE, J. M.; CIAMPITTI, I. A.; MARIANO, E.; MEGDA, M. X.V.; TRIVELIN, P. C. O. Nutrient partitioning and stoichiometry in unburnt sugarcane ratoon at varying yield levels. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, p. 1-14, 2016. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00466>

LIU, J.; BASNAYAKE, J.; JACKSON, P. A.; CHEN, X.; ZHAO, J.; ZHAO, P.; YANG, L.; BAI, Y.; XIA, H.; ZAN, F.; QIN, W.; YANG, K.; YAO, L. ZHAO, L.; ZHU, J.; LAKSHMANAN, P.; ZHAO, X.; FAN, Y. Growth and yield of sugarcane genotypes are strongly correlated across irrigated and rainfed environments. **Field Crops Research**, v. 196, p. 418-425, 2016. <https://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2016.07.022>

MA, Z. ; WU, W.; ALATALO, J. M.; FU, W.; BAI, Y. Optimal water-fertilizer combinations for efficient nitrogen fixation by sugarcane at different stages of growth. **WATER**, v. 13, 2021. <https://doi.org/10.3390/w13202895>

MARAFON, A. C. **Análise quantitativa de crescimento em cana-de-açúcar: Uma introdução ao procedimento prático**. Embrapa Tabuleiros Costeiros, Aracaju, v. 168, n. 1, p. 31, 2012. Disponível em: http://www.cpatc.embrapa.br/publicacoes_2012/doc_168.pdf

MARIANO, E.; LEITE, J. M.; VIEIRA-MEGDA, M. X.; CIAMPITTI, I. A.; VITTI, A. C.; FARONI, C. E.; FRANCO, H. C. J.; TRIVELIN, P. C. O. Biomass and nutrient content by sugarcane as affected by fertilizer nitrogen sources. **Crop Science**, v. 56, p. 1234-1244, 2016. <https://doi.org/10.2135/cropsci2015.06.0349>

MARTINS, M. T. B.; SOUZA, W. R.; CUNHA, B. A. D. B.; BASSO, M. F.; OLIVEIRA, N. G.; VINECKY, F.; MARTINS, P. K.; OLIVEIRA, P. A.; ARENQUE-MUSA, B. C.; SOUZA, A. P.; BUCKERIDGE, M. S.; KOBAYASHI, K.; QUIRINO, B. F.; MOLINARI, H. B. C. Characterization of sugarcane (*Saccharum* spp.) leaf senescence: implications for biofuel production. **Biotechnology for Biofuels**, v. 9, 2016. <https://doi.org/10.1186/s13068-016-0568-0>

MELLAND, A. R.; BOSOMWORTH, B.; COOK, F. J.; SILBURN, D.M.; EYLES, M. Impacts of sugarcane (*Saccharum* sp.) soil and fertiliser management practices on nutrients and sediment in plot-scale runoff from simulated rainfall. **Soil and Tillage Research**, v. 216, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105259>

MENDONÇA, M. F.; DANTAS NETO, J.; SILVA, P. F.; OLIVEIRA, E. C. A. Yield and technological quality of sugarcane under irrigation depths and nitrogen fertilization. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 24, p. 482-489, 2020. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v24n7p482-489>

MOORE, P. H.; PATERSON, A. H.; TEW, T. Sugarcane: The crop, the plant and domestication. In: Moore, P.; Botha, F. C. **Sugarcane: Physiology, biochemistry, and functional biology**. John Wiley & Son, New Delhi, India: Wiley Online Library, 2013. Chap 1, p. 1-18. <https://doi.org/10.1002/9781118771280.ch1>

MUKHERJEE, E.; GANTAIT, S. Genetic transformation in sugar beet (*Beta vulgaris* L.): technologies and applications. **Sugar Tech**, v.25, p. 269-281, 2023. <https://doi.org/10.1007/s12355-022-01176-6>

NASCIMENTO, F. N.; ANDRADE JUNIOR, A. S.; BASTOS, E. A.; RIBEIRO, V. Q.; LOPES, A. S. Agro-industry production of sugarcane grown using subsurface drip fertigation with N and K. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, p. 1343-1354, 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2018001200007>

NETO, E. B.; BARRETO, L. P.; **Análises químicas e bioquímicas em plantas**. Editora Universitária da UFRPE, Recife, 261p.:il. 2011.

NG KEE KWONG, K. F.; PAUL, J. P.; DEVILLE, J. Drip-fertigation – A means for reducing fertilizer nitrogen to sugarcane. **Experimental Agriculture**, v. 35, p. 31-37, 1999. <http://dx.doi.org/doi:10.1017/s0014479799001040>

OLIVEIRA, D. M. S.; CHERUBIN, M. R.; FRANCO, A. L. C.; SANTOS, A. S.; GELAIN, J. G.; DIAS, N. M. S.; DINIZ, T. R.; ALMEIDA, A. N.; FEIGL, B. J.; DAVIES, C. A.; PAUSTIAN, K.; KARLEN, D. L.; SMITH, P.; CERRI, C. C.; CERRI, C. E. P. Is the expansion of sugarcane over pasture lands a sustainable strategy for Brazil's bioenergy industry? **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 102, p. 346-355, 2019.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.012>

OLIVEIRA, R. I.; MEDEIROS, M. R. F. A.; FREIRE, C. A.; FREIRE, F. J.; SIMÕES NETO, D. E.; OLIVEIRA, E. C. A. Nutrient partitioning and nutritional requirement in sugarcane. **Australian Journal of Crop Science**, v. 10, p. 69-75, 2016.

<https://search.informit.org/doi/10.3316/informit.936795392927333>

OLIVEIRA, E. C. A.; FREIRE, F. J.; OLIVEIRA, A. C.; SIMÕES NETO, D. E.; ROCHA, A. T.; CARVALHO L. A. Produtividade, eficiência de uso da água e qualidade tecnológica de cana-de-açúcar submetida a diferentes regimes hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, p. 617-625, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011000600007>

OLIVEIRA, E. C. A.; FREIRE, F. J.; OLIVEIRA, R. I.; SANTOS FREIRE, M. B. G.; SIMÕES NETO, D. E.; SILVA, S. A. M. Extração e exportação de nutrientes por variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 34, p. 1343-1352, 2010a. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000400031>

OLIVEIRA, E. C. A.; OLIVEIRA, R. I.; ANDRADE, B. M. T.; FREIRE, F. J.; LIRA JÚNIOR, M. A.; MACHADO, P. R. Crescimento e acúmulo de matéria seca em variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.14, n.9, p.951–960, 2010b. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662010000900007>

OTTO, R.; FERRAZ-ALMEIDA, R.; SANCHES, G. M.; LISBOA, I. P.; CHERUBIM, M. R.; Nitrogen fertilizer consumption and nitrous oxide emissions associated with ethanol production – A national-scale comparison between Brazilian sugarcane and corn in the United States. **Journal of Cleaner Production**, v. 350, 2022a.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131482>

OTTO, R.; MACHADO, B. A.; SILVA, A. C. M.; CASTRO, S. G. Q.; LISBOA, I. P. Sugarcane pre-sprouted seedlings: A novel method for sugarcane establishment. **Fields Crops Research**, v.275, 2022b. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108336>

OTTO, R.; PEREIRA, G. L.; TENELI, S.; CARVALHO, J. L. N.; LAVRES, J.; CASTRO, S. A. Q.; LISBOA, I. P.; SERMARINI, R. A. Planting legume cover crop as a strategy to replace synthetic N fertilizer applied for sugarcane production. **Industrial Crops and Products**, v. 156, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112853>

OTTO, R.; CASTRO, S. A. Q.; MARIANO, E.; CASTRO, S. G. Q.; FRANCO, H. C. J.; TRIVELIN, P. C. O. Nitrogen use efficiency for sugarcane-biofuel production: what is next? **BioEnergy Research**, v. 9, p. 1272-1289, 2016. <https://doi.org/10.1007/s12155-016-9763-x>

- OTTO, R.; FRANCO, H. C. J.; FARONI, C. E.; VITTI, A. C.; OLIVEIRA, E. C. A.; SERMARINI, R. A.; TRIVELIN, P. C. O. The role of nitrogen fertilizers in sugarcane roots biomass under field conditions. **Agricultural Sciences**, v. 5, n. p. 1527-1538, 2014. <http://dx.doi.org/10.4236/as.2014.514164>
- PAN, B.; LAM, S. K.; MOSIER, A.; LUO, Y.; CHEN, D. Ammonia volatilization from synthetic fertilizers and its mitigation strategies: A global synthesis. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 232, p. 283-289, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.08.019>
- PAVANI, G.; MALHOTRA, P. K.; VERMA, S. K. Flowering in sugarcane-insights from the grasses. **Biotech**, v.13, 2023. <https://doi.org/10.1007/s13205-023-03573-4>
- PEREIRA, W.; OLIVEIRA, R. P.; PEREIRA, A.; SOUSA, J. S.; SCHULTZ, N.; URQUIAGA, S.; REIS, V. M. Nitrogen acquisition and ¹⁵N-fertiliser recovery efficiency of sugarcane cultivar RB92579 inoculated with five diazotrophs. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 119, p. 37-50, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10705-020-10100-x>
- PICOLI, M. C. A.; MACHADO, P. G. Land use change: the barrier for sugarcane sustainability. **Biofuels, Bioproducts & Biorefining**, v. 15, p. 1591-1603, 2021. <https://doi.org/10.1002/bbb.2270>
- PIERRE, J. S.; PERROUX, J. M.; RAE, A. L. Screening for sugarcane root phenes reveals that reducing tillering does not lead to an increased root mass fraction. **Frontiers in Plant Science**, v. 10, 2019. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00119>
- QIN, N.; LU, Q.; FU, G.; WANG, J.; FEI, K.; GAO, L. Assessing the drought impact on sugarcane yield based on crop water requirements and standardized precipitation evapotranspiration index. **Agricultural Water Management**, v. 275, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.108037>
- RAM, B.; HEMAPRABHA, G.; SINGH, B. D.; APPUNU, C. History and current status of sugarcane breeding, germplasm development and molecular biology in India. **Sugar Tech**, v. 24, p. 4-29, 2022. <https://doi.org/10.1007/s12355-021-01015-0>
- RAVIKUMAR, V.; VIJAYAKUMAR, G.; SIMUNEK, J.; CHELLAMUTHUA, S.; SANTHI, R.; APPAVU, K. Evaluation of fertigation scheduling for sugarcane using a vadose zone flow and transport model. **Agricultural Water Management**, v. 98, p. 1431-1440, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.04.012>
- RHEIN, A. F. L.; SILVA, M. A. Nitrogen doses on physiological attributes and yield of sugarcane grown under subsurface drip fertigation. **Journal of Plant Nutrition**, v. 40, p. 227-238, 2017. <https://doi.org/10.1080/01904167.2016.1237646>
- RHEIN, A. F. L.; PINCELLI, R. R.; ARANTES, M. T.; DELLABIGLIA, W. J.; KÖLLN, O. T.; SILVA, M. A. Technological quality and yield of sugarcane grown under nitrogen doses via subsurface drip fertigation. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, p. 209-214, 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n3p209-214>

ROBISON, N.; VOGT, J.; LAKSHMANAN, P.; SCHMIDT, S. Nitrogen physiology of sugarcane. In: Moore, P.; Botha, F. C. **Sugarcane: Physiology, biochemistry, and functional biology**. John Wiley & Son, New Delhi, India: Wiley Online Library, 2013. Chap 8, p. 169-195. <https://doi.org/10.1002/9781118771280.ch8>

ROSSETO, R.; RAMOS, N. P.; MATOS PIRES, R. C.; XAVIER, M. A.; CANTARELLA, H.; LANDELL, M. G. A. Sustainability in sugarcane supply chain in Brazil: issues and way forward. **Sugar Tech**, v. 24, p. 941-966, 2022. <https://doi.org/10.1007/s12355-022-01170-y>

SANTANA, A. C. A.; OLIVEIRA, E. C. A.; SILVA, V. S. G.; SANTOS, R. L.; SILVA, M. A.; F. J. FREIRE. Critical nitrogen dilution curves and productivity assessments for plant cane. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 24, p. 244-251, 2020. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v24n4p244-251>

SANTOS, C. M.; ENDRES, L.; SILVA, A. C. S.; SILVA, J. V.; BARBOSA, G. V. S.; FROEHLICH, A.; TEIXEIRA, M. M. Water relations and osmolite accumulation related to sugarcane yield under drought stress in a tropical climate. **International Journal of Plant Production**, v.13, p. 227-239, 2019a. <https://doi.org/10.1007/s42106-019-00050-y>

SANTOS, L. C.; COELHO, R. D.; BARBOSA, F. S.; LEAL, D. P. V.; FRAGA JÚNIOR, E. F.; BARROS, T. H. S.; LIZCANO, J. V.; RIBEIRO, N. L. Influence of deficit irrigation on accumulation and partitioning of sugarcane biomass under drip irrigation in commercial varieties. **Agricultural Water Management**, v. 221, p. 322-333, 2019b. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.05.013>

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**, 5 ed., rev. ampl, Brasília, DF: EMBRAPA, 2018.

SANTOS, R. D.; SANTOS, H. G.; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C.; SHIMIZU, S. H.; **Manual de descrição e coleta de solo no campo**, 7 ed. rev. ampl. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do solo, 2015.

SHIBAEVA, T. G.; MAMAEV, A. V.; SHERUDILO, E. G. Evaluation of a SPAD-502 Plus chlorophyll meter to estimate chlorophyll content in leaves with interveinal chlorosis. **Russian Journal of Plant Physiology**, v. 67, p. 690-696, 2020. <https://doi.org/10.1134/S1021443720040160>

SILVA, N. F.; CUNHA, F. N.; TEIXEIRA, M. B.; SOARES, F. A. L.; SILVA, E. C.; COELHO, R. D.; CABRAL FILHO, F. R.; SILVA, L. C. M.; CAVALCANTE, W. S. S. Biomass accumulation and industrial yield of irrigated sugarcane submitted to sources and doses of nitrogen grown in cerrado oxisol. **Journal of Agricultural Science**, v. 11, p. 167-168, 2019. <https://doi.org/10.5539/jas.v11n9p167>

SILVA, S.; DANTAS NETO, J.; TEODORO, I.; SANTOS, M. A. L.; ANDRADE, A. B. A.; CORDÃO, M. A. Qualidade da irrigação por gotejamento em cultivos consecutivos de cana-de-açúcar. **Agropecuária Científica no Semiárido**, v. 11, n. 2, p. 01-08, 2015. <http://dx.doi.org/10.30969/acsa.v11i2.620>

- SILVA, T. G. F.; MOURA, M. S. B.; ZOLNIER, S.; SOARES, J. M.; VIEIRA, V. J. S.; WALTER, G. F. JUNIOR. Requerimento hídrico e coeficiente de cultura da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, p. 64-71, 2012. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000100009>
- SOUSA JUNIOR, J. G. de A.; CHERUBIN, M. R.; OLIVEIRA, B. G.; CERRI, C. E. P.; CERRI, C. C; FEIGL, B. J. Three-year soil carbon and nitrogen responses to sugarcane straw management. **Bioenergy Research**, v. 11, p. 249-261, 2018. <https://doi.org/10.1007/s12155-017-9892-x>
- TAKEDA, N.; FRIEDL, J.; ROWLINGS, D.; ROSA, D.; SCHEER, C.; GRACE, P. No sugar yield gains but larger fertiliser ¹⁵N loss with increasing N rates in an intensive sugarcane system. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.121, p99-113, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10705-021-10167-0>
- TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**, 3 ed., rev. ampl, Brasília, DF: EMBRAPA, 2017.
- TENELLI, S.; OTTO, R.; BORDONAL, R. O.; CARVALHO, J. L. N. How do nitrogen fertilization and cover crop influence soil C-N stocks and subsequent yields of sugarcane? **Soil and Tillage Research**, v. 211, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.104999>
- THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. The water balance. Centerton, NJ: Drexel Institute of Technology - Laboratory of Climatology, 1955. 104p. (Publications in Climatology, vol. VIII, n.1)
- VANDENBERGHE, L. P. S.; VALLADARES-DIESTRA, K. K.; BITTENCOURT, G. A.; ZEVALLOS TORRES, L. A.; VIEIRA, S.; KARP, S. G.; SYDNEY, E. B.; de CARVALHO, J. C.; THOMAZ SOCCOL, C. R. Beyond sugar and ethanol: The future of sugarcane biorefineries in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 167, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112721>
- VALE, D. W.; PRADO, R. M.; AVALHÃES, C. C.; HOJO, R. H. Omissão de macronutrientes na nutrição e no crescimento da cana-de-açúcar cultivada em solução nutritiva. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 6, p. 189-196, 2011. <http://dx.doi.org/10.5039/agraria.v6i2a550>
- VASANTHA, S.; KUMAR, R. A.; TAYADE, A. S.; KRISHNAPRIYA, V.; RAM, BAKSHI, R.; SOLOMON, S. Physiology of sucrose productivity and implications of ripeners in sugarcane. **Sugar Tech**, v. 24, p. 715-731, 2022. <https://doi.org/10.1007/s12355-021-01062-7>
- VIEIRA-MEGDA, M. X.; MARIANO, E.; LEITE, J. M.; FRANCO, H. C. J.; VITTI, A. C.; MEGDA, M. M.; KHAN, S. A.; MULVANEY, R. L.; TRIVELIN, P. C. O. Contribution of fertilizer nitrogen to the total nitrogen extracted by sugarcane under Brazilian field conditions. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 101, p. 241-257, 2015. <https://doi.org/10.1007/s10705-015-9676-7>
- WALLMAN, M.; DELIN, S. Nitrogen leaching from tile-drained fields and lysimeters receiving contrasting rates and sources of nitrogen. **Soil Use and Management**, v. 38, p. 596-610, 2022. <https://doi-org.ez19.periodicos.capes.gov.br/10.1111/sum.12724>

WANDERLEY, L. R. S.; OLIVEIRA, E. C. A.; FREIRE, F. J.; SIMÕES NETO, D. E.; SANTOS, R. L. Nutritional requirement by irrigated Brazilian sugarcane varieties. **Sugar Tech**, v. 23, p. 762-775, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12355-020-00921-z>

WANDERLEY, L. R. S. **Nutrição de variedades de cana-de-açúcar fertirrigadas por gotejo subsuperficial**. 2018. 77 f. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2018.

WANG, Y.; YING, H.; YIN, Y.; ZHENG, H.; CUI, Z. Estimating soil nitrate leaching of nitrogen fertilizer from global meta-analysis. **Science of The Total Environment**, v. 657, p.96-102, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.029>

WEILER, D. A.; MORO, V. J.; AWE, G. O.; OLIVEIRA, D. M. S.; CERRI, C. E. P.; REICHERT, J. M.; GIACOMINI, S. J. Carbon balance in sugarcane areas under different tillage systems. **BioEnergy Research**, v. 12, p. 778-788, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12155-019-10002-z>

WONPRASAID, S.; XIE, X.; MACHIKOWA, T. Long-term effects of drip irrigation on water use efficiency, yield, and net profit of sugarcane production. **Sugar Tech**, v.25, p. 491-495, 2023. <https://doi.org/10.1007/s12355-023-01266-z>

ZAMBROSI, F. C. B.; MESQUITA G. L.; TANAKA, F. A. O. sugarcane demands lower nitrogen supply to sustain mesophyll chloroplast integrity than maximum shoot growth. **Sugar Tech**, 2023. <https://doi.org/10.1007/s12355-023-01264-1>

ZHENG, W.; WANG, S.; TAN, K.; LEI, Y. Nitrate accumulation and leaching potential is controlled by land-use and extreme precipitation in a headwater catchment in the North China Plain. **Science of The Total Environment**, v. 707, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136168>

ZHOU, M. Genotype and environmental effects on sugarcane flowering in South Africa. **Sugar Tech**, v. 24, p. 430-437, 2022. <https://doi.org/10.1007/s12355-021-01025-y>

APÊNDICE A – Resumo dos resultados análises estatísticas*Análise de Variância (ANOVA)*

Abundância – 1ª Época		Abundância – 1ª Época	
Efeito	Pr > F	Efeito	Pr > F
Dose	0.0005	Dose	0.6716
Local	<.0001	Local	<.0001
Dose*Local	0.0036	Dose*Local	0.9085

NDDF (%) – 1ª Época		NDDF (%) – 2ª Época	
Efeito	Pr > F	Efeito	Pr > F
Dose	0.0032	Dose	0.6470

NDDF (kg) – 1ª Época		NDDF (kg) – 3ª Época	
Efeito	Pr > F	Efeito	Pr > F
Dose	0.0014	Dose	0.0515

Recuperação – 1ª Época		Recuperação – 2ª Época	
Efeito	Pr > F	Efeito	Pr > F
Dose	0.9117	Dose	0.0114

NSSDF (%)		TNSS (%)	
Efeito	Pr > F	Efeito	Pr > F
Época	0.0067	Época	0.0037
Dose	0.3543	Dose	0.1654
Profundidade	0.0253	Profundidade	0.0183
Época*Dose	0.0294	Época*Dose	0.0248
Época*Profundidade	0.2626	Época*Profundidade	0.1859
Dose*Profundidade	0.9297	Dose*Profundidade	0.3688

Análise de contraste ortogonal

Perfilhamento			
<i>Sem adubação x Com Adubação</i>		<i>Sem adubação x Adubação Convencional</i>	
Tempo	Fc	Tempo	Fc
100DAC	0,530 ^{ns}	100DAC	0,713 ^{ns}
149DAC	1,393 ^{ns}	149DAC	0,002 ^{ns}
210DAC	0,000 ^{ns}	210DAC	3,758*
257DAC	4,252*	257DAC	24,996***
308DAC	2,212 ^{ns}	308DAC	0,839 ^{ns}

Diâmetro de colmos			
<i>Sem adubação x Com Adubação</i>		<i>Sem adubação x Adubação Convencional</i>	
Tempo	Fc	Tempo	Fc
100DAC	0,977 ^{ns}	100DAC	1,687 ^{ns}
149DAC	3,554*	149DAC	1,112 ^{ns}
210DAC	0,559 ^{ns}	210DAC	0,384 ^{ns}
257DAC	2,062 ^{ns}	257DAC	1,844 ^{ns}

Altura de colmos			
<i>Sem adubação x Com Adubação</i>		<i>Sem adubação x Adubação Convencional</i>	
Tempo	Fc	Tempo	Fc
100DAC	0,244 ^{ns}	100DAC	7,137**
149DAC	20,283*	149DAC	26,327*
210DAC	10,556*	210DAC	34,211*
257DAC	10,556*	257DAC	34,211*

<i>Biomassa total</i>			
<i>Sem adubação x Com Adubação</i>		<i>Sem adubação x Adubação Convencional</i>	
Tempo	Fc	Tempo	Fc
98DAC	0,146 ^{ns}	100DAC	4,497*
141DAC	0,497 ^{ns}	149DAC	1,524 ^{ns}
204DAC	2,757 ^{ns}	210DAC	7,471**
272DAC	6,325**	257DAC	3,641*

<i>Biomassa total</i>			
<i>Sem adubação x Com Adubação</i>		<i>Sem adubação x Adubação Convencional</i>	
Tempo	Fc	Tempo	Fc
98DAC	0,129 ^{ns}	98DAC	4,490*
141DAC	0,624 ^{ns}	141DAC	1,619 ^{ns}
204DAC	2,362 ^{ns}	204DAC	9,853***
272DAC	6,334**	272DAC	3,917*
308DAC	10,304***	308DAC	5,687**

<i>Biomassa folha seca</i>			
<i>Sem adubação x Com Adubação</i>		<i>Sem adubação x Adubação Convencional</i>	
Tempo	Fc	Tempo	Fc
98DAC	3,555*	98DAC	1,997 ^{ns}
141DAC	0,207 ^{ns}	141DAC	0,117 ^{ns}
204DAC	2,175 ^{ns}	204DAC	1,615 ^{ns}
272DAC	5,722**	272DAC	3,445*

Biomassa folha verde			
<i>Sem adubação x Com Adubação</i>		<i>Sem adubação x Adubação Convencional</i>	
Tempo	Fc	Tempo	Fc
98DAC	0,360 ^{ns}	98DAC	3,927 [*]
141DAC	0,408 ^{ns}	141DAC	0,980 ^{ns}
204DAC	6,297 ^{**}	204DAC	4,079 [*]
272DAC	1,151 ^{ns}	272DAC	1,685 ^{ns}

Biomassa ponteiro			
<i>Sem adubação x Com Adubação</i>		<i>Sem adubação x Adubação Convencional</i>	
Tempo	Fc	Tempo	Fc
98DAC	0,360 ^{ns}	98DAC	3,927 [*]
141DAC	0,408 ^{ns}	141DAC	0,980 ^{ns}
204DAC	6,297 ^{**}	204DAC	4,079 [*]
272DAC	1,151 ^{ns}	272DAC	1,685 ^{ns}

Rendimento agroindustrial			
<i>Sem adubação x Com Adubação</i>		<i>Sem adubação x Adubação Convencional</i>	
Variável	Fc	Variável	Fc
TCH	14,737 ^{***}	TCH	14,737 ^{***}
ATR	8,226 ^{**}	ATR	8,226 ^{**}
PC	8,421 ^{**}	PC	8,421 ^{**}
TAH	23,915 ^{***}	TAH	23,915 ^{***}

Análise fatorial

Parâmetros biométricos			
Fonte de variação	NPI	DMC	EMC
Tratamento	0,8546	0,1744	0,0144
Tempo	0,0000	0,0000	0,0005
Bloco	0,1758	0,8308	0,0000
Tratamento*Tempo	0,5435	0,8932	0,8363
CV (%)	14,84	11,76	5,97
Média geral	17,68	2,16	174,54

Obs: NPI = número de perfilhos industrializáveis por m linear; DMC = Diâmetro médio do colmo; EMC = Estatura média dos colmos; e I.S. = Índice SPAD.

Acúmulo de biomassa					
Fonte de variação	BT	CO	FS	FV	PO
Tratamento	0,0405	0,0138	0,0613	0,0268	0,6710
Tempo	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0045
Bloco	0,1001	0,3207	0,3956	0,0437	0,3133
Tratamento*Tempo	0,9445	0,8249	0,3641	0,6042	0,3941
CV (%)	25,69	21,66	36,38	29,57	55,57
Média geral	134,27	87,88	6,43	11,23	30,13