

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO

Joel José de Andrade

**EFICIÊNCIA DA ADUBAÇÃO NITROGENADA FOLIAR NA CANA-
DE-AÇÚCAR**

RECIFE

2021

Joel José de Andrade
Engenheiro Agrônomo

Eficiência da adubação nitrogenada foliar na cana-de-açúcar

Dissertação 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 Mestre em Ciências do Solo

Orientador: Prof. Dr. Emídio Cantídio Almeida de Oliveira

**Recife
2021**

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.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

A553e Andrade, Joel José de
 Eficiência da adubação nitrogenada foliar na cana-de-açúcar / Joel José de Andrade. - 2021.
 72 f. : il.

 Orientador: Emidio Cantídio Almeida de Oliveira.
 Inclui referências e apêndice(s).

 Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Recife, 2021.

 1. Nutrição vegetal. 2. Assimilação de N. 3. Manejo da adubação. 4. Lixiviação N-fertilizante.. I. Oliveira, Emidio Cantídio Almeida de, orient. II. Título

CDD 631.4

JOEL JOSÉ DE ANDRADE

Eficiência da adubação nitrogenada foliar na cana-de-açúcar

Dissertação 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 Mestre em Agronomia – Ciência do solo.

Aprovada em 06 de agosto de 2021

Prof. Dr. Emídio Cantídio Almeida de Oliveira

Orientador

Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE)

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr Paulo Cesar Ocheuze Trivelin

Universidade de São Paulo / Centro de Energia Nuclear na Agricultura (USP/CENA)

Prof. Dr Alexandre Campelo de Oliveira

Universidade Federal Rural de Pernambuco / Unidade Acadêmica de Serra Talhada
(UFRPE/UAST)

AGRADECIMENTOS

À Deus pela concessão da força e sabedoria necessária para enfrentar os desafios com coragem e entusiasmo.

À minha família pelo apoio, pela inspiração e pela compreensão dos momentos ausentes. Os planos e metas ganham outra dimensão quando são construídos em conjunto.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pela concessão da bolsa de mestrado.

À Japungu Agroindustrial LTDA pela parceria, pelo incentivo e pelo suporte dado em todas as fases dessa pesquisa.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE pela infraestrutura e recursos humanos necessário ao andamento, manutenção e conclusão desse trabalho.

Ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo – PPGCS, pela partilha do conhecimento, e pelo incentivo ao pensamento crítico, analítico e reflexivo.

À Profa. Betânia Freire pela compreensão em permitir o acesso ao laboratório de química do solo em horários e dias especiais. E, a Pedro pelo suporte no laboratório.

Ao Prof. Renato Lemos pelas sugestões e por disponibilizar a infraestrutura do laboratório de química e fertilidade do solo, do Instituto Federal de Educação Ciências e Tecnologia de Pernambuco – IFPE, Campus Vitória de Santo Antão.

Ao meu orientador, Prof. Emídio Cantídio, pela confiança, pelo encorajamento, pela inspiração e pelas conversas francas; fundamentais na construção e condução deste trabalho, bem como no meu desenvolvimento técnico-científico.

Aos membros do GNAF (Larissa, Jackelyne, Douglas, Daniel, Ester, Marcelo, Eduardo e Karol) e aos egressos (Joaquim, Brenda, Tomaz e Nicholas) pelo apoio, pelo tempo e pela energia empregada na implantação e nas avaliações do experimento. O sinergismo dado por vocês foi fundamental para que esta pesquisa pudesse ser finalizada em tempo hábil.

Aos amigos (as) Amanda Lima, Luan Wanderley e Valeska Martins por compartilhar o conhecimento e pelos boas discursões acerca de adubações e nutrição de plantas. Nutro por vocês muita admiração, respeito e gratidão.

À Maria, Marlon, Djenyffer e Pablo pelos bons momentos, pela união, e pela partilha do conhecimento.

A todos, muito obrigado!

“[...] Tudo tem o seu tempo determinado, e há tempo para todos os propósitos debaixo do céu [...]”

(Eclesiastes 3:1)

“[...] O trabalho afasta de nós três grandes males: o tédio, o vício e a necessidade [...]”

(Voltaire)

Eficiência da adubação nitrogenada foliar na cana-de-açúcar

RESUMO

A sustentabilidade produtiva dos canaviais depende de um adequado manejo nutricional da cana-de-açúcar. Entre os nutrientes, o Nitrogênio (N) é o segundo mais absorvido e o que mais limita a produtividade da cultura. As perdas por lixiviação que ocorre nos canaviais reduzem a disponibilidade de N para a cultura. Para suprir a necessidade da cana doses de até 200 kg ha⁻¹ de N mineral são aplicadas nos canaviais, mas a recuperação de N-fertilizante tem se limitado a 50%. A adubação foliar pode ser uma alternativa para a compor de manejos de adubação mais eficientes. Visto, que até 70% de N na forma de N-ureia pode ser recuperado pela cana-de-açúcar em 24 horas. Objetivo desse trabalho é avaliar a eficiência da adubação foliar com solução de N-ureia em aumentar a recuperação do N-fertilizante e reduzir suas perdas por lixiviação durante o desenvolvimento da cana-de-açúcar. Sete manejos de aplicação de N com doses de 60 kg ha⁻¹, combinando redução da adubação via solo e complementação na folha, mais um tratamento extra com aplicação de 120 kg ha⁻¹ de N via solo, foram testados e dispostos em três blocos ao acaso. Nos sete primeiros meses foi avaliado a lixiviação de N. Aos 162 Dias Após o Plantio (DAP), 194 DAP e 224 DAP foi avaliado a eficiência da adubação, o crescimento e o acúmulo de biomassa na parte aérea na cana-de-açúcar. O N-nitrico teve a maior participação na solução lixiviada. As menores concentrações de N no lixiviado e as menores perdas de N por lixiviação foram verificados nos manejos com redução da dose em 50% (30 kg ha⁻¹) e 25% (45 kg ha⁻¹). Nesses manejos o N-nitrico teve maior participação na solução lixiviada. As adubações foliares otimizaram a absorção de ¹⁵N-fertilizante e incrementaram os teores e acúmulo de N, a produção de biomassa, a altura de planta, e o número de entrenós. As melhores respostas foram identificadas no manejo com redução de 50% da dose no solo com complementação de duas aplicações de N de 15 kg.ha⁻¹. Nesse contexto, conclui-se que é possível reduzir o aporte de N no solo e complementar via foliar sem comprometer o desenvolvimento e o acúmulo de biomassa na parte aérea da cana-de-açúcar no ciclo de cana planta.

Palavras-chave: Nutrição vegetal. Assimilação de N. Manejo da adubação. Lixiviação N-fertilizante.

Efficiency of foliar nitrogen fertilization on sugarcane

ABSTRACT

The productive sustainability of sugarcane fields depends on adequate nutritional management of sugarcane. Among the nutrients, Nitrogen (N) is the second most absorbed and the one that most limits crop productivity. Leaching losses that occur in sugarcane fields reduce the availability of N for the crop. To meet the need for sugarcane, doses of up to 200 kg ha⁻¹ of mineral N are applied to sugarcane fields, but the recovery of fertilizer N has been limited to 50%. Foliar fertilization can be an alternative to compose more efficient fertilization managements. Whereas, up to 70% of N in the form of N-urea can be recovered by sugarcane within 24 hours. The objective of this work is to evaluate the efficiency of foliar fertilization with N-urea solution in increasing the recovery of N-fertilizer and reducing its leaching losses during sugarcane development. Seven N application managements with doses of 60 kg ha⁻¹, combining reduced fertilization via soil and supplementation on the leaf, plus an extra treatment with application of 120 kg ha⁻¹N via soil, were tested and arranged in three blocks by chance. In the first seven months, N leaching was evaluated. At 162 Day After Planting (DAP), 194 DAP and 224 DAP, the fertilization efficiency, growth and accumulation of aboveground biomass in sugarcane were evaluated. Nitric-N had the greatest participation in the leached solution. The smallest concentrations of N in the leachate and the smallest losses of N by leaching were verified in managements with a dose reduction of 50% (30 kg ha⁻¹) and 25% (45 kg ha⁻¹). In these managements, the N-nitric had greater participation in the leached solution. Foliar fertilization optimized ¹⁵N-fertilizer uptake and increased N content and accumulation, biomass production, plant height, and number of internodes. The best responses were identified in the management with a 50% reduction of the dose in the soil with the complementation of two 15 kg ha⁻¹ N applications. In this context, it is concluded that it is possible to reduce the input of N in the soil and complement it via the leaves without compromising the development and accumulation of biomass in the aboveground part of the sugarcane in the sugarcane plant cycle.

Keywords: Plant nutrition. N assimilation. Fertilization management. N-fertilizer leaching.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** – Caracterização meteorológica da área experimental. (A) Precipitação acumulada, (B) Temperaturas máximas, Temperatura mínimas e Radiação solar.....25
- Figura 2** – Precipitação irrigação, drenagem e lixiviação acumulada das formas nítricas, amoniacais e mineral de nitrogênio no manejos com (A) 120 kg ha⁻¹, (B) 60 kg ha⁻¹, (C) 55 kg ha⁻¹, (D) 50 kg ha⁻¹, (E) 45 kg ha⁻¹ e (F) 30 kg ha⁻¹ de N aplicação via solo com cana-de-açúcar.....34
- Figura 3** – Proporção das formas nítricas e amoniacal lixiviada no período de setembro/2020 a fevereiro/2021 nos manejos com aplicação com (A) 120kg.ha⁻¹, (B) 60 kg ha⁻¹, (C) 55 kg ha⁻¹, (D) 50 kg.ha⁻¹, (E) 45 kg ha⁻¹e (F) 30 kg ha⁻¹ de N no solo na cana-de-açúcar.....36
- Figura 4** – Construção e instalação dos lisímetros de drenagem. (1) corte da tampa do reservatório instalação da flange para drenagem; (2) Abertura dos drenos, (3) Abertura dos acessos; (5) lastro de no fundo do lisímetro; (6) vedação da tampa com as paredes do reservatório e instalação de tela na entrada do dreno; (7) cobertura com brita na entrada do dreno.....69
- Figura 5** – Disposição dos lisímetros no local experimental. Imagem aos (1) 150 DAP; (2) 224 DAP.....70
- Figura 6** – Aplicação foliar de N. (1) distribuição da solução na superfície foliar; (2) e (3) formação de cristais de sais na superfície foliar nos manejos com aplicação com 14,80 % e 22,20% de ureia, respectivamente 24 horas após a primeira aplicação.....71
- Figura 7** – Danos visuais nas folhas da cana-de-açúcar que receberam a primeira aplicação foliar de N. (1) e (2) queima foliar 4 e 10 dias após a primeira adubação, respectivamente.....72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Atributos químicos e físicos do substrato utilizado no experimento.....	21
Tabela 2 – Detalhamento dos manejos de adubação testado na cana-de-açúcar.....	23
Tabela 3 – pH e condutividade elétricas das soluções de ureia aplicadas via foliar.....	24
Tabela 4 – Monitoramento da concentração de N mineral ($\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^- + \text{NH}_4^+$) no lixiviado de lisímetros cultivado com cana-de-açúcar. Recife-PE.....	29
Tabela 5 - Monitoramento da concentração de nitrogênio nas formas N-nítrica ($\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$) e N-amoniacal (NH_4^+) no lixiviado de lisímetros cultivado com cana-de-açúcar. Recife-PE.....	30
Tabela 6 - Monitoramento da perda por lixiviação de N-nítrico ($\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$) e N-amoniacal (NH_4^+) e nitrogênio mineral ($\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^- + \text{NH}_4^+$) em lisímetros cultivado com cana-de-açúcar, Recife-PE.....	35
Tabela 7 – Contribuição dos manejos de adubação nitrogenada no teor de N na folha +1 em cana-de-açúcar. Recife-PE.....	38
Tabela 8 – Acúmulo de N, participação e recuperação de N-fertilizante na parte aérea da cana de açúcar. Recife-PE.....	40
Tabela 9 – Altura de plantas até a F+1, perfilhamento e número de entrenós de cana-de-açúcar submetida a diferentes manejos de adubação nitrogenada. Recife-PE.....	45
Tabela 10 - Média do comprimento e diâmetro dos entrenós de cana-de-açúcar antes da primeira aplicação foliar (162 DAP). Recife-PE.....	47
Tabela 11 – Comprimento e diâmetros dos entrenós correspondente as folhas +1, +2 e +3 da cana-de-açúcar submetida a diferentes manejos de adubação nitrogenada. Recife – PE.....	48
Tabela 12 – Biomassa acumulada na parte aérea da cana-de-açúcar em função de diferentes manejos de adubação nitrogenada. Recife – PE.....	50

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Hipótese	12
1.2	Objetivos.....	12
1.2.1	<i>Objetivo geral</i>	12
1.2.2	<i>Objetivos específicos</i>	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1	Cana-de-açúcar	13
2.2	Práticas e desafios no manejo da adubação nitrogenada na cultura da cana-de-açúcar..	14
2.3	Impacto da lixiviação na recuperação de N-fertilizante	16
2.4	Adubação foliar como estratégia para otimização do uso de N-fertilizante	17
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	19
3.1	Caracterização local	19
3.2	Descrição dos tratamentos e condução experimental	22
3.3	Avaliação do acúmulo de biomassa na parte aérea.....	25
3.4	Avaliação da eficiência da adubação nitrogenada	26
3.5	Avaliação de crescimento e desenvolvimento vegetativo	27
3.6	Avaliação da lixiviação de nitrogênio	27
3.7	Análise dos dados	28
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
4.1	Concentração de nitrogênio no lixiviado	29
4.2	Lixiviação de nitrogênio	33
4.3	Eficiência da adubação nitrogenada.....	38
4.3.1	Teor de N na folha +1	38
4.3.2	Acúmulo N e recuperação de ¹⁵ N-fertilizante na parte aérea da cana-de-açúcar.....	40
4.4	Crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar	44
4.5	Biomassa acumulada na parte aérea da cana-de-açúcar	50
5	CONCLUSÃO.....	53
6	REFERÊNCIAS	54
	Apêndice A – Construção dos lisímetros de drenagem.....	69
	Apêndice B – Local experimental	70
	Apêndice C – Aplicação foliar de N.....	71
	Apêndice D – Danos visuais da aplicação foliar de N.	72

1 INTRODUÇÃO

O aumento da população mundial tem intensificado a demanda por alimentos e fontes de energias renováveis. Este cenário, apresenta perspectivas promissoras ao futuro da cadeia produtiva da cana-de-açúcar por se trata de uma cultura com capacidade de energia renovável.

A sustentabilidade dos canaviais depende de um adequado manejo nutricional. Entre os nutrientes, o nitrogênio (N) é essencial no crescimento e desenvolvimento da cultura e é um dos mais limitantes nos agroecossistemas.

Em condição de deficiência N nos agroecossistemas a produtividade da cana-de-açúcar é comprometida. Para suprir a necessidade da cultura doses de até 200 kg ha⁻¹ de N mineral são administrados anualmente nos canaviais. O principal desafio dessas adubações está em otimizar o uso de N-fertilizante pela cana-de-açúcar e minimizar suas perdas nos agroecossistemas.

As perdas de N que correm nos canaviais reduzem a disponibilidade do nutriente a cultura. As condições edafoclimáticas das áreas produtoras de cana, bem com fontes e doses de N utilizadas nas adubações são determinantes para as transformações bioquímicas que ocorrem no solo. As transformações de N no solo condicionam suas perdas por desnitrificação, volatilização e/ou lixiviação.

O cultivo de cana-de-açúcar em áreas com solos de textura média e/ou arenosa e com precipitação média anual superior a 1.200 mm contribuem para que mais de 20% dos fertilizantes nitrogenados sejam perdidos por lixiviação e que a recuperação do N-fertilizante seja inferior a 50%. Nessas áreas, é comum que o aporte de fertilizante nitrogenado seja mais recorrente e as adubações menos eficiente.

Para melhorar a recuperação de N-fertilizante pela cultura e minimizar suas perdas, estratégias como parcelamento da adubação, cultivo sob palhada e uso de fontes menos solúveis já foram testadas, mas a recuperação de N-fertilizante nos canaviais ainda é inferior a 50%.

Reduzir as doses de N no solo pode ser uma alternativa para minimizar as perdas N-fertilizante por lixiviação. O desafio dessa prática está em manter o adequado suprimento de N exigido pela cana-de-açúcar, sem comprometer o seu crescimento e desenvolvimento.

A adubação foliar pode ser uma alternativa para a compor de manejos de adubação mais eficientes. Na adubação foliar, a aplicação de nutriente é localizada e as doses aplicadas nas folhas são menores que as aplicada no solo. Essas condições podem contribuir para aumentar a recuperação de N-fertilizante pela cultura e reduzir suas perdas nos canaviais.

A habilidade das plantas de absorverem solutos pelas folhas é uma característica herdada de seus ancestrais aquáticos. Os ancestrais das plantas superiores (vasculares) apresentavam órgãos pouco diferenciado e especializado que absorviam simultaneamente, água, luz, CO₂ e nutrientes por toda sua superfície. Com a mudança de habitat, essas plantas começaram a produzir órgãos mais diferenciado e especializado (raiz, caule e folha). Mas, a capacidade de absorver solutos pelas folhas foi mantida.

Na adubação foliar, fontes de N nítrica, amídica e amoniacal podem ser usadas na composição de manejos de adubação. A ureia tem se destacado por apresentar velocidade de absorção e recuperação superior as demais fontes.

Plantas adequadamente nutridas com solução de ureia via foliar podem aumenta a recuperação de N-fertilizante, a produção de aminoácidos, proteínas e fotoassímulados. Esses compostos que são essenciais no crescimento, desenvolvimento e no ganho de biomassa da cultura. Dependendo da concentração da ureia, a adubação foliar pode ser mais efetiva que a adubação via solo. Diante do exposto, o objetivo desse trabalho é avaliar a eficiência da adubação foliar com solução de N-ureia na recuperação e no desenvolvimento da cana-de-açúcar.

1.1 Hipótese

A adubação foliar com solução de N-ureia é mais eficiente e promove maior conversão em biomassa, o que permite reduzir a adubação nitrogenada aplicada no solo sem limitar a nutrição nitrogenada e o desenvolvimento da cana-de-açúcar.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar a eficiência da adubação foliar com solução de N-ureia em aumentar a recuperação do N-fertilizante e reduzir suas perdas por lixiviação durante o desenvolvimento da cana-de-açúcar.

1.2.2 Objetivos específicos

Quantificar as perdas de N-lixiviado com a redução da adubação nitrogenada no solo;

Quantificar a recuperação do N-ureia aplicado nos diferentes manejos de adubação na cana-de-açúcar;

Realizar o diagnóstico nutricional de N com uso da adubação foliar com ureia;

Identificar o potencial da adubação foliar em reduzir a adubação aplicada no solo;

Comparar o crescimento e produção de biomassa da cana-de-açúcar cultivada com o fornecimento de N via solo e foliar.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp..) é uma planta monocotiledônea, alógama, perene, que pertence a família das *Poaceae* e tem cerca de 40 espécies, sendo *S. officinarum*, *S. spontaneum*, *S. barberi*, *S. robustum* e *S. edule* as mais abundantes (WEBSTER; SHAW, 1995).

As variedades modernas de cana-de-açúcar são híbridos resultantes do cruzamento interespecífico entre *S. officinarum*, espécie com alta capacidade de produção e acumulação de sacarose no colmo, mas pouca tolerante a estresses, com *S. spontaneum*, espécie selvagem com ampla adaptação a estresse (bióticos e abióticos), mas baixo desempenho industrial (CHEAVEGATTI-GIANOTTO et al., 2011).

A cana-de-açúcar é uma planta com mecanismo fotossintético C4 que possui alta capacidade de assimilação de carbono e produção de fotoassimilados (LIAN et al., 2014). Entre as culturas açucareira, a cana-de-açúcar tem o maior potencial de produzir e acumular sacarose (SHIVALINGAMURTHY et al, 2018). Entretanto, para atingir o máximo potencial produtivo a cana depende de um manejo nutricional adequado e de condições climáticas favoráveis (SILVA et al., 2019; OLIVEIRA et al., 2018).

As regiões de baixa e média latitude onde há a ocorrência de temperatura de 22-30°C, luminosidade de 10-14 horas, umidade de 45-85% e precipitação de 1100-1500 mm são reportadas como as mais propícias ao crescimento e a maturação da cultura (SANTOS; DIOLA, 2015; LIU et al., 2018).

Para produzir 100 toneladas de colmo, a cana-de-açúcar extrai do solo em média de 593 kg ha⁻¹ de macronutrientes e 2,05 kg ha⁻¹ de micronutrientes (SHRIVASTAVA et al., 2015). Sob irrigação plena Oliveira et al., (2010) verificou que só de N a cana-de-açúcar extrai e exporta em média 197 kg ha⁻¹ e 92 kg ha⁻¹, respectivamente. Segundo Vale et al., (2011) o N é o segundo nutriente mais absorvido pela cana e o que mais limita a produção de biomassa.

2.2 Práticas e desafios no manejo da adubação nitrogenada na cultura da cana-de-açúcar

O N é um elemento essencial para o estabelecimento e desenvolvimento dos organismos vivos, haja vista que é quarto elemento com maior abundância na biomassa celular (STEIN; KLOTZ, 2016). Nas plantas, o N participa de processos metabólicos essenciais como fotossíntese (BASSI; MENSOSI; MATTIELLO, 2018), respiração (LEHMEIERE et al, 2010), multiplicação e diferenciação celular (WANG et al., 2019a), controle fitormonal (KIBA et al., 2011), além de ser componente estrutural de ácidos nucleicos, aminoácidos, enzimas e proteínas (OKUMOTO; PILOT, 2011; FRUNGILLO et al., 2014).

Nos agroecossistemas a mineralização da matéria orgânica (ZHANG et al., 2018), a fixação biológica (FBN) (VITOUSEK et al., 2013) e da deposição atmosférica (WANG et al, 2019) podem fornecer N para a cana-de-açúcar. Os estudos de FBN mostram baixas contribuições das bactérias diazotróficas em fornecer N para atender à exigência da cultura (SCHULTZ et al., 2014; ANTUNES et al., 2019). A quantidade de N aportado pela deposição atmosférica é baixa (ZHU et al., 2015). E, para fornecer N para a cultura o solo precisa ter matéria orgânica com baixa relação C:N (CANTARELA, 2007).

Nesse cenário, os fertilizantes nitrogenados minerais (N-fertilizantes) como ureia [CO(NH₂)₂] (45% de N), sulfato de amônio [(NH₄)₂ SO₄] (21% de N) e nitrato de amônio [NH₄NO₃] (33% de N) são usados para suprir a demanda de N da cana-de-açúcar, por terem concentrações e solubilidades compatíveis com a agricultura (ALCARDE, 2007; MARIANO et al., 2017)

Na literatura, estudos como o de YANG et al., (2019) mostram a importância do N-fertilizante no desenvolvimento da cana-de-açúcar. Os autores observaram que fornecimento de fertilizantes nitrogenados promovia o incremento na expressão gênica e na atividade das enzimas que atuam na assimilação de N. Similarmente, outros trabalhos como o de Bassi et al., (2018) e Zhao, Glaz e Comstock, (2014) observaram efeitos positivos da adubação nitrogenada no aumento do teor de proteína total, bem como no comprimento do colmo e na área foliar da cultura, respectivamente.

A recuperação de N-fertilizante tem se limitado entre 19% a 40% em cana planta e 43 a 56% em cana soca (TRIVELIN et al., 2002; FRANCO et al., 2011), devido a interação entre as condições edafoclimática, as características genéticas e fisiológicas das variedades, bem com os processos de transformação do nitrogênio nos agroecossistemas (VITTI et al., 2007; OLIVEIRA et al., 2010; YANG et al., 2019).

Estratégias como formas, fontes e época aplicação, bem como modificação do agroecossistema têm sido testadas para melhorar e recuperação do N-fertilizante pela cultura. Mas, resultados como os encontrados por Boschiero, Mariano e Trivelin (2018), Gava et al. (2003) e Silva (2019) demonstram que a recuperação de N-fertilizante na cana-de-açúcar ainda tem se mantido inferior a 50%.

A baixa recuperação de N-fertilizante pela cana-de-açúcar também é influenciada pelas perdas. Em média, a imobilização, volatilização, desnitrificação e lixiviação podem reduzir a disponibilidade de N em 32%, 19%, 1,8% e 5,6% respectivamente (Otto et al., 2016). As condições físico-químicas dos solos arenosos contribuem para que a lixiviação seja o processo de perda mais importante e represente de 32% a 64% do N perdido (WERFF; BAARS; OOMEN, 1995; HU et al., 2008).

No Brasil 8% dos solos são arenosos e apresentam potencial de uso agrícola para o cultivo de cana-de-açúcar (DONAGEMMA et al., 2016). Mas, devido as condições edafoclimáticas a recuperação de N-fertilizante dessas áreas é inferior a 50% (OTTO et al., 2016). Para compensar as perdas de N e manter o mesmo nível nutricional da cultura aumenta-se as doses de N na adubação (CHEN et al., 2019) e amplia-se a susceptibilidade de perda por lixiviação (LU et al., 2019).

2.3 Impacto da lixiviação na recuperação de N-fertilizante

A lixiviação é um importante mecanismo de perda de N (ZHENG et al., 2019). A intensidade desse processo depende do manejo da adubação e das características edafoclimáticas dos agroecossistemas (WANG et al., 2019b). A lixiviação é mais expressiva em regiões com solos de textura variando de média a arenosa (Zhao; Li; Jaing, 2019), com altas temperaturas (ROCHA et al., 2008; JABLUM et al., 2015) e elevados índices pluviométricos (GALLEJONES et al., 2012), condição edafoclimática comum as regiões produtoras de cana-de-açúcar no mundo (SHRIVASTAVA et al., 2015).

Entre as formas de N o nitrato (NO_3^-) é a mais susceptível a perda por lixiviação devido à alta solubilidade e a baixa capacidade de adsorção aos colóides do solo (HAMDI et al., 2013; HUANG et al., 2017). Nos horizontes superficiais (A) a adsorção de NO_3^- oriundo da adubação é inferior a 50% (PINHEIRO et al., 2020). Em áreas adubadas, a participação do NO_3^- na solução lixiviada pode variar entre 78% a 93% (GHIBERTO; LIBARDI; TRIVELIN, 2015; ZHENG-QUIN et al., 2010).

Ao avaliar o manejo da água no solo com diferentes doses N na cultura do milho, Shi et al. (2020) observaram que o conteúdo de água no solo influenciava a drenagem de água, a lixiviação NO_3^- , a eficiência do uso de N (EUN) e a produtividade da cultura. Os autores observaram que lâminas de irrigação superiores a 500 mm aplicadas ao longo do ciclo da cultura promoviam incrementos na drenagem da água no solo, aumento na lixiviação de NO_3^- , além da diminuição na EUN e reduzir a produtividade da cultura.

Na cana-de-açúcar, Ghiberto, Libardi e Trivelin, (2015) e Ghiberto et al. (2009) observaram perdas expressivas de N nos primeiros 60 dias após a adubação da cultura em Argissolo de textura franco argilo-arenosa. Ao fim da avaliação, a lixiviação de N-fertilizante correspondeu a 15% em cana planta e 22% em cana soca.

Avaliando o impacto integrado do tipo de solo, clima e o manejo de adubação sobre a produtividade, a EUN e lixiviação de N na cana-de-açúcar por simulações integradas com sistema de modelagem (APSIM- The Agricultural Production Systems IMulator), Thoburn et al., (2017) observaram que os solos de textura fina promovem maiores produtividade e EUN do que os solos arenosos, devido a maior capacidade de retenção de água. A lixiviação de NO_3^- aumenta com o incremento da adubação, sendo mais expressiva no solo arenoso com alta precipitação. Nesses ambientes a perda por lixiviação pode ser superior a 200 kg ha^{-1} de $\text{NO}_3^- \cdot \text{ano}^{-1}$.

Em Espodossolo dos tabuleiros costeiros da Paraíba, no ciclo de cana soca, Silva (2019) constatou que cerca de 80% do N da solução lixiviada era N-fertilizante. Na ocasião, a maior recuperação de N-fertilizante (15,5 %) foi observada com a aplicação de 120 kg. ha⁻¹ de forma parcelada em dois eventos (80 kg ha⁻¹ + 40 kg.ha⁻¹).

2.4 Adubação foliar como estratégia para otimização do uso de N-fertilizante

As perdas de N no agroecossistema limitam a disponibilidade de N para a planta e reduz a recuperação de N-fertilizante. Como alternativa, a adubação foliar pode ser usada para compor o manejo da adubação.

A adubação foliar consiste no fornecimento de nutrientes a partir da pulverização de solução nutritiva na parte aérea (folha e caule) da planta. Na agricultura a adubação foliar é usada para corrigir a deficiência causada pelo suprimento insuficiente de nutrientes as raízes, bem como para otimizar o uso de fertilizantes (FAGERIA et al., 2009).

A capacidade das plantas superiores em absorver nutrientes pela folha resulta da herança filogenética de ancestrais aquáticos, onde a assimilação de nutrientes e a biossíntese de fotoassimilados era realizado pelo mesmo órgão. Mesmo após a diferenciação e especialização dos órgãos a habilidade das plantas vasculares em absorver água e soluto pelas folhas foi mantida (LELIAERT et al., 2012; HARRISON et al., 2017; OLIVEIRA et al., 2019).

Absorção de nutriente pelas folhas é um processo complexo e envolve um conjunto de fatores como estabilidade físico-química e espécie iônica da solução nutritiva, anatomia foliar, estágio fenológico da cultura, condições climáticas e tecnologia empregada na aplicação (FERNÁNDEZ; EICHERT, 2009; RIEDERER, 2006; BUENO et al., 2019).

Em geral, a absorção é mais efetiva quando a solução nutritiva é aplicada em folhas jovens, pouco pilosas, com soluções nutritivas estáveis, nano-particulada ou quelatizada (RIOS et al., 2018; AVELLAN et al., 2021; KANE et al., 2020). No processo de absorção foliar, os estômatos e a cutícula são apontados como as principais vias de penetração do nutriente na folha (FERNÁNDEZ et al., 2017).

A cutícula é uma matriz composta por de cutina e/ou cutano embebecida com ceras e compostos fenólicos que se estendem através da camada cuticular, bem como por polissacáridos que ocupa a posição mais interna na cutícula (DOMÍNGUEZ et al., 2011).

As ceras cuticulares são formadas por ácidos graxos de cadeias longas unidos entre si por ésteres, álcoois, alcanos ou triterpenóides. A cutina é formada por monômeros de ácidos graxos, um poliéster de natureza despolimerizável (Hidroxi C16 e C 18). O cutano é formado por porções de polimetileno e polissacarídeos unidos com interações não hidrolisáveis ou por cadeias de polimetileno unidos a grupos carboxílicos de éter e éster. Os polissacarídeos são de natureza estrutural como pectina e celulose (Fernandez et al., 2016). Essa constituição e disposição confere à cutícula uma importante barreira de proteção a estresses bióticos e abióticos (YEATS; ROSE, 2013), bem como ao fluxo de água e nutrientes (FERNÁNDEZ; BROWN, 2013).

De acordo com Fernández e Eichertt (2009), duas vias paralelas e independentes são responsáveis pelo transporte de substâncias através da cutícula. Moléculas hidrofílicas e polares, além de íons atravessam a cutícula através de poros aquosos (TREDENICK et al., 2017). Os poros são estruturas temporárias que se formam com distanciamento da matriz lipofílica devido a adsorção de moléculas d'água pelos grupos funcionais carboxílico, fenólicos e hidroxílico (SCHÖNHERR, 2006). Por outro lado, moléculas lipofílicas, apolares e não iônicas atravessam a cutícula a partir do processo de dissolução-difusão no domínio amorfo das ceras e cutina lipofílica, bem como pelos poros aquosos (SCHREIBER, 2005).

O processo de absorção foliar via estômato depende da tensão superficial da solução nutritiva, bem como da morfologia foliar. Em média, plantas com maior densidade de estômatos, quando pulverizada com solução nutritiva com tensão superficial inferior a 30 mN.m^{-1} apresentam maior capacidade de absorver nutrientes pelos estômatos (SCHÖNHERR; BUKOVAC, 1972; BUICK; BUCHAN; FIELD, 1993; EICHERT; BURKHARD, 2001; BURKHARDT et al., 2012) por difusão independente da natureza química do nutriente (EICHERT et al., 2008).

Ao avaliar a taxa de absorção de diferentes fontes de N (ureia, NH_4^+ , NO_3^- e glicina) em função da condutância cuticular (g_c) de duas espécies florestais, Uscola et al., (2014) observaram efeito significativo entre na taxa de absorção de N e a g_c para ureia, glicina e NH_4^+ , independentemente da espécie. No estudo, a ureia apresentou taxa de absorção superior à glicina e NH_4^+ . O estudo não mostrou efeito significativo entre g_c e a taxa de absorção para o NO_3^- , sugerindo que a via estomática seja a principal forma para entrada NO_3^- na planta.

O processo de recuperação da ureia pela via foliar é rápido. Na cana-de-açúcar Trivelin et al., (1988) observaram que 70% do N-ureia aplicado na folha foi recuperado pela parte aérea 24 horas após a adubação. No citosol, a ureia absorvida é hidrolisada pela enzima urease, convertida em $2\text{CO}_2 + 2\text{NH}_4^+$ (HINSVARK et al., 1952; WITTE, 2011). O NH_4^+ produzido é assimilado a partir da ação enzimas glutamina sintetase (GS) e glutamato sintase (glutamina:2-oxoglutarato aminotransferase – GOGAT). Essa conjuntura diminuí risco de perdas de NH_3 por volatilização e incrementa o acúmulo de N no tecido (WITTE et al., 2002; MA et al., 2019).

A adubação foliar com ureia pode ser uma estratégia eficiente no manejo da nutrição de N para as culturas. O aumento de N-ureia no citosol estimula a atividade da uréase que disponibiliza mais NH_4^+ para ser assimilado pela GS-GOGAT (SIRKO; BRODRIK, 2000). Cequeira et al., (2019) observaram que a adubação foliar aumentou a disponibilidade de N, incrementou a atividade fotossintética e estimulou carboxilação pelas enzimas RUBISCO e PEPEC.

No milho, Deuner et al., (2008) observaram que a adubação foliar com 0,5 % de ureia apresentava incrementos de na área foliar em 33% e na massa seca da parte aérea em 52%, comparado a adubação via solo.

Sangplung e Rosário (1978) constataram que é possível reduzir 50 kg ha⁻¹ de N aplicado no solo por 10 kg ha⁻¹ de N aplicado via foliar sem comprometer a produtividade cana-de-açúcar. Essa prática é possível porque quando a adubação é feita no solo a cana-de-açúcar absorve em média entre 15% e 20% de todo N aplicado (JORIS et al., 2020). Dessa forma, a adubação foliar tem potencial para viabilizar a redução da aplicação de fertilizantes no solo sem diminuir que a oferta de nutriente para a culturas.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização local

O experimento foi implantado em setembro (04) de 2020 e conduzido até abril (19) de 2021 na Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE. A universidade está situada no estado de Pernambuco e no município de Recife, sob as coordenadas geográfica 8° 01' 7'' de latitude Sul e 34° 56' 41'' de longitude Oeste.

As parcelas experimentais consistiram em lisímetros de drenagem montados com reservatórios de polietileno de 0,5 m³, com volume útil de 0,49 m³. Na construção dos lisímetros as bordas das tampas dos reservatórios foram recortadas e colocadas invertidas no interior dos reservatórios, aproveitando o formato em “V” e a de inclinação de 20%.

Para evitar perda da solução do solo, a interface entre a parede do lisímetro e a tampa foram vedadas com Fita adesiva Scotch[®] Silver Tape. A fita é impermeável e resistente a tração, possui o dorso em fibra de tecido de algodão laminado com filme de polietileno e cola em resina. O centro da tampa foi perfurado para acoplar a tubulação de drenagem de 50 mm. Após ser perfurada foi colocada no fundo da tampa tela e brita n° 19 para limitar a passagem de sedimentos pela tubulação. Na extremidade terminal tubulação de drenagem foram colocados os coletores (3,5 L) para recuperar a solução lixiviada. Após montados, os lisímetros foram dispostos na área experimental sem cobertura.

No experimento foi utilizando um substrato arenoso resultante de um Espodossolo Humulúvico Órtico dúrico coletado na camada de 0,0 m a 0,60 m de profundidade, na unidade geoambiental dos tabuleiros costeiros (SILVA, 2019). Antes da implantação do experimento foram coletadas amostras de solos para fins de caracterização dos atributos químicos e físicos (Tabela 1).

Entre os atributos químicos foram determinados o pH do solo em solução de CaCl₂ a 0,01 mol L⁻¹ em suspensão 1:2,5 (solo:solução). Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ e Al³⁺ trocáveis, P disponível, acidez potencial (H+Al), matéria orgânica do solo (MOS), bem como Zn, B, Cu, Mn e Fe. O Ca²⁺, Mg²⁺, e K foram extraídos por NH₄Cl (1,0 mol L⁻¹), sendo Ca²⁺ e Mg²⁺ determinados por absorção atômica e K por fotometria de chama. O Al³⁺ foi extraído por KCl (1,0 mol L⁻¹) e determinado por volumetria (RAIJ et al., 2001). O P disponível foi extraído por Melhich-1 e dosado por colorimetria (EMBRAPA, 2011). A acidez potencial (H+Al) foi extraída por solução-tampão SMP e determinada por potenciometria.

A MOS foi oxidada em solução ácida de dicromato de potássio (0,167 mol L⁻¹) com ácido sulfúrico (5 mol L⁻¹) e determinada por colorimetria. Os micronutrientes Zn, Cu, Mn e Fe foram extraídos por solução de ETPA e determinados por absorção atômica. O B foi extraído por azometiona-H e determinado por colorimetria (RAIJ et al., 2001). Com os resultados obtidos no complexo sortivo foram estimadas a soma de bases (SB), a saturações por base (V) e por alumínio (m), assim como a CTC potencial.

Na caracterização física, a granulometria do solo foi determinada pelo método da pipeta com dispersante de hidróxido de sódio 1 mol L⁻¹. A densidade do solo pelo método do anel volumétrico. A água disponível no solo, bem como a macro e micro porosidade do solo (EMBRAPA, 2011).

Tabela 1- Atributos químicos e físicos do substrato utilizado no experimento.

Atributos químicos	
pH	4,70
M.O (g.dm ⁻³)	11,16
P (mg.dm ⁻³)	5,38
Ca ⁺² (cmol _c .dm ⁻¹)	1,12
Mg ⁺² (cmol _c .dm ⁻¹)	0,52
K ⁺ (cmol _c .dm ⁻¹)	0,043
Al ⁺³ (cmol _c .dm ⁻¹)	0,04
H+Al (cmol _c .dm ⁻¹)	1,17
S.B (cmol _c .dm ⁻¹)	1,68
CTC _(total) (cmol _c .dm ⁻¹)	3,39
Fe ⁺² (mg.dm ⁻³)	34,00
Cu ⁺² (mg.dm ⁻³)	0,51
Zn ⁺² (mg.dm ⁻³)	1,90
Mn ⁺² (mg.dm ⁻³)	2,10
SB (mg.dm ⁻³)	0,26
V (%)	49,55
m (%)	2,33
Atributos físicos	
Areia (g.kg ⁻¹)	970,60
Silte (g.kg ⁻¹)	22,60
Argila (g.kg ⁻¹)	1,20
Ds (g.cm ⁻³)	1,32
Dp (g.cm ⁻³)	2,92
α total (%)	31,58
α macro (%)	26,51
α micro (%)	5,06
θ_{CC} (m ³ m ⁻³)	0,21
θ_{PMP} (m ³ m ⁻³)	0,01

SB; Soma de Bases, V (%); saturação por base, m (%); saturação por alumínio, Ds; densidade do solo, Dp; densidade de partícula, α ; porosidade, θ_{CC} ; umidade na capacidade de campo, θ_{PMP} ; umidade no ponto de murcha permanente.

3.2 Descrição dos tratamentos e condução experimental

No experimento foi adotado uma densidade de plantio 7 gemas/m linear. A variedade selecionada para o estudo foi a RB92579, por ser a variedades mais cultivada no Nordeste e apresentar características importantes para adubação foliar como limbo foliar largo, alto perfilhamento e ser exigente em N (SIMÕES-NETO, 2009; OLIVEIRA et al., 2010; DAROS et al., 2015).

Para otimizar a disponibilidade de nutrientes e o crescimento da cana-de-açúcar, foi realizado 15 dias antes do plantio (21 de agosto/2020) a correção do solo com utilizando 99 g.parcela⁻¹ de calcário para elevar a saturação por base para 70% (RAIJ et al., 1997; CRUCIOL et al., 2017).

No plantio foi realizada a adubação no fundo do sulco com 100% da dose de P, 50% das doses de K, Mn, Zn, Cu, Mo e B. Aos 90 dias após o plantio (DAP) foram abertos sucros de 0,05 m de profundidade a 0,10 m da linha das plantas para aplicação da complementação das doses de K, Mn, Zn, Cu, Mo e B. Aos 120 DAP foi realizada aplicação extra de K no solo, visto que as plantas apresentavam sintomas visuais de deficiência.

Todas as doses foram selecionadas com base na dose de máxima eficiência física, capaz de proporcionar produtividade superior/igual 100 t.ha⁻¹. As doses de P (120 kg ha⁻¹ P₂O₅), K (150 kg.ha⁻¹), Mn (2,5 kg.ha⁻¹), Mo (0,2 kg.ha⁻¹) foram baseadas nos trabalhos de Simões-Neto et al. (2015), Rocha (2019), Benett et al. (2011) e Oliveira (2012), respectivamente. As doses de Zn e B no foram baseadas no estudo de Marangoni et al. (2019). As fontes de P, K, Mo e B usadas foram super triplo, cloreto de potássio, molibdato de sódio e ácido bórico, respectivamente. Enquanto as fontes de Mn, Zn e Cu usadas foram Sulfato de manganês, zinco e cobre, respectivamente.

A fonte de N usada no experimento foi a ureia enriquecida com 2,08% de átomos de ¹⁵N, produzida no laboratório de isótopos estáveis do Centro de Energia na agricultura (CENA) da Universidade de São Paulo (USP).

Os tratamentos foram dispostos em blocos ao acaso com sete manejos (M) de aplicação de N com doses de 60 kg ha⁻¹ combinando adubação via solo e foliar, mais um tratamento extra (TE) com aplicação de 120 kg ha⁻¹ de N via solo (Tabela 2). No total o

experimento foi organizado em vinte e quatro parcelas experimentais, com oito tratamentos e três repetições.

Nos manejos avaliados, as doses de N aplicadas no solo foram reduzidas progressivamente em 8,30%, 16,70%, 25,00% e 50,00% para serem aplicadas nas folhas em até dois eventos de aplicação conforme descrito na tabela 2. Ambas as aplicações N (solo e foliar) foram realizadas com ureia enriquecida (2,08% átomos de ^{15}N). Sendo 1/3 do N aplicado no fundo do sulco na durante o plantio e 2/3 aplicado em cobertura (90 DAP) em suco de 0,05 m de profundidade a distância de 0,10 m dos perfilhos.

Tabela 2 – Detalhamento dos manejos de adubação testado na cana-de-açúcar.

Manejos	Adubação via solo	Adubação via foliar	
		----- kg ha ⁻¹ -----	
		1°	2°
M1	60	-	-
M2	55	5	0
M3	50	5	5
M4	50	10	0
M5	45	15	0
M6	45	7,5	7,5
M7	30	15	15
TE	120	-	-

As doses de 120 kg ha⁻¹, 60 kg ha⁻¹, 55 kg ha⁻¹, 50 kg ha⁻¹, 45 kg ha⁻¹, 30 kg ha⁻¹ e 15 kg ha⁻¹, 10 kg ha⁻¹, 7,5 kg ha⁻¹ e 5 kg ha⁻¹ correspondem a 26,67 g.parcela⁻¹; 13,33 g.parcela⁻¹; 12,22 g.parcela⁻¹; 11,11 g.parcela⁻¹; 10,00 g.parcela⁻¹; 6,67 g.parcela⁻¹; 3,33 g.parcela⁻¹; 2,22 g.parcela⁻¹; 1,67 g.parcela⁻¹; 1,11 g.parcela⁻¹, respectivamente.

A dose de 15 kg ha⁻¹ foi usada com base no limite crítico com risco de queima foliar em trigo observado por Phillips e Mullins (2004). E as doses de 60 kg. ha⁻¹ e 120 kg ha⁻¹ foram baseadas nos estudos de Santana et al., (2020) e Silva (2019) que observaram o melhor rendimento econômico e a máxima recuperação de N, respectivamente.

A primeira aplicação foliar foi realizada aos 163 dias após o plantio (DAP) nas folhas +1, +2 e +3 de todas as plantas das parcelas. E, a segunda aplicação foliar foi realizada aos 195 DAP, quando as folhas +1 da primeira aplicação passaram a ser as folhas +3. Ambas as aplicações foram realizadas no final da tarde com o auxílio de um spray. Para uniformizar a aplicação e quebrar a tensão superficial da gota, a solução

recebeu dispersante. O volume de calda usado nas aplicações foi de 150 L.ha⁻¹ e as concentrações de ureia em solução foram de 7,50%, 11,10%, 14,80% e 22,20% para as doses de 5 kg.ha⁻¹, 7,5 kg.ha⁻¹, 10 kg ha⁻¹ e 15 kg ha⁻¹ de N, respectivamente.

Os manejos com adubação foliar receberam pulverizações com as respectivas soluções de ureia + dispersante, enquanto os manejos com adubação via solo (60 kg ha⁻¹ e 120 kg.ha⁻¹) receberam pulverização foliar com água + dispersante. Em todas as aplicações usou-se água destilada. Na ocasião da aplicação foram mensurados o pH e a condutividade elétrica das soluções com ureia (Tabela 3).

Tabela 3 – pH e condutividade elétricas das soluções de ureia aplicadas via foliar

Concentração de ureia em solução (%)	pH	CE (μS.cm ⁻¹)
0,00	4,97	4,11
7,50	6,70	159,30
11,10	7,05	189,30
14,80	7,17	265,50
22,20	7,23	312,50

Durante o período experimental as plantas foram irrigadas diariamente por sistema de microaspersão. As lâminas de irrigação foram estimadas com base na reposição entre produto Evapotranspiração de referência (ET_o) e o K_c de cada fase de desenvolvimento, menos a precipitação do dia anterior. Para os períodos correspondente 0-2 meses, 2-4 meses, 3-4 meses e 4-7 meses utilizou-se os respectivos K_c 0,2; 0,4; 0,6; 1,25 conforme propõe Barbieri (1981) citado por Narin et al. (2009). A ET_o foi estimada pelo método Penman-Monteith (Equação 1).

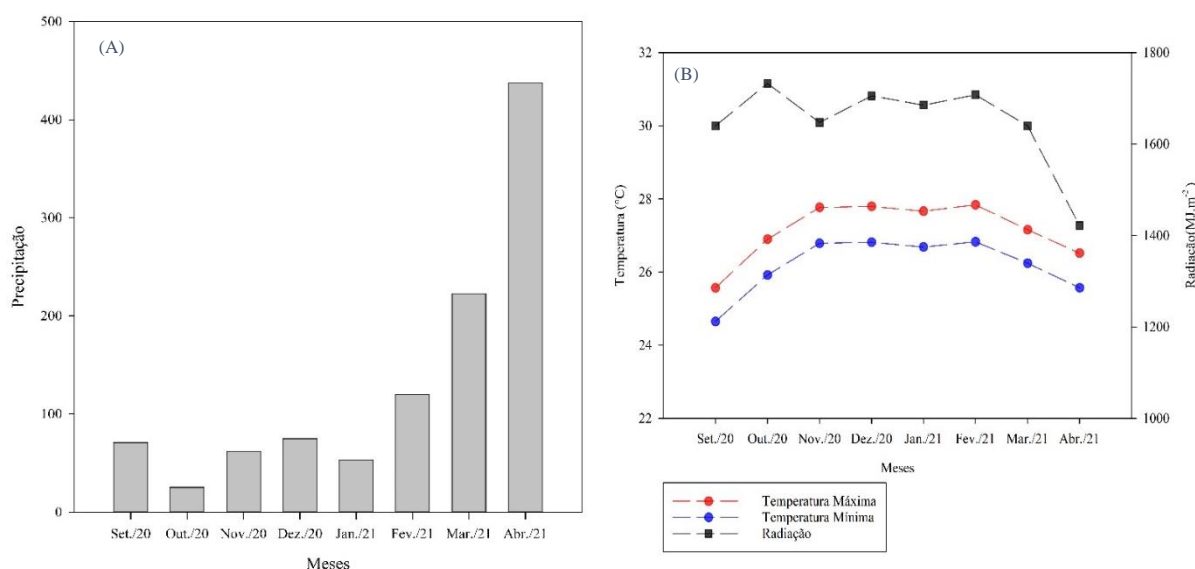
$$ET_o = \frac{0,408\Delta(Rn-G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1-0,34u_2)} \quad [\text{Equação 1}]$$

Onde,

ET_o = Evapotranspiração de Referência (mm.d⁻¹); R_n = Saldo de Radiação á superfície da cultura (MJ.m⁻².d⁻¹); G= Densidade de fluxo de calor do solo (MJ.m⁻².d⁻¹); Temperatura do ar a 2m de altura (°C); u₂= Velocidade do vento a 2 m de altura (m.s⁻¹); e_s=Pressão de vapor de saturação (KPa); e_a = Pressão parcial de vapor (KPa); Δ = Declividade da curva de pressão de vapor de saturação; γ = Coeficiente psicométrico (KPa°C⁻¹)

As variáveis meteorológicas utilizadas para estimar a ETo e para monitorar as condições meteorológico local de estudo foram extraídas da base de dados do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET. Entre a implantação do experimento (setembro/2020) e a última avaliação (abril/2021) foram encontrados valores de precipitação acumulada, médias da temperatura máxima, temperatura mínima e radiação correspondente a 1064,60 mm, 27,15 °C, 26,19 °C e 1647,71 MJ.m⁻², respectivamente (figura 1).

Figura 1 – Caracterização meteorológica da área experimental. (A) Precipitação acumulada, (B) Temperaturas máximas, Temperatura mínimas e Radiação solar.



3.3 Avaliação do acúmulo de biomassa na parte aérea.

O acúmulo de biomassa na parte aérea da cana-de-açúcar foi determinado antes da primeira aplicação foliar (163 DAP), antes da segunda aplicação foliar (195 DAP) e pós evolução da F+1, da segunda aplicação, para F+3 (224 DAP). Para isso, foram coletados três perfilhos por parcela. Cada parcela foi subdividida três sessões de 0,33 m e, em cada sessão um perfilho foi retirado aleatoriamente. Dentro das sessões, ainda foram mantidos outros perfilho que não foram coletados.

Os perfilhos coletados tiveram os compartimentos (ponteiro, colmo, folha verde, folha seca) e folha +1 separados, pesados e determinado a massa fresca. Na sequência, os componentes foram processados em forrageira. Uma subamostra de cada componente foi coletado e posta para secagem em estufa com circulação de ar forçada a 65°C até atingir peso constate. Com os resultados obtidos quantificou-se o teor de umidade de cada componente e estimou-se o acúmulo de biomassa por perfilho, com base no teor de

umidade da subamostra e a massa fresca de cada componente. O acúmulo de biomassa por parcela foi obtido com base entre o produto da biomassa acumulada por perfilho e o número de perfilho por parcela.

3.4 Avaliação da eficiência da adubação nitrogenada

O acúmulo de N na parte aérea e a eficiência da adubação nitrogenada foram quantificados os 162 DAP, 194 DAP e 224 DAP. Para isto, as parcelas foram subdivididas três sessões de 0,33 m e, em cada sessão um perfilho foi retirado aleatoriamente. No total, foram coletados três perfilhos por parcela em cada avaliação. Dentro das sessões, ainda foram mantidos outros perfilho que não foram coletados.

Os perfilhos coletados tiveram os compartimentos (ponteiro, colmo, folha verde, folha seca) e folha +1 separados. Cada compartimento foi seco em estufa de aeração forçada a 60° C até atingir peso constante. Posteriormente, os compartimentos foram moídos em moinho elétricos tipo 51 “Willey” e peneirados (malha de 1 mm) para determinação do N-total pelo método Kjeldahl (MALAVOLTA et al., 1997). Com os resultados obtidos foi estimada a quantidade de N acumulado por perfilho com o produto entre a matéria seca total e o teor de N em cada componente. E, o N acumulado por parcela com base no produto da quantidade de N acumulado por perfilho e o número de perfilho por parcela.

A eficiência da adubação nitrogenada foi determinada a partir da quantificação do nitrogênio derivado do fertilizante (NDFE) na folha +1 (primeira folha, descendente, completamente expandida e com o colarinho visível). As folhas coletadas foram secas em estufa de aeração forçada a 60° C até atingir peso constante, processadas no moinho 51 “Willey”, moídas em moinho tipo bola até a obtenção de um pó fino e pesadas em encaminhadas para análise no laboratório Plant and Soil da Universidade da Flórida, California – EUA para determinar a abundância de ¹⁵N (% em átomos ¹⁵N) por meio de espectrometria de massa. Com base nos resultados obtidos foram estimadas a quantidade de nitrogênio derivado fertilizante (Equações 2 e 3) e, posteriormente, a recuperação de N-fertilizantes (Equação 4) (TRIVELIN et al., 1994).

$$\text{NDFE} = [(a - c)/(b - c)] \cdot 100 \quad [\text{Equação 2}]$$

$$\text{NDFE}(\text{g. parcela}^{-1}) = (\text{NDFE}/100) \cdot N_{\text{total}} \quad [\text{Equação 3}]$$

$$R = (NDFf/Naf) \cdot 100 \quad [\text{Equação 4}]$$

Onde, NDFf (%) = Nitrogênio derivado do fertilizante; a = abundância em átomos de ^{15}N na planta; b = abundância em átomos de ^{15}N no fertilizante (2,08%); c = abundância natural de átomos de ^{15}N (0,3663%); N_{total} (g.parcela⁻¹) = Nitrogênio total da parte aérea; R (%) = Recuperação de nitrogênio do fertilizante; Naf (g.parcela⁻¹) = quantidade de N-fertilizante aplicado no tratamento.

3.5 Avaliação de crescimento e desenvolvimento vegetativo

A avaliação de crescimento e desenvolvimento foi realizada partir da mensuração de parâmetros biométricos da cana-de-açúcar, como: a altura da planta, número de perfilho, número entrenós, bem como diâmetro e comprimento de entrenós.

A altura de planta, número de perfilho foram contabilizados de todas as plantas presentes na parcela. E, de cada perfilho foram contabilizado o número de entrenós e tomadas as medidas de comprimento e diâmetros para cada entrenó. A altura de planta e o comprimento de entrenós foram mensurados com auxílio de fita métrica e paquímetro, respectivamente. Considerando, a altura do colmo como distância vertical entre o solo e a inserção da folha +1 (OLIVEIRA et al., 2010) e o comprimento dos entrenós como a menor distância entre dois anéis de crescimento.

Aos 32 DAAT (Dias após a aplicação dos tratamentos na folha) e 62 DAAT, também foi mensurada a altura de planta e contabilizado o número de entrenós em todas as plantas presente nas parcelas. Adicionalmente, foram mensurados o comprimento e diâmetro dos entrenós correspondente as folhas +1, +2 e +3 que receberam as soluções de ureia em três plantas de cada parcela em cada tempo de avaliação.

3.6 Avaliação da lixiviação de nitrogênio

A lixiviação de N foi estimada a partir da concentração de N, nas formas nas formas nítrica ($\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$) e amoniacal (NH_4^+), lixiviada durante os seis primeiros meses do experimento (setembro/2020 a fevereiro/2021).

Para isso, após eventos de precipitação a solução lixiviado de cada lisímetro era coletada. Para quantificar o N na solução, as amostras coletadas foram agrupadas. O agrupamento foi realizado em intervalos iguais a correspondendo a 30 dias de amostragem correlatos a; Set./20 (04/09 a 03/10), Out./20 (04/10 a 03/11), Nov./20 (04/11

a 03/12), Dez./20 (04/11 a 03/12), Jan/21 (04/01 a 03/02) e Fev./21 (04/02 a 27/02). Só amostras de fevereiro de 2021 foi agrupada em intervalo de 28 dias de amostragem.

As amostras coletadas foram armazenadas e mantida sob congelamento até o momento das determinações de N. Antes das determinações as amostras foram descongeladas em temperatura ambiente, homogeneizadas e submetida a filtragem em membrana de celulose de 0,45 μm . Uma alíquota de 20 ml de cada amostra foi retirada para a quantificação de N pelo método da destilação a vapor, conforme descreve Tedesco et al., 1995. Com os resultados obtidos foi estimada a lixiviação de N (N-nítrico e N-amoniaco) pela equação 5.

$$F_{NL} = \frac{C_i \cdot V_i}{A} \quad \text{[Equação 5]}$$

Onde, F_{NL} ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$) = Fluxo de N lixiviado (NO_3^- , NO_2^- e NH_4^+); C_i ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) = concentração de N na solução lixiviada; V_i (L) = Volume lixiviado; A (m^2) = área do lisímetro.

3.7 Análise dos dados

Os dados obtidos no experimento foram submetidos aos testes de normalidade dos resíduos de Shapiro-Wilk e quando necessário foram transformados para atender os pré-requisitos da análise de variância (ANOVA). As variáveis que apresentaram diferenças significativa pelo teste de F ($p < 0,05$) na ANOVA tiveram as médias dos manejos comparadas entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ($p < 0,05$), com base no ajuste LSMEANS do SAS.

As médias dos manejos para a biomassa acumulada na parte aérea, acúmulo de N na parte aérea e para recuperação de N-fertilizante foram submetidas a análise de contraste ortogonal para comparar; (i) O desempenho global dos manejos com adubação foliar x manejos via solo (60 kg ha^{-1} e 120 kg ha^{-1} de N), (ii) O desempenho global da aplicação da adubação foliar parcelada x aplicação foliar em dose única e (iii) O efeito da redução da adubação via solo com aplicação foliar.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Concentração de nitrogênio no lixiviado

As concentrações de N mineral ($\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^- + \text{NH}_4^+$) (Tabela 4) e N nas formas N-nitrica e N-amoniacal (Tabela 5) no lixiviado foram maiores durante os três primeiros meses após a adubação. Nesse período, foi encontrado 96%, 97% e 68% de todo o N lixiviado nas formas mineral, N-nitrica e N-amoniacal, respectivamente.

As concentrações altas de N nos primeiros 90 dias após a adubação pode ser um indicativo de maiores perdas de N decorrente das adubações. Essa condição também foi contatada no trabalho de Ghiberto, Libardi e Trivelin (2015). Na ocasião, os autores que verificaram que as concentrações de N mineral no lixiviado é máxima durante o início das avaliações e tendem a reduzir ao logo do tempo. No período de 90 dias após a adubação da cana-de-açúcar, os autores identificaram que a lixiviação de N representou 67%.

Tabela 4 – Monitoramento da concentração de N mineral ($\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^- + \text{NH}_4^+$) no lixiviado de lisímetros cultivado com cana-de-açúcar. Recife-PE.

Manejos (kg ha^{-1} de N)	N mineral (mg.L^{-1})					
	Set./20 ⁽ⁱ⁾	Out./20 ⁽ⁱ⁾	Nov./20	Dez./20	Jan./21	Fev./21
120	3,23 B	40,94	3,82 A	0,28	0,66 A	1,40 A
60	25,81 A	-	1,79 AB	0,46	0,64 AB	0,99 A
55	27,54 A	-	0,32 BC	0,35	0,47 AB	0,86 ABC
50	10,90 A	40,68	0,29 C	0,64	0,36 AB	0,50 BC
45	3,45 AB	49,61	0,26 C	0,50	0,29 B	0,42 C
30	2,73 AB	20,03	0,36 C	0,66	0,29 B	0,93 A
Média	9,20	40,09	0,74	0,48	0,42	0,74
F	7,09*	-	10,50*	0,29 ^{ns}	4,92*	14,86*
CV(%)	43,21	54,39	54,36	0,29	36,50	23,78
Precipitação	40,80	23,60	69,00	68,40	53,00	115,80

^{ns}; não significativo e *, ** significativo pelo teste de F a $p < 0,05$ e $p < 0,01$, respectivamente. Médias com letras diferentes nas linhas diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a $p < 0,05$. ⁽ⁱ⁾ variável transformada $\log(x)$. Células com (-) identificam os tratamentos onde não foram observada lixiviação. Set./20; setembro/2020, Out./20; outubro/2020, Nov./20; novembro/2020, Dez./20; dezembro/2020, Jan./21; janeiro/2021, Fev./2021; fevereiro/2021. As doses 60 kg ha^{-1} , 55 kg ha^{-1} , 50 kg ha^{-1} , 45 kg ha^{-1} , 30 kg ha^{-1} e 120 kg ha^{-1} correspondem a 100%, 92%, 83%, 75%, 50% e 150% de N aplicado no solo.

Nos três primeiros meses após a adubação, também se constatou que a proporção de N-nitrico:N-amoniacal no lixiviado é alta (55:1 em setembro/2020, 21:1 em outubro/2020 e 4:1 em novembro/2020). E, a partir do quarto mês essa proporção é menor (0,56:1 em

dezembro/2020, 1:1 em janeiro/2021 e 2:1 em fevereiro/2021). O que indica maior movimentação e perda de N ocorre na forma N-Nítrica, principalmente, nos períodos iniciais (Tabela 5).

A variação da concentração de N no lixiviado depende de um conjunto de processos. Os principais processos que influenciam na concentração de N no lixiviado são os eventos de precipitação/drenagem, a capacidade da extração de N pela cultura e as transformações bioquímicas dos fertilizantes nitrogenados no solo (AMIN et al., 2021; YANG; CHIWA, 2021; AUTRET et al., 2020).

Tabela 5 - Monitoramento da concentração de nitrogênio nas formas N-nítrica ($\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$) e N-amoniaco (NH_4^+) no lixiviado de lisímetros cultivado com cana-de-açúcar. Recife-PE.

Manejos (kg ha^{-1} de N)	$\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$ (mg. L^{-1})					
	Set./20 ⁽ⁱ⁾	Out./20	Nov./20	Dez./20 ⁽ⁱ⁾	Jan./21	Fev./21
120	3,09 B	40,07	2,27 A	0,17	0,43 A	0,98 A
60	23,47 A	-	1,76 A	0,23	0,28 A	0,56 B
55	27,11 A	-	0,35 B	0,26	0,25 A	0,61 AB
50	11,69 A	39,89	0,31 B	0,19	0,23 A	0,41 B
45	2,81 B	38,92	0,31 B	0,23	0,27 A	0,39 B
30	2,17 B	18,28	0,36 B	0,36	0,07 B	0,67 AB
Média	8,89	34,68	0,64	0,22	0,27	0,53
F	8,51*	-	22,47*	24,53 ^{ns}	4,16*	5,42*
CV(%)	50,81	50,14	37,04	1,45	37,36	29,12
Manejos (kg ha^{-1} de N)	NH_4^+ (mg. L^{-1})					
	Set./20 ⁽ⁱ⁾	Out./20	Nov./20 ⁽ⁱ⁾	Dez./20 ⁽ⁱ⁾	Jan./21 ⁽ⁱ⁾	Fev./21 ⁽ⁱ⁾
120	0,15	0,88	1,71 A	0,03 B	0,35	0,29
60	0,26	-	0,02 B	0,99 A	0,36	0,30
55	0,01	-	0,24 AB	0,02 B	0,25	0,48
50	0,18	0,79	0,03 B	0,22 AB	0,14	0,12
45	0,18	2,19	0,15 B	0,16 B	0,11	0,09
30	0,16	1,75	0,01 B	0,01 B	0,26	0,26
Média	0,16	1,63	0,16	0,39	0,26	0,24
F	0,43 ^{ns}	-	36,90*	4,12*	2,34 ^{ns}	1,73 ^{ns}
CV(%)	27,98	115,84	38,23	34,25	32,19	35,06
Precipitação (mm)	40,80	23,60	69,00	68,40	53,00	115,80
Irrigação (mm)	0	32,09	28,27	109,48	111,76	10,27

^{ns}; não significativo e *, ** significativo pelo teste de F a $p < 0,05$ e $p < 0,01$, respectivamente. Médias com letras diferentes nas linhas diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a $p < 0,05$. ⁽ⁱ⁾ variável transformada $\log(x)$. Células com (-) identificam os tratamentos onde não foram observada lixiviação. Set./20; setembro/2020, Out./20; outubro/2020, Nov./20; novembro/2020, Dez./20; dezembro/2020, Jan./21; janeiro/2021, Fev./21; fevereiro/21. As doses 60 kg ha^{-1} , 55 kg ha^{-1} , 50 kg ha^{-1} , 45 kg ha^{-1} , 30 kg ha^{-1} e 120 kg ha^{-1} correspondem a 100%, 92%, 83%, 75%, 50% e 150% de N aplicado no solo.

Os fertilizantes nitrogenados aplicados no solo estão sujeitos a transformações bioquímicas (CATALDELLI et al., 2018). Em até 48 horas, 80% da ureia aplicada via fertilizante pode ser hidrolisada, pela ação da urease, e libera amônia (NH_3) e dióxido de carbono (CO_2) na solução do solo (ANTIL; GANGWAR; KUMAR, 1992). A amônia liberada pela hidrólise pode ser estabilizada a amônio (NH_4^+), com o consumo de prótons da solução do solo (SIGURDARSON; SVANE; KARRING, 2018) ou transformada em nitrato (NO_3^-) em até 40 dias em ambientes bem drenados, pelas bactérias nitrificadoras (ROGERI et al., 2015).

A abundância de N nas formas N-nitrico e N-amoniacal dependem das transformações de N no ambiente (ZHANG et al., 2018), bem como da mobilidade dessas formas no solo (GROHSKPF et al., 2016).

Em ambientes de rápida transformação e sob baixa demanda de N pela cultura o N-nítrico é forma de N mais abundante no solo (Boschiero et al., 2018). E, devido à baixa energia envolvida na interação entre os coloides do solo, o N-nitrico é a forma de N mais móvel no solo (JADOSKI et al., 2010; GROHSKPF et al., 2019). Nessa condição, os eventos de drenagem removem, proporcionalmente, quantidades maiores de N-nitrico do solo e essa forma de N passa a predominar na solução lixiviada (LU et al., 2019; SRIVASTAVA; PANDA; CHAKRABOTY, 2020). O que explica a alta relação de N-nitrico: N-amoniacal e a elevada perda de N encontrada no pelo estudo no início das avaliações (Tabela 5).

Após as perdas acentuadas de N nos períodos iniciais, com crescimento do sistema radicular e aumento da demanda de N pela cultura, a quantidade de N na solução do solo susceptível a lixiviação reduz. Com menos N susceptível a lixiviação, os eventos de drenagem removem quantidades menores de N-nitrico do solo. A remoção de quantidades menores de N-nitrico do solo reduz a participação de N-nitrico no lixiviado, bem como a concentração de N. (MOLIN; ERNANI; GERBER, 2020; ZHENG et al., 2020). Essa condição explica a redução na concentração de N no lixiviado e o estreitamento da relação N-nitrico: N-amoniacal na solução lixiviada partir do quarto mês (Tabela 5).

As doses de N aplicadas no solo influenciaram ($p < 0,05$) as concentrações de N mineral no lixiviado em setembro/2020, novembro/2020, janeiro/2021 e fevereiro/2021, onde se concentrou 75% da precipitação acumulada (Tabela 4). Nesses meses, com exceção de setembro/2020, o manejo com 120 kg ha^{-1} de N foi o responsável por aportar

as maiores quantidades de N no lixiviado. Enquanto que doses menores (45 kg ha^{-1} e 30 kg ha^{-1} de N) resultaram em menores aportes de N no lixiviado.

Ao longo das avaliações, constatou-se reduzir a adubação de N no solo em até 16,67% não é capaz de influenciar e/ou reduzir significativamente o aporte no N mineral no lixiviado. Visto que as concentrações de N mineral encontradas nos lisímetros com aplicação de 60 kg.ha^{-1} , 55 kg.ha^{-1} e 50 kg.ha^{-1} de N não diferiram entre si. A ausência de efeito entre esses manejos pode ter ocorrido devido a mineralização da matéria orgânica do solo que compensou a diferença de 5 kg.ha^{-1} e 10 kg.ha^{-1} de N com o N nativo do solo.

Vitti et al., (2008) verificaram que só a mineralização da palhada da cana-de-açúcar pode contribuir com aporte de 25 kg.ha^{-1} de N. Contribuições maiores (36 kg.ha^{-1} de N) foram verificadas pelos autores quando o solo foi adubado com ureia (40 kg.ha^{-1}). Incremento que ocorreu devido a redução da relação C:N da matéria orgânica do solo.

Efeito das adubações na concentração de N-nítrico no lixiviado só não foi observado no quarto mês após adubação (Tabela 5). No primeiro mês após adubação, constatou-se que os manejos com 60 kg.ha^{-1} , 55 kg.ha^{-1} e 50 kg.ha^{-1} de N foram responsáveis por aportar as maiores concentrações de N-nítrico no lixiviado com $23,47 \text{ mg.L}^{-1}$, $27,11 \text{ mg.L}^{-1}$, e $11,69 \text{ mg.L}^{-1}$, respectivamente. No quarto mês após adubação os maiores aportes foram nos manejos com as maiores dose de N no solo (120 kg.ha^{-1} e 60 kg.ha^{-1}). No quinto mês pós adubação quase todos os manejos, com exceção de 30 kg.ha^{-1} , aportaram quantidade de N-nitrico similar no lixiviado. Enquanto no sexto mês os maiores aporte de N foram observados nos manejo com 120 kg.ha^{-1} , 50 kg.ha^{-1} e 30 kg.ha^{-1} de N.

As adubações influenciaram e incrementaram significativamente ($p < 0,05$) as concentrações de N-amoniaco apenas no terceiro mês após adubação na dose 120 kg ha^{-1} e no quarto mês após adubação na dose 60 kg ha^{-1} (Tabela 5).

Em ambas as formas de N, o manejo com 120 kg.ha^{-1} contribuiu para aumentar as concentrações de N-nítrico e N-amoniaco na solução lixiviada, enquanto nos manejos com redução da dose de N em 50% (30 kg ha^{-1}) e 25% (45 kg ha^{-1}) contribuíram com a redução dessas formas de N no lixiviado.

O efeito das adubações na concentração de N no lixiviado é amplamente documentado na literatura (JEMISON; FOX 1994, KÖHLER et al., 2006; SYLVESTRE

et al., 2019; LU et al., 2021). Os estudos demonstram que aumentar as doses de N na adubação pode incrementar as concentrações de N no lixiviado. Pois, as adubações contribuem com o aporte exógeno de N. A entrada extra de N no sistema potencializa a chance de perda de N por lixiviação (DUETE et al., 2008; WANG et al., 2019). Assim como ocorreu nesse estudo, Qiang et al., (2011) também constataram que incrementar (50%) a doses de N resulta no aumento (34%) nas concentrações de N (nitrato) no lixiviado.

As concentrações de N mineral encontradas ao longo do presente estudo (0,74 a 40,09 mg.L⁻¹) estão de acordo com as observadas por Ghiberto, Libardi e Trivelin (2015) que encontraram valores de N mineral no lixiviado de 0,80 mg.L⁻¹ a 41,55 mg.L⁻¹ ao manejar adubação nitrogenada (100 kg ha⁻¹ a 150 kg ha⁻¹ de N) na cana-de-açúcar em solo arenoso.

4.2 Lixiviação de nitrogênio

A precipitação acumulada entre setembro/2020 e fevereiro/2021 foi de 370,6 mm (Figura 2). Sendo, novembro/2020 (69,00 mm), dezembro/2020 (68,40 mm) e fevereiro/2021 (115,80 mm) os meses mais chuvosos. Esses dados de precipitação concordam com os encontrados por Silva et al., (2021) que para o mesmo período encontrou 371 mm, em uma serie de 20 anos. Entretanto, as maiores precipitações, observado pelos autores ao longo do ano estão entre os meses entre abril a agosto.

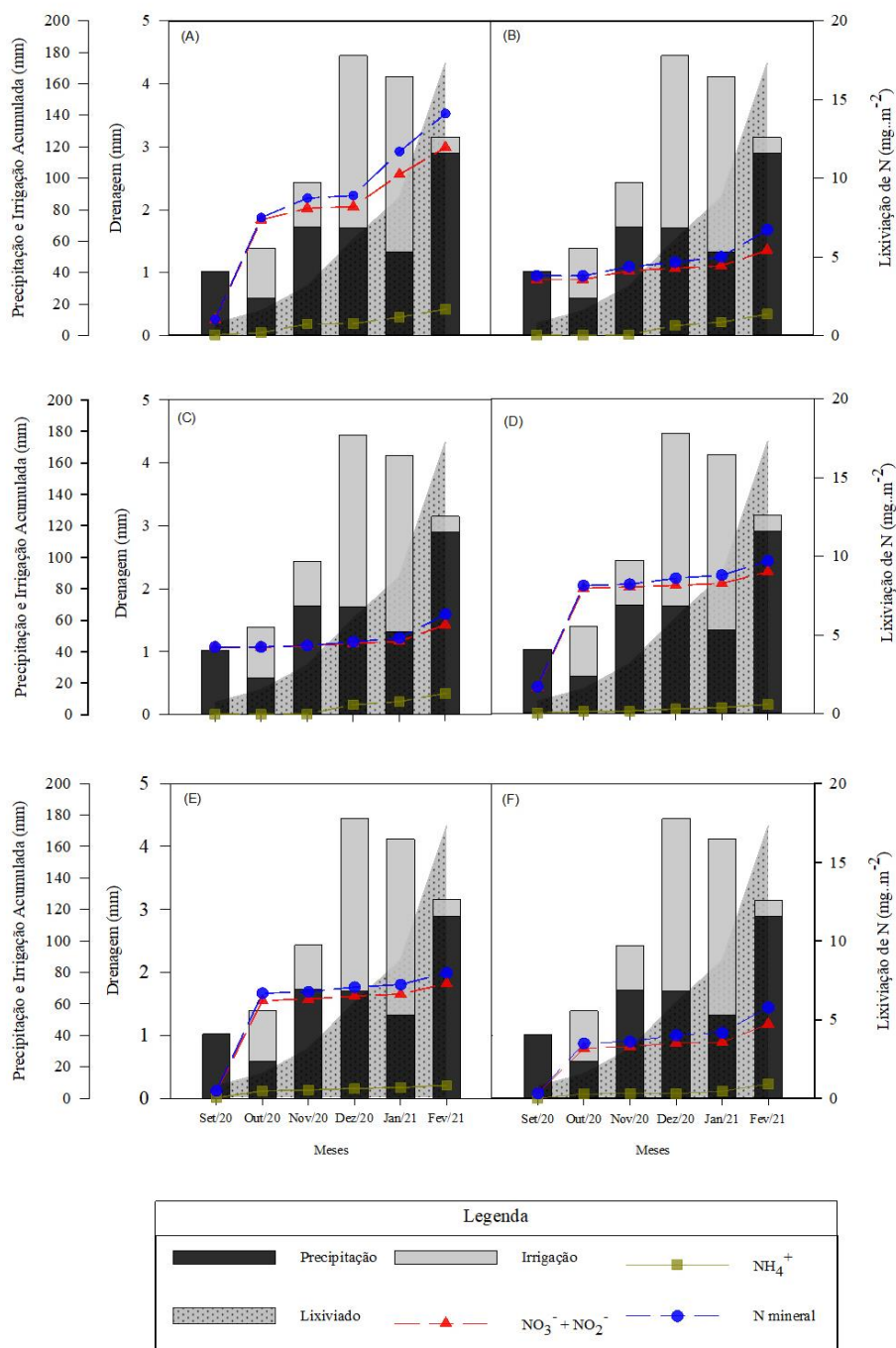
Nesse estudo, constatou-se a precipitação acumulada foi responsável por uma lâmina de drenagem acumulada de 4,32 mm (Figura 2). Os maiores registros de drenagem foram observados dezembro/2020 (0,74 mm) e janeiro/2021 (0,67 mm) e fevereiro/2021 (2,13 mm). O aumento da drenagem em outubro/2020 e fevereiro/2021 provocou incremento nas perdas de N por lixiviação (N mineral, N-nitrico e N-amoniacal), enquanto nos demais meses a perda de N no sistema foi constante.

No acumulado, a drenagem removeu do solo entre 14,11 mg.m⁻² a 5,79 mg.m⁻² de N mineral (Figura 2 e Tabela 6). Sendo, as perdas mais expressivas foram observadas em setembro/2020-outubro/2020, devido a maior concentração de N na solução (Tabela 6) e fevereiro/2020 em função do aumento da lâmina de drenagem (Figura 2).

Entre todos os manejos testados, constatou-se que a maior perda de N mineral foi encontrada no manejo 120 kg ha⁻¹ com 14,11 mg.m⁻² (Tabela 6), sendo 12% do N

lixiviado na forma N-aminacal e 88 % N-nitrico (Figura 3). E, a menor perda de N por lixiviação foi encontrada no manejo 30 kg ha⁻¹ com 5,79 mg.m⁻² (Tabela 6), sendo 16% do N lixiviado como N-amoniacal e 84% como N nítrico (Figura 3)

Figura 2 – Precipitação irrigação, drenagem e lixiviação acumulada das formas nítricas, amoniacais e mineral de nitrogênio no manejos com (A) 120 kg.ha⁻¹, (B) 60 kg.ha⁻¹, (C) 55 kg.ha⁻¹, (D) 50 kg.ha⁻¹, (E) 45 kg ha⁻¹ e (F) 30 kg ha⁻¹ de N aplicação via solo com cana-de-açúcar.



Set./20; setembro/2020, Out./20; outubro/2020, Nov./20; novembro/2020, Dez./20; dezembro/2020, Jan./21; janeiro/2021, Fev./2021; fevereiro/2021. As doses 60 kg ha⁻¹, 55 kg ha⁻¹, 50 kg ha⁻¹, 45 kg ha⁻¹, 30 kg ha⁻¹ e 120 kg ha⁻¹ correspondem a 100%, 92%, 83%, 75%, 50% e 150% de N aplicado no solo.

Independente do manejo, as perdas de N foram majoritariamente N-nítrica (figura 2 e 3). Condição de ocorreu devido a maior proporção de N-nítrico no lixiviado durante 4 meses de avaliação (Tabela 6). Em média o N-nitrico representou 86% de todo o N perdido por lixiviação (figura 3). Nos manejos com redução das doses (50 kg ha⁻¹ 45 kg ha⁻¹ e 30 kg ha⁻¹) as perdas de N-nitrico foram superiores a 84%. Enquanto nos manejos com 120 kg ha⁻¹ e 60 kg ha⁻¹ as perdas de N-nítrico representaram 88% e 80%, respectivamente, de todo o N mineral lixiviado.

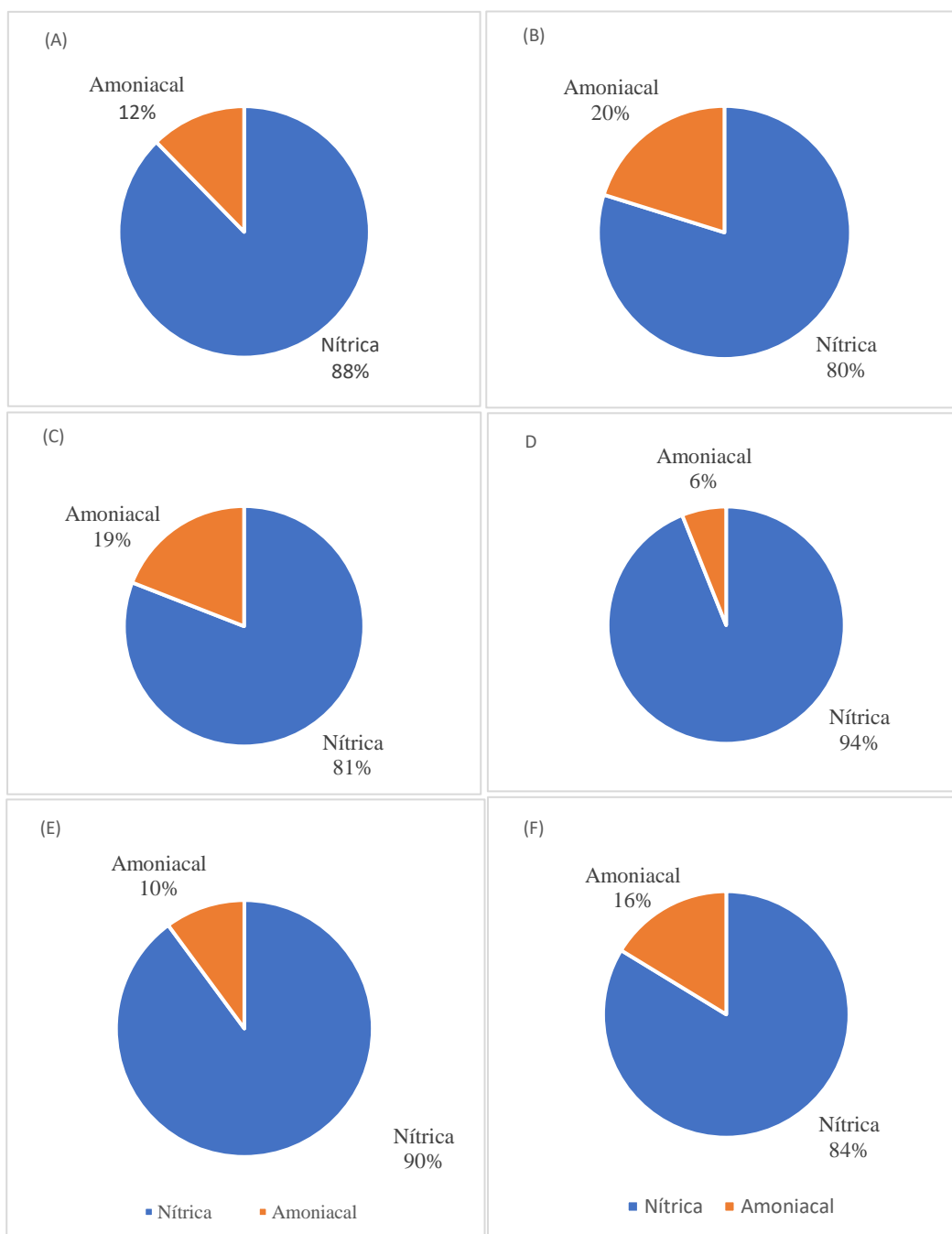
Blum et al., (2013) trabalhando com nitrato de amônio e Marín, Quílez e Isla (2020) com ureia, ambos em cana-de-açúcar, verificaram que o N-nitrico representava 92,30%, e 82,00%, respectivamente, de todo N lixiviado.

Tabela 6 - Monitoramento da perda por lixiviação de N-nítrico (NO₃⁻ + NO₂⁻) e N-amoniacal (NH₄⁺) e nitrogênio mineral (NO₃⁻ + NO₂⁻ + NH₄⁺) em lisímetros cultivado com cana-de-açúcar, Recife-PE.

Manejos (kg ha ⁻¹ de N)	NH ₄ ⁺ (mg. m ⁻²)					
	Set./20	Out./20	Nov./20	Dez./20	Jan./21	Fev./21
120	0,05 [0,02]	0,14	0,55	0,02 [0,16]	0,42 [0,00]	0,50 [0,00]
60	0,04 [0,01]	-	0,02 [0,00]	0,59 [0,56]	0,20 [0,14]	0,52 [0,40]
55	0,02 [0,01]	-	0,07	0,01 [0,00]	0,13 [0,12]	0,83 [0,82]
50	0,03 [0,01]	0,12 [0,14]	0,01 [0,04]	0,13 [0,10]	0,08 [0,05]	0,21 [0,21]
45	0,03 [0,03]	0,44 [0,47]	0,05 [0,05]	0,10 [0,16]	0,05 [0,04]	0,15 [0,00]
30	0,02 [0,01]	0,27 [0,20]	0,03	0,00	0,14 [0,06]	0,46 [0,00]
Manejos (kg ha ⁻¹ de N)	NO ₃ ⁻ + NO ₂ ⁻ (mg. m ⁻²)					
	Set./20	Out./20	Nov./20	Dez./20	Jan./21	Fev./21
120	1,02 [1,37]	6,33	0,74	0,10 [0,00]	2,05 [0,00]	1,72 [0,43]
60	3,56 [0,01]	-	0,57 [0,16]	0,16 [0,06]	0,15 [0,13]	0,98 [0,19]
55	4,28 [4,83]	-	0,11	0,15 [0,07]	0,13 [0,02]	1,06 [0,00]
50	1,66 [0,94]	6,30 [0,20]	0,10 [0,05]	0,10 [0,01]	0,12 [0,06]	0,73 [0,28]
45	0,44 [0,26]	5,76 [5,07]	0,10 [0,03]	0,18 [0,10]	0,14 [0,09]	0,67 [0,32]
30	0,31 [0,28]	2,88 [2,89]	0,12 [0,04]	0,22 [0,01]	0,04 [0,03]	1,16 [0,16]
Manejos (kg ha ⁻¹ de N)	N mineral (mg. m ⁻²)					
	Set./20	Out./20	Nov./20	Dez./20	Jan./21	Fev./21
120	1,03 [1,35]	6,47	1,23	0,17 [0,14]	2,79 [0,43]	2,42 [0,61]
60	3,80 [0,01]	-	0,58 [0,16]	0,28 [0,10]	0,35 [0,19]	1,72 [0,36]
55	4,30 [4,84]	-	0,11	0,23 [0,67]	0,25 [0,10]	1,50 [0,04]
50	1,70 [0,90]	6,43 [0,33]	0,10 [0,05]	0,38 [0,32]	0,19 [0,09]	0,90 [0,46]
45	0,47 [0,33]	6,20 [4,67]	0,09 [0,03]	0,30 [0,25]	0,16 [0,09]	0,75 [0,25]
30	0,33 [0,28]	3,17 [3,77]	0,12 [0,05]	0,40 [0,01]	0,16 [0,11]	1,61 [0,17]
Precipitação (mm)	40,80	23,60	69,00	68,40	53,00	115,80
Irrigação (mm)	0	32,09	28,27	109,48	111,76	10,27

Os valores em crochê referem-se ao desvio padrão. Células com (-) identificam os tratamentos onde não foram observada lixiviação. Set./20; setembro/2020, Out./20; outubro/2020, Nov./20; novembro/2020, Dez./20; dezembro/20[0, Jan./21; janeiro/2021, Fev./2021; fevereiro/2021. As doses 60 kg ha⁻¹, 55 kg ha⁻¹, 50 kg ha⁻¹, 45 kg ha⁻¹, 30 kg ha⁻¹ e 120 kg ha⁻¹ correspondem a 100%, 92%, 83%, 75%, 50% e 150% de N aplicado no solo.

Figura 3 – Proporção das formas nítricas e amoniacal lixiviada no período de setembro/2020 a fevereiro/2021 nos manejos com aplicação com (A) 120 kg.ha⁻¹, (B) 60 kg ha⁻¹, (C) 55 kg ha⁻¹, (D) 50 kg.ha⁻¹, (E) 45 kg ha⁻¹e (F) 30 kg ha⁻¹ de N no solo na cana-de-açúcar.



As doses 60 kg ha⁻¹, 55 kg ha⁻¹, 50 kg.ha⁻¹, 45 kg ha⁻¹, 30 kg ha⁻¹e 120 kg ha⁻¹ correspondem a 100%, 92%, 83%, 75%, 50% e 150% de N aplicado no solo

Reduzir a adubação nitrogenada no solo diminui as perdas de N por lixiviação (Tabela 6). Os resultados de perda de N encontrado nos manejos 60 kg ha⁻¹ e 30 kg ha⁻¹ é 52% e 58% menor comparado as perdas de N no manejo 120 kg ha⁻¹, respectivamente.

Entre os manejos com redução das doses de N, verificou-se que reduzir a adubação no solo em 50% (de 60 kg ha⁻¹ para 30 kg ha⁻¹) pode minimizar as perdas de N por lixiviação em até 14%.

A quantidade absoluta de N mineral lixiviada nesse estudo (Tabela 06) foi baixa comparado aos valores encontrados na literatura. Ghiberto, Libardi e Trivelin, (2015) e Ghiberto et al., (2009; 2011) verificaram que a adubação com 120 kg ha⁻¹ de N promovia a lixiviação de 1,1 kg ha⁻¹ em cana planta (2009), 18,30 kg ha⁻¹ e 34,23 kg ha⁻¹ de N em cana soca (2011 e 2015) sob condição de campo. Já Oliveira et al., (2002) observou que as adubações com 60 kg ha⁻¹ e 30 kg ha⁻¹ de N lixiviava 4,27 kg ha⁻¹ e 4,97 kg ha⁻¹ de N em lisímetro.

Extrapolando a quantidade de N lixiviada e considerando a lâmina drenada, constata-se que os resultados desse estudo para os manejos 120 kg ha⁻¹ (32,66 g.ha⁻¹mm⁻¹) é superior ao encontrado por Ghiberto et al., (2011) em cana planta (12,08 g.ha⁻¹ mm⁻¹). E, os resultados encontrados nos manejos 60 kg ha⁻¹ (15,91 g.ha⁻¹ mm⁻¹) e 30 kg ha⁻¹ (13,40 g.ha⁻¹ mm⁻¹) são superiores aos encontrado por Oliveira et al., (2002) nas doses 60 kg ha⁻¹ (11,96 g.ha⁻¹ mm⁻¹) e 30 kg ha⁻¹ (12,04 g.ha⁻¹ mm⁻¹).

Perdas mais expressivas de N poderiam ter sido observadas caso o plantio e adubação da cana-de-açúcar tivessem sido realizadas no verão. Os resultados da figura 2 mostram que os incrementos na lixiviação de N coincidem com o aumento da precipitação sistema. Corroborando com essa hipótese Dai et al., (2016) constatou que a maior intensidade e regularidades de chuva no verão aumentou a lixiviação de N, em áreas cultivada com trigo.

Thorburn et al., (2017) usou o Agricultural Production Systems Simulator (APSIM) para avaliar a dinâmica de N no solo em fazendas que cultivam cana-de-açúcar na Austrália e verificaram que as perdas de N por lixiviação dependem das condições edafoclimáticas das áreas produtivas. A lixiviação é mais expressiva em áreas com maior precipitação e em solos de textura arenosas. Com o simulador APSIM Stewart et al., (2006) também verificou, na Austrália, que a lixiviação de N em canaviais manejados com adubação parcelada e com aplicação total não diferiam entre si. O fluxo de N (NO₃⁻) para 1,5 m de profundidade nesses dois manejos correspondeu a 29,5 kg ha⁻¹ e 29,1 kg ha⁻¹ de N, respectivamente. Mas em média só 2,8 kg ha⁻¹ de N é foi completamente perdido (lençol freático). Na prática, esses resultados mostram que em solos profundos a

perda real de N é baixa. Mas, a translocação de N para camadas menos explorada pelas raízes limitar a disponibilidade de N para as culturas e reduzir a eficiência das adubações nitrogenada.

4.3 Eficiência da adubação nitrogenada

4.3.1 Teor de N na folha +1

Os resultados dos teores de N na F+1 (tabela 7) até os 162 DAP reflete o efeito das adubações de N aplicada no solo. Enquanto, os resultados aos 194 DAP e 224 DAP refletem o efeito das adubações aplicadas no solo associada com as aplicações foliares.

Tabela 7 – Contribuição dos manejos de adubação nitrogenada no teor de N na folha +1 em cana-de-açúcar. Recife-PE.

Manejos (kg ha ⁻¹)			Teor de N (g.kg ⁻¹)		
Ad. Solo	Ad foliar		162 DAP	194 DAP	224 DAP
	1°	2°			
120	--	--	10,69	9,10	7,68 AB
60	--	--	9,00	8,18	7,66 AB
55	5	0	8,85	8,64	7,64 B
50	5	5	9,03	9,33	7,39 B
50	10	0	-	9,87	8,27 B
45	7,5	7,5	9,23	8,66	6,99 B
45	15	0	-	9,28	7,23 B
30	15	15	8,76	10,19	9,23 A
Média			9,26	9,16	6,26
F			0,84 ^{ns}	1,57 ^{ns}	3,97*
CV			14,68	10,02	6,26

^{ns}; não significativo e *, ** significativo pelo teste de F a $p < 0,05$ e $p < 0,01$, respectivamente. Médias com letras diferentes nas linhas diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a $p < 0,05$. As doses 60 kg ha⁻¹, 55 kg ha⁻¹, 50 kg ha⁻¹, 45 kg ha⁻¹, 30 kg ha⁻¹ e 120 kg ha⁻¹ correspondem a 100%, 92%, 83%, 75%, 50% e 150% de N aplicado no solo. As doses 5 kg ha⁻¹, 7,5 kg ha⁻¹, 10 kg ha⁻¹ e 15 kg ha⁻¹, correspondem a solução as soluções de ureia com 7,5%, 11,16%, 17,48% e 22,20%.

As estratégias de manejo de adubação não influenciaram ($p < 0,05$) os teores de N na F+1 da cana-de-açúcar os 162 DAP e 194 DAP (Tabela 7). Os efeitos significativos dos manejos só foram observados aos 224 DAP, quando o manejo 30 + (15+15) se destacou com o maior conteúdo de N foliar (9,23 g.kg⁻¹).

Os teores de N na folha F+1 encontrados nesse estudo estiveram baixo do nível crítico (13,40 g.kg⁻¹) proposto por Reis Junior e Monnerat (2003) para a região sudeste. Mas, para mesma variedade e sob condições edafoclimáticas semelhante ao desse estudo,

verificou-se que o conteúdo de N é próximo aos encontrados por Lima (2020), para os estágios iniciais (11,20 g.kg⁻¹).

A variação do teor N encontrada ao longo do tempo e entre manejos deu-se em razão da modificação da oferta de N no sistema. Os resultados da Tabela 6 e Figura 2 mostram que até os 150 DAP (Fev/20) as lixiviações contribuíram para reduzir a quantidade de N disponível solo. Enquanto, a partir dos 194 DAP as adubações foliares contribuíram para aumentar a disponibilidade de N no sistema (Tabela 7). Essa dinâmica de N entre as parcelas provocou incremento nos teores de N nos manejos que receberam adubação foliar e redução dos teores de N nos manejos com adubação exclusiva no solo (120 kg ha⁻¹ e 60 kg ha⁻¹).

Ao longo do ciclo verificou-se uma tendência de redução dos teores de N na F+1 em todos os manejos. Esse efeito foi mais pronunciado nas parcelas que receberam adubação exclusiva no solo. Oliveira et al., (2013) e Gava et al., (2019) destacam que a variação dos teores de N ao longo do ciclo da cana-de-açúcar é provocada pela diluição do N no tecido, ocasionado pelo aumento da produção de biomassa na parte aérea associada com a redução na absorção do N nas raízes. E, pela remobilização do N na planta (Oliveira et al., 2010).

Oliveira et al., (2013) verificaram, em cana planta, que os teores de N na folha caem de 13,2 g.kg⁻¹ aos 120 DAP para 2,7 g.kg⁻¹ aos 480 DAP. E, Gava et al., (2019) constataram, em cana soca, que os teores de N caem de 20 g.kg⁻¹ aos 120 dias após o corte para 12 g.kg⁻¹ aos 340 dias após o corte. Nesse estudo, ganho médio de biomassa entre 162 DAP e 224 DAP foi de 133,13 g.parcela⁻¹ (Tabela 11), enquanto o acúmulo de N caiu em 1,2 g.parcela⁻¹ (Tabela 7). Essa condição refletiu uma redução média de 3 g.kg⁻¹ nos teores de N entre 162 DAP e 224 DAP.

De acordo com Santana et al., (2020) a diluição dos teores de N ao longo do ciclo na cana-de-açúcar ocorre de forma exponencial, independentemente da dose aplicada na adubação. Nesse contexto, o menor efeito da diluição de N e incremento dos teores de N após as aplicações foliares é um indicativo de maior assimilação de N com as adubações foliares.

4.3.2 Acúmulo N e recuperação de ¹⁵N-fertilizante na parte aérea da cana-de-açúcar

Os manejos de adubação influenciaram ($p < 0,05$) no acúmulo de N, aos 162 DAP, e na participação do ¹⁵N derivado do fertilizante, em todas as avaliações (Tabela 8). Não foram observados efeitos dos manejos para a recuperação de ¹⁵N-fertilizante.

Tabela 8 – Acúmulo de N, participação e recuperação de N-fertilizante na parte aérea da cana de açúcar. Recife-PE.

Manejos (kg.ha ⁻¹)			N acumulado (g.parcela ⁻¹)	NDDF		R (%)
Ap. solo	Ap. foliar			%	g.parcela ⁻¹	
		1°	2°	162 DAP		
120	--	--	10,06 A	40,61 A	4,12 A	34,36
60	--	--	8,87 AB	27,30 B	2,43 A	40,53
55	5	0	8,28 AB	21,22 BCD	1,78 ABC	32,31
50	5	5	6,76 AB	24,45BC	1,65 BC	32,97
50	10	0	-	-	-	-
45	7,5	7,5	4,91 B	16,99 D	0,87 C	19,26
45	15	0	-	-	-	-
30	15	15	5,23 AB	18,94 CD	0,97 C	32,36
Média			7,34	24,92	1,97	31,97
F			3,96*	19,49*	11,32*	1,68 ^{ns}
CV (%)			24,44	3,85	36,62	29,05
Contrate ortogonal						
\hat{Y}_C			4,92*	10,07*	5,74*	3,55 ^{ns}
F _C (Redução das doses x 60 kg h ⁻¹)			-10,29	-27,59	-4,46	-45,21
Manejos (kg.ha ⁻¹)			N acumulado (g.parcela ⁻¹)	NDDF		R (%)
Ap. solo	Ap. foliar			%	g.parcela ⁻¹	
		1°	2°	194 DAP		
120	--	--	7,23	37,93 A	2,74 A	22,89
60	--	--	5,76	24,51 B	1,43 B	23,38
55	5	0	5,12	29,27 AB	1,49 B	20,71
50	5	5	5,94	32,08 AB	1,90 AB	28,27
50	10	0	6,53	36,44 A	2,37 AB	28,15
45	7,5	7,5	6,26	31,32 AB	1,95 AB	27,61
45	15	0	5,65	37,98 A	2,16 AB	22,48
30	15	15	5,90	34,24 A	2,02 AB	25,02
Média			6,06	32,97	2,00	24,81
F			0,95 ^{ns}	4,18*	3,23*	0,83 ^{ns}
CV (%)			19,23	11,97	21,04	22,03
Contrate ortogonal						
\hat{Y}_A (Ad. foliar x Ad. solo)			-14,02	-14,02	0,55	-13,48
F _A			1,31 ^{ns}	1,58 ^{ns}	0,21 ^{ns}	0,74 ^{ns}
\hat{Y}_C			0,86	54,29	3,47	11,93
F _C (Redução das doses x 60 kg h ⁻¹)			0,04 ^{ns}	13,51*	4,85*	0,33 ^{ns}

Tabela 8 - Continuação.

Manejos (kg.ha ⁻¹)			N acumulado (g.parcela ⁻¹)	NDDF		R (%)
Ap. solo	Ap. foliar			%	g.parcela ⁻¹	
	1°	2°		224 DAP		
120	--	--	5,93	33,96 B	1,95	16,30
60	--	--	5,76	24,62 D	1,42	23,72
55	5	0	6,57	30,00 CD	1,89	26,28
50	5	5	7,45	35,72 BC	2,72	22,36
50	10	0	4,93	34,59 BC	1,71	22,98
45	7,5	7,5	4,64	41,37 AB	1,93	20,05
45	15	0	4,46	38,75 AB	1,73	18,02
30	15	15	6,63	45,69 A	3,00	22,77
Média			5,80	35,59	2,05	21,46
F			1,10 ^{ns}	13,18*	2,45 ^{ns}	1,89 ^{ns}
CV (%)			16,49	8,78	40,18	6,25
Contraste ortogonal						
\hat{Y}_A (Ad. foliar x 60 e 120)			-0,41	50,40	2,48	0,33
F _A			0,94 ^{ns}	32,48*	2,80 ^{ns}	1,92 ^{ns}
\hat{Y}_B (2 aplicações x 1 aplicação)			2,76	19,43	2,31	-0,002
F _B			0,30 ^{ns}	19,32*	7,45*	0,01 ^{ns}
Y _C			0,13	78,40	4,41	-0,16
F _C (Redução das doses x 60 kg.ha ⁻¹)			0,98 ^{ns}	44,93*	3,91 ^{ns}	0,26 ^{ns}

^{ns}; não significativo e *, ** significativo pelo teste de F a $p < 0,05$ e $p < 0,01$, respectivamente. NDDF = Nitrogênio Derivado do Fertilizante; R= Recuperação de ¹⁵N-fertilizante. Médias com letras diferentes nas linhas diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a $p < 0,05$. As doses 60 kg.ha⁻¹, 55 kg ha⁻¹, 50 kg ha⁻¹, 45 kg ha⁻¹, 30 kg ha⁻¹ e 120 kg ha⁻¹ correspondem a 100%, 92%, 83%, 75%, 50% e 150% de N aplicado no solo. As doses 5 kg.ha⁻¹, 7,5 kg.ha⁻¹, 10 kg ha⁻¹ e 15 kg ha⁻¹, correspondem a solução as soluções de ureia com 7,5%, 11,16%, 17,48% e 22,20%. Composição dos contrastes; \hat{Y}_A (Ad. foliar [55+ (5+0); 50+ (5+5); 50+ (10+0); 45+ (7,5+7,5); 45+(15+0); 30+(15+15)] x Ad. solo [120; 60]). \hat{Y}_B (2 aplicações foliar [50+ (5+5); 45+ (7,5+7,5); 30+(15+15)] x 1 aplicações foliar [55+ (5+0); 50+ (10+0); 45+(15+0)]). \hat{Y}_C (Redução das doses [55+ (5+0); 50+ (5+5); 50+ (10+0); 45+ (7,5+7,5); 45+(15+0); 30+(15+15)] x 60 kg.ha⁻¹).

A avaliação de grupo no contraste ortogonal aos 162 DAP, mostram que reduzir as doses de N no solo afeta significativamente ($p < 0,05$) e negativamente (\hat{Y}_C) o acúmulo de N e absorção de ¹⁵N-fertilizante comparado ao manejo controle (60 kg ha⁻¹). Os manejos mais afetados com a redução no acúmulo de N e absorção de ¹⁵N-fertilizante foram os manejos com redução de 25% e 50% da adubação via solo. Os melhores resultados para acúmulo e absorção de ¹⁵N-fertilizante foram encontrados no manejo com 120 kg ha⁻¹ com 10,06 g.parcela⁻¹ e 40,61%, respectivamente. A diferença entre o desempenho do manejo com 120 kg ha⁻¹ e os com redução de 25% e 50% da adubação via solo se deve a quantidade de N fornecida pelas adubações. A diferença média entre a quantidade de N fornecida por esses manejos é de 82.50 kg ha⁻¹ de N.

Trabalhando com a mesma variedade e tipo de solo, Silva (2019) constatou que complementar a adubação no solo com 40 kg ha de N melhora o rendimento da adubação nitrogenada em cana soca. Na ocasião, a autora verificou um incremento de 6%, 1% e 18% para acúmulo de N, NDDF e recuperação de ^{15}N -fertilizante, respectivamente. Entretanto, a autora também verificou que aumentar a adubação no solo incrementa a lixiviação de N.

Após a primeira aplicação foliar de N (194 DAP) não se observou diferenças no acúmulo de N entre os manejos. A avaliação entre grupo do contraste F_A indica que o acúmulo de N entre os manejos que receberam adubação completa via solo (120 kg ha⁻¹ e 60 kg ha⁻¹) e os manejos que tiveram a adubação no solo reduzida e complementada via foliar (F_A) foram semelhantes. O efeito da adubação foi observado na absorção de ^{15}N -fertilizante. Os manejos que receberam as maiores doses de N via foliar (10 kg ha⁻¹ e 15 kg.ha⁻¹) tiveram NDDF médio de 36,22% e absorveram em média 11,71% mais ^{15}N -fertilizante que manejo com 60 kg.ha⁻¹. O NDDF desses manejos foi semelhante ao manejo com 120 kg ha⁻¹ (37,96%).

Após a segunda adubação foliar de N (224 DAP) verificou-se na avaliação de grupo pelo contrastes F_A que a absorção de ^{15}N -fertilizante dos manejos com adubação foliar é superior os manejos com adubação via solo. Análise de grupo no contraste F_B mostrou que parcelada as adubações foliar em duas aplicações melhora a eficiente de absorção de ^{15}N -fertilizante, em comparação a aplicação única. E, avaliação de grupo no contrastes F_c mostrou que reduzir a adubação no solo e complementar via foliar otimiza a absorção de ^{15}N -fertilizante. Entre os manejos, verificou-se o melhor desempenho para NDDF (45,69%) no manejo com redução de 50% da adubação no solo com duas aplicações foliares de 15 kg ha⁻¹. A absorção de ^{15}N -fertilizante nesse manejo foi 25,67% e 46,11% maior que os manejos 120 kg ha⁻¹ e 60 kg ha⁻¹, respectivamente.

Os resultados de NDDF encontrados nesses estudos são superiores aos relatados na literatura que mostram uma participação média do ^{15}N -fertilizante de 15-20% ao realizar a adubação no solo (FRANCO et al., 2008; 2011; VITTI et al., 2011). Nesses trabalhos os autores mostram que a participação de NDDF cai ao longo do ciclo. Nos estádios iniciais de crescimento ^{15}N -fertilizante é a principal fonte de N para a cana-de-açúcar porque o sistema radicular da cultura é superficial. Com o avanço do ciclo o sistema radicular se desenvolve e aumenta a capacidade de exploração do solo, o que

aumenta a possibilidade de absorver N de camada mais profunda do solo (FRANCO et al., 2011; SILVA 2019).

Nesse estudo, também foi verificado redução do NDDF nos manejos com adubação exclusiva no solo. Nos manejos com a adubação foliar o NDDF foi incrementado com o tempo. Esse comportamento indica que há melhor aproveitamento do ^{15}N -fertilizante com adubação foliar.

A participação ^{15}N -fertilizante na planta é influenciada pelo fornecimento de outras fontes de N e pelas perdas por lixiviação (OTTO et al., 2016; JORIS et al., 2020; PEREIRA et al., 2021). Nos canaviais a matéria orgânica é a principal fonte de N para a cana-de-açúcar (DOURADO NETO et al., 2010) e pode contribuir com até 69% do N absorvido (Fortes et al., 2013). No Nordeste Lima (2020) observou que a fixação biológica de N (FBN) pode contribuir com 21% do N absorvido pela cana. Comparados ao fertilizante enriquecido, o N da matéria orgânica e da FBN são pobres em átomos de ^{15}N (RI; DAI; XU, 2020; SMITH; CHALK, 2020). O aumento na absorção de N dessas fontes dilui o ^{15}N nos tecidos e reduz a participação do NDDF na cana-de-açúcar.

No solo, o N é absorvido pelas raízes na forma iônica (NO_3^- e NH_4^+). Antes de ser assimilado o NO_3^- é reduzido a NO_2^- pela redutase do nitrato (RN) e depois a NH_4^+ pela nitrito redutase (NiR) nos plastídios das raízes ou nos cloroplastos das folhas (SAHAY et al., 2021). O NH_4^+ reduzido ou absorvido pelas raízes é assimilado, preferencialmente, pelas enzimas GS/GOGAT (plastídios/cloroplastos) (DAUBRESSE et al., 2010).

Trabalhando com duas variedades de cana-de-açúcar (RB 92579 e RB 867515) Santos et al., (2019) observou que a atividade da RN é maior nas folhas. E, Yang et al., (2019) trabalhando com nove variedades de cana, na China, constatou que a atividade das enzimas GS/GOGAT também é maior nas folhas.

A maiores atividades das enzimas da RN/NiR e GS/GOGAT na folha corre devido a quantidade de energia disponível para redução e assimilação. O complexo NR-NADH/NiR e GS/GOGAT-Fed dos cloroplastos é mais eficiente na transferência energia para as reações do que o complexo NR-NADPH/NiR e GS/GOGAT-NADH dos plastídios (YONEYAMA; SUZUKI, 2020). Assim, é possível que os incrementos no NDDF dos manejos com adubação foliar tenha corrido devido a maior eficiência da assimilação de N nas folhas.

A recuperação (R) média de ^{15}N -fertilizante encontrada para os manejos com adubação foliar foi de 22%. Esses dados são inferiores aos encontrados por Trivelin et al., (1988) que ao aplicar uma solução de ureia a 22% verificou recuperação de ^{15}N -fertilizante na parte aérea de 72%, 24 horas após a adubação. Os resultados encontrados por esses autores podem estar associados a reidratação da cutícula feita 24h após a aplicação. Reidratar a superfície foliar aumenta a mobilidade e a difusividade do soluto pela cutícula, pelos estômatos e reduz a possibilidade de formação de cristais de sais na superfície foliar (DELGADO et al., 2021; FERNÁNDEZ et al., 2020).

Essa hipótese pode ser corroborada com o trabalho de Leite et al., (2020) que ao fez dois ensaios com adubação foliar (ureia a 6%), com e sem reidratação superfície foliar, observou que as plantas que tiveram as folhas reidratadas recuperam 58% do ^{15}N -fertilizante, enquanto as plantas cujas folha não foram reidratadas a recuperação do ^{15}N -fertilizante foi de 17%.

Nesse estudo, 24 horas após a primeira aplicação constatou-se a formação de sais na superfície das folha que receberam a solução de ureia a 14,80% (10 kg ha^{-1}) e 22,20% (15 kg ha^{-1}). Enquanto que 8 horas após a segunda aplicação houve um evento de precipitação que pode ter removido parte do N não absorvido. Trivelin et al., (1988) que verificou redução de 10% na recuperação ^{15}N -fertilizante das plantas cujas folhas foram submetidas a lavagem, simulando uma precipitação. Nesse contexto, é possível que as condições ambientais da área experimental tenham reduzido a eficiência da adubação foliar.

Mesmo com a adversidade das condições ambientais os resultados de acúmulo de N e a recuperação de N pela cana (224 DAP) foram semelhantes entre os manejos, independente da dose aplicada no solo. Assim, reduzir a adubação no solo e complementar via foliar não reduz o acúmulo de N e a recuperação de ^{15}N devido a maior eficiência na absorção de ^{15}N -fertilizante das adubações foliares, mesmo com doses baixa de N.

4.4 Crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar

Os atributos morfológicos da cana-de-açúcar responderam de modo diferentes os manejos de adubação testados.

As 162 DAP, verificou-se que manejos influenciaram significativamente ($p < 0,05$) a altura de planta, número de perfilhos, números de entrenós (Tabela 9), comprimento e diâmetro de entrenós (Tabela 10). O manejo com 45 kg ha⁻¹ de N no solo apresentou os melhores resultado de crescimento com maior altura de planta (1,24 m), maior número de entrenós (5,64 unidade.perfilho⁻¹) e maior comprimento de entrenós (12,13 cm). Para perfilhamento os melhores resultados foram observados nos manejos 120 kg ha⁻¹ e 50 kg ha⁻¹ de N no solo.

Tabela 9 – Altura de plantas até a F+1, perfilhamento e número de entrenós de cana-de-açúcar submetida a diferentes manejos de adubação nitrogenada. Recife-PE

Ap. solo	Manejos (kg.ha ⁻¹)		Altura de planta (m)		
	Ap. foliar		162 DAP	194 DAP	224 DAP ⁽ⁱ⁾
	1°	2°			
120	--	--	1,03 B	1,46	1,74
60	--	--	1,08 B	1,53	1,88
55	5	0	1,02 B	1,52	1,73
50	5	5	1,08 B	1,53	1,84
50	10	0	1,09 B	1,57	1,78
45	7,5	7,5	1,05 B	1,58	1,92
45	15	0	1,24 A	1,59	1,83
30	15	15	1,13 AB	1,58	1,79
Média			1,09	1,55	1,81
F			3,06*	1,22 ^{ns}	0,92 ^{ns}
CV(%)			31,34	16,91	15,19
Ap. solo	Manejos (kg.ha ⁻¹)		Perfilhamento (perfilho.parcela ⁻¹)		
	Ap. foliar		162 DAP	194 DAP	224 DAP
	1°	2°			
120	--	--	18,67 A	14,33	10,00
60	--	--	17,00 AB	13,00	10,67
55	5	0	15,33 AB	10,67	11,67
50	5	5	15,67 AB	13,00	11,67
50	10	0	19,33 A	16,33	11,67
45	7,5	7,5	14,67 AB	10,67	7,33
45	15	0	15,33 AB	12,00	8,33
30	15	15	13,00 B	10,67	8,67
Média			16,13	12,58	10,00
F			3,51*	0,11 ^{ns}	0,22 ^{ns}
CV(%)			12,04	19,08	23,52

Tabela 9 - Continuação.

Ap. solo	Manejos (kg.ha ⁻¹)		N° de entrenós (unidade.perfilho ⁻¹)		
	1°	2°	162 DAP	194 DAP	224 DAP
120	--	--	4,84 AB	9,12	13,08 AB
60	--	--	4,91 AB	8,11	12,35 AB
55	5	0	4,27 B	8,57	12,54 B
50	5	5	4,96 AB	8,74	13,15 AB
50	10	0	5,12 AB	9,00	12,93 B
45	7,5	7,5	5,14 AB	8,65	13,27 AB
45	15	0	5,64 A	8,53	12,08 B
30	15	15	5,32 AB	9,18	14,62 A
Média			5,01	8,73	12,93
F			2,34*	1,41 ^{ns}	3,41*
CV(%)			34,91	20,03	4,32

^{ns}, não significativo e *, ** significativo pelo teste de F a $p < 0,05$ e $p < 0,01$, respectivamente. Médias com letras diferentes nas linhas diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a $p < 0,05$. As doses 60 kg ha⁻¹, 55 kg ha⁻¹, 50 kg ha⁻¹, 45 kg ha⁻¹, 30 kg ha⁻¹ e 120 kg ha⁻¹ correspondem a 100%, 92%, 83%, 75%, 50% e 150% de N aplicado no solo. As doses 5 kg ha⁻¹, 7,5 kg ha⁻¹, 10 kg ha⁻¹ e 15 kg ha⁻¹, correspondem a solução as soluções de ureia com 7,5%, 11,16%, 17,48% e 22,20%.

⁽ⁱ⁾ variável transformada log(x).

O perfilhamento foi afetado pela redução da adubação no solo. Os resultados mostram que a redução de 50% da dose de N no solo (60 kg ha⁻¹ para 30 kg.ha⁻¹) diminuiu o perfilhamento em 23%. Com a mesma redução na adubação nitrogenada, Zeng et al., (2020) verificou redução de até 27% no perfilhamento.

De acordo com Megda et al., (2012) e Vuyyuru et al., (2019) adubação nitrogenada aumenta o perfilhamento da cana-de-açúcar. Com mais perfilho a competição pela luz se intensifica e radiação interceptada pelo dossel da planta diminui (Singles; Smit, 2009). Sob baixa a luminosidade atividade fotossintética o crescimento das plantas pode ser reduzido (ZHAO; GLAZ; COMSTOCK, 2014; LUI et al., 2020). Assim, é possível que a competição entre perfilhos tenha reduzido a altura de planta, número e comprimento de entrenós nos manejos com as maiores doses de N no solo aos 162 DAP. Enquanto, a menor competição entre perfilhos tenha propiciado os melhores resultados de crescimento no manejo com 45 kg ha⁻¹ de N.

Aos 194 DAP e 224 DAP, só foram identificados efeitos dos manejos no crescimento dos três primeiros entrenós (Tabela 11). Aos 194 DAP, o efeito dos manejos foi no diâmetro do terceiro entrenó, sendo a melhor resposta identificada no manejo 55+(5+0) cujo diâmetro foi 2,35 cm.

Aos 224 DAP, os manejos influenciaram no crescimento dos três primeiros entrenós. A melhor resposta para comprimento de entrenó foi encontrada no manejo 55+(5+0). Para diâmetro, constatou-se efeito no primeiro entrenó, sendo o melhor resultado encontrado no manejo 45+(15+0).

Tabela 10 - Média do comprimento e diâmetro dos entrenós de cana-de-açúcar antes da primeira aplicação foliar (162 DAP). Recife-PE

Manejos (kg ha ⁻¹)		Entrenós	
Ap. Solo	Ap. foliar	Comprimento (cm)	Diâmetro (cm)
		162 DAP	
	1°	2°	
120	-	-	10,61 E
60	-	-	11,90 ABC
55	5	0	11,42 BCD
50	5	5	11,07 DE
50	10	0	11,80 AB
45	7,5	7,5	11,14 CD
45	15	0	12,13 A
30	15	0	11,26 C
F			12,28*
CV(%)			29,05
			23,54*
			14,30

^{ns}; não significativo e *, ** significativo pelo teste de F a $p < 0,05$ e $p < 0,01$, respectivamente. Médias com letras diferentes diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a $p < 0,05$. As doses 60 kg ha⁻¹, 55 kg ha⁻¹, 50 kg ha⁻¹, 45 kg ha⁻¹, 30 kg ha⁻¹ e 120 kg ha⁻¹ correspondem a 100%, 92%, 83%, 75%, 50% e 150% de N aplicado no solo. As doses 5 kg ha⁻¹, 7,5 kg ha⁻¹, 10 kg ha⁻¹ e 15 kg ha⁻¹, correspondem a solução as soluções de ureia com 7,5%, 11,16%, 17,48% e 22,20%.

O comportamento de desenvolvimento e crescimento da cana-de-açúcar encontrado nesse estudo, após as aplicações foliares, é semelhante aos observados por Sangplung e Rosário (1987). Ao reduzir a adubação nitrogenada no solo em até 75% e complementar com aplicações foliares de N, os autores verificaram que os manejos com adubação foliar mantem o perfilhamento, diâmetro de colmo, comprimento do colmo semelhante ao manejo com a maior dose de N aplicado no solo (200 kg ha⁻¹). Zeng et al (2020), também verificou a mesma altura de planta e diâmetro de colmo quando reduziu a adubação nos solos em 50%.

Esse efeito no desenvolvimento e crescimento da planta pode estar associado seu está nutricional. Pois, tanto no estudo de Sangplung e Rosário (1987) quanto no de Zeng et al (2020) os autores constatam, respectivamente, que o teor de N e a eficiência de uso de N não diferiam entre os manejos testados. Nesse estudo, não foi encontrada diferença significativa entre os manejos para teor de N (Tabela 7), acúmulo de N e Recuperação de ¹⁵N-fertilizante (Tabela 8) no intervalo entre as duas adubações foliares.

Tabela 11 – Comprimento e diâmetros dos entrenós correspondente as folhas +1, +2 e +3 da cana-de-açúcar submetida a diferentes manejos de adubação nitrogenada. Recife – PE.

Manejos (kg ha ⁻¹)			----- Entrenós -----					
			Comprimento (cm)			Diâmetro (cm)		
Ad. Solo	Ad foliar		1°	2°	3° (ii)	1°	2°	3°
	1°	2°	30 DAAT (194 DAP)					
120	--	--	10,59	10,43	9,43	2,11	2,20	2,26 AB
60	--	--	10,82	10,43	10,94	1,99	2,10	2,12 AB
55	5	0	10,58	10,62	9,91	2,13	2,30	2,35 A
50	10	0	10,08	10,25	10,35	2,06	2,23	2,21 AB
50	5	5	10,37	10,89	11,00	1,99	1,93	1,97 B
45	7,5	7,5	9,83	9,84	10,27	2,04	2,09	2,10 AB
45	15	0	9,91	9,89	10,50	2,02	2,18	2,11 AB
30	15	15	10,14	10,22	10,86	1,99	2,03	2,14 AB
Média			10,30	10,32	10,42	2,04	2,13	2,16
F			1,04 ^{ns}	1,04	1,75 ^{ns}	0,42 ^{ns}	1,97 ^{ns}	2,22 [*]
CV			9,93	9,98	23,02	12,45	11,78	10,72

Tabela 11 – Continuação.

			60 DAAT (224DAP)					
	1°	2°						
120	--	--	7,77 AB	8,91 AB	10,90 AB	2,15 AB	2,42	2,21
60	--	--	8,2 A	9,10 AB	11,19 A	2,10 AB	2,05	2,15
55	5	0	8,12 A	9,98 A	11,17 A	2,16 AB	2,09	2,20
50	10	0	7,49 AB	8,99 AB	10,45 ABC	2,17 B	2,11	2,20
50	5	5	7,93 AB	8,83 AB	10,09 ABC	2,04 AB	2,04	2,00
45	7,5	7,5	7,16 AB	8,49 AB	9,22 ABC	2,22 AB	2,19	2,19
45	15	0	7,34 AB	8,08 AB	9,64 BC	2,39 A	2,24	2,21
30	15	15	6,87 B	8,01 B	9,26 C	2,26 AB	2,24	2,21
Média			7,60	8,79	10,35	2,18	2,17	2,17
F			2,62**	2,12**	6,03**	2,48**	1,76 ^{ns}	1,39 ^{ns}
CV			11,39	13,87	8,76	9,42	9,74	15,02

^{ns}; não significativo e *, ** significativo pelo teste de F a $p < 0,05$ e $p < 0,01$, respectivamente. Médias com letras diferentes nas linhas diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a $p < 0,05$. ⁽ⁱⁱ⁾ e ⁽ⁱⁱⁱ⁾ correspondem as transformações x^2 e $1/x$, realizadas aos 30 DAAT e aos 60 DAAT, respectivamente. As doses 60 kg ha⁻¹, 55 kg ha⁻¹, 50 kg ha⁻¹, 45 kg ha⁻¹, 30 kg ha⁻¹ e 120 kg ha⁻¹ correspondem a 100%, 92%, 83%, 75%, 50% e 150% de N aplicado no solo. As doses 5 kg ha⁻¹, 7,5 kg ha⁻¹, 10 kg ha⁻¹ e 15 kg ha⁻¹, correspondem a solução de ureia com 7,5%, 11,16%, 17,48% e 22,20%.

4.5 Biomassa acumulada na parte aérea da cana-de-açúcar

Os manejos de adubação não influenciaram ($p < 0,05$) o acúmulo de biomassa na parte aérea da cana-de-açúcar para a planta toda (Tabela 12).

A avaliação de grupo dos contratos indicam que reduzir a adubação no solo (162 DAP) pode reduzir o acúmulo de biomassa da cana-de-açúcar (\hat{Y}_C). Entretanto, as adubações foliares com N podem aumentar o acúmulo de biomassa desses manejos (\hat{Y}_A) (194 DAP e 224 DAP), principalmente, quando parcelada (\hat{Y}_B).

Tabela 12 – Biomassa acumulada na parte aérea da cana-de-açúcar em função de diferentes manejos de adubação nitrogenada. Recife – PE.

Manejos (kg ha ⁻¹ de N)			Biomassa acumulada (g. perfilho ⁻¹)				
Ad. solo	Ad. Foliar		162 DAP				
	1°	2°	Folha seca	Folha verde	Colmo	Ponteiro	Perfilho
120	--	--	20,12	19,48	102,89	48,64	189,95
60	--	--	20,08	16,59	108,45	40,51	181,98
55	5	0	24,73	18,71	98,03	38,82	180,29
50	5	5	28,78	20,01	107,12	39,77	185,29
50	10	0	21,51	14,22	68,10	44,91	141,95
45	7,5	7,5	20,71	14,48	82,29	41,68	165,81
45	15	0	24,78	15,56	88,23	27,73	166,56
30	15	15	22,55	20,55	75,04	42,69	160,82
Média			23,02	17,67	92,24	41,22	171,75
F			1,67 ^{ns}	0,94 ^{ns}	0,65 ^{ns}	0,49 ^{ns}	0,42 ^{ns}
CV (%)			16,45	27,00	32,54	32,17	21,12
Manejos (kg ha ⁻¹ de N)			194 DAP				
Ad. solo	Ad. Foliar		Folha seca	Folha verde	Colmo	Ponteiro	Perfilho
	1°	2°					
120	--	--	33,61	16,31 B	128,71	33,00	211,62
60	--	--	27,99	16,41 B	127,61	21,53	203,45
55	5	0	25,59	19,00 AB	129,34	32,14	215,53
50	5	5	26,79	17,61 AB	144,62	25,27	219,20
50	10	0	26,33	21,34 AB	139,92	23,97	212,09
45	7,5	7,5	24,41	22,89 AB	159,97	29,64	245,40
45	15	0	27,07	18,40 AB	152,48	28,53	255,63
30	15	15	27,80	24,14 A	136,36	29,67	218,62
Média			27,51	19,50	140,54	28,32	222,14
F			2,04 ^{ns}	3,16 ^{**}	0,65 ^{ns}	1,86 ^{ns}	0,88 ^{ns}
CV (%)			12,12	14,60	17,71	16,55	13,55

Tabela 12 – Continuação.

Contraste Ortogonal							
\hat{Y}_A (Ad. foliar x Ad. solo)	-	-	-	-	-	127,51	
F_A	-	-	-	-	-	2,02 ^{ns}	
\hat{Y}_C (Redução das doses x 60 kg ha ⁻¹)	-	-	-	-	-	152,01	
F_C	-	-	-	-	-	1,17 ^{ns}	
Manejos (kg ha ⁻¹ de N)			224 DAP				
Ad. solo	Ad. Foliar		Folha seca	Folha verde ⁽ⁱ⁾	Colmo	Ponteiro ⁽ⁱ⁾	Perfilho
	1°	2°					
120	--	--	43,82 A	15,51	200,57	41,96 A	296,67
60	--	--	38,43 AB	17,26	212,95	29,48 B	298,11
55	5	0	32,76 AB	17,93	198,31	30,11 B	271,22
50	5	5	35,09 AB	18,20	207,76	33,23 AB	294,29
50	10	0	28,49 B	18,34	208,67	30,06 B	285,56
45	7,5	7,5	33,34AB	21,56	220,39	30,67 B	326,45
45	15	0	41,03 AB	26,63	247,88	26,25 B	332,88
30	15	15	47,67 A	20,44	232,71	30,14 B	341,39
Média			36,88	19,66	216,93	31,08	304,93
F			4,55 *	1,80 ^{ns}	0,77 ^{ns}	4,59 *	1,65 ^{ns}
CV (%)			12,44	21,61	14,97	10,41	10,78
Contraste Ortogonal							
\hat{Y}_A (Ad. foliar x Ad. solo 60 e 120)	-	-	-	-	-	-	47,39
F_A	-	-	-	-	-	-	0,34 ^{ns}
\hat{Y}_B (2 aplicações x 1 aplicação)	-	-	-	-	-	-	52,42
F_B	-	-	-	-	-	-	1,47 ^{ns}
Y_C (Redução das doses x 60 kg ha ⁻¹)	-	-	-	-	-	-	43,06
F_C	-	-	-	-	-	-	0,16 ^{ns}

^{ns}; não significativo e *, ** significativo pelo teste de F a $p < 0,05$ e $p < 0,01$, respectivamente. Médias com letras diferentes nas linhas diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a $p < 0,05$. ⁽ⁱ⁾ variável transformada $\log(x)$. Composição dos contrastes: \hat{Y}_A (Ad. foliar [55+ (5+0); 50+ (5+5); 50+ (10+0); 45+ (7,5+7,5); 45+(15+0); 30+(15+15)] x Ad. solo [120; 60]). \hat{Y}_B (2 aplicações foliar [50+ (5+5); 45+ (7,5+7,5); 30+(15+15)] x 1 aplicações foliar [55+ (5+0); 50+ (10+0); 45+(15+0)]). \hat{Y}_C (Redução das doses [55+ (5+0); 50+ (5+5); 50+ (10+0); 45+ (7,5+7,5); 45+(15+0); 30+(15+15)] x 60 kg ha⁻¹).

Os efeitos dos manejos de adubação no acúmulo de biomassa só foram observados nos compartimentos aos 194 DAP e 224 DAP.

Aos 194 DAP, constatou-se um incremento significativo no acúmulo biomassa de folha verde, onde o maior acúmulo foi identificado no manejo 30+(15+15). Aos 224 DAP as adubações influenciaram na biomassa de folhas secas e ponteiro. Em ambos os compartimentos, o manejo com 120 kg ha⁻¹ destacou-se com maior biomassa acumulada.

Resultado encontrados nesse estudo são similares aos observado por Sangplung e rosário (1978) que, ao reduzir a adubação nitrogenada no solo em até 75% e complementar via foliar não, constataram diferença no acúmulo de biomassa na parte aérea da cana-de-açúcar entre os manejos testados. Os autores também observaram que os melhores resultados de acúmulo de biomassa foram encontrados com o aumento do

número de aplicação de N via foliar. Mesmo aumentando a eficiência da adubação nitrogenada foliar Leite et al., (2020), também não verificou diferença no acúmulo de biomassa na cana-de-açúcar.

Os resultados encontrados nos manejos com 60 kg ha^{-1} e 120 kg ha^{-1} de N mostram que incrementar as doses de N no solo não aumenta o acúmulo de biomassa dos perfilhos. Santana et al., (2020) também chegaram a mesma conclusão quando observou que as doses de 60 kg ha^{-1} e 120 kg ha^{-1} acumulavam $59,84 \text{ Mg.ha}^{-1}$ e $56,18 \text{ Mg.ha}^{-1}$, respectivamente.

Avaliando o efeito de doses de N em duas áreas com condições edáficas distintas, Otto et al., (2009) constatou que a adubação nitrogenada em Latossolos distróficos com históricos de incorporação de resíduos orgânicos não influenciava na produção de biomassa da cana-de-açúcar. Enquanto, a adubação com 120 kg ha^{-1} de N incrementava a biomassa da parte aérea em 32% em relação ao controle sem adubação, em Latossolos eutróficos. Esses resultados sugerem que a resposta da cana-de-açúcar a adubação nitrogenada depende das condições edáficas e do histórico de uso do solo.

A ausência de resposta significativa no acúmulo de biomassa entre os manejos pode ter ocorrido devido ao suprimento de outras fontes de N para a cana, principalmente nos manejos que apresentaram as maiores perdas de N por lixiviação (60 kg ha^{-1} e 120 kg ha^{-1}). Pois, os resultados da tabela 8 mostram que a quantidade de ^{15}N -fertilizante na cana-de-açúcar representa uma fração média de 35% do N acumulado. Resultado menor foi observado no manejo com 60 kg ha^{-1} (24,62%).

Apesar de não ter identificado diferença entre os manejos constatou-se que os manejos com as maiores reduções de N no solo (45 kg ha^{-1} e 30 kg ha^{-1}) apresentaram acúmulo de biomassa da parte aérea acima da média. Esse resultado pode ter ocorrido devido as menores perdas por lixiviação (Tabela 6 e figura 2) e a maior eficiência da adubação (Tabela 7 e 8), promovido pelas aplicações foliar de N.

5 CONCLUSÃO

As maiores perdas de N foram identificadas nos manejos com adubação exclusiva no solo (60 kg ha^{-1} e 120 kg ha^{-1}). Reduzir as doses de N no solo em até 16% não influenciou na concentração de N no lixiviado. O N-nitrato representou 86% da forma de N no lixiviado. A participação dessa forma de N foi maior nos manejos com redução das doses aplicadas no solo.

A aplicação foliar de N otimizou a eficiência da adubação nitrogenada. Aumentou a absorção de ^{15}N -fertilizante, bem como os teores e acúmulo de N, principalmente, quando parcelado em duas aplicações e manteve a mesma recuperação ^{15}N -fertilizante comparado ao manejo com 60 kg ha^{-1} .

Reduzir as doses de N no solo impacta negativamente no perfilhamento da cana-de-açúcar. As adubações foliares promovem incremento na altura de planta, no número de entrenós. Mas, reduz o comprimento e o diâmetro dos entrenós das folhas que recebem aplicação de N (F+1, F+2 e F+3).

A adubação foliar incrementou o acúmulo de biomassa de folhas (verdes e secas) na cana-de-açúcar, e aumentou o acúmulo de biomassa na parte aérea da cana-de-açúcar, principalmente, nos manejos com parcelamento da aplicação foliar.

A melhor estratégia de adubação foi a do manejo com redução da dose via solo de 50% com duas aplicações foliares de 15 kg ha^{-1} . Uma vez que foram identificadas as melhores respostas para: (i) teor de N na folha +1; (ii) acúmulo de N e (iii) absorção de ^{15}N -fertilizante.

Nesse contexto, conclui-se que é possível reduzir o aporte de N no solo e complementar via foliar sem comprometer o desenvolvimento e o acúmulo de biomassa na parte aérea da cana-de-açúcar no ciclo de cana planta.

6 REFERÊNCIAS

ALCARDE, J. C. Fertilizantes. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do solo**, 1ed. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.738-766, 2007.

AMIN, M. G. M.; ALTER, A.; JAHANGIR, M. M. R.; AHMED, T. Leaching and runoff potential of nutrient and water losses in rice field as affected by alternate wetting and drying irrigation. **Journal of Environmental Management**, v. 297, p. 113402, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113402>.

ANTIL, R. S.; GANGWAR, M. S.; KUMAR, V. Transformation and movement of urea in soil as influenced by water application rate, moisture management regime, and initial moisture content. **Arid soil research and rehabilitation**, v.6, p.319-325, 1992. <https://doi.org/10.1080/15324989209381326>.

ANTUNES, J. E. L.; FREITAS, A. D. S.; OLIVEIRA, L. M. S.; LYRA, M. C. C. P.; FONSECA, M. A. C.; SANTOS, C. E. R. S.; OLIVEIRA, J. P.; ARAÚJO, A. S. F.; FIGUEIREDO, M. V. B. Sugarcane inoculated with endophytic diazotrophic bacteria: effects on yield, biological nitrogen fixation and industrial characteristics. **Anais da academia Brasileira de ciências**, Rio de Janeiro, v.91, n.4, 2019. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201920180990>.

AUTRET, B.; MARY, B.; STRULLU, L.; CHLEBOSKI, F.; MÄDER, P.; MAYER, J.; OLSEN, J. E.; BEAUDOIN, N. Long-term modelling of crop yield, nitrogen losses and GHG balance in organic cropping systems. **Science of the Total Environment**, v. 710, p. 134597, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134597>.

AVELLAN, A.; YUN, J.; MORAIS, B. P.; CLEMENT, E. T.; RODRIGUES, S. M.; LOWRY, G. V. Critical Review: Role of inorganic nanoparticle properties on their foliar uptake and in planta translocation. **Environmental science technology**, 2021. <https://doi/10.1021/acs.est.1c00178>.

BASSI, D.; MENOSSI, M.; MATTIELLO, L. Nitrogen supply influences photosynthesis establishment along the sugarcane leaf. **Nature**, Londres, Inglaterra, v.8, n.2327, 2018. <https://doi/10.1038/s41598-018-20653-1>

BENETT, C. G.; BUZETTI, S.; SILVA, K. S.; TEXIRA-FILHO, M. C. M.; GARCIA, C. M. P.; MAESTRELO, P. R. Produtividade e desenvolvimento da cana-planta e soca em função de doses e fontes de manganês. **Revista Brasileira de ciência do solo**, Viçosa, v.35, p.1661-1668, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000500020>

BLUM, J.; MELFI, Q. J.; MONTES, C. R.; GOMES, T. M. Nitrogen and phosphorus leaching in a tropical Brazilian soil cropped with sugarcane and irrigated with treated sewage effluente, **Agricultural Water Management**, Dordrecht, v.117, p. 115-122, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.11.010>.

BOSCHIERO, B. N. MARIANO, E.; TRIVELIN, P. C. O. “Preferential” ammonium uptake by sugarcane does not increase the ¹⁵N recovery of fertilizer sources. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.429, p.253-269, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3672-z>.

BUENO, A.; ALFRHAN, A.; ARAND, K.; BURGHARDT, M.; DEINIGER, A. C.; HEDRICH, R.; LEIDE, J.; SEUFERT, P.; STAIGER, S.; REIDERER, M. Effects of temperature on the cuticular transpiration barrier of two desert plants with water-spender and water-saver strategies, **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 70, n.5, p.1613-1625, 2019. <https://doi.org/10.1093/jxb/erz018>.

BUICK, R. D.; BUCHAN, G. D.; FIELD, R. **Pesticide Science**, Chichester, V.38, p.227-235, 1993.

BURKHARDT, J.; BASI, S.; PARIYAR, S.; HUNSCHE, M. Stomatal penetration by aqueous solutions – an update involving leaf surface particles. *New phytologist*, Lancaster, v.196, p.774-787, 2012. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04307.x>.

CANTARELA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do solo**, 1ed. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, p.376-448, 2007.

CATALDELLI, G.; COLOMBANI, N.; TAMBURINI, E.; VENCENZI, F.; M, MICÓL. Soil type and microclimatic conditions as drivers of urea transformation kinetics in maize plots. **Catena**, v.166, p.200-208, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.04.009>.

CERQUEIRA, G.; SANTOS, M. C.; MARCHIORI, P. E. R.; SILVEIRA, N. M.; MACHADO, E. C.; RIBEIRO, R. V. Leaf nitrogen supply improves sugarcane photosynthesis under low temperature. **Photosynthetica**, Praga, v.57, n.1, p.18-26, 2019. <https://doi.org/10.32615/ps.2019.033>.

CHEAVEGATTI-GIANOTTO, A.; ABREU, H. M. C.; FILHO, P. A.; BESPALHOK, J. C.; BURNGUIST, W. L.; CRESTE, S.; CIERO, L.; FERRO, J. A.; OLIVEIRA, A. V. F.; FILGUEIRA, T. S.; SÁ, M. F. G.; GUSSO, E. C.; HOFFMAN, H. P.; LANDEL, M. G. A.; MATSUKA, N. M.; REINACH, S. M.; REINACH, F. C.; ROMANO, E.; SILVA, W. J.; FILHO, M. C. S.; ULIAN, E. C. Sugarcane (*Saccharum X officinarum*): A Reference Study for the Regulation of Genetically Modified Cultivars in Brazil. **Tropical Plant Biology**, Nova York v.4, p.62-89, 2011. <https://doi.org/10.1007/s12042-011-9068-3>.

CHEN, P.; NIE, T.; CHEN, S.; ZHANG, Z.; QI, Z.; LI, W.; Recovery efficiency and loss of ¹⁵N-labelled urea in a rice-soil system under water saving irrigation in the songnen plain of Northeast China. **Agricultural Water Mangement**, Dordrecht, v.222, p.139-153, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.04.026>.

CRUCIOL, C. A. C.; ROSSATO, O. B.; FOLTRAN, R.; MARTELLO, J. M.; NASCIMENTO, C. A. C. Soil fertility, sugarcane yield affected by limestone, silicate, and gypsum application. **Communitacion in soil science and plant analysis**, Londres, v.48, p.2314-2323, 2017. <https://doi.org/10.1080/00103624.2017.1411507>.

DAI, J.; WANG, Z.; LI, M.; HE, G.; LI, Q.; CAO, H.; WANG, S.; GAO, Y.; HUI, X. Winter wheat grain yield and summer nitrate leaching: long-term effects of nitrogen and phosphorus rates on the Loess Plateau of China. **Field Crops Research**, v. 196, p. 180-190, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.06.020>.

DAROS, E.; OLIVEIRA, R. A.; SOUZA, G. V. Variedades RB desenvolvidas pela RIDESA. In: _____(org.). **45 anos de variedades RB de cana-de-açúcar: 25 anos de Ridesa** 1º Ed, Curitiba: Graciosa, p.35, 2015.

DAUBRESSE, C. M.; VEDELE, F. D.; DECHORGNAT, J.; CHARDON, F.; GAUFICHIN, L.; SUZUKI, A. Nitrogen uptake, assimilation and remobilization in plants: challenges for sustainable and productive agriculture. **Annals of botany**, v. 105, n. 7, p. 1141-1157, 2010. <https://doi.org/10.1093/aob>.

DE OLIVEIRA, E. C. A.; GAVA, G. J. C.; TRIVELIN, P. C. O.; OTTO, R.; FRANCO, H. C. J. Determining a critical nitrogen dilution curve for sugarcane. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 176, n. 5, p. 712-723, 2013. <https://doi.org/10.1002/jpln.201200133>.

DELGADO, P. G.; LACA, E.; ZWIENIECKI, M. A. Unravelling foliar water uptake pathways: The contribution of stomata and the cuticle. **Plant, Cell & Environment**, v. 44, n. 6, p. 1728-1740, 2021. <https://doi.org/10.1111/pce.14041>.

DEUNER, S.; NASCIMENTO, R.; FERREIRA, L. S.; BADINELLI, P. G.; KERBER, R. S. Adubação foliar e via solo de nitrogênio em plantas de milho em fase inicial de desenvolvimento. **Ciências e agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 5, p. 1359-1365, set./out., 2008. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542008000500001>.

DOMÍNGUEZ, E.; CUARTERO, J.; HEREDIA, A. Na overview on plant cuticle biomechanics. **Plant Science**, Limerick, v.181, p.77-84, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2011.04.016>.

DONAGEMMA, G. K.; FREITAS, P. L.; BALIEIRO, F. C.; FONTANA, A.; SPERA, S. T.; LUMBRERAS, J. F.; VIANA, J. H. M.; FILHO, J. C. A.; SANTOS, F. C.; ALBURQUERQUE, M. R.; MACEDO, M. C. M.; TEIXEIRA, P. C.; AMARAL, A. J.; BORTOLON, E.; BORTOLON, L. Caracterização, potencial agrícola e perspectivas de manejo de solo leves no Brasil. **Pesquisa agropecuária Brasileira**, Brasília, v.51, n.9, p.1003-1020, set. 2016. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900001>.

DOURADO NETO, D.; POWLSON, D.; BAKAR, R. A.; BACCHI, O. O. S.; BASANTA, M. V.; CONG, P. T.; ISMAILI, M.; RAHMAN, S.M.; REICHARDT, K.; SAFWAT, M. S. A.; SANGAKKARA, R.; TIMM, L. C.; WANG, J. Y.; ZAGAL, E.; KESSEL, C. V. Multiseason recoveries of organic and inorganic nitrogen-15 in tropical cropping systems. **Soil Science Society of America Journal**, v. 74, n. 1, p. 139-152, 2010. <https://doi.org/10.2136/sssaj2009.0192>.

DUETE, R. R. C.; MURAOKA, T.; SILVA, E. D.; TRIVELIN, P. C. O.; AMBROSANO, E. J.; Manejo da adubação nitrogenada e utilização do nitrogênio (¹⁵N) pelo milho em Latossolo vermelho, **Revista Brasileira de ciência do solo**, Viçosa, v. 32, p.161-171, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000100016>.

EICHERT, T.; BURKHARD, J. Quantification of stomatal uptake of ionic solutes using a new model system. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v.52, n.357, p.771-781, April 2001. <https://doi.org/10.1093/jexbot/52.357.771>.

EICHERT, T.; KURTZ, A.; STEINER, U.; GOLBACH, H. Size exclusion limits and lateral heterogeneity of the stomatal foliar uptake pathway for aqueous solutes and water-suspended nanoparticles. **Physiologia Plantarum**, KOBENHAVN, v.134, p.151-160, 2008. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2008.01135.x>.

Embrapa – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise de solo**. Embrapa solo, Rio de Janeiro, 2011.

FAGERIA, N. K.; BARBOSA FILHO, M. P.; MOREIRA, A.; GUIMARÃES, C. M. Foliar Fertilization of crop plants. **Journal of plant nutrition**, Filadélfia, v.32, p.1044-1064, 2009. <https://doi.org/10.1080/01904160902872826>.

FERNÁNDEZ, V.; EICHERT, T. Uptake of hydrophilic solutes through plant leaves: current State of knowledge and perspectives of foliar fertilization. **Plant Science**, Limerick, v.28, p.36-68, 2009. <https://doi.org/10.1080/07352680902743069>.

FERNÁNDEZ, V.; BAHAMONDE, H. A.; PINA, J. J. P.; PERLEFRÍN, E. G.; KNAPIK, D. S.; GIL, L.; GOLDBACH, H. E.; EICHERT, T. Physico-chemical properties of plant cuticles and their functional and ecological significance. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 68, n.19, p.5293-5306, 2017. <https://doi.org/10.1093/jxb/erx302>.

FERNÁNDEZ, V.; BROWN, P. From plant surface to plant metabolism: the uncertain fate of foliar-applied nutrientes. **Frontiers in plant scienc**, Lausanne, v.4, july, 2013. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00289>.

FERNÁNDEZ, V.; DELGADO, P. G.; GRAÇA, J.; SANTOS, S.; GIL, L. Cuticle structure in relation to chemical composition: Re-assessing the prevailing model. **Frontiers in Plant Science** Limerick, v.7, 2016. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00427>.

FERNÁNDEZ, V.; GIL, E. P.; EICHERT, T. Foliar water and solute absorption: an update. **The Plant Journal**, v. 105, n. 4, p. 870-883, 2021. <https://doi.org/10.1111/TPJ.15090>.

FORTES, C.; VITTI, A. C.; OTTO, R.; FERREIRA, D. A.; FRANCO, H. C. J.; TRIVELIN, P. C. O. Contribution of nitrogen from sugarcane harvest residues and urea for crop nutrition. **Scientia Agricola**, v. 70, n. 5, p. 313-320, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162013000500005>.

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

FRANCO, H. C. J.; TRIVELIN, P. C. O.; FARONI, C. R.; VITTI, A. C.; OTTO, R. Aproveitamento pela cana-de-açúcar da adubação nitrogenada de plantio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 2763-2770, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000700021>.

FRUNGILLO, L.; SKELLY, M.; LOAKE, G. J.; SPOEL, S. H.; SALGADO, I. S-nitrosothiols regulate nitric oxide production and storage in plants through the nitrogen assimilation pathway. **Nature communications**, Londres, v.6, 2014. <https://doi.org/10.1038/ncomms6401>.

GALLEJONES, P.; CASTELLÓN, A.; PRADO, A. UNAMUZAGA, O.; AIZPURUA, A. Nitrogen and sulphur fertilization effect on leaching loss, nutriente balance and plant quality in a wheat-repressed rotation under a humid Mediterranean climate. **Nutrient cycling agoecosystems**, Dordrecht, v.93, p.337-355, 2012. <https://doi.org/10.1007/s10705-012-9520-2>.

GAVA, G. J. C.; SCARPARE, F. V.; CANTARELLA, H.; KÖLLN, O. T.; CORREA, S. T. R.; 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, n. 3, p. 462-470, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12355-018-0614-2>.

GAVA, G. J. C.; TRIVELIN, P. C. O.; VITTI, A. C.; OLIVEIRA, M. W. Recuperação do nitrogênio (^{15}N) da ureia e da palhada por soqueira de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.). **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, v.27, p.622-630, 2003. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000400006>.

GHILBERTO, P. J.; LIBARDI, L. P.; BRITO, A. S.; TRIVELIN, P. C. O. Leaching of nutrientes from a sugarcane crop growing on na Ustisol in Brazil. **Agricultural Walter Mangement**, Dordrecht, v.96, p.1443-1448, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.04.020>.

GHILBERTO, P. J.; LIBARDI, P. L.; TRIVELIN, P. C. O. Nutrient leaching in na Ultisol cultivated with sugarcane. **Agricultural Walter Management**, Dordrecht, v.148, p.141-149, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.09.027>.

GROHSPKF, M; A.; CORRÊA, J. C.; FERNANDES, D. M.; TEXEIRA, P. C.; MOTA, S. C. A.; Mobility of Nitrogen in the Soil Due to the Use of Organomineral Fertilizers with Different Concentrations of Phosphorus, **Communications in soil scienc and plant analysis**, Londres, v.50, n.23, p.1-13, 2016. <https://doi.org/10.1080/00103624.2019.1705321>.

GROOT, C. C.; MARCELIS, L. F. M.; BOOGAARD, R. V. D.; LAMBERS, H. Interactive effects of nitrogen and irradiance on growth and partitioning do dray mass and nitrogen in Young tomato plants, **Funct. Plant Biol.**, v.29, p.1319-1328, 2002. <https://doi.org/10.1071/FP02087>.

HAMDI, W.; GAMAOUN, F.; PELSTER, D. E.; SEFFEN, M. Nitrate sorption in an agricultural soil profile. **Applied and Environmental Soil Science**, Londres, v.2013, p.1-7, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/597824>.

HARRISON, C. J.; MORRIS, J. The origin and early Evolution of vascular plant shoots and leaves. **Philosophical Transactions of the Royal Society B**, Londres, v.373, 2017. <https://doi.org/10.1098/rstb.2016.0496>.

HINSVARK, O. N. WITTEWER, S. H.; TUKEY, H. B. The metabolismo of foliar-appleid urea I. relative rate of C^{14}O_2 . **Plant physiology**, Dordrecht, v.28, n.1, p.70-76, jan. 1952. <https://doi.org/10.1104/pp.28.1.70>.

HUANG, T.; JU, X.; YANG, H. Nitrate leaching in a winter wheat-summer maize rotation on a calcareous soil as affected by nitrogen and straw management. **Nature**, Londres, v.7, n.42247, p.1-11, 2017. <https://doi.org/10.1038/srep42247>.

JABLOUN, M.; SCHELDE, K.; TAO, F.; OLESEN, J. Effect of temperature and precipitation on nitrate leaching from organic cereal cropping systems in Denmark. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v.62, p.55-64, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2014.09.007>.

JADOSKI, C. J.; TOPPA, B. E. V.; JULIANETTI, A.; HULSHOF, T.; ONO, E. O.; RODRIGUES, J. D. Fisiologia do desenvolvimento do estágio vegetativo da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.), **Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia**, Guarapuava, v.3, n.2, mai.-ago. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2014.09.007>.

JEMISON, J. M.; FOX, R. H. Soil Processes and Chemical Transport, *J. Environ. Qual.*, v.23, MARCH-APRIL, p.337-343, 1994.

JORIS, H. A. W.; VITTI, A. C.; ALMEIDA, R. F.; 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, n. 1, p. 1-9, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75971-0>.

KANE, C. N.; JORDAN, G. J.; JANSEN, S.; MCADAM, A. M. A permeable cuticle not open stomata, is the primary source of water loss from expanding leaves, **Frontiers in plant science**, Lausanne, v.11, 2020. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00774>.

KIBA, T.; KUDO, T.; KOJIMA, M.; SAKAKIBARA, H. Hormonal control of nitrogen acquisition: role of auxin, abscisic acid, and cytokinin. **Journal of Experimental Botany**, Oxford v.62, n.4, p.1399-1409, 2011. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq410>.

KÖHLER, K.; DUYNISVELD, W. H. M.; BÖTTCHER, J. Nitrogen fertilization and nitrate leaching into groundwater on arable sandy soils. **Journal of plant nutrition and soil science**, Weinheim, v.169, p.185-195, 2006. <https://doi.org/10.1002/jpln.200521765>.

LEHMEIERE, C. A. LATTANZI, F. A.; SCHÄUFELE, R.; SCHNYDER, H. Nitrogen deficiency increases the residence time of respiratory carbon in the respiratory substrate supply system of perennial ryegrass. **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v.33, p.76-87, 2010. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2009.02058.x>.

LEITE, J. M.; ARACHICHIGE, P. S. P.; CIAMPITTI, I. A.; HETTIARACICI, G. M.; MAURMANN, L.; TRIVELIN, P. C. O.; PRASAD, P.V.; SUNOJ, S. B. J. Co-addition of humic substances and humic acids with urea enhances foliar nitrogen use efficiency in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). **Heliyon**, v. 6, n. 10, p. e05100, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05100>.

LELIAERT, F.; SMITH, D. R.; MOREAU, H.; HERRON, M. D.; VERBRUGGEN, H.; DELWICHE, C. F.; CLERCK, O. Phylogeny and molecular evolution of the green algae. **Critical reviews in plant sciences**, v. 31, n. 1, p. 1-46, 2012. <https://doi.org/10.1080/07352689.2011.615705>.

LIAN, L.; WANG, X.; ZHU, Y.; HE, W.; CAI, Q.; XIE, H.; ZHANG, M.; ZHANG, J. Physiological and photosynthetic characteristics of indica Hang2 expressing the sugarcane PEPC gene. **Molecular Biology Reports**, Dordrecht, v.41, p.2189-2197, 2014. <https://doi.org/10.1007/s11033-014-3070-4>.

LIMA, A. M. S. Adubação nitrogenada e molíbdica em cana planta inoculada com bactéria promotora de crescimento. 2020. 84 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do solo) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2020.

LIU, H.; YANG, X.; YOU, Q.; SONG, J.; WANG, L.; ZHANG, J.; DENG, Z.; MING, R.; WANG, JIANPING. Pedigree, marker recruitment, and genetic diversity of modern sugarcane cultivars in China and the United States. **Euphytica**, Dordrecht, v.214, n.48, p.2-17, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10681-018-2127-1>.

LU, J.; BAI, Z.; VELTHOF, G. L.; CHADWICK, D.; MA, L. Accumulation and leaching of nitrate in soils in wheat-maize production in China **Agricultural Water Management**, Dordrecht, v.212, p.407-415, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.08.039>.

LU, J.; BAI, Z.; VELTHOF, G. L.; WU, Z.; CHADWICK, D.; MA, L. Accumulation and leaching of nitrate in soils in wheat-maize production in China, **Agricultural Water Management**, Dordrecht, v.212, p.407-415, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.08.039>.

LU, J.; HU, T.; ZHANG, B.; WANG, L.; YANG, S.; FAN, J.; YAN, S.; ZHANG, F. Nitrogen fertilizer management effects on soil nitrate leaching, grain yield and economic benefit of summer maize in Northwest China, **Agricultural Water Management**, Dordrecht, v.247, p.106-793, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106739>.

MA, C.; BAN, T.; YU, H.; LI, Q.; LI, X.; JIANG, W.; XIE, J. Urea addition promotes the metabolism and utilization of nitrogen in Cucumber. **Agronomy**, Bogotá v.9, n.262, p.2-17, 2019. <https://doi.org/10.3390/agronomy9050262>.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. 2º Ed, Piracicaba: POTAFÓS, 1997.

MARANGONI, F. F.; OTTO, R.; ALMEIDA, R. F.; CASARIN, V.; VITTI, G. C.; TIRITAN, C. S. Soluble source of Zinc and Boron on Sugarcane yield in Southeast Brazil. **Sugar Tech**, Nova Deli, v.21, p.917-924, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12355-019-00716-x>.

MARIANO, E.; OTTO, RAFAEL.; MONTEZANO, Z. F.; CANTARELA, H.; TRIVELIN, P. C. O. Soil nitrogen availability indices as predictors of sugarcane nitrogen requirements. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v.89, p.25-37, 2017. <https://doi.org/10.1007/s12355-019-00716-x>.

MARÍN, N. M.; QUÍLEZ, D.; ISLA, R. Utility of stabilized nitrogen fertilizers to reduce nitrate leaching under optimal management practices. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 183, n. 5, p. 567-578, 2020. <https://doi.org/10.1002/jpln.201900561>.

MEGDA, M. X. V.; TRIVELIN, P. C. O.; FRANCO, H. C. J.; OTTO, R.; VITTI, A. C. Eficiência agrônômica de adubos nitrogenados em soqueira de cana-de-açúcar colhida sem queima. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, p. 1681-1690, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2012001200002>.

MOLIN, S. J.; ERNANI, P. R.; GERBER, J. M. Soil acidification and nitrogen release following application of nitrogen fertilizers, **Communications in soil science and plant analysis**, Londres, v. 51, n. 20, p.2551–2558, 2020. <https://doi.org/0.1080/00103624.2020.1845347>.

NARIN, F. R.; PELLEGRINO, G. Q.; ASSAD, E. D.; PINTO, H. S.; JUNIOR, J. Z. Cana-de-açúcar. In: MONTEIRO, J. E. B. A. **Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**, Brasília, DF: INMET, p. 109-130, 2009.

OKUMOTO, S.; PILOT, G. Amino acid export in plant: A missing link in nitrogen cycling. **Molecular plant**, Bristol v.4, n.3. p.453-463, 2011. <https://doi.org/10.1093/mp/ssr003>.

OLIVEIRA, A. C. **Interação da adubação nitrogenada e molíbdica em cana-de-açúcar**. Recife, 2012. [Tese de doutorado].

OLIVEIRA, E. C. A.; FREIRE, F. J.; OLIVEIRA, R. I.; FREIRE, M. B. G. S.; 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**, Viçosa, v.34, p.1343-1252, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000400031>.

OLIVEIRA, M. W.; NASCIF, C.; Silva, V. S. G.; OLIVEIRA, T. B. A.; RODRIGUES T. C.; GAMA, K. F. V.; OLIVEIRA, G. C. B. Biomass yield, nutritional status and industrial quality of sugarcane as a function of nitrogen and potassium fertilization. **Australian journal of crop science**, Brisbane, Austrália, v.12, n.5, p.834-840. 2018. <https://doi.org/10.21475/ajcs.18.12.05.PNE1082>.

OLIVEIRA, M. W.; TRIVELIN, P. C. O.; BOARETTO, A. E.; MURAOKA, T.; MORTATTI, J. Leaching of nitrogen, potassium, calcium and magnesium in a sandy soil cultivated with sugarcane. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, p. 861-868, 2002. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2002000600016>.

OLIVEIRA, S.M.; JUNIOR, C. P.; LAGO, B. C.; ALMEIDA, R.; E. N.; TRIELIN, P. C. O.; FAVARIN, J. L. Grain yield, efficiency and the allocation of foliar N applied to soybean canopies. **Scientia Agricola**, São Paulo, v.76, n.4, p.305-310, jul/august 2019. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2017-0395>.

OTTO, R.; CASTRO, S. A. Q.; MARIANO, E.; CASTRO, S. G. Q.; FRANCO, H. C. J. Nitrogen use efficiency for sugarcane-Biofuel Production: Wat is next? **BioEnergy Research**, Nova York, 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.; TRIVELIN, P. C. O. Fitomassa de raízes e da parte aérea da cana-de-açúcar relacionada à adubação nitrogenada de plantio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, p. 398-405, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2009000400010>.

PENG, J.; FENG, Y.; WANG, X.; LI, XU, G.; PHONENASAY, S.; LUO, Q.; HAN, Z.; LU, W. Effects of nitrogen application rate on the photosynthetic pigment, leaf fluorescence characteristics, and yield of indica hybrid rice and their interrelations. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 1-10, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86858-z>.

PEREIRA, W.; OLIVEIRA, R. P.; PERREIRA, A.; SOUZA, J. S.; SCHULTZ, N.; URQUIAGA, S.; REIS, V. M. Nitrogen acquisition and 15 N-fertiliser recovery efficiency of sugarcane cultivar RB92579 inoculated with five diazotrophs. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 119, n. 1, p. 37-50, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10705-020-10100-x>.

PHILLIPS, S. B.; MULLINS, G. L. Foliar burn and wheat grain yield response following topdress-applied nitrogen and sulfúfur fertilizers. **Journal of plant nutrition**, Filadélfia, v.27, p.921-930, 2004. <https://doi.org/10.1081/PLN-120030679>.

PINHEIRO, R. B.; CANTARUTTI, R. B.; VILLANI, E. M. A.; CAVALCANTE, V. S.; FONTES, M. F. P. Nitrate mobility in variable-charge tropical soils, **Communications in soil science and plant analysis**, Londre, Inglaterra, v.51, n.16, p.2163-2173, 2020. <https://doi.org/10.1080/00103624.2020.1820025>.

RAIJ, B. V.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas, Instituto Agrônômico de Campinas, 2001. p. 285.

RAIJ, B.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. FURLANI, A. M. C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**, 2º Ed.rev. atual. Campinas, Instituto Agrônômico: Fundação IAC, 1997.

REIS JÚNIOR, R. A.; MONNERAT, P. H. DRIS norms validation for sugarcane crop. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, p. 379-385, 2003. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2003000300007>.

RI, X.; DAI, D.; XU, X. The symbiotic nitrogen fixation by legumes in a legume-companion and a legume-dominant alpine steppe on the central Tibetan Plateau. **Ecological Research**, v. 36, n. 3, p. 545-555, 2021. <https://doi.org/10.1111/1440-1703.12221>.

RIEDERER, M. Thermodynamics of the water permeability of plant cuticles: characterization of the polar pathway, **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 57, n.12, p.2937-2942, 2006. <https://doi.org/doi.org/10.1093/jxb/erl053>.

RIOS, J. J.; GARCIA, I. P.; CARVAJAL, M. The use of biovesicles to improve the efficiency of Zn foliar fertilization, **Colloids and surfarces B: Biointerfaces**, v.173, p.899-905, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2018.10.057>.

ROCHA, F.A.; MARTINEZ, M. A.; MATOS, A. T.; CANTARUTTI, R. B.; SILVA, J. O. Modelo numérico do transporte de nitrogênio no solo. Parte II: Reações biológicas durante a lixiviação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.12, n.1, p.54-61, 2008. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662008000100008>.

ROCHA, I. T. M.; FREIRE, J. F.; OLIVEIRA, E. C. A.; SOUZA, E. R.; FREIRE, M. B. G. S.; NETO, D. E.; SILVA, A. V. Salt effect of potassium fertilizer on productivity and technological quality of sugarcane. **Australian journal of crop science**, Brisbane, Austrália, v. 13, n.9, p.1552-1560. 2019. <https://doi.org/10.21475/ajcs.19.13.09.p1919>.

RODRÍGUEZ-CARDONA, B. M.; WYMORE, A. S.; MCDOWELL, W. H. Nitrate uptake enhanced by availability of dissolved organic matter in tropical montane streams. **Freshwater Science**, Chicago, EUA, v. 40, n. 1, p. 65-76, 2021. <https://doi.org/10.1086/713070>.

ROGERI, D. A. et al. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental Mineralização e nitrificação do nitrogênio proveniente da cama de aves aplicada ao solo 1 Mineralization and nitrification of nitrogen from poultry litter applied to soil. n. 3, p. 534–540, 2015. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n6p534-540>.

RUIZ-NAVARRO, A.; FERNÁNDEZ, V.; ABADÍA, J.; ABADÍA, A.; QUEREJATA, J. I.; ALBALADEJO, J.; BARBERÁ, G. G. Foliar fertilization of two dominant species in a semiarid ecosystem improves their ecophysiological status and the use efficiency of a water pulse. **Environmental and Experimental Botany**, Oxford, v.167, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.103854>.

SAHAY, S; ARRATIA, L. R.; GLOACKA, K.; GUPTA, M. Root NRT, NiR, AMT, GS, GOGAT and GDH expression levels reveal NO and ABA mediated drought tolerance in Brassica juncea L. **Scientific reports**, v. 11, n. 1, p. 1-15, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86401-0>.

SANTANA, A. C. A.; OLIVEIRA, E. C. A.; SILVA, V. S. G.; SANTOS, R. L.; SILVA, M. S.; FREIRE, F. J. Critical nitrogen dilution curves and productivity assessments for plant cane. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.24, n.4, p.244-251, 2020. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v24n4p244-251>.

SANTOS, F.; DIOLA, V. Physiology. In: SANTOS, F.; BORÉM, B.; CALDAS, C. **Sugarcane: Agricultural production, bioenergy, and ethanol**. Elsevier Inc, Amsterdam, p.13-21, 2015.

SANTOS, R. L.; FREIRE, F. J.; OLIVEIRA, E. C. A.; FREIRE, M. B. G. S.; WEST, J. B. BARBOSA, J. A.; MOURA, M. J. A.; BEZERRA, P. C. Nitrate reductase activity and nitrogen and biomass accumulation in sugarcane under molybdenum and nitrogen fertilization. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 43, 2019. <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20180171>.

SCHÖNHERR, J.; BUKOVAC, M. J. Penetration of stomata by liquids. **Plant Physiology**, Dordrecht, v.49, p.813-819, 1972. <https://doi.org/10.1104/pp.49.5.813>.

SCHREIBER, L. Polar paths of diffusion across plant cuticles: New evidence for an old hypothesis. **Annals of Botany**, Oxford, v.95, p.1069-1073, 2006. <https://doi.org/10.1093/aob/mci122>.

SCHULTZ, N.; SILVA, J. A.; SOUZA, J. S.; MONTEIRO, R. C.; OLIVEIRA, R. P.; CHAVES, V. A.; PEREIRA, W.; SILVA, M. F.; BALDANI, S. I.; BODDEY, R. M.; REIS, V. M.; URQUIAGA, S. Inoculation of sugarcane with diazotrophic bacteria. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.38, p.407-414, 2014. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000200005>.

SHI, X.; BATCHELOR, W.; HAO, L.; LI, S.; LI, B.; HU, K.; Determining optimal water na nitrogen mangement under diffent initial soil mineral nitrogen levels in norghtwest China baseado n a midel approach. **Agricultural Water Mangement**, Dordrecht, v.234. p.106110, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106110>.

SHIVALINGAMURTHY, S.; ANANGI, R.; KALAIPANDIAN, S.; KIMG.; ERA, A. Identification and functional characterization of sugarcane invertase Inibitor (ShiNH1): A potencial candidate for reduciong pre-and post-harvest loss of sucrose in sugarcane. **Frontiers in plant Science**, Lausanne, v.9, may, 2018. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00598>.

SHRIVASTAVA, A. K.; SOLOMON, S.; RAI, R. K. SINGH, P.; CHANDRA, A.; JAIN, R.; SHUKLA, S. P. Physiological interventions ofr enhancing sugarcane and sugar productivy. **Sugar tech**, Nova Deli, v.17, n.3, p. 215-226, <https://doi.org/10.1007/s12355-014-0321-6>.

SIGURDARSON, J. J.; SVANE, S.; KARRING, H. The molecular processes of urea in relation to ammonia emissions from agriculture. **Rev Environ Sci Biotechnol**, v.17, p.241-258, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11157-018-9466-1>.

SILVA, A. M. S. **Eficiência do manejo da adubação nitrogenada na cana soca cultivada em solo arenoso da região do Nordeste do Brasil**. Recife, 2019. 107 Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2019.

SILVA, M. V.; P, H.; JARDINS, A. M. R. F.; JÚNIOR, J. F. O.; DIVINCULA, J. S.; GIONGO, P. R.; SILVA, T. G. F.; ALMEIDA, G. L. P.; MOURA, G. B. A.; LOPES, P. M. O. Spatial modeling of rainfall patterns and groundwater on the coast of northeastern Brazil, **Urban Climate**, v.38, p. 100911, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100911>.

SILVA, W. K. M.; FREITAS, G. P.; JUNIOR, L. M.; PINTO, P. A. L. A.; ABRAHÃO, R. Effect of climate change on sugarcane production in the State of Paraíba (Brazil): a panel data approach (1990-2015). **Climatic change**, California, EUA, v.154, p.195-209. 2019. <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02424-7>.

SIMÕES-NETO, D. E. S. Variedades de Cana-de-açúcar no estado de Pernambuco contribuição do melhoramento clássico da RIDESA-UFRPE. **Anais da academia Pernambucana de ciências agrônômica**, Recife, v.5 e 6 p.125-146, 2008-2009.

SIMÕES-NETO, D. E.; OLIVEIRA, A.; FREIRE, F. J.; FREIRE, M. B. G. S.; OLIVEIRA, E. C. A.; ROCHA, A. T. Adubação fosfatada para cana-de-açúcar em solos representativos para o cultivo da espécie no Nordeste brasileiro. **Pesquisa agropecuária Brasileira**, Brasília, v.50, n.1, p.73-81, jan. 2015. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2015000100008>.

SIRKO, A.; BRODRIK, R. Plant urease: Roles and regulation. **Acta Biochimica Polonica**. Varsórvia, V.47, n.4, p.1189-1195, 2000. https://doi.org/10.18388/abp.2000_3972.

SMITH, C. J.; CHALK, P. M. The role of ^{15}N in tracing N dynamics in agro-ecosystems under alternative systems of tillage management: A review. **Soil and Tillage Research**, v. 197, p. 104496, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104496>.

SRIVASTAVA, R. K.; PANDA, R. K.; CHAKRABOTY, A. Quantification of nitrogen transformation and leaching response to agronomic management for maize crop under rainfed and irrigated condition, **Environmental Pollution**, v.265, p. 114866, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114866>.

STEIN, L. Y.; KLOTZ, M. G. The nitrogen cycle. **Current Biology**, Cambridge, v.26, p.83-101, fevereiro, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2015.12.021>

STEWART, L. K.; CHARLESWORTH, P. B.; BRISTOW, K. L.; THORBURN, P. J. Estimating deep drainage and nitrate leaching from the root zone under sugarcane using APSIM-SWIM. **Agricultural Water Management**, v. 81, n. 3, p. 315-334, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.05.002>.

SYLVESTRE, T. B.; BRAOS, L. B.; FILHO, F. B.; CRUZ, M. C. P.; FERREIRA, M. E. Mineral nitrogen fertilization effects on lettuce crop yield and nitrogen leaching, **Scientia Horticulturae**, v.255, p.153–160, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.05.032>.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A. BOHNEW, H.; VOLKWESISS, S. J. Nitrogênio mineral no solo. In:_____ (Org.). Análises de solo, plantas e outros materiais. 2ªEd: UFRGS, Porto Alegre, 1995.

THORBURN, P. J.; BIGGS, J. S.; PALMER, J.; MEIER, E. A.; VERBURG, K.; SKOCAJ, D. M.. Prioritizing crop management to increase nitrogen use efficiency in Australian sugarcane crops. **Frontiers in plant science**, v. 8, p. 1504, 2017. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01504>.

TREDENICK, E.; FARRELL, T. W.; FORSTER, W. A.; PSALTIS, S. T. P. Nonlinear porous diffusion modeling of hydrophilic ionic agrochemicals in stomatous plant cuticle aqueous pores: A mechanistic approach. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v.8, 2017. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00746>.

TRIVELIN, P. C. O.; CARVALHO, J. G.; SILVA, A. L.; PRIMAVESI, A. C. P. A.; CAMACHO, E.; EIMORI, I. E.; GUILHERME, M. R. Adubação foliar de cana-de-açúcar (*Saccharum* Spp.): Absorção e translocação de ureia – ^{15}N . **Energia Nuclear na Agricultura**., Piracicaba, v.9, n.2, p.52-65, jul./dez., 1988.

TRIVELIN, P. C. O.; LARA CABEZAS, W.A.R.; VICTORIA, R.L.; REICHARDT, K. Evaluation of a ^{15}N plot design for estimating plant recovery of fertilizer nitrogen applied to sugar cane. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 51, p. 226-234, 1994. <https://doi.org/10.1590/S0103-90161994000200005>.

TRIVELIN, P. C. O.; VITTI, A. C.; OLIVEIRA, M. W.; GAVA, G. J. C.; SARRIÉS, G. A. Utilização de nitrogênio e produtividade da cana-de-açúcar (cana-planta) em solo arenoso com incorporação de resíduos da cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 637-646, 2002. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832002000300008>.

USCOLA, M.; SALVADOR, P. V.; OLIET, J.; WARREN, CHARLES R. Foliar absorption and root translocation of nitrogen from different chemical forms in seedlings of two Mediterranean trees. **Environmental and experimental botany**, Oxford, v.104, p.34-43, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2014.03.004>.

VALE, D. W.; PRADO, R. M.; AVALHÃES, C.C.; HOJO, R. H. Omissão de macronutrientes na nutrição e no crescimento de cana-de-açúcar cultivada em solução nutritiva. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Belo Horizonte, v.6, n.2, p.188-196, abr.-jun., 2011. <https://doi.org/10.5039/agraria.v62a550>.

VITOUSEK, P. M.; MENEG, D. N. L.; REED, S. C.; CLEVELAND, C. C. Biological nitrogen fixation: rates, patterns and ecological controls in terrestrial ecosystems. **Philosophical Transactions of the Royal Society B**, Londres, v. 368, 2013. <https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0119>.

VITTI, A. C.; FRANCO, H. C. J.; TRIVELIN, P. C. O.; FERREIRA, D. A.; OTTO, R.; FORTES, C.; FARONI, C. E. Nitrogênio proveniente da adubação nitrogenada e de resíduos culturais na nutrição da cana-planta. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 46, n. 3, p. 287-293, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011000300009>.

VITTI, A. C.; TRIVELIN, P. C. O.; CANTARELLA, H.; FRANCO, H. C. J.; FARONI, C. E.; OTTO, R.; TRIVELIN, M. O.; TOVAJAR, J. G. Mineralização da palhada e crescimento de raízes de cana-de-açúcar relacionados com a adubação nitrogenada de plantio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 2757-2762, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000700020>.

VITTI, A. C.; TRIVELIN, P. C. O.; GAVA, G. J. C.; FRANCO, C. J.; BOLOGNA, R.; FARONI, C. E. Produtividade de cana-de-açúcar relacionada à localização de adubos nitrogenados aplicados sobre os resíduos culturais em canavial sem queima. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, v.31, p.491-498, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000300009>.

VUYYURU, M. SANDHU, H. S.; MCCRAY, M. J.; RAID, R. N.; ERICKSON, J. E. Effects of nitrogen fertilization and seed piece applied fungicides on establishment, tiller dynamics, and sucrose yields in successively planted sugarcane. **Agronomy**, v. 9, n. 7, p. 387, 2019. <https://doi.org/10.3390/agronomy9070387>.

WANG, D.; GUO, L.; ZHENG, L.; ZHANG, Y.; YANG, R.; LI, M.; MA, F.; ZHANG, X.; LI, Y. Effects of nitrogen fertilizer and water management practices on nitrogen leaching from a typical open field used for vegetable planting in northern China, **Agricultural Water Management**, Dordrecht, v.213, P.913-921, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.12.015>.

WANG, W.; XU, W.; WEN, Z.; WANG, D.; WANG, S.; ZHANG, Z.; ZHAO, Y.; LUI, X. Characteristics of Atmospheric Reactive Nitrogen Deposition in Nyingchi City. **Nature**, Londres, v.9, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-39855-2>.

WANG, Y.; GONG, Z.; FRIML, J.; ZHANG, J. Nitrate modulates the differentiation of root distal stem cells. **Plant Physiology**, Dordrecht, v.180, p.22-25, may, 2019a. <https://doi.org/10.1104/pp.18.01305>.

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**, Amsterdam, v.667, p.96-102, 2019b. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.029>.

WEBSTER, R. D.; SHAW, R. B. Taxonomy the native north american species of *Saccharum* (Poaceae:Androponeae), **Sida**, Fort Worth, v.16, n.3, 1995.

WERFF, P. A.; BAARS, A.; OOMEN, G. J. M. Nutrient balance and measurement of nitrogen losses on mixed ecological farms on Sandy soils in the netherlands. **Biological agriculture & horticulture**, Bicester, v.11, p.41-50, 1995. <https://doi.org/10.1080/01448765.1995.9754692>.

WITTE, C. P. Urea metabolismo in plants. **Plant Science**, Limerick v.180, p.431-438, 2011. Doi: WITTE. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2010.11.010>.

WITTE, C. P.; TILLER, S. A.; TAYLOR, M. A.; DAVIES, H. V. Leaf urea metabolism in potato. urease activity profile and patterns of recovery and distribution of ¹⁵N after foliar urea application in wild-type and urease-antisense transgenics. **Plant Physiology**, Dordrecht, v.128, p.1129-1136, march, 2002. <https://doi.org/10.1104/pp.010506>.

XIN-QIANG, L.; LEI, X.; MIAO-MIAO, H; YI-CHAO, Q.; JIN, L.; ZE-YU.; YU-SHI, Y.; YINGXU. Influence of N fertilization rates, rainfall, and temperature on nitrate leaching from a rainfed winter wheat field in Taihu watershed. **Physics and Chermitry of the Earth, Oxford**, v.26, p.395-400, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2010.03.017>.

YANG, R.; CHIWA, M. Low nitrogen retention in a Japanese cedar plantation in a suburban area, western Japan. **Scientific reports**, v.11, n.1, p.1-7, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84753-1>.

YANG, Y.; GAO, S.; JIANG, Y.; LIN, Z.; LUO, J.; LI, M.; GUO, J.; SU, Y.; SU, Y.; QUE, Y. The physiological and agronomic responses to nitrogen dosage in different sugarcane varieties. **Frontiers in plant Science**, Limerick v.10, april, 2019. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00406>.

YEATS, T.; ROSE, J. K. C. The formation and function of plant cuticles. **Plant Physiology**, Dordrecht, v.163, p.5-20, 2013. <https://doi.org/10.1104/pp.113.222737>.

YONEYAMA, T.; SUZUKI, A. Light-independent nitrogen assimilation in plant leaves: Nitrate incorporation into glutamine, glutamate, aspartate, and asparagine traced by ¹⁵N. **Plants**, v. 9, n. 10, p. 1303, 2020. <https://doi.org/10.3390/plants9101303>.

YUE, K.; FORNARA, D. A.; LI, W.; NI, X.; PENG, Y.; LIAO, S.; TAN, S.; WANG, D.; WU, F.; YANG, Y. Nitrogen addition affects plant biomass allocation but not allometric relationships among different organs across the globe. **Journal of Plant Ecology**, v. 14, n. 3, p. 361-371, 2021. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtaa100>.

ZENG, X. P.; ZHU, K.; LU, J. M.; JIANG, Y.; YANG, L. T.; XING, Y. X.; LI, Y. R. Long-Term Effects of different nitrogen levels on growth, yield, and quality in sugarcane. **Agronomy**, v. 10, n. 3, p. 353, 2020. <https://doi.org/10.3390/agronomy10030353>.

ZHANG Y.; DING, H.; ZHENG, X.; CAI, Z.; MISSELBROOK, T.; CARSWELL, A.; MULLER, C.; ZHANG, J. Soil N transformation mechanisms can effectively conserve N in soil under saturated conditions compared to unsaturated conditions in subtropical China, Dordrecht, **Biology and Fertility of Soils**, v.54, p.495–507, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00374-018-1276-7>.

ZHAO, D.; GLAZ, B.; COMSTOCK, J. C. Physiological and growth responses of sugarcane genotypes to nitrogen rate on a sand soil. **Journal agronomy and crop Science**, Malden, v.200, p.290-301, 2014. <https://doi.org/10.1111/jac.12084>.

ZHAO, H.; LI, X.; JAING, Y. Response of nitrogen losses to excessive nitrogen fertilizer application in intensive greenhouse vegetable production. **Sustainability**, Basiléia, v.11, p.1513, 2019. <https://doi.org/10.3390/su11061513>.

ZHENG, H.; LUI, Z.; NIE, X.; ZUO, J.; WANG, L. Comparison of active nitrogen loss in four pathways on a sloped penaut field with red soil in China under conventional fertilization conditions. **Sustentainbility**, Basiléia, v.11, p.6219, 2019. <https://doi.org/10.3390/su11226219>.

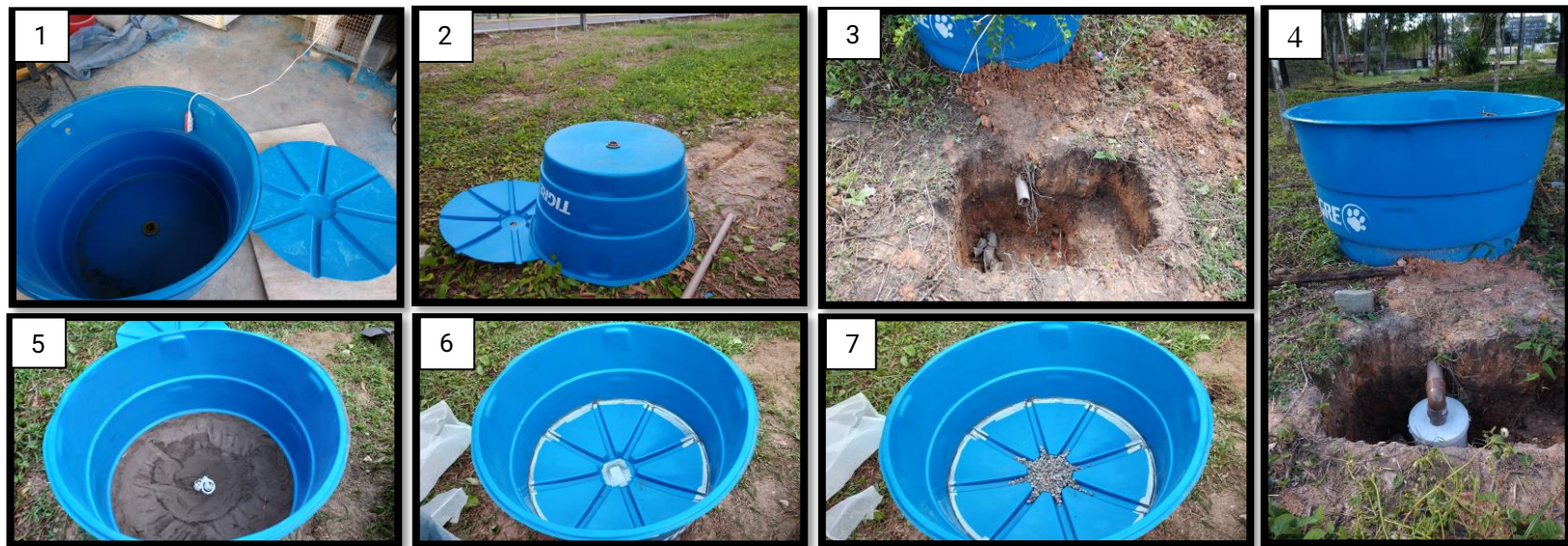
ZHENG, W.; WANG, S.; TAN, K.; LEI, Y. Nitrate accumulation and leaching potential is controlled by land-use and extreme precipitation in a headwater catchment in the North China Plain, **Science of the Total Environment**, v.707, p.136168, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136168>.

ZHENG-QIN.X.; TAI-QING, H.; GUANG-XI, X.; ZHAO-LIANG, Z. Nitrate and ammonium leaching in variable- and permanente-charge paddy soils, **Pedosphere**, Nanjing, China, v.20, n.2, p.209-216, 2010. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(10\)60008-2](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(10)60008-2).

ZHU, J.; HE, N.; WANG, Q.; YUAN, G.; WEN, D.; YU, G.; JIA, Y. The composition, spatial patterns, and infl uencing factors of atmospheric wet nitrogen deposition in Chinese terrestrial ecosystems. **Science of the total environment**, Amsterdam, v.511, p.777-785, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.12.038>.

Apêndice A – Construção dos lisímetros de drenagem

Figura 4 – Construção e instalação dos lisímetros de drenagem. (1) corte da tampa do reservatório instalação da flange para drenagem; (2) Abertura dos drenos, (3) Abertura dos acessos; (5) lastro de no fundo do lisímetro; (6) vedação da tampa com as paredes do reservatório e instalação de tela na entrada do dreno; (7) cobertura com brita na entrada do dreno.



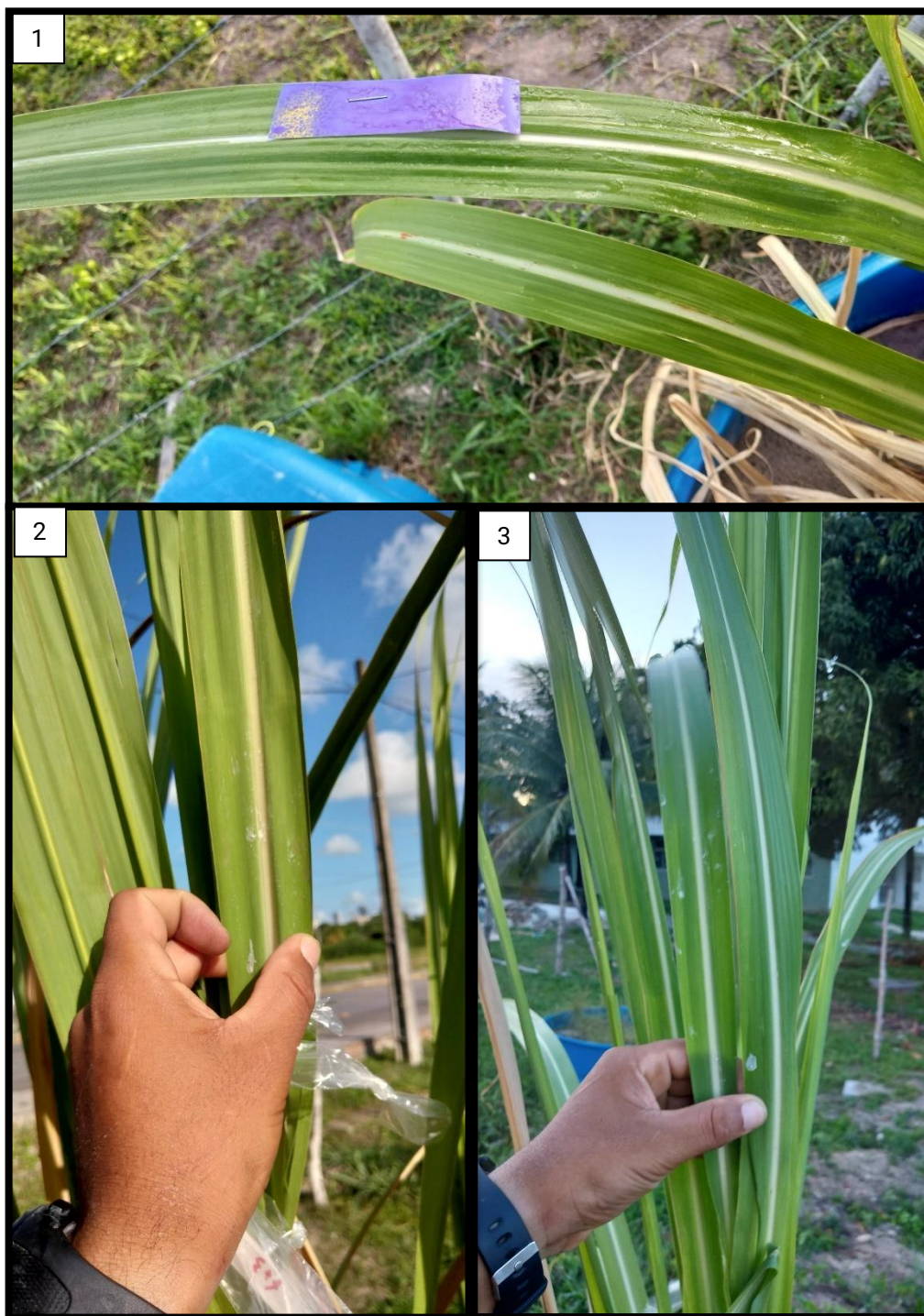
Apêndice B – Local experimental

Figura 5 – Disposição dos lisímetros no local experimental. Imagem aos (1) 150 DAP; (2) 224 DAP.



Apêndice C – Aplicação foliar de N

Figura 6 – Aplicação foliar de N. (1) distribuição da solução na superfície foliar; (2) e (3) formação de cristais de sais na superfície foliar nos manejos com aplicação com 14,80 % e 22,20% de ureia, respectivamente 24 horas após a primeira aplicação.



Apêndice D – Danos visuais da aplicação foliar de N.

Figura 7 – Danos visuais nas folhas da cana-de-açúcar que receberam a primeira aplicação foliar de N. (1) e (2) queima foliar 4 e 10 dias após a primeira adubação, respectivamente.

