

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Aproveitamento do N-fertilizante (N-ureia) pela cana-de-açúcar
aplicado por via foliar no período de máximo crescimento da cultura
em complemento à adubação de solo**

Saulo Augusto Quassi de Castro

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Área de concentração: Solos e Nutrição de
Plantas

**Piracicaba
2022**

Saulo Augusto Quassi de Castro
Engenheiro Agrônomo

Aproveitamento do N-fertilizante (N-ureia) pela cana-de-açúcar aplicado por via foliar no período de máximo crescimento da cultura em complemento à adubação de solo

Orientador:
Prof. Dr. **PAULO CESAR OCHEUZE TRIVELIN**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Ciências. Área de concentração: Solos e Nutrição de Plantas

Piracicaba
2022

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP**

Castro, Saulo Augusto Quassi de

Aproveitamento do N-fertilizante (N-ureia) pela cana-de-açúcar aplicado por via foliar no período de máximo crescimento da cultura em complemento à adubação de solo / Saulo Augusto Quassi de Castro. - - Piracicaba, 2022. 162 p.

Tese (Doutorado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Anatomia foliar 2. Isótopo estável 3. Absorção foliar 4. Variedades de cana-de-açúcar 5. Redistribuição do nitrogênio 6. Produtividade I. Título

A minha mãe, **Solange Meire Quassi de Castro**,
por seu apoio constante e amor incondicional;

Ao meu pai, **Sérgio Donizeti de Castro**,
por me apresentar a agronomia e encorajar a seguir nesse caminho;

Ao meu irmão, **Sérgio Gustavo Quassi de Castro**,
pelo exemplo de pesquisador, de dedicação e amante da canavicultura; e

A minha esposa, **Renata Rebellato Linhares de Castro**,
pelo carinho, incentivo, paciência, companheirismo e sonhos,

DEDICO!

AGRADECIMENTOS

A Jesus Cristo que me proporcionou o dom da vida, a sabedoria e a saúde, e com a intercessão de Maria, me iluminou e mostrou o caminho a ser seguido, não deixando que eu desanimasse nos momentos de dificuldades, me permitindo cumprir mais essa etapa da minha vida, realizando sonhos e alcançando os objetivos.

As famílias Quassi, Castro e Rebellato Linhares, motivadoras e exemplos de união, que me apoiaram e me incentivaram incansavelmente, que foram meu sustento ao longo dessa jornada, comemorando comigo a cada conquista obtida e etapa concluída.

Ao professor Paulo Cesar Ocheuze Trivelin, meu orientador, que sempre foi um exemplo de pesquisador e professor para mim, desde o início da minha carreira (iniciação científica), e que acreditou e confiou no meu trabalho durante o doutorado, me ensinando e sendo muito importante no meu crescimento profissional e pessoal.

Aos professores Jan Kofod Schjørring e Daniel Pergament Persson, respectivamente meu orientador e co-orientador durante o intercâmbio na Universidade de Copenhague, pelo ensino, troca de conhecimento e por confiarem no meu trabalho, os quais foram fundamentais para aumentar a minha paixão pela pesquisa e vontade de seguir na carreira acadêmica.

A Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP), em especial, ao Departamento de Ciência do Solo (LSO), e ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA/USP), em especial, ao Laboratório de Isótopos Estáveis (LIE/DVTEC), pela excelência de ensino, pela infraestrutura e pelas amizades realizadas.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão da bolsa de estudo no país (processo nº 2017/25489-3) e da bolsa estágio de pesquisa no exterior (BEPE) (processo nº 2020/11959-0).

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa no início do doutorado.

A AgroQuatro-S pela parceria nos experimentos realizados em campo, disponibilizando área e colaboradores (Val, Baguinho, Benedita, Dilda, Etelvino, Fatinha, João, Leandro, Maria das Dores, Maria das Graças, Maria Santana, Marlene, Paloma, Pariquera, Sirlei, Wanda, Zé Mineiro; Cuti, Nico, Rafael e Felipe), os quais foram fundamentais para que todas as atividades fossem realizadas.

A professora Renata Alcarde Sermarini pela amizade e por aceitar me auxiliar nas análises estatísticas dos experimentos conduzidos em casa-de-vegetação e em campo, realizando as análises para que todas as variáveis fossem incluídas nos modelos.

Ao professor, Francisco Scaglia Linhares, e a Mônica Lanzoni Rossi pela amizade, ensinamentos e parceria no projeto, possibilitando que as análises morfoanatômicas das folhas da cana-de-açúcar fossem realizadas.

Aos estudantes de graduação, Régis R. L. Vieira e Eluisa R. Elias, por aceitarem a minha co-orientação durante os respectivos projetos de iniciação científica que desenvolveram junto ao LIE/CENA, que faziam parte do meu projeto de doutorado, me ajudando em diversas atividades realizadas em campo e no laboratório e também pelas conversas e momentos de distração.

Ao meu irmão, Sérgio G. Q. de Castro, à minha esposa, Renata R. L. de Castro, ao colega, Bruno R. Toneto, aos estudantes de graduação, Lucas Z. de M. Silva e Caique Catani, e ao técnico do LIE/CENA, Hugo H. Batagello, pelo auxílio nas atividades realizadas em campo, momentos que se tornaram mais divertidos e menos cansativos com a ajuda de vocês.

A amiga de pós-graduação, Nicole C. Cheng, pelo auxílio nas atividades realizadas em campo, pelas discussões dos resultados, pelos momentos de distração, pela amizade e por aceitar enfrentar os desafios da realização de experimentos com a cana-de-açúcar.

A equipe do LIE/CENA, professor José Albertino Bendassolli, professor José Lavres Junior, Ana Paula G. de M. Duarte, Bento M. M. Neto, Clelber V. Prestes, Hugo H. Batagello, José A. Bonassi, Miguel L. Baldessin e Cristina B. Salvego pelo apoio técnico, trocas de informações e suporte durante a realização das atividades no laboratório e de escritório.

Aos estagiários que passaram pelo LIE/CENA, Bianca Rodrigues, Cátia B. C. Pereira, Carla Costa, Leonardo Godoy, Maria Roberta Monteiro, Mateus Rodrigues, Moniky S. Andreoni, Pablo Silva e Wellington Coutinho, me ajudando em todas as etapas do experimento conduzido em casa-de-vegetação e no processamento das amostras no laboratório.

A todos os amigos que Piracicaba me proporcionou, em especial, Alexandre L. Pinto, Arthur K. B. dos Santos, Karla Kudlawiec, Kelly Pazolini, Leonardo Miranda, Manoel P. Gonçalves, Sabrina Holz e Sarah R. Galvão, pelos momentos de diversão, pelas confraternizações, pelas viagens e demais momentos que passamos juntos, fazendo com que hoje possa chamá-los de família Piracicabana.

Aos colegas de pós-graduação Bruno P. Moschini, Gabriela C. Salgado, Pedro L. Garcia, Beatriz N. Boschiero, José Lucas Safanelli, Antonio L. Florentino, Eduardo H. M. Boleta, Jéssica B. de Oliveira, Natalia F. Carr, Mateus Araújo, Nicolas B. Casarin, Nikolas S. Mateus e demais que passaram por minha vida durante o doutorado, pelos momentos de distração e conhecimento compartilhado.

Aos amigos realizados em Copenhague, em especial, professor Søren Husted, professora Ana Assuncao, Andrea Pinna, Anja H. Ivø, Birgit Andersen, Clara S. Kopp, Feixue Liao,

Francesco Minutello, Grmay H. Lilay, Kenneth M. Ordenana, Kichi P. Møs, Luca R. Queiroz, Maria Belen Rabaglino, Morten L. Stephensen, Oscar Queiroz, Pietro M. de S. Sica, Simon Stork, Siting Zhao, Thomas H. Hansen, Tiago Izeppi e Yuankun Liu, pelo conhecimento compartilhado, apoio técnico na condução dos experimentos, momentos de descontração, viagens entre outros, tornando o período de intercâmbio indescritível, repleto de aprendizado e de momentos que serão lembrados para sempre.

Ao Rodrigo A. Pessanha pela disponibilidade em responder e exemplificar os processos e prazos da pós-graduação da ESALQ/USP, tornando os processos burocráticos mais fáceis.

A Eliana M. Garcia pela atenção e agilidade na execução do trabalho.

A todos os professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Solo e Nutrição de Plantas que convivi durante o doutorado, os quais agradeço em nome dos professores coordenadores do PPG-SNP ao longo desse período, professor Carlos Eduardo Pellegrino Cerri e professor Fernando Dini Andreote.

A todos aqueles não mencionados nominalmente que me auxiliaram, me apoiaram e contribuíram direta ou indiretamente para a realização desse trabalho, proporcionando crescimento pessoal e profissional durante essa caminhada.

A todos, o meu muito obrigado!

“A humildade é o primeiro degrau para a sabedoria”.

São Tomás de Aquino

“No que diz respeito ao empenho, ao compromisso, ao esforço, à dedicação, não existe meio termo, ou você faz uma coisa bem feita ou não faz.”

Ayrton Senna

“Para adquirir conhecimento, é preciso estudar; mas para adquirir sabedoria, é preciso observar.”

Marilyn vos Savant Quotes

RESUMO

Aproveitamento do N-fertilizante (N-ureia) pela cana-de-açúcar aplicado por via foliar no período de máximo crescimento da cultura em complemento à adubação de solo

A cana-de-açúcar é uma das principais culturas agrícolas produzidas no Brasil e tem grande importância em nível mundial não só por ser produtora de sacarose, mas especialmente, devido ao aumento na demanda por combustíveis renováveis, como o etanol, para diminuir a emissão de gases do efeito estufa. O nitrogênio é o segundo elemento mineral mais demandado pela cana-de-açúcar, aplicado anualmente no solo para que se obtenha um canavial longo e produtivo, contudo, grande parte desse permanece no solo, podendo ser perdido para o ambiente. Na adubação nitrogenada foliar, a recuperação do N-fertilizante pela planta é maior, quando comparado com a adubação feita no solo, e permite que haja sincronia entre as exigências das plantas de cana-de-açúcar e a aplicação do N-fertilizante. Nesse contexto, pode ser inferido que a adubação nitrogenada via foliar em complemento a aplicação do nutriente no solo proverá o equilíbrio entre produção de biomassa e o meio-ambiente trazendo benefícios para a sustentabilidade nos agrossistemas com cana-de-açúcar com ganhos financeiros. Para validar essa hipótese, experimentos foram conduzidos em condição controlada e em campo. Primeiramente, objetivou-se avaliar a anatomia das folhas de cana-de-açúcar para que variedades contrastantes fossem utilizadas nos experimentos visando a adubação foliar com ureia. Quatorze variedades de cana-de-açúcar foram selecionadas, sendo consideradas as mais plantadas no sudeste do Brasil, e agrupadas em função das características anatômicas foliares e relacionadas com os mecanismos de absorção foliar. Quatro variedades contrastantes quanto às variáveis anatômicas foram selecionadas e utilizadas em experimento conduzido em casa-de-vegetação para avaliar a recuperação e a redistribuição do N-fertilizante aplicado via foliar (^{15}N -ureia) em função da concentração de nitrogênio na solução (8, 16, 24 e 36 % ^{15}N -ureia). As variedades diferiram quanto a velocidade de absorção do ^{15}N -ureia. Aos 5 dias após a adubação nitrogenada foliar houve um máximo de absorção do nitrogênio, alcançando até 78 % de recuperação do ^{15}N -ureia. Até os 20 dias ocorreu a redistribuição do ^{15}N -ureia, sendo o colmo e as folhas não expandidas os drenos de nitrogênio. Uma das variedades utilizadas no experimento em casa-de-vegetação foi selecionada e utilizada nos experimentos em campo para validar esse manejo da adubação nitrogenada. Dois experimentos em campo foram conduzidos, por três anos, para avaliar a produtividade e a qualidade do caldo da cana-de-açúcar quando realizado a adubação nitrogenada via foliar, no período de máximo crescimento da planta, em complemento a aplicação do nutriente no solo. Quinze tratamentos foram instalados sendo esses 0 + 0, 40 + 0, 60 + 0, 80 + 0, 120 + 0, 160 + 0, 0 + 12, 0 + 24, 0 + 36, 40 + 12, 40 + 24, 40 + 36, 60 + 12, 60 + 24, e 60 + 36 kg ha⁻¹ N aplicados, respectivamente, no solo e por via foliar. No somatório dos três anos, ambas as áreas foram responsivas à adubação nitrogenada e demonstraram que é possível reduzir a dose de nitrogênio aplicada no solo sem causar prejuízos na produtividade e na qualidade do caldo da cana-de-açúcar. No 2º ano dos experimentos, ^{15}N -ureia foi aplicado às folhas e a recuperação do N-fertilizante pela planta foi, na média, de 53 %, diferindo entre as áreas. Conclui-se que o uso da adubação nitrogenada via foliar é uma importante ferramenta para adequar o manejo da adubação nitrogenada na cana-de-açúcar visando obter um canavial longo, produtivo e em equilíbrio com o meio-ambiente.

Palavras-chave: Anatomia foliar, Isótopo estável, Absorção foliar, Variedades de cana-de-açúcar, Redistribuição do nitrogênio, Produtividade

ABSTRACT

N-fertilizer (N-urea) utilization by sugarcane foliar-applied in the period of maximum crop growth as a complement to soil fertilization

Sugarcane is one of the main agricultural crops produced in Brazil and is important worldwide not only because it produces sucrose, but especially because of the increased demand for renewable fuels, e.g., ethanol, to reduce the greenhouse gases emission. Nitrogen is the second most demanded mineral essential element by sugarcane, applied annually to the soil to obtain a long-lived and productive sugarcane field, however, much of it remains in the soil and can be lost to the environment. In foliar nitrogen fertilization, the N-fertilizer recovery by the plant is greater, when compared to soil nitrogen fertilization, and allows for synchrony between the sugarcane plant requirements and the N-fertilizer application. In this context, it can be inferred that foliar nitrogen fertilization in addition to the soil nutrient application will provide a balance between biomass production and the environment, bringing benefits to sustainability in sugarcane agrosystems with financial gains. To validate this hypothesis, experiments were conducted under controlled conditions and in the field. Firstly, the objective was to evaluate the sugarcane leaves anatomy so that contrasting varieties could be used in experiments aiming at foliar fertilization with urea. Fourteen sugarcane varieties were selected, the most planted in southeastern Brazil, and grouped according to leaf anatomical characteristics and related to leaf absorption pathways. Four contrasting varieties in terms of anatomical variables were selected and used in an experiment carried out in greenhouse conditions to evaluate the N-fertilizer recovery and redistribution applied to the leaves (^{15}N -urea) as a function of the nitrogen concentration in the solution (8, 16, 24 and 36 % ^{15}N -urea). Sugarcane varieties differed in the absorption rate of ^{15}N -urea. At 5 days after foliar nitrogen fertilization there was, a maximum of nitrogen absorption, reaching up to 78 % of ^{15}N -urea recovery. Up to 20 days there was a ^{15}N -urea redistribution; stalk and not-expanded leaves were the nitrogen sinks. One of the sugarcane varieties used in the greenhouse experiment was selected and used in the field experiments to validate this nitrogen fertilization management. Two field experiments were carried out, for three years, to evaluate the sugarcane biomass production and juice quality when foliar nitrogen fertilization was carried out in the maximum plant growth period as a complement to soil nitrogen fertilization. Fifteen treatments were installed, i.e., 0 + 0, 40 + 0, 60 + 0, 80 + 0, 120 + 0, 160 + 0, 0 + 12, 0 + 24, 0 + 36, 40 + 12, 40 + 24, 40 + 36, 60 + 12, 60 + 24, and 60 + 36 kg ha⁻¹ N applied, respectively, to soil and to the leaves. In the sum of the three years, both sites were responsive to nitrogen fertilization and demonstrated that it is possible to reduce the soil nitrogen fertilization rate without causing damage to sugarcane biomass production and juice quality. In the 2nd year of the experiments, ^{15}N -urea was applied to the leaves and the N-fertilizer recovery by the plant was, on average, 53 %, differing between sites. It is concluded that the use of foliar nitrogen fertilization is an important tool for the adjustment of nitrogen fertilizer management in sugarcane in order to obtain a long-lived, productive, and environment-friendly sugarcane field.

Keywords: Leaf anatomy, Stable isotope, Uptake by the leaves, Sugarcane varieties, Nitrogen redistribution, Sugarcane yield

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

^{15}NF – Folhas fertilizadas com ^{15}N -ureia

ANF – Adubação Nitrogenada via Foliar

ANS – Adubação Nitrogenada no Solo

CH_4 – Metano

CMRA – Capacidade Máxima de Retenção de Água

CO_2 – Dióxido de carbono (gás carbônico)

DAANf – Dias Após a Adubação Nitrogenada via foliar

EA – Eficiência Agronômica

EUN – Eficiência de Uso do N-fertilizante

FCEANf – Folhas jovens Completamente Expandidas Após a Adubação Nitrogenada via foliar

FNE – Folhas Não Expandidas no momento da adubação nitrogenada via foliar

FV – Folhas Verdes com inserção da bainha abaixo da folha +3

GEE – Gases do Efeito Estufa

K – Potássio

KCl – Cloreto de Potássio

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

MOS – Matéria Orgânica do Solo N – Nitrogênio

MPB – Muda Pré-Brotada

N – Nitrogênio

NH_3 – Amônia

N-NH_4^+ – Amônio

N-NO_2^- – Nitrito

N-NO_3^- – Nitrato

N_2O – Óxido nitroso

NPPF – Nitrogênio na Planta Proveniente do Fertilizante

N-total – Teor total de Nitrogênio na planta

PAS – Ácido Periódico de Schiff

PN – Poder de Neutralização

PRNT – Poder Relativo de Neutralização Total

QNPPF – Quantidade de Nitrogênio na Planta Proveniente do Fertilizante

RNP – Recuperação do N-fertilizante pela Planta

TVD – Top Visible Dewlap (folha +1)

URA – Umidade Relativa do Ar

1. INTRODUÇÃO

O aumento da temperatura média global do ar, ocasionada pelo incremento da concentração de dióxido de carbono na atmosfera, tem proporcionado maior frequência de eventos extremos, tema esse central em reuniões e acordos internacionais (HE *et al.*, 2022; LÜTHI *et al.*, 2008; MASSON-DELMOTTE *et al.*, 2018; UNFCCC, 2015). Uma das principais medidas para mitigar o aquecimento global é a intensificação no uso de combustíveis renováveis, em que a cana-de-açúcar apresenta grande importância por ser utilizada para a produção de etanol (FORMANN *et al.*, 2020; GOLDEMBERG; COELHO; GUARDABASSI, 2008; HANSSEN *et al.*, 2020; RFA, 2021).

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar produzindo 585,2 milhões de toneladas em 8,3 milhões de hectares, produtividade média de 70,5 Mg ha⁻¹ (CONAB, 2022). Para obtenção dessa produtividade é necessário fazer a adubação com os nutrientes, mesmo essa não sendo elevada quando comparado com o potencial produtivo da cultura (WACLAWOVSKY *et al.*, 2010). O nutriente mais demandado pela cana-de-açúcar é o potássio seguido pelo nitrogênio, sendo esses aplicados em função da expectativa de produção de biomassa vegetal da planta (CHERUBIN *et al.*, 2019; SANCHES; OTTO, 2022).

O nitrogênio é limitante no desenvolvimento da planta, constituindo 0,3 a 2 % da massa seca da cana-de-açúcar (ROBINSON *et al.*, 2013). Para atender a essa demanda é aplicado, anualmente, 60 a 140 kg ha⁻¹ N, com o objetivo de se produzir 100 Mg ha⁻¹ de colmos de cana-de-açúcar (BOSCHIERO *et al.*, 2020; DE CASTRO *et al.*, 2021; SANCHES; OTTO, 2022). A aplicação do N-fertilizante é realizada no solo em até 60 dias após a colheita da cultura, dessincronizado com o período de maior demanda da cana-de-açúcar por nitrogênio. No Brasil, na região Sudeste e Sul, essa fase ocorre entre os meses de novembro a fevereiro, quando tem radiação, temperatura e disponibilidade de água adequada para o crescimento da planta (DE OLIVEIRA *et al.*, 2013; LEITE *et al.*, 2016). Essa falta de sincronia, entre a época de aplicação do N-fertilizante e a demanda da cana-de-açúcar pelo nitrogênio, é um dos fatores que justifica a baixa recuperação do N-fertilizante pela planta quando esse é aplicado no solo. Na fase inicial de desenvolvimento da cana-de-açúcar a porcentagem do nitrogênio total na planta proveniente do fertilizante é elevada, alcançando até 72 % em função da fonte de N-fertilizante (VIEIRA-MEGDA *et al.*, 2015). Ao longo do ciclo esse valor diminui, sendo a média da recuperação do N-fertilizante pela cana-de-açúcar quando aplicado no solo de, aproximadamente, 26 % no final do ciclo da cultura (OTTO *et al.*, 2016). A maior fração do N-

fertilizante aplicado no solo permanece nesse, estando passível de ser perdido para o ambiente (QUASSI DE CASTRO *et al.*, 2021; ZHANG *et al.*, 2015).

Uma das perdas é através da emissão de óxido nitroso, gás com potencial 273 vezes maior do que o dióxido de carbono em promover o efeito estufa. O óxido nitroso é emitido durante o processo de desnitrificação do nitrogênio, favorecido no atual sistema de colheita da cana-de-açúcar em que o resíduo vegetal da planta (palhada) é depositado sobre o solo, criando condições de anaerobiose, e na nitrificação do amônio (DEGASPARI *et al.*, 2020; VASCONCELOS *et al.*, 2022; YANG *et al.*, 2021). Dessa maneira, se faz necessário que haja maior recuperação do N-fertilizante pela planta visando reduzir as doses aplicadas no solo e, conseqüentemente, as perdas do nitrogênio para o ambiente, o que pode ser obtido através do ajuste no método de aplicação do N-fertilizante (BORGES *et al.*, 2019). Dentre os métodos disponíveis e economicamente viáveis, a adubação nitrogenada via foliar é uma das práticas disponíveis.

A adubação nitrogenada foliar possibilita que haja sincronia entre a demanda pela cana-de-açúcar por nitrogênio e a oferta de nitrogênio, uma vez que a absorção via foliar é mais rápida do que quando o nutriente é aplicado no solo (FAGERIA *et al.*, 2009; FAGERIA; BALIGAR, 2005; FERNANDÉZ; SOTIROPOULOS; BROWN, 2015). Essa sincronia e a menor dinâmica e complexidade para que o nitrogênio seja absorvido quando aplicado via foliar, comparado ao solo, promove uma alta recuperação do N-fertilizante pela cana-de-açúcar, variando entre 50 a 85 % (HUMBERT, 1960; TRIVELIN *et al.*, 1988; TRIVELIN; COLETI; MATSUI, 1985). Contudo, por o nitrogênio ser um macronutriente, exigido em grande quantidade, a aplicação via foliar não é suficiente por si só, uma vez que elevadas doses podem causar danos foliares (JOHNSON *et al.*, 2001; KROGMEIER; MCCARTY; BREMNER, 1989; SANGPLUNG; ROSÁRIO, 1978).

Com base nas informações acima apresentadas, comprova-se a importância da adubação nitrogenada na cana-de-açúcar assim como a necessidade de aumentar a produção da cultura emitindo menores quantidades de gases do efeito estufa (CHERUBIN *et al.*, 2021). Para atender essa demanda, uma alternativa é a utilização da adubação nitrogenada via foliar em complemento a aplicação do nutriente no solo, contudo, não existe na literatura trabalhos que realizaram essa avaliação, validando tal prática agrícola. Os poucos trabalhos realizados até então, que avaliaram a adubação nitrogenada via foliar, foram realizados em vasos, com uma variedade de cana-de-açúcar e por um ano (LEITE *et al.*, 2020; TRIVELIN *et al.*, 1988; TRIVELIN; COLETI; LARA CABEZAS, 1984; TRIVELIN; COLETI; MATSUI, 1985). Os trabalhos realizados em campo, são antigos e apresentam poucos detalhes, informações, o que

traz incerteza sobre a eficácia da adubação nitrogenada foliar, além de terem sido realizados em condições edafoclimáticas diferentes das que ocorrem no Brasil (HUMBERT, 1960; SANGPLUNG; ROSÁRIO, 1978). Além disso, houve mudança no sistema de colheita da cana-de-açúcar, colheita manual com queima da palha foi substituída pela colheita mecanizada sem queima prévia da palha, assim como lançamento de variedades que apresentam maior potencial produtivo e, conseqüentemente, maior demanda por nutrientes (GOLDEMBERG; COELHO; GUARDABASSI, 2008; WACLAWOVSKY *et al.*, 2010).

Diante do estado da arte apresentado, as seguintes hipóteses foram propostas: i. a densidade estomática da superfície adaxial e a anatomia das folhas de cana-de-açúcar diferem entre as variedades mais plantadas no sudeste do Brasil; ii. a taxa de absorção do N-fertilizante aplicado via foliar difere entre as variedades de cana-de-açúcar em função da concentração de nitrogênio na solução e da anatomia foliar; iii. os tecidos vegetais mais novos são os drenos do N-fertilizante aplicado via foliar; iv. a adubação nitrogenada via foliar como complemento da aplicação do nutriente no solo em cana-de-açúcar colhida no início da safra possibilitará que seja reduzida a dose de N-fertilizante aplicada no solo sem causar diminuição da produtividade da cana-de-açúcar.

Referências

- BORGES, C. D.; CARVALHO, J. L. N.; KÖLLN, O. T.; SANCHES, G. M.; SILVA, M. J.; CASTRO, S. G. Q.; CASTRO, S. A. Q.; SOUSA, L. L.; OLIVEIRA, J. V. C.; CANTARELLA, H.; VARGAS, V. P.; TSAI, S. M.; FRANCO, H. C. J. Can alternative N-fertilization methods influence GHG emissions and biomass production in sugarcane fields? **Biomass and Bioenergy**, v. 120, p. 21–27, jan. 2019. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0961953418302836>>.
- BOSCHIERO, B. N.; MARIANO, E.; TORRES-DORANTE, L. O.; SATTOLO, T. M. S.; OTTO, R.; GARCIA, P. L.; DIAS, C. T. S.; TRIVELIN, P. C. O. Nitrogen fertilizer effects on sugarcane growth, nutritional status, and productivity in tropical acid soils. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 117, n. 3, p. 367–382, 16 jul. 2020. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s10705-020-10074-w>>.
- CHERUBIN, M. R.; CARVALHO, J. L. N.; CERRI, C. E. P.; NOGUEIRA, L. A. H.; SOUZA, G. M.; CANTARELLA, H. Land Use and Management Effects on Sustainable Sugarcane-Derived Bioenergy. **Land**, v. 10, n. 1, p. 72, 15 jan. 2021. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-445X/10/1/72>>.
- CHERUBIN, M. R.; LISBOA, I. P.; SILVA, A. G. B.; VARANDA, L. L.; BORDONAL, R. O.; CARVALHO, J. L. N.; OTTO, R.; PAVINATO, P. S.; SOLTANGHEISI, A.; CERRI, C. E. P. Sugarcane Straw Removal: Implications to Soil Fertility and Fertilizer Demand in Brazil. **BioEnergy Research**, 2019.
- CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar - Safra 2022-23 - Primeiro levantamento**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>>.
- DE CASTRO, S. G. Q.; MAGALHÃES, P. S. G.; DE CASTRO, S. A. Q.; KÖLLN, O. T.; FRANCO, H. C. J. Optimizing Nitrogen Fertilizer Rates at Distinct In-season Application Moments in Sugarcane. **International Journal of Plant Production**, 29 nov. 2021. Disponível em: <<https://link.springer.com/10.1007/s42106-021-00175-z>>.

- DE OLIVEIRA, E. C. A.; DE CASTRO GAVA, G. J.; 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, out. 2013. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/jpln.201200133>>.
- DEGASPARI, I. A. M.; SOARES, J. R.; MONTEZANO, Z. F.; DEL GROSSO, S. J.; VITTI, A. C.; ROSSETTO, R.; CANTARELLA, H. Nitrogen sources and application rates affect emissions of N₂O and NH₃ in sugarcane. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 116, n. 3, p. 329–344, 16 abr. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10705-019-10045-w>>.
- FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Enhancing Nitrogen Use Efficiency in Crop Plants. *In*: **Advances in Agronomy**. [s.l.: s.n.].p. 97–185.
- FAGERIA, N. K.; FILHO, M. P. B.; MOREIRA, A.; GUIMARÃES, C. M. Foliar fertilization of crop plants. **Journal of Plant Nutrition**, v. 32, n. 6, p. 1044–1064, 2009.
- FERNANDÉZ, V.; SOTIROPOULOS, T.; BROWN, P. **Adubação foliar: fundamentos científico e técnicas de campo**. [s.l.] Abisolo, 2015. 150 p.
- FORMANN, S.; HAHN, A.; JANKE, L.; STINNER, W.; STRÄUBER, H.; LOGROÑO, W.; NIKOLAUSZ, M. Beyond Sugar and Ethanol Production: Value Generation Opportunities Through Sugarcane Residues. **Frontiers in Energy Research**, v. 8, p. 267, 27 nov. 2020. Disponível em: <<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2020.579577/full>>. Acesso em: 21 mar. 2022.
- GOLDEMBERG, J.; COELHO, S. T.; GUARDABASSI, P. The sustainability of ethanol production from sugarcane. **Energy Policy**, v. 36, n. 6, p. 2086–2097, 2008.
- HANSSEN, S. . V.; DAOGLOU, V.; STEINMANN, Z. J. N.; DOELMAN, J. C.; VAN VUUREN, D. P.; HUIJBREGTS, M. A. J. The climate change mitigation potential of bioenergy with carbon capture and storage. **Nature Climate Change**, v. 10, n. 11, p. 1023–1029, 24 nov. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/s41558-020-0885-y>>. Acesso em: 3 maio. 2022.
- HE, Y.; HU, X.; XU, W.; FANG, J.; SHI, P. Increased probability and severity of compound dry and hot growing seasons over world’s major croplands. **Science of The Total Environment**, v. 824, p. 153885, 10 jun. 2022. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969722009779>>. Acesso em: 3 maio. 2022.
- HUMBERT, R. P. Fertilization by aircraft in the Hawaiian sugar industry. **The Hawaiian Planter’s Record**, v. 55, n. 4, p. 301–311, 1960.
- JOHNSON, R. S.; ROSECRANCE, R.; WEINBAUM, S.; ANDRIS, H.; WANG, J. Can we approach complete dependence on foliar-applied urea nitrogen in an early-maturing peach? **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v. 126, n. 3, p. 364–370, 2001. Disponível em: <http://ovidsp.ovid.com/ovidweb.cgi?T=JS&CSC=Y&NEWS=N&PAGE=fulltext&D=agra5&AN=IND23221833%5Cnhttp://ucelinks.cdlib.org:8888/sfx_local?sid=OVID:agradb&issn=0003-1062&isbn=&volume=126&issue=3&spage=364&date=2001&title=Journal+of+the+American+Society+for+Hor>.
- KROGMEIER, M. J.; MCCARTY, G. W.; BREMNER, J. M. Phytotoxicity of foliar-applied urea. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 86, n. 21, p. 8189–8191, 1 nov. 1989. Disponível em: <<http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.86.21.8189>>.
- LEITE, J. M.; CIAMPITTI, I. A.; MARIANO, E.; VIEIRA-MEGDA, M. X.; TRIVELIN, P. C. O. Nutrient Partitioning and Stoichiometry in Unburnt Sugarcane Ratoon at Varying Yield Levels. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, n. 466, p. 14, 2016.

- LEITE, J. M.; PITUMPE ARACHCHIGE, P. S.; CIAMPITTI, I. A.; HETTIARACHCHI, G. M.; MAURMANN, L.; TRIVELIN, P. C. O.; PRASAD, P. V. V.; SUNOJ, S. V. 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, 1 out. 2020. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2405844020319435>>. Acesso em: 1 fev. 2022.
- LÜTHI, D.; LE FLOCH, M.; BEREITER, B.; BLUNIER, T.; BARNOLA, J.-M.; SIEGENTHALER, U.; RAYNAUD, D.; JOUZEL, J.; FISCHER, H.; KAWAMURA, K.; STOCKER, T. F. High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present. **Nature**, v. 453, n. 7193, p. 379–382, 15 maio 2008. Disponível em: <<http://www.nature.com/articles/nature06949>>. Acesso em: 3 maio. 2022.
- MASSON-DELMOTTE, V.; ZHAI, P.; PÖRTNER, H.-O.; ROBERTS, D.; SKEA, J.; SHUKLA, P. R.; PIRANI, A.; MOUFOUMA-OKIA, W.; PÉAN, C.; PIDCOCK, R.; CONNORS, S.; MATTHEWS, J. B. R.; CHEN, Y.; ZHOU, X.; GOMIS, M. I.; LONNOY, E.; MAYCOCK, T.; TIGNOR, M.; WATERFIELD, T. **Global Warming 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, susta.** [s.l.: s.n.]. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/06/SR15_Full_Report_High_Res.pdf>. Acesso em: 3 maio. 2022.
- OTTO, R.; CASTRO, S. A. Q.; MARIANO, E.; CASTRO, S. G. Q.; FRANCO, H. C. J.; TRIVELIN, P. C. O. Nitrogen Use Efficiency for Sugarcane-Biofuel Production: What Is Next? **BioEnergy Research**, v. 9, n. 4, p. 1272–1289, 10 dez. 2016. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s12155-016-9763-x>>.
- QUASSI DE CASTRO, S. A.; OTTO, R.; BOHÓRQUEZ SÁNCHEZ, C. E.; TENELLI, S.; SERMARINI, R. A.; TRIVELIN, P. C. O. Sugarcane straw preservation results in limited immobilization and improves crop N-fertilizer recovery. **Biomass and Bioenergy**, v. 144, p. 105889, 1 jan. 2021. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0961953420304232>>. Acesso em: 13 jan. 2022.
- RFA. **World Fuel Ethanol Production by Region.** Disponível em: <<https://ethanolrfa.org/markets-and-statistics/annual-ethanol-production>>. Acesso em: 3 maio. 2022.
- ROBINSON, N.; VOGT, J.; LAKSHMANAN, P.; SCHMIDT, S. Nitrogen Physiology of Sugarcane. *In: Sugarcane: Physiology, Biochemistry, and Functional Biology*. [s.l.] John Wiley & Sons Ltd, 2013. p. 169–195.
- SANCHES, G. M.; OTTO, R. A novel approach for determining nitrogen requirement based on a new agronomic principle—sugarcane as a crop model. **Plant and Soil**, v. 472, n. 1–2, p. 29–43, 29 mar. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11104-021-05263-7>>.
- SANGPLUNG, N.; ROSÁRIO, E. L. Response of sugarcane to foliar application of urea. **Philippines Journal of Crop Science**, v. 3, n. 2, p. 103–109, 1978.
- TRIVELIN, P. C. O.; CARVALHO, J. G. de; SILVA, A. Q. da; 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 uréia-15N. **Energia Nuclear e Agricultura**, v. 9, n. 2, p. 52–65, 1988.
- TRIVELIN, P. C. O.; COLETI, J. T.; LARA CABEZAS, W. A. R. Efeito residual na soqueira de cana-de-açúcar do nitrogênio da uréia aplicada por via foliar na cana-planta. *In: SEMINÁRIO SOBRE TÉCNICAS NUCLEARES NA PRODUÇÃO DE PLANTAS AGRÍCOLAS*, 1984, Piracicaba. [...]. Piracicaba: CENA, 1984. p. 119–124.
- TRIVELIN, P. C. O.; COLETI, J. T.; MATSUI, E. Absorção e perdas de uréia aplicada por via foliar na cana-de-açúcar (*Saccharum* spp), considerando a ocorrência de chuvas a diferentes intervalos de tempo da aplicação. **STAB-Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v. 3, n. 3, p. 12–16, 1985.
- UNFCCC, U. N. F. C. on C. C. **Paris Agreement.** Disponível em: <https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2022.

- VASCONCELOS, A. L. S.; CHERUBIN, M. R.; CERRI, C. E. P.; FEIGL, B. J.; BORJA REIS, A. F.; SIQUEIRA-NETO, M. Sugarcane residue and N-fertilization effects on soil GHG emissions in south-central, Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 158, n. November 2021, p. 106342, mar. 2022. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0961953422000034>>.
- VIEIRA-MEGDA, M. X.; MARIANO, E.; LEITE, J. M.; FRANCO, H. C. J.; VITTI, A. C.; MEGDA, M. M.; KHAN, S. A.; MULVANEY, R. L.; TRIVELIN, P. C. O. Contribution of fertilizer nitrogen to the total nitrogen extracted by sugarcane under Brazilian field conditions. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 101, n. 2, p. 241–257, 2015. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s10705-015-9676-7>>.
- WACLAWOVSKY, A. J.; SATO, P. M.; LEMBKE, C. G.; MOORE, P. H.; SOUZA, G. M. **Sugarcane for bioenergy production: An assessment of yield and regulation of sucrose content Plant Biotechnology Journal**2010.
- YANG, L.; DENG, Y.; WANG, X.; ZHANG, W.; SHI, X.; CHEN, X.; LAKSHMANAN, P.; ZHANG, F. Global direct nitrous oxide emissions from the bioenergy crop sugarcane (*Saccharum* spp. inter-specific hybrids). **Science of The Total Environment**, v. 752, p. 141795, 15 jan. 2021. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969720353249>>. Acesso em: 3 maio. 2022.
- ZHANG, X.; DAVIDSON, E. A.; MAUZERALL, D. L.; SEARCHINGER, T. D.; DUMAS, P.; SHEN, Y. Managing nitrogen for sustainable development. **Nature**, v. 528, n. 7580, p. 51–59, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1038/nature15743>>.

2. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A adubação foliar é uma prática agrícola muito utilizada na agricultura atual. As finalidades para o uso dessa são diversas, variando desde o uso para aumento da produtividade, como para o incremento de qualidade das plantas, principalmente do tecido vegetal que será comercializado, até o uso para proteção contra estresses bióticos e abióticos. Esse último tema ainda é recente e poucos estudos foram desenvolvidos, enquanto para os demais, já é encontrado uma maior quantidade de trabalhos. Para a cultura da cana-de-açúcar, são raros os trabalhos publicados que avaliaram o uso de nutrientes e/ou elementos benéficos aplicados via foliar e mais escassos ainda são os que avaliaram o uso de macronutrientes aplicados via foliar.

Na qualidade das plantas, os estudos tem sido realizados, principalmente, com as culturas graníferas. Tal importância se deve ao fato de que essas culturas são muito importantes para o suprimento de alimento para a população e a melhoria da qualidade dos grãos permite que deficiências nutricionais e a sub-nutrição nos humanos sejam sanadas. Diversos exemplos podem ser mencionados, como a biofortificação dos grãos de arroz com elementos essenciais para o desenvolvimento humano assim como a aplicação de nitrogênio no trigo para aumento do conteúdo de proteína. Além das culturas graníferas, a adubação foliar para aumento da qualidade das plantas também tem sido muito utilizado na fruticultura, por exemplo na cultura dos citros e da uva, produzindo frutos com maior quantidade de carboidratos e melhor desenvolvimento. Na cultura da cana-de-açúcar, a adubação foliar para melhoria da qualidade da planta, ou seja, maior acúmulo de sacarose no colmo, é algo recente e tem atraído a atenção de diversos pesquisadores. Estudos demonstraram eficácia dessa prática agrícola no período de maturação ao utilizar de micronutrientes associados a macronutrientes.

Com o objetivo de aumentar a produtividade da cultura, uma maior quantidade de trabalhos e com diversidade de culturas pode ser encontrada na literatura disponível. Os efeitos da adubação foliar nesse tema são diversos, variando desde efeitos nulo a positivos quando a adubação foliar foi utilizada como complemento ou suplemento da adubação no solo. Efeitos negativos também são encontrados quando a adubação foliar foi utilizada como substitutiva à adubação de solo. Tais resultados são de trabalhos que avaliaram a eficácia da adubação foliar com macronutrientes, pois, se focado nos micronutrientes, a maior parte dos trabalhos demonstram efeitos positivos. Poucos são os trabalhos realizados com a cultura da cana-de-açúcar utilizando da adubação foliar visando o incremento de produtividade.

Essa variação de resultados e a pouca quantidade de trabalhos disponíveis na literatura que avaliaram o uso da adubação foliar pode ser justificada pelas incertezas que ainda existem

sobre os mecanismos de absorção foliar, que variam em função da condição climática e do estágio de desenvolvimento da planta. A morfologia e a anatomia das folhas também interferem nesse processo e, conforme apresentado no capítulo 2 da tese, há diferença entre as variedades de cana-de-açúcar que pode proporcionar diferenças na taxa de absorção foliar e na eficácia da adubação foliar. No caso da cana-de-açúcar, além desses fatores que devem ser considerados, avaliar a adubação foliar é um processo trabalhoso e demorado, que deve ser feito em ciclos subsequentes, uma vez que a cana-de-açúcar é uma cultura semi-perene. Além disso, a cana-de-açúcar possui um extenso sistema radicular, que é a principal via de absorção dos nutrientes e, por isso, o foco dos trabalhos tem sido na adubação de solo. Entretanto, a dinâmica do nutriente no solo é mais complexa, envolve diversos fatores que são difíceis de serem controlados, diminuindo a eficácia da adubação e, em certos casos, aumentando a perda dos nutrientes para o ambiente, causando danos ambientais. Nesse contexto, a adubação foliar se torna uma prática fundamental para minimizar os danos ambientais, principalmente da adubação nitrogenada.

O nitrogênio no solo emite grande quantidade de óxido nitroso durante os processos de oxidação e redução, gás 273 vezes mais danoso do que o dióxido de carbono quando avaliado a contribuição para o efeito estufa, e é um dos principais nutrientes que promovem a eutrofização dos corpos d'água. Quando aplicado no solo, a recuperação do N-fertilizante pela planta ao final do ciclo é baixa, ~26 %, enquanto na adubação via foliar, a recuperação pode ser de até 85 %, conforme apresentado no capítulo 3 desta tese. A variedade de cana-de-açúcar influencia na taxa de absorção do N-fertilizante a curto prazo, mas nos dias subsequentes da adubação esse efeito é perdido. Mesmo havendo alta recuperação do N-fertilizante aplicado via foliar pelas variedades de cana-de-açúcar, é preciso ter atenção com a concentração de N-fertilizante na solução; soluções com concentração de nitrogênio maior do que 16 % N, podem causar danos foliares (queima).

Com base nesses conhecimentos e sabendo da alta demanda que a cultura da cana-de-açúcar tem pelo nitrogênio, que limita que todo o suprimento desse nutriente seja feito via foliar, o uso da adubação foliar como complemento da aplicação do nutriente no solo passa a ser uma prática agrícola viável tanto economicamente quanto ambientalmente. Junto a isso, a adubação nitrogenada foliar proporciona sincronia entre a época de aplicação do N-fertilizante e o período de máxima demanda pela cultura. No sistema de produção atual tem sido recomendada a adubação no solo, na fase inicial de desenvolvimento da planta, e a adubação via foliar, no período de máximo crescimento da cultura, mas essa como suplemento daquela. No atual contexto, isto é, alto preço e baixa oferta dos fertilizantes, e exigência para menor emissão de

gases do efeito estufa o ideal é utilizar da adubação nitrogenada como forma complementar, reduzindo a dose de N-fertilizante aplicada no solo. Ao fazer tal sugestão de manejo da adubação nitrogenada, a primeira dúvida que vem à mente dos produtores de cana-de-açúcar é sobre a produtividade da cultura, será que essa também reduzirá? E ao final deste trabalho, conduzido em duas áreas a campo por três anos, foi possível concluir que a adoção dessa prática agrícola não diminuirá a produtividade da cana-de-açúcar, resultados apresentados no capítulo 4 desta tese.

Por fim, é importante mencionar que esse é um estudo preliminar que comprova os benefícios do uso da adubação nitrogenada foliar na cultura da cana-de-açúcar como complemento da aplicação no nutriente no solo e abre portas para que novos estudos sejam realizados. Como ideias de estudos futuros podem ser mencionadas: 1. Avaliar esse manejo da adubação nitrogenada em diversas condições edafoclimáticas e de sistemas de produção, manejo, da cultura; 2. Avaliar fontes de N-fertilizante para aplicação via foliar; e 3. Avaliar a adição de adjuvantes na solução nitrogenada (permitirá que maior volume de solução seja aplicada possibilitando aumentar a dose de N-fertilizante via foliar sem causar queima das folhas?).