

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP CÂMPUS  
DE JABOTICABAL**

**EFEITO DE DOSES E ÉPOCAS DE APLICAÇÃO DE  
NITROGÊNIO NA BIOMASSA E NITROGÊNIO  
ACUMULADO EM CANA-DE-AÇÚCAR EM  
LATOSSOLO NO ESTADO DE SÃO PAULO**

**Hugo Miranda Faria**

**Engenheiro Agrônomo**

**2021**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP  
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**EFEITO DE DOSES E ÉPOCAS DE  
APLICAÇÃO DE NITROGÊNIO NA BIOMASSA  
E NITROGÊNIO ACUMULADO EM CANA-DE-  
AÇÚCAR EM LATOSSOLO NO ESTADO DE  
SÃO PAULO**

**Discente: Hugo Miranda Faria**

**Orientador: Prof. Dr. José Eduardo Corá**

**Tese apresentada à Faculdade de  
Ciências Agrárias e Veterinárias -  
Unesp, Câmpus de Jaboticabal,  
como parte das exigências para a  
obtenção do título de Doutor em  
Agronomia (Produção Vegetal).**

**2021**

F224e Faria, Hugo Miranda  
Efeito de doses e épocas de aplicação de nitrogênio na biomassa e nitrogênio acumulado em cana-de-açúcar em latossolo no estado de São Paulo. / Hugo Miranda Faria. -- Jaboticabal, 2021  
62 f. : il., tabs., mapas

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal  
Orientador: José Eduardo Corá

1. Agronomia. 2. Adubação nitrogenada. 3. Cana-de-açúcar. 4. Manejo de solo e planta. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecido pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.]

## CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

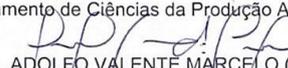
TÍTULO DA TESE: EFEITO DE DOSES E ÉPOCAS DE APLICAÇÃO DE NITROGÊNIO NA BIOMASSA E NITROGÊNIO ACUMULADO EM CANA-DE-AÇÚCAR EM LATOSSOLO NO ESTADO DE SÃO PAULO

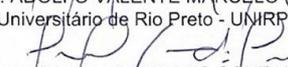
**AUTOR: HUGO MIRANDA FARIA**

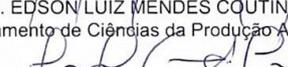
**ORIENTADOR: JOSÉ EDUARDO CORÁ**

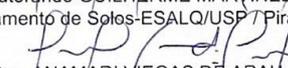
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA (PRODUÇÃO VEGETAL), pela Comissão Examinadora:

  
Prof. Dr. JOSÉ EDUARDO CORÁ (Participação Virtual)  
Departamento de Ciências da Produção Agrícola / FCAV / UNESP - Jaboticabal

  
Prof. Dr. ADOLFO VALENTE MARCELO (Participação Virtual)  
Centro Universitário de Rio Preto - UNIRP / São José do Rio Preto/SP

  
Prof. Dr. EDSON LUIZ MENDES COUTINHO (Participação Virtual)  
Departamento de Ciências da Produção Agrícola (Solos e Adubos) - Aposentado / FCAV / UNESP - Jaboticabal

  
Pós-Doutorando GUILHERME MARTINI SANCHES (Participação Virtual)  
Departamento de Solos-ESALQ/USP / Piracicaba/SP

  
Profa. Dra. ANAMARI VIEGAS DE ARAUJO MOTOMIYA (Participação Virtual)  
Universidade Federal da Grande Dourados-UFGD / Dourados/MS

Jaboticabal, 07 de julho de 2021

## **Banca Examinadora**

Prof. Dr. José Eduardo Corá – UNESP/FCAV – Presidente

Prof. Dr. Adolfo Valente Marcelo – Centro Universitário de  
Rio Preto (UNIRP)

Profa. Dra. Anamari Motomiya – UFGD/Dourados

Pós doutorando Dr. Guilherme Mastineli Sanches –  
ESALQ/Piracicaba

Prof. Dr. Edson Luiz Mendes Coutinho – UNESP/FCAV

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, por ser o motivo de tudo.

À minha família, meus pais Gilmar Miranda e Tânia dos Santos, meu irmão Heitor Miranda, por todo apoio que sempre me deram, não deixando faltar nada para que eu pudesse cumprir, com êxito, este objetivo.

À minha namorada Izabella Ferreira, por todo apoio e doação todo este tempo.

Aos membros da banca examinadora pelas valiosas contribuições para melhoria do trabalho.

Ao Professor Dr. José Eduardo Corá, por todo apoio e ensinamento no desenvolvimento deste trabalho. Obrigado pela sua amizade e por ter feito com tamanha responsabilidade sua missão de me orientar.

Aos colegas de Pós-Graduação Almir, Henildo, Samara e Vinicius, por todo apoio e contribuições para a realização deste trabalho.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias-FCAV, Câmpus de Jaboticabal, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Produção Vegetal), pela oportunidade ofertada.

À toda equipe do Departamento de Solos e Adubos da FCAV/UNESP, em especial ao Adauto da Silva Alves, por toda ajuda e apoio no cumprimento das minhas atividades.

À Fundação de Amparo à pesquisa do estado de São Paulo (FAPESP), processo nº 2017/18418-2. Obrigado por acreditar no nosso trabalho e financiar nossa pesquisa.

Por fim, a todos que de forma direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho e conquista deste título, muito obrigado.

## Sumário

<b>CAPÍTULO 1 – Considerações gerais.....</b>	<b>8</b>
<b>CAPÍTULO 2 - Efeito de doses e momentos de aplicação de nitrogênio na biomassa e nitrogênio acumulado em cana-de-açúcar em Latossolo .....</b>	<b>11</b>
Resumo.....	11
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
<b>2. MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>17</b>
2.1. Descrição do local e delineamento experimental.....	17
2.2. Produção de Biomassa.....	19
2.3. Análise de dados .....	22
<b>3. RESULTADOS.....</b>	<b>22</b>
3.1. Matéria seca e N acumulado na biomassa.....	22
3.2. Produtividade e Açúcar Total Recuperável (ATR).....	33
3.3. Análise de agrupamento.....	35
<b>4. DISCUSSÃO.....</b>	<b>40</b>
<b>5. CONCLUSÃO.....</b>	<b>42</b>
<b>6. REFERÊNCIAS.....</b>	<b>43</b>
<b>CAPÍTULO 3. Determinação de zonas homogêneas de manejo por meio de imagens de sensores multiespectrais acoplados em VANT no cultivo de cana-de-açúcar utilizando NDVI e NDRE.....</b>	<b>46</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>46</b>
<b>1. Introdução.....</b>	<b>47</b>
<b>2. MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>50</b>
2.1. Descrição do local .....	50
2.2. Determinação de zonas homogêneas de manejo.....	50
2.3. Produção de Biomassa.....	52
2.4. Análise de solo.....	52
<b>3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>53</b>
<b>4. CONCLUSÃO.....</b>	<b>60</b>

## **CAPÍTULO 1 – Considerações gerais**

A cana-de-açúcar é a safra mais importante para a produção de açúcar e etanol em climas tropicais e subtropicais e o Brasil é o maior produtor mundial. A ocorrência de fatores de restrição (condições climáticas, estresse hídrico, limitações de nutrientes e competição biológica) associadas ao desenvolvimento da cana-de-açúcar pode resultar na redução do rendimento e da qualidade, o que afeta diretamente o processamento industrial da biomassa. Além disso, tanto a produção de cana como os componentes de qualidade constituem a base do sistema de pagamento para os produtores. Portanto, fatores e condições que afetam a produção de cana-de-açúcar do ponto de vista agrônomo também podem afetar o sistema de produção do ponto de vista econômico, afetando a rentabilidade da indústria e dos produtores.

No sistema de produção de cana-de-açúcar, a disponibilidade de água no solo e nitrogênio (N) é o fator mais importante para limitar o crescimento das plantas, o rendimento e a qualidade da cana-de-açúcar (Ometto et al., 2009). A adubação nitrogenada aumenta o rendimento, beneficia as canas subsequentes e aumenta os atributos tecnológicos (por exemplo, a qualidade) da cana-de-açúcar. Por outro lado, a adubação nitrogenada pode representar uma parte significativa das despesas totais de produção, o que significa que tem um grande impacto na rentabilidade do sistema de produção de cana-de-açúcar e no meio ambiente.

As taxas de aplicação de fertilizantes nitrogenados que não estejam sincronizadas com a demanda das culturas podem contribuir para um menor rendimento ou, se em excesso, aumentar o risco de lixiviação de nitratos de terras agrícolas para águas superficiais e subterrâneas ou emissões de óxido nitroso

para a atmosfera por desnitrificação. Assim, a gestão adequada de N é um dos principais desafios da produção agrícola de cana-de-açúcar e dos impactos ambientais relacionados.

O manejo apropriada do N inclui o uso mais eficiente de fertilizantes nitrogenados, mas a quantidade e o momento de aplicação de N continua sendo um desafio de gestão para a produção de cana-de-açúcar. Atualmente, a aplicação de fertilizantes nitrogenados na cana-de-açúcar é feita, normalmente, a uma taxa uniforme baseada nas necessidades médias da cultura, sem levar em conta a variabilidade espacial do solo e das culturas. Além disso, a aplicação é feita logo após a colheita, quando, na maior parte do tempo, a umidade do solo é muito baixa, o que diminui a eficiência do uso de fertilizantes nitrogenados. As taxas ótimas de aplicação devem variar Tanto no espaço quanto no tempo devido à variabilidade das condições de cultivo e das propriedades do solo. A aplicação de N em uma variável espacial é desafiadora porque requer adoção de práticas específicas de locais que visam maximizar a absorção de N da cultura, minimizar as perdas de N e otimizar a oferta de N no solo.

Soluções técnicas modernas para a distribuição espacial variável através da Agricultura de Precisão (PA) (definida como "a aplicação de tecnologias e princípios para gerenciar a variabilidade espacial (no campo) e temporal (ao longo do tempo) associada a todos os aspectos da produção agrícola para melhorar o desempenho e Qualidade ambiental ") já estão no mercado devido à rápida evolução dos setores eletrônicos e de informação associados. Os dados dos monitores de produção de cana-de-açúcar mostraram que existem diferenças de rendimento muito grandes em um campo (Magalhães e Cerri, 2007) A variabilidade da produtividade dentro de um campo difere de ano para

ano (Pierce e Nowak, 1999, Rodrigues et al., 2013) e as imagens de sensores de culturas confirmam grandes diferenças no desenvolvimento do dossel de cana-de-açúcar (Molin, 2011, Portal et al., 2012, Amaral et al., 2013, Amaral e Molin 2014, Amaral et al., 2015). A magnitude dessa variabilidade pode ser utilizada para avaliar a adequação da implementação de um plano de manejo espacialmente variável. Os mapas de rendimento têm pouco valor até serem analisados e interpretados levando a algumas mudanças na gestão em resposta à variabilidade observada. Estamos inundados com informações sobre o rendimento das culturas e fatores que o afetam, mas na maioria das vezes somos incapazes de interpretar a variabilidade do rendimento em um campo.

A interpretação das informações contidas em um mapa de rendimento e a avaliação da variabilidade gerenciável de acordo com os aspectos técnicos e econômicos nem sempre é clara para os agricultores. A variabilidade adequada do rendimento da avaliação é obtida apenas considerando vários anos com culturas diferentes, porque o mesmo fator limitante pode exercer influência espacial e temporal diferente sobre o rendimento (Basso et al., 2012).

## **CAPÍTULO 2 - Efeito de doses e momentos de aplicação de nitrogênio na biomassa e nitrogênio acumulado em cana-de-açúcar em Latossolo**

### Resumo

A cana-de-açúcar é uma cultura de suma importância para economia do Brasil, crescendo anualmente a área plantada no país. O cultivo de cana requer uma alta quantidade de nutrientes, principalmente o nitrogênio, para que a planta se desenvolva adequadamente. O objetivo do trabalho foi avaliar o efeito de doses de nitrogênio e momentos de aplicação do fertilizante, na produção de matéria seca e N acumulado na biomassa da cana-de-açúcar, produtividade e ATR, em dois anos de cultivo de cana (2ª e 3ª soca), durante o ciclo da cultura. O experimento foi conduzido em uma área comercial de cana-de-açúcar localizada no Estado de São Paulo, Brasil (21 ° 22'38.48 "S, 47 ° 57'28.01" O). O experimento foi instalado em esquema fatorial 4x3, mais o tratamento controle, distribuídos em blocos ao acaso com quatro repetições. Foram realizadas duas aplicações do fertilizante nitrogenado. A primeira foi realizada logo após a colheita e a segunda aplicação foi realizado quando a cultura estava com aproximadamente 1,10 m de altura. Os tratamentos foram 4 doses de nitrogênio, 54, 109, 163 e 218 kg ha<sup>-1</sup> de N, mais o tratamento controle (0 kg ha<sup>-1</sup> de N) e três momentos de aplicação: 1) aplicação de todo o fertilizante na primeira aplicação; 2) aplicação do N parcelado, a primeira metade da dose na primeira aplicação e a outra metade na segunda aplicação 3) aplicação de todo fertilizante na segunda aplicação. A cultivar implantada no experimento foi a RB85-5156. Analisou-se matéria seca (MS) e N acumulado da parte aérea da cana-de-açúcar (biomassa), dividido em ponteiro e colmo, ATR e produtividade, em dois anos de cultivo (2018/2019 e 2019/2020), durante o ciclo da cana-de-açúcar. Observaram-se maiores quantidades de MS e N acumulado no ponteiro, colmo e biomassa, quando aplicado todo fertilizante logo após a colheita, no início do ciclo da cultura, antes dos 191 dias após a colheita (DAC). No entanto, após a segunda aplicação, seja todo o fertilizante ou parceladamente, foi possível observar que as quantidades de MS e N acumulado no ponteiro, colmo e biomassa foram maiores. Não foi observado diferença estatística para produtividade da cana-de-açúcar entre os tratamentos avaliados. Porém, observou-se maior quantidade de ATR, no primeiro ano agrícola, quando aplicado todo o fertilizante no momento em que a cultura estava com aproximadamente 1,10 m de altura. A quantidade de dias chuvosos, por período de amostragens da cana, foi determinante na produção de biomassa e produtividade.

Palavra-chave: Adubação nitrogenada; Parcelamento de adubação; *Saccharum spp.*

## Effect of rates and times of nitrogen application on biomass and accumulated nitrogen in sugarcane in an Oxisol

### Abstract

Sugarcane is a crop of paramount importance for the Brazilian economy, with the planted area growing annually. Sugarcane cultivation requires a high amount of nutrients, mainly nitrogen, for the plant to develop properly. This study aimed to evaluate the effect of nitrogen rates and fertilizer application times on dry matter production and accumulated N in sugarcane biomass, yield, and total recoverable sugar (TRS) during two years of sugarcane cultivation (2nd and 3rd ratoon) in the crop cycle. The experiment was conducted in a commercial sugarcane area located in the State of São Paulo, Brazil (21°22'38.48"S, 47°57'28.01"W). The experiment was set up in a 4x3 factorial scheme plus the control treatment, distributed in randomized blocks with four replications. Two applications of nitrogen fertilizer were carried out. The first application was carried out right after harvest and the second application was performed when the crop was approximately 1.10 m high. The treatments consisted of four nitrogen rates (54, 109, 163, and 218 kg N ha<sup>-1</sup>) plus the control (0 kg N ha<sup>-1</sup>) and three application times, as follows: 1) application of all the fertilizer in the first application; 2) split N application, the first half of the rate in the first application and the other half in the second application; and 3) application of all fertilizer in the second application. The cultivar RB85-5156 was used in the experiment. Dry matter (DM) and accumulated N of the sugarcane shoot (biomass), divided into top and stalk, TRS, and yield were analyzed in two years of cultivation (2018/2019 and 2019/2020), during the sugarcane cycle. Higher amounts of DM and N accumulated in the tops, stalk, and biomass were observed after the second application of nitrogen fertilizer, when a crop was approximately 1.10 m high, a period with a high precipitation. No statistical difference was observed for sugarcane yield between the evaluated treatments. However, a higher amount of TRS was observed in the first agricultural year, when all the fertilizer was applied when the crop was approximately 1.10 m high. The number of rainy days per sugarcane sampling period was decisive for biomass production and yield.

Keywords: Nitrogen fertilization; Fertilizer splitting; *Saccharum* spp.

## 1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é uma das principais culturas cultivadas, no âmbito econômico, em mais de 70 países, em uma ampla gama de ambientes nos trópicos e subtropicais (FAO, 2014). Estima-se que a área utilizada para o cultivo de cana-de-açúcar no Brasil se expanda rapidamente, com uma área cultivável em 2019 de 10,13 milhões de hectares, 14% a mais que em 2016 (CONAB, 2019). A cana-de-açúcar é uma planta tropical (Humbert, 1968) e requer clima quente e úmido para produção adequada. A FAO fez uma estimativa em 2018 de uma queda na produção de cana de açúcar no ano agrícola 2018/2019 no Brasil, devido às condições climáticas geralmente desfavoráveis para a produção de cana de açúcar (FAO, 2018). No ano agrícola 2018/2019 houve redução na produção de 4,2% em relação à safra 2017/18 (CONAB, 2019), como previsto pela FAO.

Inúmeros fatores são responsáveis pelo baixo rendimento da cana de açúcar no Brasil, incluindo a escassez de água e o uso inadequado de fertilizantes. A cana-de-açúcar é uma cultura de ciclo longo, entre cortes (até 18 meses), que requer uma alta quantidade de nutrientes. Um cultivo de cana com rendimento de 100 t ha<sup>-1</sup> extrai 207 kg N, 30 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 233 kg K<sub>2</sub>O do solo (Jagtap et al., 2006). Portanto, esses elementos devem ser adicionados em quantidades adequadas durante o ciclo da cultura para obter maior rendimento. Dentre esses elementos, nitrogênio (N) é o nutriente primário que limita a produção de cana (Wiedenfeld e Enciso, 2008) em todo o mundo. Globalmente, aproximadamente 2,5 Tg de fertilizante N são aplicados todos os anos em canaviais, representando 2% do uso total de fertilizante N (Robinson et al., 2011). As taxas recomendadas

de fertilizante N para produção de cana variam entre 45 e 300 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (Srivastava e Suarez, 1992).

O aumento significativo no cultivo de cana-de-açúcar no mundo, conseqüentemente, gera um aumento na demanda por N, impactando diretamente o meio ambiente, com o aumento da lixiviação de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, eutrofização dos corpos d'água (Yeoh et al., 2016) e aumento na emissão de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) (Meurer et al., 2016). Em um ano de produção de cana-de-açúcar a emissão total de gases de efeito estufa (GEE) foi de 2.316,5 kg CO<sub>2</sub> eq ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, sendo fertilizantes nitrogenados responsáveis por 42,5% de toda a emissão de GEE geradas durante a produção de um ano de cultivo de cana de açúcar (Bordonal, Figueiredo e La Scala, 2013). Portanto, é necessário realizar um manejo adequado da adubação nitrogenada para aumentar o uso eficiente do N (UEN), reduzindo perdas e danos ao meio ambiente.

Muitas alternativas de gestão para o UEN estão sendo estudadas e praticadas na agricultura. Em um estudo sobre métodos de aplicação de N, foram observadas concentrações mais altas de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> e N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> nos tratamentos em que o fertilizante foi aplicado sob a palha e incorporado no solo, em comparação com os tratamentos em que o fertilizante foi aplicado acima da palha sem incorporação (Borges et al., 2019 e Castro et al., 2017), sendo este um exemplo de manejo para aumento do UEN. As principais formas de N que as plantas absorvem são amônio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) e nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>). O N utilizado pelas plantas são provenientes da mineralização da matéria orgânica do solo ou via fertilizantes nitrogenados, sendo uréia a fonte mais utilizada de fertilizante nitrogenado, devido ao seu menor custo por unidade de N e por obter, em sua composição, maior quantidade de nitrogênio (46%).

Após a aplicação da uréia-N no solo ocorre processo de hidrólise da ureia pelas enzimas ureases formando carbonato de amônio  $[\text{CO}(\text{NH}_2)_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow (\text{NH}_4)_2\text{CO}_3]$ , que se decompõe rapidamente, formando amônio ( $\text{NH}_4^+$ ), bicarbonato e hidroxila  $[(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{NH}_4^+ + \text{OH}^- + \text{HCO}_3^-]$ . Como há a formação de hidroxila no processo bioquímico da ureia, o pH ao redor do grânulo fica acima de 7 e parte do  $\text{NH}_4$  se converte em  $\text{NH}_3$ , que apresenta o maior potencial de perda de volatilização em sistemas agrícolas (IPCC, 2014), podendo perder de 0 a 64% da quantidade aplicada, dependendo da dose, fonte e eficiência da aplicação (Pan et al., 2016). Em condições tropicais, como no Brasil, a perda de  $\text{NH}_3\text{-N}$  representa aproximadamente 30% da uréia-N aplicada (Mira et al., 2017).

Em estudo realizado no Paquistão, testando diferentes doses de N e momentos de aplicação na produção de cana-de-açúcar em dois anos de cultivo, observou-se que os resultados mais satisfatórios nas variáveis estudadas foram obtidos quando o fertilizante nitrogenado foi aplicado em parcelas, metade da dose após a colheita e a outra metade 90 dias após plantio (DAP) a uma dose de  $252 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$  (50% a mais do que o recomendado) (Saleem et al., 2012). Outro estudo que corrobora com Saleem et. al. (2012) conclui que a aplicação da dose recomendada de fertilizante ( $150 \text{ kg ha}^{-1}$ ) em duas parcelas iguais, no plantio e nos 30 dias após o plantio, ou nos 30 e 60 DAP, beneficiou a produtividade da cana (Lakshmi et al., 2003). Quando o fertilizante nitrogenado é aplicado totalmente no início do ciclo, ocorre uma redução no rendimento da cana e, quando aplicado muito tarde, ocorre uma redução na produção de açúcar (Wiedengeld, 1997). Além disso, pode-se concluir que altas doses de N não estão diretamente relacionadas à alta produtividade da cana-de-açúcar (Saleem

et al., 2012), porque quando aplicada uma maior dose de fertilizante N (225 kg ha<sup>-1</sup>) em comparação com menores doses (175 ou 150 kg ha<sup>-1</sup>) houve acúmulo de matéria seca na cana e não conversão em produtividade (LAL, 1991).

A porcentagem do teor total de N decorrente do fertilizante nas plantas (NDFP) na época da colheita varia normalmente entre 10 e 28% (Trivelin et al., 1995; Gava et al., 2003; Faroni, 2008; Basanta et al., 2003; Gava et al., 2001; Franco et al., 2011; Vieira-Megda et al., 2015), ou seja, 28% do N total na planta são provenientes de fertilizantes nitrogenados e 72% são de outras fontes, como mineralização de palha, fixação biológica de N, entre outros. No mesmo estudo, concluiu-se que o NDFP é maior nos estágios iniciais de crescimento, diminuindo nos estágios finais. O NDFP na cana-de-açúcar atingiu 60 a 70% nos estágios iniciais e caiu para 10 a 20% no momento da colheita (Franco et al., 2011 e Vieira-Megda et al., 2015), o que demonstra a importância da fertilização nitrogenada nos estágios iniciais e reserva no solo pelos períodos restantes, ou parcela da adubação, a fim de fornecer o nutriente para a planta no momento correto. Contudo, o objetivo do trabalho foi avaliar o efeito de doses de nitrogênio e momentos de aplicação do fertilizante, na produção de matéria seca e N acumulado na biomassa da cana-de-açúcar, produtividade e ATR, em dois anos de cultivo de cana (2<sup>a</sup> e 3<sup>a</sup> soca), durante o ciclo da cultura.

As hipóteses do presente trabalho foram: 1) Aplicação de fertilizante nitrogenado via ureia em dose total logo após a colheita é ineficiente devido à baixa eficiência no uso do N aplicado; 2) Maior produção e produtividade no cultivo de cana-de-açúcar quando aplicado fertilizante nitrogenado parceladamente ou em dose total no período chuvoso; 3) Efeitos climáticos, principalmente precipitação, são limitantes na produção da cana-de-açúcar.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1. Descrição do local e delineamento experimental**

O experimento foi conduzido em uma área comercial de cana-de-açúcar localizada no Estado de São Paulo, Brasil (21 ° 22'38.48 "S, 47 ° 57'28.01" O), em área de cultivo de cana-de-açúcar de segundo e terceiro corte (2ª e 3ª soca) e possui um histórico de 30 anos de cultivo de cana-de-açúcar, com colheita sem queima a partir de 2010. O clima regional, de acordo com a classificação de Koppen, é Aw (tropical), com verão quente e úmido e inverno seco. A pluviosidade média (média do total de chuva em 45 anos) anual da região foi de 1420,3 mm e a temperatura média foi 22,5°C. A precipitação total no local do experimento, no período de 26/05/2018 à 04/06/2019, primeiro ano agrícola avaliado (2018/2019), foi de 1631 mm e no período de 04/06/2019 à 15/05/2020, segundo ano agrícola avaliado, foi de 1260,9 mm. A precipitação e temperatura, nos períodos que foram realizado o experimento, foram comparados com os dados médios de um histórico de 45 anos (1970 a 2015) a fim de observar se o ano agrícola que foi realizado o experimento representou a região (Figura 1 e 2).

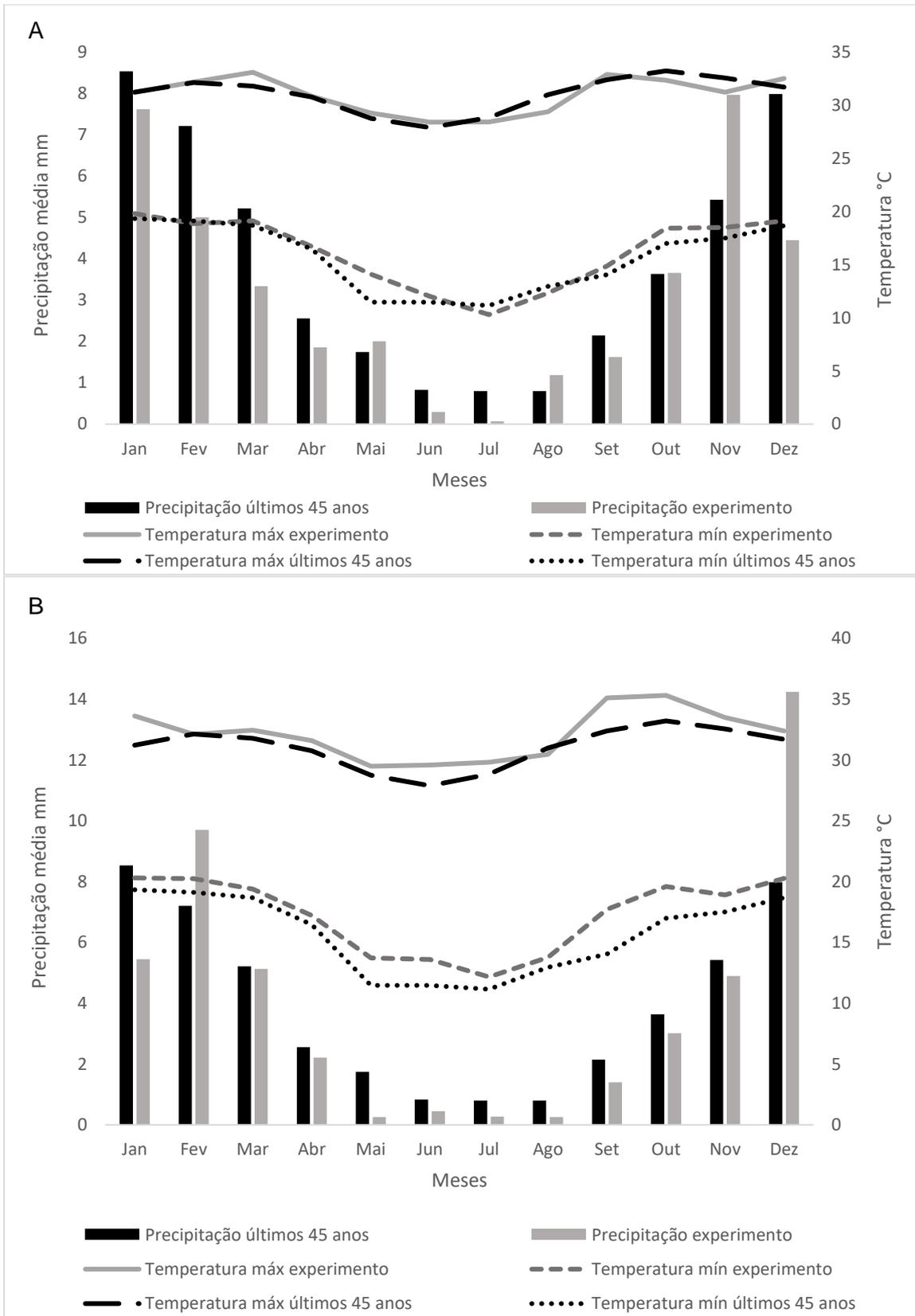


Figura 1. Comparação dos dados médios de precipitação e temperatura (máx e mín) entre o período que foi realizado o experimento (2018/2019 (A) e 2019/2020(B)) e histórico de 45 anos (1970 a 2015).

O solo na área é classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo. A cultivar de cana-de-açúcar utilizada foi RB85-5156, com perfilhamento alto e alta produtividade, classificada entre as dez variedades mais cultivadas da região centro-sul do Brasil.

O experimento de campo foi instalado seguindo delineamento em blocos casualizados, com treze tratamentos e quatro repetições, totalizando 52 parcelas. Cada parcela (900 m<sup>2</sup>) consiste em quatro linhas de cana-de-açúcar de 150 m de comprimento, espaçadas de 1,5 m. Realizou-se a aplicação do fertilizante nitrogenado em dois momentos diferentes do ciclo da cultura. A primeira aplicação foi realizada logo após a colheita e a segunda adubação foi realizada quando a cultura estava com aproximadamente 1,10 m de altura. Os tratamentos foram quatro doses de N e um controle (sem aplicação de N), e três momentos de aplicação. As doses de N foram de 50%, 100%, 150% e 200% da dose de N utilizada nos campos comerciais de cana-de-açúcar (54, 109, 163 e 218 kg ha<sup>-1</sup> de N, respectivamente), utilizando ureia como fonte de N. A recomendação para a cultura se baseia em 1 kg de N para 1 tonelada de produtividade esperada. Os três momentos de aplicação do fertilizante nitrogenado foram: 1) dose total na primeira aplicação (E1); 2) aplicação do N parcelado, sendo metade da dose na primeira aplicação e a segunda metade da dose na segunda aplicação (E2); 3) dose total na segunda aplicação (E3). Os fertilizantes nitrogenados foram aplicados ao solo, mecanicamente.

## 2.2. Produção de Biomassa

A biomassa foi determinada em cinco pontos de amostragem em cada parcela. Cada ponto de amostragem consistiu em 1 linha de cana de 1,5 m de

comprimento, intercalada entre as duas linhas centrais da parcela. Os tecidos das plantas foram coletados da parte acima do solo (colmo, palha e ponteiro). No campo, foi separado as três partes, pesou-se separadamente, para determinação da matéria fresca e retirou-se uma amostra de cada tecido para determinação da matéria seca (MS). As amostras frescas de colmo, palha e ponteiro foram pesadas, lavadas em água corrente e água deionizada e, em seguida, secas em um forno com circulação de ar a 65 °C por 72 h, para determinação da matéria seca e, por fim, trituradas em um moinho para determinar as concentrações de N total por combustão a seco.

Após determinado o teor de N total e MS de cada tecido da planta foi determinado o N acumulado em cada tecido, obtido pelo produto da multiplicação de MS e teor de N, em kg ha<sup>-1</sup>. Por fim determinou-se a MS da biomassa (soma da MS do ponteiro, colmo e palha) e N acumulado da biomassa (soma do N acumulado do ponteiro, colmo e palha).

O rendimento de cana-de-açúcar (t ha<sup>-1</sup>) foi estimado com base na matéria fresca dos colmos em 1,5 m de linha na colheita a cada 5 pontos de amostragem, antes da colheita mecanizada da cana-de-açúcar. Além disso, na colheita, foram determinados os parâmetros de qualidade da cana (açúcares totais recuperáveis (ATR), sólidos solúveis totais (Brix) e pureza), conforme CONSECANA (2006), em uma amostra de dez colmos inteiros em cada parcela. Os ponteiros foram removidos do colmo e cada colmo foi cortado aproximadamente 10 a 12 cm abaixo do meristema apical.

As amostragens foram realizadas periodicamente durante o ciclo da cultura. A primeira amostragem foi realizada 140 dias após a colheita (DAC) e 135 DAC, no primeiro e segundo ano agrícola, respectivamente, por considerar

o tamanho ideal da cultura para amostragem, visto que antes deste período a cana apresenta-se heterogeneidade quanto à brotação e/ou com tamanho inviável para coleta de amostras. No primeiro ano agrícola avaliado (2018/2019) as amostragens, posteriores a primeira, foram realizadas em uma periodicidade de 60 dias, porém não foi possível manter a frequência de amostragem após a amostragem número 3 (Fevereiro de 2019) devido um tombamento da cana-de-açúcar, ocorrido no dia 18/02/2019, na área experimental, impossibilitando a amostragem após esta data até a colheita. A cultivar RB85-5156 apresenta um histórico severo de tombamento. No segundo ano agrícola avaliado (2019/2020) realizou-se, após a primeira amostragem, amostragens mais frequentes no início do ciclo com o objetivo de avaliar a produção da cana-de-açúcar de forma mais constante no início do ciclo da cultura, mantendo maior o período entre as amostragens após a terceira amostragem realizada no dia 12 de dezembro de 2019 (Tabela 2).

Tabela 2. Atividades agrícolas e experimentais durante os dois anos de cultivo de cana de açúcar avaliados.

Atividades agrícolas	DAC		Data
	Ano agrícola 1 (2018/2019)		
Plantio			23/07/2016
Primeiro Corte			21/06/2017
Segundo Corte – Implantação do experimento			26/05/2018
Primeira Aplicação	25		21/06/2018
Amostragem 1	143		16/10/2018
Segunda Aplicação	192		04/12/2018
Amostragem 2	206		18/12/2018
Amostragem 3	269		19/02/2019
Amostragem 4 / Colheita	374		04/06/2019
	Ano agrícola 2 (2019/2020)		
Terceiro Corte			04/06/2019
Primeira Aplicação	25		01/07/2019
Amostragem 1	135		17/10/2019
Amostragem 2	155		06/11/2019
Segunda aplicação	182		03/12/2019
Amostragem 3	191		12/12/2019
Amostragem 4	277		07/03/2020

### 2.3. Análise de dados

Foi realizada análise gráfica para todas as variáveis avaliadas, apresentadas por meio de gráficos de Box plot, com o objetivo de identificar se os dados apresentaram distribuição simétrica e a quantidade de outliers presentes no conjunto de dados.

Realizou-se análise de agrupamento (Cluster), com o objetivo de juntar, em grupos, todos os dados que apresentam determinada similaridade para definir o acúmulo de MS e N acumulado na biomassa.

Para analisar o efeito dos tratamentos na produtividade e na quantidade de Açúcar Total Recuperável (ATR) na cultura seguiu-se o delineamento fatorial 4x3 com tratamento adicional (tratamento controle) e realizou-se análise de variância (ANOVA). Quando foi observado diferença significativa, considerando 5% de probabilidade ( $\alpha < 0,05$ ), entre os tratamentos, foi utilizada a análise de regressão polinomial para doses de N e análise de comparação de médias, pelo teste LSD, para momentos de aplicação.

## 3. RESULTADOS

### 3.1. Matéria seca e N acumulado na biomassa

Foram observadas maiores diferenças nas quantidades de MS do ponteiro, entre os momentos de aplicação, aos 269 DAC no primeiro ano agrícola e aos 191 DAC no segundo ano agrícola. Obtiveram-se as maiores quantidades de MS do ponteiro, nestes períodos, quando o fertilizante nitrogenado foi aplicado todo após a colheita e quando aplicado parceladamente (Figura 2).

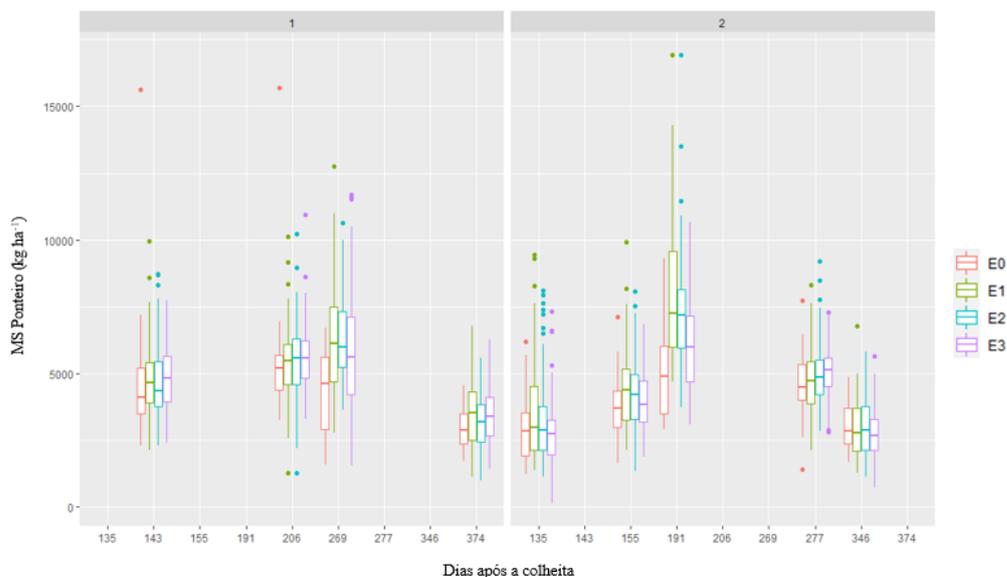


Figura 2. Gráfico boxplot dos valores médios da MS do ponteiro, para momentos de aplicação de N (E1, E2 e E3) e tratamento controle (E0), em dias após a colheita, para dois anos de cultivo (1 - 2018/2019 e 2 - 2019/2020).

No entanto, aos 277 DAC, a maior quantidade de MS do ponteiro foi observada quando todo o fertilizante foi aplicado no momento em que a cultura estava com aproximadamente 1,10 m de altura. Este resultado, provavelmente, foi em decorrência da resposta da cultura à segunda aplicação.

Porém, aos 374 e 346 DAC, momento em que foi realizada a colheita da cana-de-açúcar nos dois anos agrícolas, não foi observado diferença significativa na quantidade de MS do ponteiro entre os momentos de aplicação.

Ao observar o efeito das doses de N na MS do ponteiro, foram verificadas diferenças aos 269 DAC, com maior quantidade de MS quando aplicado a dose de 54 kg ha<sup>-1</sup> de N. Aos 191 DAC, foram observadas quantidades próximas para MS do ponteiro quando aplicado 54, 109, 163 e 218 kg ha<sup>-1</sup>, diferindo apenas do valor de MS quando não houve aplicação de N (Figura 3).

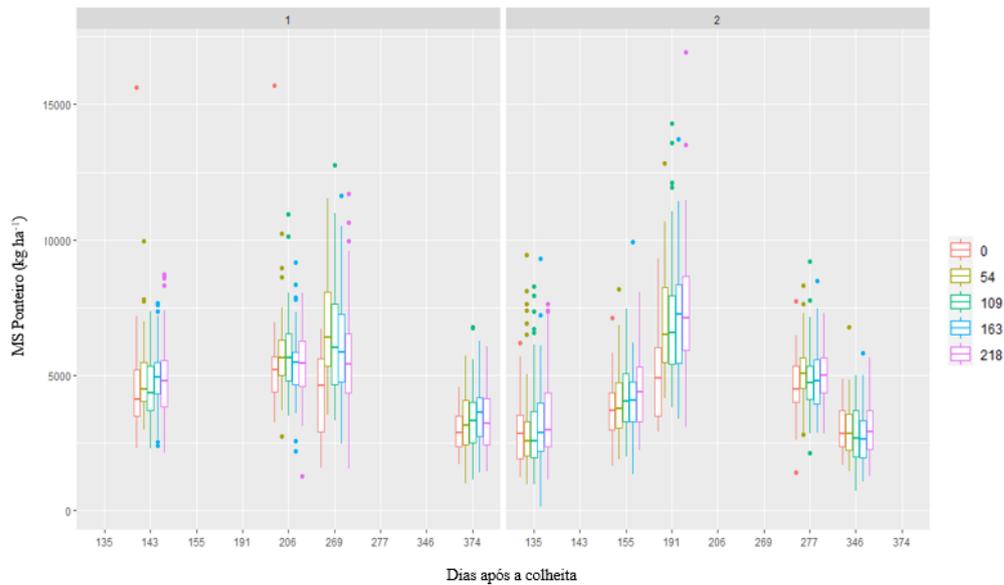


Figura 3. Gráfico boxplot dos valores médios da MS do ponteiro, para doses de N (0, 54, 109, 163 e 218 kg ha<sup>-1</sup>), em dias após a colheita, para dois anos de cultivo (1 - 2018/2019 e 2 - 2019/2020).

Ao analisar a quantidade de N acumulado no ponteiro, entre os momentos de aplicação, foram observadas maiores quantidades, aos 155 e 191 DAC, quando aplicado o fertilizante todo após a colheita e quando aplicado parceladamente. Aos 277 DAC, foi observado maior quantidade de N acumulado quando aplicado todo o fertilizante no momento em que a cultura estava com aproximadamente 1,10 m de altura (Figura 4). Como observado para MS do ponteiro, este resultado, provavelmente, foi em decorrência da resposta da cultura à segunda aplicação.

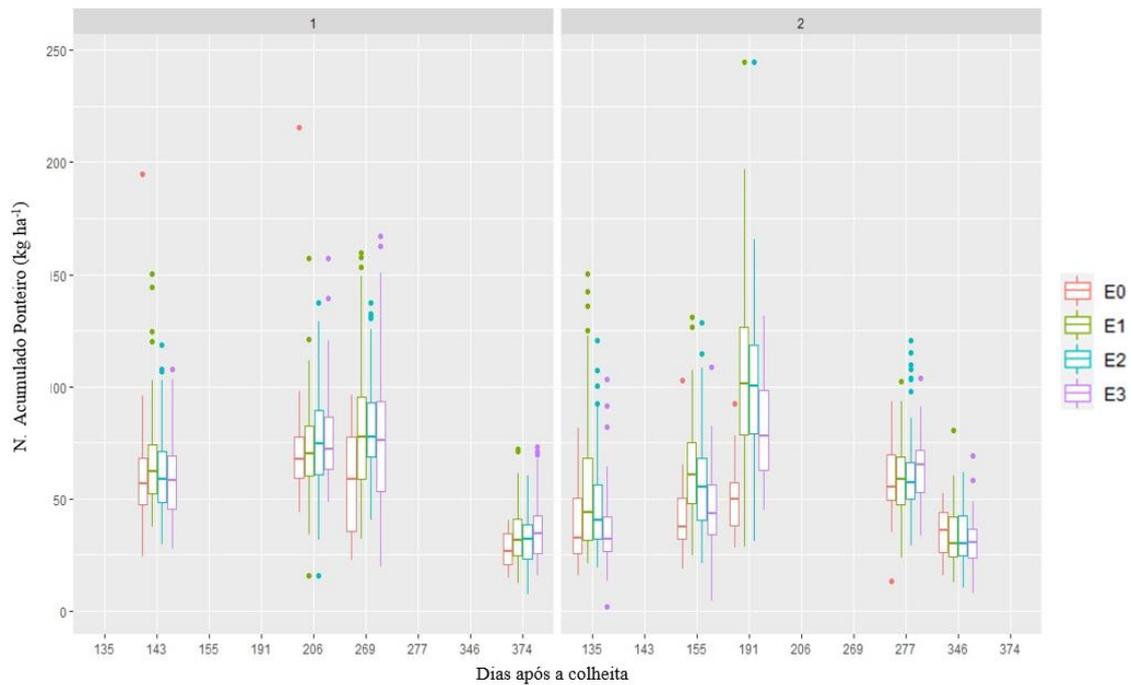


Figura 4. Gráfico boxplot dos valores médios de N acumulado no ponteiro, para momentos de aplicação de N (E1, E2 e E3) e tratamento controle (E0), em dias após a colheita, para dois anos de cultivo (1 - 2018/2019 e 2 - 2019/2020).

Foram observadas diferenças nas quantidades de N acumulado no ponteiro, entre as doses de N, aos 269 e 191 DAC, com valores semelhantes de N acumulado no ponteiro quando aplicado as doses 54, 109, 163 e 218 kg ha<sup>-1</sup> de N, diferenciando de quando não houve aplicação de N. Aos 191 DAC a maior quantidade de N acumulado foi observado quando aplicado a dose de 163 kg ha<sup>-1</sup> de N (Figura 5).

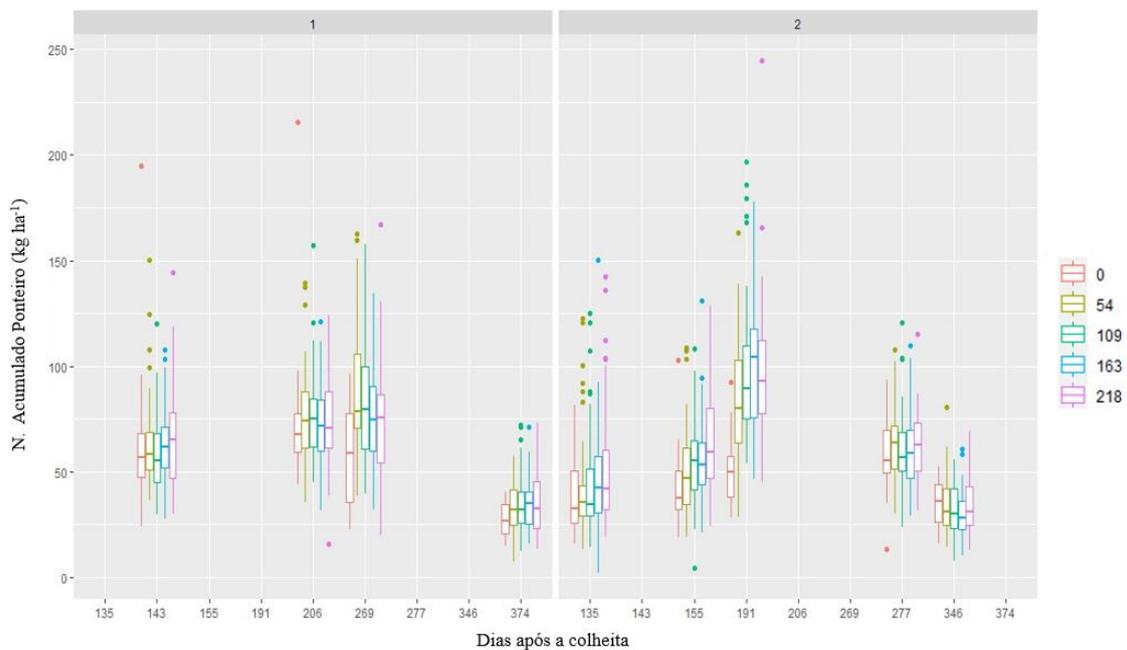


Figura 5. Gráfico boxplot dos valores médios de N acumulado no ponteiro, para doses de N (0, 54, 109, 163 e 218 kg ha<sup>-1</sup>), em dias após a colheita, para dois anos de cultivo (1 - 2018/2019 e 2 - 2019/2020).

Ao analisar o efeito dos tratamentos na MS do colmo, foram observados maiores valores de MS do colmo, aos 206 e 191 DAC, quando aplicado todo o fertilizante nitrogenado após a colheita (Figura 6).

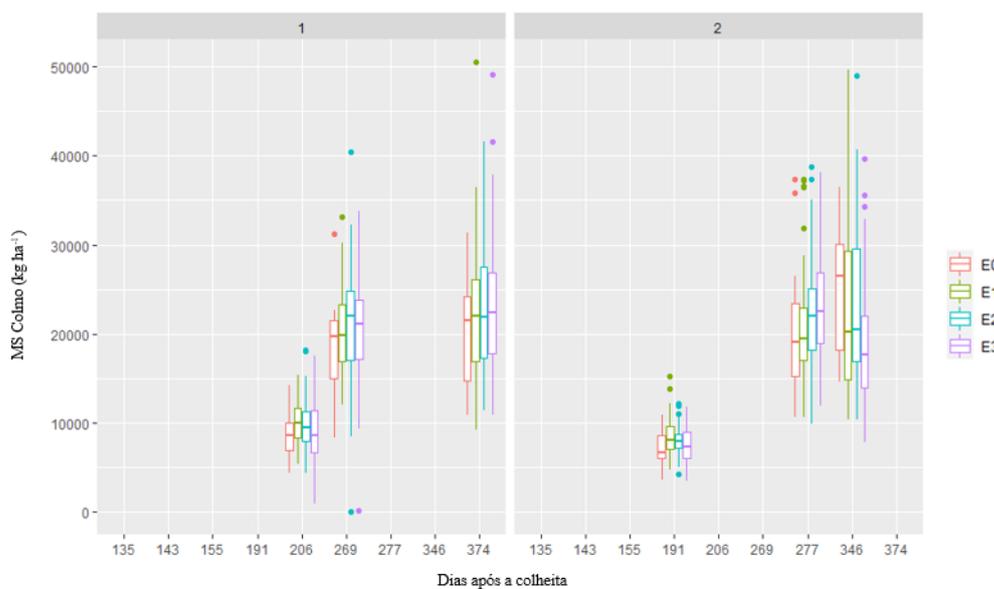


Figura 6. Gráfico boxplot dos valores médios da MS do colmo, para momentos de aplicação de N (E1, E2 e E3) e tratamento controle (E0), em dias após a colheita, para dois anos de cultivo (1 - 2018/2019 e 2 - 2019/2020).

No entanto, aos 269 e 277 DAC, após a segunda aplicação do fertilizante, foi observado maiores quantidades de MS do colmo quando aplicado o fertilizante nitrogenado parcelado (269 DAC) e quando aplicado todo o fertilizante quando a cultura estava com altura de aproximadamente 1,10 m (277 DAC).

Aos 374 e 346 DAC, momento em que foi realizado a colheita da cana-de-açúcar, não foi observado diferença significativa na quantidade de MS do colmo entre os momentos de aplicação.

Foram identificadas diferenças na MS do colmo, entre as doses de N aplicadas, apenas aos 269 DAC, quando aplicado a dose de 109 kg ha<sup>-1</sup> de N (Figura 7).

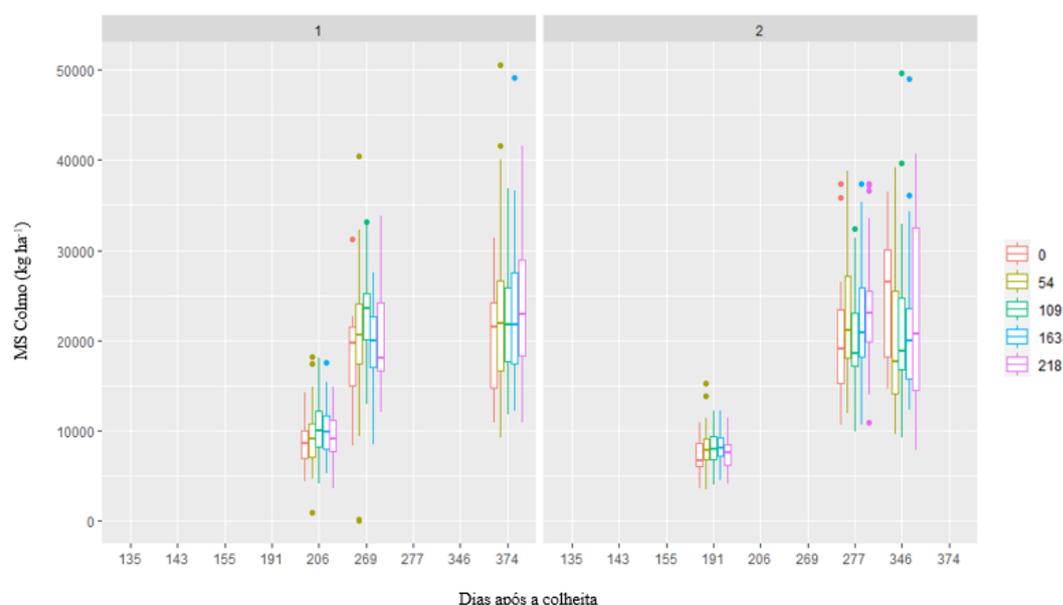


Figura 7. Gráfico boxplot dos valores médios da MS do colmo, para doses de N (0, 54, 109, 163 e 218 kg ha<sup>-1</sup>), em dias após a colheita, para dois anos de cultivo (1 - 2018/2019 e 2 - 2019/2020).

Resultados semelhantes aos obtidos para MS do colmo foram observados para N acumulado no colmo. Foram obtidas maiores quantidades de N acumulado no colmo, aos 269 e 277 DAC, quando aplicado o fertilizante todo quando a cultura estava com aproximadamente 1,10 m de altura (Figura 8).

Entretanto, quanto maior a quantidade de MS do colmo maior a quantidade de N acumulado neste tecido.

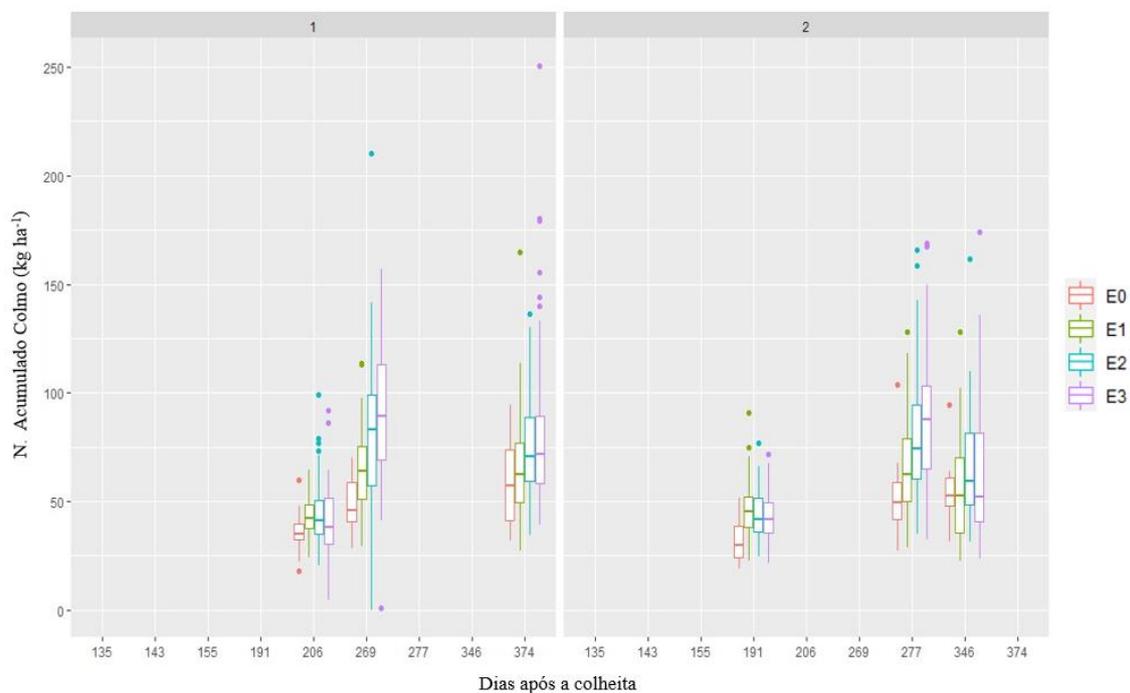


Figura 8. Gráfico boxplot dos valores médios de N acumulado no colmo, para momentos de aplicação de N (E1, E2 e E3) e tratamento controle (E0), em dias após a colheita, para dois anos de cultivo (1 - 2018/2019 e 2 - 2019/2020).

As maiores quantidades de N acumulado no colmo, para doses de N, foram identificadas aos 374, 191, 277 e 346 DAC, quando aplicado a dose de 218 kg ha<sup>-1</sup> de N (Figura 9).

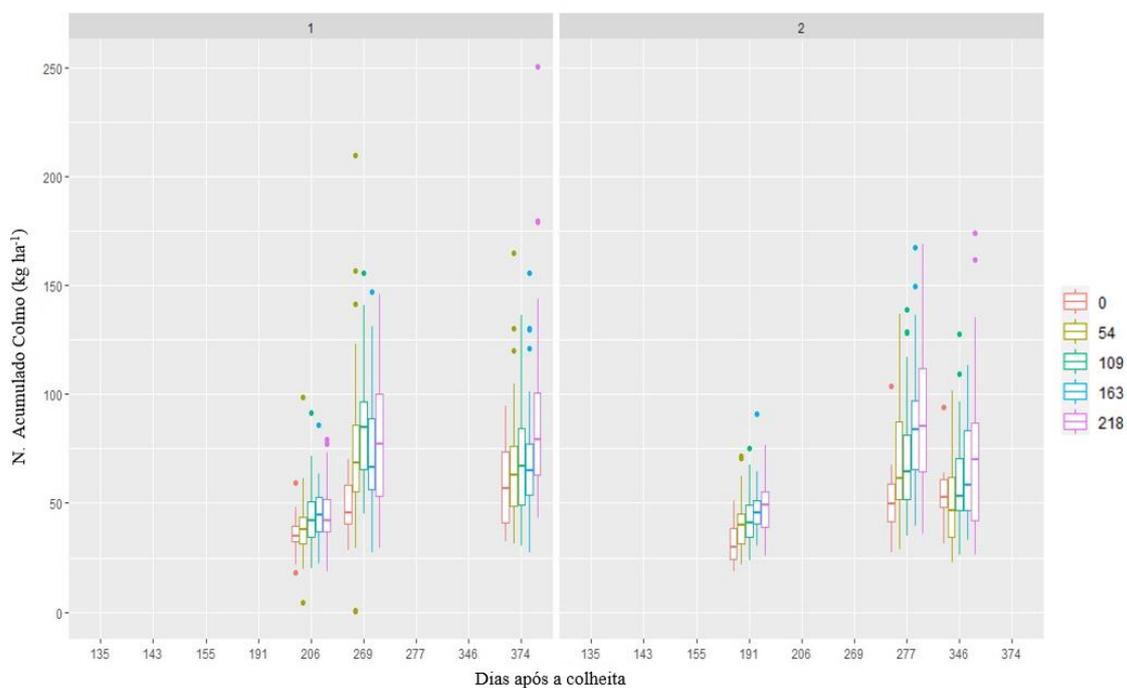


Figura 9. Gráfico boxplot dos valores médios da MS do colmo, para doses de N (0, 54, 109, 163 e 218 kg ha<sup>-1</sup>), em dias após a colheita, para dois anos de cultivo (1 - 2018/2019 e 2 - 2019/2020).

Para MS da biomassa, as maiores diferenças foram observadas a partir dos 206 e 191 DAC, com maiores quantidades de MS quando aplicado todo o fertilizante após a colheita. Porém, aos 269 e 277 DAC, após a segunda aplicação, foi observado maiores quantidades de MS da biomassa quando aplicado o fertilizante parcelado e quando todo o fertilizante foi aplicado no momento em que a cultura estava com aproximadamente 1,10 m de altura (Figura 10).

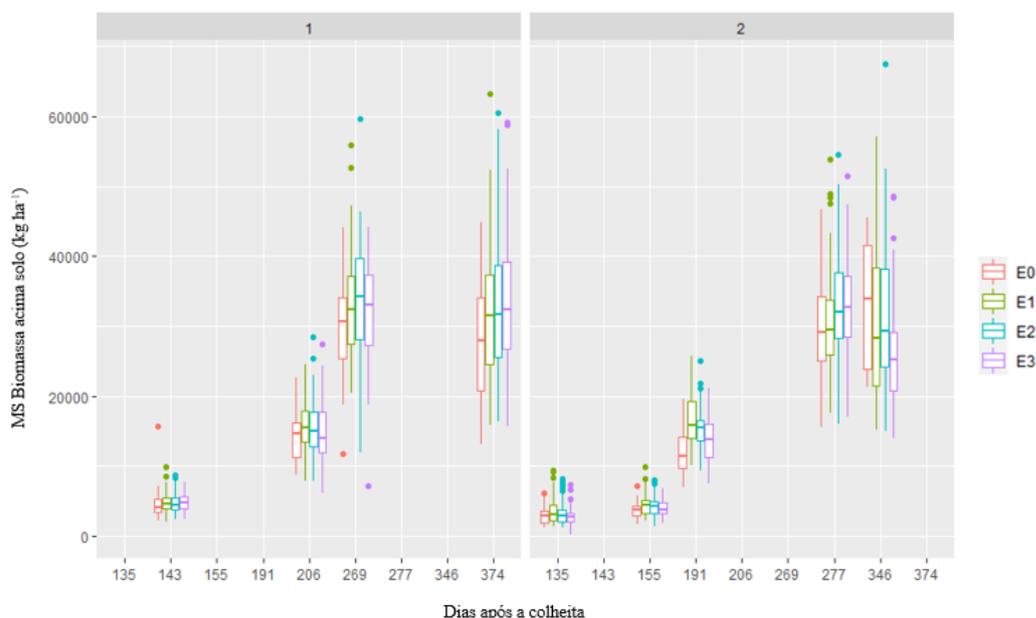


Figura 10. Gráfico boxplot dos valores médios da MS da biomassa, para momentos de aplicação de N (E1, E2 e E3) e tratamento controle (E0), em dias após a colheita, para dois anos de cultivo (1 - 2018/2019 e 2 - 2019/2020).

Aos 269 DAC, a maior quantidade de MS da biomassa ( $34350 \text{ kg ha}^{-1}$ ), observado quando o fertilizante foi aplicado parceladamente, foi de  $3700 \text{ kg ha}^{-1}$  a mais que a menor quantidade de MS da biomassa ( $30650 \text{ kg ha}^{-1}$ ), referente à quando não houve aplicação de N.

Aos 277 DAC, a maior quantidade de MS da biomassa ( $32729 \text{ kg ha}^{-1}$ ), observado quando o fertilizante foi aplicado totalmente no momento em que a cultura estava com aproximadamente 1,10 m, foi de  $3554 \text{ kg ha}^{-1}$  maior que a menor quantidade ( $29175 \text{ kg ha}^{-1}$ ), também referente à quando não houve aplicação de N.

Quanto as doses de N, foram observadas maiores quantidades de MS da biomassa quando aplicado  $109 \text{ kg ha}^{-1}$  de N, aos 206 e 269 DAC e quando aplicado  $218 \text{ kg ha}^{-1}$ , aos 374 e 277 DAC (Figura 11).

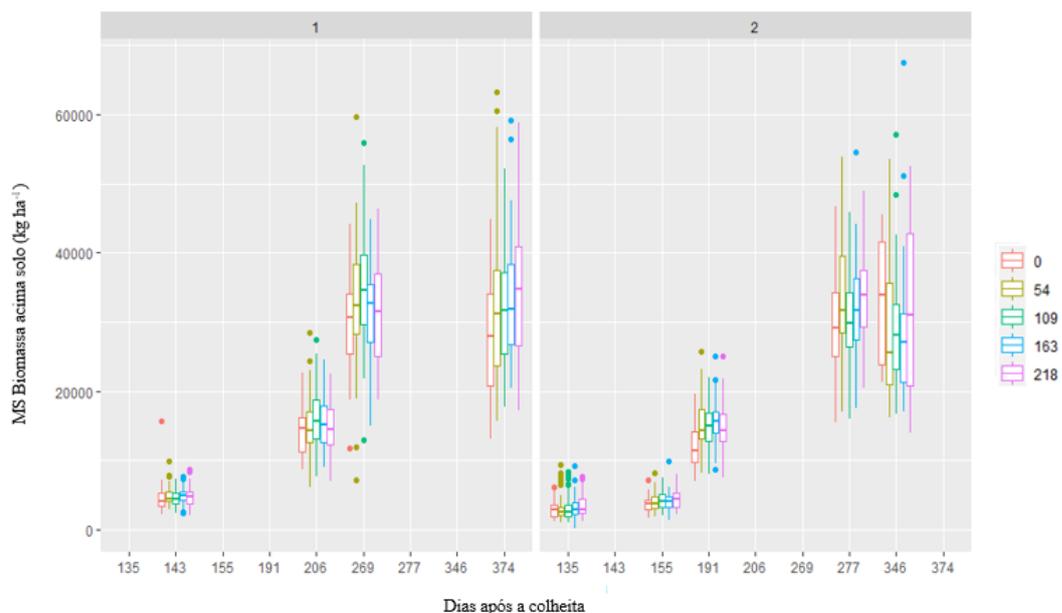


Figura 11. Gráfico boxplot dos valores médios da MS da biomassa, para doses de N (0, 54, 109, 163 e 218 kg ha<sup>-1</sup>), em dias após a colheita, para dois anos de cultivo (1 - 2018/2019 e 2 - 2019/2020).

Ao analisar N acumulado na biomassa, observam-se maiores valores aos 155 e 191 DAC, quando aplicado todo o fertilizante logo após a colheita. No entanto, após realizado a segunda aplicação do fertilizante, foram observados maiores valores de N na biomassa, aos 269, 374 e 277 DAC, quando aplicado todo o fertilizante no momento em que a cultura estava com aproximadamente 1,10 m de altura (Figura 12).

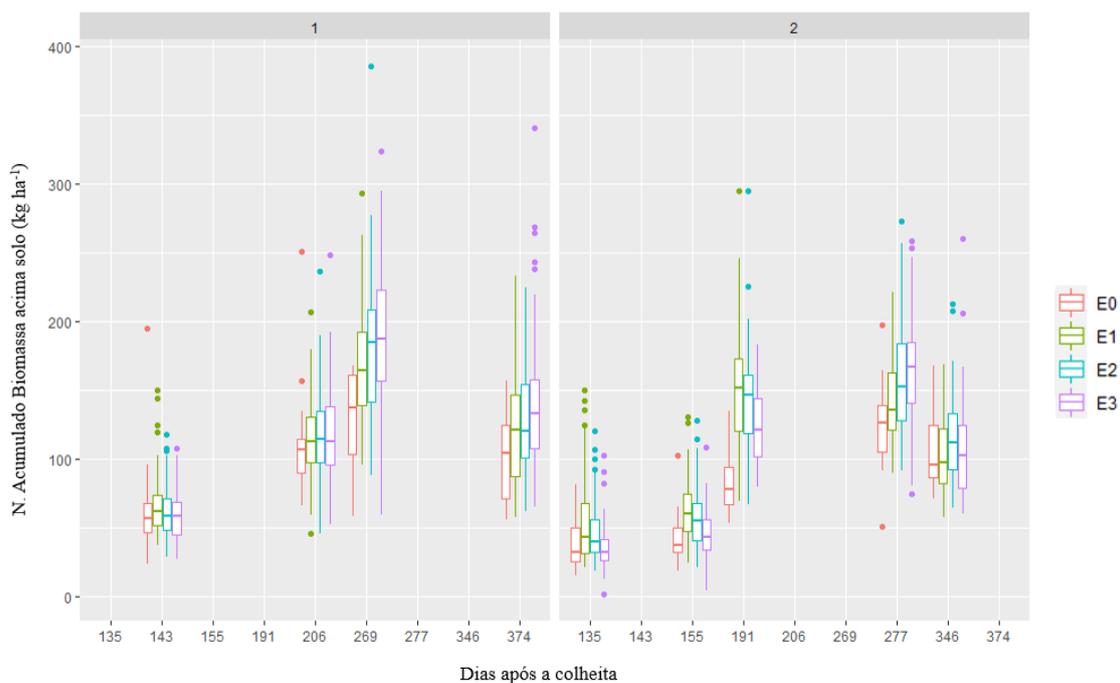


Figura 12. Gráfico boxplot dos valores médios da MS da biomassa, para momentos de aplicação de N (E1, E2 e E3) e tratamento controle (E0), em dias após a colheita, para dois anos de cultivo (1 - 2018/2019 e 2 - 2019/2020).

As quantidades de N acumulado na biomassa, entre as doses de N aplicados, foram se diferenciar do tratamento controle ( $0 \text{ kg ha}^{-1}$ ) aos 269 e 191 DAC. Maiores valores de N acumulado foi observado quando aplicado  $109 \text{ kg ha}^{-1}$ , aos 269 DAC e quando aplicado a dose de  $218 \text{ kg ha}^{-1}$ , aos 277 DAC (Figura 13).

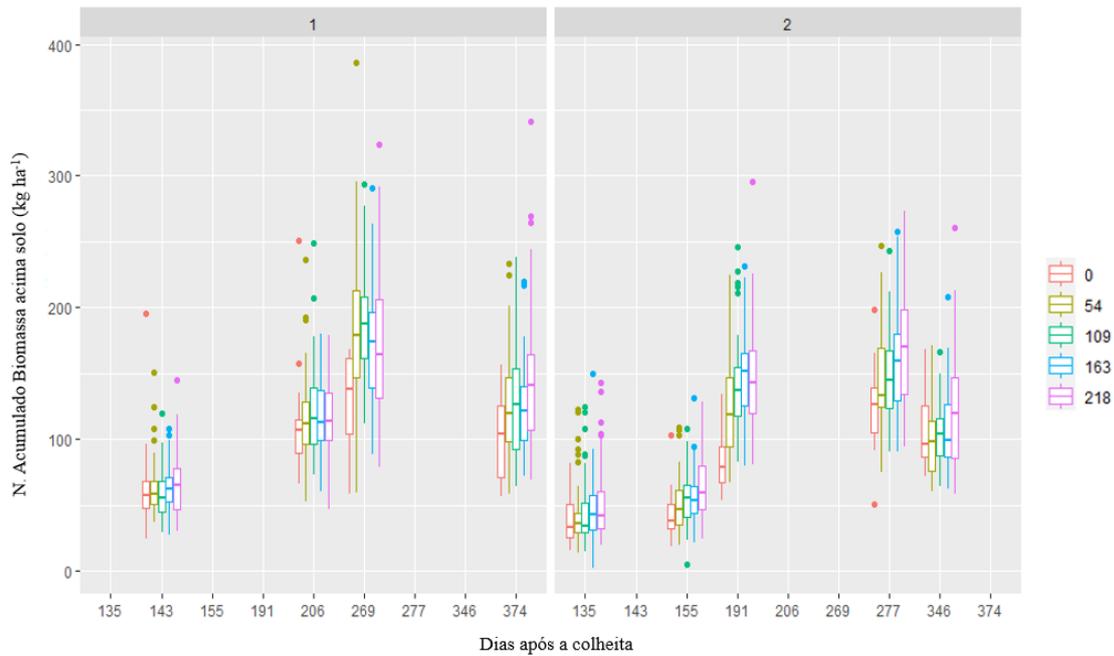


Figura 13. Gráfico boxplot dos valores médios de N acumulado na biomassa, para doses de N (0, 54, 109, 163 e 218 kg ha<sup>-1</sup>), em dias após a colheita, para dois anos de cultivo (1 - 2018/2019 e 2 - 2019/2020).

De forma geral, foi possível perceber que maiores quantidades de MS e N acumulado no ponteiro, colmo e biomassa, quando aplicado todo fertilizante logo após a colheita, ocorreram no início do ciclo da cultura. No entanto, após a aplicação do fertilizante quando a cultura estava com aproximadamente 1,10 m de altura, seja totalmente ou parceladamente, foi possível observar que as quantidades de MS e N acumulado no ponteiro, colmo e biomassa foram maiores.

### 3.2. Produtividade e Açúcar Total Recuperável (ATR)

Não houve diferença estatística para produtividade da cana-de-açúcar entre os tratamentos avaliados. No primeiro ano agrícola, para doses de N, observou-se maior produtividade, 80,6 kg ha<sup>-1</sup> de cana, quando aplicado a dose de 218 kg ha<sup>-1</sup> de N. Quanto à momentos de aplicação, maiores produtividades foram observadas quando aplicado o fertilizante parceladamente e quando

aplicado todo o fertilizante no momento em que a cultura estava com 1,10 m de altura. No segundo ano agrícola observou-se valores próximos para produtividade, entre as doses de N e momentos de aplicação (Tabela 6).

Tabela 6. Resultado da análise de variância para doses e momentos de aplicação de N, para produtividade e Açúcar Total Recuperável (ATR).

Dose (kg ha <sup>-1</sup> )	Produtividade (t ha <sup>-1</sup> )		ATR (kg t de cana <sup>-1</sup> )	
	2018/2019	2019/2020	2018/2019	2019/2020
0	68,5	69,7	154,2	157,5
54	75,1 a	71,9 a	158,4 a	158,4 a
109	75,0 a	71,5 a	159,1 a	155,2 a
163	76,0 a	72,2 a	162,7 a	154,9 a
218	80,6 a	71,3 a	158,4 a	156,3 a
CV	19	9	4	4
p Dose	0,77 <sup>ns</sup>	0,98 <sup>ns</sup>	0,29 <sup>ns</sup>	0,44 <sup>ns</sup>
Momento de Aplicação				
1	74,7 a	72,2 a	157,5 b	158,4 a
2	77,9 a	71,9 a	158,0 b	155,2 a
3	77,4 a	71,1 a	163,4 a	155,0 a
p Momento	0,80 <sup>ns</sup>	0,90 <sup>ns</sup>	0,02*	0,18 <sup>ns</sup>
p Interação	0,97 <sup>ns</sup>	0,95 <sup>ns</sup>	0,12 <sup>ns</sup>	0,57 <sup>ns</sup>
p Adic. vs Fatorial	0,29 <sup>ns</sup>	0,56 <sup>ns</sup>	0,10 <sup>ns</sup>	0,50 <sup>ns</sup>

Médias seguidas da mesma letra não apresentam diferença significativa pelo teste de LSD (5%) para momento de aplicação e doses de N. (<sup>ns</sup>): Análise de variância não significativa; (<sup>\*</sup>) Análise de variância significativa (p < 0,05); 1: dose total logo após a colheita; 2: dose parcelada, metade logo após a colheita e metade quando a cultura estava com 1,10 m de altura; E3: dose total quando a cultura estava com 1,10 m de altura.

Houve diferença significativa para ATR na cana-de-açúcar no primeiro ano agrícola, com maior valor de ATR quando se realizou a aplicação de todo o fertilizante no momento em que a cultura estava com aproximadamente 1,10 m de altura (Tabela 6).

Maiores quantidades de ATR, em kg ha<sup>-1</sup> (produto da multiplicação do ATR pela produtividade), no primeiro ano agrícola, foram observadas quando aplicado a dose de 163 e 218 kg ha<sup>-1</sup> de N e quando aplicado o fertilizante

parcelado e todo o fertilizante quando a cultura estava com aproximadamente 1,10 m de altura (Tabela 7).

Tabela 7. Média de ATR, em kg ha<sup>-1</sup>, para doses e momentos de aplicação de N.

Dose (kg ha <sup>-1</sup> )	Kg ATR ha <sup>-1</sup>	
	Ano Agrícola 2018/2019	Ano Agrícola 2019/2020
0	10563	10978
54	11896	11389
109	11932	11097
163	12365	11184
218	12767	11144
<b>Momento de Aplicação</b>		
1	11765	11436
2	12308	11159
3	12616	11020

Momento de aplicação 1: dose total logo após a colheita; 2: dose parcelada, metade logo após a colheita e metade quando a cultura estava com 1,10 m de altura; E3: dose total quando a cultura estava com 1,10 m de altura.

### 3.3. Análise de agrupamento

Foi observado, por meio da análise de agrupamento (gráfico Scree-Plot), que os dados de MS e N acumulado na biomassa foram definidos e divididos em três grupos (Figura 14 e 15).

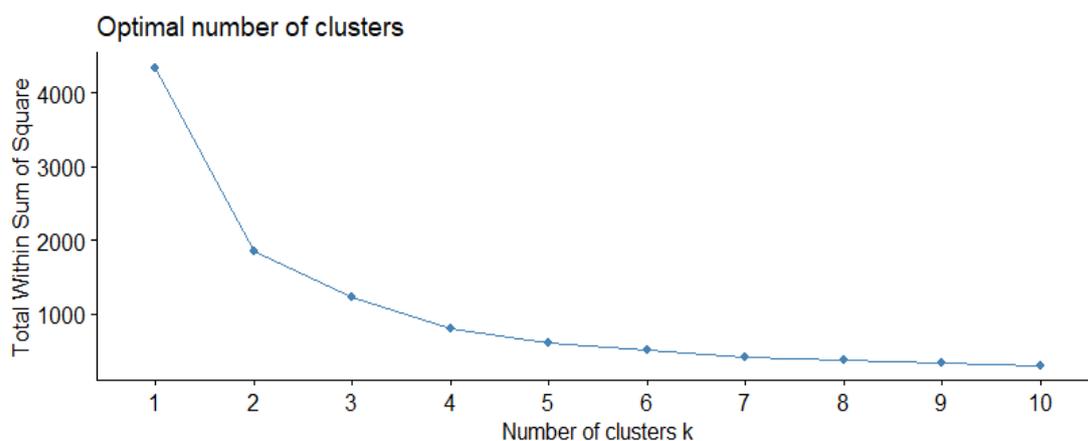


Figura 14. Gráfico Scree-Plot

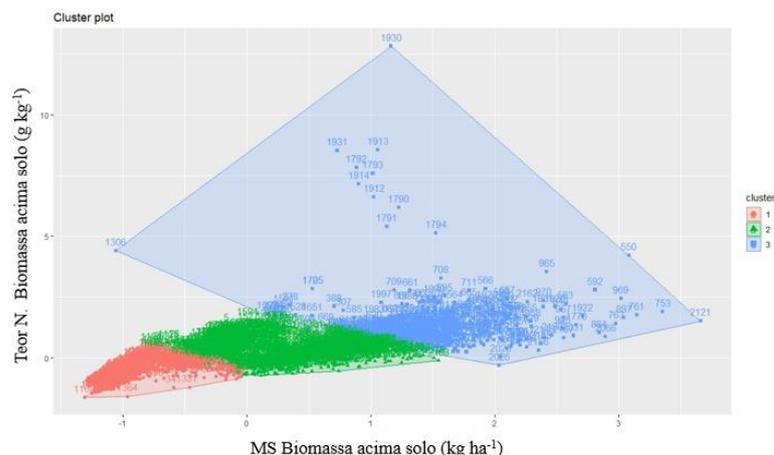


Figura 15. Análise de cluster para MS e N acumulado na biomassa acima do solo.

No entanto, maiores quantidades de MS e N acumulado na biomassa foram observados no grupo três, valores médios no grupo dois e menores quantidades no grupo 1.

Foi observado que doses de N e momentos de aplicação do fertilizante não foram determinantes na separação dos grupos, pois não apresentaram maiores números de observações no grupo três, seguidos do grupo dois e um (Tabela 3 e 4).

Tabela 3. Tabela de frequências de dados para doses e momentos de aplicação de N, em cada grupo, definido pela análise de agrupamento.

Dose (kg ha <sup>-1</sup> )	Cluster Grupos		
	1	2	3
	Número de observações		
0	85	60	22
54	210	201	90
109	201	207	93
163	195	215	91
218	198	190	112
<b>Momento de aplicação</b>			
1	261	288	118
2	264	276	128
3	279	249	140

Momento de aplicação 1: dose total logo após a colheita; 2: dose parcelada, metade logo após a colheita e metade quando a cultura estava com 1,10 m de altura; E3: dose total quando a cultura estava com 1,10 m de altura.

Tabela 4. Tabela de frequências de dados para interação de doses e momentos de aplicação de N, em cada grupo, definido pela análise de agrupamento.

Dose	Momento da aplicação	Cluster Grupos		
		1	2	3
		Número de observações		
0	E0	85	60	22
54	1	68	66	33
54	2	73	66	28
54	3	69	69	29
109	1	67	74	26
109	2	64	70	33
109	3	70	63	34
163	1	62	76	29
163	2	65	76	26
163	3	68	63	36
218	1	64	72	30
218	2	62	64	41
218	3	72	54	41

Momento de aplicação 1: dose total logo após a colheita; 2: dose parcelada, metade logo após a colheita e metade quando a cultura estava com 1,10 m de altura; E3: dose total quando a cultura estava com 1,10 m de altura.

No entanto, observou-se que a quantidade de dias chuvosos, entre os períodos de amostragem, foi determinante na separação dos grupos, para acúmulo de MS e N acumulado na biomassa (Tabela 5).

Tabela 5. Frequências de dados para dias chuvosos por período, em cada grupo, definido pela análise de agrupamento.

	Dias por período	Dias chuvosos por período	Porcentagem de dias chuvosos por período	Cluster Grupos		
				1	2	3
				Número de observações		
Ano agrícola 2018/2019	143	22	15,4	255	5	0
	63	25	39,7	60	197	3
	63	21	33,3	2	71	122
	105	29	27,6	7	153	100
Ano agrícola 2019/2020	135	12	8,9	255	5	0
	20	6	30	256	3	1
	36	17	47,2	48	199	12
	86	37	43	1	124	134
	69	6	8,7	4	116	36

Sendo assim, foram observadas maiores médias de MS do ponteiro, colmo e biomassa e N acumulado na biomassa, quando se obtiveram maiores quantidades de dias chuvosos por período (Tabela 5).

Tabela 5. Mediana da MS e N acumulado do ponteiro, colmo e biomassa ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), dias chuvosos por período e chuva média por período (mm), em cada grupo, definido pela análise de agrupamento.

Grupo	MS Ponteiro	MS Colmo	MS Biomassa
1	3929	6815	5000
2	4911	14030	21411
3	5279	26152	38325
	N Ac. Ponteiro	N Ac. Colmo	N Ac. Biomassa
1	56,5	54,1	102,7
2	56,3	54,1	102,7
3	55,4	54,5	112,1
	Dias chuvosos por período	Chuva média por período	
1	14,0	11,0	
2	23,0	15,0	
3	27,0	15,5	

Observa-se que a mediana para N acumulado no ponteiro e colmo não foram definidos pelos grupos, ou seja, independentemente da ocorrência de chuva o N foi absorvido. No entanto, mesmo que o N tenha sido absorvido a produção de MS do ponteiro e colmo foi menor com a baixa ocorrência de chuva.

As maiores porcentagens de dias chuvosos, por período de amostragem, foram observadas nos períodos de 143 aos 206, 206 aos 269, 155 aos 191 e 191 aos 277 DAC (Figura 16).

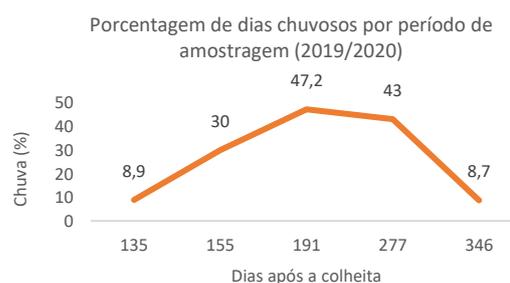
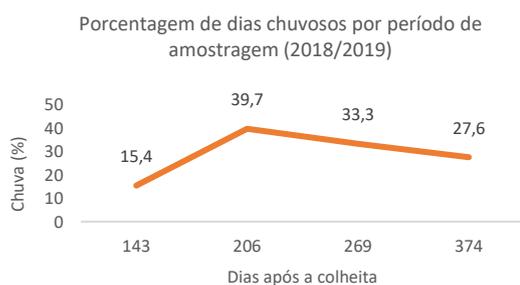


Figura 16. Porcentagem de dias chuvosos em cada período de amostragem para os anos agrícolas 2018/2019 e 2019/2020.

É possível observar, por meio do esquema apresentado pela figura 17, a distribuição de chuva durante os anos agrícolas 1 e 2, bem como as aplicações de fertilizantes nitrogenados e amostragens de biomassa.

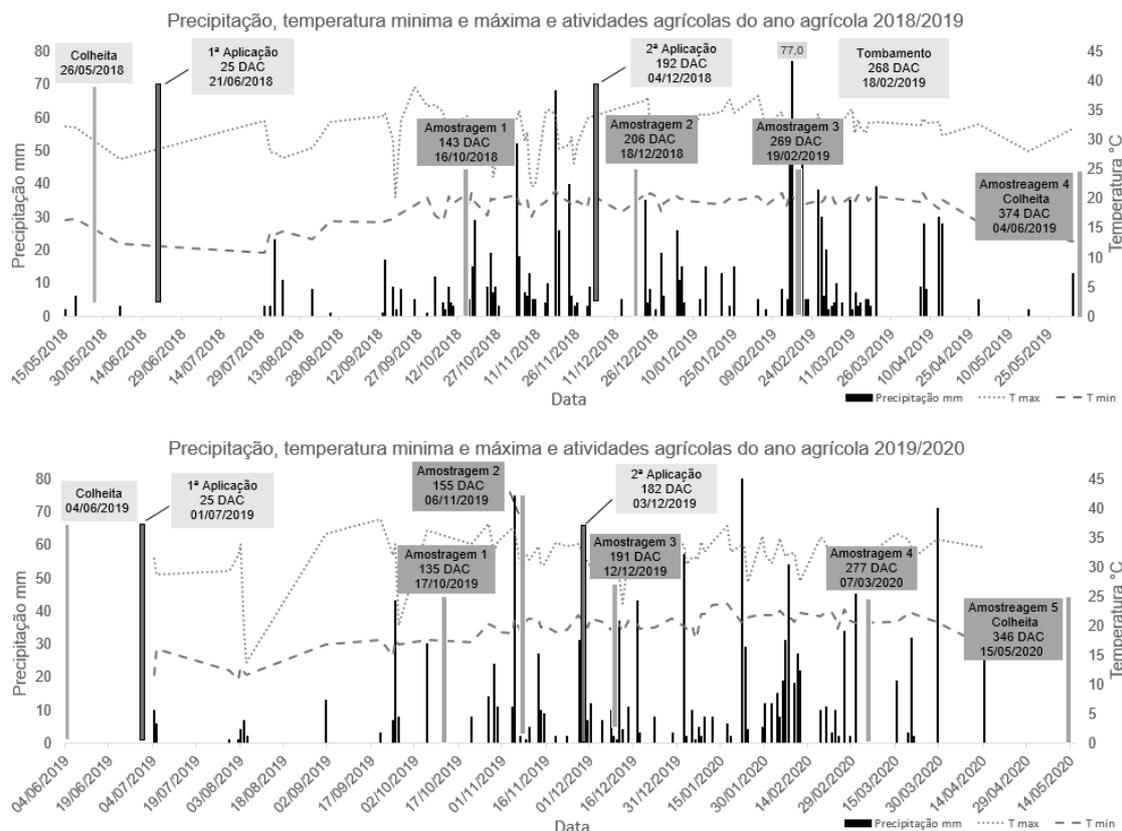


Figura 17. Precipitação, temperatura mínima e máxima e atividades agrícolas dos anos agrícolas 2018/2019 e 2019/2020.

No primeiro ano agrícola, após a primeira aplicação, houve um período sem chuva de 40 dias, com chuva no 40º dia (30/07/2018) de 3 mm e no 43º (03/08/2018) de 23 mm. No segundo ano agrícola, após a primeira aplicação, houve um período sem chuva de 13 dias, com chuva de 16 mm no 13º dia, seguido de 29 dias sem chuva.

Em contrapartida, após a segunda aplicação do fertilizante, observou-se períodos com maiores ocorrências de chuva.

#### **4. DISCUSSÃO**

A aplicação de ureia acima da palha, como realizado no experimento, favorece a hidrólise da partícula da ureia devido a umidade contida na palha. Porém, essa umidade não é suficiente para incorporar a ureia ao solo, favorecendo a volatilização do  $\text{NH}_3$  (Borges et al., 2019, Castro et al., 2017e Pan et al., 2016).

Contudo, apesar de não ter sido avaliado a perda de N no presente trabalho, houveram, provavelmente, perdas consideráveis do N-ureia aplicado, principalmente quando o fertilizante foi aplicado logo após a colheita. Este resultado foi em decorrência da quantidade de dias sem chuva, após a primeira aplicação, nos dois anos agrícolas.

Ao observar, no início do ciclo da cultura, maiores quantidades de N acumulado no ponteiro, quando aplicado todo o fertilizante logo após a colheita e quantidades semelhantes de MS do ponteiro da cana-de-açúcar, para as doses de N e momentos de aplicação avaliados, torna-se possível perceber que alguma parte do N-ureia aplicado, após a colheita, foi absorvido pelas raízes da planta, mas o longo déficit hídrico, no início do ciclo da cultura, favoreceu baixa produção de MS do ponteiro neste período.

Além disso, a cana-de-açúcar apresenta uma decomposição média, da palha depositada no momento da colheita, de 58% (Ferreira, 2017), suficiente para fornecer condições à planta para seu desenvolvimento inicial (Franco et al., 2011; Vieira-Megda et al., 2015). Entretanto, foi observado, no presente trabalho,

quando não houve aplicação de N, quantidades semelhantes de MS do ponteiro, comparado aos demais tratamentos, durante o período inicial da cultura.

Após o começo do desenvolvimento do colmo, na cultura da cana-de-açúcar, há maior demanda de N pela cultura. Portanto, foi observado que a quantidade de MS do colmo foi significativamente menor quando não houve aplicação de N, comparado aos demais tratamentos. Sendo assim, é necessário realizar a adubação nitrogenada antes do início de desenvolvimento do colmo na cultura da cana (Wiedengeld, 1997).

Entretanto, observaram-se maiores quantidades de MS e N acumulado do colmo quando houve maior distribuição de chuva. Diferentemente do ocorrido no acúmulo de N no ponteiro, não foi observado diferença, entre os momentos de aplicação, no acúmulo de N no colmo antes da segunda aplicação do fertilizante. Logo, observou-se que a aplicação do fertilizante, no momento em que a cultura estava com 1,10 m de altura, foi favorável para acúmulo de MS e N acumulado, devido ao maior aproveitamento do N aplicado em decorrência da maior quantidade de chuva.

Segundo Inman-Bamber e Smith (2005) a produção de colmo é extremamente dependente da presença de água no período de desenvolvimento do colmo na cultura da cana-de-açúcar. Concluíram, que o controle de abertura estomática pelas raízes, em períodos de déficit hídrico, favorecem atividade fotossintética reduzida, afetando a produção de colmo e acúmulo de sacarose na cana-de-açúcar. Resultados semelhantes foram encontrados por Bell e Garside (2005).

Devido ao déficit hídrico, no final do ciclo da cultura, foi observado redução na produção de MS da biomassa no momento da colheita (374 e 346 DAC),

comparado às amostragens anteriores (269 e 277 DAC). No entanto, por mais que foi observado efeito das doses de N e momentos de aplicação do fertilizante, aos 269 e 277 DAC, no acúmulo de MS da biomassa, o longo período de déficit hídrico, até o momento da colheita da cultura, foi o suficiente para ocasionar uma diminuição na MS da biomassa. Logo, não foi observado diferença estatística para produtividade da cana-de-açúcar entre os tratamentos avaliados.

A quantidade de ATR foi superior quando aplicado todo o fertilizante no momento em que a cultura estava com 1,10 m de altura devido ao fato do maior aproveitamento do N aplicado, sendo o N nutriente de suma importância para rendimento de açúcar. Além disso, observa-se, em situações de maior disponibilidade hídrica, maior acúmulo de ATR na cultura da cana-de-açúcar (Oliveira et. al., 2012).

## **5. CONCLUSÃO**

A produção de MS e N acumulado na biomassa da cana-de-açúcar foi maior quando realizou-se aplicação do fertilizante nitrogenado parceladamente e quando a cultura estava com aproximadamente 1,10 m de altura.

Déficit hídrico durante o ano agrícola de cana-de-açúcar afetou a produção de matéria seca e produtividade da cultura.

As doses de N não impactaram significativamente na produção de MS e produtividade da cana de açúcar.

Maiores quantidades de ATR foram obtidos quando realizou-se aplicação do fertilizante nitrogenado parceladamente e quando a cultura estava com aproximadamente 1,10 m de altura.

## **Financiamento**

Fundação de Amparo à Pesquisa do estado de São Paulo (FAPESP) – São Paulo, Brasil.

## 6. REFERÊNCIAS

- Basanta, M.V., Dourado Neto, D., Reichardt, K., Bacchi, O.O.S., Oilveira, J.C.M., Trivelin, P.C.O., Timm, L.C., Tominaga, T.T., Correchel, V., Cássaro, F.A.M., Pires, L.F., Macedo, J.R. (2003) Management effects on nitrogen recovery um a sugarcane crop grown in Brazil. *Geoderma* 116:235–248. doi:10.1016/S0016-7061(03)00103-4
- Bell, M.J., Garside A.L. Shoot and stalk dynamics and the yield of sugarcane crops in tropical and subtropical Queensland, Australia, *Field Crops Res.* 92 (2005), pp. 231 – 248.
- Bordonal, R.O., Figueiredo E.B., La Scala N. Greenhouse gas mitigation potential from green harvested sugarcane scenarios in São Paulo State, Brazil, *Biomass Bioenergy* 58 (2013) 195-207, <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.08.040>.
- Borges, C.D., Carvalho J.L.N., Kolln O.T., Sanches G.M., Silva M.J., Castro S.G.Q., Castro S.A.Q., Sousa L.L., Oliveira J.V.C., Catarella 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?, Brazil, *Biomass and Bioenergy* 120 (2019) 21-27.
- Castro, S.G.Q., S.T. Decaro, Franco H.C.J., Graziano Magalhães P.S., Garside A., Mutton M.A. Best practices of nitrogen fertilization management for sugarcane under green Cane trash blanket in Brazil, *Sugar Tech* 19 (2017) 51–56, <https://doi.org/10.1007/s12355-016-0443-0>.
- Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB. 2019). Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar, terceiro levantamento, p. 1-58 dezembro de 2019. CONAB, Brasília.
- CONSECANA. Regulamento dos negócios de compra e venda de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo: Manual de Instruções. Piracicaba: 2006. 16p.
- FAO, 2014. FAO statistical yearbook 2014 ([www.fao.org](http://www.fao.org)).
- FAO, 2018. FAO statistical yearbook 2018 ([www.fao.org](http://www.fao.org)).
- Faroni, C.E. (2008) Eficiência agronômica das adubações nitrogenadas de plantio e após o primeiro corte avaliada na primeira soqueira de cana-de-açúcar. Thesis, University of São Paulo
- Ferreira, T.E. Decomposição da palha de cana-de-açúcar em área de recolhimento variável sob adubação nitrogenada mineral ou inoculação com bactérias diazotróficas. Dissertação de mestrado, UNESP - Botucatu, Brasil, 2017.
- Franco, H.C.J., Otto R, Faroni CE, Vitti AC, Oliveira ECA, Trivelin PCO (2011) Nitrogen in sugarcane derived from fertilizer under Brazilian field conditions. *Field Crop Res* 121:29–41. doi:10.1016/j.fcr.2010.11.011
- Gava, G.J.C., Trivelin PCO, Oliveira MW, Penatti CP (2001) Crescimento e acúmulo de nitrogênio em cana-de-açúcar cultivada em solo coberto com

palhada. *Pesq Agrop Brasileira* 36:347–1354. doi:10.1590/S0100-204X2001001100004

Gava, G.J.C., Trivelin PCO, Vitti AC, Oliveira MW (2003) Recuperação do nitrogênio (15 N) da ureia e da palhada por soqueira de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*). *R Bras Ci Solo* 27:621–630. doi:10.1590/S0100-06832003000400006

Humbert, R.P. 1968. *The Growing of Sugarcane*. Elsevier publishing company, New York, USA.

IPCC, 2014. In: Core Writing Team, R.K., Meyer, L.A. (Eds.) *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 151.

Jagtap, S.M., M.B. Jadhavi and R.V. Kulkarm. 2006. Effect of levels of NPK on yield and quality of sugarcane (cv. Co. 7527). *Ind. Sugar*. 56: 35-40.

Lakshmi, M.B., T.C. Devi, I.V.N. Rao and K.L. Rao. 2003. Effect of time of N application on yield and quality of early maturing sugarcane varieties under rainfed conditions. *Sugar Technol*. 5: 73-76.

Lal, B. 1991. Effect of N levels on tillering of spring planted sugarcane under different moisture regimes. *In Proceeding 53rd Annual Convention Sugar Technology Association India*.

Meurer, K.H.E., Franko U., Stange C.F., Rosa J.D., Madari B.E., Jungkunst H.F., Direct nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) fluxes from soils under different land use in Brazil—a critical review, *Environ. Res. Lett.* 11 (2016) 023001, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/2/023001>.

Mira, A.B., Cantarella, H., Souza-Netto, G.J.M., Moreira, L.A., Kamogava, M.Y., Otto, R., 2017. Optimizing urease inhibitor usage to reduce ammonia emission following urea application over crop residues. *Agr. Ecosyst. Environ.* 248, 105-112. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.07.032>.

Oliveira, F.M., Aspiazú, I., Kondo, M. K., Borges, I. D., Pegoraro, R. F. Technology assessment of sugarcane varieties influenced by different fertilization and water stress. *Rev. Ceres* 59 (2012), <https://doi.org/10.1590/S0034-737X2012000600014>.

Pan, B., Lam, S.K., Mosier, A., Luo, Y., Chen, D., 2016. Ammonia volatilization from synthetic fertilizers and its mitigation strategies: a global synthesis. *Agr. Ecosyst. Environ.* 232,283-289. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.08.019>.

Robinson N, Brackin R, Soper KVF, Gamage JHH, Paungfoo-Lonhienne C, Rennenberg H, Lakshmanan P, Schmidt S (2011) Nitrate paradigm does not hold up for sugarcane. *PLoS One* 6:e19045. doi:10.1371/journal.pone.0019045

Saleem M.F., Ghaffar A., Anjum S.A., Cheema M.A., Bilal M.F., Effect of Nitrogen on Growth and Yield of Sugarcane, Pakistan, *American Society of Sugar Cane Technologists*, Vol. 32 (2012).

Srivastava, S.C., and N.R. Suarez. 1992. Sugarcane. In: World fertilizer use manual, W. Wichmann, ed. BASF AG, Germany, pp 257-266.

Trivelin P.C.O, Victoria RL, Rodrigues JCS (1995) Aproveitamento por soqueira de cana-de-açúcar de final de safra do nitrogênio da aquamônia-15 N e ureia-15 N aplicado ao solo em complemento à vinhaça. *Pesq Agrop. Brasileira* 30:1375–1385

Vieira-Megda MX, Mariano E, Leite JM, Franco HCJ, Vitti AC, Megda MM, Khan SA, Mulvaney RL, Trivelin PCO (2015) Contribution of fertilizer nitrogen to the total nitrogen extracted by sugarcane under Brazilian field conditions. *Nutr Cycl Agroecosyst* 101:241–257. doi:10.1007/s10705-015-9676-7

Wiedenfled, B., and J. Enciso. 2008. Sugarcane responses to irrigation and N in semiarid South Texas. *Agron. J.* 100: 665-671.

Wiedenfled, R. 1997. Sugarcane responses to N fertilizer application on clay soils. *J. Amer. Soc. Sugar Cane Technol.* 17: 14-27.

Yeoh Y.K., Paungfoo-Lonhienne C., Dennis P.G., Robinson N., Ragan M.A., Schmidt S., Hugenholtz P., The core root microbiome of sugarcane cultivated under varying nitrogen fertilizer application, *Environ. Microbiol.* 18 (2016) 1338–1351, <https://doi.org/10.1111/1462-2920.12925>.

### **CAPÍTULO 3. Determinação de zonas homogêneas de manejo por meio de imagens de sensores multiespectrais acoplados em VANT no cultivo de cana-de-açúcar utilizando NDVI e NDRE**

#### **RESUMO**

A definição de Zonas Homogêneas de Manejo (ZHM) torna-se mais fácil e viável a aplicação de agricultura de precisão, de modo a conhecer a variabilidade espacial da área e poder manejá-la separadamente. O objetivo do presente trabalho foi identificar a capacidade de imagens de sensores acoplados em VANT na determinação de Zonas Homogêneas de Manejo, na cultura da cana-de-açúcar, utilizando os índices de vegetação NDVI e NDRE. O experimento foi conduzido em uma área comercial de cana-de-açúcar localizada no Estado de São Paulo, Brasil (21 ° 22'38.48 "S, 47 ° 57'28.01" O). Os anos de cultivo que foram avaliados o experimento foram Maio/2018 à Junho/2019 e Junho/2019 à Maio/2020. O solo na área é classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo. A cultivar de cana-de-açúcar utilizada foi RB85-5156 com perfilhamento alto e alta produtividade. Foram determinadas ZHM, por meio de imagens de sensores multiespectrais acoplados em VANT, utilizando os índices de vegetação NDVI e NDRE. Foi determinado, em cada ZHM, a matéria seca (MS) e N acumulado no ponteiro, colmo e biomassa total da cana-de-açúcar no momento da colheita do canavial, em ambos os anos. Foi avaliado, também, a produtividade da cultura em cada ZHM. As imagens espectrais NDVI e NDRE foram eficientes na determinação das ZHM. Foram determinadas 4 ZHM, duas de alto rendimento de produção da cana-de-açúcar, uma de médio e uma de baixo rendimento. No segundo ano agrícola, aos 200 e 255 DAC, as definições mais precisas das ZHM foram quando utilizado o mapa com índice de vegetação NDRE. Observou-se valores altos, acima de 0,70, para NDVI, em todas as imagens após os 177 DAC. Maiores quantidades de MS do ponteiro, colmo e biomassa e produtividade da cana-de-açúcar, foram observadas nas ZHM definidas de alto rendimento. Conclui-se que foi possível determinar Zonas Homogêneas de Manejo por meio de imagens NDVI e NDRE, obtido por sensores multiespectrais acoplados em VANT.

**Palavras-chave:** Sensoriamento remoto; Variabilidade espacial; Índices de vegetação; Drone; Variabilidade temporal;

## 1. Introdução

A implementação de práticas que aumentam a eficiência do uso da terra pode ser feita por meio de técnicas de segmentação de áreas heterogêneas em áreas homogêneas conhecidas como zonas homogêneas de manejo (ZHM) (PLANT, 2001, FRIDGEN et al., 2004; MZUKU et al., 2005; ADHIKARI K., 2009; YAO et al., 2014). As ZHM são áreas de um determinado terreno com mesmo potencial produtivo, demanda de nutrientes e fatores limitantes na produção (LUCHIARI JUNIOR et al., 2000). Além disso, após a determinação das ZHM, é possível direcionar de forma mais eficiente as amostragens de solo a fim de gerar diagnósticos da área e tomadas de decisões, quanto ao manejo da lavoura, de forma eficiente.

A definição de ZHM torna-se mais fácil e viável a aplicação de agricultura de precisão, de modo a conhecer a variabilidade espacial da área e poder manejá-la separadamente. Variabilidade espacial significa avaliação e a quantificação da variabilidade das características e atributos do solo, planta e ambiente. A aplicação de técnicas em agricultura de precisão deve iniciar com a identificação da variabilidade espacial da lavoura (MOLIN; AMARAL; COLAÇO, 2015).

Sendo assim, uma das alternativas utilizadas em lavouras, na determinação da variabilidade espacial, é a técnica da geoestatística, que consiste na extração e organização de dados disponíveis de acordo com a semelhança entre pontos próximos georreferenciados. Entretanto, por meio de um método, denominado interpolação, determina-se valores desconhecidos

(valores entre pontos amostrais) de um determinado atributo de interesse (MIRANDA, 2010).

Outra técnica utilizada para identificação da variabilidade espacial são técnicas de sensoriamento remoto. O Sensoriamento Remoto define-se como a ciência que visa o desenvolvimento da obtenção de imagens da superfície terrestre por meio da detecção e medição quantitativa das respostas das interações da radiação eletromagnética com os materiais terrestres (como seus índices de resposta espectral entre folhas, solo, rocha etc.) (LILLESAND & KIEFFER, 1994). No sensoriamento remoto utilizam-se quaisquer sensores para extrair informações dos alvos de interesse, pelas quais são obtidas em longas ou curtas distâncias, por meio da captura dos comprimentos de ondas eletromagnéticas, também denominadas como radiação eletromagnética, emitidas ou refletidas pelos objetos. Cada sensor é responsável pela captação da intensidade da radiação do objeto, resposta espectral, compondo imagens e dados a respeito do alvo (HONDA e JORGE, 2013).

Técnicas de sensoriamento remoto tem sido utilizada cada vez mais no monitoramento de lavouras. Sensores acoplados em satélites, veículos aéreos não tripulados (VANT), sensores terrestres, são utilizados como ferramentas para captação da refletância das plantas, com o objetivo de determinar a variabilidade espacial nas lavouras, por apresentarem potencial para monitoramento da produção de biomassa da cultura, ao longo de todo o ciclo de desenvolvimento (MOTOMIYA et al., 2012).

Utilizam-se índices de vegetação, desenvolvidos para determinar a parâmetros estruturais, fenológicos e biofísicos da vegetação (WANG et al., 2003), como, por exemplo, sanidade da cultura, produção de biomassa,

população de plantas, entre outros, a fim de identificar a variabilidade espacial e temporal em lavouras. Os índices de vegetação são combinações de dados espectrais, entre duas ou mais bandas, gerando resultado de uma equação matemática, um valor adimensional, denominado índice de vegetação. Um dos índices de vegetação mais utilizados atualmente é o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), proposto por Kriegler et al. (1969). Este índice foi desenvolvido para identificar a sanidade da cultura, sendo a razão entre a banda do vermelho e infravermelho próximo. No entanto, devido ao fato do NDVI apresentar facilidade de saturação, quando há alta quantidade de biomassa, outro índice de vegetação foi desenvolvido, denominado Diferença Normalizada de Borda Vermelha (NDRE), também responsável pela identificação da sanidade da cultura. Porém, o NDRE é a razão entre a banda do infravermelho próximo e a banda RedEdge. O comprimento de onda, referente ao RedEdge, com aproximadamente 730 nm, está diretamente relacionado com o teor de nitrogênio (N) na cultura.

Baseado nisto, o objetivo do presente trabalho foi identificar a capacidade de imagens de sensores acoplados em VANT na determinação de Zonas Homogêneas de Manejo, na cultura da cana-de-açúcar, utilizando os índices de vegetação NDVI e NDRE.

As hipóteses do trabalho foram: 1) Imagens de sensores multiespectrais, acoplados em VANT, são eficientes na determinação de ZHM; 2) É possível identificar variabilidade espacial e temporal utilizando os índices de vegetação NDVI e NDRE; 3) O índice de vegetação NDVI irá saturar quando a cultura da cana-de-açúcar estiver em alta produção de biomassa (parte aérea);

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1. Descrição do local**

O experimento foi conduzido em uma área comercial de cana-de-açúcar localizada no Estado de São Paulo, Brasil (21 ° 22'38.48 "S, 47 ° 57'28.01" O), em área de cultivo de primeiro e segundo corte (2ª e 3ª soca) e possui um histórico de 30 anos de cultivo de cana-de-açúcar, com colheita sem queima a partir de 2010. Os anos de cultivo que foram avaliados o experimento foram Maio/2018 à Junho/2019 e Junho/2019 à Maio/2020. O solo na área é classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo. A cultivar de cana-de-açúcar utilizada foi RB85-5156 com perfilhamento alto e alta produtividade, classificada entre as dez variedades mais cultivadas da região centro-sul do Brasil. Todos os manejos, como método de aplicação e dose de fertilizantes, aplicações de produtos fitossanitários, colheita, foram realizados de forma homogênea em toda a área.

### **2.2. Determinação de zonas homogêneas de manejo**

O método utilizado para determinar as ZHM, por meio de imagens de sensores multiespectrais acoplados em VANT, inclui as seguintes etapas: captação das imagens, por meio destes sensores; extração da refletância geoespacial das plantas na área experimental; cálculo dos índices de vegetação Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) e Diferença Normalizada de Borda Vermelha (NDRE), por meio dos dados de refletância da cana-de-açúcar, na área experimental; determinar-se as zonas homogêneas de manejo.

As captações das imagens foram realizadas utilizando um sensor multiespectral, acoplado a um VANT multi-rotor, com resolução espacial de 15 cm. Os voos foram realizados à aproximadamente 300 m de altura. Todas as capturas digitais foram revisadas, costuradas (produção do orthomosaico) e processadas utilizando Pix4DMapper (Pix4d, Lausanne, Suíça) e software ArcGIS (ESRI, Redlands, CA, EUA). Por fim, os índices de vegetação foram calculados a partir dos mapas raster de refletância geoespacial adquiridos, como apresentado pelas equações abaixo:

$$NDVI = (NIR_{780} - RED_{660}) / (NIR_{780} + RED_{660})$$

$$NDRE = (NIR_{780} - REDEEDGE_{730}) / (NIR_{780} + REDEEDGE_{730})$$

onde  $RED_{660}$ ,  $NIR_{780}$  e  $REDEEDGE_{730}$  são a refletância espectral na banda do vermelho (660 nm), infravermelho (780 nm) e RedEdge (730 nm), respectivamente.

Os voos, para capturar as imagens por sensores multiespectrais acoplados ao VANT, foram realizados periodicamente durante os dois anos agrícolas. No entanto, por problemas técnicos com o VANT, realizou-se apenas três voos no primeiro ano agrícola, aos 177, 264 e 354 DAC. No segundo ano agrícola, realizou-se sete voos, aos 132, 149, 200, 255, 297, 318 e 337 DAC.

Por fim, após calculado os índices de vegetação, é realizado a extração de todos os valores de pixels da imagem, por meio do software Python, a fim de obter as diferenças existentes, entre os valores dos índices de vegetação, com o objetivo de determinar as zonas homogêneas de manejo.

### 2.3. Produção de Biomassa

A biomassa foi determinada em dez pontos de amostragem em cada ZHM. Cada ponto de amostragem consistiu em 1 linha de cana de 1,5 m de comprimento. Os tecidos das plantas foram coletados da parte acima do solo (colmo, palha e ponteiro). No campo, foi separado as três partes, pesou-se separadamente, para determinação da matéria fresca e retirou-se uma amostra de cada tecido para determinação da matéria seca (MS). As amostras frescas de colmo, palha e ponteiro foram pesadas, lavadas em água corrente e água deionizada e, em seguida, secas em um forno com circulação de ar a 65 °C por 72 h, para determinação da matéria seca e, por fim, trituradas em um moinho para determinar as concentrações de N total por combustão a seco.

Após determinado o teor de N total e MS de cada tecido da planta foi determinado o N acumulado em cada tecido, obtido pelo produto da multiplicação de MS e teor de N, em kg ha<sup>-1</sup>. Por fim determinou-se a MS da biomassa (soma da MS do ponteiro, colmo e palha) e N acumulado da biomassa (soma do N acumulado do ponteiro, colmo e palha). O rendimento de cana-de-açúcar (t ha<sup>-1</sup>) foi estimado com base na matéria fresca dos colmos em 1,5 m de linha na colheita a cada 10 pontos de amostragem, antes da colheita mecanizada da cana-de-açúcar. As amostragens foram realizadas no período da colheita da cultura da cana-de-açúcar, em cada ano agrícola.

### 2.4. Análise de solo

As amostras de solo foram coletadas antes da condução do experimento. Foram coletadas dez sub amostras de solo em cada ZHM, nas camadas de profundidades de 0 - 0,20 e 0,20 - 0,40 m. As amostras foram misturadas para

formar uma amostra composta representativa de cada ZHM na respectiva profundidade. As amostras foram utilizadas para a determinação das frações granulométricas areia total, silte e argila ( $\text{g kg}^{-1}$ ), pelo método da pipeta (Gee & Bauder, 1986).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foi determinado, por meio das imagens, quatro zonas homogêneas de manejo (Figura 1). No entanto, determinou-se duas ZHM de alto rendimento de produção da cana-de-açúcar, uma de médio e uma de baixo rendimento. Observou-se que as ZHM foram iguais nos dois anos agrícolas. Portanto, a variabilidade espacial foi identificada nos mesmos locais em ambos os anos avaliados.

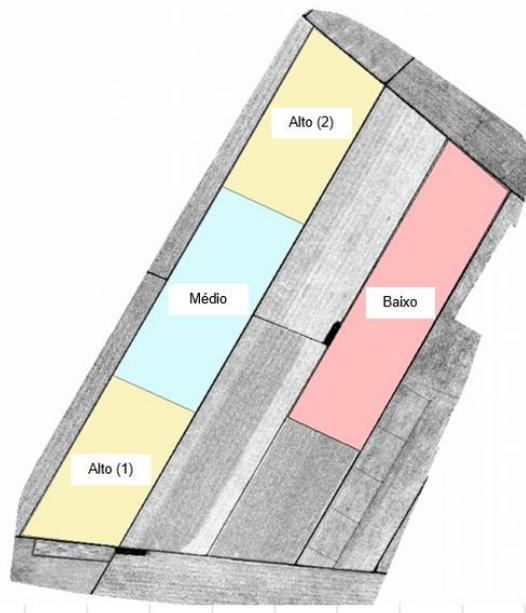
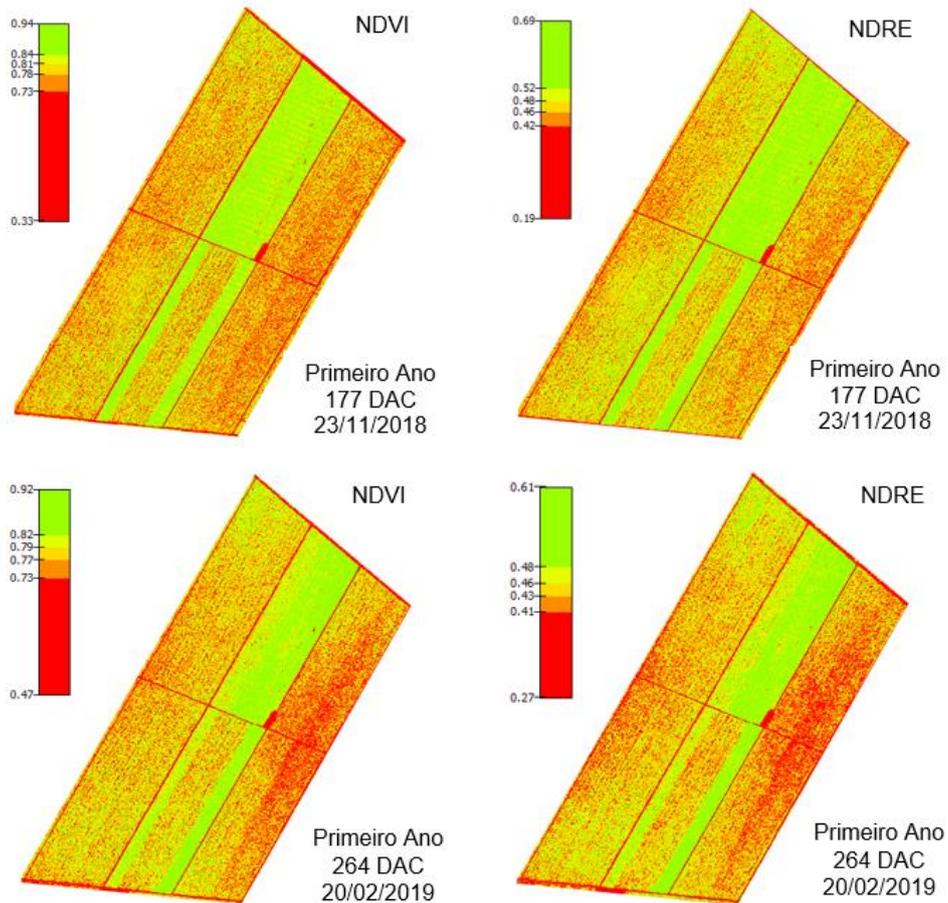


Figura 1. Zonas homogêneas de Manejo determinadas por meio de imagens de sensor multiespectral acoplado em VANT.

Serão apresentadas as imagens obtidas, referente aos 177, 264, 200 e 297 DAC, de forma a apresentar os locais definidos como homogêneos (Figura 2). As outras imagens obtidas, nos dois anos agrícolas, estão representadas pelas imagens abaixo.



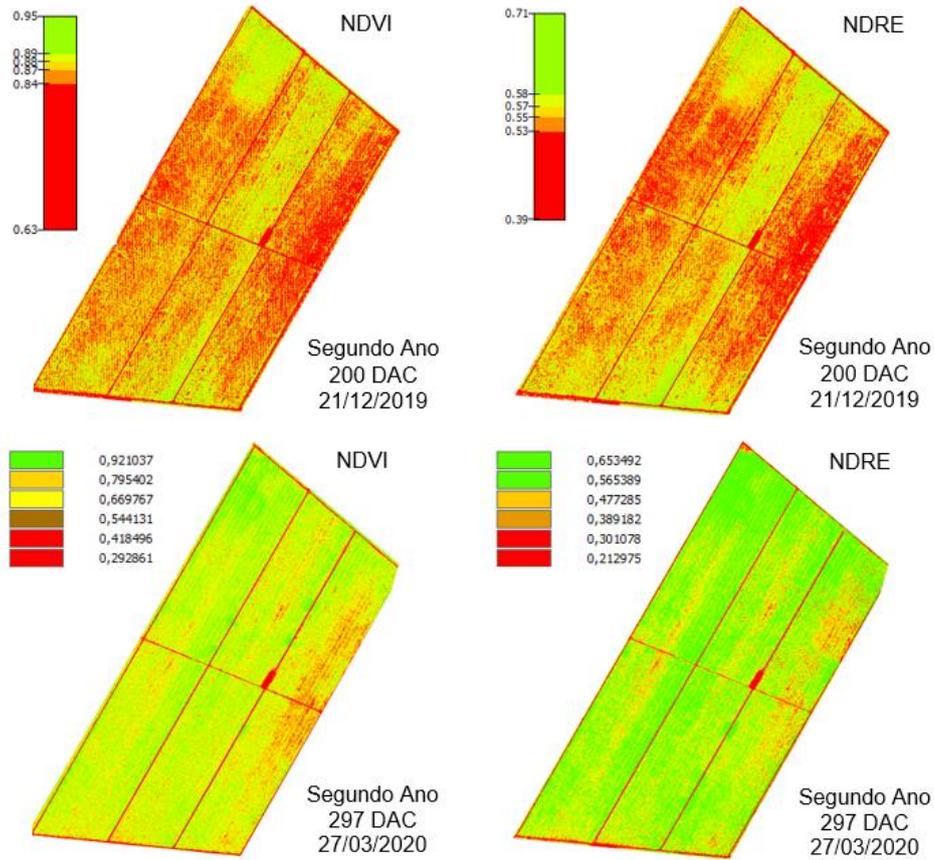


Figura 2. Mapas NDVI e NDRE em diferentes momentos do ciclo da cana-de-açúcar em dois anos agrícola.

Ambos os índices de vegetação, NDVI e NDRE, foram eficientes para determinação das ZHM. Porém, foi possível observar, no segundo ano agrícola, aos 200 e 255 DAC, definições mais precisas das ZHM quando utilizado o mapa com índice de vegetação NDRE (Figura 3 e 4). Resultados semelhantes foram observados por Amaral et. al. (2014), que concluem que o NDRE apresenta maior sensibilidade na previsão da variabilidade da biomassa da cana-de-açúcar do que o NDVI, principalmente quando há alta quantidade de biomassa.

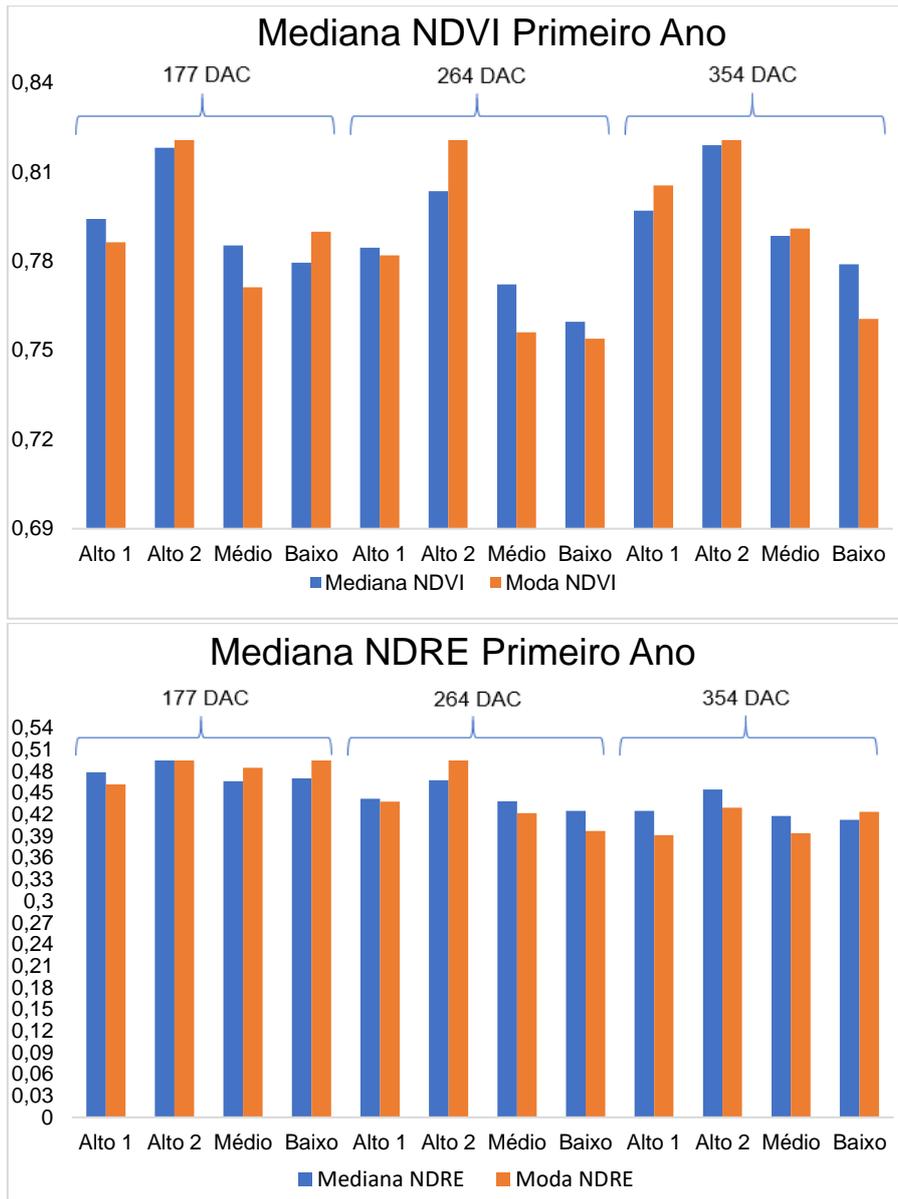


Figura 3. Mediana dos valores de NDVI e NDRE em cada zona homogênea de manejo, por imagem, em DAC, no primeiro ano agrícola.

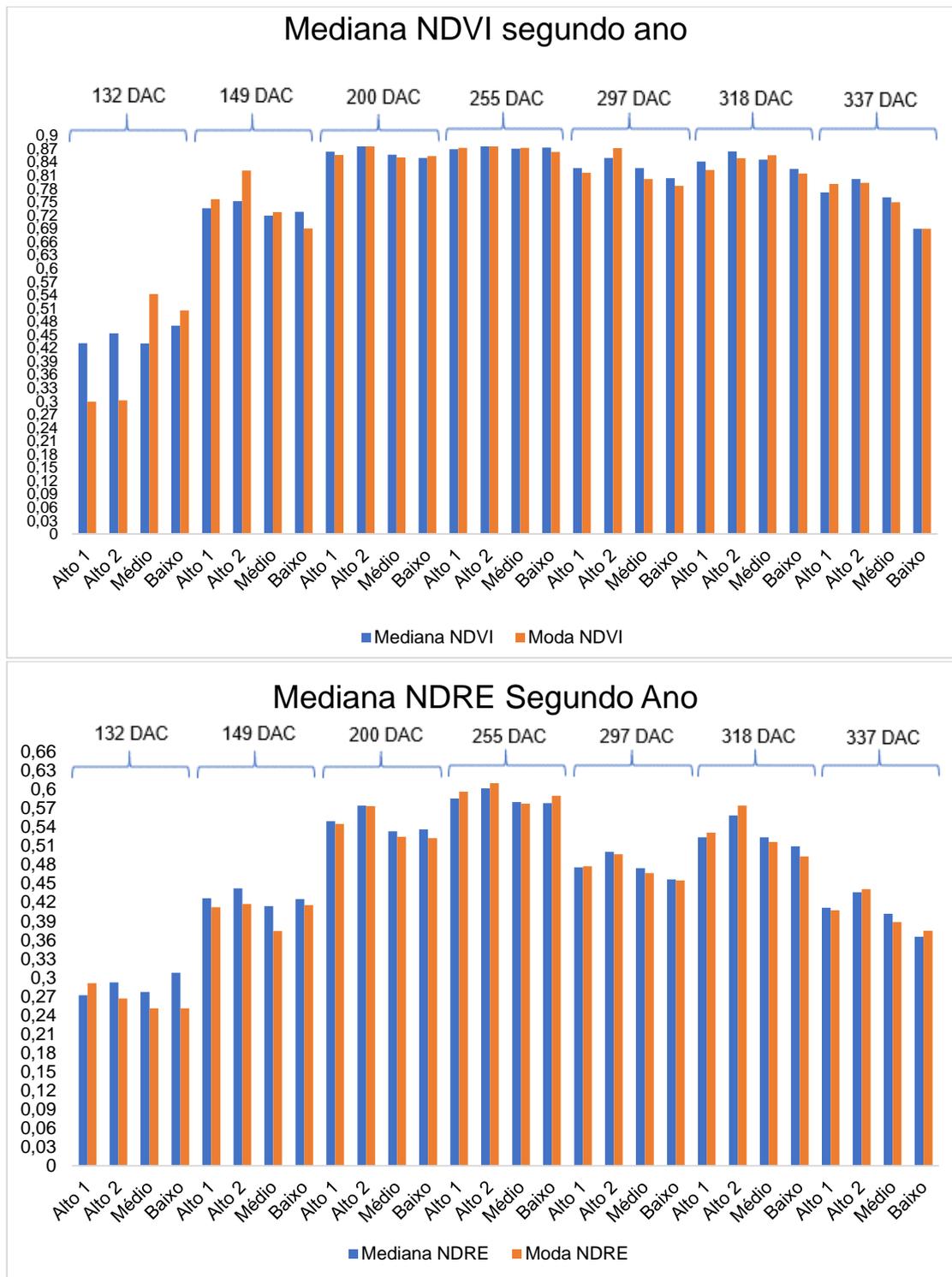


Figura 4. Mediana dos valores de NDVI e NDRE em cada zona homogênea de manejo, por imagem, em DAC, no segundo ano agrícola.

Pode-se observar valores altos, acima de 0,70, para NDVI, em todas as imagens após os 177 DAC. Logo, é necessário se atentar à possibilidade do

NDVI em saturar em condições de média à alta quantidade de biomassa (GITELSON et al., 2002; WANG et. al. 2005; SHAVER et al., 2011). A saturação do NDVI consiste no valor do índice estabilizar em um patamar, apresentando um mesmo valor, mesmo que haja aumento na quantidade de biomassa. O NDVI se satura devido a alta reflectância do infravermelho próximo, por parte do dossel da cultura, de modo à reflectância do infravermelho ser muito maior que da banda do vermelho, fazendo com que o NDVI se sature (GITELSON, 2004).

No entanto, a cultura da cana-de-açúcar, baseado na produção de biomassa observada na área experimental, produz maior quantidade de parte aérea (ponteiro), parte da planta responsável pela reflectância captada pelos sensores, no período entre novembro e março, aproximadamente de 160 a 280 DAC. Por isso, observou-se valores altos para NDVI neste período, além de mínima diferença entre as ZHM.

Contudo, foi possível confirmar as diferenças entre as ZHM, pré-definidas com o uso das imagens, por meio das análises da produção de biomassa, N acumulado e produtividade da cana-de-açúcar. Foram observadas maiores quantidades de MS do ponteiro, colmo e biomassa e na produtividade da cana-de-açúcar, nas ZHM definidas de alto rendimento (Tabela 1).

Tabela 1. Médias de Matéria seca (MS) e N acumulado (N Ac.) no ponteiro, colmo e na biomassa da cana-de-açúcar, em dois anos agrícolas, em diferentes zonas homogêneas de manejo determinadas por imagens de sensores acoplados em VANT.

ZH	MS	MS	MS	N Ac.	N Ac.	N Ac.	Produtivida de
	Ponteiro	Colmo	Biomassa	Ponteiro	Colmo	Biomassa	
kg ha <sup>-1</sup>							
Primeiro Ano agrícola (2018/2019)							
Alto (1)	3376	38637	48896	34,9	122,2	179,2	113,9
Alt0 (2)	2895	37567	47441	28,8	111,1	161,5	114,2
Médio	2763	33033	42407	26,6	114,5	161,6	107,5
Baixo	2591	27712	36184	23,9	91,3	134,1	90,4

Segundo Ano agrícola (2019/2020)							
Alto (1)	4041	39343	49923	47,9	69,9	131,7	123
Alto (2)	3579	43482	54722	40	90,9	148	136
Médio	2143	30942	39212	25,1	60,9	98,7	97
Baixo	2110	19538	26045	27	39	77,7	62

Maiores produtividades e produção de MS foram observadas quando houve maior quantidade de N acumulado, em todas as partes da planta. Porém, houve valores semelhantes de N acumulado, em diferentes ZHM, com menores quantidades de MS e produtividade. Por exemplo, a quantidade de N acumulado no colmo na ZHM de médio rendimento foi maior que na de Alto (2) rendimento.

O menor aproveitamento do N acumulado, pela cultura da cana-de-açúcar, de uma ZHM para outra, foi em decorrência, provavelmente, de fatores relacionados à parte física do solo, como textura, que pode, dependendo do teor de argila, fornecer maior capacidade de retenção de água. Contudo, houve diferença no teor de argila, silte e areia nas quatro ZHM definidas (Tabela 2).

Tabela 2. Quantidade de argila, silte e areia, em  $g\ kg^{-1}$ , em cada zona homogênea de manejo, para as camadas de profundidade 0,00 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m.

ZH	Argila	Silte		Areia
		0,00 - 0,20 m		
Alta (1)	181	33		786
Alta (2)	121	89		790
Médio	129	45		826
Baixo	125	21		854
0,20 - 0,40 m				
Alta (1)	156	46		798
Alta (2)	189	31		780
Médio	128	38		834
Baixo	126	44		830

Observaram-se maiores teores de argila, na camada de 0,00 a 0,20 m, na ZHM de alto (1) rendimento e maior teor de argila, na camada de 0,20 a 0,40 m,

na ZHM de alto (2) rendimento. Logo, provavelmente, a textura do solo foi determinante na produção da cana de açúcar nas diferentes ZHM.

#### **4. CONCLUSÃO**

Conclui-se que foi possível determinar Zonas Homogêneas de Manejo por meio de imagens NDVI e NDRE, obtido por sensores multiespectrais acoplados em VANT.

Devido à saturação do NDVI em médias e altas quantidades de biomassa, o NDRE foi mais eficiente para determinar a variabilidade espacial no cultivo de cana-de-açúcar no período de novembro a março, período de maior produção de biomassa da cultura.

#### **Financiamento**

Fundação de Amparo à Pesquisa do estado de São Paulo (FAPESP) – São Paulo, Brasil.

## 5. REFERÊNCIAS

Adhikari K., C. F., Toth G. And Montanarella L. Site Specific Land Management; General Concepts and Applications. EUR -Scientific and Technical Research series, p.60. 2009.

Amaral, L. R., Molin, J.P. The effectiveness of three vegetation indices obtained from a canopy sensor in identifying sugarcane response to nitrogen. Soil fertility & crop nutrition. Agronomy Journal. v.106, n.1, p.273-280. 2014.

Fridgen, J.J., Kitchen, N.R., Sudduth, K.A., Drummond, S.T., Wiebold, W.J., Fraisse, C.W. Management Zone Analyst (MZA): Software for Subfield Management Zone Delineation. Agronomy Journal, v.96, n.1, p.100-108. 2004.

Gee, G.W. & Bauder, W. Particle-size analysis. In: BLACK, C.A., ed. Methods of soil analysis. Madison, American Society of Agronomy, 1986. Part 1. p.383-409. (Agronomy, 9).

Gitelson, A.A., Kaufman, Y.J., Stark, R., Rundquist, D. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. Remote Sens. Environ., 80, pp. 76-87. 2002.

Gitelson, A.A. Wide dynamic range vegetation index for remote quantification of biophysical characteristics of vegetation. J. Plant physiol., 161, pp.165-173. 2004.

Honda, B.; Jorge, L. Computação Aplicada À Agricultura De Precisão. Rev. Científica Eletrônica UNISEB, Ribeirão Preto, v.1, n.1, p.111-132, jan./jun.2013. Disponível em: <http://uniseb.com.br/presencial/revistacientifica/arquivos/8.pdf>

Kriegler, F.J., Malila, W.A., Nalepka, R.F., Richardson, W. Preprocessing transformations and their effects on multispectral recognition. Proceedings of the Sixth International Symposium on Remote Sensing of Environment, University of Michigan, Ann Arbor, MI, pp. 97-131. 1969.

Lillesand, T.M. and R.W. Kiefer. 1994. Remote Sensing and Photo Interpretation, 3rd. ed. John Wiley & Sons: New York. 750 p.

Luchiari, A. Jr., Shanahan, J., Francis, D., Schlemmer, M., Schepers, J., Liebig, M., Schepers, A., Payton, S. Strategies for Establishing Management Zones for Site Specific Nutrient Management. University of Minnesota 2000. In: International Conference On Precision Agriculture, 5, 2000.

Miranda, J. I. Interpolação. In: MIRANDA, J. I. Fundamentos de Sistemas de Informações Geográficas. 2. ed. rev. e atual. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2010. cap. 8, p. 265-304.

Molin, J. P.; Amaral, L. R.; Colaço, A. F. Agricultura de precisão. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2015.

Motomiya, A.V.A., Molin, J.P., Motomiya, W.R., Baio, F.H.R. Mapeamento Do Índice De Vegetação Da Diferença Normalizada Em Lavoura De Algodão.

Goiânia, v. 42, n. 1, p. 112-118, jan./mar. 2012. Disponível em: <http://www.revistas.ufg.br/index.php/pat/article/view/14251>.

Mzuku, M.; Khosla, R.; Reich, R.; Inman, D.; Smith, F. ; Macdonald, L. Spatial Variability of Measured Soil Properties across Site-Specific Management Zones. Madison, WI: Soil Science Society. 69: 1572-1579 p. 2005.

Plant, R.E. Site-specific management: The application of information technology to crop production. *Computers and Electronics in Agriculture*, v.30, n.1, p.9-29. 2001.

Shaver, T.M., Khosla, R., Westfall, D.G. Evaluation of two crop canopy sensors for nitrogen variability determination in irrigated maize. *Precision Agriculture*, v.12, p.892-904. 2011.

Wang, Z. X., Liu, C., Huete, A. From AVHRRNDVI to MODIS-EVI: Advances in vegetation index research. *Acta Ecologica Sinica*, v.23, n.5, p.979-988, 2003.

Yao, R.J.; Yang, J.S.; Zhang, T.J.; Gao, P.; Wang, X.P.; Hong, L.Z. ; Wang, M.W. Determination of site-specific management zones using soil physico-chemical properties and crop yields in coastal reclaimed farmland. *Geoderma*, v.232-234, p.381- 393. 2014.