

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

Sistemas sustentáveis para produção de cana-de-açúcar: influência integrada de manejo de solo, sucessão de culturas e adubação nitrogenada

Nicole Colombari Cheng

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

**Piracicaba
2022**

Nicole Colombari Cheng
Engenheira Agrônoma

Sistemas sustentáveis para produção de cana-de-açúcar: influência integrada de manejo do solo, sucessão de culturas e adubação nitrogenada

versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:

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

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

Piracicaba
2022

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

Cheng, Nicole Colombari

Sistemas sustentáveis para produção de cana-de-açúcar: influência integrada de manejo do solo, sucessão de culturas e adubação nitrogenada / Nicole Colombari Cheng. - - versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2022.

158 p.

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

1. *Saccharum* spp. 2. Plantio direto 3. Adubação verde 4. Soja 5. Amendoim 6. Sustentabilidade 7. Absorção de nutrientes 8. Análise tecnológica de colmos I.
Título

À minha avó, Faustina Gigli Colombari (in memoriam),
à minha tia, Ângela Colombari (in memoriam),
pelos ensinamentos e exemplos de coragem.

DEDICO

Aos meus amados pais, Cheng Yung Hsiang e Janine Colombari,
ao meu irmão, Arthur Colombari Cheng, e
ao meu marido, José Lucas Safanelli,
pelo amor, incentivo e carinho.

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela oportunidade de aprender e melhorar a cada dia, como pessoa e profissional, e por me amparar em todas as etapas dessa jornada que se iniciou lá atrás, bem antes da pós-graduação.

À minha família, que serviu de base, lastro e motivação ao longo de toda a minha vida, e moldou meus valores e princípios. Ao meu pai, Cheng Y. Hsiang, meu grande incentivador e, que muito mais que um progenitor, sempre será meu maior orgulho e minha maior referência, no quesito comprometimento, responsabilidade e benevolência. À minha mãe, Janine Colombari, que por meu espelho refletido em alguns aspectos da minha personalidade, me auxiliou em grandes aprendizados e, por consequência, apoiou meu desenvolvimento pessoal. Ao meu irmão, Arthur C. Cheng, pelo amor, carinho e respeito. À minha avó, Faustina G. Colombari, meu modelo de sabedoria, resignação e caridade, e à minha tia, Ângela Colombari, pela personificações de energia, força e garra, as quais também foram/são essenciais na minha vida e que amarei para todo sempre.

Ao meu marido, José Lucas Safanelli, pelo amor, companheirismo, respeito, paciência e apoio incondicional. Durante o curso, eu encontrei nele um amigo, namorado, colega de trabalho, parceiro de altos e baixos, e uma grande fonte de encorajamento. Me sinto privilegiada por dividir uma vida ao seu lado.

À Elisângela Dupas e família, pela motivação, ensinamentos, incentivo, carinho e amparo, em questões decisivas e momentos nem sempre fáceis.

Ao Prof. Paulo C. O. Trivelin, pelos ensinamentos, voto de confiança, subsídios e atenção, durante esses seis anos de formação acadêmica, sob sua supervisão. Sou honrada por tê-lo na minha trajetória acadêmica e serei eternamente grata pela oportunidade de vivenciar experiências tão valiosas.

Ao Saulo A. Q. Castro, amigo, colega de curso e principal idealizador da proposta desse estudo, que se tornou meu parceiro direto desde o início do doutorado. Agradeço muito por compartilhar sem reservas seu conhecimento, pela confiança e assistência prestada ao longo do doutoramento. Como produtor e grande entusiasta do setor, me ensinou muitos aspectos da cultura sob uma nova ótica, o que contribui muito para meu desenvolvimento profissional.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP), bem como o Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, pela infraestrutura, ensino de excelência e oportunidade de cursar o doutorado.

Ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA/USP), especialmente à Divisão de Desenvolvimento de Métodos e Técnicas Analíticas Nucleares (DVTEC), pela infraestrutura, suporte laboratorial e técnico. Em especial, agradeço ainda a equipe do Laboratório de Isótopos Estáveis (LIE), constituída pelo Prof. Dr. José A. Bendassoli, Hugo H. Batagello, Ana Paula G. M., Magda M. G. Bartolamei, Cristina B. Salvego, Bento M. Moraes Neto, Cleber V. Prestes e Miguel L. Baldessin, e do setor de convênios, Eliana A. F. Gimenes e Maria L. E. Victoriano, pela cordialidade e apoio técnico.

À empresa AgroQuatro-S., pela troca de conhecimento e apoio financeiro para atividades de campo, que muito auxiliaram no início da condução do experimento, quando ainda não havia a formalização de demais apoiadores.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de estudo (Processo nº 141844/2018-3) e ao suporte financeiro do projeto que contemplou essa tese (Processo nº 434118/2018-4, Chamada MCTIC/CNPQ nº 28/2018 – Universal/Faixa C).

À Fundação Agrisus - Agricultura Sustentável pelo apoio financeiro em avaliações em campo e análises laboratoriais (Projeto PA 2568/18).

Ao Laboratório de Microbiologia do Solo da ESALQ, em parceria com o Prof. Fernando Dini Andreote, pelo suporte para condução das análises microbiológicas do solo.

Aos meus parceiros de morada, Bruno P. Moschini e Lisiane Brichi, que foram grandes amigos de convívio diário, e me auxiliaram, em âmbito pessoal e profissional, nas várias etapas da carreira acadêmica. À Cláudia C. Geron, Nathalie R. Pereira e Ricardo Pivatto, meus grandes amigos, pelo carinho, cuidado e paciência.

Aos meus colegas de Pós-Graduação, Eduardo Mariano, Beatriz N. Boschiero, Flávio H. S. Rabêlo, Hugo A. G. Villalba, Pedro L. Garcia, Gabriela C. Salgado, Ruan F. Firmano, Acácio de Mira, Luciana A. Garcia, Matheus S. C. Barreto, Matheus B. Soares, Douglas G. Viana, entre outros, pela colaboração, amizade, conhecimento compartilhado e momentos de descontração.

À equipe de campo, Val, Eutervino, Vanda, Maria I, Maria II, Fatinha, Sirley, Paloma, Dilda, Baguinho, Leandro, José, Zé da bala, pela dedicação, apoio, aprendizados e atenção.

Aos estagiários do departamento do LIE, Cátia B. C. Pereira, Carla Costa, Mayara A. Arioza, Moniky S. Andreoni, Pablo Silva, Bianca Rodrigues, Mateus Rodrigues e Leonardo Godoy, os estudantes de iniciação científica da ESALQ, Régis R. L. Vieira e Eluisa R. Elias, pela colaboração e auxílio nas atividades de avaliação do experimento.

À Universidade Estadual do Centro-Oeste do Paraná, minha instituição acadêmica de origem, e aos mestres Itacir E. Sandini, Maria Lígia S. Silva, Jackson Kawakami, os quais fizeram parte da minha formação acadêmica de base e despertaram minha paixão pela profissão.

Aos membros julgadores das bancas de qualificação e doutoramento, pelos questionamentos, sugestões e críticas construtivas.

Aos demais integrantes do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas da ESALQ/USP, incluindo discentes e docentes, que convivi durante o período de curso do Mestrado e Doutorado. Em especial, agradeço os coordenadores do programa, prof. Carlos E. P. Cerri e Fernando D. Andreote, pelo auxílio e atenção.

A todos aqueles não mencionados nominalmente que contribuíram indiretamente para a realização desse trabalho ou tiveram papel importante, antes e durante, essa caminhada.

MUITO OBRIGADA.

EPÍGRAFE

“Decidir comprometer-se com resultados de longo prazo ao invés de reparos a curto prazo é tão importante quanto qualquer decisão que você fará em toda a sua vida.”

Anthony Robbins., escritor norte-americano (1960-1968)

“Talvez não tenhamos conseguido fazer o melhor, mas lutamos para que o melhor fosse feito. Não somos o que deveríamos ser, não somos o que iremos ser, mas graças a Deus, não somos o que éramos.”

Martin Luther King Jr., ativista norte-americano (1929-1968)

“Nascer, viver, morrer, renascer ainda e progredir sempre, tal é a lei”

Allan Kardec, educador francês (1804-1869)

SUMÁRIO

RESUMO.....	10
ABSTRACT.....	11
1 INTRODUÇÃO	13
Referências.....	17
2 PRODUTIVIDADE E PARÂMETROS TECNOLÓGICOS DE SOQUEIRAS DE CANA-DE-AÇÚCAR EM FUNÇÃO DO MANEJO DE SOLO E DA SUCESSÃO DE CULTURAS NA RENOVAÇÃO DE CANAVIAL.....	21
Resumo.....	21
Abstract	21
2.1. Introdução	22
2.2. Material e Métodos	25
2.2.1. Caracterização da área e condução experimental	25
2.2.2. Delineamento experimental e tratamentos	31
2.2.3. Avaliações e análises	35
2.2.4. Análise de dados e estatística.....	36
2.3. Resultados	37
2.3.1. Perfilamento, densidade e biomassa seca	37
2.3.2. Produtividade de colmos e de açúcar	42
2.3.3. Atributos tecnológicos de colmos	50
2.4. Discussão	51
2.5. Conclusões	54
Referências.....	54
3 ACÚMULO DE NUTRIENTES DE CANA-DE-AÇÚCAR EM FUNÇÃO DO MANEJO DE SOLO E DA CULTURA ANTECESSORA NA RENOVAÇÃO DE CANAVIAL.....	61
Resumo.....	61
Abstract	62
3.1. Introdução	62
3.2. Material e Métodos	65
3.2.1. Caracterização da área e condução experimental	65
3.2.2. Delineamento experimental e tratamentos	72
3.2.3. Avaliações e análises	73

3.2.4. Análise de dados e estatística	74
3.3. Resultados.....	75
3.3.1. Componentes principais dos parâmetros biométricos	75
3.3.2. Acúmulo de biomassa e produtividade de colmos	76
3.3.3. Componentes principais do acúmulo de nutrientes	79
3.3.4. Acúmulo de macronutrientes	81
3.3.5. Acúmulo de boro, cobre e zinco	90
3.4. Discussão	92
3.5. Conclusões.....	95
Referências	95
4 MANEJO DO SOLO E SUCESSÃO DE CULTURAS NA RENOVAÇÃO DE CANAVIAL: EFEITOS SOBRE ATRIBUTOS QUÍMICOS E BIOLÓGICOS DO SOLO EM SOQUEIRAS DE CANA-DE-AÇÚCAR	101
Resumo	101
Abstract.....	102
4.1. Introdução	103
4.2. Material e Métodos	106
4.2.1. Caracterização da área e condução experimental	106
4.2.2. Delineamento experimental e tratamentos	111
4.2.3. Avaliações e análises	115
4.2.4. Análise de dados e estatística	116
4.3. Resultados.....	117
4.3.1. Atributos químicos do solo.....	117
4.3.2. N-mineral e atributos biológicos do solo.....	132
4.4. Discussão	136
4.5. Conclusões.....	139
Referências	140
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	145
ANEXOS.....	149
APÊNDICES	159

RESUMO

Sistemas sustentáveis para produção de cana-de-açúcar: influência integrada de manejo de solo, sucessão de culturas e adubação nitrogenada

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) é atualmente considerada uma das culturas mais sustentáveis para produção de energia limpa e renovável do mundo. Frente às grandes transformações nas práticas de cultivo dessa matéria-prima na última década, vêm se expandindo o uso de estratégias mais diferenciadas para o manejo da cultura. Nesse contexto, o objetivo do estudo foi avaliar a influência integrada de manejo de solo, sucessão de culturas e adubação nitrogenada, visando propor possíveis sistemas mais sustentáveis para a produção de cana-de-açúcar. O experimento foi constituído por duas áreas experimentais, plantio convencional (PC) e plantio direto (PD), localizadas na região de Ribeirão Preto, estado de São Paulo, Brasil. A avaliação do estudo foi conduzida nas safras de 2018 a 2020, para as três primeiras soqueiras. As duas áreas experimentais foram igualmente delineadas e envolveram os seguintes fatores: sucessão de culturas e adubação nitrogenada de soqueira. O fator primário foi composto pela sucessão com amendoim, *Crotalaria juncea*, *Crotalaria spectabilis*, *Crotalaria ochroleuca*, soja e pousio. O fator secundário foi constituído pelos níveis de N aplicados em soqueira: 0, 50, 100 e 150% do N exportado. A análise estatística dos resultados foi realizada a partir da análise conjunta de dois locais e modelos lineares mistos, em esquema fatorial triplo. Os parâmetros biométricos foram afetados diretamente pela sazonalidade climática. As doses de N aumentaram a biomassa seca e produtividade de colmos ao final de três soqueiras, com reposição de 100 % do N exportado. Não houve efeito do manejo de solo e sucessão de culturas para produtividade de colmos e açúcar da cana-planta. A sucessão de culturas afetou a produtividade de colmos e açúcar ao final de três soqueiras. A adubação nitrogenada de soqueira aumentou de forma crescente os teores de Brix, Pol e ATR. A aplicação de N aumentou o acúmulo de P em parte aérea. Em geral, o acúmulo de macronutrientes secundários foram afetados pela interação da adubação nitrogenada com manejo de solo e soqueira. A adubação nitrogenada demonstrou ser o fator mais determinante na dinâmica de acúmulo de nutrientes. A adubação nitrogenada foi um importante fator para discriminação de grupos de tratamento e atributos químicos do solo. A associação de plantio direto e amendoim não demonstrou ser uma combinação de manejo favorável. As crotalárias em plantio direto incrementaram os teores de nutrientes no solo. Em sistemas sem N, as culturas antecessoras não se diferiram do pousio. Com aplicação de N, as sucessões de amendoim e soja apresentaram relações mais desfavoráveis, em relação ao pousio e às crotalárias. De modo geral, o plantio direto favoreceu a disponibilidade de nutrientes no solo, ainda que a ausência de N limite mais benefícios desse sistema. A aplicação de N aumentou a disponibilidade de N-mineral no solo. A atividade enzimática do solo foi alterada pela interação de fatores, especialmente para soqueira, cultura antecessora e adubação nitrogenada.

Palavras-chave: *Saccharum* spp., Plantio direto, Adubação verde, Soja, Amendoim, Sustentabilidade, Absorção de nutrientes, Análise tecnológica de colmos

ABSTRACT

Sustainable systems for sugarcane production: integrated influence of soil management, crop rotation and nitrogen fertilization

Sugarcane (*Saccharum* spp.) is considered one of the most sustainable crops for the production of clean and renewable energy in the world. Considering the great transformations of the cultivation practices of this crop in the last decade, the use of alternative management strategies in the sector has been promoted. In this context, the objective of the study was to evaluate the integrated influence of soil management, crop succession and nitrogen fertilization to propose potentially more sustainable systems for the production of sugarcane. The experiment consisted of two experimental sites, i.e., under conventional tillage (CT) and no-tillage (NT), located in the region of Ribeirão Preto, state of São Paulo, Brazil. The study was conducted between the 2018 to 2020 season, for the first three ratoons. The two experimental sites were equally delineated and involved the following factors: crop succession and ratoon nitrogen fertilization. The primary factor was the succession with peanut, *Crotalaria juncea*, *Crotalaria spectabilis*, *Crotalaria ochroleuca*, soybean and fallow. The secondary factor was constituted by levels of N applied in ratoon: 0, 50, 100 and 150% of the exported N. The statistical analysis was performed from a joint analysis of two locations with mixed linear models, in a triple factorial scheme. Biometric parameters were directly affected by climatic seasonality. The doses of N increased dry biomass and productivity of stalks at the end of three ratoons, with replacement of 100% of the exported N. There was no effect of soil management and crop succession on the yield of stalks and sugar in the cane plant. The succession of crops affected the productivity of stalks and sugar. The nitrogen fertilization increased the levels of Brix, Pol and ATR. In general, the accumulation of secondary macronutrients was affected by the interaction of nitrogen fertilization with soil management and ratoon. Nitrogen fertilization proved to be the most determining factor in the dynamics of nutrient accumulation. Phosphorus expressed little influence to distinguish between ratoons. Nitrogen fertilization was an important factor for discrimination of treatment groups and soil chemical attributes. The association of no-till and peanut did not prove to be a favorable management combination. Sunn hemp under no-tillage increased nutrient contents in the soil. In systems without N, the succession crops did not differ from the fallow. With N application, the successions of peanut and soybean showed more unfavorable conditions, in relation to fallow and sunn hemp. In general, no-tillage favored the availability of nutrients in the soil, although the absence of N limits the additional benefits of this system. The application of N increased the availability of N-mineral in the soil. Soil enzymatic activity was altered by the interaction of many factors, especially for ratoon, predecessor crop and nitrogen fertilization.

Keywords: *Saccharum* spp., No-tillage, Green manure, Soybean, Peanut, Sustainability, Nutrient absorption, Technological analysis of stalks

1 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) é vastamente difundida nas regiões tropicais e subtropicais do mundo. Somada à flexibilidade para produção de açúcar e etanol, a diversificação de sua aplicação na agroindústria viabiliza que subprodutos da sua produção, como palha e bagaço, sejam empregados para cogeração de energia e produção de etanol de segunda geração. Esse alto desempenho energético atribuído à elevada capacidade para produção de biomassa por unidade de área associada à maior aptidão de conversão de energia luminosa em energia química das plantas com aparato fotossintético de ciclo C4 (Huang et al., 2016), faz com que a cultura apresente um balanço positivo de energia no sistema de produção e demais benefícios ambientais, tais como aumento do sequestro de C e, conseqüentemente, uma menor emissão de gases do efeito estufa na colheita da cana crua (Goldemberg et al., 2008).

A trajetória da cana-de-açúcar no Brasil foi iniciada no século 16 e introduzida nas terras brasileiras durante a colonização portuguesa. A partir de então, a cultura se tornou uma das mais representativas e relevantes do agronegócio brasileiro. O Brasil é atualmente o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, o que corresponde aproximadamente de 40% da produção mundial e abrange 20% da produção global de açúcar, além do segundo lugar em produção de etanol.

Segundo dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2021), com base na safra de 2019/2020, concentrada na região centro-sul do país, onde as condições geográficas e climáticas são mais favoráveis ao desenvolvimento da cultura, a produção nacional se encontra entre 615,98 milhões Mg em uma área cultivada de 8,38 milhões de ha. Nesse cenário, o estado de São Paulo se destaca como maior em área plantada, com cerca de 5,6 milhões de hectares, o equivalente a metade do total de área colhida na safra atual do país.

Ainda que sejam dados expressivos em termos absolutos, a produtividade média nacional da cultura ($76,13 \text{ Mg ha}^{-1}$) ainda está muito abaixo do potencial produtivo da cana, que é da ordem 400 Mg ha^{-1} (Waclawovsky et al., 2010). Vários aspectos são atrelados à essa baixa produtividade, podendo ser destacado as condições climáticas desfavoráveis durante o ciclo, o manejo inadequado da cultura e as perdas por doenças e pragas. Entre as possíveis estratégias a serem adotadas para contornar esses problemas, as práticas voltadas ao manejo da cultura podem ser consideradas as principais responsáveis pelo aumento de produtividade da cana (Egeskog et al., 2014).

Relacionado a esse contexto, em resposta às exigências ambientais e trabalhistas que contribuíram para o término das queimadas nos últimos 15 anos, o cultivo brasileiro de cana apresentou transição da colheita da cana queimada para a cana crua. Em São Paulo, o índice de colheita mecanizada que antes era de 33% na safra de 2007/2008, já se encontra estimada em 96,5% para a safra de 2019/2020 (CONAB, 2021). Além da colheita sem queima prévia mitigar a emissão de gases de efeito estufa, a deposição da palhada na superfície beneficia a qualidade do solo, evitando a erosão e contribuindo para o aumento da fertilidade pelo incremento da matéria orgânica (Cerri et al., 2013; Trivelin et al., 2013; Franco et al., 2015). Entretanto, nesse sistema de cultivo, uma quantidade expressiva de resíduo vegetal composto por folhas secas e ponteiros é depositada sobre o solo, o que altera a dinâmica dos nutrientes no solo, especialmente pela baixa relação C/N da palhada, que pode variar de 80 a 100:1 (Franco et al., 2013; Ferreira et al., 2016).

Embora apresente muitas vantagens agronômicas, a colheita de cana crua altera a longevidade dos canaviais e aumenta sobremaneira o custo com preparo de solo por ocasião da renovação, em função do alto aporte de resíduos presentes na superfície (Farhate et al., 2022). Desse modo, muitos dos benefícios agronômicos deste sistema podem ser comprometidos no momento da renovação, realizada em média a cada cinco ciclos, quando se utiliza manejo convencional de preparo do solo, o qual é fundamentado no intenso revolvimento do solo para atenuar problemas de compactação decorrentes da intensificação da mecanização, necessidade de incorporar corretivos e controle de pragas. Nestas condições, é desejável a adoção dos princípios da agricultura conservacionista, que tem como alicerces o mínimo revolvimento do solo, a manutenção de resíduos na superfície e o uso de rotação de culturas (Derpsch et al., 2014).

Diferentemente da produção de grãos no país, a adoção de práticas mais conservacionistas no preparo de solo ainda é pouco difundida na cultura da cana-de-açúcar. Parte das barreiras para essa quebra de paradigma teve início na década de 80, quando a cultura foi uma das primeiras testadas para o uso do herbicida glifosato, com intuito de reduzir as operações de preparo do solo e, assim, viabilizar o que seria um sistema de cultivo mínimo para produção de cana. Naquela época, pesquisas apontavam que o plantio direto poderia ser empregado em pelo menos 40% dos canaviais paulistas, todavia o custo do herbicida inviabilizava sua adoção. Desde então, somado ao receio do problema de compactação pela intensificação da mecanização no setor, predomina erroneamente que o conceito de preparo profundo e intensivo seja essencial para a obtenção de maior desempenho agrônômico dessa cultura (Coleti, 2008; Farhate et al., 2022).

As primeiras tentativas de plantio direto no cultivo de cana-de-açúcar foram promovidas pela Cooperativa de Produtores de Cana-de-açúcar, Açúcar e Álcool do estado de São Paulo (Copersucar), as quais propiciaram o surgimento de diferentes implementos, tais como o sulcador com rotativa acoplada e o sulcador/subsolador com uma ponteira alada abaixo das asas do sulcador (Coleti, 2009). Também desse período remonta o primeiro protótipo do erradicador de socas, cujo objetivo é de eliminar superficialmente as cepas da soca anterior, substituindo a eliminação química via glifosato. O plantio direto consiste na técnica de manejo do solo em que palhiço e restos vegetais (folhas, colmos, raízes) são deixados na superfície do solo. O solo é revolvido apenas no sulco onde são depositadas as mudas e fertilizantes e as plantas infestantes são controladas por herbicidas, evitando assim cultivos mecânicos que provocam o revolvimento do solo. Não existe preparo do solo além da mobilização no sulco de plantio (Coleti, 2008).

Dentre muitas práticas agronômicas, o uso de adubação verde em áreas de renovação de canal tem se apresentado como uma estratégia viável para auxiliar na manutenção ou aumento da fertilidade do solo, bem como no incremento de produtividade da cana, por estar relacionado ao controle da erosão hídrica, do assoreamento de sulco e da compactação do solo; à diminuição da população de nematoides; à micorrização e ciclagem de nutrientes; e à supressão de plantas daninhas e fitorremediação de herbicidas (Ambrosano et al., 2005). Além dos vários benefícios em aspectos físicos, químicos e biológicos do solo, o emprego de adubos verdes incorporados ou não ao solo aumenta o estoque de carbono orgânico do solo, diminuindo a emissão de gases do efeito estufa pela fixação de carbono (Wutke et al., 2014).

Em geral, as espécies pertencentes à família Fabaceae são geralmente preferidas para os sistemas de consórcio ou sucessão/rotação de culturas, pois o N fixado pelas leguminosas pode ser transferido para culturas não leguminosas (Ashworth et al., 2015). Sob essa perspectiva atual, a soja (*Glycine max* (L.) Merr) e o amendoim (*Arachis hypogaea* L.) são as principais leguminosas empregadas na reforma de canaviais, uma vez que possuem potencial comercial de rentabilidade no período de entressafra. Mesmo em menor proporção, os adubos verdes sem finalidade comercial também vêm sendo expandidos nessas áreas, como é o caso de algumas espécies de *Crotalaria*, *C. spectabilis*, *C. juncea* e, mais recentemente, a *C. ochroleuca*. Segundo levantamento feito em 2021 pelo grupo fitotécnico do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), a região centro sul do Brasil adotou o uso de leguminosas em 60% da área de reforma cultivada com cana-de-açúcar, sendo que deste montante, 40% foram por adubos verdes e 60% por soja ou amendoim. Nesse contexto, é vertiginoso o

crescimento dessas culturas na reforma do canavial, diante da expansão que atualmente abrange aproximadamente 200 mil hectares no Centro sul (IAC, 2022).

Um paradigma no início da adoção de leguminosas na renovação de canaviais recai sobre a necessidade da aplicação de fertilizante nitrogenado no plantio da cana, considerando que esse nutriente seria fixado biologicamente pelas leguminosas no ciclo antecedente. Contudo, estudos da literatura apontam que, mesmo com o emprego de adubação verde na reforma do canavial, a cana-planta ainda necessitaria do N-fertilizante do plantio, um aspecto que também se estenderia para a adubação nitrogenada de soqueira (Ambrosano et al., 2005; Tenelli et al., 2019). Assim, mesmo diante a resposta limitada da adubação nitrogenada de soqueira ser muitas vezes restringida (Boschiero et al., 2018; Otto et al., 2020), geralmente é aplicado a mesma quantidade de N em áreas reformadas com adubos verdes. Considerando que as leguminosas apresentam baixa relação C/N e contribuem para fornecimento biológico de N ao solo, a resposta da adubação nitrogenada de soqueira em áreas submetidas à rotação de culturas na renovação do canavial poderá ser ainda menor, se os efeitos benéficos da adubação verde se mantiverem de médio a longo prazo e auxiliarem na menor imobilização do N do fertilizante, especialmente pela alta relação C/N dos resíduos vegetais de cana. Além da adubação verde, uma alternativa para o incremento da produtividade e sustentabilidade do sistema canavieiro está compreendida na redução do revolvimento do solo, por meio da sulcagem direta no plantio. Entretanto, ainda não existem trabalhos que avaliaram a interação entre essas duas práticas conservacionistas.

Nesse contexto, foram formuladas as seguintes hipóteses para o direcionamento do presente estudo: i) A adoção de práticas conservacionistas na reforma do canavial, como o plantio direto e uso de adubação verde, empregadas de forma isolada ou combinada, é capaz promover aumento de produtividade de colmos e açúcar ao final de três soqueiras, devido ao aporte e ciclagem de biomassa e nutrientes; ii) O manejo do solo e a sucessão de culturas empregados no período de reforma do canavial promovem melhorias em atributos químicos e biológicos, os quais são mantidos em safras sucessivas e, desta forma, podem interferir no manejo da adubação nitrogenada a ser adotado em soqueiras; iii) A adubação nitrogenada deve ser ajustada às práticas de manejo adotadas no momento da renovação do canavial, pois torna-se indispensável para manutenção de áreas reformadas em cortes subsequentes.

Para testar as hipóteses formuladas, o presente trabalho foi dividido em três capítulos para atender os seguintes objetivos do estudo: (1) Avaliar a influência integrada do manejo do solo, sucessão de culturas e adubação nitrogenada sobre aspectos biométricos, produtividade e parâmetros tecnológicos de soqueiras de cana-de-açúcar; (2) Avaliar o efeito do manejo do

solo e da sucessão de culturas, associados à adubação nitrogenada, no acúmulo de nutrientes da parte aérea total e do particionado folha seca mais ponteiro. (3) Avaliar a associação do manejo do solo e sucessão de culturas com adubação nitrogenada de soqueira sobre atributos químicos e atividade enzimática.

Referências

- Ambrosano EJ, Trivelin PCO, Cantarella H, Ambrosano GMB, Schammas EA, Guirado N, Rossi F, Mendes PCD, Muraoka T. Utilization of nitrogen from green manure and mineral fertilizer by sugarcane. *Sci Agric*. 2005;62:534-42. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162005000600004>
- Ashworth AJ, West CP, Allen FL, Keyser PD, Weiss SA, Tyler DD, Taylor AM, Warwick KL, Beamer KP. Biologically Fixed Nitrogen in Legume Intercropped Systems: Comparison of Nitrogen-Difference and Nitrogen-15 Enrichment Techniques. *Agron J*. 2015;107:2419-30. <https://doi.org/10.2134/agronj14.0639>
- Boschiero BN, Mariano E, Trivelin PCO. “Preferential” ammonium uptake by sugarcane does not increase the 15N recovery of fertilizer sources. *Plant Soil*. 2018;429:253-69. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3672-z>
- Cerri CEP, Galdos MV, Carvalho JLN, Feigl BJ, Cerri CC. Quantifying soil carbon stocks and greenhouse gas fluxes in the sugarcane agrosystem: point of view. *Sci Agric*. 2013;70:361-8. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162013000500011>
- Coleti JT. Preparo mínimo viabiliza canal conservacionista. *Visão Agrícola No 9 - Desafios - Cana-de-Açúcar*. 2009:175-82
- Coleti JT. O preparo do solo sob ótica conservacionista. In: Dinardo-Miranda LL, Vasconcelos ACM de, Landell MG de A, editors. *Cana-de-açúcar*. 1. ed. Campinas: Instituto Agronômico; 2008. p. 573-83.
- CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento: Portal de informações agropecuárias; 2021 [cited n.d.]. Available from: <https://portaldeinformacoes.conab.gov.br/index.php/>.
- Derpsch R, Franzluebbbers AJ, Duiker SW, Reicosky DC, Koeller K, Friedrich T, Sturny WG, Sá JCM, Weiss K. Why do we need to standardize no-tillage research? *Soil Tillage Res*. 2014;137:16-22. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.10.002>
- Egeskog A, Freitas F, Berndes G, Sparovek G, Wirsenius S. Greenhouse gas balances and land use changes associated with the planned expansion (to 2020) of the sugarcane ethanol industry in Sao Paulo, Brazil. *Biomass and Bioenergy*. 2014;63:280-90. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.01.030>

- Farhate CVV, Souza ZM de, Cherubin MR, Lovera LH, Oliveira IN de, Júnnyor W da SG, Scala N La. Soil physical change and sugarcane stalk yield induced by cover crop and soil tillage. *Rev Bras Ciência Do Solo*. 2022;46. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20210123>
- Ferreira DA, Franco HCJ, Otto R, Vitti AC, Fortes C, Faroni CE, Garside AL, Trivelin PCO. Contribution of N from green harvest residues for sugarcane nutrition in Brazil. *GCB Bioenergy*. 2016;8:859-66. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12292>
- Franco HCJ, Otto R, Vitti AC, Faroni CE, Oliveira EC de A, Fortes C, Ferreira DA, Kölln OT, Garside AL, Trivelin PCO. Residual recovery and yield performance of nitrogen fertilizer applied at sugarcane planting. *Sci Agric*. 2015;72:528-34. <https://doi.org/10.1590/0103-9016-2015-0170>
- Franco HCJ, Pimenta MTB, Carvalho JLN, Magalhães PSG, Rossell CEV, Braunbeck OA, Vitti AC, Kölln OT, Rossi Neto J. Assessment of sugarcane trash for agronomic and energy purposes in Brazil. *Sci Agric*. 2013;70:305-12. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162013000500004>
- Goldemberg J, Coelho ST, Guardabassi P. The sustainability of ethanol production from sugarcane. *Energy Policy*. 2008;36:2086-97. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.02.028>
- Huang H, Long S, Singh V. Techno-economic analysis of biodiesel and ethanol co-production from lipid-producing sugarcane. *Biofuels, Bioprod Biorefining*. 2016;10:299-315. <https://doi.org/10.1002/bbb.1640>
- IAC. Levantamento fitotécnico da cana-de-açúcar 2021; 2022 [cited n.d.]. Available from: <https://grupofitotecnicodecana.com.br/quem-somos/>.
- Otto R, Pereira GL, Tenelli S, Carvalho JLN, Lavres J, de Castro SAQ, Lisboa IP, Sermarini RA. Planting legume cover crop as a strategy to replace synthetic N fertilizer applied for sugarcane production. *Ind Crops Prod*. 2020;156:112853. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112853>
- Tenelli S, Otto R, de Castro SAQ, Sánchez CEB, Sattolo TMS, Kamogawa MY, Pagliari PH, Carvalho JLN. Legume nitrogen credits for sugarcane production: implications for soil N availability and ratoon yield. *Nutr Cycl Agroecosystems*. 2019;113:307-22. <https://doi.org/10.1007/s10705-019-09979-y>
- Trivelin PCO, Franco HCJ, Otto R, Ferreira DA, Vitti AC, Fortes C, Faroni CE, Oliveira ECA, Cantarella H. Impact of sugarcane trash on fertilizer requirements for São Paulo, Brazil. *Sci Agric*. 2013;70:345-52. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162013000500009>

Waclawovsky AJ, Sato PM, Lembke CG, Moore PH, Souza GM. Sugarcane for bioenergy production: an assessment of yield and regulation of sucrose content. *Plant Biotechnol J*. 2010;8:263-76. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7652.2009.00491.x>

Wutke EB, Calegari A, Wildner L do P. Espécies de adubos verdes e plantas de cobertura e recomendações para seu uso. In: Lima Filho OF de, Ambrosano EJ, Rossi F, Carlos JAD, editors. *Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil*. 1. ed. Brasília, DF: Embrapa; 2014. p. 59-168.

2 PRODUTIVIDADE E PARÂMETROS TECNOLÓGICOS DE SOQUEIRAS DE CANA-DE-AÇÚCAR EM FUNÇÃO DO MANEJO DE SOLO E DA SUCESSÃO DE CULTURAS NA RENOVAÇÃO DE CANAVIAL

Resumo

O objetivo desse trabalho foi avaliar a influência integrada do manejo do solo, sucessão de culturas e adubação nitrogenada sobre aspectos biométricos, produtividade e parâmetros tecnológicos de soqueiras de cana-de-açúcar. O experimento foi constituído por duas áreas experimentais, plantio convencional (PC) e plantio direto (PD), localizadas em área comercial de produção de cana-de-açúcar, no município de Sales Oliveira, região de Ribeirão Preto, estado de São Paulo, Brasil. A avaliação do estudo foi conduzida nas safras de 2016/2017, 2017/2018, 2018/2019 e 2019/2020, abrangendo a cana-planta e três ciclos subsequentes. As duas áreas experimentais foram delineadas de forma espelhada e envolveram os seguintes fatores: sucessão de culturas (fator primário) e adubação nitrogenada de soqueira (fator secundário). O fator primário foi composto por pousio e uso de cinco leguminosas, sendo duas culturas com fins comerciais (soja e amendoim) e três espécies distintas de crotalárias (*Crotalaria juncea*, *Crotalaria spectabilis*, *Crotalaria ochroleuca*). O fator secundário foi constituído pelos tratamentos da adubação nitrogenada de soqueira: controle (sem N) e três doses de nitrogênio (50, 100 e 150% do N exportado na colheita antecessora). A avaliação dos parâmetros biométricos e tecnológicos do colmo foram realizados no período de colheita dos três ciclos subsequentes (primeira soqueira, segunda soqueira e terceira soqueira) entre os meses de julho a agosto de cada safra. A análise estatística dos resultados foi realizada a partir da análise conjunta de dois locais junto da aplicação de modelos lineares mistos, em esquema fatorial triplo. Os parâmetros biométricos foram afetados diretamente pela sazonalidade climática, respondendo a aplicação de N em algumas situações. As doses de N aumentaram a biomassa seca e produtividade de colmos ao final de três soqueiras, independente do manejo de solo e sucessão de cultura, com reposição de 100 % do N exportado. Não houve efeito do manejo de solo e sucessão de culturas para produtividade de colmos e açúcar da cana-planta. A influência dos fatores foi alterada sazonalmente para produtividade de colmos e açúcar. A sucessão de culturas afetou a produtividade de colmos e açúcar. Além disso, a adubação nitrogenada de soqueira aumentou de forma crescente os teores de Brix, Pol e ATR.

Palavras-chave: *Saccharum* spp.; Plantio direto; Adubação verde; Amendoim; Soja; *Crotalaria*

Abstract

The objective of this work was to evaluate the integrated influence of soil management, crop succession and nitrogen fertilization on biometric aspects,

productivity and technological parameters of sugarcane ratoons. The experiment consisted of two experimental sites, conventional tillage (CT) and no-tillage (NT), located in a commercial area of sugarcane production, in the municipality of Sales Oliveira, region of Ribeirão Preto, state of São Paulo, Brazil. The study was conducted in the 2016/2017, 2017/2018, 2018/2019 and 2019/2020 harvests, covering the plant cane and three subsequent ratoons. The two experimental areas were mirrored and involved the following factors: crop succession (primary factor) and ratoon nitrogen fertilization (secondary factor). The primary factor consisted of fallow and the use of five legumes, with two being commercial crops (soybean and peanut) and three different species of sunn hemp (*Crotalaria juncea*, *Crotalaria spectabilis*, *Crotalaria ochroleuca*). The secondary factor was constituted by levels of nitrogen fertilization: control (without N) and three doses of nitrogen (50, 100 and 150% of the N exported in the previous harvest). The evaluation of the biometric and technological parameters of the stalks were carried out during the harvest period of the three subsequent cycles (first, second and third ratoon) between the months of July to August of each harvest. The statistical analysis was performed from a joint analysis of the two sites along with the application of mixed linear models, in a triple factorial scheme. Biometric parameters were directly affected by weather seasonality, responding to N application in some situations. The doses of N increased the dry biomass and productivity of stalks at the end of three ratoons, regardless of soil management and crop succession, with replacement of 100% of the exported N. There was no effect of soil management and crop succession on the yield of stalks and sugar in the cane plant. The seasonal influence of factors was changed for yield of stalks and sugar. The succession of crops affected the productivity of stalks and sugar. Finally, ratoon nitrogen fertilization increased the levels of Brix, Pol and ATR.

Keywords: *Saccharum* spp.; No-till; Cover crops; Peanut; Soybean; *Crotalaria*

2.1. Introdução

O Brasil é atualmente o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, pois atingiu a produção de 628 milhões Mg em uma área de 8,42 milhões de hectares na safra 2020/2021 (CONAB, 2021). Mesmo com números impressionantes, a produtividade média nacional da cultura (74,6 Mg ha⁻¹) ainda está muito abaixo do potencial produtivo, podendo alcançar cerca de 400 Mg ha⁻¹ conforme estimativas reportadas na literatura (Waclawovsky et al., 2010). Dentre os diversos aspectos que podem estar atrelados à baixa produtividade, pode-se destacar as adversidades climáticas, o manejo inadequado da cultura e as perdas por doenças e pragas. As possíveis estratégias a serem adotadas para aumentar a produtividade e longevidade do canavial incluem práticas de manejo sustentáveis voltadas à nutrição de planta e qualidade do solo (Egeskog et al., 2014).

Nos últimos anos, o cultivo brasileiro de cana-de-açúcar tem adotado amplamente a colheita mecanizada de cana crua (98%, CONAB, 2021), a qual substituiu da colheita da cana

queimada para reduzir os impactos ambientais. Além da colheita sem queima prévia mitigar a emissão de gases de efeito estufa, a deposição da palhada na superfície do solo beneficia sua qualidade, evitando a erosão e contribuindo para o aumento da fertilidade pelo incremento da matéria orgânica (Cerri et al., 2013; Trivelin et al., 2013; Franco et al., 2015). Entretanto, em cultivos que adotam esse tipo de colheita, uma quantidade expressiva de resíduo vegetal composto por folhas secas e ponteiros é depositada sobre o solo, o que altera a dinâmica dos nutrientes no solo, especialmente pela elevada relação C/N da palhada, que pode variar de 80 a 100:1 e, assim, reduzir a taxa de mineralização de N (Franco et al., 2013; Ferreira et al., 2016). No Brasil, estima-se que 70% de toda a matéria seca é decomposta somente após um período de três anos, promovendo a mineralização de nutrientes como K, Ca e N (Fortes et al., 2013). Segundo Trivelin et al. (2013), a disponibilização potencial de 40 kg ha⁻¹ de N ano⁻¹ a partir de um estoque de N que se formará no solo pela permanência dos resíduos culturais em sistema de cana crua ocorrerá somente após 40 anos.

Embora a colheita de cana crua já tenha sido amplamente adotada no setor, outros impactos foram devidamente reportados na literatura, principalmente em relação a degradação da qualidade física do solo e perdas de produtividade causadas pelo tráfego intenso de maquinário (Prado et al., 2019; Farhate et al., 2022). Além disso, a cultura da cana-de-açúcar no Brasil é ainda historicamente cultivada sob manejo do solo convencional no período que antecede o plantio. Esta prática busca homogeneizar fisicamente a camada superficial (0-40 cm) por meio de práticas intensivas, como aração e gradagem, a fim de facilitar as operações mecanizadas e proporcionar uma adequação das condições físicas do solo (Hoorman et al., 2011). Por outro lado, esse tipo de manejo ocasiona perdas substanciais de carbono (Silva-Olaya et al., 2013), altera a dinâmica da temperatura e água no sistema (Awe et al., 2015a, 2015b), e impacta, de forma geral, a qualidade do solo, prejudicando a produção e sustentabilidade do sistema a médio e longo prazo (Filoso et al., 2015; Cherubin et al., 2016; Bordonal et al., 2017).

A adoção de culturas de sucessão para reforma, seja para fins comerciais ou adubação verde, também tem sido amplamente difundida com o intuito de proporcionar maior qualidade do solo e/ou capacitar financeiramente os agricultores durante a entressafra (Ambrosano et al., 2005; Farinelli et al., 2018; Vuyyuru et al., 2020). O uso de leguminosas em áreas de renovação de canavial tem se apresentado como uma estratégia viável para auxílio da manutenção ou aumento da fertilidade do solo, bem como no incremento de produtividade da cana, por estar relacionado ao controle da erosão hídrica, do assoreamento de sulco e da compactação do solo; à diminuição da população de nematoides; à micorrização

e ciclagem de nutrientes; e à supressão de plantas daninhas e fitorremediação de herbicidas (Ambrosano et al., 2011). Além de proporcionar vários benefícios em aspectos físicos, químicos e biológicos do solo, o emprego de adubos verdes incorporados ou não ao solo aumenta o estoque de carbono orgânico do solo, diminuindo a emissão de gases do efeito estufa pela fixação de carbono (Wutke et al., 2014).

Do ponto de vista nutricional, a cana-de-açúcar requer uma quantidade substancial de N para a produção de colmos, uma vez que é absorvido aproximadamente de 100 a 300 kg ha⁻¹ de N para a produção de 100 Mg ha⁻¹ de colmos (Franco et al., 2007), sendo ainda posteriormente metade dessa fração exportada por ocasião da colheita (Cantarella et al., 2008). A fim de atender as necessidades desse nutriente pela cultura, são recomendadas doses que geralmente variam de 120 a 200 kg ha⁻¹ de N para a cana crua (Cantarella and Rosseto, 2014). Na maioria das recomendações ainda é considerado a quantidade de N exportado para a produção de uma tonelada de colmos, que poderá apresentar variação na região centro-sul de aproximadamente 0,7 a 1,8 kg de N para cada tonelada de colmos colhida (Vitti et al., 2006; Franco et al., 2007; Cantarella et al., 2008). No geral, a utilização do N-fertilizante pela cultura é baixa, sendo comumente inferiores a 50% da dose aplicada (Trivelin et al., 2002; Vitti et al., 2011). Assim, o manejo da adubação nitrogenada pode ser considerado uma das práticas mais importantes para produção da cana-de-açúcar, apresentando grande variabilidade de resposta sob o ponto de vista da produtividade de colmos, em razão das doses de N aplicadas (Franco et al., 2015; Otto et al., 2016).

Um ponto inicialmente polêmico da adoção de leguminosas na renovação de canaviais era a necessidade da aplicação de fertilizante nitrogenado no plantio da cana-de-açúcar, uma vez que esse nutriente seria fixado biologicamente ao solo. Entretanto, estudos apontaram que, mesmo com o uso de adubação verde na reforma do canavial, a cana-de-açúcar ainda necessita do N-fertilizante do plantio, dúvida essa que ainda se mantém para a adubação nitrogenada de soqueira (Ambrosano et al., 2005, 2011). Apesar da resposta à adubação nitrogenada de soqueira ser muitas vezes limitada, geralmente é aplicado a mesma quantidade de N em áreas reformadas com adubos verdes (Otto et al., 2016; Boschiero et al., 2020).

Considerando que as leguminosas apresentam baixa relação C/N e contribuem para fornecimento biológico de N ao solo, a resposta da adubação nitrogenada de soqueira em áreas submetidas à rotação de culturas na renovação do canavial poderá ser ainda menor, se os efeitos benéficos da adubação verde se mantiverem de médio a longo prazo e auxiliarem na menor imobilização do N do fertilizante, especialmente pela alta relação C/N dos resíduos

vegetais de cana. Além da adubação verde, uma alternativa para o incremento da produtividade e sustentabilidade do sistema canavieiro está compreendida na redução do revolvimento do solo, por meio da sulcagem direta no plantio.

Entretanto, uma avaliação integrada dos efeitos do manejo de solo, sucessão de culturas e adubação nitrogenada nos parâmetros produtivos e tecnológicos ainda é escassa na literatura e precisa ser melhor investigada. O objetivo desse trabalho é, portanto, avaliar o efeito do manejo do solo e sucessão de culturas sob diferentes níveis de adubação nitrogenada nos parâmetros produtivos e tecnológicos ao final de três soqueiras de cana-de-açúcar. A combinação dessas práticas pode proporcionar uma série de benefícios e influenciar a longevidade e produtividade do canavial, trazendo assim, uma perspectiva complementar referente à adoção de práticas mais sustentáveis na cultura.

2.2. Material e Métodos

2.2.1. Caracterização da área e condução experimental

O experimento foi constituído por duas áreas experimentais, localizadas em área comercial de produção de cana-de-açúcar, no município de Sales Oliveira, região de Ribeirão Preto, Estado de São Paulo, Brasil (20°50'21" S, 47°57'11" O, 604 m) (Figura 1). A avaliação do estudo foi conduzida nas safras de 2016/2017, 2017/2018, 2018/2019 e 2019/2020, abrangendo a cana-planta e três ciclos subsequentes.

Como parte do histórico da área, a transição do sistema de colheita do semimecanizado com queima prévia da palha para o sistema mecanizado sem queima prévia da palha foi iniciada no ano de 2010. Desse modo, antes da instalação do experimento, as áreas já eram cultivadas no sistema de colheita da cana crua há pelo menos 5 anos. No período de sistema de colheita mecanizada de cana queimada, foi realizada a aplicação de vinhaça na dose de 100 m³ ha⁻¹ logo após o corte. Com o início do sistema de colheita de cana-crua, o uso de vinhaça foi suspenso do manejo e não houve mais aplicação.

O clima do local é classificado como subtropical úmido com verão quente (Cwa), segundo Köppen, com temperatura média anual de 20,7°C e pluviosidade média anual de 1559 mm. A estação úmida, compreendida no período de outubro a março, apresenta temperatura média de 22,6° C e pluviosidade média de 1323 mm. Já para a estação seca, período de abril a setembro, a pluviosidade média se encontra em 236 mm e temperatura média em 19,1°C (Alvares et al., 2013).



Figura 1. Localização geográfica das áreas experimentais no município de Sales Oliveira, SP.

O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho Distroférrico (Santos et al., 2018), de textura argilosa, correspondente a Rhodic Hapludox (Soil Survey Staff, 2014). A caracterização físico-química do solo foi realizada pela coleta de amostras deformadas compostas, nas profundidades 0-0,1, 0,1-0,2, 0,2-0,4, 0,4-0,6 e 0,6-1,0 m, para duas áreas experimentais, antes da instalação do experimento (Tabela 1). As análises para fins de fertilidade do solo foram determinadas de acordo com Raij et al. (2001) e as análises granulométricas foram obtidas pelo método da pipeta (Teixeira et al., 2017). Segundo a metodologia do Instituto Agrônomo de Campinas do Programa Ambicana, o ambiente de produção se enquadra em B2/C1, indicando médio potencial de produtividade e baixas limitações para cultivo.

Tabela 1. Caracterização físico-química do solo das áreas experimentais.

Características	Profundidade (cm)				
	0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,4	0,4-0,6	0,6-1,0
	<u>Plantio convencional (PC)</u>				
pH	5,3	5,2	5,3	4,9	5,4
C orgânico (g dm ⁻³)	32	32	27	20	16
P resina (mg dm ⁻³)	8	7	6	3	3
S (mg dm ⁻³)	12	28	12	57	26
K (mmolc dm ⁻³)	1,8	1,2	0,7	0,4	0,3
Ca (mmolc dm ⁻³)	27	19	20	10	8
Mg (mmolc dm ⁻³)	8	7	6	3	3
Al (mmolc dm ⁻³)	<1	<1	<1	<1	<1
H + Al (mmolc dm ⁻³)	52	52	31	42	25
SB (mmolc dm ⁻³)	36,8	27,2	26,7	13,4	11,3
CTC (mmolc dm ⁻³)	88,8	79,2	57,7	55,4	36,3
V (%)	41	34	46	24	31
m (%)	0	0	0	0	0
Areia (g kg ⁻¹)	215	220	206	190	194
Silte (g kg ⁻¹)	286	260	269	234	222
Argila (g kg ⁻¹)	499	520	525	576	583
	<u>Plantio direto (PD)</u>				
pH	5,3	5,2	5,3	5,4	5,6
C orgânico (g dm ⁻³)	26	28	25	20	14
P resina (mg dm ⁻³)	7	7	10	5	4
S (mg dm ⁻³)	9	9	9	28	25
K (mmolc dm ⁻³)	1,9	1,2	0,7	0,6	0,4
Ca (mmolc dm ⁻³)	22	22	21	15	11
Mg (mmolc dm ⁻³)	7	7	6	4	3
Al (mmolc dm ⁻³)	<1	<1	<1	<1	<1
H + Al (mmolc dm ⁻³)	47	38	42	22	25
SB (mmolc dm ⁻³)	30,9	30,2	27,7	19,6	14,4
CTC (mmolc dm ⁻³)	77,9	68,2	69,7	41,6	39,4
V (%)	40	44	40	47	37
m (%)	0	0	0	0	0
Areia (g kg ⁻¹)	203	200	197	186	188
Silte (g kg ⁻¹)	279	267	256	214	235
Argila (g kg ⁻¹)	517	533	547	599	576

pH: pH em solução de CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹; C orgânico: carbono orgânico pela oxidação com dicromato; P, Ca, Mg e K: fósforo, cálcio, magnésio e potássio trocáveis com extração por resina trocadora de íons; S: sulfato extraível em solução de Ca(H₂PO₄)₂ 0,01 mol L⁻¹; Al: alumínio trocável em solução de KCl 1 mol L⁻¹; H + Al: acidez potencial com solução-tampão SMP em pH 7,0; SB: soma de bases; CTC: capacidade de troca catiônica a pH 7,0; V: saturação por bases; m: saturação por alumínio; Areia, Silte e Argila: análise granulométrica pelo método da pipeta.

As operações de preparo de solo e dessecação da cana remanescente, empregadas respectivamente em pré-plantio para área de plantio convencional (PC) e direto (PD), foram conduzidas 10 dias antes do plantio das leguminosas no período de reforma. A eliminação da soqueira para reforma do canavial foi realizada por dessecação prévia com glifosato (5 L ha^{-1}). Já para PC, a área foi operacionalizada sequencialmente por meio de gradagem pesada, aração com aiveca e gradagem intermediária (niveladora).

O solo foi corrigido com aplicação de calcário, na dose fixa de $1,5 \text{ Mg ha}^{-1}$, de forma superficial para PD e incorporada para PC, e condicionado à gessagem (1 Mg ha^{-1}), logo após a calagem. O plantio de amendoim foi realizado com a cultivar IAC 503, com espaçamento entre linhas de 0,90 m, em profundidade de 5 a 6 cm, na densidade de 15 a 18 sementes por metro, e sem adubação de plantio. Já para a soja, a semeadura foi realizada com o cultivar BMX Potência RR, com espaçamento entre linhas de 0,45 m, em profundidade de 4 a 5 cm, na densidade de 22 a 23 sementes por metro, e com aplicação de 350 kg ha^{-1} do fertilizante formulado 02-20-18, posicionado no fundo do sulco. As crotalárias foram obtidas em empresa comercial credenciada no Sistema Nacional de Sementes e Mudas do Ministério da Agricultura (Piraí Sementes Ltda), e semeadas com espaçamento entre linhas de 0,45 m, em profundidade de 2 a 3 cm, e densidade linear de 22-27, 55-60 e 22-24 sementes para *Crotalaria spectabilis*, *Crotalaria ochroleuca*, *Crotalaria juncea*, respectivamente. Segundo a legislação vigente, as crotalária são classificados como cultivar “comum” e não apresentam demais especificações para comercialização. Após a colheita das culturas antecessoras, foi realizada o levantamento de componentes produtivos, como biomassa seca e produtividade de grãos. O acúmulo de nutrientes da biomassa remanescente das culturas antecessoras foi determinado por análise do tecido vegetal do material amostrado, segundo metodologia descrita por Malavolta et al. (1997).

A primeira aplicação foliar de soja ocorreu aos 30 dias após o plantio (DAP), com herbicida e inseticidas a base de piretróide e benzoiluréia. Demais aplicações de inseticida e fungicida foram realizadas aos 51, 92, 110, 122 e 137 DAP (Anexo A). A aplicação de fertilizante foliar foi utilizada nas três primeiras épocas, em associação com outros produtos. Para auxiliar o processo de nodulação, foi aplicado um fertilizante fluído organomineral com cobalto (Co) e molibdênio (Mo) enriquecido com materiais orgânicos aos 92 DAP.

O manejo do amendoim se iniciou aos 15 dias DAP com controle de plantas daninhas, mediante a aplicação de herbicida do grupo químico imidazolinona. Ao longo do ciclo da cultura, foram feitas sete aplicações de inseticidas e fungicidas para controle de doenças e de pragas (Anexo A). Demais aplicações foliares, incluíram os fertilizantes a base

de compostos orgânicos, aos 30 DAP, e fluído organomineral com Co e Mo, aos 30 e 45 DAP.

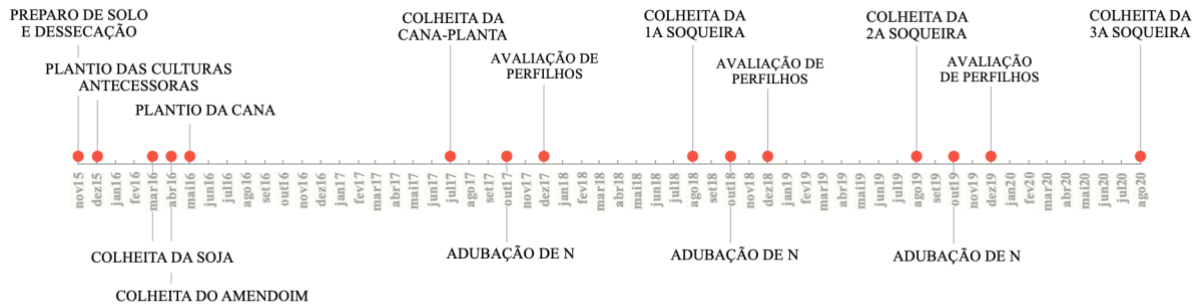


Figura 2. Cronologia dos principais eventos ocorridos no período de condução experimental.

Considerando o manejo de solo como um fator determinante do estudo, o início do experimento ocorreu em novembro de 2015 (Figura 2). Com intuito de avaliar o efeito do preparo de solo na renovação do canal, o experimento foi dividido em duas áreas experimentais, de acordo com o manejo do solo (plantio convencional e plantio direto). Enquanto o plantio convencional consistiu no preparo de solo com grade e arado, o plantio direto apresentou mobilização do solo somente na linha de cultivo no plantio das leguminosas e da cana-planta. Após o preparo do solo e dessecação, o plantio de leguminosas empregadas na reforma do canal, também denominadas de culturas de sucessão ou antecessoras, foi conduzido em dezembro de 2015 e incluiu as seguintes espécies: *Crotalaria juncea*, *Crotalaria spectabilis*, *Crotalaria ochroleuca*, soja [*Glycine max* (L.) Merrill] e amendoim-branco (*Arachis hypogaea* L.) (Figura 2). A colheita da soja e amendoim foi realizada nos meses de março e abril, respectivamente. As crotalárias não foram anteriormente dessecadas, roçadas ou incorporadas para o plantio da cana e, portanto, o processo de abertura de sulcos foi realizado sem nenhum manejo prévio destinado à adubação verde.

Após encerramento de ciclo das culturas antecessoras, o plantio da cana foi realizado em maio de 2016. A abertura dos sulcos foi efetuada com a plantadora de cana-de-açúcar de duas linhas espaçadas em 1,5 m, com profundidade de 50 a 55 cm e base larga. A distribuição dos toletes no fundo do sulco foi feita manualmente, aproximadamente, 20 gemas viáveis por metro. A adubação de plantio da cana foi constituída pela aplicação incorporada ao solo de 130 kg ha⁻¹ de P₂O₅, na forma de fosfato monoamônico (MAP, 10% N e 52% P₂O₅), e 125 kg ha⁻¹ de K₂O, na forma de cloreto de potássio (KCl), correspondendo ao final aproximadamente 25 kg ha⁻¹ de N, 56 kg ha⁻¹ de P e 104 kg ha⁻¹ de K, em profundidade

estimada de 60 cm. Concomitantemente ao plantio e adubação com fertilizantes sólidos, foi aplicado fertilizantes líquidos para suprimento de Mo, Cu, Mn e Zn, no fundo de plantio (Anexo A). A adubação nitrogenada da cana-planta ainda foi complementada com aplicação de 50 kg ha⁻¹ de N em cobertura, na forma de nitrato de amônio (NH₄NO₃). Logo após o depósito dos toletes no sulco, foi realizada a aplicação de inseticida (Regent, 800 WG, na dose de 250 g ha⁻¹) e fungicida (Priori Xtra, na dose de 1,5 L ha⁻¹), e o fechamento dos sulcos de plantio em profundidade final aproximada de 6 cm de solo.

A variedade escolhida para estudo foi a RB966928, a segunda mais planta da região Centro-Sul, segundo o censo varietal do Instituto Agronômico de Campinas (Braga Junior et al., 2021). Indicada para ambientes de médio a alto potencial e considerada de maturação média, a RB966928 é comumente caracterizada pela boa brotação em condições de colheita mecanizada e pelo teor de sacarose. A variedade foi plantada próximo ao período de inverno e colhida no meio de safra (entre os meses de julho e agosto) e, portanto, conduzida em sistema de cana de ano e meio.

Com a colheita mecanizada da cana-planta em julho de 2017, foi realizada a subdivisão das parcelas que consistiu em quatro níveis de adubação nitrogenada de soqueira, com base na quantidade de N exportado de cada parcela. O N em soqueira foi distribuído manualmente, na superfície do solo e em faixa, com distância de 15 cm da linha do plantio, na forma de nitrato de amônio. Durante aplicação das doses de N em soqueira, a adubação potássica foi realizada com KCl, na dose de 120 kg ha⁻¹ de K₂O (± 100 kg ha⁻¹ K). Além da adubação de plantio e aplicação de N e K em soqueira, foi realizado a aplicação foliar de micronutrientes, especialmente B e Zn, no mês de dezembro (Anexo A), podendo estar associado à aplicação de defensivos, conforme a necessidade.

O controle de pragas, doenças e plantas daninhas foi efetuado ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura, mediante aplicação de defensivos agrícolas recomendados para a cultura (Anexo A), de acordo com a necessidade. As principais pragas incidentes na área foram broca da cana-de-açúcar (*Diatraea saccharalis*) e cigarrinha-das-raízes (*Mahanarva fimbriolata*), ambas controladas somente por produto químico. Ao final de cada ciclo, o processo de maturação foi auxiliado pela aplicação de maturador comercial (Sugar Plus), composto de água amoniacal e cloreto de potássio, na dose de 2 L ha⁻¹, 30 dias antes da colheita, a fim de estimular a produção de complexos enzimáticos que favorecem a transferência e acúmulo de sacarose do colmo.

Os dados de pluviosidade, temperatura, umidade relativa, radiação e evapotranspiração foram monitorados na estação meteorológica automatizada da propriedade

(Vantage Pro II, Decagon Devices, Califórnia – EUA). O balanço hídrico foi calculado pelo método de Penman-Monteith (Figura 3). O coeficiente da cultura (K_c) foi baseado no levantamento da evapotranspiração recomendado por Dias e Sentelhas (2016). A capacidade de água disponível (CAD) considerada foi 168 mm, conforme critérios de Pereira et al. (2002).

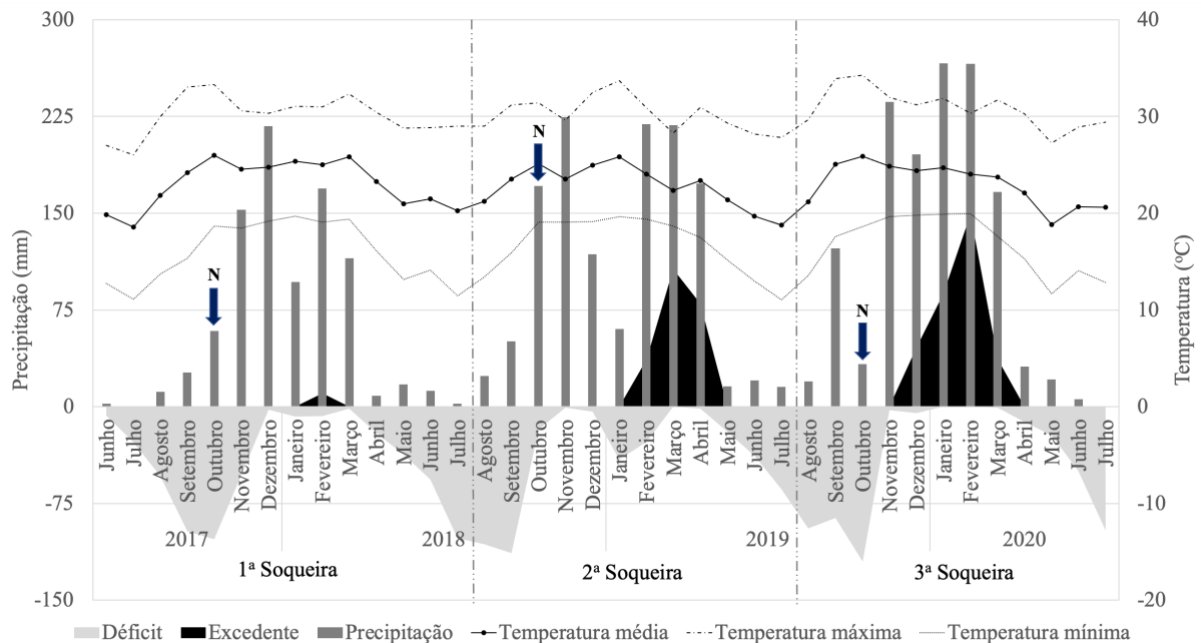


Figura 3. Balanço hídrico sequencial, precipitação e temperaturas do ar mensais registradas para os anos agrícolas de 2017 a 2020, no período de desenvolvimento das três primeiras soqueiras.

2.2.2. Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental (Figura 4) foi de blocos ao acaso, em esquema de parcelas subdivididas, com quatro repetições. As unidades experimentais foram compostas por cinco linhas de cana com 10 m de comprimento, o que compreendeu em área total de 75 m². O experimento foi dividido em duas áreas experimentais, de acordo com o manejo do solo empregado durante a renovação do canal (plântio convencional e plântio direto).

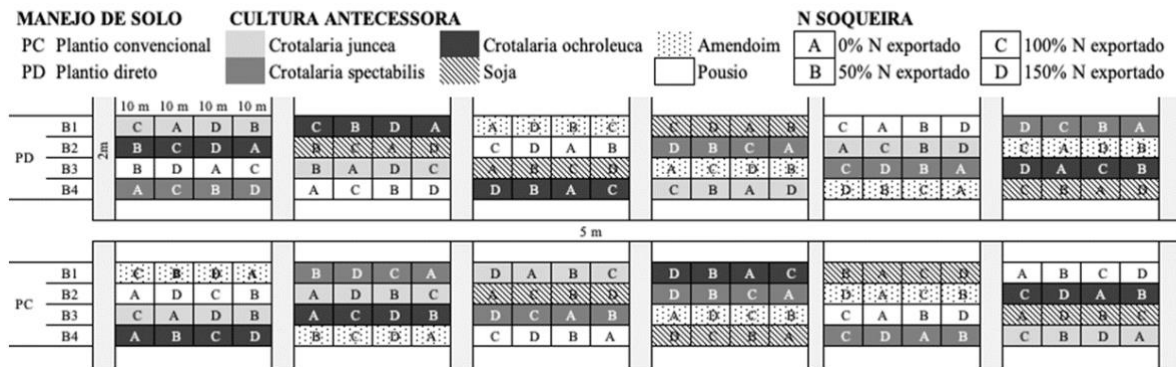


Figura 4. Esquema do delineamento experimental e tratamentos.

As duas áreas experimentais foram delineadas de forma espelhada e envolveram os seguintes fatores: sucessão de culturas (fator primário) e adubação nitrogenada de soqueira (fator secundário). O fator primário foi composto por pousio (sem adubação verde) e uso de cinco leguminosas, sendo duas culturas com fins comerciais (soja e amendoim) e três espécies distintas de crotalárias (*Crotalaria juncea*, *Crotalaria spectabilis*, *Crotalaria ochroleuca*). O fator secundário, oriundo da subdivisão de parcelas, foi constituído pelos tratamentos da adubação nitrogenada de soqueira: controle (sem N) e três doses de nitrogênio (50, 100 e 150% da quantidade de N exportado na colheita antecessora).

Conforme citado, as doses de N foram aplicadas com base na produtividade de cada parcela. Como exemplo, considerando que 1 Mg de cana colhida possa ser restituído pela aplicação de 1 kg de N (Vitti et al., 2006), na unidade experimental que produzir 80 Mg ha⁻¹ será aplicado 0, 40, 80 ou 120 kg N ha⁻¹, respectivamente, para repor 0, 50, 100 ou 150% do N exportado. Diante disso, com base na combinação de seis sistemas de sucessão, quatro níveis de N em soqueira, replicados em quatro blocos, o arranjo experimental composto pelas duas áreas totalizou 192 parcelas.

A produção de biomassa seca e produtividade de grãos das culturas antecessoras foram avaliadas ao final dos seus respectivos ciclos (Tabela 2). O acúmulo de nutrientes na biomassa das leguminosas foi devidamente quantificada para inferir possíveis associações de respostas pela sucessão de culturas (Tabela 3).

Tabela 2. Produção de biomassa seca das culturas antecessoras e produtividade de grãos das culturas comercialmente exploradas, no período de renovação do canavial.

Antecessora	Manejo de solo		
	PC	PD	Média
	Biomassa seca (Mg ha⁻¹)		
Amendoim	6,0 ± 1,2	7,1 ± 0,7	6,6 ± 0,4
<i>Crotalaria juncea</i>	19,2 ± 2,9	20,2 ± 2,9	19,7 ± 1,9
<i>Crotalaria ochroleuca</i>	25,5 ± 4,4	19,8 ± 1,4	22,6 ± 2,4
<i>Crotalaria spectabilis</i>	7,3 ± 0,3	7,0 ± 1,0	7,1 ± 0,5
Soja	3,0 ± 0,0	3,2 ± 0,1	3,1 ± 0,1
Média	12,2 ± 2,2	11,5 ± 1,7	
	Produtividade de grãos (kg ha⁻¹)		
Amendoim	4571,8 ± 349,4	4412,5 ± 356,3	4492,1 ± 233,0
Soja	2253,5 ± 105,5	2607,3 ± 105,1	2430,4 ± 96,0

PC: Plantio convencional; PD: Plantio direto. Média ± erro padrão da média (n = 48).

Tabela 3. Acúmulo de nutrientes das culturas antecessoras, empregadas no período de reforma do canavial.

(A)	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	g kg ⁻¹						mg kg ⁻¹				
	PC										
A	81,6 ± 15,4	4,7 ± 0,8	130,6 ± 30,0	70,3 ± 16,0	29,8 ± 5,5	6,9 ± 1,4	150,4 ± 25,4	48,2 ± 9,9	9175 ± 4411	964 ± 205	140,4 ± 39,6
CJ	119,2 ± 23,0	8,1 ± 1,2	219,0 ± 33,4	50,7 ± 7,7	28,3 ± 4,6	16,9 ± 2,6	352,7 ± 72,5	88,8 ± 20,8	3993 ± 1090	453 ± 66	230,3 ± 35,0
CO	220,2 ± 34,6	15,6 ± 2,5	250,2 ± 45,7	130,0 ± 25,6	58,3 ± 10,8	34,7 ± 7,1	365,4 ± 88,1	136,4 ± 23,2	20460 ± 6089	3810 ± 725	349,0 ± 43,5
CS	89,3 ± 19,6	6,4 ± 1,3	155,1 ± 4,7	60,2 ± 7,9	16,5 ± 0,9	16,0 ± 1,1	210,2 ± 26,1	73,8 ± 12,3	1283 ± 205	679 ± 40	165,6 ± 12,2
S	20,0 ± 3,0	1,5 ± 0,2	31,7 ± 0,4	21,1 ± 1,4	16,4 ± 1,1	1,9 ± 0,2	60,3 ± 7,0	12,0 ± 0,1	829 ± 112	563 ± 20	33,0 ± 1,1
	PD										
A	136,5 ± 16,4	7,5 ± 0,9	164,3 ± 11,0	82,6 ± 5,9	32,2 ± 3,1	10,7 ± 1,3	187,0 ± 17,3	56,9 ± 5,6	4537 ± 334	700 ± 155	201,4 ± 23,6
CJ	124,1 ± 29,1	10,8 ± 2,2	239,0 ± 52,9	57,4 ± 12,5	42,4 ± 10,0	22,4 ± 3,4	286,1 ± 76,7	131,8 ± 24,1	2820 ± 898	2124 ± 500	309,4 ± 90,8
CO	195,5 ± 14,8	12,0 ± 1,5	244,9 ± 31,2	104,6 ± 12,5	49,5 ± 6,9	23,7 ± 1,9	366,6 ± 81,9	118,5 ± 16,0	7508 ± 1368	3943 ± 296	277,8 ± 37,0
CS	114,1 ± 16,9	8,0 ± 1,0	148,9 ± 22,8	81,7 ± 13,0	16,6 ± 2,1	13,9 ± 2,3	256,6 ± 31,9	73,2 ± 13,3	1810 ± 329	804 ± 122	179,0 ± 28,7
S	21,7 ± 1,3	1,0 ± 0,2	30,3 ± 2,3	18,4 ± 0,6	14,9 ± 0,8	2,1 ± 0,1	70,0 ± 7,0	12,7 ± 0,5	351 ± 56	507 ± 30	39,4 ± 3,2

(A): Cultura antecessora; PC: Plantio convencional; PD: Plantio direto. A: Amendoim; CJ: *Crotalaria juncea*; CO: *Crotalaria ochroleuca*; CS: *Crotalaria spectabilis*; P: Pousio; S: soja. Média ± erro padrão da média (n = 4).

2.2.3. Avaliações e análises

O perfilhamento da cultura foi avaliado próximo ao período de verão, aproximadamente 120 dias após o corte, com intuito de corresponder ao pico de perfilhamento. Essa avaliação foi orientada pelo desenvolvimento vegetativo descrito por Bonnett et al. (2006), no qual define as fases de perfilhamento primário e secundário da cultura. Ao longo do processo, a fase de perfilhamento é cessada e inicia o período de alongação dos colmos. Após a estabilização da alongação, a contagem geralmente coincide com o número final de colmos comercialmente viáveis, também denominado de densidade de colmos, realizada juntamente a biometria no período de colheita. O perfilhamento e a densidade de colmos foram conduzidos por meio da contagem de perfilhos em três linhas centrais da parcela de 5 m de comprimento (linha 2, 3 e 4), no mês de dezembro e período de colheita, respectivamente, e expressos em número de perfilhos por metro (perfilhos/colmos m⁻¹).

A avaliação dos parâmetros biométricos e tecnológicos do colmo foram realizados no período de colheita dos três ciclos subsequentes (primeira soqueira, segunda soqueira e terceira soqueira) entre os meses de julho a agosto de cada safra.

O acúmulo de biomassa seca da parte aérea de plantas foi determinada no momento do corte, em 2 m lineares. Essa amostragem alternou anualmente entre as três linhas centrais da parcela para evitar desgaste por pisoteio e assegurar melhor aleatorização de amostragem. A biometria de plantas foi conduzida no campo por meio do particionamento manualmente dos compartimentos vegetais de ponteiro, colmo e folha. A estimativa para hectare foi calculada a partir do número de colmos viáveis da biometria, da massa média por perfilho e dos metros lineares do hectare (6.667 m de sulcos). Após a separação e pesagem em balança eletrônica da massa fresca dos compartimentos no campo, o material vegetal subamostrado de cada compartimento foi pré-triturado em picadora e encaminhado ao Laboratório de Isótopos Estáveis (CENA/USP). Em seguida, as amostras vegetais foram secas em estufas com circulação de ar à 65°C até a estabilização da massa e finamente trituradas em moinho tipo Wiley. Após o processo de secagem e moagem, a produtividade de biomassa seca foi estimada por hectare (Mg ha⁻¹), com base na população de plantas da biometria. Para fins de facilitar a interpretação dos resultados, as frações de folha seca e ponteiro foram agregadas por somatória em um único compartimento vegetal (FS+P).

A produtividade final de colmos por hectare (TCH) foi estimada ao final de cada ciclo da cana-de-açúcar (cana-planta, 1ª, 2ª e 3ª soqueira) nos dois metros de sulco da

biometria. Após a separação dos compartimentos vegetais, a biomassa de colmos foi extrapolada para 1 ha pela média das repetições. Considerando o grande número de parcelas, a logística e atividades operacionais, a partir de comparações conduzidas nos primeiros cortes, a TCH da biometria foi preferida em detrimento da TCH por densidade e de transbordo para garantir melhor controle da precisão de dados.

A determinação dos parâmetros tecnológicos da matéria prima foi realizada por meio da coleta de dez colmos selecionados ao acaso na biometria, os quais foram posteriormente triturados e enviados ao laboratório do grupo Biosev, unidade Santa Elisa, em Sertãozinho, São Paulo. Os parâmetros industriais do colmo foram determinados pela metodologia proposta por Fernandes (2003), para detalhamento dos seguintes aspectos: brix (%), pureza (%), fibra (%), teor de sacarosa aparente (Pol, %), açúcares redutores (AR, %) e açúcar total recuperável (ATR, em kg Mg⁻¹). A produtividade de açúcar (TPH, Mg ha⁻¹) foi obtida pela multiplicação entre a produtividade de colmos (TCH, Mg ha⁻¹) e o Pol da cana (%) de cada parcela, dividido por 100.

Adicionalmente, o número de perfilhos nos períodos de meio (janeiro de 2019) e fim (abril de 2019) do perfilhamento foi avaliado para acompanhar os impactos de adversidades climáticas do ano agrícola sobre a estabilização da densidade de colmos.

2.2.4. Análise de dados e estatística

A análise estatística dos resultados foi realizada a partir da análise conjunta de dois locais (PC e PD) e aplicação de modelos lineares mistos, em esquema fatorial triplo. Os modelos lineares mistos são empregados para interpretação de dados submetidos a fatores aleatórios e fixos. Desse modo, esse tipo de análise apresenta duas fases, na qual uma parte é compreendida na fixa do modelo linear, baseada na estimativa e testes de hipóteses por funções lineares estimáveis dos efeitos fixos, e outra parte que é atribuída aos efeitos aleatórios, por meio da análise sequencial, após descontar os efeitos fixos e a estabelecer a caracterização dos efeitos residuais. Em geral, a análise conjunta é usada para avaliar as interações com ambientes (efeito de local e ano) e verificar efeitos gerais, quando presentes.

O fator manejo de solo foi conduzido em faixas contínuas, incluindo todos os níveis dos demais fatores, para facilitar a instalação e manejo. Nesse sentido, essa variável independente apresenta restrições atreladas ao princípio de casualização e, portanto, foi embutida no modelo de análise como um efeito fixo de aleatorização dependente. Isso porque, diferentemente do que usualmente é convencionado, a segregação das áreas não representa

um controle local, uma vez que não se refere a fatores aleatórios, como clima, solo e demais aspectos ambientais.

A parcela principal foi formada pelos sistemas de sucessão (amendoim, *Crotalaria spectabilis*, *Crotalaria juncea*, *Crotalaria ochroleuca*, soja e pousio) e a subparcela foi constituída pela adubação nitrogenada de soqueira, em quatro níveis quantitativos (0, 50, 100 e 150% do N exportado na colheita antecessora). Para análise global de três soqueiras dos sistemas de manejo, considerando ainda as adversidades relacionadas à sazonalidade de cada rebrota, foi inserido no modelo matemático o efeito de soqueira, como fator aleatório. Tendo em vista à falta de randomização do efeito de manejo do solo e aleatoriedade do efeito de soqueira, a análise estatística não abrange a interação quádrupla dos fatores, o que possibilitou a combinação do fator soqueira apenas com as variáveis independentes de repetição essencialmente genuínas, como cultura antecessora e doses de N. A título de histórico e detalhamento pontual, para obtenção sob uma ótica sazonal, os fatores fixos foram também analisados isoladamente ano a ano para TCH e TPH, desde o primeiro corte (cana-planta).

Previamente, os dados foram submetidos aos testes de pressuposições de normalidade dos resíduos e homogeneidade das variâncias pelos testes de Shapiro-Wilk e Bartlett, respectivamente. Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) pelo teste F ($p \leq 0,1$), considerando os efeitos principais e interações (Anexo B). O efeito das doses de N foi avaliado por análise de regressão linear e quadrática, de acordo com significância ($p \leq 0,1$) e análise do coeficiente de determinação ajustado ($R^2 \geq 0,6$) dos modelos. Para os demais fatores qualitativos, os efeitos principais e os desdobramentos das interações significativas foram comparados pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,1$).

Todas as análises estatísticas e as representações gráficas foram realizadas no programa livre R (R Core Team, 2021). Para análise de variância do tipo III e a comparação de média no programa estatístico, foram empregados os pacotes ‘lmerTest’ (Kuznetsova et al., 2017), ‘emmeans’ (Lenth et al., 2021), e ‘multcomp’ (Hothorn et al., 2008).

2.3. Resultados

2.3.1. Perfilhamento, densidade e biomassa seca

A análise de variância de parâmetros biométricos de soqueiras da cana-de-açúcar revelou significância estatística no perfilhamento para a interação entre doses de nitrogênio e soqueira (Anexo B). Para todas as doses de nitrogênio analisadas, a terceira soqueira foi a que

proporcionou maior perfilhamento (média de 23,4 perfilhos m^{-1}), enquanto a segunda soqueira apresentou os menores valores desse parâmetro biométrico (média de 13,6 perfilhos m^{-1}) (Tabela 4). Efeito da aplicação de nitrogênio foi constatada somente para a terceira soqueira com um ajuste de regressão polinomial de segunda ordem ($p < 0,001$).

Embora tenha sido identificado um possível efeito da interação de doses de nitrogênio com culturas antecessoras na densidade de colmos ($p = 0,14$), o teste estatístico não identificou diferenças entre culturas antecessoras nas doses aplicadas (Tabela 5). A cultura do amendoim, por sua vez, foi a que proporcionou menor perfilhamento médio independente da dose (11,9 perfilhos m^{-1}). Diferenças entre doses também não foram significativas.

Na análise da produção de biomassa seca de folha seca mais ponteiro, a interação entre manejo do solo, cultura antecessora e dose de nitrogênio apresentou resultados bastante variados (Figura 5). Somente foi identificada uma menor produção de biomassa para o plantio convencional quando foi aplicada a dose de 150 kg por % N exportado ha^{-1} na cultura CO. Diferenças entre doses, por outro lado, foram identificadas no plantio convencional em CJ e P. Enquanto sob P a dose máxima de 150 kg por % N exportado ha^{-1} proporcionou maior acúmulo de biomassa seca atingindo 14,1 Mg ha^{-1} a partir de uma regressão polinomial de primeiro grau ($p = 0,025$), o ajuste de regressão polinomial de segundo grau ($p = 0,093$) para CJ identificou uma dose máxima de 102,5 kg por % N exportado ha^{-1} que proporcionou 12,83 Mg ha^{-1} .

Os efeitos experimentais simplificados também foram observados no acúmulo de biomassa seca em colmos (Figura 6). Enquanto a segunda soqueira apresentou o maior acúmulo de biomassa seca acima de 35 Mg ha^{-1} , a primeira e terceira soqueira não se diferiram significativamente entre si e não superaram o patamar de 30 Mg ha^{-1} . Além disso, uma regressão polinomial de segunda ordem ($p = 0,002$) foi ajustada para o efeito simples da adubação nitrogenada no acúmulo de biomassa seca em colmos. O acúmulo máximo foi de 31 Mg ha^{-1} na dose de 98 kg por % N exportado ha^{-1} .

Tabela 4. Interação entre soqueira e dose de nitrogênio no perfilhamento (perfilhos m⁻¹), avaliado aproximadamente 120 dias após colheita para as três primeiras soqueiras (safras de 2018 a 2020).

Soqueira	Dose de N (kg por % N exportado ha ⁻¹)				Equação	R ²	p-valor	Média
	0	50	100	150				
1	14,9 ± 0,3 b	14,9 ± 0,1 b	15,5 ± 0,1 b	15,3 ± 0,1 b	-	-	-	15,1 ± 0,1
2	13,5 ± 0,2 c	13,5 ± 0,2 c	14,2 ± 0,2 c	13,2 ± 0,2 c	-	-	-	13,6 ± 0,1
3	21,9 ± 0,5 a	23,5 ± 0,5 a	24,1 ± 0,5 a	24,2 ± 0,6 a	y = -0,0001x ² + 0,037x + 21,936	0,972	0,001	23,4 ± 0,3
Média	16,8 ± 5,6	17,3 ± 6,8	17,9 ± 6,6	17,6 ± 7,2				

Média ± erro padrão da média (n = 48) seguida por letras minúsculas distintas indicam diferenças nas colunas (culturas antecessoras) pelo teste de Tukey (p ≤ 0,10). - Dado numérico não disponível.

Tabela 5. Interação entre cultura antecessora e dose de nitrogênio na densidade de colmos (colmos m⁻¹) para as três primeiras soqueiras (safras de 2018 a 2020).

Cultura Antecessora	Dose de N (kg por % N exportado ha ⁻¹)				Equação	R ₂	p-valor	Média
	0	50	100	150				
Amendoim	11,8 ± 0,7 a	12,0 ± 0,4 a	11,4 ± 0,5 a	12,4 ± 0,4 a	-	-	-	11,9 ± 0,2
<i>Crotalaria juncea</i>	11,8 ± 0,3 a	11,5 ± 0,2 a	12,1 ± 0,4 a	12,4 ± 0,3 a	-	-	-	12,0 ± 0,2
<i>Crotalaria ochroleuca</i>	12,2 ± 0,6 a	12,3 ± 0,7 a	12,0 ± 0,6 a	12,8 ± 0,7 a	-	-	-	12,3 ± 0,3
<i>Crotalaria spectabilis</i>	12,1 ± 0,3 a	12,0 ± 0,4 a	12,5 ± 0,3 a	11,9 ± 0,3 a	-	-	-	12,1 ± 0,2
Pousio	12,0 ± 0,6 a	12,3 ± 0,8 a	11,9 ± 0,5 a	12,6 ± 0,4 a	-	-	-	12,2 ± 0,3
Soja	12,1 ± 0,5 a	12,6 ± 0,5 a	12,3 ± 0,7 a	11,8 ± 0,6 a	-	-	-	12,2 ± 0,3
Média	12,0 ± 0,2 a	12,1 ± 0,2 a	12,0 ± 0,2 a	12,3 ± 0,2 a	-	-	-	

Média ± erro padrão da média (n = 24) seguida por letras minúsculas distintas indicam diferenças nas colunas (culturas antecessoras) pelo teste de Tukey (p ≤ 0,10). - Dado numérico não disponível.

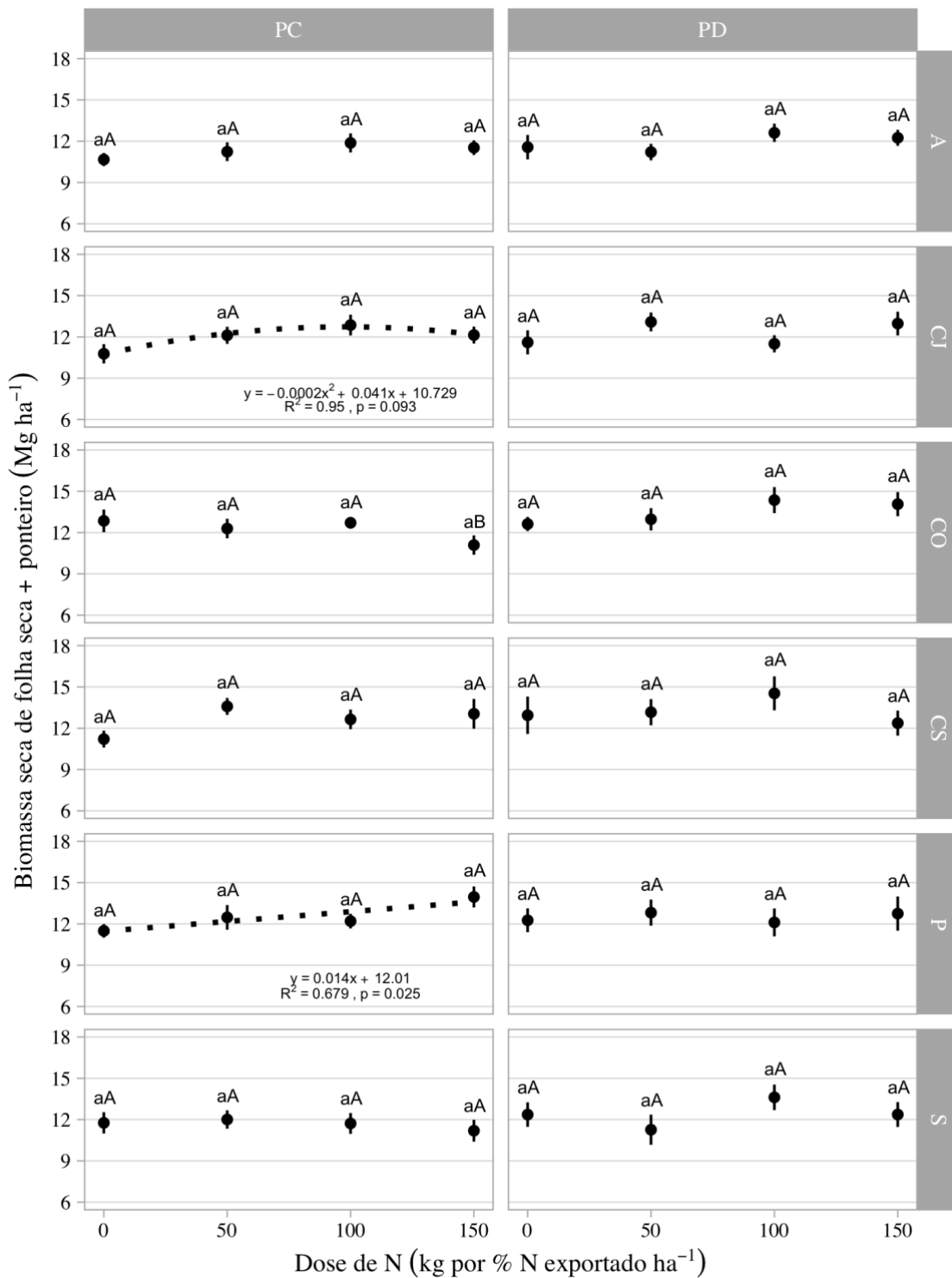
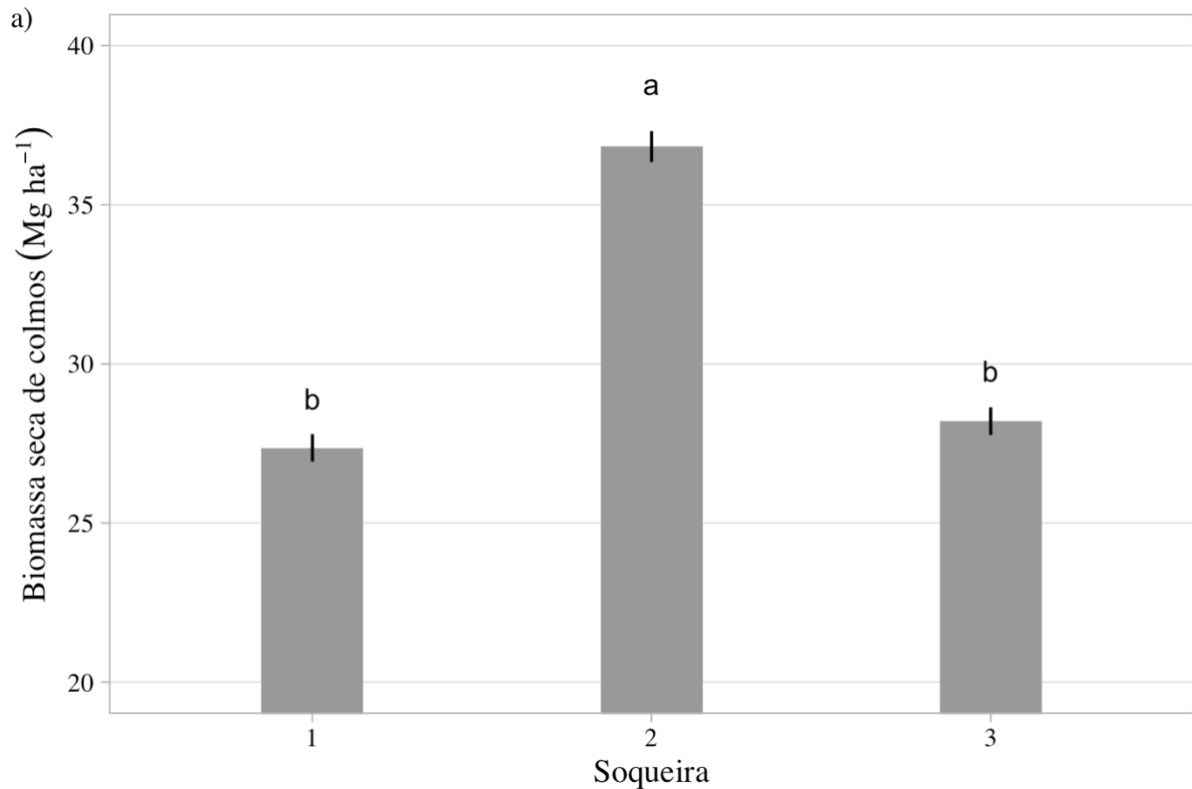


Figura 5. Interação entre manejo do solo, cultura antecessora e dose de nitrogênio no acúmulo de biomassa seca de folha seca + ponteiro (Mg ha⁻¹) para as três primeiras soqueiras (safras 2018 a 2020). PC: Plantio convencional; PD: Plantio direto. A: Amendoim; CJ: *Crotalaria juncea*; CO: *Crotalaria ochroleuca*; CS: *Crotalaria spectabilis*; P: Pousio; S: soja. Letras minúsculas distintas indicam diferenças entre as culturas antecessoras, e letras maiúsculas distintas indicam diferenças entre os tipos de manejo de solo, pelo teste de Tukey ($p \leq 0,10$). Os pontos representam os valores médios e as linhas verticais representam o erro padrão da média do tratamento ($n = 12$). As linhas pontilhadas indicam o ajuste do modelo de regressão ($p \leq 0,10$).



b)

Equação : $y = -0.0003x^2 + 0.059x + 28.962$, $R^2 = 0.939$, $p = 0.002$

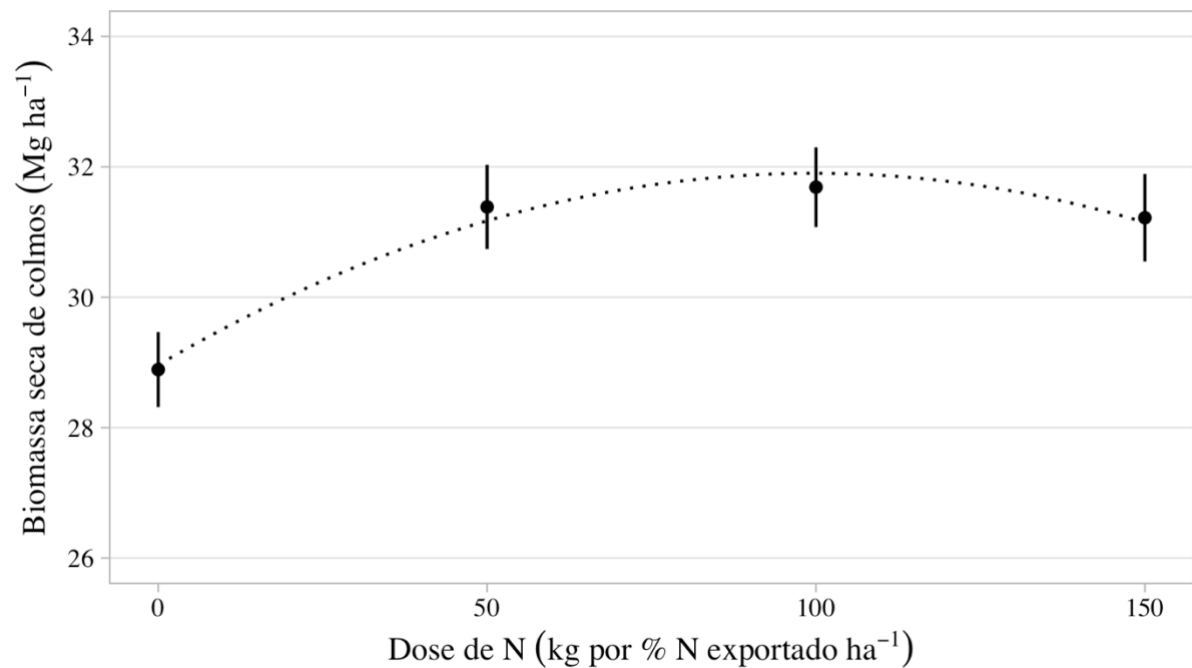


Figura 6. Efeitos da soqueira (a) e dose de nitrogênio (b) no acúmulo de biomassa seca de colmos (Mg ha⁻¹) para as três primeiras soqueiras (safras 2018 a 2020). Os pontos representam os valores médios e as linhas verticais representam o erro padrão da média do tratamento (n = 192 para soqueira e n = 144 para dose de N). Letras minúsculas distintas indicam diferenças entre as soqueiras pelo teste de Tukey ($p \leq 0,10$). A linha pontilhada indica o ajuste do modelo de regressão ($p \leq 0,10$).

2.3.2. Produtividade de colmos e de açúcar

Na produtividade de colmos e açúcar, que representam os principais parâmetros de eficiência de produção do sistema agrícola canavieiro, a análise de variância foi realizada de forma separada em um primeiro momento para a cana planta e as três soqueiras (Anexo C). Uma hipótese testada foi de verificar o efeito do manejo do solo e culturas antecessoras na cana planta, uma vez que se esperava um maior impacto desses tratamentos no início da produção do canavial (Tabela 6). Na produtividade de colmos, as diferenças médias entre culturas variaram entre 122,2 e 129,9 Mg ha⁻¹, com menor desempenho para a cultura da soja. Na comparação dos tipos de manejo do solo, o plantio direto proporcionou em média 4 Mg a mais que o plantio convencional. Resultados semelhantes foram encontrados para a produção de açúcar, onde as culturas antecessoras soja e amendoim não conseguiram superar a produtividade média de açúcar de 20 Mg, e o plantio convencional proporcionou um desempenho pior que o plantio direto (Tabela 6). Entretanto, embora tenham sido identificadas diferenças numéricas entre os tratamentos, a análise de variância não revelou significância estatística para manejo do solo e cultura antecessora na cana-planta.

Tabela 6. Produtividade de colmos e açúcar (Mg ha⁻¹) da cana-planta (safra 2016/2017).

Cultura Antecessora	Manejo do solo		
	PC	PD	Média
Produtividade de colmos (Mg ha⁻¹)			
Amendoim	129,8 ± 8,9	125,5 ± 9,5	127,7 ± 6,1
<i>Crotalaria juncea</i>	133,0 ± 9,6	126,6 ± 14,1	129,8 ± 8,0
<i>Crotalaria ochroleuca</i>	133,6 ± 10,5	122,5 ± 14,3	128,0 ± 8,5
<i>Crotalaria spectabilis</i>	120,6 ± 6,3	139,2 ± 12,5	129,9 ± 7,4
Pousio	116,6 ± 9,7	140,3 ± 7,0	128,4 ± 7,1
Soja	119,9 ± 12,6	124,6 ± 7,1	122,2 ± 6,8
Média	125,6 ± 3,8	129,8 ± 4,3	
Produtividade de açúcar (Mg ha⁻¹)			
Amendoim	19,1 ± 1,4	20,0 ± 1,6	19,5 ± 1,0
<i>Crotalaria juncea</i>	21,1 ± 1,6	20,1 ± 2,5	20,6 ± 1,4
<i>Crotalaria ochroleuca</i>	21,5 ± 1,7	19,0 ± 2,0	20,3 ± 1,3
<i>Crotalaria spectabilis</i>	19,4 ± 1,0	22,7 ± 1,9	21,0 ± 1,2
Pousio	18,9 ± 1,6	22,4 ± 1,7	20,7 ± 1,3
Soja	18,9 ± 2,1	19,8 ± 0,7	19,4 ± 1,0
Média	19,8 ± 0,6	20,7 ± 0,7	

PC: Plantio convencional; PD: Plantio direto. Média ± erro padrão da média (n = 48).

Na primeira soqueira, por outro lado, a ANOVA identificou diferenças entre manejo do solo na produtividade de colmos e açúcar com nível de confiança maior que 90%. O plantio direto foi o tratamento que proporcionou maiores produtividades em ambos os parâmetros, embora o teste de média tenha apresentado letras iguais (Figura 7). Enquanto o plantio direto proporcionou uma produtividade média de colmos de 96,5 Mg ha⁻¹, o plantio convencional, por sua vez, atingiu somente 92,5 Mg ha⁻¹. Na produtividade de açúcar, a diferença média foi cerca de 0,5 Mg, com o plantio direto atingindo 15,9 Mg ha⁻¹.

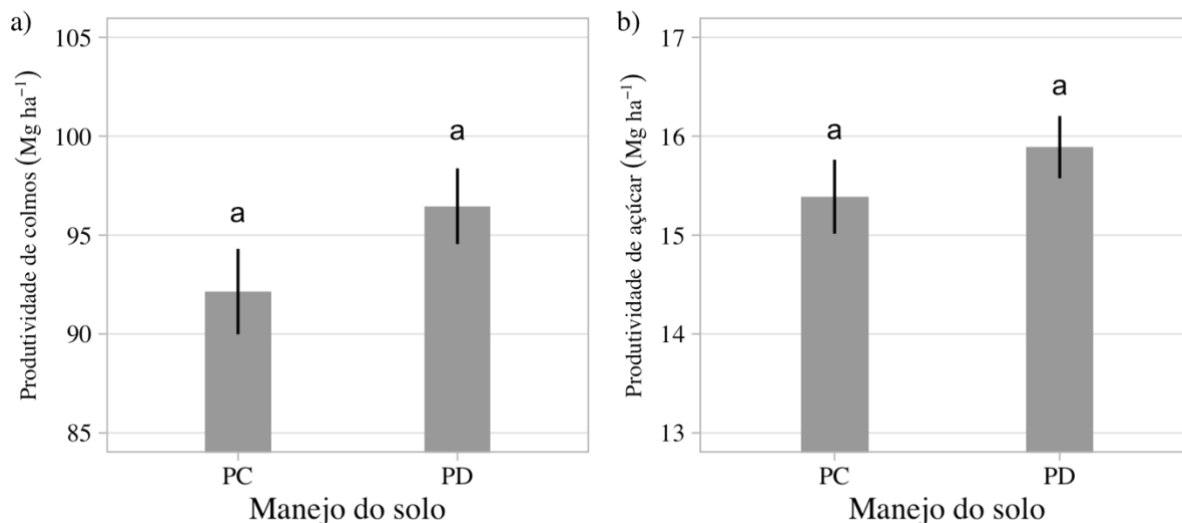


Figura 7. Efeito do manejo do solo na produtividade de colmos (a) e açúcar (b) (Mg ha⁻¹) para primeira soqueira (safra 2017/2018). PC: Plantio convencional; PD: Plantio direto. Letras minúsculas distintas indicam diferenças entre manejos do solo, pelo teste de Tukey ($p \leq 0,10$). As linhas verticais representam o erro padrão da média do tratamento ($n = 96$).

Outro efeito experimental identificado foi a adubação nitrogenada na produtividade de açúcar da segunda soqueira (Figura 8). Um modelo de regressão polinomial de segunda ordem foi ajustado com p-valor de 0,043. Nesse ajuste, que obteve um R^2 de 0,946, a produtividade máxima de açúcar de 92,5 Mg ha⁻¹ foi obtida com a dose de 135% por kg de N exportado ha⁻¹.

Na terceira e última soqueira analisada, a interação entre manejo do solo, cultura antecessora e adubação nitrogenada foi significativa tanto para produtividade de colmos quanto na produtividade de açúcar (Tabela 7). O efeito das doses de nitrogênio foi mais frequente nos tratamentos com plantio convencional, ocorrendo em dois tipos de crotalárias: CJ e CS. Enquanto a CJ apresentou uma regressão polinomial de segunda ordem ($p = 0,002$) que atinge uma produtividade máxima de colmos de 117 Mg ha⁻¹ na dose de 96% por kg de N exportado ha⁻¹, a CS atinge uma produtividade máxima de colmos de 126 Mg ha⁻¹ na dose de 150% por kg de N exportado ha⁻¹ a partir de uma regressão polinomial de primeira ordem ajustada ($p = 0,026$). No plantio direto, somente a CO apresentou efeito da adubação nitrogenada na produtividade de colmos, a qual foi ajustada por uma regressão polinomial de segunda ordem ($p = 0,089$) que descreve uma produtividade máxima de 116 Mg ha⁻¹ na dose de 88% por kg de N exportado ha⁻¹.

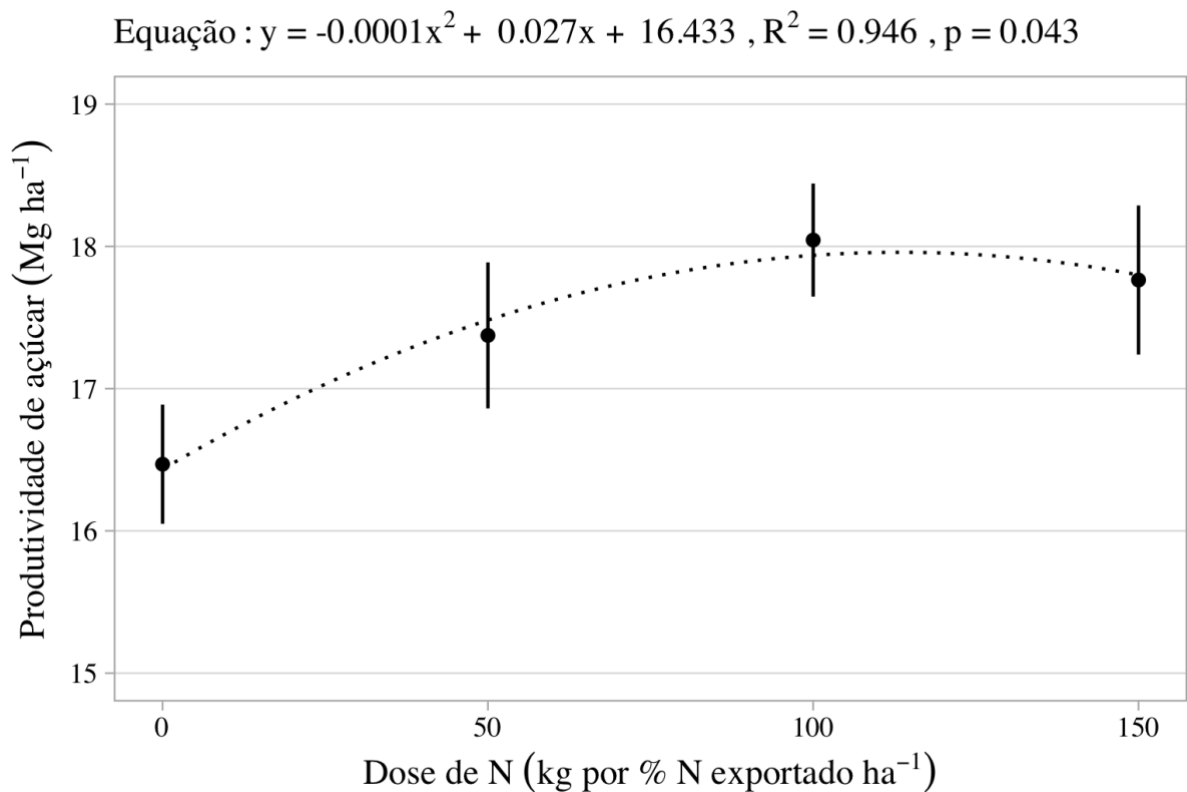


Figura 8. Efeito da dose de nitrogênio na produtividade de açúcar (Mg ha⁻¹) para segunda soqueira (safra 2018/2019). Os pontos representam os valores médios e as linhas verticais representam o erro padrão da média do tratamento (n = 48). A linha pontilhada indica o ajuste do modelo de regressão ($p \leq 0,10$).

Para a produtividade de açúcar da terceira soqueira, os efeitos foram semelhantes ao colmo, com exceção do ajuste de doses no plantio direto (Tabela 7). A CJ apresentou um ajuste de regressão polinomial de segunda ordem ($p = 0,003$) que proporciona uma produtividade máxima de açúcar de 21 Mg ha⁻¹ na dose de 88% por kg de N exportado ha⁻¹. Por sua vez, a CS apresentou um ajuste de regressão polinomial de primeira ordem ($p = 0,019$) que proporciona uma produtividade máxima de açúcar de 23 Mg ha⁻¹ na dose de 150% por kg de N exportado ha⁻¹.

Tabela 7. Interação entre manejo do solo, cultura antecessora e dose de N na produtividade de colmos e açúcar (Mg ha⁻¹) para terceira soqueira (safra 2019/2020).

(A)	(M)	(N) (kg por % N exportado ha ⁻¹)				Equação	R ²	P
		0	50	100	150			
Produtividade de colmos (Mg ha⁻¹)								
A	PC	86,0 ± 8,9 aA	104,0 ± 12,4 aA	84,8 ± 5,7 aA	91,5 ± 7,2 bA	-	-	-
CJ	PC	73,0 ± 6,8 aA	101,7 ± 8,9 aA	116,6 ± 2,3 aA	90,4 ± 7,6 bA	y = -0,005x ² + 0,957x + 71,661	0,889	0,002
CO	PC	100,5 ± 10,5 aA	115,5 ± 2,7 aA	98,4 ± 4,5 aA	100,3 ± 5,4 abA	-	-	-
CS	PC	85,7 ± 12,2 aA	102,2 ± 16,9 aA	103,3 ± 10,0 aA	130,8 ± 11,1 aA	y = 0,273x + 85,053	0,830	0,026
P	PC	93,8 ± 6,1 aA	102,8 ± 12,2 aA	104,4 ± 8,9 aA	107,0 ± 8,3 abA	-	-	-
S	PC	95,7 ± 11,8 aA	105,0 ± 16,1 aA	111,6 ± 14,0 aA	106,1 ± 11,1 abA	-	-	-
A	PD	79,8 ± 10,5 aA	73,1 ± 7,2 bB	90,7 ± 8,5 abA	101,2 ± 10,9 aA	-	-	-
CJ	PD	80,3 ± 7,0 aA	106,4 ± 11,9 abA	94,5 ± 7,1 abA	88,6 ± 6,2 aA	-	-	-
CO	PD	87,1 ± 4,4 aA	106,5 ± 8,0 abA	121,3 ± 11,4 aA	101,1 ± 13,5 aA	y = -0,004x ² + 0,708x + 85,543	0,772	0,089
CS	PD	93,0 ± 9,6 aA	116,6 ± 6,6 aA	97,0 ± 10,8 abA	88,4 ± 6,6 aB	-	-	-
P	PD	65,9 ± 5,8 aB	90,8 ± 9,6 abA	82,7 ± 5,0 bA	94,0 ± 9,6 aA	-	-	-
S	PD	89,8 ± 5,4 aA	100,5 ± 11,2 abA	90,1 ± 16,3 abA	109,3 ± 10,5 aA	-	-	-
Produtividade de açúcar (Mg ha⁻¹)								
A	PC	15,7 ± 1,6 aA	18,9 ± 2,3 aA	15,7 ± 1,0 aA	16,8 ± 1,3 bA	-	-	-
CJ	PC	13,5 ± 1,2 aA	18,8 ± 1,8 aA	21,6 ± 0,4 aA	16,8 ± 1,5 bA	y = -0,001x ² + 0,177x + 13,228	0,892	0,003
CO	PC	18,4 ± 1,9 aA	20,9 ± 0,3 aA	18,5 ± 0,9 aA	18,4 ± 1,1 abA	-	-	-
CS	PC	15,6 ± 2,3 aA	18,3 ± 3,1 aA	19,1 ± 1,8 aA	24,3 ± 2,1 aA	y = 0,054x + 15,326	0,866	0,019
P	PC	16,8 ± 0,9 aA	18,6 ± 2,3 aA	19,5 ± 1,8 aA	19,9 ± 1,6 abA	-	-	-
S	PC	17,8 ± 2,2 aA	19,4 ± 2,9 aA	20,3 ± 2,7 aA	19,7 ± 2,1 abA	-	-	-
A	PD	14,7 ± 2,0 aA	13,2 ± 1,4 bB	16,9 ± 1,6 abA	18,5 ± 2,0 aA	-	-	-
CJ	PD	14,7 ± 1,4 aA	18,7 ± 2,3 abA	17,3 ± 1,2 abA	16,1 ± 1,1 aA	-	-	-
CO	PD	15,7 ± 0,8 aA	19,4 ± 1,4 abA	21,8 ± 2,3 aA	18,4 ± 2,6 aA	-	-	-
CS	PD	16,8 ± 2,0 aA	21,2 ± 1,2 aA	17,8 ± 2,2 abA	15,9 ± 1,1 aB	-	-	-
P	PD	11,8 ± 1,0 aB	16,6 ± 1,5 abA	14,7 ± 1,1 bB	17,1 ± 1,8 aA	-	-	-
S	PD	16,4 ± 1,0 aA	18,1 ± 2,2 abA	16,2 ± 3,0 abA	20,1 ± 2,0 aA	-	-	-

(A): Cultura antecessora; (M): Manejo do solo; (N): Dose de N; PC: Plantio convencional; PD: Plantio direto. A: Amendoim; CJ: *Crotalaria juncea*; CO: *Crotalaria ochroleuca*; CS: *Crotalaria spectabilis*; P: Pousio; S: soja. Média ± erro padrão da média (n = 4) seguida por letras minúsculas distintas indicam diferenças para (A) dentro de (M) e (N), e letras maiúsculas distintas indicam diferenças para (M) dentro de (A) e (N), pelo teste de Tukey (p ≤ 0,10). As equações reportam o ajuste do modelo de regressão (p ≤ 0,10) para (N) dentro de (M) e (A). - Dado numérico não disponível.

Além dos ajustes de regressão, a análise estatística revelou algumas diferenças significativas entre as culturas antecessoras e manejo do solo conforme a dose aplicada na terceira soqueira (Tabela 7). De modo geral, observa-se que tanto para a produtividade de colmos quanto para a produtividade de açúcar os efeitos de cultura antecessoras foram mais evidentes sob plantio direto. Nesta condição, amendoim e pousio proporcionaram menores produtividades nas doses de 50% e 100% por kg de N exportado ha^{-1} . Na condição contrastante, sob plantio convencional, somente na dosagem de 150% por kg de N exportado ha^{-1} os efeitos entre culturas se tornou evidente, com maiores produtividades obtidas com CS. As diferenças de manejo do solo mais significativas aconteceram para P e A, com menor produtividade de colmos e açúcar sob plantio direto e nas doses de 0 e 50% por kg de N exportado ha^{-1} . Além disso, CS também apresentou pior rendimento de ambos os parâmetros sob plantio direto, porém na dosagem de 150% por kg de N exportado ha^{-1} .

Quando todos os tratamentos foram analisados conjuntamente com as soqueiras, os efeitos experimentais que se mostraram significativos foram as culturas antecessoras e adubação nitrogenada analisadas separadamente (Figura 9). Na produtividade de colmos, a cultura que proporcionou maior produtividade de colmos foi a CO, com valor médio de 103 Mg ha^{-1} . Enquanto amendoim proporcionou a menor produtividade média, de 93 Mg ha^{-1} , as demais culturas apresentaram rendimento variando entre 93 e 103 Mg ha^{-1} . Para a adubação nitrogenada, um ajuste de regressão polinomial de segunda ordem ($p = 0.001$) descreve que a produtividade máxima de colmos de 101 Mg ha^{-1} acontece na dose de 96% por kg de N exportado ha^{-1} .

Na produtividade de açúcar, os resultados foram muito semelhantes (Figura 10). A cultura que proporcionou maior produtividade de açúcar foi a CO, com valor médio de 17,5 Mg ha^{-1} . Enquanto amendoim proporcionou a menor produtividade média, de 16 Mg ha^{-1} , as demais culturas apresentaram rendimento variando entre 16 e 17,5 Mg ha^{-1} . Para a adubação nitrogenada, um ajuste de regressão polinomial de segunda ordem ($p = 0.001$) descreve que a produtividade máxima de açúcar de 17,6 Mg ha^{-1} acontece na dose de 105% por kg de N exportado ha^{-1} .

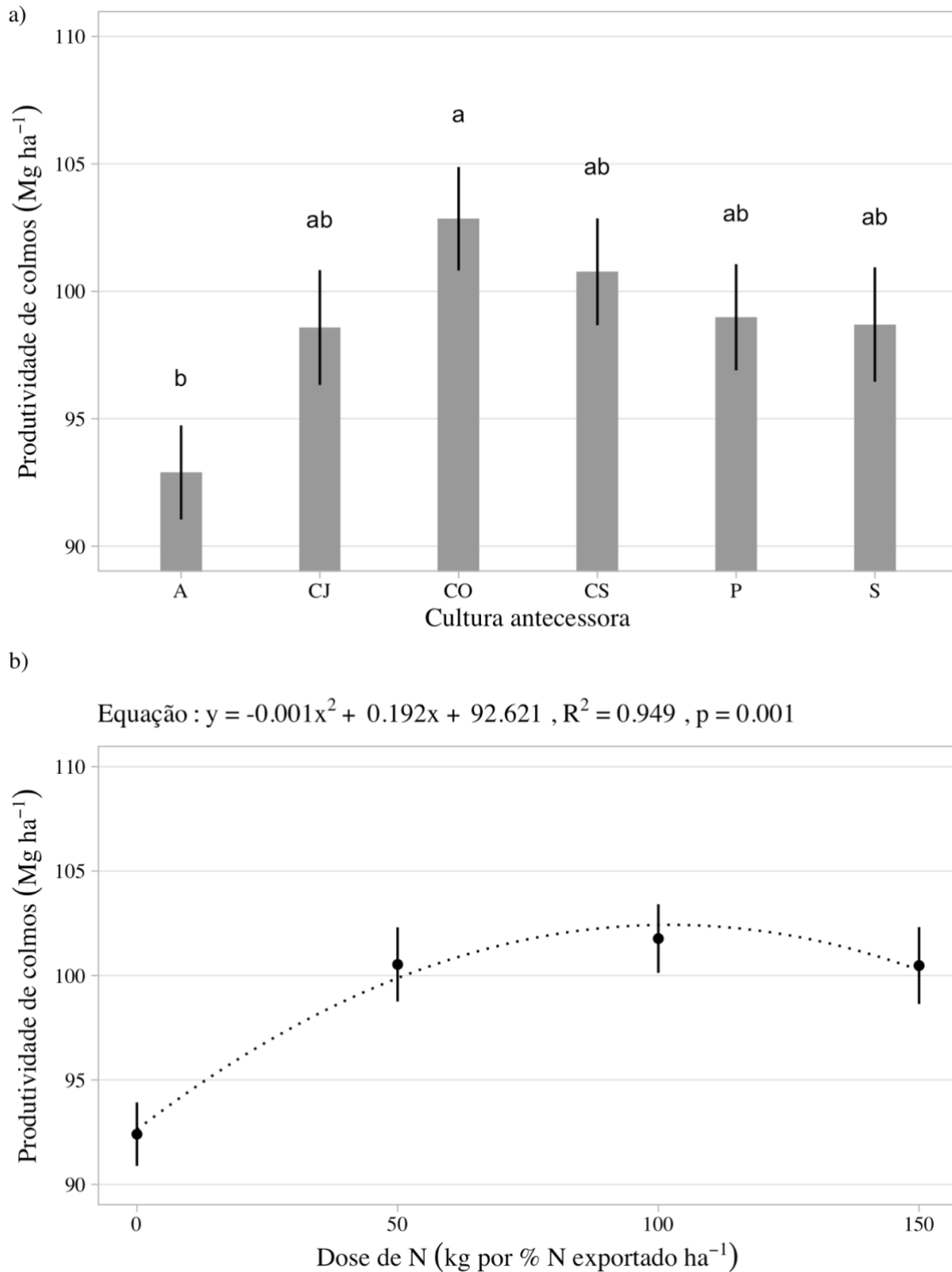


Figura 9. Efeito da cultura antecessora (a) e da dose de nitrogênio (b) na produtividade de colmos (Mg ha⁻¹) para três primeiras soqueiras (safras 2018 a 2020). A: Amendoim; CJ: *Crotalaria juncea*; CO: *Crotalaria ochroleuca*; CS: *Crotalaria spectabilis*; P: Pousio; S: soja. Letras minúsculas distintas indicam diferenças entre culturas antecessoras, pelo teste de Tukey ($p \leq 0,10$). As linhas verticais representam o erro padrão da média do tratamento ($n = 96$ para cultura antecessora e $n = 144$ para dose de N). Os pontos representam os valores médios e a linha pontilhada indica o ajuste do modelo de regressão ($p \leq 0,10$).

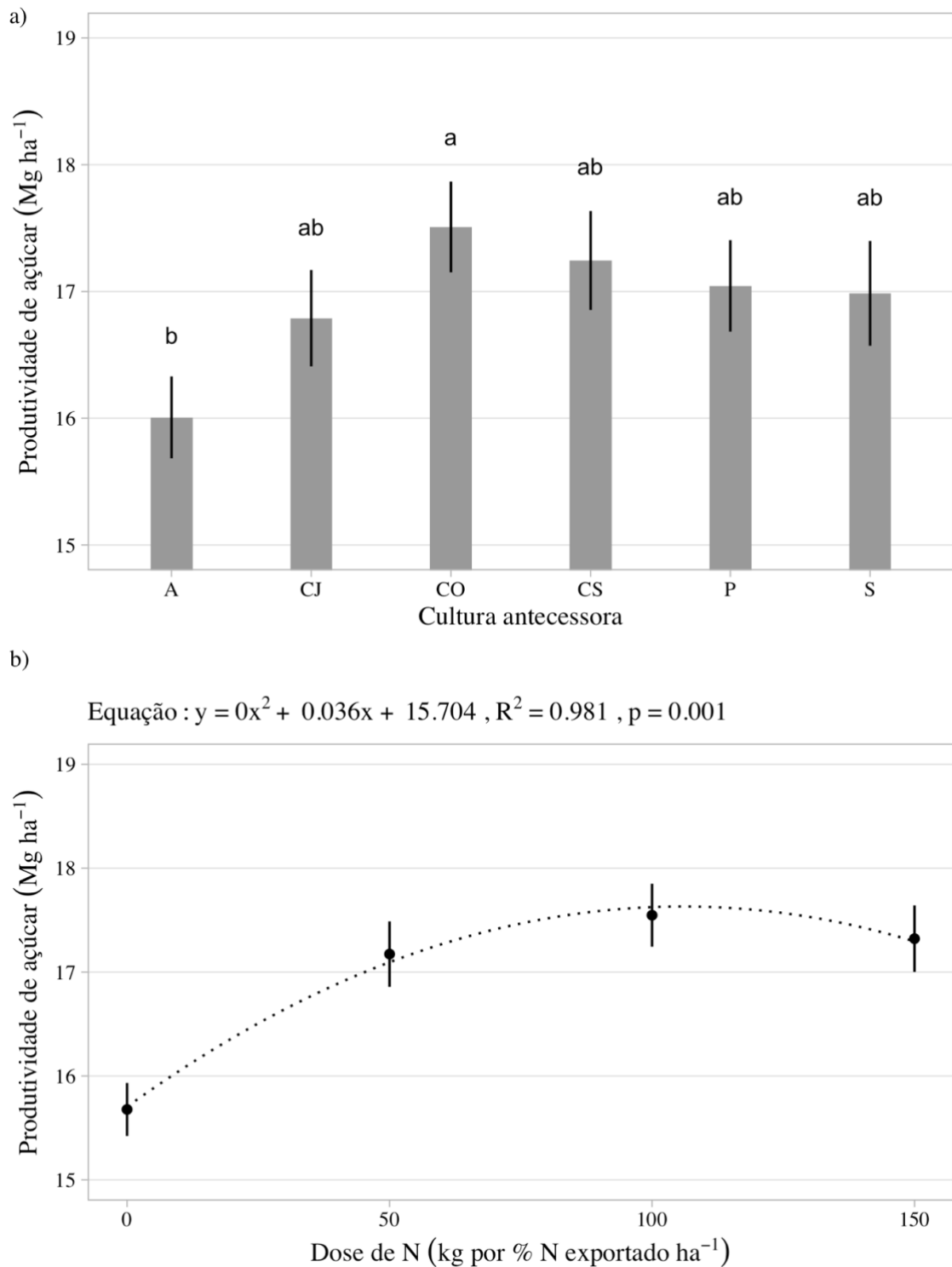


Figura 10. Efeito da cultura antecessora (a) e da dose de nitrogênio (b) na produtividade de açúcar (Mg ha⁻¹) para as três primeiras soqueiras (safras 2018 a 2020). A: Amendoim; CJ: *Crotalaria juncea*; CO: *Crotalaria ochroleuca*; CS: *Crotalaria spectabilis*; P: Pousio; S: soja. Letras minúsculas distintas indicam diferenças entre culturas antecessoras, pelo teste de Tukey ($p \leq 0,10$). As linhas verticais representam o erro padrão da média do tratamento ($n = 96$ para cultura antecessora e $n = 144$ para dose de N). Os pontos representam os valores médios e a linha pontilhada indica o ajuste do modelo de regressão ($p \leq 0,10$).

2.3.3. Atributos tecnológicos de colmos

Foram constatadas diferenças significativas entre as soqueiras na avaliação de atributos tecnológicos de colmos. A terceira soqueira apresentou os maiores teores de sólidos solúveis (Brix), sacarose aparente da cana (Pol) e açúcar total recuperável (ATR) (Tabela 8). Enquanto a terceira apresentou um Brix médio de 23,22%, a primeira e segunda soqueira atingiram 21,89% e 21,62%, respectivamente. Para o parâmetro Pol, a terceira soqueira apresentou, em média, 18,26%, sendo estatisticamente superior que 16,61% e 16,62% da primeira e segunda soqueira, respectivamente. Diferenças significativas também ocorreram para ATR, pois a terceira soqueira obteve um teor médio de 179,48 kg Mg⁻¹, montante superior à primeira (164,28 kg Mg⁻¹) e segunda soqueira (164,09 kg Mg⁻¹).

Os mesmos parâmetros tecnológicos também responderam, de forma simplificada, ao aumento da dose de nitrogênio (Tabela 9). Modelos de regressão polinomial de primeira ordem foram ajustados aos parâmetros tecnológicos ($p < 0,10$), onde a dose máxima de 150% por kg de N exportado ha⁻¹ proporcionou os maiores teores de sólidos solúveis (Brix), sacarose aparente da cana (Pol) e açúcar total recuperável (ATR).

Por fim, alguns efeitos da interação entre manejo do solo e cultura antecessora também foram significativos para o teor de sólidos solúveis (Tabela 10). Diferenças entre manejo para cada tipo de cultura não foram identificadas. Ausência de efeito também foi constatada entre as culturas dentro do plantio convencional. Entretanto, sob plantio direto, a cultura do amendoim foi a que proporcionou maior teor de sólidos solúveis (22,49%), enquanto CJ e CO apresentaram os menores teores (22,08 e 22,06%, respectivamente).

Tabela 8. Efeito da soqueira nas variáveis de análise tecnológica de teor de sólidos solúveis (Brix, %), teor de sacarose aparente da cana (Pol, %) e açúcar total recuperável (ATR, kg Mg⁻¹) para três primeiras soqueiras (safras 2018 a 2020).

Variável	Soqueira		
	1	2	3
Brix	21,89 ± 0,03 b	21,62 ± 0,12 b	23,22 ± 0,03 a
Pol	16,61 ± 0,07 b	16,62 ± 0,07 b	18,26 ± 0,02 a
ATR	164,28 ± 0,59 b	164,09 ± 0,70 b	179,48 ± 0,24 a

Média ± erro padrão da média (n = 192) seguida por letras minúsculas distintas indicam diferenças entre soqueiras, pelo teste de Tukey ($p \leq 0,10$).

Tabela 9. Efeito da dose de nitrogênio nas variáveis de análise tecnológica de teor de sólidos solúveis (Brix, %), teor de sacarose aparente da cana (Pol, %) e açúcar total recuperável (ATR, kg Mg⁻¹) para três primeiras soqueiras (safras 2018 a 2020).

Variável	Dose de N (kg por % N exportado ha ⁻¹)		
	Equação	R ²	p-valor
Brix	$y = 0,001x + 22,145$	0,749	0,075
Pol	$y = 0,002x + 17,034$	0,838	0,020
ATR	$y = 0,015x + 168,129$	0,889	0,021

As equações indicam o ajuste do modelo de regressão ($p \leq 0,10$) para as doses de N nos níveis de 0, 50, 100, 150.

Tabela 10. Interação entre manejo do solo e cultura antecessora no teor de sólidos solúveis (Brix, %) para três primeiras soqueiras (safras 2018 a 2020).

Cultura Antecessora	Manejo do solo		Média
	PC	PD	
Amendoim	22,14 ± 0,18 aA	22,49 ± 0,02 aA	22,32 ± 0,11
<i>Crotalaria juncea</i>	22,27 ± 0,16 aA	22,08 ± 0,25 bA	22,17 ± 0,14
<i>Crotalaria ochroleuca</i>	22,18 ± 0,02 aA	22,06 ± 0,09 bA	22,12 ± 0,05
<i>Crotalaria spectabilis</i>	22,34 ± 0,09 aA	22,15 ± 0,15 abA	22,25 ± 0,09
Pousio	22,30 ± 0,18 aA	22,22 ± 0,07 abA	22,26 ± 0,09
Soja	22,39 ± 0,13 aA	22,29 ± 0,08 abA	22,34 ± 0,07
Média	22,3 ± 0,05	22,2 ± 0,06	

PC: Plantio convencional; PD: Plantio direto. Média ± erro padrão da média (n = 48) seguida por letras minúsculas distintas indicam diferenças para cultura antecessora e letras maiúsculas distintas indicam diferenças para manejo do solo, pelo teste de Tukey ($p \leq 0,10$).

2.4. Discussão

Quando o efeito integrado do manejo do solo, cultura antecessora, e adubação nitrogenada foram analisados nos parâmetros biométricos e tecnológicos da cultura da cana-de-açúcar, observou-se que nem sempre foram identificadas interações desses três fatores. O efeito combinado se deu somente na biomassa seca de folha seca e ponteiro ao final de três soqueiras (Figura 5). A biomassa seca de folha seca e ponteiro respondeu a adubação nitrogenada somente para PC, apresentando aumento crescente para o pousio e dose mais eficiente próximo de 100% do N exportado para *Crotalaria juncea* (Figura 5).

A folha seca e ponteiro são compartimentos que formam a palhada de cana-de-açúcar depositada sobre o solo, a qual tem papel fundamental na ciclagem de nutrientes, podendo também ser empregada para produção de bioeletricidade e etanol de segunda geração (Leal et al., 2013; Trivelin et al., 2013). Estudos indicam que o ponteiro é o responsável pela maior concentração de NPK presente na palhada, ciclando até quatro vezes mais nutrientes que a

folha seca (Menandro et al., 2017). Considerando que o plantio convencional proporciona maior mineralização de palha (Silva-Olaya et al., 2013), os resultados deste estudo indicam que a reposição do nitrogênio exportado pela cana é imprescindível quando utilizado o pousio ou CJ com antecessores ao novo ciclo de cultivo, pois somente assim poderá garantir os potenciais benefícios da palhada a ser depositada ao longo das soqueiras.

Quando analisada de forma separada, a terceira soqueira apresentou efeito combinado dos três fatores experimentais na produtividade (Tabela 7). A sucessão com amendoim ou pousio no plantio direto afetou negativamente a produtividade de colmos e açúcar, nas doses respectivas de 0 e 50% do N exportado (Tabela 7). Isso pode estar relacionado com a necessidade de mobilização do solo na colheita do amendoim, mesmo com subsequente plantio direto da cana, o qual pode ter prejudicado a recuperação da qualidade do solo e dinâmica de nutrientes. Os implementos utilizados na colheita do amendoim fazem o arrancamento e inversão das plantas, influenciando a decomposição da palhada e consequentemente a liberação de nutrientes para a cultura em sucessão (Crusciol e Soratto, 2007).

O pousio também não proporcionou benefícios ao sistema sob plantio direto quando comparado às demais culturas antecessoras, com os efeitos negativos na produtividade tornando-se evidente somente a partir da terceira soqueira. A ausência de diferença entre crotalárias indica a capacidade dessa espécie em tornar o ambiente mais resiliente independente do preparo do solo, embora seja necessário ficar atento à reposição de nitrogênio. As condições climáticas da terceira safra mostram um maior volume de chuvas durante o ciclo de crescimento da soqueira (Figura 3), o que pode ter afetado a dinâmica do nitrogênio ou causada uma maior necessidade de extração de nutrientes para garantir altos níveis produtivos. A reposição do nitrogênio é crucial nas soqueiras mais velhas, pois está relacionada com a manutenção do vigor e longevidade do canavial (Otto et al., 2016). Além disso, a utilização de nitrogênio fertilizante é muito mais importante nas soqueiras do que a cana planta (Franco et al., 2011).

A combinação de pelo menos dois fatores experimentais teve resultados adversos nos parâmetros analisados. No final das três soqueiras, o número de perfilhos foi afetado diretamente pela sazonalidade climática e respondeu a aplicação de N somente na terceira soqueira (Tabela 4), mas estes fatores não influenciaram a densidade de colmos do canavial (Tabela 5). A capacidade de perfilhamento é afetada à medida que o canavial envelhece, sendo também influenciada por fatores ambientais como temperatura e umidade do solo (Lisboa et al., 2018; Otto et al., 2022). Sob condições ambientais favoráveis (terceira

soqueira), a adubação nitrogenada tornou-se determinante para o desenvolvimento de perfilhos e manutenção da capacidade produtiva do canavial. Os benefícios proporcionados por práticas mais sustentáveis geralmente aparecem mais a médio e longo prazo, isto é, nas últimas soqueiras (Sandhu et al., 2019).

Cabe salientar que não houve efeito do manejo de solo e sucessão de culturas para produtividade de colmos e açúcar na cana-planta (Tabela 6), mostrando que a combinação desses dois fatores não afetou à produtividade logo após o estabelecimento do canavial. Este resultado é muito parecido com o que foi encontrado no estudo de Sandhu et al. (2019). Naquela ocasião, os pesquisadores identificaram benefícios do cultivo mínimo ou direto no perfilhamento e produtividade somente nas soqueiras, enquanto o plantio convencional foi inicialmente melhor na cana planta. A influência dos fatores foi alterada quando as soqueiras foram analisadas separadamente. Enquanto a primeira soqueira apresentou maior produtividade de açúcar e colmos no plantio direto (Figura 7), na segunda soqueira a adubação nitrogenada foi o fator determinante para garantir altos níveis de produtividade de açúcar (Figura 8). Estes resultados indicam que os manejos podem se sobressair independente da combinação com outras práticas sustentáveis, estando ligados principalmente as condições específicas de cada safra, como as condições ambientais e níveis de fertilidade do solo. Os benefícios proporcionados tanto pela adubação nitrogenada quanto o plantio direto na cana-de-açúcar, de forma separada ou conjunta, são extensivamente reportados na literatura (Duarte Júnior and Coelho, 2008; Ferreira et al., 2016; Joris et al., 2020; Tenelli et al., 2021).

Dentro de um contexto mais amplo, levando em consideração os efeitos experimentais ao longo de três soqueiras, os resultados experimentais deste trabalho mostraram que as doses de N aumentam a biomassa seca (Figura 6b) e produtividade de colmos (Figura 9b), independente do manejo de solo e sucessão de cultura, apresentando dose ótima com reposição de 100 % do N exportado. Por outro lado, a sucessão de culturas também afetou a produtividade de colmos e açúcar ao longo de três anos (Figura 9 e 10), apresentando incrementos produtivos com adoção da *Crotalaria ochroleuca* e níveis produtivos menores para sistemas com amendoim. Embora a combinação desses fatores não foi identificada ao longo das três soqueiras, foi possível mais uma vez confirmar a resposta da reposição de nitrogênio para manutenção da produtividade de soqueiras (Joris et al., 2020).

A reforma de canavial é uma prática que busca renovar o sistema produtivo com a remoção das soqueiras e estabelecimento de um novo canavial logo em seguida ou após um período de entressafra. Por geralmente requerer um intensivo preparo do solo, os agricultores também aproveitam esse momento para cultivar plantas com fins comerciais ou de adubação

verde (Wutke et al., 2014; Tenelli et al., 2019). Neste estudo, ficou evidente que a opção por adubos verdes é mais adequada para o sistema produtivo, pois garantiu maiores níveis de produtividade ao longo de três soqueiras. A *Crotalaria ochroleuca* destacou-se nesse ponto porque é uma planta robusta e com grande aporte de biomassa (Tabela 1), a qual tem capacidade de proporcionar maior qualidade física do solo devido seu sistema radicular profundo, promover maior atividade biológica por exsudatos, realizar a fixação de nitrogênio, e controlar população de nematoides (Cherubin, 2022).

Em relação aos atributos tecnológicos dos colmos, quando analisado em um contexto mais amplo sob efeito de três soqueiras, a adubação nitrogenada aumentou de forma crescente os teores de Brix, Pol e ATR (Tabela 9). Especificamente em relação ao teor de Brix, este parâmetro apresentou comportamento adverso para as culturas antecessoras sob condições de plantio direto (Tabela 10). Todos os parâmetros também apresentaram maior desempenho para as condições climáticas da terceira soqueira (Tabela 8), o qual foi caracterizado principalmente por um maior volume de chuvas que os demais ciclos. É importante salientar que os atributos tecnológicos da cana geralmente são pouco influenciados pelo do manejo solo, pois a variedade e o desenvolvimento da cultura acabam tendo maior importância no desempenho desses parâmetros (Resende et al., 2006). A maior quantidade de fibra no colmo tende a causar menor acúmulo de sacarose, sendo que temperaturas maiores ao longo do ciclo proporcionam maior número de internódios e menor produção de sacarose (Bonnett et al., 2006).

2.5. Conclusões

Foram observados diferentes efeitos do manejo do solo, sucessão de cultura e adubação nitrogenada nos parâmetros produtivos e tecnológicos de cana-de-açúcar ao final de três soqueiras. A reposição do nitrogênio exportado foi o principal fator determinante no acúmulo de biomassa seca, produtividade de colmos, produtividade de açúcar, e parâmetros tecnológicos (Brix, Pol e ATR). Além disso, a utilização da *Crotalaria ochroleuca* também demonstrou ser a cultura antecessora mais indicada para o período de reforma.

Referências

- Alvares, C.A., J.L. Stape, P.C. Sentelhas, J.L. de Moraes Gonçalves, and G. Sparovek. 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorol. Zeitschrift* 22(6): 711–728. doi: 10.1127/0941-2948/2013/0507.

- Ambrosano, E.J., P.C.O. Trivelin, H. Cantarella, G.M.B. Ambrosano, E.A. Schammas, et al. 2005. Utilization of nitrogen from green manure and mineral fertilizer by sugarcane. *Sci. Agric.* 62(6): 534–542. doi: 10.1590/S0103-90162005000600004.
- Ambrosano, E.J., P.C.O. Trivelin, H. Cantarella, G.M.B. Ambrosano, E.A. Schammas, et al. 2011. ¹⁵N-labeled nitrogen from green manure and ammonium sulfate utilization by the sugarcane ratoon. *Sci. Agric.* 68(3): 361–368. doi: 10.1590/S0103-90162011000300014.
- Awe, G.O., J.M. Reichert, L.C. Timm, and O.O. Wendroth. 2015a. Temporal processes of soil water status in a sugarcane field under residue management. *Plant Soil* 387(1–2): 395–411. doi: 10.1007/s11104-014-2304-5.
- Awe, G.O., J.M. Reichert, and O.O. Wendroth. 2015b. Temporal variability and covariance structures of soil temperature in a sugarcane field under different management practices in southern Brazil. *Soil Tillage Res.* 150: 93–106. doi: 10.1016/j.still.2015.01.013.
- Bonnett, G.D., M.L. Hewitt, and D. Glassop. 2006. Effects of high temperature on the growth and composition of sugarcane internodes. *Aust. J. Agric. Res.* 57(10): 1087. doi: 10.1071/AR06042.
- Bordonal, R. de O., R. Lal, C.C. Ronquim, E.B. de Figueiredo, J.L.N. Carvalho, et al. 2017. Changes in quantity and quality of soil carbon due to the land-use conversion to sugarcane (*Saccharum officinarum*) plantation in southern Brazil. *Agric. Ecosyst. Environ.* 240: 54–65. doi: 10.1016/j.agee.2017.02.016.
- Boschiero, B.N., E. Mariano, L.O. Torres-Dorante, T.M.S. Sattolo, R. Otto, et al. 2020. Nitrogen fertilizer effects on sugarcane growth, nutritional status, and productivity in tropical acid soils. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* 117(3): 367–382. doi: 10.1007/s10705-020-10074-w.
- Braga Junior, R.L. do C., M.G. de A. Landell, D.N. da Silva, M.A.P. Bidóia, T.N. da Silva, et al. 2021. Censo varietal IAC de cana-de-açúcar no Brasil - Safra 2019/20 e na região Centro-Sul - Safra 2020/21. *érie Tecno*. Instituto Agronômico, Campinas.
- Cantarella, H., and R. Rosseto. 2014. Fertilizers for sugarcane. In: Cortez, L.A.B., editor, *Sugarcane bioethanol — R&D for Productivity and Sustainability*. Editora Edgard Blücher, São Paulo. p. 405–422
- Cantarella, H., P.C.O. Trivelin, T.L.M. Contin, F.L.F. Dias, R. Rosseto, et al. 2008. Ammonia volatilisation from urease inhibitor-treated urea applied to sugarcane trash blankets. *Sci. Agric.* 65(4): 397–401. doi: 10.1590/S0103-90162008000400011.

- Cerri, C.E.P., M.V. Galdos, J.L.N. Carvalho, B.J. Feigl, and C.C. Cerri. 2013. Quantifying soil carbon stocks and greenhouse gas fluxes in the sugarcane agrosystem: point of view. *Sci. Agric.* 70(5): 361–368. doi: 10.1590/S0103-90162013000500011.
- Cherubin, M.R. 2022. Guia prático de plantas de cobertura: aspectos filotécnicos e impactos sobre a saúde do solo (M.R. Cherubin, editor). Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.
- Cherubin, M.R., D.L. Karlen, A.L.C. Franco, C.A. Tormena, C.E.P. Cerri, et al. 2016. Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil. *Geoderma* 267: 156–168. doi: 10.1016/j.geoderma.2016.01.004.
- CONAB. 2021. Companhia Nacional de Abastecimento: Portal de informações agropecuárias. <https://portaldeinformacoes.conab.gov.br/index.php/>.
- Crusciol, C.A.C., and R.P. Soratto. 2007. Nutrição e produtividade do amendoim em sucessão ao cultivo de plantas de cobertura no sistema plantio direto. *Pesqui. Agropecuária Bras.* 42(11): 1553–1560. doi: 10.1590/S0100-204X2007001100006.
- Dias, H.B., and P.C. Sentelhas. 2017. Evaluation of three sugarcane simulation models and their ensemble for yield estimation in commercially managed fields. *F. Crop. Res.* 213: 174–185. doi: 10.1016/j.fcr.2017.07.022.
- Duarte Júnior, J.B., and F.C. Coelho. 2008. A cana-de-açúcar em sistema de plantio direto comparado ao sistema convencional com e sem adubação. *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.* 12(6): 576–583. doi: 10.1590/S1415-43662008000600003.
- Egeskog, A., F. Freitas, G. Berndes, G. Sparovek, and S. Wirsenius. 2014. Greenhouse gas balances and land use changes associated with the planned expansion (to 2020) of the sugarcane ethanol industry in Sao Paulo, Brazil. *Biomass and Bioenergy* 63: 280–290. doi: 10.1016/j.biombioe.2014.01.030.
- Farhate, C.V.V., Z.M. de Souza, M.R. Cherubin, L.H. Lovera, I.N. de Oliveira, et al. 2022. Soil physical change and sugarcane stalk yield induced by cover crop and soil tillage. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 46. doi: 10.36783/18069657rbc20210123.
- Farinelli, J.B. de M., D.F.L. Santos, C. Fernandes, M.M.H. Fernandes, and M.F. da Silva. 2018. Crop Diversification Strategy to Improve Economic Value in Brazilian Sugarcane Production. *Agron. J.* 110(4): 1402–1411. doi: 10.2134/agronj2017.10.0578.
- Ferreira, D.A., H.C.J. Franco, R. Otto, A.C. Vitti, C. Fortes, et al. 2016. Contribution of N from green harvest residues for sugarcane nutrition in Brazil. *GCB Bioenergy* 8(5): 859–866. doi: 10.1111/gcbb.12292.

- Filoso, S., J.B. do Carmo, S.F. Mardegan, S.R.M. Lins, T.F. Gomes, et al. 2015. Reassessing the environmental impacts of sugarcane ethanol production in Brazil to help meet sustainability goals. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 52: 1847–1856. doi: 10.1016/j.rser.2015.08.012.
- Fortes, C., P.C.O. Trivelin, A.C. Vitti, R. Otto, H.C.J. Franco, et al. 2013. Stalk and sucrose yield in response to nitrogen fertilization of sugarcane under reduced tillage. *Pesqui. Agropecuária Bras.* 48(1): 88–96. doi: 10.1590/S0100-204X2013000100012.
- Franco, H.C.J., I.R. Bologna, C.E. Faroni, A.C. Vitti, and P.C.O. Trivelin. 2007. Acúmulo de macronutrientes em cana-de-açúcar em função da adubação nitrogenada e dos resíduos culturais incorporados ao solo no plantio. *Bragantia* 66(4): 669–674. doi: 10.1590/S0006-87052007000400017.
- Franco, H.C.J., R. Otto, C.E. Faroni, A.C. Vitti, E.C. Almeida de Oliveira, et al. 2011. Nitrogen in sugarcane derived from fertilizer under Brazilian field conditions. *F. Crop. Res.* 121(1): 29–41. doi: 10.1016/j.fcr.2010.11.011.
- Franco, H.C.J., R. Otto, A.C. Vitti, C.E. Faroni, E.C. de A. Oliveira, et al. 2015. Residual recovery and yield performance of nitrogen fertilizer applied at sugarcane planting. *Sci. Agric.* 72(6): 528–534. doi: 10.1590/0103-9016-2015-0170.
- Franco, H.C.J., M.T.B. Pimenta, J.L.N. Carvalho, P.S.G. Magalhães, C.E.V. Rossell, et al. 2013. Assessment of sugarcane trash for agronomic and energy purposes in Brazil. *Sci. Agric.* 70(5): 305–312. doi: 10.1590/S0103-90162013000500004.
- Hoorman, J.J., J.C.M. Sá, and R. Reeder. 2011. The biology of soil compaction. *Science* (80-.). 68: 49–57.
- Hothorn, T., F. Bretz, and P. Westfall. 2008. Simultaneous Inference in General Parametric Models. *Biometrical J.* 50(3): 346–363. doi: 10.1002/bimj.200810425.
- Joris, H.A.W., A.C. Vitti, R. Ferraz-Almeida, R. Otto, and H. Cantarella. 2020. Long-term N fertilization reduces uptake of N from fertilizer and increases the uptake of N from soil. *Sci. Rep.* 10(1): 18834. doi: 10.1038/s41598-020-75971-0.
- Kuznetsova, A., P.B. Brockhoff, and R.H.B. Christensen. 2017. lmerTest Package: Tests in Linear Mixed Effects Models. *J. Stat. Softw.* 82(13). doi: 10.18637/jss.v082.i13.
- Leal, M.R.L.V., M. V. Galdos, F. V. Scarpore, J.E.A. Seabra, A. Walter, et al. 2013. Sugarcane straw availability, quality, recovery and energy use: A literature review. *Biomass and Bioenergy* 53: 11–19. doi: 10.1016/j.biombioe.2013.03.007.
- Lenth, R., H. Singmann, and J. Love. 2021. Emmeans: Estimated marginal means, aka least-squares means. : R package version 1.4.

- Lisboa, I.P., M.R. Cherubin, R.P. Lima, C.C. Cerri, L.S. Satiro, et al. 2018. Sugarcane straw removal effects on plant growth and stalk yield. *Ind. Crops Prod.* 111: 794–806. doi: 10.1016/j.indcrop.2017.11.049.
- Malavolta, E., G.C. Vitti, and S.A. Oliveira. 1997. Avaliação do estado nutricional de plantas: princípios e aplicações. Potafos, Piracicaba.
- Menandro, L.M.S., H. Cantarella, H.C.J. Franco, O.T. Kölln, M.T.B. Pimenta, et al. 2017. Comprehensive assessment of sugarcane straw: implications for biomass and bioenergy production. *Biofuels, Bioprod. Biorefining* 11(3): 488–504. doi: 10.1002/bbb.1760.
- Otto, R., S.A.Q. Castro, E. Mariano, S.G.Q. Castro, H.C.J. Franco, et al. 2016. Nitrogen Use Efficiency for Sugarcane-Biofuel Production: What Is Next? *BioEnergy Res.* 9(4): 1272–1289. doi: 10.1007/s12155-016-9763-x.
- Otto, R., B.A. Machado, A.C. Melo da Silva, S.G. Quassi de Castro, and I.P. Lisboa. 2022. Sugarcane pre-sprouted seedlings: A novel method for sugarcane establishment. *F. Crop. Res.* 275: 108336. doi: 10.1016/j.fcr.2021.108336.
- Pereira, A.R., L.R. Angelocci, and P.C. Sentelhas. 2002. Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas. Agropecuária, Guaíba.
- Prado, E.A.F. do, A.C.T. Vitorino, R.A. Garcia, C.J. da Silva, and M. Mauad. 2019. Structural Quality of an Oxisol Under Conventional Soil Tillage and Predecessor Crops in Sugarcane Rotation. *Sugar Tech* 21(1): 93–103. doi: 10.1007/s12355-018-0626-y.
- R Core Team. 2021. R: A language and environment for statistical computing. <https://www.r-project.org/>.
- Raij, B. van, J.C.C. Andrade, H. Cantarella, and J.A.A. Quaggio. 2001. Análise química para avaliação de solos tropicais. Instituto Agrônômico de Campinas, Campinas.
- Resende, A.S. de, A. Santos, R.P. Xavier, C.H. Coelho, A. Gondim, et al. 2006. Efeito da queima da palhada da cana-de-açúcar e de aplicações de vinhaça e adubo nitrogenado em características tecnológicas da cultura. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 30(6): 937–941. doi: 10.1590/S0100-06832006000600003.
- Sandhu, H.S., M.P. Singh, and M. Vuyyuru. 2019. Minimum or No-Tillage Improves Sugarcane Ratoon Yield on Florida Histosol. *Agron. J.* 111(3): 1516–1523. doi: 10.2134/agronj2018.08.0543.
- Santos, H.G. dos, P.K.T. Jacomine, L.H.C. dos Anjos, V.Á. de A. Oliveira, J.F. Lumberras, et al. 2018. Sistema brasileiro de classificação de solos. 5 ed. rev. Embrapa, Brasília, DF.

- Silva-Olaya, A.M., C.E.P. Cerri, N. La Scala Jr, C.T.S. Dias, and C.C. Cerri. 2013. Carbon dioxide emissions under different soil tillage systems in mechanically harvested sugarcane. *Environ. Res. Lett.* 8(1): 015014. doi: 10.1088/1748-9326/8/1/015014.
- Soil Survey Staff. 2014. *Keys to Soil Taxonomy*. 12th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.
- Teixeira, P.C., G.K. Donagema, A. Fontana, and W.G. Teixeira. 2017. *Manual de métodos de análise de solo*. 3rd ed. Embrapa, Brasília, DF.
- Tenelli, S., R. Otto, R.O. Bordonal, and J.L.N. Carvalho. 2021. How do nitrogen fertilization and cover crop influence soil C-N stocks and subsequent yields of sugarcane? *Soil Tillage Res.* 211: 104999. doi: 10.1016/j.still.2021.104999.
- Tenelli, S., R. Otto, S.A.Q. de Castro, C.E.B. Sánchez, T.M.S. Sattolo, et al. 2019. Legume nitrogen credits for sugarcane production: implications for soil N availability and ratoon yield. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* 113(3): 307–322. doi: 10.1007/s10705-019-09979-y.
- Trivelin, P.C.O., H.C.J. Franco, R. Otto, D.A. Ferreira, A.C. Vitti, et al. 2013. Impact of sugarcane trash on fertilizer requirements for São Paulo, Brazil. *Sci. Agric.* 70(5): 345–352. doi: 10.1590/S0103-90162013000500009.
- Trivelin, P.C.O., M.W. de Oliveira, A.C. Vitti, G.J. de C. Gava, and J.A. Bendassolli. 2002. Perdas do nitrogênio da uréia no sistema solo-planta em dois ciclos de cana-de-açúcar. *Pesqui. Agropecuária Bras.* 37(2): 193–201. doi: 10.1590/S0100-204X2002000200011.
- Vitti, A.C., H.C.J. Franco, P.C.O. Trivelin, D.A. Ferreira, R. Otto, et al. 2011. Nitrogênio proveniente da adubação nitrogenada e de resíduos culturais na nutrição da cana-planta. *Pesqui. Agropecuária Bras.* 46(3): 287–293. doi: 10.1590/S0100-204X2011000300009.
- Vitti, G.C., J.A. Mazza, T.A. Quintino, and R. Otto. 2006. Nutrição e adubação. In: Ripoli, T.C.C., Ripoli, M.L.C., Casagrandi, D. V., and Ide, B.Y., editors, *Plantio da cana-de-açúcar: estado da arte*. ESALQ, Piracicaba. p. 102–144
- Vuyyuru, M., H.S. Sandhu, J.E. Erickson, and A. V. Ogram. 2020. Soil chemical and biological fertility, microbial community structure and dynamics in successive and fallow sugarcane planting systems. *Agroecol. Sustain. Food Syst.* 44(6): 768–794. doi: 10.1080/21683565.2019.1666075.
- Waclawovsky, A.J., P.M. Sato, C.G. Lembke, P.H. Moore, and G.M. Souza. 2010. Sugarcane for bioenergy production: an assessment of yield and regulation of sucrose content. *Plant Biotechnol. J.* 8(3): 263–276. doi: 10.1111/j.1467-7652.2009.00491.x.

Wutke, E.B., A. Calegari, and L. do P. Wildner. 2014. Espécies de adubos verdes e plantas de cobertura e recomendações para seu uso. In: Lima Filho, O.F. de, Ambrosano, E.J., Rossi, F., and Carlos, J.A.D., editors, Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil. 1st ed. Embrapa, Brasília, DF. p. 59–168

3 ACÚMULO DE NUTRIENTES DE CANA-DE-AÇÚCAR EM FUNÇÃO DO MANEJO DE SOLO E DA CULTURA ANTECESSORA NA RENOVAÇÃO DE CANAVIAL

Resumo

O objetivo desse estudo foi avaliar o efeito do manejo do solo e da sucessão de culturas, associados à adubação nitrogenada, no acúmulo particionado de biomassa seca e nutrientes em parte aérea (PA) e folha seca mais ponteiro (FS+P). O experimento foi constituído por duas áreas experimentais, plantio convencional (PC) e plantio direto (PD), localizadas em área comercial de produção de cana-de-açúcar, no município de Sales Oliveira, região de Ribeirão Preto, estado de São Paulo, Brasil. A avaliação do estudo foi conduzida nas safras de 2017/2018 e 2018/2019, abrangendo a primeira e segunda soqueira. As duas áreas experimentais foram delineadas de forma espelhada e envolveram os seguintes fatores: sucessão de culturas e adubação nitrogenada de soqueira. O fator primário foi composto por pousio e uso de cinco leguminosas, sendo duas culturas com fins comerciais (soja e amendoim) e três espécies distintas de crotalárias (*Crotalaria juncea*, *Crotalaria spectabilis*, *Crotalaria ochroleuca*). O fator secundário foi constituído pelos tratamentos da adubação nitrogenada de soqueira: com (reposição de 100% do N exportado) e sem N (controle). Para avaliação do acúmulo de nutrientes da biomassa na colheita, as plantas foram particionadas manualmente em compartimentos vegetais de ponteiro, colmo e folha e determinadas as concentrações de macro (N, P, K, Ca, Mg e S) e micronutrientes (Fe, Cu, Mn, Zn e B). A análise estatística dos resultados foi realizada a partir da análise conjunta de dois locais junto da aplicação de modelos lineares mistos, em esquema fatorial triplo. A aplicação de N aumentou o acúmulo de biomassa seca da PA e a produtividade de colmos. A sucessão de soja apresentou maior produtividade de colmos para o PD. O acúmulo de N pelo compartimento FS+P apresentou interação para manejo do solo, cultura antecessora e adubação nitrogenada. A adubação nitrogenada aumentou o acúmulo de P em PA e a sucessão com crotalária nem sempre favoreceu o acúmulo de P para FS+P. O amendoim e a *Crotalaria spectabilis* em PC apresentaram reduções no acúmulo de K para PA e FS+P. Em geral, o acúmulo de macronutrientes secundários foram afetados pela interação da adubação nitrogenada com manejo de solo e soqueira. O acúmulo de Ca em PA foi reduzido sem aplicação de N e para PC sem N em FS+P. A adubação nitrogenada aumentou o acúmulo de S em FS+P, efeito similar do PD na PA. O acúmulo de B, Cu e Zn pela PA foi afetado diretamente pela interação entre adubação nitrogenada e soqueira. A adubação nitrogenada demonstrou ser o fator mais determinante na dinâmica de acúmulo de nutrientes.

Palavras-chave: *Saccharum* spp.; Plantio direto; Adubação verde; Amendoim; Soja; *Crotalaria*

Abstract

The objective of this study was to evaluate the effect of soil management and crop succession, associated with nitrogen fertilization, on the fractionated accumulation of dry biomass and nutrients in the whole plant (WP), and dry leaves plus top (DL+T). The experiment consisted of two experimental sites, conventional tillage (CT) and no-tillage (NT), located in a commercial area of sugarcane production, in the municipality of Sales Oliveira, region of Ribeirão Preto, state of São Paulo, Brazil. The study was conducted in the 2017/2018 and 2018/2019 harvests, covering the first and second ratoons. The two experimental areas were delineated in a mirrored manner and involved the following factors: crop succession and ratoon nitrogen fertilization. The primary factor consisted of fallow and the use of five legumes, with two being commercial crops (soybean and peanut) and three different species of sunn hemp (*Crotalaria juncea*, *Crotalaria spectabilis*, *Crotalaria ochroleuca*). The secondary factor was constituted by the treatments of nitrogen fertilization: with (replacement of 100% of the exported N) and without N (control). To evaluate the accumulation of nutrients in the biomass at harvest, the plants were manually partitioned into top, stalk and leaf compartments, with the concentrations of macro (N, P, K, Ca, Mg and S) and micronutrients (Fe, Cu, Mn, Zn and B) determined. The statistical analysis was performed from a joint analysis of two sites along with the application of mixed linear models, in a triple factorial scheme. N application increased WP dry biomass accumulation and stalk productivity. Soybean succession showed higher stalk productivity for NT. The accumulation of N by the DL+T compartment showed interaction for soil management, predecessor crop and N fertilization. Nitrogen fertilization increased P accumulation in shoots and succession with sunn hemp did not always favor P accumulation for DL+T. Peanut and *Crotalaria spectabilis* in CT showed reductions in K accumulation for WP and DL+T. In general, the accumulation of secondary macronutrients was affected by the interaction of N fertilization with soil management and ratoon. Ca accumulation in WP was reduced without N application and for CT without N in DL+T. Nitrogen fertilization increased S accumulation in DL+T, similar to the effect of NT for the WP. The accumulation of B, Cu and Zn by the WP was directly affected by the interaction between N fertilization and ratoon. Nitrogen fertilization proved to be the most determining factor in the dynamics of nutrient accumulation.

Keywords: *Saccharum* spp.; No-till; Cover crops; Peanut; soybean; *Crotalaria*

3.1. Introdução

O Brasil é atualmente o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, pois atingiu a produção de 628 milhões Mg em uma área de 8,42 milhões de hectares na safra 2020/2021 (CONAB, 2021). Mesmo com números impressionantes, a produtividade média nacional da cultura (74,6 Mg ha⁻¹) ainda está muito abaixo do potencial produtivo, podendo alcançar cerca

de 400 Mg ha⁻¹ conforme estimativas reportadas na literatura (Waclawovsky et al., 2010). Dentre os diversos aspectos que podem estar atrelados à baixa produtividade, pode-se destacar as adversidades climáticas, o manejo inadequado da cultura e as perdas por doenças e pragas. As possíveis estratégias a serem adotadas para aumentar a produtividade e longevidade do canavial incluem práticas de manejo sustentáveis voltadas à nutrição de planta e qualidade do solo (Egeskog et al., 2014).

Nos últimos anos, o cultivo brasileiro de cana-de-açúcar tem adotado amplamente a colheita mecanizada de cana crua (98%, CONAB, 2021), a qual substituiu da colheita da cana queimada para reduzir os impactos ambientais. Além da colheita sem queima prévia mitigar a emissão de gases de efeito estufa, a deposição da palhada na superfície do solo beneficia sua qualidade, evitando a erosão e contribuindo para o aumento da fertilidade pelo incremento da matéria orgânica (Cerri et al., 2013; Trivelin et al., 2013; Franco et al., 2015). Entretanto, em cultivos que adotam esse tipo de colheita, uma quantidade expressiva de resíduo vegetal composto por folhas secas e ponteiros é depositada sobre o solo, o que altera a dinâmica dos nutrientes no solo, especialmente pela elevada relação C/N da palhada, que pode variar de 80 a 100:1 e, assim, reduzir a taxa de mineralização de N (Franco et al., 2013; Ferreira et al., 2016). No Brasil, estima-se que 70% de toda a matéria seca é decomposta somente após um período de três anos, promovendo a mineralização de nutrientes como K, Ca e N (Fortes et al., 2013). Segundo Trivelin et al. (2013), a disponibilização potencial de 40 kg ha⁻¹ de N ano⁻¹ a partir de um estoque de N que se formará no solo pela permanência dos resíduos culturais em sistema de cana crua ocorrerá somente após 40 anos.

Embora a colheita de cana crua já tenha sido amplamente adotada no setor, outros impactos foram devidamente reportados na literatura, principalmente em relação a degradação da qualidade física do solo e perdas de produtividade causadas pelo tráfego intenso de maquinário (Prado et al., 2019; Farhate et al., 2022). Além disso, a cultura da cana-de-açúcar no Brasil é ainda historicamente cultivada sob manejo do solo convencional no período que antecede o plantio. Esta prática busca homogeneizar fisicamente a camada superficial (0-40 cm) por meio de práticas intensivas, como aração e gradagem, a fim de facilitar as operações mecanizadas e proporcionar uma adequação das condições físicas do solo (Hoorman et al., 2011). Por outro lado, esse tipo de manejo ocasiona perdas substanciais de carbono (Silva-Olaya et al., 2013), altera a dinâmica da temperatura e água no sistema (Awe et al., 2015a, 2015b), e impacta, de forma geral, a qualidade do solo, prejudicando a produção e sustentabilidade do sistema a médio e longo prazo (Filoso et al., 2015; Cherubin et al., 2016; Bordonal et al., 2017).

A adoção de culturas de sucessão para reforma, seja para fins comerciais ou adubação verde, também tem sido amplamente difundida com o intuito de proporcionar maior qualidade do solo e/ou capacitar financeiramente os agricultores durante a entressafra (Ambrosano et al., 2005; Farinelli et al., 2018; Vuyyuru et al., 2020). O uso de leguminosas em áreas de renovação de canavial tem se apresentado como uma estratégia viável para auxílio da manutenção ou aumento da fertilidade do solo, bem como no incremento de produtividade da cana, por estar relacionado ao controle da erosão hídrica, do assoreamento de sulco e da compactação do solo; à diminuição da população de nematoides; à micorrização e ciclagem de nutrientes; e à supressão de plantas daninhas e fitorremediação de herbicidas (Ambrosano et al., 2011). Além de proporcionar vários benefícios em aspectos físicos, químicos e biológicos do solo, o emprego de adubos verdes incorporados ou não ao solo aumenta o estoque de carbono orgânico do solo, diminuindo a emissão de gases do efeito estufa pela fixação de carbono (Wutke et al., 2014).

Do ponto de vista nutricional, a cana-de-açúcar requer uma quantidade substancial de N para a produção de colmos, uma vez que é absorvido aproximadamente de 100 a 300 kg ha⁻¹ de N para a produção de 100 Mg ha⁻¹ de colmos (Franco et al., 2007), sendo ainda posteriormente metade dessa fração exportada por ocasião da colheita (Cantarella et al., 2008). A fim de atender as necessidades desse nutriente pela cultura, são recomendadas doses que geralmente variam de 120 a 200 kg ha⁻¹ de N para a cana crua (Cantarella and Rosseto, 2014). Na maioria das recomendações ainda é considerado a quantidade de N exportado para a produção de uma tonelada de colmos, que poderá apresentar variação na região centro-sul de aproximadamente 0,7 a 1,8 kg de N para cada tonelada de colmos colhida (Vitti et al., 2006; Franco et al., 2007; Cantarella et al., 2008). No geral, a utilização do N-fertilizante pela cultura é baixa, sendo comumente inferiores a 50% da dose aplicada (Trivelin et al., 2002; Vitti et al., 2011). Assim, o manejo da adubação nitrogenada pode ser considerado uma das práticas mais importantes para produção da cana-de-açúcar, apresentando grande variabilidade de resposta sob o ponto de vista da produtividade de colmos, em razão das doses de N aplicadas (Franco et al., 2015; Otto et al., 2016).

Um ponto inicialmente polêmico da adoção de leguminosas na renovação de canaviais era a necessidade da aplicação de fertilizante nitrogenado no plantio da cana-de-açúcar, uma vez que esse nutriente seria fixado biologicamente ao solo. Entretanto, estudos apontaram que, mesmo com o uso de adubação verde na reforma do canavial, a cana-de-açúcar ainda necessita do N-fertilizante do plantio, dúvida essa que ainda se mantém para a adubação nitrogenada de soqueira (Ambrosano et al., 2005, 2011). Apesar da resposta à

adubação nitrogenada de soqueira ser muitas vezes limitada, geralmente é aplicado a mesma quantidade de N em áreas reformadas com adubos verdes (Otto et al., 2016; Boschiero et al., 2020).

Considerando que as leguminosas apresentam baixa relação C/N e contribuem para fornecimento biológico de N ao solo, a resposta da adubação nitrogenada de soqueira em áreas submetidas à rotação de culturas na renovação do canavial poderá ser ainda menor, se os efeitos benéficos da adubação verde se mantiverem de médio a longo prazo e auxiliarem na menor imobilização do N do fertilizante, especialmente pela alta relação C/N dos resíduos vegetais de cana. Além da adubação verde, uma alternativa para o incremento da produtividade e sustentabilidade do sistema canavieiro está compreendida na redução do revolvimento do solo, por meio da sulcagem direta no plantio.

Entretanto, uma avaliação integrada dos efeitos do manejo de solo, sucessão de culturas e adubação nitrogenada no acúmulo de nutrientes na planta ainda é escassa e precisa ser melhor investigada. O objetivo desse trabalho é, portanto, avaliar o efeito do manejo do solo e sucessão de culturas sob diferentes níveis de adubação nitrogenada no acúmulo de nutrientes em cana-de-açúcar. A combinação dessas práticas pode causar diversos efeitos na ciclagem de nutrientes, trazendo assim, uma visão complementar referente à adoção de práticas mais sustentáveis na cultura.

3.2. Material e Métodos

3.2.1. Caracterização da área e condução experimental

O estudo foi desenvolvido em duas áreas experimentais, localizadas em área comercial de produção de cana-de-açúcar, no município de Sales Oliveira, região de Ribeirão Preto, Estado de São Paulo, Brasil (20°50'21" S, 47°57'11" O, 604 m) (Figura 1). A avaliação do experimento foi conduzida nas safras de 2017/2018 e 2018/2019, abrangendo a primeira e segunda soqueira de cana-de-açúcar. O clima do local é classificado como subtropical úmido com verão quente (Cwa), segundo Köppen (Alvares et al., 2011). O histórico da área apresenta longo cultivo com cana e obteve a adoção do sistema de mecanizado sem queima prévia da palha a partir de 2011. No período do sistema semimecanizado com queima prévia, foi aplicado de vinhaça na dose de 100 m³ ha⁻¹ logo após o corte. Com início da colheita da cana crua, o uso de vinhaça foi suspenso e não houve mais aplicação.

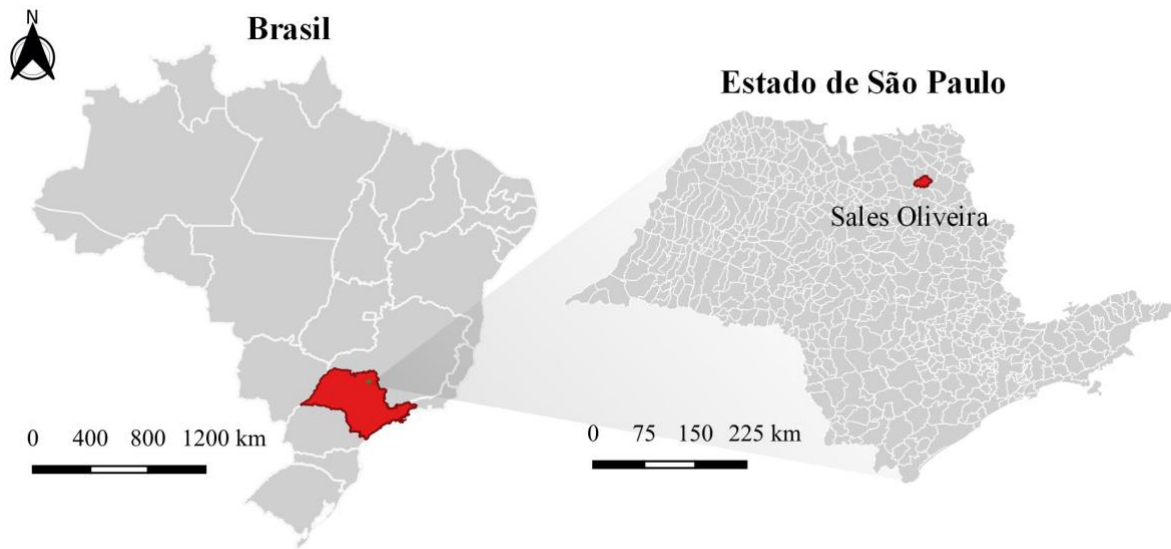


Figura 1. Localização geográfica das áreas experimentais no município de Sales Oliveira, SP.

O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho Distroférrico (Santos et al., 2018), de textura argilosa, correspondente a Rhodic (Soil Survey Staff, 2014). A caracterização físico-química do solo foi realizada pela coleta de amostras deformadas compostas, nas profundidades 0-0,1, 0,1-0,2, 0,2-0,4, 0,4-0,6 e 0,6-1,0 m, para duas áreas experimentais, antes da instalação do experimento (Tabela 1). As análises para fins de fertilidade do solo foram determinadas de acordo com Raij et al. (2001) e as análises granulométricas foram obtidas pelo método da pipeta (Teixeira et al., 2017).

As operações de preparo de solo e dessecação prévia com glifosato, empregadas respectivamente em pré-plantio para área de plantio convencional (PC) e direto (PD), foram conduzidas 10 dias antes do plantio das leguminosas no período de reforma. Já para PC, a área foi operacionalizada sequencialmente por meio de gradagem pesada, aração com aiveca e gradagem intermediária (niveladora).

Tabela 1. Caracterização físico-química do solo das áreas experimentais.

Características	Profundidade (cm)				
	0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,4	0,4-0,6	0,6-1,0
	<u>Plantio convencional (PC)</u>				
pH	5,3	5,2	5,3	4,9	5,4
C orgânico (g dm ⁻³)	32	32	27	20	16
P resina (mg dm ⁻³)	8	7	6	3	3
S (mg dm ⁻³)	12	28	12	57	26
K (mmolc dm ⁻³)	1,8	1,2	0,7	0,4	0,3
Ca (mmolc dm ⁻³)	27	19	20	10	8
Mg (mmolc dm ⁻³)	8	7	6	3	3
Al (mmolc dm ⁻³)	<1	<1	<1	<1	<1
H + Al (mmolc dm ⁻³)	52	52	31	42	25
SB (mmolc dm ⁻³)	36,8	27,2	26,7	13,4	11,3
CTC (mmolc dm ⁻³)	88,8	79,2	57,7	55,4	36,3
V (%)	41	34	46	24	31
m (%)	0	0	0	0	0
Areia (g kg ⁻¹)	215	220	206	190	194
Silte (g kg ⁻¹)	286	260	269	234	222
Argila (g kg ⁻¹)	499	520	525	576	583
	<u>Plantio direto (PD)</u>				
pH	5,3	5,2	5,3	5,4	5,6
C orgânico (g dm ⁻³)	26	28	25	20	14
P resina (mg dm ⁻³)	7	7	10	5	4
S (mg dm ⁻³)	9	9	9	28	25
K (mmolc dm ⁻³)	1,9	1,2	0,7	0,6	0,4
Ca (mmolc dm ⁻³)	22	22	21	15	11
Mg (mmolc dm ⁻³)	7	7	6	4	3
Al (mmolc dm ⁻³)	<1	<1	<1	<1	<1
H + Al (mmolc dm ⁻³)	47	38	42	22	25
SB (mmolc dm ⁻³)	30,9	30,2	27,7	19,6	14,4
CTC (mmolc dm ⁻³)	77,9	68,2	69,7	41,6	39,4
V (%)	40	44	40	47	37
m (%)	0	0	0	0	0
Areia (g kg ⁻¹)	203	200	197	186	188
Silte (g kg ⁻¹)	279	267	256	214	235
Argila (g kg ⁻¹)	517	533	547	599	576

pH: pH em solução de CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹; C orgânico: carbono orgânico pela oxidação com dicromato; P, Ca, Mg e K: fósforo, cálcio, magnésio e potássio trocáveis com extração por resina trocadora de íons; S: sulfato extraível em solução de Ca(H₂PO₄)₂ 0,01 mol L⁻¹; Al: alumínio trocável em solução de KCl 1 mol L⁻¹; H + Al: acidez potencial com solução-tampão SMP em pH 7,0; SB: soma de bases; CTC: capacidade de troca catiônica a pH 7,0; V: saturação por bases; m: saturação por alumínio; Areia, Silte e Argila: análise granulométrica pelo método da pipeta.

O solo foi corrigido com aplicação de calcário ($1,5 \text{ Mg ha}^{-1}$), de forma superficial para PD e incorporada para PC, e condicionado à gessagem (1 Mg ha^{-1}), logo após a calagem. O plantio de amendoim foi realizado com a cultivar IAC 503, com espaçamento entre linhas de 0,90 m, em profundidade de 5 a 6 cm, na densidade de 15 a 18 sementes por metro, e sem adubação de plantio. Já para a soja, a semeadura foi realizada com o cultivar BMX Potência RR, com espaçamento entre linhas de 0,45 m, em profundidade de 4 a 5 cm, na densidade de 22 a 23 sementes por metro, e com aplicação de 350 kg ha^{-1} do fertilizante formulado 02-20-18, posicionado no fundo do sulco. As crotalárias foram obtidas em empresa comercial credenciada no Sistema Nacional de Sementes e Mudas do Ministério da Agricultura (Pirai Sementes Ltda), e semeadas com espaçamento entre linhas de 0,45 m, em profundidade de 2 a 3 cm, e densidade linear de 22-27, 55-60 e 22-24 sementes para *Crotalaria spectabilis*, *Crotalaria ochroleuca*, *Crotalaria juncea*, respectivamente.

Os componentes produtivos, como biomassa seca e produtividade de grãos (Tabela 2), bem como o acúmulo de nutrientes da biomassa remanescente das culturas antecessoras (Tabela 3), foram avaliados após a colheita e determinados pela análise do tecido vegetal do material amostrado, segundo metodologia de Malavolta et al. (1997).

Tabela 2. Produção de biomassa seca das culturas antecessoras e produtividade de grãos das culturas comercialmente exploradas, no período de renovação do canavial.

Antecessora	Manejo de solo		
	PC	PD	Média
	Biomassa seca (Mg ha^{-1})		
Amendoim	$6,0 \pm 1,2$	$7,1 \pm 0,7$	$6,6 \pm 0,4$
<i>Crotalaria juncea</i>	$19,2 \pm 2,9$	$20,2 \pm 2,9$	$19,7 \pm 1,9$
<i>Crotalaria ochroleuca</i>	$25,5 \pm 4,4$	$19,8 \pm 1,4$	$22,6 \pm 2,4$
<i>Crotalaria spectabilis</i>	$7,3 \pm 0,3$	$7,0 \pm 1,0$	$7,1 \pm 0,5$
Soja	$3,0 \pm 0,0$	$3,2 \pm 0,1$	$3,1 \pm 0,1$
Média	$12,2 \pm 2,2$	$11,5 \pm 1,7$	
	Produtividade de grãos (kg ha^{-1})		
Amendoim	$4571,8 \pm 349,4$	$4412,5 \pm 356,3$	$4492,1 \pm 233,0$
Soja	$2253,5 \pm 105,5$	$2607,3 \pm 105,1$	$2430,4 \pm 96,0$

PC: Plantio convencional; PD: Plantio direto. Média \pm erro padrão da média (n = 48).

Tabela 3. Acúmulo de nutrientes das culturas antecessoras, empregadas no período de reforma do canavial.

(A)	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	g kg ⁻¹						mg kg ⁻¹				
PC											
A	81,6 ± 15,4	4,7 ± 0,8	130,6 ± 30,0	70,3 ± 16,0	29,8 ± 5,5	6,9 ± 1,4	150,4 ± 25,4	48,2 ± 9,9	9175 ± 4411	964 ± 205	140,4 ± 39,6
CJ	119,2 ± 23,0	8,1 ± 1,2	219,0 ± 33,4	50,7 ± 7,7	28,3 ± 4,6	16,9 ± 2,6	352,7 ± 72,5	88,8 ± 20,8	3993 ± 1090	453 ± 66	230,3 ± 35,0
CO	220,2 ± 34,6	15,6 ± 2,5	250,2 ± 45,7	130,0 ± 25,6	58,3 ± 10,8	34,7 ± 7,1	365,4 ± 88,1	136,4 ± 23,2	20460 ± 6089	3810 ± 725	349,0 ± 43,5
CS	89,3 ± 19,6	6,4 ± 1,3	155,1 ± 4,7	60,2 ± 7,9	16,5 ± 0,9	16,0 ± 1,1	210,2 ± 26,1	73,8 ± 12,3	1283 ± 205	679 ± 40	165,6 ± 12,2
S	20,0 ± 3,0	1,5 ± 0,2	31,7 ± 0,4	21,1 ± 1,4	16,4 ± 1,1	1,9 ± 0,2	60,3 ± 7,0	12,0 ± 0,1	829 ± 112	563 ± 20	33,0 ± 1,1
PD											
A	136,5 ± 16,4	7,5 ± 0,9	164,3 ± 11,0	82,6 ± 5,9	32,2 ± 3,1	10,7 ± 1,3	187,0 ± 17,3	56,9 ± 5,6	4537 ± 334	700 ± 155	201,4 ± 23,6
CJ	124,1 ± 29,1	10,8 ± 2,2	239,0 ± 52,9	57,4 ± 12,5	42,4 ± 10,0	22,4 ± 3,4	286,1 ± 76,7	131,8 ± 24,1	2820 ± 898	2124 ± 500	309,4 ± 90,8
CO	195,5 ± 14,8	12,0 ± 1,5	244,9 ± 31,2	104,6 ± 12,5	49,5 ± 6,9	23,7 ± 1,9	366,6 ± 81,9	118,5 ± 16,0	7508 ± 1368	3943 ± 296	277,8 ± 37,0
CS	114,1 ± 16,9	8,0 ± 1,0	148,9 ± 22,8	81,7 ± 13,0	16,6 ± 2,1	13,9 ± 2,3	256,6 ± 31,9	73,2 ± 13,3	1810 ± 329	804 ± 122	179,0 ± 28,7
S	21,7 ± 1,3	1,0 ± 0,2	30,3 ± 2,3	18,4 ± 0,6	14,9 ± 0,8	2,1 ± 0,1	70,0 ± 7,0	12,7 ± 0,5	351 ± 56	507 ± 30	39,4 ± 3,2

(A): Cultura antecessora; PC: Plantio convencional; PD: Plantio direto. A: Amendoim; CJ: *Crotalaria juncea*; CO: *Crotalaria ochroleuca*; CS: *Crotalaria spectabilis*; P: Pousio; S: soja. Média ± erro padrão da média (n = 4).

O início do experimento ocorreu em novembro de 2015, a partir das operações destinadas ao preparo de solo de PC e dessecação prévia de PD (Figura 2). Com intuito de avaliar o efeito do preparo de solo na renovação do canavial, o experimento foi dividido em duas áreas experimentais, de acordo com o manejo do solo (plantio convencional e plantio direto). Enquanto o plantio convencional consistiu no preparo de solo com grade e arado, o plantio direto apresentou mobilização do solo somente na linha de cultivo no plantio das leguminosas e da cana-planta. Após essa etapa, o plantio de leguminosas empregadas na reforma do canavial, também denominadas de culturas de sucessão ou antecessoras, foi conduzido em dezembro de 2015 e incluiu as seguintes espécies: *Crotalaria juncea*, *Crotalaria spectabilis*, *Crotalaria ochroleuca*, soja [*Glycine max* (L.) Merrill] e amendoim-branco (*Arachis hypogaea* L.) (Figura 2). A colheita da soja e amendoim foi realizada nos meses de março e abril, respectivamente. As crotalárias não foram anteriormente dessecadas, roçadas ou incorporadas para o plantio da cana e, portanto, o processo de abertura de sulcos foi realizado sem nenhum manejo prévio destinado à adubação verde.



Figura 2. Cronologia dos principais eventos ocorridos no período de condução experimental.

Após o término do período de sucessão de culturas, o plantio da cana foi realizado em maio de 2016 com a variedade RB966928, indicada para ambientes de médio a alto potencial e considerada de maturação média. A abertura dos sulcos foi efetuada com a plantadora de cana-de-açúcar de duas linhas espaçadas em 1,5 m, com profundidade de 50 a 55 cm e base larga. Nessa operação, também foram adicionados fertilizantes líquidos no tanque de pulverização, com intenção de atender a necessidade de micronutrientes pela cultura (Anexo A), em especial de B e Zn. A distribuição dos toletes no fundo do sulco foi feita manualmente, aproximadamente, 20 gemas viáveis por metro. A adubação de plantio da cana foi constituída pela aplicação incorporada ao solo de 130 kg ha⁻¹ de P₂O₅, na forma de fosfato monoamônico (MAP, 10% N e 52% P₂O₅), e 125 kg ha⁻¹ de K₂O, na forma de cloreto de potássio (KCl), correspondendo ao final aproximadamente 25 kg ha⁻¹ de N, 56 kg ha⁻¹ de P

e 104 kg ha⁻¹ de K, em profundidade estimada de 60 cm. A adubação nitrogenada da cana-planta ainda foi complementada com aplicação de 50 kg ha⁻¹ de N em cobertura, na forma de nitrato de amônio (NH₄NO₃). Foi realizada a aplicação de inseticida (Regent, 800 WG, na dose de 250 g ha⁻¹) e fungicida (Priori Xtra, na dose de 1,5 L ha⁻¹) sobre os toletes depositados no sulco de plantio, e o fechamento de sulcos efetuado em profundidade aproximada de 6 cm de solo.

A colheita da cana-planta foi realizada em julho de 2017. A subdivisão das parcelas que consistiu em quatro níveis de adubação nitrogenada, com base no N exportado de cada parcela, foi concebida na adubação da primeira soqueira (N e K) e replicada nos demais ciclos subsequentes pela reaplicação dos tratamentos. O N em soqueira distribuído manualmente, na superfície do solo e em faixa, com distância de 15 cm da linha do plantio, na forma de nitrato de amônio. Durante aplicação das doses de N em soqueira, a adubação potássica foi realizada com KCl, na dose de 120 kg ha⁻¹ de K₂O (± 100 kg ha⁻¹ K). Além da adubação de plantio e aplicação de N e K em soqueira, foi realizado a aplicação foliar de micronutrientes, especialmente B e Zn, no mês de dezembro (Anexo A), podendo estar associado à aplicação de defensivos, conforme a necessidade.

O controle de pragas, doenças e plantas daninhas foi efetuado ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura, mediante aplicação de defensivos agrícolas recomendados para a cultura (Anexo A), conforme a necessidade. Ao final de cada ciclo, o processo de maturação foi auxiliado pela aplicação de maturador comercial (Sugar Plus), composto de água amoniacal e cloreto de potássio, na dose de 2 L ha⁻¹, 30 dias antes da colheita, a fim de estimular a produção de complexos enzimáticos que favorecem a transferência e acúmulo de sacarose dos colmos.

Os dados de pluviosidade, temperatura, umidade relativa, radiação e evapotranspiração foram monitorados na estação meteorológica automatizada da propriedade (Vantage Pro II, Decagon Devices, Califórnia – EUA). O balanço hídrico foi calculado pelo método de Penman-Monteith (Figura 3). O coeficiente da cultura (Kc) foi baseado no levantamento da evapotranspiração recomendado por Dias e Sentelhas (2017). A capacidade de água disponível (CAD) considerada foi 168 mm, conforme critérios de Pereira et al. (2002).

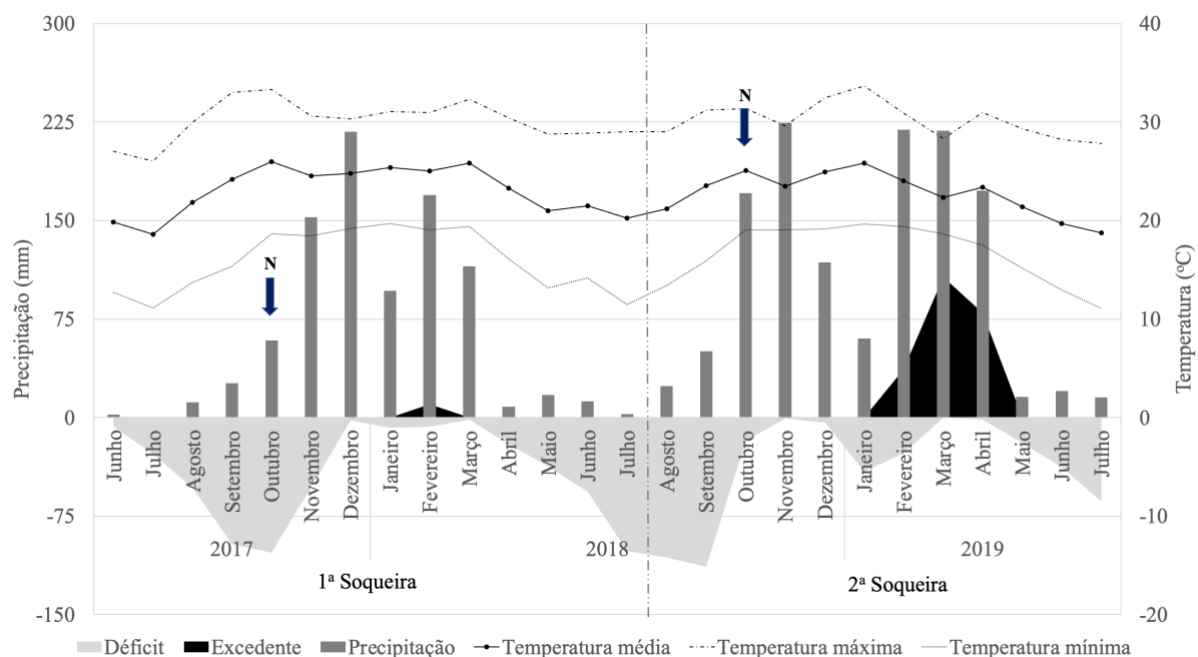


Figura 3. Balanço hídrico sequencial, precipitação e temperaturas do ar mensais registradas para primeira (2017/2018) e segunda (2018/2019) soqueira, no período de desenvolvimento das três primeiras soqueiras.

3.2.2. Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental foi de blocos ao acaso, em esquema de parcelas subdivididas, com quatro repetições. As unidades experimentais foram compostas por cinco linhas de cana com 10 m de comprimento, o que compreendeu em área total de 75 m². O experimento foi dividido em duas áreas experimentais, de acordo com o manejo do solo empregado durante a renovação do canal (plantio convencional e plantio direto).

As duas áreas experimentais foram delineadas de forma espelhada e envolveram os seguintes fatores: sucessão de culturas (fator primário) e adubação nitrogenada de soqueira (fator secundário). O fator primário foi composto por pousio (sem adubação verde) e uso de cinco leguminosas, sendo duas culturas com fins comerciais (soja e amendoim) e três espécies distintas de crotalárias (*Crotalaria juncea*, *Crotalaria spectabilis*, *Crotalaria ochroleuca*). O fator secundário, oriundo da subdivisão de parcelas, foi constituído pelos tratamentos da adubação nitrogenada de soqueira: sem N (controle) e com N (100% do N exportado na colheita antecessora).

A dose de N foi aplicada com base na produtividade de cada parcela. Desse modo, considerando que 1 Mg de cana colhida possa ser restituído pela aplicação de 1 kg de N (Vitti

et al., 2006), na unidade experimental que produzir 80 Mg ha⁻¹ seria aplicado 80 kg N ha⁻¹, intencionando a reposição de 100% do N exportado. Por questões de viabilidade operacional e de custo, o acúmulo de nutrientes foi realizado em dois níveis de adubação nitrogenada de soqueira (0 e 100% do N exportado), para primeira e segunda soqueira. Assim, a combinação de seis sistemas de sucessão, dois níveis de N em soqueira, em quatro blocos e duas áreas experimentais, formou um arranjo experimental global de 96 parcelas.

3.2.3. Avaliações e análises

O acúmulo de biomassa seca e nutrientes pela parte aérea das plantas de cana foi determinada no momento do corte, em dois metros lineares da parcela, no período de colheita da primeira soqueira (2017/2018) e segunda soqueira (2018/ 2019). Para avaliação da biomassa, as plantas foram particionadas manualmente em compartimentos vegetais de ponteiro, colmo e folha. Após a separação e pesagem dos compartimentos no campo, o material vegetal subamostrado de cada compartimento foi seco em estufa a 65° e triturado em moinho tipo Wiley. Após a separação e pesagem em balança eletrônica da massa fresca dos compartimentos no campo, o material vegetal subamostrado de cada compartimento foi pré-triturado em picadora e encaminhado ao Laboratório de Isótopos Estáveis (CENA/USP). Em seguida, as amostras vegetais foram secas em estufas com circulação de ar à 65°C até a estabilização da massa e finamente trituradas em moinho tipo Wiley. Posterior ao processo de secagem e moagem, a produtividade de biomassa foi estimada por hectare (Mg ha⁻¹), com base na população de plantas da biometria. Os valores dos compartimentos de ponteiro, colmo e folha seca foram somados para obtenção do acúmulo total de nutrientes pela parte aérea (PA). A produtividade de colmos (TCH) foi determinada com base na massa fresca de colmos.

A determinação das concentrações de macro (N, P, K, Ca, Mg e S) e micronutrientes (Fe, Cu, Mn, Zn e B) foram realizadas de acordo com a metodologia descrita de Malavolta et al. (1997) e Bataglia et al. (1983). O teor de nitrogênio foi obtido por digestão sulfúrica, por meio do método analítico semi-micro-Kjeldahl. Com exceção do B, as demais determinações foram avaliadas a partir da digestão nitro-perclórica, sendo o P determinado pelo método colorimétrico de metavanadato; o Ca, Mg, Fe, Cu, Mn e Zn por espectrofotometria de absorção atômica; o K por fotometria de chama de emissão; e S por turbidimetria do cloreto e bário. A concentração de B será determinada por digestão via seca e método colorimétrico da azometina-H.

O acúmulo de nutrientes (kg ou g ha⁻¹) de cada compartimento vegetal foi calculada pelo produto entre o teor do nutriente nos tecidos vegetais (mg ou g kg⁻¹) e a massa seca da biomassa vegetal (Mg ha⁻¹) de cada compartimento. Para fins de facilitar a interpretação dos resultados, as frações de folha seca e ponteiro foram agregadas por somatória em um único compartimento vegetal (FS+P).

3.2.4. Análise de dados e estatística

A análise estatística dos resultados foi realizada a partir da análise conjunta de dois locais (PC e PD) e aplicação de modelos lineares mistos, em esquema fatorial triplo. O fator manejo de solo foi aplicado em faixas contínuas, incluindo todos os níveis dos demais fatores, para facilitar a instalação e manejo. Nesse sentido, essa variável independente apresenta restrições atreladas ao princípio de casualização e, portanto, foi embutida no modelo de análise como um efeito fixo de aleatorização dependente. Isso porque, diferentemente do que geralmente é convencionado, a segregação das áreas não representa um controle local, uma vez que não se refere as interações do ambiente, como efeitos aleatórios usuais de clima e solo.

A parcela principal foi formada pelos sistemas de sucessão (amendoim, *Crotalaria spectabilis*, *Crotalaria juncea*, *Crotalaria ochroleuca*, soja e pousio) e a subparcela foi constituída pela adubação nitrogenada de soqueira, em quatro níveis quantitativos (0, 50, 100 e 150% do N exportado na colheita antecessora). Para análise global dos sistemas de manejo, considerando ainda as adversidades relacionadas à sazonalidade de cada rebrota, foi inserido no modelo matemático o efeito de soqueira, como fator aleatório. Tendo em vista à falta de randomização do efeito de manejo do solo e aleatoriedade do efeito de soqueira, a análise estatística não abrange a interação quádrupla dos fatores, o que possibilitou a combinação do fator soqueira apenas com as variáveis independentes de repetição essencialmente genuínas, como cultura antecessora e doses de N.

Previamente, os dados foram submetidos aos testes de pressuposições de normalidade dos resíduos e homogeneidade das variâncias pelos testes de Shapiro-Wilk e Bartlett, respectivamente. Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) pelo teste F ($p \leq 0,1$), considerando os efeitos principais e interações (Anexo B). Em seguida, como parte da análise exploratória dos dados, foi também realizada uma análise de componentes principais para explicar a variância de todas as variáveis observadas e a intercorrelação entre elas, com intuito de sintetizar as variáveis mais significativas ao longo

de dois anos do estudo. Já para o acúmulo de nutrientes, os efeitos principais e os desdobramentos das interações significativas foram comparados pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,1$).

Todas as análises estatísticas e as representações gráficas foram realizadas no programa livre R (R Core Team, 2020). Para análise de variância do tipo III e a comparação de média no programa estatístico, foram empregados os pacotes ‘lmerTest’ (Kuznetsova et al., 2017), ‘emmeans’ (Lenth et al., 2021), e ‘multcomp’ (Hothorn et al., 2008).

3.3. Resultados

3.3.1. Componentes principais dos parâmetros biométricos

Devido à caracterização biométrica detalhada, a análise de componentes principais (ACP) foi utilizada com o intuito de selecionar os principais compartimentos considerando suas possíveis intercorrelações, associação com a TCH e relevância para o sistema agrícola (Figura 4). A ACP revelou que todos os compartimentos biométricos apresentaram uma tendência semelhante de acúmulo de biomassa caracterizada pelo componente principal 1 (PC1), uma vez que todos ficaram dispersos no lado direito que concentra parcelas com maior TCH (legenda de cor) e acúmulo de biomassa. A partir do segundo componente (PC2), que explica 14% da variabilidade remanescente, a diferenciação entre compartimentos ficou mais evidente.

Enquanto a TCH ficou dispersa na porção superior junto de ponteiro (P) e colmo, os compartimentos folha seca (FS), FS+P e parte aérea (PA) ficaram separados na porção inferior. Diante disso, os compartimentos selecionados para análise de variância (Anexo D) foram colmo, que apresentou correlação com TCH e representa o compartimento exportado do sistema agrícola; e FS+P, uma vez que apresenta acúmulo de biomassa contrastante com os compartimentos do quadrante superior e representa o compartimento aportado no sistema, simbolizando um papel importante para ciclagem de nutrientes (Figura 4). Além disso, para uma compreensão mais completa do acúmulo de nutrientes, optou-se também analisar o compartimento PA, representado pela somatória de colmo, folha seca e ponteiro.

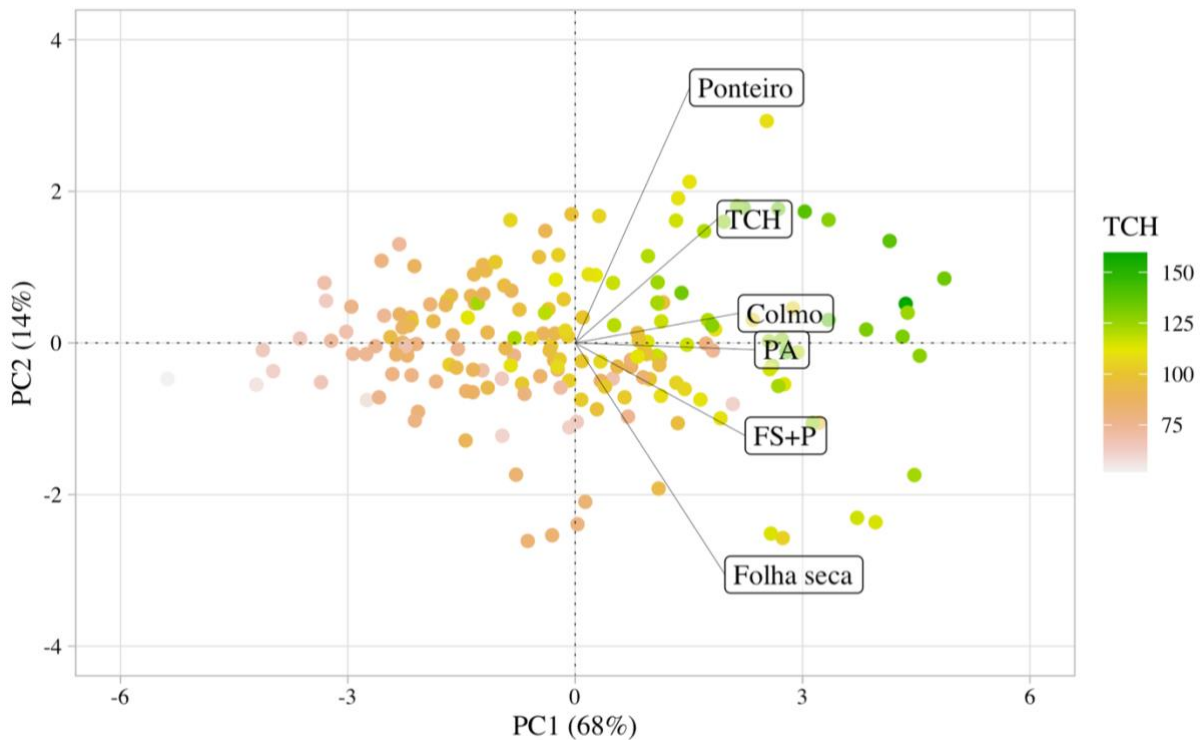


Figura 4. Análise de componentes principais dos parâmetros biométricos da cana-de-açúcar para as duas primeiras soqueiras (safras de 2018 e 2019). TCH: produtividade de colmos. PA: parte aérea. FS+P: folha seca e ponteiro. A porcentagem em parênteses indica a variância total explicada para cada componente principal (PC).

3.3.2. Acúmulo de biomassa e produtividade de colmos

A análise de variância (Anexo D) identificou diferenças estatísticas para manejo do solo e adubação nitrogenada no acúmulo de biomassa seca de FS+P (Figura 5a e 5c). Embora o tratamento PD tenha proporcionado maior acúmulo de biomassa seca em termos absolutos, a diferença em relação ao PC não foi estatisticamente significativa com 10% de probabilidade de erro a partir do teste de médias (Figura 5a). O mesmo resultado foi encontrado para adubação nitrogenada (Figura 5c). Por outro lado, considerando a parte aérea representada por todos os compartimentos, diferenças estatísticas foram encontradas entre soqueiras e adubação nitrogenada (Figura 5b e 5d). O acúmulo de biomassa foi maior para a segunda soqueira devido principalmente ao maior efeito sobre o compartimento colmo (Figura 5b), sendo que a adubação nitrogenada também teve papel importante na parte aérea (Figura 5d).

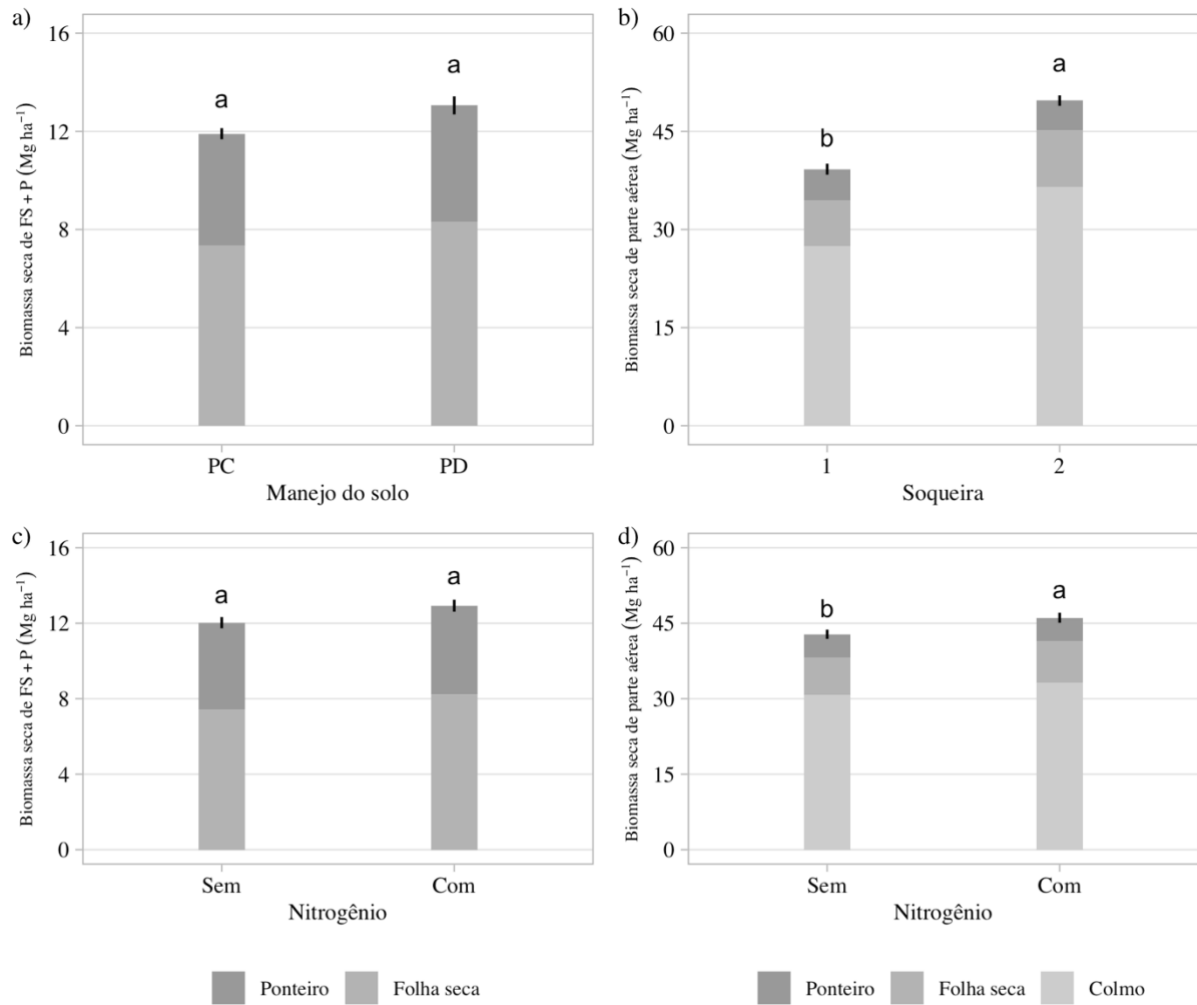


Figura 5. Efeitos do manejo do solo (a) e da adubação nitrogenada (c) no acúmulo de biomassa seca (Mg ha⁻¹) do compartimento de folha seca e ponteiro (FS+P), e da soqueira (b) e da adubação nitrogenada (d) no acúmulo de biomassa seca de parte aérea (Mg ha⁻¹), para duas primeiras soqueiras (safras 2018 e 2019). PC: Plantio convencional; PD: Plantio direto. Letras minúsculas distintas indicam diferenças entre manejos do solo, soqueiras ou a presença ou ausência da adubação nitrogenada, pelo teste de Tukey ($p \leq 0,10$). As barras verticais representam o erro padrão da média do tratamento ($n = 96$).

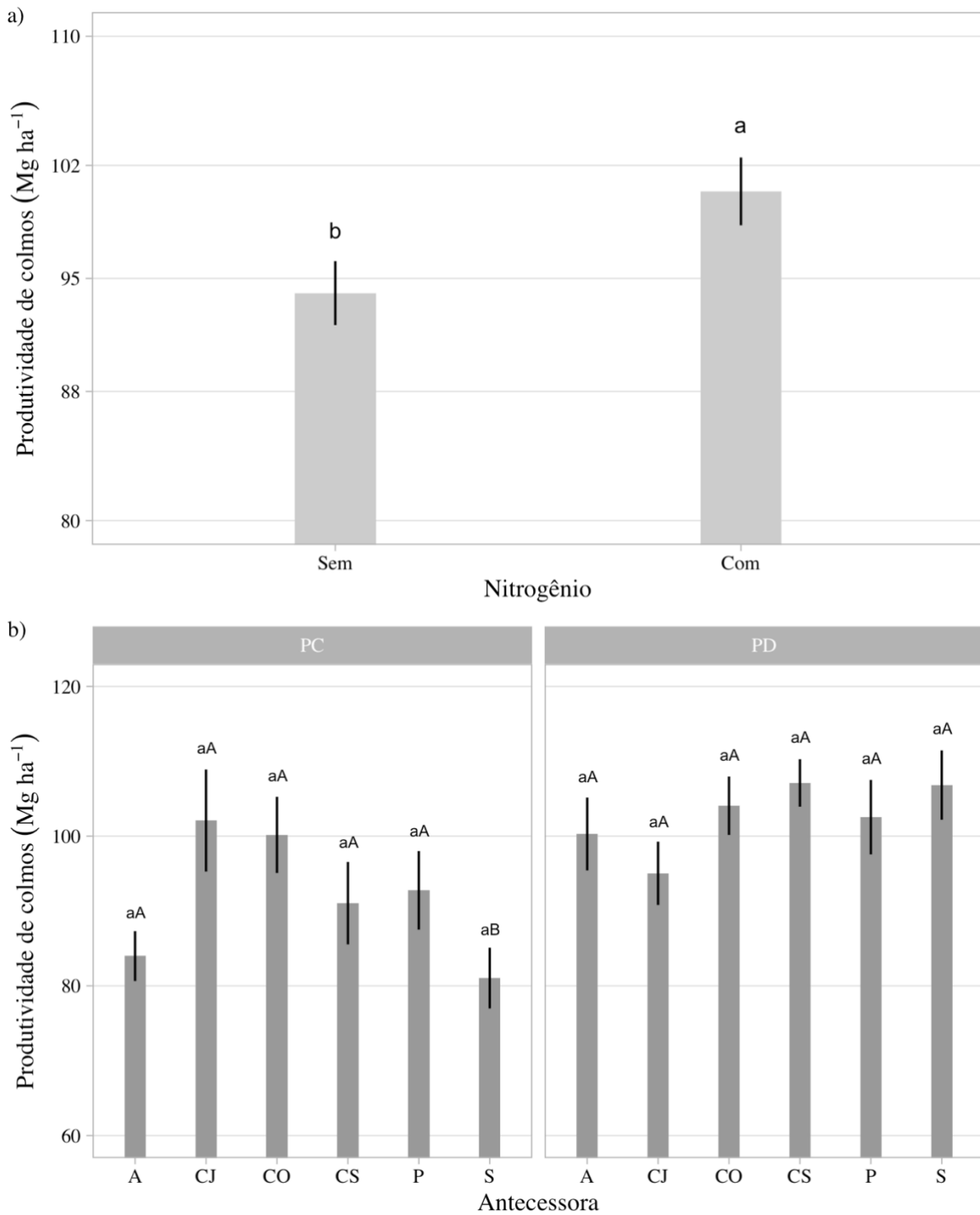


Figura 6. Efeito da adubação nitrogenada (a) e interação entre manejo do solo e cultura antecessora (b) na produtividade de colmos (Mg ha^{-1}) para duas primeiras soqueiras (safras de 2018 e 2019). PC: Plantio convencional; PD: Plantio direto. A: Amendoim; CJ: *Crotalaria juncea*; CO: *Crotalaria ochroleuca*; CS: *Crotalaria spectabilis*; P: Pousio; S: soja. Letras minúsculas distintas indicam diferenças entre manejos do solo ou a presença ou ausência da adubação nitrogenada, pelo teste de Tukey ($p \leq 0,10$). As barras verticais representam o erro padrão da média do tratamento ($n = 96$ para adubação nitrogenada e $n = 16$ para interação manejo do solo e cultura antecessora).

A adubação nitrogenada desempenhou papel essencial na produtividade de colmos (TCH), com diferenças chegando a quase 10 Mg em relação ao tratamento controle (Figura 6a). Outros fatores importantes que afetaram a produtividade de colmos foram as culturas antecessoras analisadas conjuntamente com o tipo de manejo de solo (Figura 6b). De modo geral, o PD proporcionou maiores produtividades de colmo, sendo que não foi encontrada nenhuma diferença entre as culturas para esse tipo de manejo de solo. Para o PC, embora as culturas antecessoras apresentaram uma maior variabilidade entre seus tipos e um padrão de menor produtividade comparado ao PD, não foi constatada diferença estatística entre seus níveis. Somente a sucessão com soja teve uma menor produtividade de colmos no manejo PC (Figura 6b).

3.3.3. Componentes principais do acúmulo de nutrientes

Após a análise de produtividade de colmos e biomassa, os teores de elementos acumulados na biomassa foram analisados no compartimento folha seca (FS) e ponteiro (P) (FS+P) (Figura 7a), e parte aérea (PA) que inclui colmos, FS e P (Figura 7b), uma vez que colmo apresentou alta correlação com a PA. A ACP foi novamente empregada a fim de identificar os principais elementos dentre todos aqueles que foram analisados em laboratório, levando em consideração a inclusão adicional da produtividade de colmos (TCH) para demonstração de intercorrelações (Figura 7a). A análise do compartimento FS+P via ACP revelou que a maioria das variáveis se concentraram no lado direito da PC1, região que representa as parcelas com maiores valores de todos os elementos analisados e inter-relacionados com maiores valores de TCH. As correlações mais fortes com TCH, por outro lado, foram associadas aos elementos do quadrante superior direito, onde Ca, N e P ficaram posicionados. As legendas de cor e tipo de ponto revelam certo nível de agrupamento dos dados, pois as parcelas da segunda soqueira estão posicionadas na porção mais à direita, enquanto as parcelas com mais adubação nitrogenada estão dispersas na porção superior do gráfico (Figura 7a).

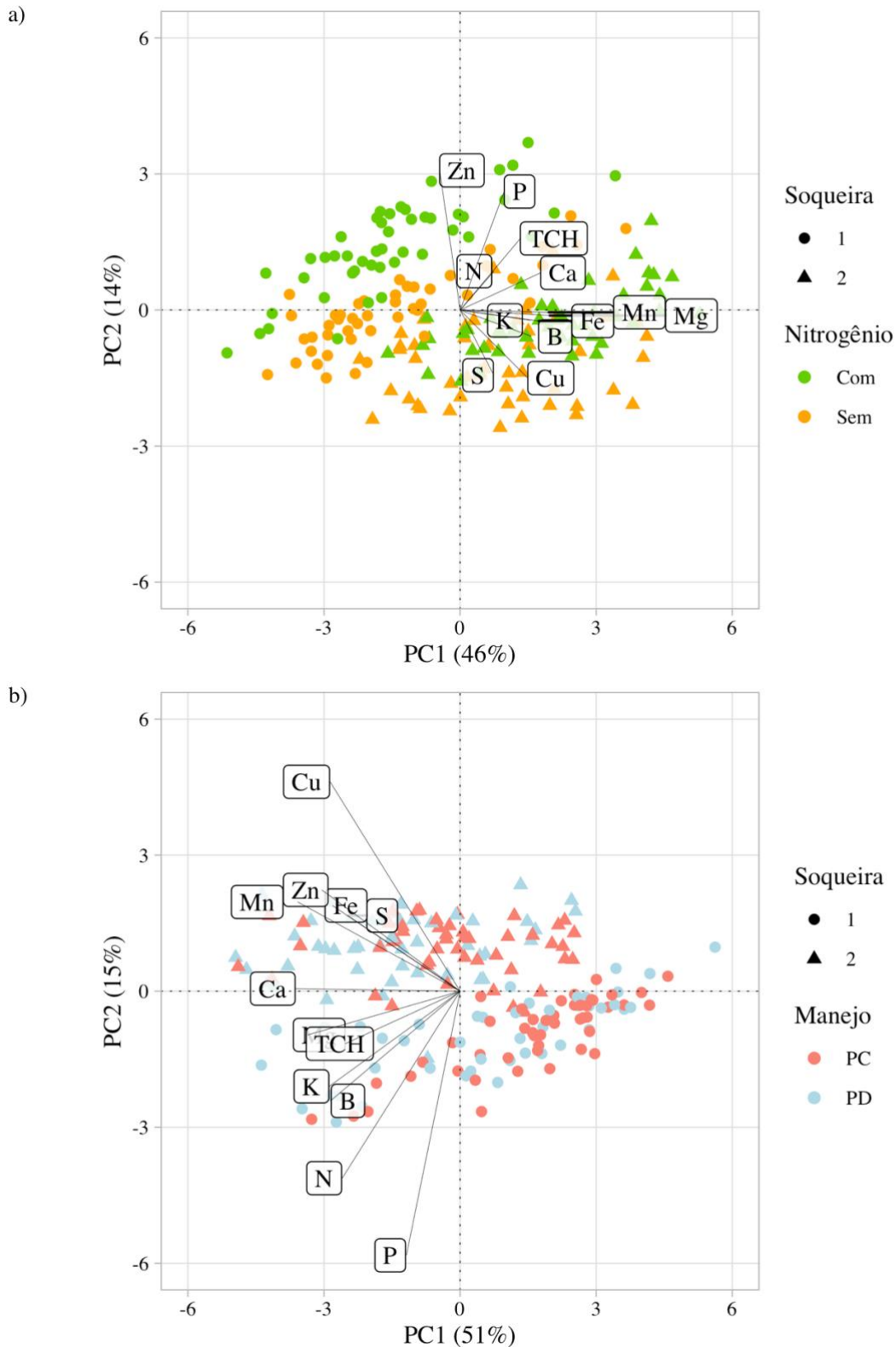


Figura 7. Análise de componentes principais do acúmulo de nutrientes no compartimento de folha seca e ponteiro (a) e da parte aérea (b) de cana-de-açúcar, para as duas primeiras soqueiras (safras de 2018 e 2019). A porcentagem em parênteses indica a variância total explicada para cada componente principal (PC). *Inclusão adicional da produtividade de colmos (TCH, Mg ha⁻¹) para demonstração de intercorrelações.

No que diz respeito ao acúmulo de nutrientes da parte aérea total (Figura 7b), os resultados referentes às associações foram diferentes. A TCH posicionada no quadrante inferior esquerdo apresentou alta correlação com Mg, K, B, Ca e N. A aplicação de cores e tipos de pontos revela agrupamentos mais difusos entre as observações, com a concentração maior de parcelas da primeira soqueira na porção superior do gráfico, e uma dispersão mais difusa de parcelas sob PC no lado direito, região associada a um menor acúmulo de nutrientes e produtividade de colmos. Com o intuito de selecionar os principais e mais variados elementos levando em consideração os resultados da ACP e a relevância dos elementos na nutrição de plantas, a análise de variância foi realizada para N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu e Zn (Anexo E e Anexo F).

3.3.4. Acúmulo de macronutrientes

A ANOVA revelou efeito de interação entre soqueira e adubação nitrogenada no acúmulo de N na parte aérea (Tabela 4). Quando submetida à adubação nitrogenada, a segunda soqueira apresentou maior acúmulo de N (91 kg ha^{-1}) do que a primeira soqueira (71 kg ha^{-1}) na parte aérea, sendo que efeito inverso foi constatado para as parcelas sem adubação. Para o compartimento FS+P, por outro lado, somente diferença estatística entre soqueiras foi constatada, pois a primeira soqueira proporcionou maior acúmulo de N (45 kg ha^{-1}) do que a segunda soqueira (40 kg ha^{-1}).

Tabela 4. Interação entre soqueira e adubação nitrogenada no acúmulo de N (kg ha^{-1}) da parte aérea para as duas primeiras soqueiras de cana-de-açúcar (safras 2018 e 2019).

Soqueira	Nitrogênio		Média
	Com	Sem	
Parte aérea (kg ha^{-1})			
1	72 ± 2 aB	99 ± 2 aA	86 ± 5
2	91 ± 3 aA	74 ± 3 aB	82 ± 4
Média	82 ± 4	87 ± 5	
FS + P (kg ha^{-1})			
1	45 ± 1	45 ± 2	45 ± 1 a
2	43 ± 2	38 ± 1	40 ± 1 b
Média	44 ± 1	41 ± 2	

Médias seguidas de letras minúsculas distintas nas colunas (níveis de soqueira) e letras maiúsculas distintas nas linhas (níveis de nitrogênio), diferem entre si pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,10$). Média \pm erro padrão da média ($n = 48$).

No compartimento FS+P também foi constatada interação dos efeitos de cultura antecedente, manejo do solo e adubação nitrogenada no acúmulo de N (Figura 8). Diferenças significativas entre culturas anteriores foram encontradas para S, a qual apresentou menor acúmulo de N do que as demais culturas quando manejada sob PC e com adubação nitrogenada, e menor acúmulo em comparação ao tratamento com PD sob os mesmos efeitos. Para o tratamento de pousio (P), o acúmulo de N foi maior sob PD e sem adubação nitrogenada. Por outro lado, a análise de comparação sob contexto da adubação nitrogenada revela que a cultura S proporcionou maior acúmulo de N em PD e com adubação de N na FS+P, enquanto para o P, maior acúmulo foi encontrado no PD sem efeito da adubação nitrogenada (Figura 8).

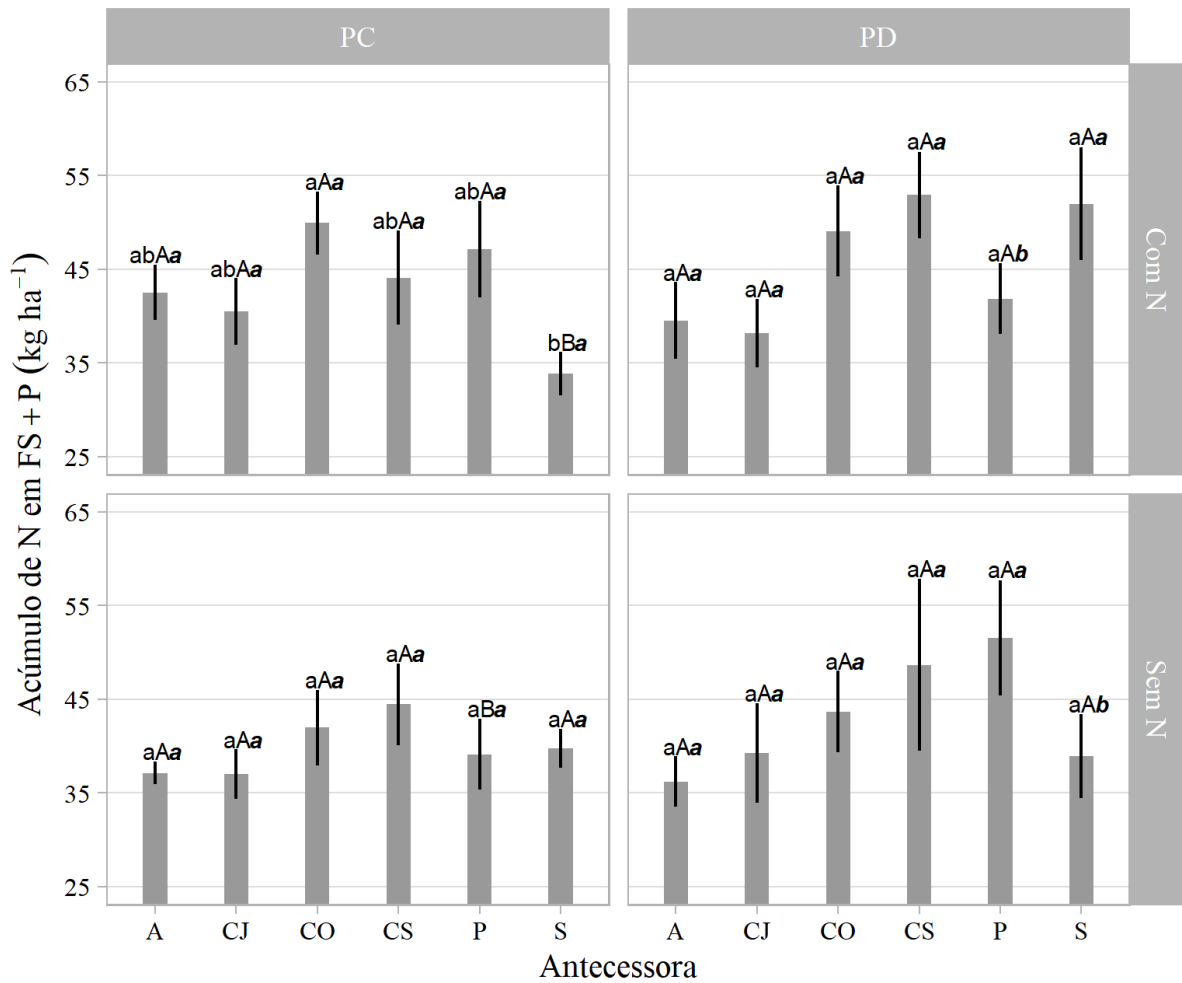


Figura 8. Interação entre manejo do solo (M), cultura antecessora (A) e adubação nitrogenada (N) no acúmulo de N (kg ha^{-1}) do compartimento folha seca e ponteiro (FS+P) para duas primeiras soqueiras de cana-de-açúcar (safra de 2018 e 2019). PC: Plantio convencional; PD: Plantio direto. A: Amendoim; CJ: *Crotalaria juncea*; CO: *Crotalaria ochroleuca*; CS: *Crotalaria spectabilis*; P: Pousio; S: soja. Letras minúsculas distintas indicam diferenças para (A) dentro de (M) e (N), letras maiúsculas distintas indicam diferenças para (M) dentro de (A) e (N), e letras minúsculas em negrito indicam diferenças para (N) dentro de (M) e (A), pelo teste de Tukey ($p \leq 0,10$). As linhas verticais representam o erro padrão da média do tratamento ($n = 8$).

Para o acúmulo de P na parte aérea, embora a ANOVA tenha indicado interação entre soqueira e adubação nitrogenada, o teste de média revelou somente efeito simples da adubação nitrogenada, a qual proporcionou maior acúmulo de P ($10,2 \text{ kg ha}^{-1}$) em relação ao tratamento controle ($7,3 \text{ kg ha}^{-1}$) (Tabela 5). Para o compartimento FS+P, uma interação entre cultura antecessora, adubação nitrogenada e soqueira foi identificada. Diferenças entre culturas antecessoras foram constatadas somente sob efeito conjunto de adubação nitrogenada na primeira soqueira, e de forma contrastante, sem adubação nitrogenada na segunda soqueira. Nesses dois casos, o efeito de cultura antecessora foi variado, porém, pelo menos um tipo de crotalária proporcionou menor acúmulo de P em ambas as condições. Enquanto na primeira

soqueira somente CO apresentou menor acúmulo sem adubação nitrogenada, na segunda soqueira CO e pousio obtiveram desempenho inferior. Os resultados revelam também que sob adubação nitrogenada, a primeira soqueira foi que a proporcionou maior acúmulo de P na maioria das culturas (média de 4,8 em comparação à 2,8 kg ha⁻¹, Tabela 5).

Tabela 5. Interações entre soqueira e adubação nitrogenada para parte aérea, e entre soqueira, cultura antecessora e adubação nitrogenada no acúmulo de P (kg ha⁻¹) de folha seca mais ponteiro para primeira e segunda soqueira de cana-de-açúcar (safras 2018 e 2019).

Antecessora (A)	Soqueira (S)	Nitrogênio (N)		Média
		Com	Sem	
Parte aérea (kg ha⁻¹)				
-	1	9,8 ± 0,2 aA	7,4 ± 0,2 aB	8,6 ± 0,5
-	2	10,6 ± 0,5 aA	7,2 ± 0,6 aB	8,9 ± 0,7
<i>Média</i>		10,2 ± 0,3	7,3 ± 0,3	
FS + P (kg ha⁻¹)				
Amendoim	1	4,3 ± 0,2 abAA	3,9 ± 0,2 aAA	4,1 ± 0,2
<i>Crotalaria juncea</i>	1	4,0 ± 0,4 bAA	4,3 ± 0,3 aAA	4,1 ± 0,2
<i>Crotalaria ochroleuca</i>	1	5,9 ± 0,2 aAA	4,5 ± 0,4 aBA	5,2 ± 0,3
<i>Crotalaria spectabilis</i>	1	5,4 ± 0,5 abAA	5,0 ± 1,0 aAA	5,2 ± 0,5
Pousio	1	4,8 ± 0,1 abAA	4,4 ± 0,4 aAA	4,6 ± 0,2
Soja	1	4,2 ± 0,5 abAA	3,7 ± 0,2 aAA	3,9 ± 0,3
<i>Média</i>		4,8 ± 0,2	4,3 ± 0,2	
Amendoim	2	2,8 ± 0,1 aAB	3,2 ± 0,4 abAA	3,0 ± 0,2
<i>Crotalaria juncea</i>	2	3,4 ± 0,3 aAA	4,0 ± 0,4 abAA	3,7 ± 0,2
<i>Crotalaria ochroleuca</i>	2	2,7 ± 0,5 aBB	4,5 ± 0,6 abAA	3,6 ± 0,5
<i>Crotalaria spectabilis</i>	2	2,4 ± 0,1 aAB	2,9 ± 0,5 bAB	2,6 ± 0,3
Pousio	2	2,9 ± 0,5 aBB	4,7 ± 0,7 aAA	3,8 ± 0,5
Soja	2	2,6 ± 0,3 aAB	3,1 ± 0,4 abAA	2,8 ± 0,3
<i>Média</i>		2,8 ± 0,1	3,7 ± 0,2	

Médias seguidas de letras minúsculas distintas nas colunas (níveis de soqueira em PA e cultura antecessora em FS+P), letras maiúsculas distintas nas linhas (níveis de nitrogênio), e letras maiúsculas sublinhadas distintas nas colunas (níveis de soqueira em FS+P) diferem entre si pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,10$). Média ± erro padrão da média ($n = 48$ para (S) x (N) e $n = 8$ para (S) x (A) e (N)).

Outro efeito experimental analisado foi a interação entre manejo do solo, cultura antecessora e adubação nitrogenada no acúmulo de P da parte área e FS+P (Tabela 6). Na parte área, diferenças entre cultura antecessora foram encontradas somente sob efeito conjunto de plantio direto e ausência de adubação nitrogenada, onde a cultura da soja proporcionou menor acúmulo de P (5,6 kg ha⁻¹) em comparação às demais culturas. A adubação nitrogenada proporcionou maiores acúmulos tanto sob PD quanto PC para a maioria das culturas, com exceção de pousio e soja sob PC. As diferenças entre manejo do solo foram

confirmadas sob ausência de adubação nitrogenada, onde CO e S sob plantio direto proporcionaram menor acúmulo de P na parte aérea (Tabela 6).

Para o compartimento FS+P, as diferenças entre culturas antecessoras apareceram na ausência de adubação nitrogenada tanto sob plantio direto ou convencional (Tabela 6). Entretanto, enquanto pousio proporcionou menor acúmulo entre as culturas sem adubação nitrogenada sob plantio convencional ($2,7 \text{ kg ha}^{-1}$), resultado inverso foi encontrado sob plantio direto e sem adubação nitrogenada, com pousio proporcionando o maior acúmulo de P entre as culturas ($6,4 \text{ kg ha}^{-1}$). Na comparação de manejo do solo, a soja sob plantio direto e com adubação nitrogenada proporcionou menor acúmulo de P ($4,2 \text{ kg ha}^{-1}$) quando comparada com a soja do plantio convencional com adubação nitrogenada ($2,6 \text{ kg ha}^{-1}$). Maiores acúmulos de P também foram significativos para o pousio e CS quando manejada sob plantio direto, porém sem adubação nitrogenada (Tabela 6).

Tabela 6. Interações entre manejo do solo, adubação nitrogenada e cultura antecessora no acúmulo de P (kg ha⁻¹) da parte aérea e folha seca + ponteiro (FS+P) para primeira e segunda soqueira de cana-de-açúcar (safras 2018 e 2019).

Antecessora	Manejo do solo	Nitrogênio		Média
		Com	Sem	
Parte aérea (kg ha⁻¹)				
Amendoim	PC	9,4 ± 0,2 aAA	7,3 ± 0,9 aBA	8,3 ± 0,6
<i>Crotalaria juncea</i>	PC	10,4 ± 1,0 aAA	6,8 ± 0,3 aBA	8,6 ± 0,8
<i>Crotalaria ochroleuca</i>	PC	10,7 ± 1,0 aAA	8,9 ± 1,1 aBA	9,8 ± 0,8
<i>Crotalaria spectabilis</i>	PC	10,0 ± 1,3 aAA	7,8 ± 1,3 aBA	8,9 ± 0,9
Pousio	PC	8,9 ± 0,5 aAA	8,0 ± 0,5 aAA	8,5 ± 0,4
Soja	PC	9,0 ± 0,8 aAA	8,5 ± 0,5 aAA	8,7 ± 0,4
<i>Média</i>		9,7 ± 0,3	7,9 ± 0,3	
Amendoim	PD	10,2 ± 0,7 aAA	6,3 ± 0,5 abBA	8,2 ± 0,8
<i>Crotalaria juncea</i>	PD	9,0 ± 0,6 aAA	7,0 ± 0,8 abBA	8,0 ± 0,6
<i>Crotalaria ochroleuca</i>	PD	11,4 ± 1,1 aAA	6,0 ± 0,7 abBB	8,7 ± 1,2
<i>Crotalaria spectabilis</i>	PD	11,2 ± 0,6 aAA	6,8 ± 0,7 abBA	9,0 ± 0,9
Pousio	PD	10,6 ± 1,0 aAA	8,8 ± 1,0 aBA	9,7 ± 0,7
Soja	PD	11,2 ± 0,7 aAA	5,6 ± 0,2 bBB	8,4 ± 1,1
<i>Média</i>		10,6 ± 0,3	6,8 ± 0,3	
FS + P (kg ha⁻¹)				
Amendoim	PC	3,7 ± 0,3 aAA	3,1 ± 0,3 abAA	3,4 ± 0,2
<i>Crotalaria juncea</i>	PC	3,8 ± 0,6 aAA	4,2 ± 0,4 abAA	4,0 ± 0,3
<i>Crotalaria ochroleuca</i>	PC	4,0 ± 0,2 aAA	4,8 ± 0,6 aAA	4,4 ± 0,4
<i>Crotalaria spectabilis</i>	PC	3,5 ± 0,4 aAA	3,3 ± 0,2 abAB	3,4 ± 0,2
Pousio	PC	3,8 ± 0,4 aAA	2,7 ± 0,1 bBB	3,3 ± 0,3
Soja	PC	2,6 ± 0,2 aAB	3,2 ± 0,2 abAA	2,9 ± 0,2
<i>Média</i>		3,6 ± 0,2	3,5 ± 0,2	
Amendoim	PD	3,4 ± 0,1 aAA	4,0 ± 0,7 bAA	3,7 ± 0,3
<i>Crotalaria juncea</i>	PD	3,6 ± 0,7 aAA	4,1 ± 0,4 bAA	3,9 ± 0,4
<i>Crotalaria ochroleuca</i>	PD	4,6 ± 0,7 aAA	4,2 ± 0,6 bAA	4,4 ± 0,4
<i>Crotalaria spectabilis</i>	PD	4,3 ± 0,4 aAA	4,7 ± 0,7 abAA	4,5 ± 0,4
Pousio	PD	3,9 ± 0,8 aBA	6,4 ± 1,0 aAA	5,1 ± 0,8
Soja	PD	4,2 ± 0,6 aAA	3,5 ± 0,3 bAA	3,8 ± 0,4
<i>Média</i>		4,0 ± 0,2	4,5 ± 0,3	

Médias seguidas de letras minúsculas distintas nas colunas (níveis de cultura antecessora), letras maiúsculas distintas nas linhas (níveis de nitrogênio), e letras maiúsculas sublinhadas distintas nas colunas (níveis de manejo do solo) diferem entre si pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,10$). Média ± erro padrão da média (n = 8).

Para o acúmulo de K na parte aérea, diferenças entre culturas antecessoras combinadas com o manejo do solo foram identificadas (Tabela 7). Enquanto não foram constatadas diferenças entre culturas antecessoras sob plantio convencional, no plantio direto, por sua vez, os resultados foram mais diversificados, com destaque para a cultura CS que apresentou maior acúmulo de K (230 kg ha^{-1}). A diferença entre manejos foi significativa para amendoim e CS, pois ambas as culturas apresentaram maior acúmulo de K sob plantio direto. Na avaliação da FS+P, os resultados foram semelhantes aos da parte aérea (Tabela 7), com exceção para a cultura de amendoim, a qual não apresentou diferença entre PC e PD.

Tabela 7. Interação entre manejo do solo e cultura antecessora no acúmulo de K (kg ha^{-1}) da parte aérea e compartimento folha seca e ponteiro (FS+P) para as duas primeiras soqueiras de cana-de-açúcar (safras 2018 e 2019).

Antecessora	Manejo do solo		Média
	PC	PD	
Parte aérea (kg ha^{-1})			
Amendoim	164 ± 4 aB	193 ± 8 abA	179 ± 7
<i>Crotalaria juncea</i>	184 ± 18 aA	183 ± 11 bA	183 ± 10
<i>Crotalaria ochroleuca</i>	207 ± 15 aA	194 ± 20 abA	201 ± 12
<i>Crotalaria spectabilis</i>	167 ± 7 aB	230 ± 15 aA	198 ± 14
Pousio	171 ± 10 aA	192 ± 8 abA	181 ± 7
Soja	187 ± 8 aA	193 ± 6 abA	190 ± 5
<i>Média</i>	180 ± 5	198 ± 5	
FS+P (kg ha^{-1})			
Amendoim	67 ± 5 aA	75 ± 3 bA	71 ± 3
<i>Crotalaria juncea</i>	74 ± 4 aA	68 ± 4 bA	71 ± 3
<i>Crotalaria ochroleuca</i>	81 ± 2 aA	82 ± 6 abA	82 ± 3
<i>Crotalaria spectabilis</i>	69 ± 4 aB	92 ± 5 aA	80 ± 5
Pousio	71 ± 5 aA	78 ± 4 abA	75 ± 3
Soja	69 ± 2 aA	76 ± 7 abA	73 ± 4
<i>Média</i>	72 ± 2	79 ± 2	

Médias seguidas de letras minúsculas distintas nas colunas (níveis de cultura antecessora), e letras maiúsculas distintas nas linhas (níveis de manejo do solo), diferem entre si pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,10$). Média ± erro padrão da média (n = 16).

Foram identificados efeitos da adubação nitrogenada no acúmulo de Ca na parte aérea (Tabela 8). Embora não tenham sido constatados efeitos de interação com soqueiras ou manejo do solo, a adubação nitrogenada proporcionou maior acúmulo de Ca ($70,4 \text{ kg ha}^{-1}$) na parte aérea. No acúmulo de Mg, por sua vez, os resultados foram contrastantes considerando a interação entre soqueira e adubação nitrogenada. Enquanto na primeira soqueira a ausência de

adubação nitrogenada proporcionou maior acúmulo de Mg ($21,8 \text{ kg ha}^{-1}$) comparado ao tratamento sem adubação ($19,3 \text{ kg ha}^{-1}$), na segunda soqueira o efeito foi inverso, com maior acúmulo sendo identificado para o tratamento com adubação nitrogenada ($35,4 \text{ kg ha}^{-1}$). Além disso, somente foram confirmadas diferenças entre as soqueiras para os tratamentos com adubação nitrogenada. Para o elemento S, a análise da interação revelou que a adubação nitrogenada teve efeito somente sob plantio direto ($29,3 \text{ kg ha}^{-1}$), pois maior acúmulo de S foi encontrado na ausência de adubação nitrogenada sob plantio convencional ($24,2 \text{ kg ha}^{-1}$) (Tabela 8).

Tabela 8. Interação entre soqueira e adubação nitrogenada, e manejo do solo e adubação nitrogenada, no acúmulo de Ca, Mg e S (kg ha^{-1}) da parte aérea para as duas primeiras soqueiras de cana-de-açúcar (safras 2018 e 2019).

Fator	Nitrogênio		Média
	Com	Sem	
Soqueira (S)	Acúmulo de Ca (kg ha^{-1})		
1	$61,6 \pm 1,5$	$61,5 \pm 4,8$	$61,5 \pm 21,5$
2	$79,3 \pm 3,1$	$69,8 \pm 2,0$	$74,5 \pm 29,5$
Manejo do solo (M)			
PC	$68,6 \pm 1,6$	$61,5 \pm 0,9$	$65,0 \pm 25,1$
PD	$72,2 \pm 1,8$	$69,7 \pm 4,4$	$71,0 \pm 25,6$
<i>Média</i>	$70,4 \pm 1,3$ A	$65,6 \pm 2,6$ B	
Soqueira (S)	Acúmulo de Mg (kg ha^{-1})		
1	$19,3 \pm 1,1$ bB	$21,8 \pm 1,2$ aA	$20,5 \pm 6,4$
2	$35,4 \pm 1,3$ aA	$28,2 \pm 0,8$ aB	$31,8 \pm 13,7$
Manejo do solo (M)			
PC	$26,3 \pm 1,0$	$24,3 \pm 0,5$	$25,3 \pm 9,5$
PD	$28,4 \pm 1,1$	$25,6 \pm 1,2$	$27,0 \pm 10,5$
<i>Média</i>	$27,3 \pm 0,8$	$25,0 \pm 0,6$	
Soqueira (S)	Acúmulo de S (kg ha^{-1})		
1	$19,3 \pm 1,6$	$21,0 \pm 0,8$	$20,2 \pm 6,7$
2	$29,4 \pm 1,0$	$28,1 \pm 1,0$	$28,7 \pm 10,5$
Manejo do solo (M)			
PC	$19,4 \pm 1,1$ aB	$24,2 \pm 0,4$ aA	$21,8 \pm 5,9$
PD	$29,3 \pm 1,4$ aA	$24,9 \pm 1,6$ aB	$27,1 \pm 11,1$
<i>Média</i>	$24,3 \pm 2,1$	$24,6 \pm 0,8$	

Médias seguidas de letras minúsculas distintas nas colunas (níveis de soqueira e manejo do solo), e letras maiúsculas distintas nas linhas (níveis de nitrogênio), diferem entre si pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,10$). Média \pm erro padrão da média ($n = 16$).

Diferente da parte aérea, o acúmulo de Ca na FS+P foi maior sob o efeito da adubação nitrogenada e na segunda soqueira (Tabela 9). Além disso, a adubação nitrogenada combinada com plantio convencional também proporcionou maior acúmulo de Ca (46,4 kg ha⁻¹). No acúmulo de Mg, os resultados foram semelhantes ao Ca, com maior acúmulo na segunda soqueira e sob efeito da adubação nitrogenada ou plantio convencional (Tabela 9). Para o elemento S, por outro lado, a análise de variância mostrou somente que a adubação nitrogenada proporcionou maior acúmulo de S na FS+P (Tabela 9).

Tabela 9. Interação entre soqueira e adubação nitrogenada, e manejo do solo e adubação nitrogenada, no acúmulo de Ca, Mg e S (kg ha⁻¹) da folha seca e ponteiro (FS+P) para as duas primeiras soqueiras de cana-de-açúcar (safras 2018 e 2019).

Fator	Nitrogênio		Média
	Com	Sem	
Soqueira (S)			Acúmulo de Ca (kg ha⁻¹)
1	40,3 ± 2,2 aA	42,3 ± 5,3 aA	41,3 ± 14,0
2	54,9 ± 2,4 aA	47,7 ± 2,0 aB	51,3 ± 20,6
Manejo do solo (M)			
PC	46,4 ± 1,1 aA	40,3 ± 0,6 aB	43,4 ± 17,3
PD	48,7 ± 1,4 aA	49,6 ± 4,1 aA	49,2 ± 16,8
Média	47,6 ± 0,9	45,0 ± 2,6	
Soqueira (S)			Acúmulo de Mg (kg ha⁻¹)
1	9,6 ± 0,8 aA	10,0 ± 1,2 aA	9,8 ± 3,5
2	11,8 ± 0,3 aA	9,8 ± 0,5 aB	10,8 ± 4,5
Manejo do solo (M)			
PC	10,4 ± 0,3 aA	8,9 ± 0,2 aB	9,6 ± 3,9
PD	11,1 ± 0,6 aA	10,9 ± 1,0 aA	11,0 ± 4,0
Média	10,7 ± 0,3	9,9 ± 0,6	
Soqueira (S)			Acúmulo de S (kg ha⁻¹)
1	8,7 ± 0,2	8,1 ± 0,3	8,4 ± 3,2
2	12,7 ± 0,5	11,0 ± 0,6	11,9 ± 4,8
Manejo do solo (M)			
PC	9,0 ± 0,4	8,8 ± 0,3	8,9 ± 3,2
PD	12,4 ± 0,5	10,3 ± 0,5	11,4 ± 4,7
Média	10,7 ± 0,7 A	9,6 ± 0,4 B	

Médias seguidas de letras minúsculas distintas nas colunas (níveis de soqueira e manejo do solo), e letras maiúsculas distintas nas linhas (níveis de nitrogênio), diferem entre si pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,10$). Média ± erro padrão da média (n = 16).

3.3.5. Acúmulo de boro, cobre e zinco

Na análise de micronutrientes da parte aérea, a análise de variância do acúmulo de B revelou que a segunda soqueira apresentou maior acúmulo somente quando não foi realizada a adubação nitrogenada (Tabela 10). Por outro lado, a adubação nitrogenada proporcionou maior acúmulo de B na primeira soqueira (358 g ha⁻¹). Padrões semelhantes foram encontrados no manejo do solo, pois a adubação nitrogenada proporcionou maior acúmulo somente no plantio direto, enquanto no plantio convencional o resultado foi inverso. Para a análise do Cu, a segunda soqueira proporcionou maior acúmulo de Cu tanto com ou sem adubação nitrogenada, sendo que na primeira soqueira, o efeito da adubação nitrogenada foi significativo. Quando o efeito do manejo do solo foi considerado, a adubação nitrogenada proporcionou maior acúmulo somente sob plantio convencional (303 g ha⁻¹), pois a ausência de adubação favoreceu maior acúmulo de Cu sob plantio direto (247 g ha⁻¹). O acúmulo de Zn, por sua vez, foi maior na primeira soqueira tanto com ou sem adubação nitrogenada, com efeito da adubação nitrogenada sendo significativo somente na primeira soqueira. O plantio direto foi o manejo que proporcionou maior acúmulo de Zn (Tabela 10).

Diferente da parte aérea, o acúmulo de micronutrientes na FS+P foi mais sutil quanto aos efeitos experimentais (Tabela 11). Embora a análise da variância tenha identificado diferenças entre soqueira no acúmulo de B, o teste de média, por sua vez, não confirmou as diferenças. Por outro lado, o acúmulo de B foi maior sob efeito da adubação nitrogenada (242 g ha⁻¹). Para o acúmulo de Cu, a análise estatística confirmou maior acúmulo na segunda soqueira, sob efeito da adubação nitrogenada, e sob plantio direto, todos eles analisados de forma independente. Com o Zn, a combinação da segunda soqueira com adubação nitrogenada proporcionou o maior acúmulo, sendo que a ausência de adubação também proporcionou maior acúmulo de Zn somente na primeira soqueira (Tabela 11).

Tabela 10. Interação entre soqueira e adubação nitrogenada, e manejo do solo e adubação nitrogenada, no acúmulo de B, Cu e Zn (g ha^{-1}) da parte aérea para as duas primeiras soqueiras de cana-de-açúcar (safras 2018 e 2019).

Fator	Nitrogênio		Média
	Com	Sem	
Soqueira (S)	Acúmulo de B (g ha^{-1})		
1	358 ± 12 aA	307 ± 35 bB	332 ± 20
2	449 ± 27 aB	525 ± 15 aA	487 ± 20
Manejo do solo (M)			
PC	397 ± 23 aA	350 ± 16 aB	374 ± 149
PD	410 ± 9 aB	482 ± 29 aA	446 ± 129
<i>Média</i>	403 ± 12	416 ± 29	
Soqueira (S)	Acúmulo de Cu (g ha^{-1})		
1	156 ± 5 bA	63 ± 5 bB	110 ± 18
2	359 ± 15 aA	359 ± 12 aA	359 ± 9
Manejo do solo (M)			
PC	303 ± 13 aA	175 ± 10 aB	239 ± 130
PD	212 ± 8 aB	247 ± 6 aA	230 ± 68
<i>Média</i>	258 ± 18	211 ± 15	
Soqueira (S)	Acúmulo de Zn (g ha^{-1})		
1	5524 ± 310 aA	1962 ± 124 aB	3743 ± 691
2	1582 ± 52 bA	1554 ± 53 bA	1568 ± 35
Manejo do solo (M)			
PC	3369 ± 208	1734 ± 42	2551 ± 1498 b
PD	3736 ± 142	1783 ± 101	2760 ± 1671 a
<i>Média</i>	3553 ± 135	1758 ± 52	

Médias seguidas de letras minúsculas distintas nas colunas (níveis de soqueira e manejo do solo), e letras maiúsculas distintas nas linhas (níveis de nitrogênio), diferem entre si pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,10$). Média ± erro padrão da média ($n = 16$).

Tabela 11. Interação entre soqueira e adubação nitrogenada, e manejo do solo e adubação nitrogenada, no acúmulo de B, Cu e Zn (g ha^{-1}) da folha seca e ponteiro (FS+P) para as duas primeiras soqueiras de cana-de-açúcar (safra 2018 e 2019).

Fator	Nitrogênio		Média
	Com	Sem	
Soqueira (S)			
Acúmulo de B (g ha^{-1})			
1	242 ± 8	221 ± 16	232 ± 89 a
2	241 ± 11	198 ± 6	220 ± 93 a
Manejo do solo (M)			
PC	233 ± 12	200 ± 5	217 ± 88
PD	250 ± 5	219 ± 10	235 ± 92
Média	242 ± 7 A	210 ± 6 B	
Soqueira (S)			
Acúmulo de Cu (g ha^{-1})			
1	49 ± 3	44 ± 5	47 ± 19 b
2	120 ± 5	117 ± 4	118 ± 43 a
Manejo do solo (M)			
PC	77 ± 1	75 ± 3	76 ± 27 b
PD	92 ± 4	86 ± 2	89 ± 33 a
Média	85 ± 4 A	80 ± 3 B	
Soqueira (S)			
Acúmulo de Zn (g ha^{-1})			
1	603 ± 38 bB	871 ± 71 aA	737 ± 169
2	1058 ± 45 aA	1080 ± 38 aA	1069 ± 367
Manejo do solo (M)			
PC	721 ± 15	839 ± 43	780 ± 228
PD	940 ± 18	1111 ± 28	1026 ± 294
Média	831 ± 43	975 ± 57	

Médias seguidas de letras minúsculas distintas nas colunas (níveis de soqueira e manejo do solo), e letras maiúsculas distintas nas linhas (níveis de nitrogênio), diferem entre si pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,10$). Média ± erro padrão da média ($n = 16$).

3.4. Discussão

Antes de analisar o acúmulo de nutrientes diante dos efeitos experimentais, foi imprescindível compreender a produção de biomassa dos compartimentos da parte aérea. Isso porque as variações na produção de biomassa afetam diretamente o acúmulo de nutrientes, com uma parte podendo retornar para o sistema via decomposição da palhada. Neste raciocínio, o compartimento FS+P representa a fração com o potencial de ciclagem do sistema produtivo (Menandro et al., 2017), enquanto a parte aérea pode auxiliar na compreensão da demanda total de nutrientes para o desenvolvimento da cultura (Franco et al., 2007, 2015; Vitti et al., 2011). Por conta disso, a análise de componentes principais foi utilizada para facilitar a interpretação das relações entre os compartimentos da parte aérea.

As variáveis que apresentaram maior poder discriminatório para o acúmulo de biomassa seca no primeiro componente principal foram os compartimentos de colmo, FS+P e PA (Figura 4). A aplicação de N proporcionou maior acúmulo de biomassa seca da parte aérea (Figura 5d) e a produtividade de colmos (Figura 6a), enquanto as condições edafoclimáticas da segunda soqueira foram mais favoráveis no acúmulo de biomassa seca da parte aérea (Figura 5b). A sucessão de cana após cultivo com soja proporcionou maior produtividade de colmos sob plantio direto (Figura 6b).

O acúmulo de N pelo compartimento FS+P apresentou interação para manejo do solo, cultura antecessora e adubação nitrogenada (Figura 8). Quando o sistema apresentou reposição de nitrogênio, a sucessão com soja propiciou o menor acúmulo de N em relação as demais culturas antecessoras sob PC, assim como menor acúmulo quando comparado ao sistema PD antecedida por soja. O pousio foi beneficiado no plantio convencional com aplicação de N e desfavorecido pelo mesmo motivo em PD. A reposição de N também pode ocasionar resultados adversos no acúmulo de nitrogênio específicos de cada safra, dificultando a interpretação geral dos efeitos experimentais (Tabela 4).

A adubação nitrogenada aumentou o acúmulo de P em parte aérea e a sucessão com crotalária nem sempre favoreceu o acúmulo de P para FS+P. (Tabela 5). Com exceção de pousio e soja, a adubação nitrogenada aumentou os acúmulos de P de parte aérea para a maioria dos sistemas de sucessão em PC (Tabela 6). Enquanto o pousio sem reposição de N foi a combinação mais desfavorável para o acúmulo de P em FS+P em PC, a soja sem N foi a combinação mais desfavorável para o acúmulo de P em PA para PD. O acúmulo de P em FS+P foi aumentado com PD para soja com N. É importante salientar que a palhada tem um papel crucial na disponibilização de P, e alguns resultados experimentais indicam que a remoção para propósitos industriais ocasiona deficiência desse nutriente no solo após 6 cultivos consecutivos (Soltangheisi et al., 2021).

A utilização de pousio e soja parece desfavorecer o acúmulo de P sem a reposição de nitrogênio, com o plantio direto sendo ainda mais desfavorável possivelmente por afetar o processo de mineralização de nutrientes no solo devido a inúmeros fatores, como especialmente a relação C:N e a composição química dos resíduos (Vitti et al., 2011; Passos et al., 2018). Além disso, o acúmulo de K pela *Crotalaria juncea* também não foi favorecido em PD (Tabela 7). Diferentemente de nutrientes como N, Ca e Mg que necessitam da degradação dos componentes orgânicos para liberação no sistema solo-planta, a ciclagem de K pelos sistemas canavieiros tendem a ser mais rápido por meio da liberação dos resíduos remanescentes (Fortes et al., 2012).

Em geral, o acúmulo de macronutrientes secundários foram afetados pela interação da adubação nitrogenada com manejo de solo ou soqueira (Tabela 8 e 9). O acúmulo de Ca em PA foi reduzido sem aplicação de N, com esse fator afetando também o acúmulo no compartimento FS+P sob PC. Na ausência de adubação nitrogenada, o acúmulo de Mg em FS+P foi reduzido para segunda soqueira sob PC. A adubação nitrogenada aumentou o acúmulo de S em FS+P e o plantio direto favoreceu o acúmulo desse nutriente em PA.

O acúmulo de B, Cu e Zn pela PA foi afetado diretamente pela interação entre adubação nitrogenada e soqueira (Tabela 10 e 11). Em PA, a aplicação de N favoreceu o acúmulo de B e Cu em PC. Já para FS+P, os mesmos nutrientes tiveram concentrações reduzidas na ausência de N. De modo geral, a adubação nitrogenada demonstrou ser o fator mais determinante na dinâmica de acúmulo de nutrientes, com o manejo do solo sob plantio direto desfavorecendo alguns nutrientes.

Análogo ao relatado na produção de grãos, nem todos os benefícios do plantio direto podem ser alcançados a curto prazo, pois é necessário um período de estabilização do sistema para sua consolidação. Sendo assim, ainda que a mínima mobilização do solo promove o maior armazenamento de água pela manutenção da cobertura de resíduos em superfície, a ausência de preparo do solo reduz o processo de mineralização do sistema e, conseqüentemente, a ciclagem de nutrientes é inicialmente reduzida. Nesse sentido, mesmo com a adoção de plantas de cobertura, é essencial a adição de N para manutenção e favorecimento da mineralização. No trabalho conduzido por Franco et al. (2007), a adubação nitrogenada foi determinante para promover maior acúmulo de N e S na parte aérea.

Outro ponto que merece ser mencionado é a implicação do sistema de colheita da cana-de-açúcar sem queima. No início desse sistema, a deposição de resíduos culturais na superfície do solo leva a imobilização do N (Otto et al., 2016). O presente experimento foi estabelecido em uma área que realiza a colheita mecanizada da cana por cerca de 20 anos. Entretanto, conforme relatado no estudo de Trivelin et al. (2013), o ponto de equilíbrio entre a manutenção da palhada e mineralização do N acontece por volta de 40 anos, podendo recuperar cerca de $40 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de N do estoque presente no solo. Diante disso, ficou evidente que a reposição de N via fertilizante nitrogenado foi o fator mais importante para o acúmulo da maioria dos nutrientes analisados, possivelmente por estar favorecendo a mineralização da matéria orgânica no solo (Boschiero et al., 2020).

3.5. Conclusões

De modo geral, a adubação nitrogenada demonstrou ser o fator mais determinante na dinâmica de acúmulo de nutrientes, apresentando algumas variações de acordo com o manejo de solo e cultura antecessora. A utilização de soja ou pousio como antecessores demonstrou ser a condição mais desfavorável para o acúmulo de N. A adubação nitrogenada garantiu maior acúmulo de P e macronutrientes secundários. Da mesma forma, a adubação nitrogenada proporcionou maior acúmulo de micronutrientes, mas alguns elementos foram prejudicados sob PD.

Referências

- Alvares, C.A., J.L. Stape, P.C. Sentelhas, J.L. de Moraes Gonçalves, and G. Sparovek. 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorol. Zeitschrift* 22(6): 711–728. doi: 10.1127/0941-2948/2013/0507.
- Ambrosano, E.J., P.C.O. Trivelin, H. Cantarella, G.M.B. Ambrosano, E.A. Schammas, et al. 2005. Utilization of nitrogen from green manure and mineral fertilizer by sugarcane. *Sci. Agric.* 62(6): 534–542. doi: 10.1590/S0103-90162005000600004.
- Ambrosano, E.J., P.C.O. Trivelin, H. Cantarella, G.M.B. Ambrosano, E.A. Schammas, et al. 2011. ¹⁵N-labeled nitrogen from green manure and ammonium sulfate utilization by the sugarcane ratoon. *Sci. Agric.* 68(3): 361–368. doi: 10.1590/S0103-90162011000300014.
- Awe, G.O., J.M. Reichert, L.C. Timm, and O.O. Wendroth. 2015a. Temporal processes of soil water status in a sugarcane field under residue management. *Plant Soil* 387(1–2): 395–411. doi: 10.1007/s11104-014-2304-5.
- Awe, G.O., J.M. Reichert, and O.O. Wendroth. 2015b. Temporal variability and covariance structures of soil temperature in a sugarcane field under different management practices in southern Brazil. *Soil Tillage Res.* 150: 93–106. doi: 10.1016/j.still.2015.01.013.
- Bataglia, O.C., A.M.C. Furlani, J.P.F. Teixeira, P.R. Furlani, and J.R. Gallo. 1983. Métodos de análise química de plantas. Instituto Agrônômico, Campinas.
- Bordonal, R. de O., R. Lal, C.C. Ronquim, E.B. de Figueiredo, J.L.N. Carvalho, et al. 2017. Changes in quantity and quality of soil carbon due to the land-use conversion to sugarcane (*Saccharum officinarum*) plantation in southern Brazil. *Agric. Ecosyst. Environ.* 240: 54–65. doi: 10.1016/j.agee.2017.02.016.

- Boschiero, B.N., E. Mariano, L.O. Torres-Dorante, T.M.S. Sattolo, R. Otto, et al. 2020. Nitrogen fertilizer effects on sugarcane growth, nutritional status, and productivity in tropical acid soils. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* 117(3): 367–382. doi: 10.1007/s10705-020-10074-w.
- Cantarella, H., and R. Rosseto. 2014. Fertilizers for sugarcane. In: Cortez, L.A.B., editor, *Sugarcane bioethanol — R&D for Productivity and Sustainability*. Editora Edgard Blücher, São Paulo. p. 405–422
- Cantarella, H., P.C.O. Trivelin, T.L.M. Contin, F.L.F. Dias, R. Rossetto, et al. 2008. Ammonia volatilisation from urease inhibitor-treated urea applied to sugarcane trash blankets. *Sci. Agric.* 65(4): 397–401. doi: 10.1590/S0103-90162008000400011.
- Cerri, C.E.P., M.V. Galdos, J.L.N. Carvalho, B.J. Feigl, and C.C. Cerri. 2013. Quantifying soil carbon stocks and greenhouse gas fluxes in the sugarcane agrosystem: point of view. *Sci. Agric.* 70(5): 361–368. doi: 10.1590/S0103-90162013000500011.
- Cherubin, M.R., D.L. Karlen, A.L.C. Franco, C.A. Tormena, C.E.P. Cerri, et al. 2016. Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil. *Geoderma* 267: 156–168. doi: 10.1016/j.geoderma.2016.01.004.
- CONAB. 2021. Companhia Nacional de Abastecimento: Portal de informações agropecuárias. <https://portaldeinformacoes.conab.gov.br/index.php/>.
- Dias, H.B., and P.C. Sentelhas. 2017. Evaluation of three sugarcane simulation models and their ensemble for yield estimation in commercially managed fields. *F. Crop. Res.* 213: 174–185. doi: 10.1016/j.fcr.2017.07.022.
- Egeskog, A., F. Freitas, G. Berndes, G. Sparovek, and S. Wirsenius. 2014. Greenhouse gas balances and land use changes associated with the planned expansion (to 2020) of the sugarcane ethanol industry in Sao Paulo, Brazil. *Biomass and Bioenergy* 63: 280–290. doi: 10.1016/j.biombioe.2014.01.030.
- Farhate, C.V.V., Z.M. de Souza, M.R. Cherubin, L.H. Lovera, I.N. de Oliveira, et al. 2022. Soil physical change and sugarcane stalk yield induced by cover crop and soil tillage. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 46. doi: 10.36783/18069657rbcs20210123.
- Farinelli, J.B. de M., D.F.L. Santos, C. Fernandes, M.M.H. Fernandes, and M.F. da Silva. 2018. Crop Diversification Strategy to Improve Economic Value in Brazilian Sugarcane Production. *Agron. J.* 110(4): 1402–1411. doi: 10.2134/agronj2017.10.0578.
- Ferreira, D.A., H.C.J. Franco, R. Otto, A.C. Vitti, C. Fortes, et al. 2016. Contribution of N from green harvest residues for sugarcane nutrition in Brazil. *GCB Bioenergy* 8(5): 859–866. doi: 10.1111/gcbb.12292.

- Filoso, S., J.B. do Carmo, S.F. Mardegan, S.R.M. Lins, T.F. Gomes, et al. 2015. Reassessing the environmental impacts of sugarcane ethanol production in Brazil to help meet sustainability goals. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 52: 1847–1856. doi: 10.1016/j.rser.2015.08.012.
- Fortes, C., P.C.O. Trivelin, and A.C. Vitti. 2012. Long-term decomposition of sugarcane harvest residues in Sao Paulo state, Brazil. *Biomass and Bioenergy* 42: 189–198. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.03.011>.
- Fortes, C., P.C.O. Trivelin, A.C. Vitti, R. Otto, H.C.J. Franco, et al. 2013. Stalk and sucrose yield in response to nitrogen fertilization of sugarcane under reduced tillage. *Pesqui. Agropecuária Bras.* 48(1): 88–96. doi: 10.1590/S0100-204X2013000100012.
- Franco, H.C.J., I.R. Bologna, C.E. Faroni, A.C. Vitti, and P.C.O. Trivelin. 2007. Acúmulo de macronutrientes em cana-de-açúcar em função da adubação nitrogenada e dos resíduos culturais incorporados ao solo no plantio. *Bragantia* 66(4): 669–674. doi: 10.1590/S0006-87052007000400017.
- Franco, H.C.J., R. Otto, A.C. Vitti, C.E. Faroni, E.C. de A. Oliveira, et al. 2015. Residual recovery and yield performance of nitrogen fertilizer applied at sugarcane planting. *Sci. Agric.* 72(6): 528–534. doi: 10.1590/0103-9016-2015-0170.
- Franco, H.C.J., M.T.B. Pimenta, J.L.N. Carvalho, P.S.G. Magalhães, C.E.V. Rossell, et al. 2013. Assessment of sugarcane trash for agronomic and energy purposes in Brazil. *Sci. Agric.* 70(5): 305–312. doi: 10.1590/S0103-90162013000500004.
- Hoorman, J.J., J.C.M. Sá, and R. Reeder. 2011. The biology of soil compaction. *Science* (80) 68: 49–57.
- Hothorn, T., F. Bretz, and P. Westfall. 2008. Simultaneous Inference in General Parametric Models. *Biometrical J.* 50(3): 346–363. doi: 10.1002/bimj.200810425.
- Kuznetsova, A., P.B. Brockhoff, and R.H.B. Christensen. 2017. lmerTest Package: Tests in Linear Mixed Effects Models. *J. Stat. Softw.* 82(13). doi: 10.18637/jss.v082.i13.
- Lenth, R., H. Singmann, and J. Love. 2021. Emmeans: Estimated marginal means, aka least-squares means. : R package version 1.4.
- Malavolta, E., G.C. Vitti, and S.A. Oliveira. 1997. Avaliação do estado nutricional de plantas: princípios e aplicações. Potafos, Piracicaba.
- Menandro, L.M.S., H. Cantarella, H.C.J. Franco, O.T. Kölln, M.T.B. Pimenta, et al. 2017. Comprehensive assessment of sugarcane straw: implications for biomass and bioenergy production. *Biofuels, Bioprod. Biorefining* 11(3): 488–504. doi: 10.1002/bbb.1760.

- Otto, R., S.A.Q. Castro, E. Mariano, S.G.Q. Castro, H.C.J. Franco, et al. 2016. Nitrogen Use Efficiency for Sugarcane-Biofuel Production: What Is Next? *BioEnergy Res.* 9(4): 1272–1289. doi: 10.1007/s12155-016-9763-x.
- Passos, A.M.A., R.C. Alvarenga, and F.C. Santos. 2018. Sistema de plantio direto. In: Nobre, M.M. and Oliveira, I.R. de, editors, *Agricultura de baixo carbono: tecnologias e estratégias de implantação*. Embrapa, Brasília, DF. p. 61–104
- Pereira, A.R., L.R. Angelocci, and P.C. Sentelhas. 2002. *Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas*. Agropecuária, Guaíba.
- Prado, E.A.F. do, A.C.T. Vitorino, R.A. Garcia, C.J. da Silva, and M. Mauad. 2019. Structural Quality of an Oxisol Under Conventional Soil Tillage and Predecessor Crops in Sugarcane Rotation. *Sugar Tech* 21(1): 93–103. doi: 10.1007/s12355-018-0626-y.
- Raij, B. van, J.C.C. Andrade, H. Cantarella, and J.A.A. Quaggio. 2001. *Análise química para avaliação de solos tropicais*. Instituto Agrônômico de Campinas, Campinas.
- Santos, H.G. dos, P.K.T. Jacomine, L.H.C. dos Anjos, V.Á. de A. Oliveira, J.F. Lumbrreras, et al. 2018. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 5 ed. rev. Embrapa, Brasília, DF.
- Silva-Olaya, A.M., C.E.P. Cerri, N. La Scala Jr, C.T.S. Dias, and C.C. Cerri. 2013. Carbon dioxide emissions under different soil tillage systems in mechanically harvested sugarcane. *Environ. Res. Lett.* 8(1): 015014. doi: 10.1088/1748-9326/8/1/015014.
- Soil Survey Staff. 2014. *Keys to Soil Taxonomy*. 12th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.
- Soltangheisi, A., P.M. Haygarth, P.S. Pavinato, M.R. Cherubin, A.P.B. Teles, et al. 2021. Long term sugarcane straw removal affects soil phosphorus dynamics. *Soil Tillage Res.* 208: 104898. doi: <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104898>.
- Teixeira, P.C., G.K. Donagema, A. Fontana, and W.G. Teixeira. 2017. *Manual de métodos de análise de solo*. 3rd ed. Embrapa, Brasília, DF.
- Trivelin, P.C.O., H.C.J. Franco, R. Otto, D.A. Ferreira, A.C. Vitti, et al. 2013. Impact of sugarcane trash on fertilizer requirements for São Paulo, Brazil. *Sci. Agric.* 70(5): 345–352. doi: 10.1590/S0103-90162013000500009.
- Trivelin, P.C.O., M.W. de Oliveira, A.C. Vitti, G.J. de C. Gava, and J.A. Bendassolli. 2002. Perdas do nitrogênio da uréia no sistema solo-planta em dois ciclos de cana-de-açúcar. *Pesqui. Agropecuária Bras.* 37(2): 193–201. doi: 10.1590/S0100-204X2002000200011.
- Vitti, A.C., H.C.J. Franco, P.C.O. Trivelin, D.A. Ferreira, R. Otto, et al. 2011. Nitrogênio proveniente da adubação nitrogenada e de resíduos culturais na nutrição da cana-planta. *Pesqui. Agropecuária Bras.* 46(3): 287–293. doi: 10.1590/S0100-204X2011000300009.

- Vitti, G.C., J.A. Mazza, T.A. Quintino, and R. Otto. 2006. Nutrição e adubação. In: Ripoli, T.C.C., Ripoli, M.L.C., Casagrandi, D. V., and Ide, B.Y., editors, *Plantio da cana-de-açúcar: estado da arte*. ESALQ, Piracicaba. p. 102–144
- Vuyyuru, M., H.S. Sandhu, J.E. Erickson, and A. V. Ogram. 2020. Soil chemical and biological fertility, microbial community structure and dynamics in successive and fallow sugarcane planting systems. *Agroecol. Sustain. Food Syst.* 44(6): 768–794. doi: 10.1080/21683565.2019.1666075.
- Waclawovsky, A.J., P.M. Sato, C.G. Lembke, P.H. Moore, and G.M. Souza. 2010. Sugarcane for bioenergy production: an assessment of yield and regulation of sucrose content. *Plant Biotechnol. J.* 8(3): 263–276. doi: 10.1111/j.1467-7652.2009.00491.x.
- Wutke, E.B., A. Calegari, and L. do P. Wildner. 2014. Espécies de adubos verdes e plantas de cobertura e recomendações para seu uso. In: Lima Filho, O.F. de, Ambrosano, E.J., Rossi, F., and Carlos, J.A.D., editors, *Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil*. 1st ed. Embrapa, Brasilia, DF. p. 59–168

4 MANEJO DO SOLO E SUCESSÃO DE CULTURAS NA RENOVAÇÃO DE CANAVIAL: EFEITOS SOBRE ATRIBUTOS QUÍMICOS E BIOLÓGICOS DO SOLO EM SOQUEIRAS DE CANA-DE-AÇÚCAR

Resumo

O objetivo desse estudo foi avaliar a associação do manejo do solo e sucessão de culturas com adubação nitrogenada de soqueira sobre atributos químicos e atividade enzimática do solo. O experimento foi constituído por duas áreas experimentais, plantio convencional (PC) e plantio direto (PD), localizadas em área comercial de produção de cana-de-açúcar, no município de Sales Oliveira, região de Ribeirão Preto, Estado de São Paulo, Brasil. A avaliação do estudo foi conduzida nas safras de 2017/2018, 2018/2019 e 2019/2020, abrangendo as três primeiras soqueiras. As duas áreas experimentais foram delineadas de forma espelhada e envolveram os seguintes fatores: sucessão de culturas e adubação nitrogenada de soqueira. O fator primário foi composto por pousio e uso de cinco leguminosas, sendo duas culturas com fins comerciais (soja e amendoim) e três espécies distintas de crotalárias (*Crotalaria juncea*, *Crotalaria spectabilis*, *Crotalaria ochroleuca*). O fator secundário foi constituído pelos tratamentos da adubação nitrogenada de soqueira: com (reposição de 100% do N exportado) e sem N (controle). As amostragens de solo para análise da fertilidade foram realizadas após as colheitas das soqueiras, em duas profundidades (0-20 e 20-40 cm). A fertilidade do solo foi avaliada pela análise de rotina dos principais macros e micronutrientes (P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn), bem como pelo teor de carbono orgânico e acidez potencial do solo. As coletas para análises enzimáticas e N-mineral do solo foram conduzidas entre os meses de janeiro e fevereiro (época úmida), para segunda e terceira soqueira, as quais foram avaliadas quanto ao ciclo do carbono (β -glucosidase), fósforo (fosfatase ácida), e formas inorgânicas de N-mineral ($N-NH_4^+$ e $N-NO_3^-$). A análise estatística dos resultados foi realizada a partir da análise conjunta de dois locais junto da aplicação de modelos lineares mistos, em esquema fatorial triplo. As combinações associadas ao efeito de soqueira agregaram grande parte da variabilidade dos atributos químicos, evidenciando as diferenças existentes de acordo com o ciclo. A primeira soqueira apresentou resposta mais pronunciada para as variáveis relacionadas a acidez do solo, ocorrendo o mesmo contraponto para os cátions que compõe a soma de bases para segunda soqueira. O fósforo expressou pouca influência para distinção entre soqueiras. A adubação nitrogenada foi um importante fator para discriminação de grupos de tratamento e atributos químicos do solo. No plantio direto, a sucessão com amendoim se distinguiu dos tratamentos com crotalária e de todas as demais culturas antecessoras do plantio convencional. As crotalárias em plantio direto incrementaram os teores de nutrientes no solo. Em sistemas sem N, as culturas de sucessão não se diferiram do pousio. Com aplicação de N, as sucessões de amendoim e soja apresentaram relações mais desfavoráveis em relação ao pousio e crotalárias. De modo geral, o plantio direto favoreceu a disponibilidade de nutrientes no solo. Entretanto, a ausência de N desfavoreceu os benefícios desse sistema. A aplicação de N aumentou a disponibilidade de N-mineral no solo, mas reduziu a participação da

fração amoniacal. A atividade enzimática do solo foi alterada pela interação de fatores, especialmente para soqueira, cultura antecessora e adubação nitrogenada. A adubação nitrogenada aumentou a atividade da β -glucosidase para PC e PD, bem como para cada soqueira. A atividade da fosfatase ácida foi alterada pela adubação nitrogenada, mas apresentou variações contrárias entre ciclos.

Palavras-chave: *Saccharum* spp.; Plantio direto; Adubação verde; Amendoim; Soja; *Crotalaria*

Abstract

The objective of this study was to evaluate the association of soil management and crop succession with ratoon nitrogen fertilization on soil chemical attributes and soil enzymatic activity. The experiment consisted of two experimental sites, i.e., conventional tillage (CT) and no-tillage (NT), located in a commercial area of sugarcane production, in the municipality of Sales Oliveira, region of Ribeirão Preto, state of São Paulo, Brazil. The study was conducted in the 2017/2018, 2018/2019 and 2019/2020 harvests, covering the first three ratoons. The two experimental areas were delineated in a mirrored manner and involved the following factors: crop succession and ratoon nitrogen fertilization. The primary factor consisted of fallow and the use of five legumes, with two being commercial crops (soybean and peanut) and three different species of sunn hemp (*Crotalaria juncea*, *Crotalaria spectabilis*, *Crotalaria ochroleuca*). The secondary factor was constituted by the treatments of nitrogen fertilization: with (replacement of 100% of the exported N) and without N (control). Soil sampling for fertility analysis was performed after ratoon harvesting, at two depths (0-20 and 20-40 cm). Soil fertility was evaluated by routine analysis of the main macro and micronutrients (P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn and Zn), as well as by the organic carbon content and potential acidity of the soil. The collections for enzymatic and N-mineral analyzes of the soil were carried out between January and February (wet season), for the second and third ratoons, which were evaluated for carbon (β -glucosidase), phosphorus (acid phosphatase), and inorganic forms of N-mineral (N-NH_4^+ e N-NO_3^-). The statistical analysis was performed from a joint analysis of the two sites together with the application of mixed linear models, in a triple factorial scheme. The combinations associated with the ratoon effect added a large part of the variability of chemical attributes, evidencing the existing differences according to the cycle. The first ratoon showed a more pronounced response to the variables related to soil acidity, with the same counterpoint occurring for the cations that make up the sum of bases for the second ratoon. Phosphorus expressed little influence to distinguish ratoons. Nitrogen fertilization was an important factor for the discrimination of experimental factors and soil chemical attributes. In NT, succession with peanut was distinguished from treatments with sunn hemp and from all other predecessor crops of CT. Sunn hemp under NT increased nutrient contents in the soil. In systems without N, the succession crops did not differ from the fallow. With N application, the successions of peanut and soybean showed more unfavorable relationships in relation to fallow and sunn hemp. In general, NT favored the availability of nutrients in the soil. However, the absence of N undermined the benefits of this

system. The application of N increased the availability of N-mineral in the soil, but reduced the participation of the ammonia fraction. Soil enzymatic activity was altered by the interaction of factors, especially for ratoon, predecessor crop and N fertilization. Nitrogen fertilization increased β -glucosidase activity for CT and NT, as well as for each ratoon. Acid phosphatase activity was altered by N fertilization but showed opposite variations between seasons.

Keywords: *Saccharum* spp.; No-till; Cover crops; Peanut; Soybean; Crotalaria

4.1. Introdução

O Brasil é atualmente o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, pois atingiu a produção de 628 milhões Mg em uma área de 8,42 milhões de hectares na safra 2020/2021 (CONAB, 2021). Mesmo com números impressionantes, a produtividade média nacional da cultura ($74,6 \text{ Mg ha}^{-1}$) ainda está muito abaixo do potencial produtivo, podendo alcançar cerca de 400 Mg ha^{-1} conforme estimativas reportadas na literatura (Waclawovsky et al., 2010). Dentre os diversos aspectos que podem estar atrelados à baixa produtividade, pode-se destacar as adversidades climáticas, o manejo inadequado da cultura e as perdas por doenças e pragas. As possíveis estratégias a serem adotadas para aumentar a produtividade e longevidade do canavial incluem práticas de manejo sustentáveis voltadas à nutrição de planta e qualidade do solo (Egeskog et al., 2014).

Nos últimos anos, o cultivo brasileiro de cana-de-açúcar tem adotado amplamente a colheita mecanizada de cana crua (98%, CONAB (2021)), a qual substituiu da colheita da cana queimada para reduzir os impactos ambientais. Além da colheita sem queima prévia mitigar a emissão de gases de efeito estufa, a deposição da palhada na superfície do solo beneficia sua qualidade, evitando a erosão e contribuindo para o aumento da fertilidade pelo incremento da matéria orgânica (Cerri et al., 2013; Trivelin et al., 2013; Franco et al., 2015). Entretanto, em cultivos que adotam esse tipo de colheita, uma quantidade expressiva de resíduo vegetal composto por folhas secas e ponteiros é depositada sobre o solo, o que altera a dinâmica dos nutrientes no solo, especialmente pela elevada relação C/N da palhada, que pode variar de 80 a 100:1 e, assim, reduzir a taxa de mineralização de N (Franco et al., 2013; Ferreira et al., 2016). No Brasil, estima-se que 70% de toda a matéria seca é decomposta somente após um período de três anos, promovendo a mineralização de nutrientes como K, Ca e N (Fortes et al., 2013). Segundo Trivelin et al. (2013), a disponibilização potencial de 40 kg ha^{-1} de N ano^{-1} a partir de um estoque de N que se formará no solo pela permanência dos resíduos culturais em sistema de cana crua ocorrerá somente após 40 anos.

Embora a colheita de cana crua já tenha sido amplamente adotada no setor, outros impactos foram devidamente reportados na literatura, principalmente em relação a degradação da qualidade física do solo e perdas de produtividade causadas pelo tráfego intenso de maquinário (Prado et al., 2019; Farhate et al., 2022). Além disso, a cultura da cana-de-açúcar no Brasil é ainda historicamente cultivada sob manejo do solo convencional no período que antecede o plantio. Esta prática busca homogeneizar fisicamente a camada superficial (0-40 cm) por meio de práticas intensivas, como aração e gradagem, a fim de facilitar as operações mecanizadas e proporcionar uma adequação das condições físicas do solo (Hoorman et al., 2011). Por outro lado, esse tipo de manejo ocasiona perdas substanciais de carbono (Silva-Olaya et al., 2013), altera a dinâmica da temperatura e água no sistema (Awe et al., 2015a, 2015b), e impacta, de forma geral, a qualidade do solo, prejudicando a produção e sustentabilidade do sistema a médio e longo prazo (Filoso et al., 2015; Cherubin et al., 2016; Bordonal et al., 2017).

A adoção de culturas de sucessão para reforma, seja para fins comerciais ou adubação verde, também tem sido amplamente difundida com o intuito de proporcionar maior qualidade do solo e/ou capacitar financeiramente os agricultores durante a entressafra (Ambrosano et al., 2005; Borba de Moraes Farinelli et al., 2018; Vuyyuru et al., 2020). O uso de leguminosas em áreas de renovação de canavial tem se apresentado como uma estratégia viável para auxílio da manutenção ou aumento da fertilidade do solo, bem como no incremento de produtividade da cana, por estar relacionado ao controle da erosão hídrica, do assoreamento de sulco e da compactação do solo; à diminuição da população de nematoides; à micorrização e ciclagem de nutrientes; e à supressão de plantas daninhas e fitorremediação de herbicidas (Ambrosano et al., 2011). Além de proporcionar vários benefícios em aspectos físicos, químicos e biológicos do solo, o emprego de adubos verdes incorporados ou não ao solo aumenta o estoque de carbono orgânico do solo, diminuindo a emissão de gases do efeito estufa pela fixação de carbono (Wutke et al., 2014).

Do ponto de vista nutricional, a cana-de-açúcar requer uma quantidade substancial de N para a produção de colmos, uma vez que é absorvido aproximadamente de 100 a 300 kg ha⁻¹ de N para a produção de 100 Mg ha⁻¹ de colmos (Franco et al., 2007), sendo ainda posteriormente metade dessa fração exportada por ocasião da colheita (Cantarella et al., 2008). A fim de atender as necessidades desse nutriente pela cultura, são recomendadas doses que geralmente variam de 120 a 200 kg ha⁻¹ de N para a cana crua (Cantarella and Rosseto, 2014). Na maioria das recomendações ainda é considerado a quantidade de N exportado para a produção de uma tonelada de colmos, que poderá apresentar variação na região centro-sul

de aproximadamente 0,7 a 1,8 kg de N para cada tonelada de colmos colhida (Vitti et al., 2006; Franco et al., 2007; Cantarella et al., 2008). No geral, a utilização do N-fertilizante pela cultura é baixa, sendo comumente inferiores a 50% da dose aplicada (Trivelin et al., 2002; Vitti et al., 2011). Assim, o manejo da adubação nitrogenada pode ser considerado uma das práticas mais importantes para produção da cana-de-açúcar, apresentando grande variabilidade de resposta sob o ponto de vista da produtividade de colmos, em razão das doses de N aplicadas (Franco et al., 2015; Otto et al., 2016).

Um ponto inicialmente polêmico da adoção de leguminosas na renovação de canaviais era a necessidade da aplicação de fertilizante nitrogenado no plantio da cana-de-açúcar, uma vez que esse nutriente seria fixado biologicamente ao solo. Entretanto, estudos apontaram que, mesmo com o uso de adubação verde na reforma do canavial, a cana-de-açúcar ainda necessita do N-fertilizante do plantio, dúvida essa que ainda se mantém para a adubação nitrogenada de soqueira (Ambrosano et al., 2005, 2011). Apesar da resposta à adubação nitrogenada de soqueira ser muitas vezes limitada, geralmente é aplicado a mesma quantidade de N em áreas reformadas com adubos verdes (Otto et al., 2016; Boschiero et al., 2020).

Considerando que as leguminosas apresentam baixa relação C/N e contribuem para fornecimento biológico de N ao solo, a resposta da adubação nitrogenada de soqueira em áreas submetidas à rotação de culturas na renovação do canavial poderá ser ainda menor, se os efeitos benéficos da adubação verde se mantiverem de médio a longo prazo e auxiliarem na menor imobilização do N do fertilizante, especialmente pela alta relação C/N dos resíduos vegetais de cana. Além da adubação verde, uma alternativa para o incremento da produtividade e sustentabilidade do sistema canavieiro está compreendida na redução do revolvimento do solo, por meio da sulcagem direta no plantio.

Entretanto, uma avaliação integrada dos efeitos do manejo de solo, sucessão de culturas e adubação nitrogenada nas condições químicas e biológicas do solo ainda é escassa e precisa ser melhor investigada. O objetivo desse trabalho é, portanto, avaliar o efeito do manejo do solo e sucessão de culturas sob diferentes níveis de adubação nitrogenada nos atributos químicos e biológicos do solo em soqueiras de cana-de-açúcar. A combinação dessas práticas pode evidenciar alterações na dinâmica de nutrientes e atributos biológicos no solo e influenciar a longevidade e produtividade do canavial, trazendo assim, uma perspectiva complementar referente à adoção de práticas mais sustentáveis na cultura.

4.2. Material e Métodos

4.2.1. Caracterização da área e condução experimental

O experimento foi desenvolvido em duas áreas experimentais, localizadas em área comercial de produção de cana-de-açúcar, no município de Sales Oliveira, região de Ribeirão Preto, Estado de São Paulo, Brasil (20°50'21" S, 47°57'11" O, 604 m) (Figura 1). A avaliação do experimento foi conduzida nas safras de 2017/2018, 2018/2019 e 2019/2020, abrangendo os três primeiros ciclos de soqueira. O clima do local é classificado como subtropical úmido com verão quente (Cwa), segundo Köppen (Alvares et al., 2013). O histórico da área apresenta longo cultivo com cana e obteve a adoção do sistema de mecanizado sem queima prévia da palha a partir de 2011. No período do sistema semimecanizado com queima prévia, foi aplicado de vinhaça na dose de 100 m³ ha⁻¹ logo após o corte. Com início da colheita da cana crua, a aplicação de vinhaça não foi mais empregada no manejo.



Figura 1. Localização geográfica das áreas experimentais no município de Sales Oliveira, SP.

O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho Distroférrico (Santos et al., 2018), de textura argilosa, correspondente a Rhodic Hapludox (Soil Survey Staff, 2014). A caracterização físico-química do solo foi realizada pela coleta de amostras deformadas compostas, nas profundidades 0-0,1, 0,1-0,2, 0,2-0,4, 0,4-0,6 e 0,6-1,0 m, para duas áreas experimentais, antes da instalação do experimento (Tabela 1). As análises para fins de fertilidade do solo foram determinadas de acordo com Raij et al., (2001) e as análises granulométricas foram obtidas pelo método da pipeta (Teixeira et al., 2017).

As operações prévias de preparo de solo e dessecação com glifosato foram empregadas em pré-plantio respectivamente para área de plantio convencional (PC) e direto (PD), foram conduzidas 10 dias antes do plantio das leguminosas no período de reforma. Já

para PC, a área foi operacionalizada sequencialmente por meio de gradagem pesada, aração com aiveca e gradagem intermediária (niveladora).

O solo foi corrigido com aplicação de calcário ($1,5 \text{ Mg ha}^{-1}$), de forma superficial para PD e incorporada para PC, e condicionado à gessagem (1 Mg ha^{-1}), logo após a calagem. O plantio de amendoim foi realizado com a cultivar IAC 503, com espaçamento entre linhas de 0,90 m, em profundidade de 5 a 6 cm, na densidade de 15 a 18 sementes por metro, e sem adubação de plantio. Já para a soja, a semeadura foi realizada com o cultivar BMX Potência RR, com espaçamento entre linhas de 0,45 m, em profundidade de 4 a 5 cm, na densidade de 22 a 23 sementes por metro, e com aplicação de 350 kg ha^{-1} do fertilizante formulado 02-20-18, posicionado no fundo do sulco. As crotalárias foram obtidas em empresa comercial credenciada no Sistema Nacional de Sementes e Mudas do Ministério da Agricultura (Piraí Sementes Ltda), e semeadas com espaçamento entre linhas de 0,45 m, em profundidade de 2 a 3 cm, e densidade linear de 22-27, 55-60 e 22-24 sementes para *Crotalaria spectabilis*, *Crotalaria ochroleuca*, *Crotalaria juncea*, respectivamente. Os componentes produtivos, como biomassa seca e produtividade de grãos, e o acúmulo de nutrientes da biomassa remanescente das culturas antecessoras, foram avaliados após a colheita e determinados pela análise do tecido vegetal do material amostrado, segundo metodologia descrita por Malavolta et al. (1997).

Tabela 1. Caracterização físico-química do solo das áreas experimentais.

Características	Profundidade (cm)				
	0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,4	0,4-0,6	0,6-1,0
	<u>Plantio convencional (PC)</u>				
pH	5,3	5,2	5,3	4,9	5,4
C orgânico (g dm ⁻³)	32	32	27	20	16
P resina (mg dm ⁻³)	8	7	6	3	3
S (mg dm ⁻³)	12	28	12	57	26
K (mmolc dm ⁻³)	1,8	1,2	0,7	0,4	0,3
Ca (mmolc dm ⁻³)	27	19	20	10	8
Mg (mmolc dm ⁻³)	8	7	6	3	3
Al (mmolc dm ⁻³)	<1	<1	<1	<1	<1
H + Al (mmolc dm ⁻³)	52	52	31	42	25
SB (mmolc dm ⁻³)	36,8	27,2	26,7	13,4	11,3
CTC (mmolc dm ⁻³)	88,8	79,2	57,7	55,4	36,3
V (%)	41	34	46	24	31
m (%)	0	0	0	0	0
Areia (g kg ⁻¹)	215	220	206	190	194
Silte (g kg ⁻¹)	286	260	269	234	222
Argila (g kg ⁻¹)	499	520	525	576	583
	<u>Plantio direto (PD)</u>				
pH	5,3	5,2	5,3	5,4	5,6
C orgânico (g dm ⁻³)	26	28	25	20	14
P resina (mg dm ⁻³)	7	7	10	5	4
S (mg dm ⁻³)	9	9	9	28	25
K (mmolc dm ⁻³)	1,9	1,2	0,7	0,6	0,4
Ca (mmolc dm ⁻³)	22	22	21	15	11
Mg (mmolc dm ⁻³)	7	7	6	4	3
Al (mmolc dm ⁻³)	<1	<1	<1	<1	<1
H + Al (mmolc dm ⁻³)	47	38	42	22	25
SB (mmolc dm ⁻³)	30,9	30,2	27,7	19,6	14,4
CTC (mmolc dm ⁻³)	77,9	68,2	69,7	41,6	39,4
V (%)	40	44	40	47	37
m (%)	0	0	0	0	0
Areia (g kg ⁻¹)	203	200	197	186	188
Silte (g kg ⁻¹)	279	267	256	214	235
Argila (g kg ⁻¹)	517	533	547	599	576

pH: pH em solução de CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹; C orgânico: carbono orgânico pela oxidação com dicromato; P, Ca, Mg e K: fósforo, cálcio, magnésio e potássio trocáveis com extração por resina trocadora de íons; S: sulfato extraível em solução de Ca(H₂PO₄)₂ 0,01 mol L⁻¹; Al: alumínio trocável em solução de KCl 1 mol L⁻¹; H + Al: acidez potencial com solução-tampão SMP em pH 7,0; SB: soma de bases; CTC: capacidade de troca catiônica a pH 7,0; V: saturação por bases; m: saturação por alumínio; Areia, Silte e Argila: análise granulométrica pelo método da pipeta.

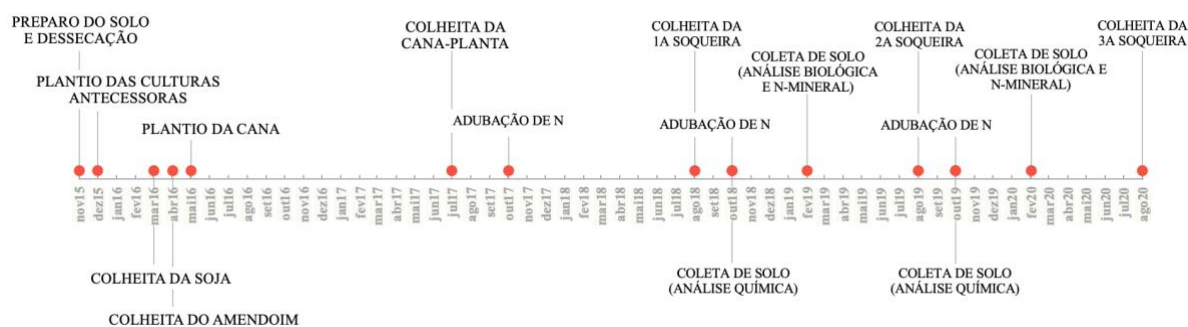


Figura 2. Cronologia dos principais eventos ocorridos no período de condução experimental.

O início do experimento ocorreu em novembro de 2015, a partir das operações destinadas ao preparo de solo de PC e dessecação prévia de PD (Figura 2). Com intuito de avaliar o efeito do preparo de solo na renovação do canavial, o experimento foi dividido em duas áreas experimentais, de acordo com o manejo do solo (plantio convencional e plantio direto). Enquanto o plantio convencional consistiu no preparo de solo com grade e arado, o plantio direto apresentou mobilização do solo somente na linha de cultivo no plantio das leguminosas e da cana-planta. Após essa fase, o plantio de leguminosas empregadas na reforma do canavial, também denominadas de culturas de sucessão ou antecessoras, foi conduzido em dezembro de 2015, contemplando as seguintes espécies: *Crotalaria juncea*, *Crotalaria spectabilis*, *Crotalaria ochroleuca*, soja [*Glycine max* (L.) Merrill] e amendoim-branco (*Arachis hypogaea* L.) (Figura 2). A colheita da soja e amendoim foi realizada nos meses de março e abril, respectivamente. As crotalárias não foram anteriormente dessecadas, roçadas ou incorporadas para o plantio da cana e, portanto, o processo de abertura de sulcos foi realizado sem nenhum manejo prévio destinado à adubação verde.

Após o término do período de renovação do canavial com sucessão de culturas, o plantio da cana foi realizado em maio de 2016 com a variedade RB966928, indicada para ambientes de médio a alto potencial e considerada de maturação média. A abertura dos sulcos foi efetuada com a plantadora de cana-de-açúcar de duas linhas espaçadas em 1,5 m, com profundidade de 50 a 55 cm e base larga. Nessa operação, também foram adicionados fertilizantes líquidos no tanque de pulverização, com intenção de atender a necessidade de micronutrientes pela cultura (Anexo A), em especial de B e Zn. A distribuição dos toletes no fundo do sulco foi feita manualmente, aproximadamente, 20 gemas viáveis por metro. A adubação de plantio da cana foi constituída pela aplicação incorporada ao solo de 130 kg ha⁻¹ de P₂O₅, na forma de fosfato monoamônico (MAP, 10% N e 52% P₂O₅), e 125 kg ha⁻¹ de K₂O, na forma de cloreto de potássio (KCl), correspondendo ao final aproximadamente 25 kg

ha⁻¹ de N, 56 kg ha⁻¹ de P e 104 kg ha⁻¹ de K, em profundidade estimada de 60 cm. A adubação nitrogenada da cana-planta ainda foi complementada com aplicação de 50 kg ha⁻¹ de N em cobertura, na forma de nitrato de amônio (NH₄NO₃). Foi realizada a aplicação de inseticida (Regent, 800 WG, na dose de 250 g ha⁻¹) e fungicida (Priori Xtra, na dose de 1,5 L ha⁻¹) sobre os toletes depositados no sulco de plantio, e o fechamento de sulcos efetuado em profundidade aproximada de 6 cm de solo.

A partir da colheita da cana-planta em julho de 2017, foi realizada a subdivisão das parcelas que consistiu em quatro níveis de adubação nitrogenada de soqueira, com base no N exportado de cada parcela. O N em soqueira distribuído manualmente, na superfície do solo e em faixa, com distância de 15 cm da linha do plantio, na forma de nitrato de amônio. Durante aplicação das doses de N em soqueira, a adubação potássica foi realizada com KCl, na dose de 120 kg ha⁻¹ de K₂O (± 100 kg ha⁻¹ K). Além da adubação de plantio e aplicação de N e K em soqueira, foi realizado a aplicação foliar de micronutrientes, especialmente B e Zn, no mês de dezembro (Anexo A), podendo estar associado à aplicação de defensivos, conforme a necessidade.

O controle de pragas, doenças e plantas daninhas foi realizado ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura, mediante aplicação de defensivos agrícolas recomendados para a cultura (Anexo A), conforme a necessidade. Ao final de cada ciclo, o processo de maturação foi auxiliado pela aplicação de maturador comercial (Sugar Plus), composto de água amoniacal e cloreto de potássio, na dose de 2 L ha⁻¹, 30 dias antes da colheita, a fim de estimular a produção de complexos enzimáticos que favorecem a transferência e acúmulo de sacarose do colmo.

Os dados meteorológicos de pluviosidade, temperatura, umidade relativa, radiação e evaporação foram monitorados na estação meteorológica automatizada da propriedade (Vantage Pro II, Decagon Devices, Califórnia – EUA). O balanço hídrico foi calculado pelo método de Penman-Monteith (Figura 3). O coeficiente da cultura (Kc) foi baseado no levantamento da evapotranspiração recomendado por Dias e Sentelhas (2016). A capacidade de água disponível (CAD) considerada foi 168 mm, conforme critérios de Pereira et al. (2002).

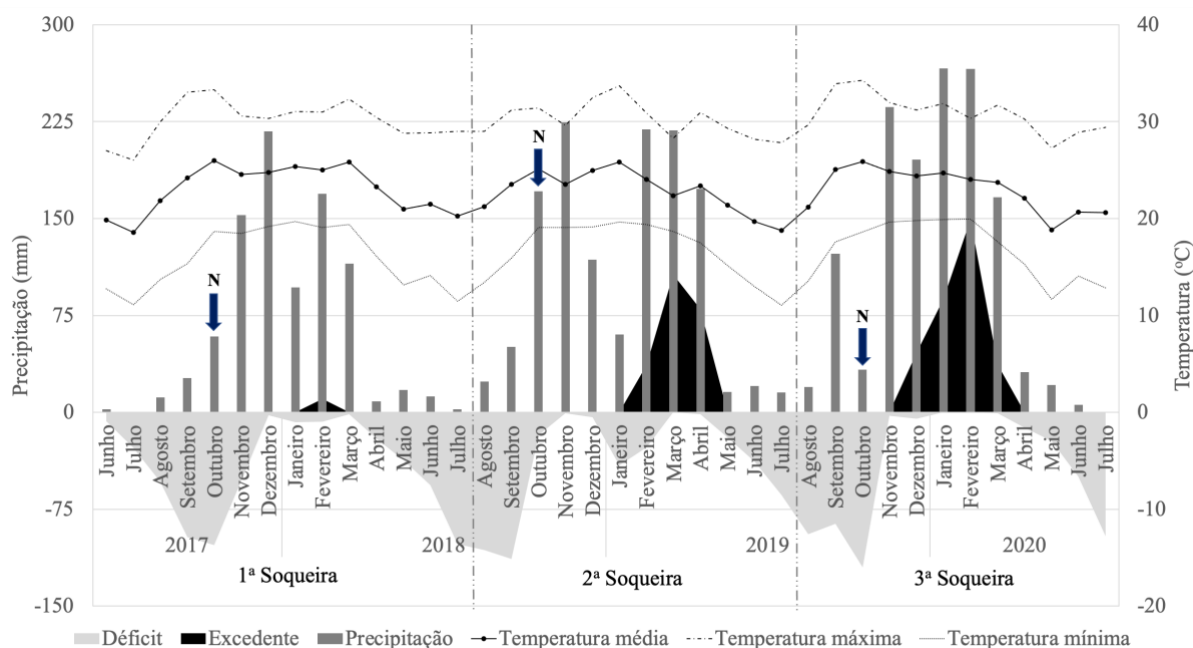


Figura 3. Balanço hídrico sequencial, precipitação e temperaturas do ar mensais registradas para os anos agrícolas de 2017 a 2020, no período de desenvolvimento das três primeiras soqueiras.

4.2.2. Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental foi de blocos ao acaso, em esquema de parcelas subdivididas, com quatro repetições (Figura 4). As unidades experimentais foram compostas por cinco linhas de cana com 10 m de comprimento, o que compreendeu em área total de 75 m². O experimento foi dividido em duas áreas experimentais, de acordo com o manejo do solo empregado durante a renovação do canavial (plantio convencional e plantio direto). A área de plantio convencional foi revolvida em área total por meio de grade e arado, e a área de plantio convencional apresentou mobilização do solo somente na linha de plantio.

As duas áreas experimentais foram delineadas de forma espelhada e envolveram os seguintes fatores: sucessão de culturas (fator primário) e adubação nitrogenada de soqueira (fator secundário). O fator primário foi composto por pousio (sem adubação verde) e uso de cinco leguminosas, sendo duas culturas com fins comerciais (soja e amendoim) e três espécies distintas de crotalárias (*Crotalaria juncea*, *Crotalaria spectabilis*, *Crotalaria ochroleuca*). O fator secundário, oriundo da subdivisão de parcelas, foi constituído pelos tratamentos da adubação nitrogenada de soqueira: sem N (controle) e com N (100% do N exportado na colheita antecessora).

A dose de N foi aplicada com base na produtividade de cada parcela. Desse modo, considerando que 1 Mg de cana colhida possa ser restituído pela aplicação de 1 kg de N (Vitti

et al., 2006), na unidade experimental que produzir 80 Mg ha⁻¹ seria aplicado 80 kg N ha⁻¹, intencionando a reposição de 100% do N exportado. Em vista de questões de viabilidade operacional e de custo, os atributos biológicos e os compartimentos de N-mineral do solo foram avaliados somente em dois níveis de adubação nitrogenada de soqueira (0 e 100% do N exportado), para segunda e terceira soqueira. Assim, a combinação de seis sistemas de sucessão, dois níveis de N em soqueira, em quatro blocos e duas áreas experimentais, formando um arranjo experimental reduzido composto por 96 parcelas.

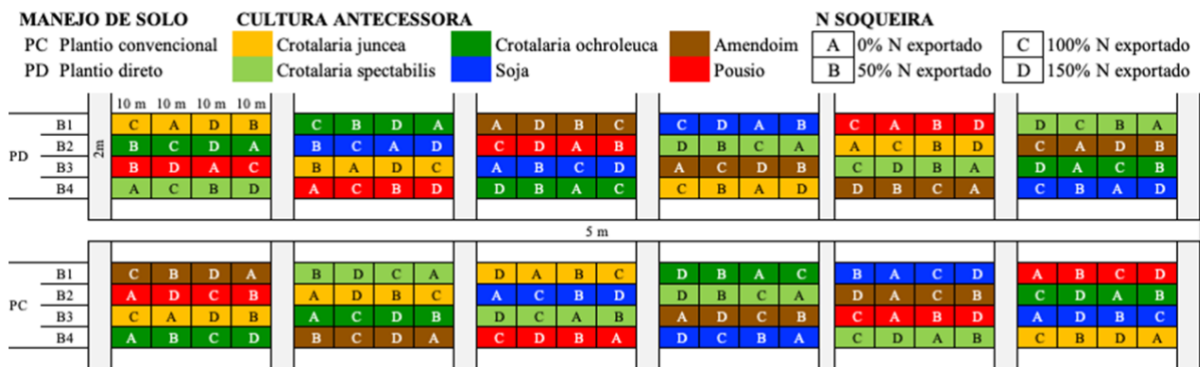


Figura 4. Esquema do delineamento experimental e tratamentos.

A produção de biomassa seca e produtividade de grãos das culturas ancestrais foram avaliadas ao final dos seus respectivos ciclos (Tabela 2). O acúmulo de nutrientes na biomassa das leguminosas foi devidamente quantificada para inferir possíveis associações de respostas pela sucessão de culturas (Tabela 3).

Tabela 2. Produção de biomassa seca das culturas antecessoras e produtividade de grãos das culturas comercialmente exploradas, no período de renovação do canavial.

Antecessora	Manejo de solo		
	PC	PD	Média
	Biomassa seca (Mg ha⁻¹)		
Amendoim	6,0 ± 1,2	7,1 ± 0,7	6,6 ± 0,4
<i>Crotalaria juncea</i>	19,2 ± 2,9	20,2 ± 2,9	19,7 ± 1,9
<i>Crotalaria ochroleuca</i>	25,5 ± 4,4	19,8 ± 1,4	22,6 ± 2,4
<i>Crotalaria spectabilis</i>	7,3 ± 0,3	7,0 ± 1,0	7,1 ± 0,5
Soja	3,0 ± 0,0	3,2 ± 0,1	3,1 ± 0,1
Média	12,2 ± 2,2	11,5 ± 1,7	
	Produtividade de grãos (kg ha⁻¹)		
Amendoim	4571,8 ± 349,4	4412,5 ± 356,3	4492,1 ± 233,0
Soja	2253,5 ± 105,5	2607,3 ± 105,1	2430,4 ± 96,0

PC: Plantio convencional; PD: Plantio direto. Média ± erro padrão da média (n = 48).

Tabela 3. Acúmulo de nutrientes das culturas antecessoras, empregadas no período de reforma do canavial.

(A)	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn	
	g kg ⁻¹						mg kg ⁻¹					
	PC											
A	81,6 ± 15,4	4,7 ± 0,8	130,6 ± 30,0	70,3 ± 16,0	29,8 ± 5,5	6,9 ± 1,4	150,4 ± 25,4	48,2 ± 9,9	9175 ± 4411	964 ± 205	140,4 ± 39,6	
CJ	119,2 ± 23,0	8,1 ± 1,2	219,0 ± 33,4	50,7 ± 7,7	28,3 ± 4,6	16,9 ± 2,6	352,7 ± 72,5	88,8 ± 20,8	3993 ± 1090	453 ± 66	230,3 ± 35,0	
CO	220,2 ± 34,6	15,6 ± 2,5	250,2 ± 45,7	130,0 ± 25,6	58,3 ± 10,8	34,7 ± 7,1	365,4 ± 88,1	136,4 ± 23,2	20460 ± 6089	3810 ± 725	349,0 ± 43,5	
CS	89,3 ± 19,6	6,4 ± 1,3	155,1 ± 4,7	60,2 ± 7,9	16,5 ± 0,9	16,0 ± 1,1	210,2 ± 26,1	73,8 ± 12,3	1283 ± 205	679 ± 40	165,6 ± 12,2	
S	20,0 ± 3,0	1,5 ± 0,2	31,7 ± 0,4	21,1 ± 1,4	16,4 ± 1,1	1,9 ± 0,2	60,3 ± 7,0	12,0 ± 0,1	829 ± 112	563 ± 20	33,0 ± 1,1	
	PD											
A	136,5 ± 16,4	7,5 ± 0,9	164,3 ± 11,0	82,6 ± 5,9	32,2 ± 3,1	10,7 ± 1,3	187,0 ± 17,3	56,9 ± 5,6	4537 ± 334	700 ± 155	201,4 ± 23,6	
CJ	124,1 ± 29,1	10,8 ± 2,2	239,0 ± 52,9	57,4 ± 12,5	42,4 ± 10,0	22,4 ± 3,4	286,1 ± 76,7	131,8 ± 24,1	2820 ± 898	2124 ± 500	309,4 ± 90,8	
CO	195,5 ± 14,8	12,0 ± 1,5	244,9 ± 31,2	104,6 ± 12,5	49,5 ± 6,9	23,7 ± 1,9	366,6 ± 81,9	118,5 ± 16,0	7508 ± 1368	3943 ± 296	277,8 ± 37,0	
CS	114,1 ± 16,9	8,0 ± 1,0	148,9 ± 22,8	81,7 ± 13,0	16,6 ± 2,1	13,9 ± 2,3	256,6 ± 31,9	73,2 ± 13,3	1810 ± 329	804 ± 122	179,0 ± 28,7	
S	21,7 ± 1,3	1,0 ± 0,2	30,3 ± 2,3	18,4 ± 0,6	14,9 ± 0,8	2,1 ± 0,1	70,0 ± 7,0	12,7 ± 0,5	351 ± 56	507 ± 30	39,4 ± 3,2	

(A): Cultura antecessora; PC: Plantio convencional; PD: Plantio direto. A: Amendoim; CJ: *Crotalaria juncea*; CO: *Crotalaria ochroleuca*; CS: *Crotalaria spectabilis*; P: Pousio; S: soja. Média ± erro padrão da média (n = 4).

4.2.3. Avaliações e análises

As amostragens de solo para fins de fertilidade do solo foram realizadas após as colheitas das soqueiras, em duas profundidades (0-20 e 20-40 cm), mediante amostras compostas das três linhas centrais das parcelas, coletadas com trado holandês. A descrição da fertilidade do solo foi avaliada pela análise de rotina dos principais macros e micronutrientes (P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn), bem como pelo teor de carbono orgânico e acidez potencial do solo (Raij et al., 2001).

As coletas para análises enzimáticas e N-mineral do solo foram conduzidas entre os meses de janeiro e fevereiro (época úmida), para segunda e terceira soqueira, a partir de amostras compostas das três linhas centrais da parcela, sobre o local de aplicação da adubação de soqueira. Após as amostragens, o solo foi acondicionado em sacos plásticos e armazenado em geladeira (7 a 10°C), preferencialmente, por um período de até uma semana. A determinação da umidade foi realizada pelo método gravimétrico, antes e após o peneiramento e limpeza dos resíduos vegetais das amostras.

A atividade enzimática do solo foi associada ao ciclo do carbono (β -glucosidase) e fósforo (fosfatase ácida), utilizando os métodos descritos por Tabatabai (1994). Esses métodos foram baseados na determinação colorimétrica do p-nitrofenol, formado após a incubação com substratos incolores específicos para cada enzima. As amostras foram avaliadas em triplicatas no laboratório de Microbiologia da ESALQ/USP, por espectrofotometria na região da luz visível. A atividade enzimática do solo foi expressa em μg p-nitrofenol por grama de solo seco por hora.

A extração das formas inorgânicas de N-mineral (N-NH_4^+ e N-NO_3^-) no solo foi realizada em subamostras de 5 g de solo em base úmida, com solução de KCl 2 mol L^{-1} , na relação 1:5 (solo: solução – m/v), e agitação de 1 h em agitador orbital. A extração será efetuada com solução de KCl 2 mol L^{-1} na relação 1:5 (solo: solução – m/v), sob agitação por 1 h em agitador orbital. As concentrações das frações amoniacais e nítricas foram determinadas por meio de sistema de análise por injeção em fluxo (FIA, Flow Injection Analysis). O conteúdo de N-NH_4^+ foi determinado por método condutimétrico, segundo Reis et al. (1997), por meio da formação de NH_3 em meio alcalino, molécula permeável em membrana hidrofóbica (PTFE), com fluxo direcionado para uma cela de condutividade. O $\text{N-NO}_3^- + \text{N-NO}_2^-$ foi analisado por espectrofotometria, mediante redução do nitrato a nitrito por coluna de cádmio coperado e posterior reação do nitrito com sulfanilamida em meio ácido (Giné et al., 1980). Os resultados de N-mineral (N-NH_4^+ e N-NO_3^-) no solo foram corrigidos

em umidade e expressos em mg por kg de solo seco, após a secagem do material em estufa a 105°C por 48 h.

4.2.4. Análise de dados e estatística

A análise estatística dos resultados foi realizada a partir da análise conjunta de dois locais (PC e PD) e aplicação de modelos lineares mistos, em esquema fatorial triplo. O fator manejo de solo foi aplicado em faixas contínuas, incluindo todos os níveis dos demais fatores, para facilitar a instalação e manejo. Nesse sentido, essa variável independente apresenta restrições atreladas ao princípio de casualização e, portanto, foi embutida no modelo de análise como um efeito fixo de aleatorização dependente. Isso porque, a divisão de áreas não representa um controle local, uma vez que não se refere as interações do ambiente, como efeitos aleatórios usuais de clima e solo.

A parcela principal foi formada pelos sistemas de sucessão (amendoim, *Crotalaria spectabilis*, *Crotalaria juncea*, *Crotalaria ochroleuca*, soja e pousio) e a subparcela foi constituída pela adubação nitrogenada de soqueira, em quatro níveis quantitativos (0, 50, 100 e 150% do N exportado na colheita antecessora). Para análise global dos sistemas de manejo, considerando ainda as adversidades relacionadas à sazonalidade de cada rebrota, foi inserido no modelo matemático o efeito de soqueira, como fator aleatório. Tendo em vista à falta de randomização do efeito de manejo do solo e aleatoriedade do efeito de soqueira, a análise estatística não abrange a interação quádrupla dos fatores, o que possibilitou a combinação do fator soqueira apenas com as variáveis independentes de repetição essencialmente genuínas, como cultura antecessora e doses de N.

Previamente, os dados foram submetidos aos testes de pressuposições de normalidade dos resíduos e homogeneidade das variâncias pelos testes de Shapiro-Wilk e Bartlett, respectivamente. Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) pelo teste F ($p \leq 0,1$), considerando os efeitos principais e interações (Anexo B). Posteriormente, para avaliação integrada dos efeitos sobre a qualidade química do solo, os dados foram submetidos a análise de variância multivariada (MANOVA) para análise discriminante canônica (ADC), por meio do pacote Candisc (Friendly e Fox, 2013). As representações da ADC foram realizadas em gráfico biplot para avaliar as diferenças multivariadas entre os tratamentos e hierarquizar a contribuição das variáveis-respostas, tendo em vista as interações significativas dos fatores. O centro dos círculos no gráfico expressa o valor médio das duas primeiras variáveis canônicas e o raio (intervalo de confiança) foi calculado pela equação:

$\sqrt{(\chi_{0,95^2}(v))/n}$, onde, $\chi_{0,95^2}$ é o valor da distribuição qui-quadrado para 95% de confiança, v é o número de variáveis canônicas da representação, e n é o número de repetições do tratamento. Quando os círculos não se sobrepõem, os tratamentos são estatisticamente diferentes. O tamanho da seta representa o peso de cada atributo químico do solo para distinção dos tratamentos e sua direção indica o efeito positivo ou negativo desses atributos nos tratamentos. As variáveis relacionadas a atividade enzimática e ao N-mineral do solo foram coletadas em períodos de avaliação diferentes dos demais atributos da ADC e, por isso, foram submetidas a comparação de médias pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,1$) para análise de efeitos e as interações significativas.

Todas as análises estatísticas e as representações gráficas foram realizadas no programa livre R (R Core Team, 2021). Para análise de variância do tipo III e a comparação de média no programa estatístico, foram empregados os pacotes ‘lmerTest’ (Kuznetsova et al., 2017), ‘emmeans’ (Lenth et al., 2021), e ‘multcomp’ (Hothorn et al., 2008).

4.3. Resultados

4.3.1. Atributos químicos do solo

Com o intuito de facilitar a interpretação dos resultados vinculadas às hipóteses do trabalho, os atributos do solo foram primeiramente divididos em químicos e biológicos antes de submetê-los à análise de variância (ANOVA). Os atributos químicos utilizados foram pH, MOS, P, Ca, Mg, K, S, Al e H+Al (HAl). Os atributos biológicos, por sua vez, foram representados por fosfatase ácida, β -glucosidase, amônio, nitrato e N-mineral. Com a divisão desses principais grupos, a ANOVA foi utilizada a fim de testar os efeitos dos tratamentos experimentais nos resultados individuais dos atributos do solo. Para os atributos químicos, constatou-se significância dos efeitos de forma pronunciada para a maioria dos tratamentos, com uma variação muito grande entre os tipos de efeitos junto de muitas interações (Anexo G). Desta maneira, optou-se por utilizar a análise de variância multivariada (MANOVA) junto da análise discriminante canônica (ADC) a fim de sintetizar os principais efeitos dos tratamentos experimentais nos atributos químicos do solo (Anexo H).

A primeira combinação analisada foi o efeito de soqueira com a cultura antecessora (Figura 4). A primeira variável canônica (VC1) conseguiu agregar cerca de 99% da variabilidade dos atributos químicos do solo, destacando uma forte separação entre os níveis de soqueira. Para a segunda variável canônica (VC2), a variabilidade representada por essa

variável não chegou a somar 1%. A separação dos círculos (intervalos de confiança com probabilidade de 5% de erro), representadas pelo tipo de linha (soqueira 1 - linha sólida, e soqueira 2 - linha tracejada), revela que os atributos químicos do solo são estatisticamente diferentes entre as soqueiras (Figura 4). O posicionamento de elementos como Ca, Mg, K e Mg, junto do teor de MOS, no quadrante esquerdo, indica que a soqueira do segundo ano foi fortemente influenciada por esses atributos.

A análise descritiva desse agrupamento de atributos químicos vinculados à VC1 evidencia a ocorrência de altos teores de atributos para a segunda soqueira (Tabela 4). Situação contrastante é encontrada para os atributos HAl, S, Al e pH, pois estes ficaram agrupados no quadrante direito próximo dos tratamentos da soqueira do primeiro ano (Figura 4). Da mesma forma, a análise descritiva evidencia a ocorrência de maiores teores para atributos químicos vinculados à primeira soqueira (Tabela 4), embora seja possível encontrar diferenças absolutas mínimas para alguns atributos, como o pH e P. A única exceção encontrada foi para o teor de P, pois este ficou posicionado bem ao meio da VC1, indicando pouca influência na separação entre soqueiras a partir da análise multivariada (Figura 4).

No que se refere aos tratamentos de cultura antecessora, a análise multivariada revela uma sobreposição na maioria dos níveis, evidenciando, portanto, ausência de diferença estatística (Figura 4). Para a primeira soqueira, no entanto, observa-se uma maior separação de CO das demais culturas antecessoras. Devido a pouca representatividade da VC2 (menos de 1%), torna-se difícil analisar os efeitos dos níveis de cultura antecessora nos atributos químicos do solo.

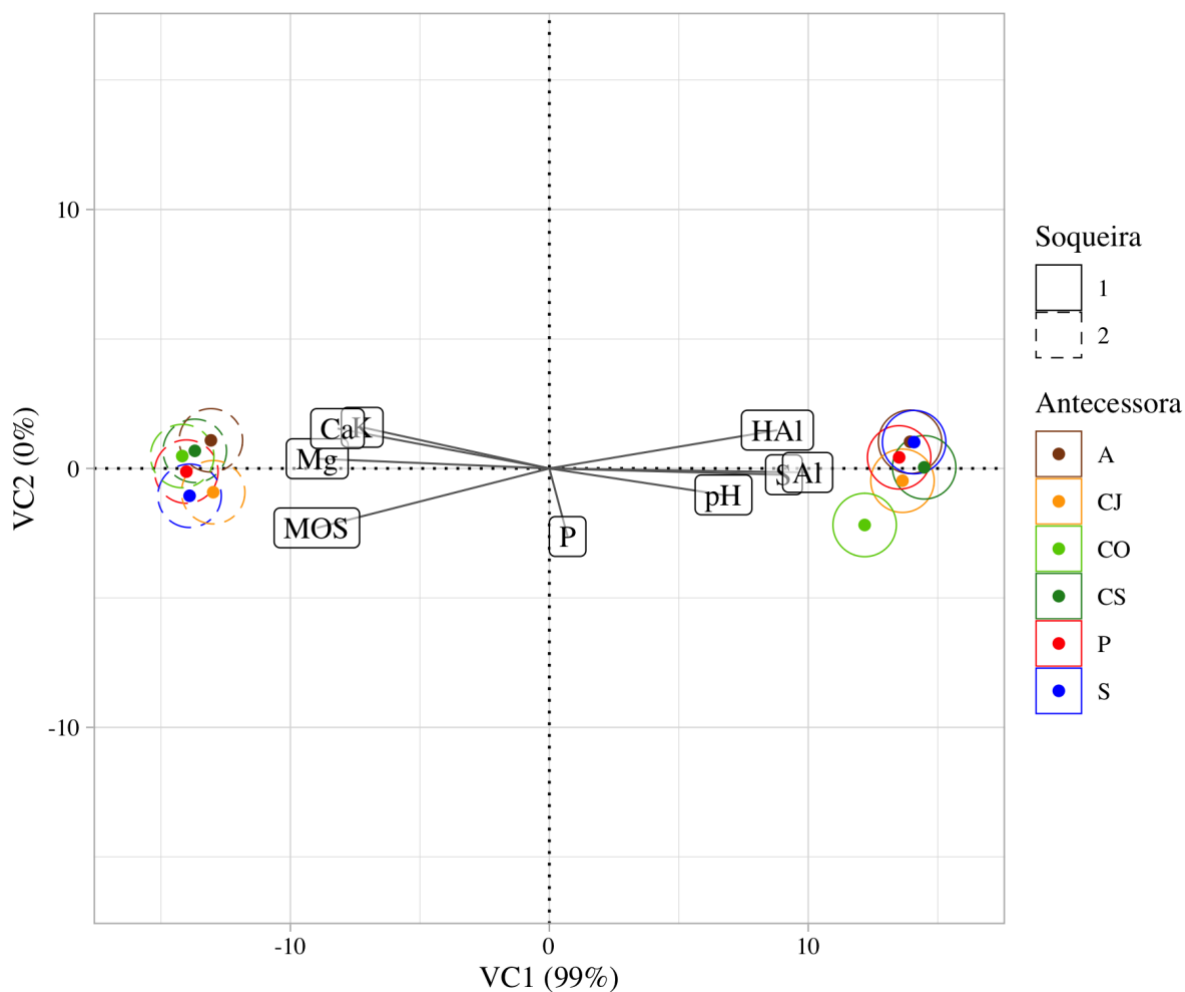


Figura 4. Análise discriminante canônica considerando os efeitos experimentais de soqueira e cultura antecedente nos atributos químicos do solo. Os coeficientes dos atributos químicos do solo foram escalonados a fim de permitir a visualização conjunta com os escores médios dos tratamentos experimentais.

Na análise multivariada de atributos químicos do solo considerando os efeitos combinados de soqueira com adubação nitrogenada (Figura 5), a VC1 conseguiu agregar cerca de 97% da variabilidade dos dados, destacando novamente, uma forte separação entre os níveis de soqueira. Para a VC2, a variabilidade representada por essa variável somou 3%, embora seja possível verificar uma forte separação entre tratamento sob efeito da adubação nitrogenada.

A separação dos círculos representadas pelo tipo de linha (soqueira 1 - linha sólida, e soqueira 2 - linha tracejada), revela que os atributos químicos do solo são estatisticamente diferentes entre as soqueiras quando analisadas juntamente com a adubação nitrogenada (Figura 5). O posicionamento de elementos como Mg, K, Ca, Mg e MOS, no quadrante direito, indica que a soqueira do segundo ano foi fortemente influenciada por esses atributos.

A análise descritiva desse agrupamento de atributos químicos influenciadas pela VC1 evidencia a ocorrência de altos teores médios desses atributos (Mg, K, Ca, Mg e MOS) para a segunda soqueira (Tabela 5). Situação contrastante é encontrada para os atributos HAl, Al, S e pH, pois estes ficaram agrupados no quadrante esquerdo próximo dos tratamentos da soqueira do primeiro ano. Da mesma forma, a análise descritiva evidencia a ocorrência de maiores teores desses atributos químicos (HAl, Al, S e pH) vinculados à primeira soqueira. A única exceção encontrada em relação a VC1 foi para o teor de P, pois este ficou posicionado bem ao meio, indicando pouca influência na separação entre soqueiras a partir da análise multivariada.

Embora pouco representativa (3%), a separação dos efeitos da adubação nitrogenada (vinculada à VC2) revela uma maior concentração de nutrientes em parcelas submetidas à adubação (Figura 5). Observa-se uma influência muito forte nos teores de P e MOS no quadrante superior, confirmado pela Tabela 5, enquanto os demais atributos apresentam influência semelhante e muito mais próximo de 0. Além disso, os efeitos da adubação nitrogenada foram inversos conforme a soqueira analisada. Essa diferenciação foi muito pronunciada para os teores de P e MOS (principais atributos da VC2), uma vez que ambos apresentaram menores teores para adubação nitrogenada na primeira soqueira, e maiores teores com adubação nitrogenada na segunda soqueira. Para os demais atributos, mesmo com a baixa e variada influência na VC2, o tratamento com adubação nitrogenada proporcionou menores teores na maioria dos atributos em ambas as soqueiras (Tabela 5).

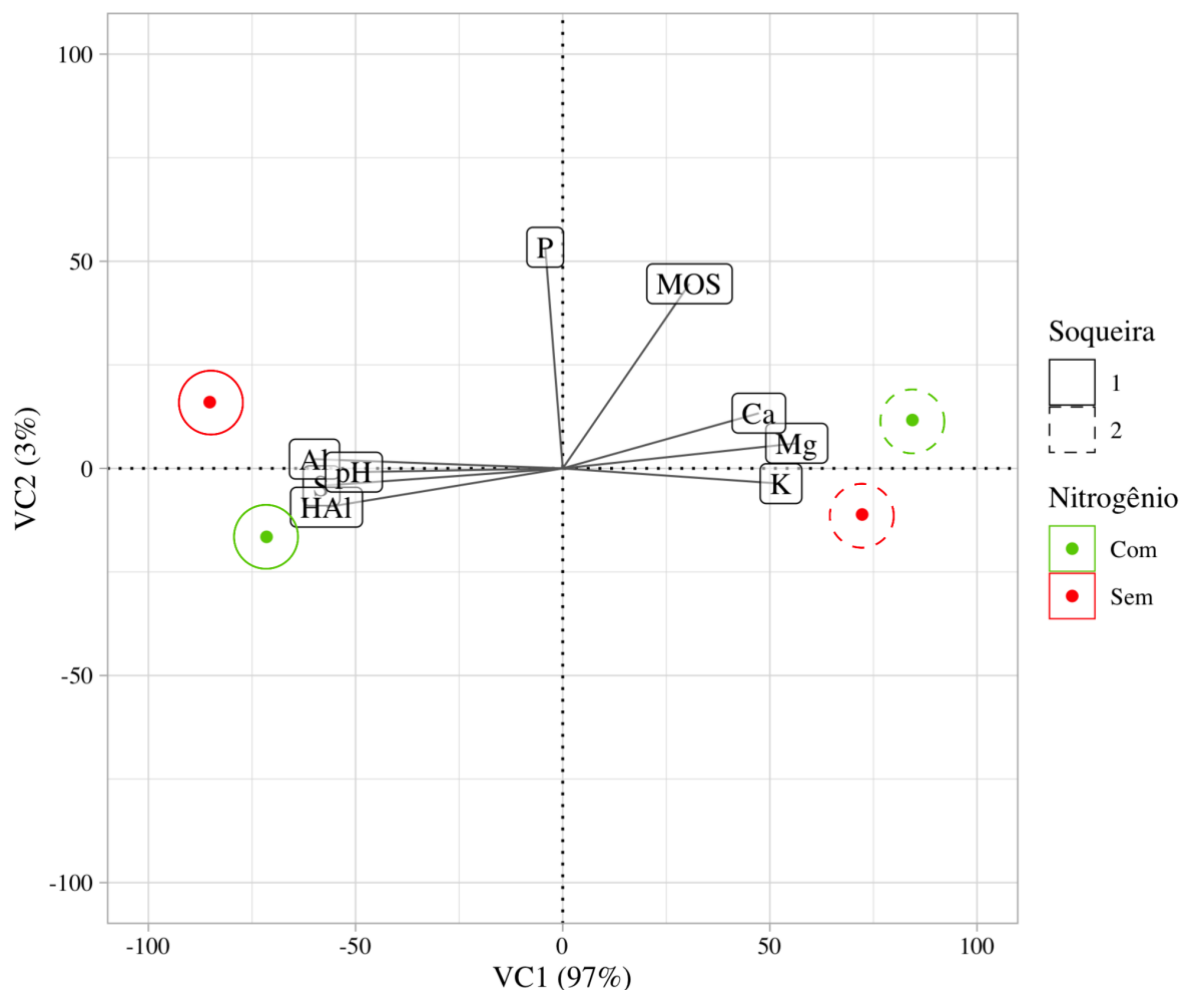


Figura 5. Análise discriminante canônica considerando os efeitos experimentais de soqueira e adubação nitrogenada nos atributos químicos do solo. Os coeficientes dos atributos químicos do solo foram escalonados a fim de permitir a visualização conjunta com os escores médios dos tratamentos experimentais.

Quando os atributos químicos do solo foram analisados em relação aos efeitos combinados de manejo do solo cultura antecessora (Figura 6), a VC1 conseguiu agregar cerca de 46% da variabilidade dos dados. Para a VC2, a variabilidade representada atingiu 21%. Observa-se que a VC1 foi responsável por uma separação não tão acentuada dos níveis de manejo de solo, enquanto a VC2 conseguiu diferenciar estatisticamente alguns níveis de cultura antecessora.

A separação dos círculos representados pelo tipo de linha revela que os atributos químicos do solo são estatisticamente diferentes entre os tipos de manejo de solo quando considerados o mesmo tipo de cultura antecessora (Figura 6). Quando as culturas são comparadas entre si, por outro lado, muitos níveis acabam se sobrepondo. De modo geral, os atributos químicos vinculados ao PC foram pH, P e K, os quais apresentaram níveis superiores desses atributos na análise descritiva (Tabela 6). Os atributos Al, HAl e S tiveram

maior influência sobre os tratamentos com PD a partir da influência de altos valores encontrados para esses atributos (Al, HAl e S).

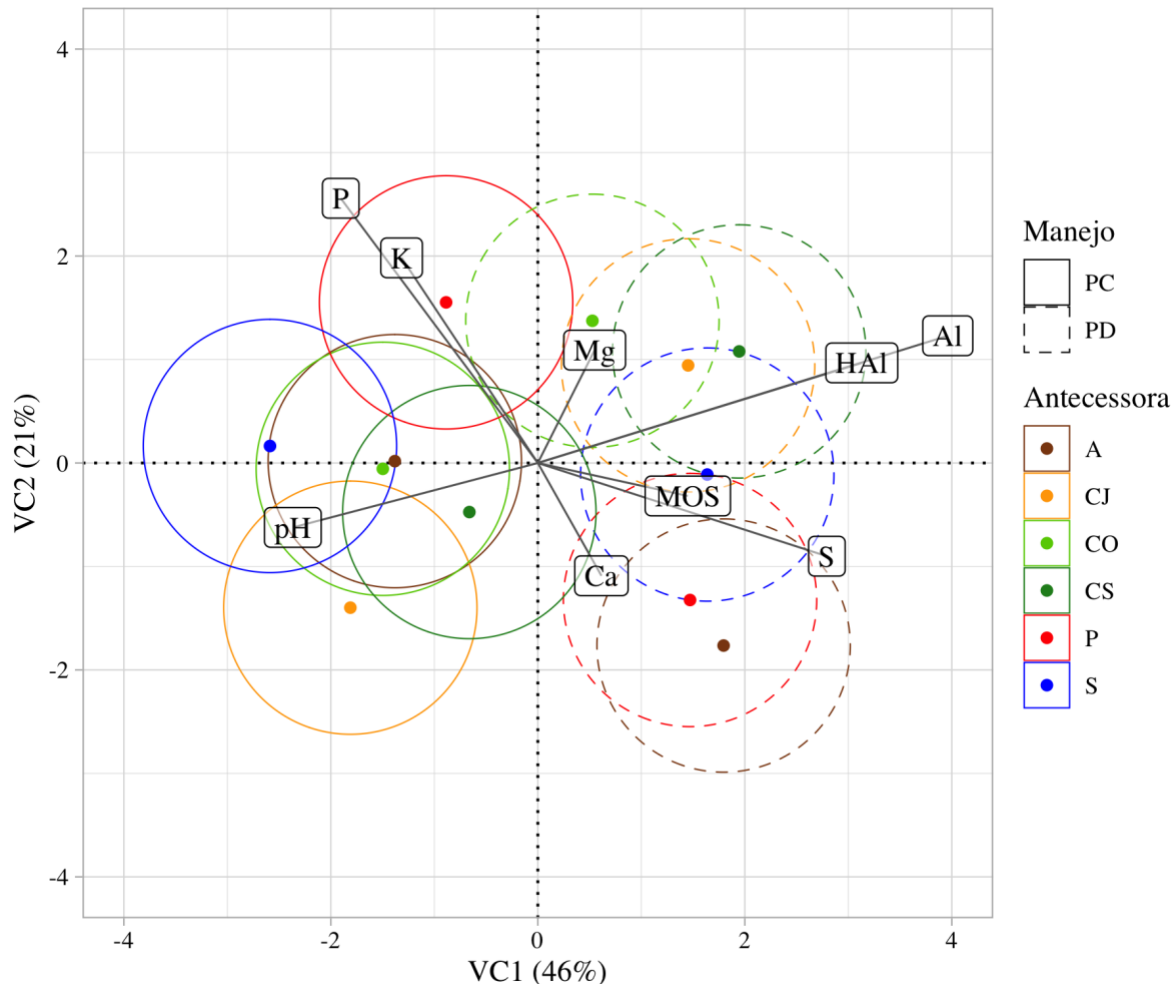


Figura 6. Análise discriminante canônica considerando os efeitos experimentais de manejo do solo e cultura antecessora nos atributos químicos do solo. Os coeficientes dos atributos químicos do solo foram escalonados a fim de permitir a visualização conjunta com os escores médios dos tratamentos experimentais.

No que se refere aos efeitos de cultura antecessora, a análise multivariada revela uma maior separação do tratamento P em relação CJ, mas efeito semelhante com as demais culturas antecessoras dentro do manejo PC (Figura 6). No manejo com PD, os tratamentos com crotalária apresentaram efeitos similares, diferenciando somente dos tratamentos com A e P. Os tratamentos dos quadrantes inferiores foram influenciados principalmente por maiores teores de pH no tratamento CJ do PC, e maiores teores de Ca, S e MOS em A e S dentro do manejo PD (Tabela 6). No quadrante superior, observou-se efeito pronunciado de altos teores de P e K no tratamento pousio do manejo PC, e efeito de Mg, HAl e Al nos tratamentos com crotalária do manejo PD (Figura 6).

Na análise dos atributos químicos do solo sob os efeitos combinados de adubação nitrogenada com cultura antecessora (Figura 7), a primeira variável canônica (VC1) conseguiu agregar 80% da variabilidade dos dados, destacando nesse caso, uma forte separação entre os níveis de adubação nitrogenada. Para a segunda variável canônica (VC2), a variabilidade representada por essa variável somou 9%.

A separação dos círculos representadas pelo tipo de linha (com adubação nitrogenada - linha sólida, e sem adubação nitrogenada - linha tracejada), revela que os atributos químicos do solo são estatisticamente diferentes quando analisadas juntamente com as culturas antecessoras (Figura 7). O posicionamento da maioria dos atributos químicos no quadrante direito, com exceção de S e HAl, indica que os solos sem adubação nitrogenada foram fortemente influenciados por esses atributos. A análise descritiva do agrupamento de atributos químicos influenciadas pela VC1 evidencia a ocorrência de maiores teores desses atributos no tratamento sem adubação nitrogenada (Tabela 7).

No que se refere aos tratamentos de cultura antecessora, a análise multivariada revela uma separação gradual para os tipos de culturas (Figura 7). Observa-se uma influência muito forte dos atributos químicos benéficos no quadrante superior direito, tais como MOS, pH, Mg, K e P, onde os tratamentos com crotalaria e pousio sem adubação nitrogenada ficaram concentrados devido aos maiores teores encontrados para esse tipo de tratamento (Tabela 7).

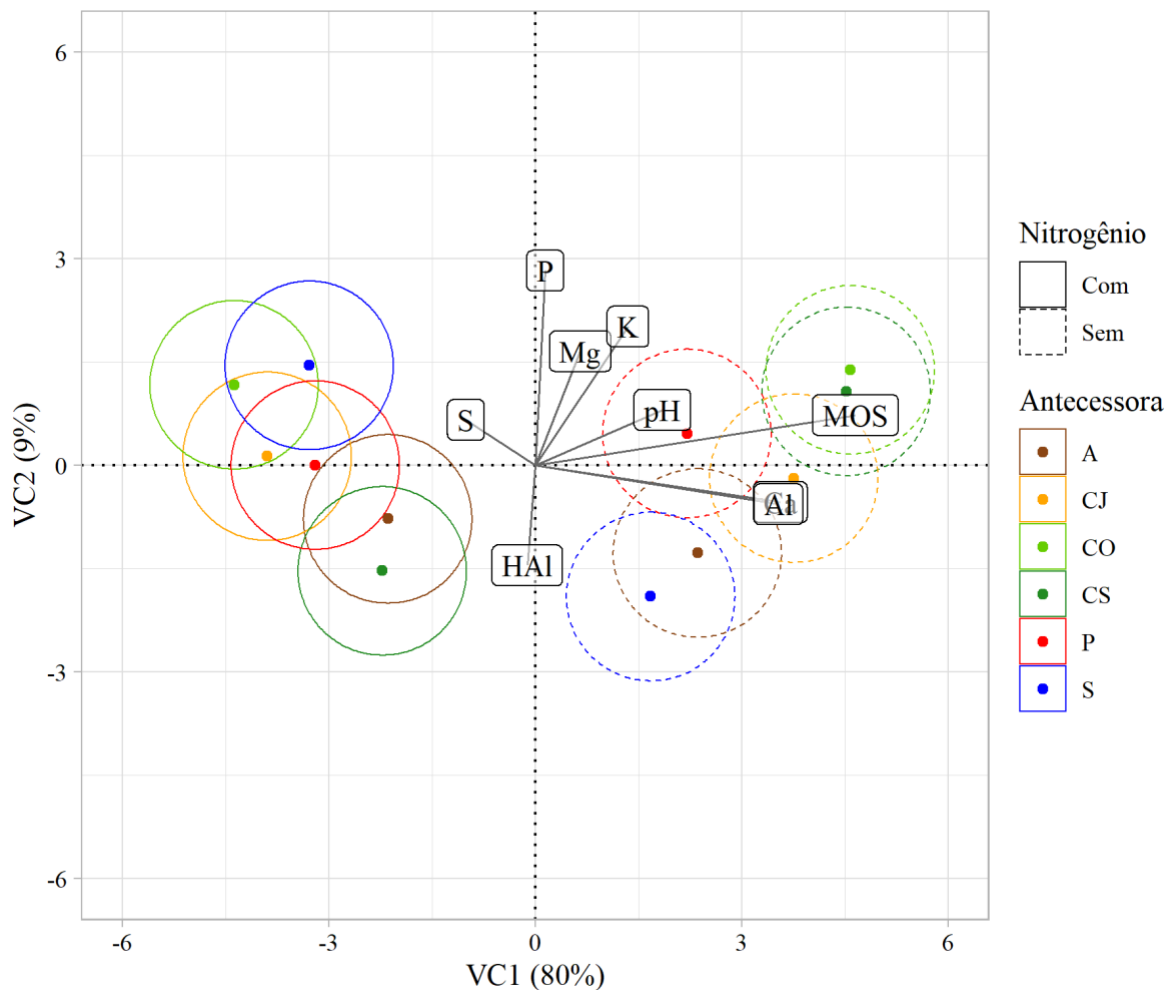


Figura 7. Análise discriminante canônica considerando os efeitos experimentais de adubação nitrogenada e cultura antecessora nos atributos químicos do solo. Os coeficientes dos atributos químicos do solo foram escalonados a fim de permitir a visualização conjunta com os escores médios dos tratamentos experimentais.

Por fim, a análise multivariada dos atributos químicos do solo quanto aos efeitos combinados de manejo do solo com adubação nitrogenada (Figura 8) revelou que a VC1 conseguiu agregar cerca de 75% da variabilidade dos dados. A VC2, por sua vez, sintetizou cerca de 24% da variabilidade remanescente. Enquanto a VC1 foi responsável pela forte separação entre os níveis de adubação nitrogenada, a VC2 foi responsável pela separação remanescente entre os tipos de manejo de solo.

A discriminação dos círculos representados pela cor da linha revela que os atributos químicos do solo são estatisticamente diferentes entre os níveis de adubação nitrogenada quando analisadas juntamente com manejo do solo (Figura 8). O posicionamento da maioria dos atributos químicos no quadrante esquerdo indica que a ausência de adubação nitrogenada apresentou maiores teores desses atributos, principalmente MOS e Ca (Tabela 8). Os maiores de P e S foram vinculados aos tratamentos com adubação nitrogenada. No que se refere aos

tratamentos de manejo do solo, a análise multivariada revela uma separação acentuada pela VC2 (Figura 8). Observa-se uma influência muito forte de atributos benéficos no quadrante superior, principalmente decorrente da influência de altos valores de pH e P, onde os tratamentos com plantio convencional se concentraram (Tabela 8).

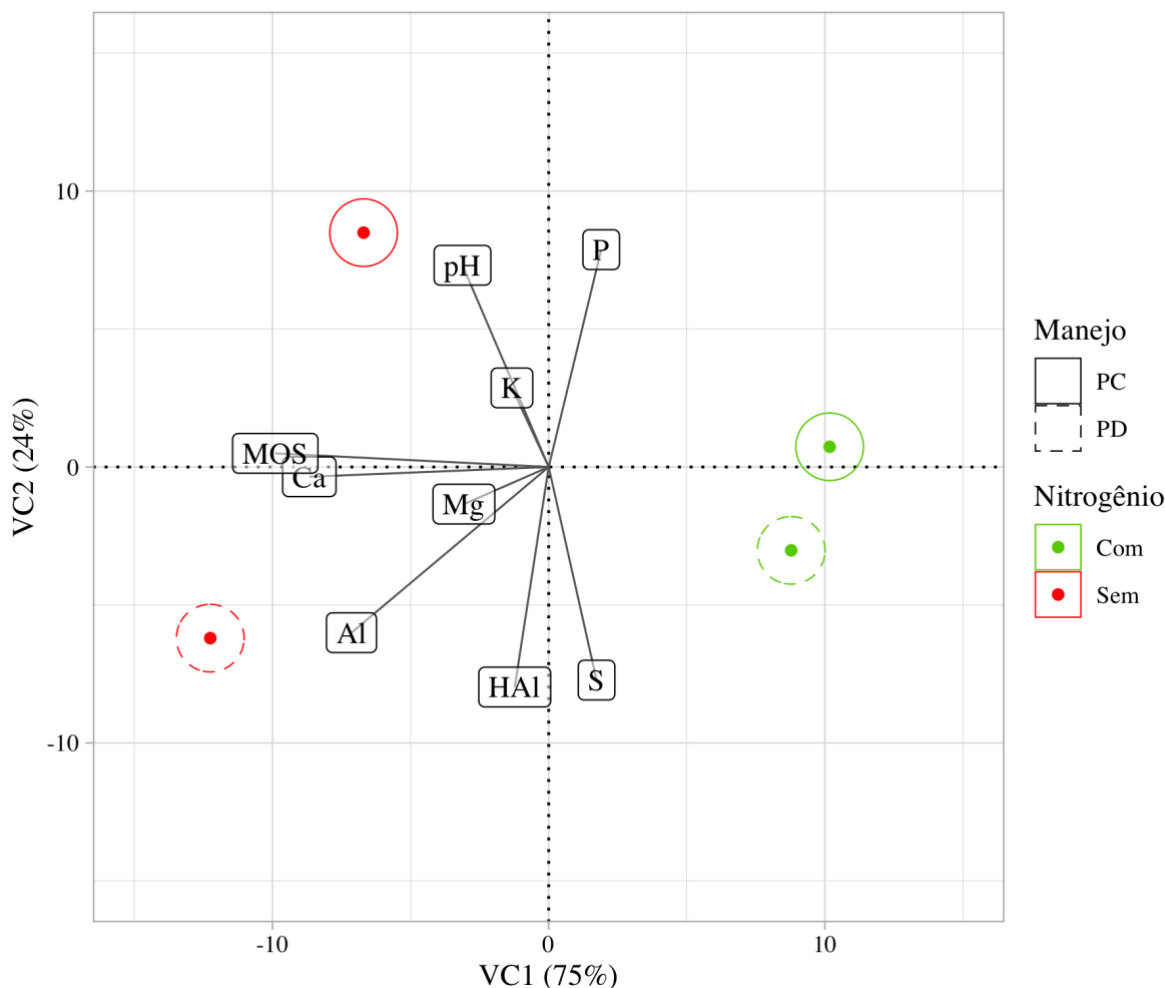


Figura 8. Análise discriminante canônica considerando os efeitos experimentais de manejo do solo e adubação nitrogenada nos atributos químicos do solo. Os coeficientes dos atributos químicos do solo foram escalonados a fim de permitir a visualização conjunta com os escores médios dos tratamentos experimentais.

A discriminação dos círculos representados pela cor da linha revela que os atributos químicos do solo são estatisticamente diferentes entre os níveis de adubação nitrogenada quando analisadas juntamente com manejo do solo (Figura 8). O posicionamento da maioria dos atributos químicos no quadrante esquerdo indica que a ausência de adubação nitrogenada apresentou maiores teores desses atributos, principalmente MOS e Ca (Tabela 5). Os maiores valores de P e S foram vinculados aos tratamentos com adubação nitrogenada. No que se refere aos tratamentos de manejo do solo, a análise multivariada revela uma separação

acentuada pela VC2 (Figura 8). Observa-se uma influência muito forte de nutrientes e parâmetros da acidez do solo no quadrante superior, principalmente decorrente da influência de altos valores de pH e P, onde os tratamentos com plantio convencional se concentraram (Tabela 5).

Tabela 4. Médias dos atributos químicos do solo para interação soqueira e cultura antecessora na primeira (2017/2018) e segunda soqueira (2018/2019), com valores dos coeficientes discriminantes canônicos.

Antecessora	Soqueira	pH	H+Al	Al	S	P	MOS	Ca	Mg	K
		(mmolc dm ⁻³)	(mmolc dm ⁻³)	(mg dm ⁻³)	(mg dm ⁻³)	(g dm ⁻³)	(mmolc dm ⁻³)	(mmolc dm ⁻³)	(mmolc dm ⁻³)	
Amendoim	1	5,1	44,8	4,0	3,8	11,5	26,8	12,8	4,5	2,8
<i>Crotalaria juncea</i>	1	5,1	44,6	4,0	4,1	12,7	28,6	12,2	4,1	2,8
<i>Crotalaria ochroleuca</i>	1	5,1	43,5	3,9	4,0	13,6	29,9	10,6	4,4	3,3
<i>Crotalaria spectabilis</i>	1	5,2	43,8	4,1	3,5	13,7	27,9	14,2	4,4	3,1
Pousio	1	5,1	46,7	3,9	4,2	13,1	27,5	11,2	4,5	2,4
Soja	1	5,1	45,3	3,9	4,0	12,8	26,0	11,5	4,5	2,9
	<i>Média</i>	5,1	44,8	4,0	3,9	12,9	27,8	12,1	4,4	2,9
Amendoim	2	4,9	36,0	0,5	2,2	12,2	33,3	18,8	7,0	5,1
<i>Crotalaria juncea</i>	2	4,9	33,5	0,5	2,0	12,9	32,9	18,0	7,9	3,7
<i>Crotalaria ochroleuca</i>	2	5,0	33,1	0,5	1,5	12,3	33,2	20,0	8,6	5,8
<i>Crotalaria spectabilis</i>	2	4,9	35,7	0,6	1,9	12,5	34,6	20,5	8,5	5,6
Pousio	2	4,9	33,5	0,5	2,0	13,4	33,6	20,5	8,7	4,9
Soja	2	5,0	32,4	0,4	1,8	12,7	33,8	19,0	7,8	4,4
	<i>Média</i>	4,9	34,0	0,5	1,9	12,7	33,6	19,5	8,1	4,9
	<i>VC1</i>	0,67	0,88	1,00	0,91	0,07	-0,90	-0,82	-0,90	-0,72
	<i>VC2</i>	-0,10	0,15	-0,02	-0,02	-0,26	-0,23	0,15	0,04	0,16

Tabela 5. Médias dos atributos químicos do solo para interação de soqueira e adubação nitrogenada na primeira (2017/2018) e segunda soqueira (2018/2019), com valores dos coeficientes discriminantes canônicos.

Nitrogênio	Soqueira	pH	H+Al	Al	S	P	MOS	Ca	Mg	K
			(mmolc dm ⁻³)	(mmolc dm ⁻³)	(mg dm ⁻³)	(mg dm ⁻³)	(g dm ⁻³)	(mmolc dm ⁻³)	(mmolc dm ⁻³)	(mmolc dm ⁻³)
Com	1	5,1	45,7	3,7	4,1	11,2	21,8	9,4	4,1	2,9
Sem	1	5,2	43,9	4,2	3,8	14,6	33,8	14,7	4,7	2,9
	<i>Média</i>	5,1	44,8	4,0	3,9	12,9	27,8	12,1	4,4	2,9
Com	2	4,9	33,4	0,4	2,0	14,4	34,4	18,0	8,1	4,7
Sem	2	5,0	34,7	0,6	1,8	10,9	32,7	21,0	8,1	5,2
	<i>Média</i>	4,9	34,0	0,5	1,9	12,7	33,6	19,5	8,1	4,9
	<i>VC1</i>	-0,84	-0,95	-1,00	-0,97	-0,07	0,51	0,79	0,94	0,88
	<i>VC2</i>	-0,02	-0,16	0,04	-0,07	0,89	0,74	0,22	0,10	-0,06

Tabela 6. Médias dos atributos químicos do solo para interação de manejo de solo e cultura antecedente na primeira (2017/2018) e segunda soqueira (2018/2019), com valores dos coeficientes discriminantes canônicos.

Manejo	Antecedente	pH	H+Al	Al	S	P	MOS	Ca	Mg	K
			(mmolc dm ⁻³)	(mmolc dm ⁻³)	(mg dm ⁻³)	(mg dm ⁻³)	(g dm ⁻³)	(mmolc dm ⁻³)	(mmolc dm ⁻³)	(mmolc dm ⁻³)
PC	Amendoim	5,0	40,2	2,2	2,8	13,4	29,1	14,5	5,4	4,2
PD	Amendoim	5,0	40,5	2,3	3,3	10,3	31,0	17,1	6,1	3,6
	<i>Média</i>	5,0	40,4	2,2	3,0	11,8	30,0	15,8	5,7	3,9
PC	<i>Crotalaria juncea</i>	5,1	36,8	2,0	2,8	12,9	30,9	15,5	5,8	3,1
PD	<i>Crotalaria juncea</i>	5,0	41,4	2,5	3,3	12,7	30,6	14,7	6,2	3,5
	<i>Média</i>	5,0	39,1	2,3	3,1	12,8	30,7	15,1	6,0	3,3
PC	<i>Crotalaria ochroleuca</i>	5,1	37,0	2,0	2,6	13,0	32,0	15,2	6,2	5,1
PD	<i>Crotalaria ochroleuca</i>	5,0	39,5	2,3	2,8	12,9	31,1	15,5	6,8	3,9
	<i>Média</i>	5,0	38,3	2,2	2,7	12,9	31,5	15,3	6,5	4,5
PC	<i>Crotalaria spectabilis</i>	5,1	35,7	2,1	2,5	12,5	30,7	18,1	6,6	4,3
PD	<i>Crotalaria spectabilis</i>	4,9	43,8	2,6	2,9	13,7	31,8	16,6	6,3	4,4
	<i>Média</i>	5,0	39,8	2,3	2,7	13,1	31,2	17,3	6,4	4,3
PC	Pousio	5,0	39,4	2,1	2,9	14,8	30,1	15,2	6,8	4,6
PD	Pousio	5,0	40,8	2,3	3,4	11,7	31,1	16,4	6,4	2,7
	<i>Média</i>	5,0	40,1	2,2	3,1	13,3	30,6	15,8	6,6	3,7
PC	Soja	5,1	35,5	2,0	2,5	14,1	29,4	15,5	6,1	4,0
PD	Soja	4,9	42,2	2,4	3,3	11,4	30,4	15,1	6,1	3,3
	<i>Média</i>	5,0	38,8	2,2	2,9	12,8	29,9	15,3	6,1	3,6
	VC1	-0,47	0,63	0,79	0,56	-0,38	0,29	0,12	0,11	-0,26
	VC2	-0,12	0,19	0,25	-0,18	0,51	-0,06	-0,22	0,22	0,40

Tabela 7. Médias dos atributos químicos do solo para interação de cultura antecessora e adubação nitrogenada na primeira (2017/2018) e segunda soqueira (2018/2019), com valores dos coeficientes discriminantes canônicos.

Antecessora	Nitrogênio	pH	H+Al	Al	S	P	MOS	Ca	Mg	K
		(mmolc dm ⁻³)	(mmolc dm ⁻³)	(mmolc dm ⁻³)	(mg dm ⁻³)	(mg dm ⁻³)	(g dm ⁻³)	(mmolc dm ⁻³)	(mmolc dm ⁻³)	(mmolc dm ⁻³)
Amendoim	Com	5,0	40,2	2,1	3,2	11,2	28,1	13,7	5,3	4,0
<i>Crotalaria juncea</i>	Com	5,0	38,4	2,1	3,2	13,2	27,9	13,1	6,3	2,6
<i>Crotalaria ochroleuca</i>	Com	5,0	38,2	2,0	2,7	12,5	27,8	12,7	6,4	4,3
<i>Crotalaria spectabilis</i>	Com	5,0	40,9	2,2	2,7	11,8	28,4	14,7	6,0	3,9
Pousio	Com	4,9	40,9	2,1	3,0	13,6	28,4	15,1	6,3	3,6
Soja	Com	5,0	38,6	2,1	3,2	14,5	28,0	12,9	6,1	4,0
	<i>Média</i>	5,0	39,5	2,1	3,0	12,8	28,1	13,7	6,1	3,8
Amendoim	Sem	5,0	40,6	2,4	2,8	12,4	32,0	17,9	6,2	3,8
<i>Crotalaria juncea</i>	Sem	5,0	39,8	2,4	2,9	12,4	33,6	17,1	5,7	3,9
<i>Crotalaria ochroleuca</i>	Sem	5,1	38,3	2,3	2,7	13,4	35,3	17,9	6,5	4,7
<i>Crotalaria spectabilis</i>	Sem	5,1	38,7	2,5	2,7	14,3	34,0	20,0	6,9	4,8
Pousio	Sem	5,1	39,3	2,3	3,2	12,9	32,8	16,6	6,8	3,7
Soja	Sem	5,1	39,1	2,3	2,6	11,1	31,8	17,7	6,1	3,2
	<i>Média</i>	5,1	39,3	2,4	2,8	12,8	33,2	17,9	6,4	4,0
	<i>VC1</i>	0,37	-0,02	0,71	-0,20	0,03	0,93	0,71	0,13	0,27
	<i>VC2</i>	0,16	-0,29	-0,11	0,13	0,56	0,15	-0,11	0,33	0,40

Tabela 8. Médias dos atributos químicos do solo para interação de soqueira e adubação nitrogenada na primeira (2017/2018) e segunda soqueira (2018/2019), com valores dos coeficientes discriminantes canônicos.

Nitrogênio	Manejo	pH	H+Al	Al	S	P	MOS	Ca	Mg	K
			(mmolc dm ⁻³)	(mmolc dm ⁻³)	(mg dm ⁻³)	(mg dm ⁻³)	(g dm ⁻³)	(mmolc dm ⁻³)	(mmolc dm ⁻³)	(mmolc dm ⁻³)
Com	PC	5,0	38,0	2,0	2,8	13,1	28,1	14,4	6,1	4,3
Sem	PC	5,1	36,9	2,1	2,6	13,8	32,6	16,9	6,2	4,1
	<i>Média</i>	5,1	37,4	2,1	2,7	13,4	30,4	15,7	6,2	4,2
Com	PD	4,9	41,0	2,2	3,2	12,5	28,1	13,0	6,1	3,2
Sem	PD	5,0	41,8	2,6	3,1	11,8	33,8	18,8	6,5	3,9
	<i>Média</i>	5,0	41,4	2,4	3,1	12,1	31,0	15,9	6,3	3,6
	<i>VC1</i>	-0,31	-0,12	-0,71	0,17	0,19	-0,99	-0,87	-0,31	-0,13
	<i>VC2</i>	0,73	-0,80	-0,60	-0,77	0,79	0,05	-0,04	-0,13	0,29

4.3.2. N-mineral e atributos biológicos do solo

No que se refere aos efeitos experimentais testados nos atributos biológicos, a ANOVA revelou significância estatística para os tratamentos testados (Anexo I). Primeiramente foram analisados os efeitos simples dos tratamentos experimentais (Tabela 9). A concentração de amônio no solo foi maior para as parcelas sem adubação nitrogenada ($6,0 \text{ mg kg}^{-1}$) do que aquelas que receberam o tratamento ($4,9 \text{ mg kg}^{-1}$). Para o nitrato, embora a ANOVA tenha estimada significância estatística e o tratamento PC tenha apresentado maior média numérica ($30,4 \text{ mg kg}^{-1}$), a comparação com o plantio direto ($27,8 \text{ mg kg}^{-1}$) não apresentou diferença estatística significativa. A concentração de N mineral ($\text{N-NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$ e NO_2^-) do solo, por outro lado, foi maior para as parcelas com adubação nitrogenada ($35,4 \text{ mg kg}^{-1}$) quando comparada com o tratamento controle ($33,6 \text{ mg kg}^{-1}$).

O nitrato também apresentou diferença estatística na interação entre adubação nitrogenada com soqueira (Tabela 9). Para a segunda soqueira, a adubação nitrogenada proporcionou maior concentração de nitrato ($32,2 \text{ mg kg}^{-1}$) do que o tratamento controle ($27,7 \text{ mg kg}^{-1}$). Esse resultado foi diferente para a terceira soqueira, pois não foram encontrados efeitos da adubação nitrogenada. Além disso, a concentração de nitrato foi superior para a segunda soqueira com adubação nitrogenada ($32,2 \text{ mg kg}^{-1}$) quando comparada com a terceira soqueira também fertilizada com N ($28,9 \text{ mg kg}^{-1}$).

Tabela 9. Concentração de amônio (N-NH_4^+), nitrato (NO_3^- e NO_2^-) e N mineral ($\text{N-NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$ e NO_2^-) do solo da segunda (2018/2019) e terceira soqueira (2019/2020) de cana-de-açúcar.

Fator	Nitrogênio		
	Com	Sem	Média
Amônio (mg kg^{-1} solo)			
PC	3,3 ± 0,6	3,7 ± 0,5	3,5 ± 0,4
PD	6,4 ± 0,4	8,2 ± 0,7	7,3 ± 0,5
Média	4,9 ± 0,7 B	6,0 ± 0,9 A	
Nitrato (mg kg^{-1} solo)			
PC	31,8 ± 0,6	29,0 ± 0,5	30,4 ± 0,8 a
PD	29,3 ± 0,4	26,3 ± 0,7	27,8 ± 1,0 a
Média	30,5 ± 0,9	27,6 ± 0,9	
Soqueira 2	32,2 ± 0,6 aA	27,7 ± 0,5 aB	29,9 ± 0,4
Soqueira 3	28,9 ± 0,4 bA	27,5 ± 0,7 aA	28,2 ± 0,5
Média	30,5 ± 1,0	27,6 ± 0,6	
N mineral (mg kg^{-1} solo)			
PC	35,1 ± 0,6	32,7 ± 0,5	33,9 ± 0,4
PD	35,7 ± 0,4	34,5 ± 0,7	35,1 ± 0,5
Média	35,4 ± 0,7 A	33,6 ± 0,6 B	

Médias seguidas de letras minúsculas distintas nas colunas e letras maiúsculas distintas nas linhas, diferem entre si pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,10$).

Para o atributo β -glucosidase, diferentes interações dos tratamentos experimentais foram avaliadas (Figura 9). Embora tenha sido constatado o efeito da interação entre adubação nitrogenada e manejo do solo ($p = 0,035$) na ANOVA, o teste de comparação de médias revelou somente o efeito da adubação nitrogenada dentro dos mesmos níveis de manejo do solo (Figura 9a). Tanto nos tratamentos PD e PC, o efeito da adubação nitrogenada proporcionou maiores concentrações de β -glucosidase no solo, mas não foi constatada diferença entre os tipos de manejo. Situação contrastante foi encontrada para a interação entre soqueira e adubação nitrogenada (Figura 9b). Tanto com ou sem a adubação nitrogenada, a segunda soqueira apresentou maiores concentrações de β -glucosidase que a terceira soqueira. Além disso, a concentração de β -glucosidase da segunda soqueira foi maior no tratamento com adubação nitrogenada. Por outro lado, efeito contrastante foi encontrado para a terceira soqueira, pois a adubação nitrogenada não garantiu maiores concentrações β -glucosidase no solo. No que se refere ao efeito combinado de soqueiras e cultura antecessora (Figura 9c), somente a segunda soqueira apresentou diferenciação entre as culturas antecessoras na concentração de β -glucosidase no solo, com destaque para as crotalárias. Entretanto, nenhum efeito foi observado entre as culturas antecessoras da terceira soqueira, a qual apresentou

também as menores concentrações de β -glucosidase em relação à segunda soqueira para todos os tipos de culturas antecessoras.

Para o atributo fosfatase ácida foi constatada uma interação tripla entre cultura antecessora, adubação nitrogenada e soqueira (Figura 10). Diferenças entre culturas antecessoras foram encontradas para a segunda soqueira sem adubação nitrogenada, com destaque para CO e CJ e menor concentração em soja. Além disso, também foram encontradas diferenças para a terceira soqueira com adubação nitrogenada, sendo que somente a soja apresentou menor concentração de fosfatase ácida. No que se refere aos efeitos da adubação nitrogenada, as culturas A, CJ, P, e S apresentaram maiores concentrações de fosfatase ácida quando foram adubadas durante o crescimento da segunda soqueira. Na terceira soqueira, por outro lado, somente A, CS e S apresentaram efeito da adubação nitrogenada. Por fim, a comparação entre soqueiras revelou somente uma maior concentração na segunda soqueira para a cultura CO sob efeito da adubação nitrogenada, enquanto todas as culturas antecessoras da terceira soqueira apresentaram maiores concentrações de fosfatase ácida no solo sem adubação nitrogenada.

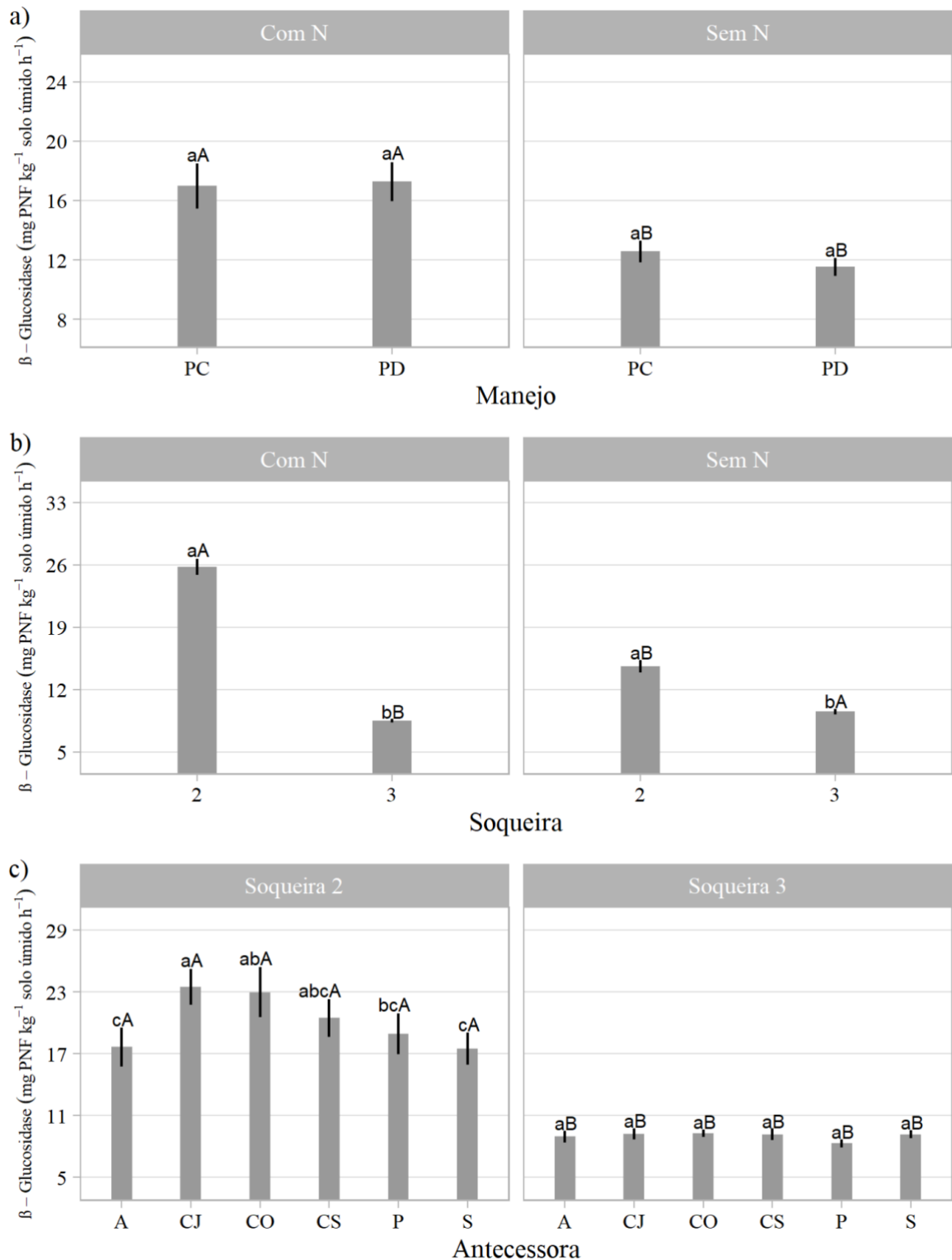


Figura 9. Interações entre adubação nitrogenada e manejo do solo (a), adubação nitrogenada e soqueira (b) e soqueira e cultura antecessora (c), para atividade de β -glucosidase do solo (mg PNF kg^{-1} solo úmido h^{-1}), na segunda e terceira soqueira de cana-de-açúcar (safras de 2019 e 2020). A: Amendoim; CJ: *Crotalaria juncea*; CO: *Crotalaria ochroleuca*; CS: *Crotalaria spectabilis*; P: Pousio; S: Soja. Letras minúsculas distintas indicam diferenças para manejo de solo dentro de N (a), soqueira dentro de N (b) e cultura antecessora dentro de soqueira (c). Letras maiúsculas distintas indicam diferenças para N dentro de manejo do solo (a), N dentro de soqueira (b) e soqueira dentro de cultura antecessora (c). As linhas verticais representam o erro padrão da média do tratamento ($n = 16$).

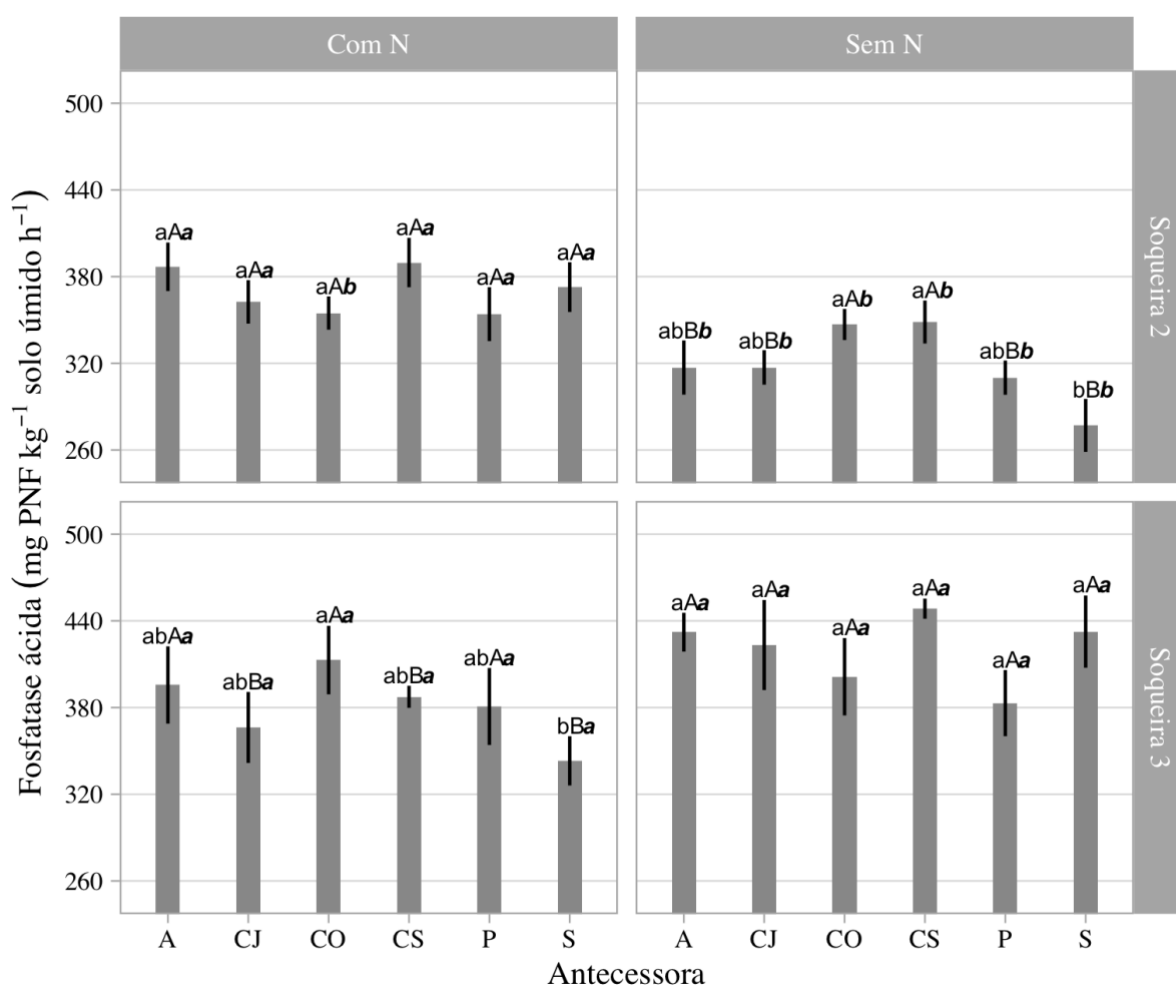


Figura 10. Interação entre soqueira (S), cultura antecessora (A) e adubação nitrogenada (N) para atividade de fosfatase ácida do solo (mg PNF kg⁻¹ solo úmido h⁻¹), na segunda e terceira soqueira de cana-de-açúcar (safras de 2019 e 2020). A: Amendoim; CJ: *Crotalaria juncea*; CO: *Crotalaria ochroleuca*; CS: *Crotalaria spectabilis*; P: Pousio; S: Soja. Letras minúsculas distintas indicam diferenças para (A) dentro de (S) e (N), letras maiúsculas distintas indicam diferenças para (N) dentro de (A) e (S), e letras minúsculas em negrito indicam diferenças para (S) dentro de (A) e (N), pelo teste de Tukey ($p \leq 0,10$). As linhas verticais representam o erro padrão da média do tratamento ($n = 8$).

4.4. Discussão

O emprego da análise multivariada para interpretação de atributos do solo sob efeitos experimentais tem sido reportado na literatura (Oliveira Filho et al., 2017; Satiro et al., 2017). No trabalho de Oliveira Filho et al. (2017), os pesquisadores utilizaram da análise de componentes principais para entender como as frações de fósforo, características de adsorção e o conteúdo de matéria orgânica interagem entre si na cultura da cana-de-açúcar. Desta maneira, uma ampla diversidade de características e tratamentos são sumarizados em uma

única visualização multidimensional, e as possíveis correlações entre atributos, similaridades e agrupamentos podem ser visualizados.

As combinações associadas ao efeito de soqueira agregaram grande parte da variabilidade dos atributos químicos, evidenciando as diferenças existentes de acordo com o ciclo (Figura 4). A primeira soqueira apresentou resposta mais pronunciada para as variáveis relacionadas a acidez do solo, contrapondo os cátions que compõe a soma de bases associados à segunda soqueira. O fósforo expressou pouca influência para distinção nessa análise.

A adubação nitrogenada foi um importante fator para discriminação dos atributos químicos do solo quando analisada junto ao efeito da soqueira (Figura 5). Enquanto na primeira soqueira a adubação nitrogenada teve forte relação à acidez do solo, a presença de N na segunda soqueira ficou associada à maior disponibilidade de nutrientes catiônicos e matéria orgânica.

Os resultados de análise revelam que a acidez do solo foi maior na segunda soqueira, porém os teores de Al foram menores possivelmente por conta da precipitação com sulfato e subsequente lixiviação das camadas mais superficiais (Carvalho et al., 2013), liberando as cargas do solo para retenção de cátions. Outro efeito observado foi a maior concentração de matéria orgânica na segunda soqueira, que também apresentou menor teor de pH. A mineralização da matéria orgânica pode estar relacionada tanto com a maior disponibilidade de cátions, que antes estavam mobilizados na palhada, quanto com as alterações de pH identificadas (Velooso et al., 1992). Além disso, as condições climáticas da segunda soqueira revelam um maior volume de chuvas durante o ciclo da cultura (Figura 3), sendo um fator que também catalisa o processo de mineralização (Tognon et al., 1998).

No plantio direto, a sucessão com amendoim se distinguiu dos tratamentos com crotalária e de todas as demais culturas antecessoras do plantio convencional (Figura 6), denotando uma relação desarmônica para essa combinação de manejo (Tabela 6). Menores teores de MOS, Mg e P estão associados a essa cultura. As crotalárias em plantio direto, por outro lado, estão relacionadas com maiores teores de nutrientes no solo. Embora não ocorra diferenças entre as espécies dentro de cada sistema, a CJ foi a que mais destoou nessa espécie e demonstrou ser menos eficiente para disponibilidade de nutrientes em PC.

A utilização de crotalárias como adubação verde tem sido objeto de estudo em diferentes trabalhos. No estudo de Ambrosano et al. (2005), os autores identificaram alteração nos atributos do solo e da planta, promovendo aumento nos teores de Ca e Mg, soma de bases e saturação de bases e pH, com declínio na acidez potencial no solo. Além disso, os autores também observaram aumento nos teores de Ca e K na parte aérea a partir da combinação de

adubo verde e N-fertilizante. Em um estudo mais recente, Tenelli et al (2021) perceberam que a utilização de crotalária proporcionou maiores níveis de produtividade (9-15%) depois de quatro ciclos de soqueira sem suplementação mineral de N, o que demonstra uma possível redução da necessidade da adubação via fertilizante e nas emissões de gases de efeito estufa associadas a esse manejo.

Neste presente trabalho, as culturas antecessoras foram diferenciadas pela adubação nitrogenada para os atributos químicos do solo (Figura 7). Em sistemas com N, as culturas antecessoras não se diferiram do pousio. Sem aplicação de N, as sucessões de amendoim e soja tenderam a apresentar relações mais desfavoráveis em relação ao pousio e crotalárias. As crotalárias proporcionaram maior acúmulo de matéria orgânica no solo, o que conseqüentemente pode proporcionar maior disponibilidade de nutrientes pela sua decomposição (Ferreira et al., 2016; Otto et al., 2020).

De modo geral, o plantio direto favoreceu a disponibilidade de nutrientes no solo independente da adubação nitrogenada, com exceção do P e K (Figura 8). Além disso, as parcelas com adubação nitrogenada sob esse sistema apresentaram menores teores de nutrientes, muito possivelmente por conta da maior extração de nutrientes para produção de biomassa. No trabalho desenvolvido por Duarte Filho e Coelho (2010), os autores identificaram que o sistema de plantio direto proporcionou após o primeiro corte, na camada de 0 a 5 cm de profundidade, o aumento no teor de carbono e matéria orgânica em 14 e 13% maior do que no preparo convencional do solo. Além disso, os autores argumentam que, embora essa prática não tenha proporcionado aumentos significativos de nutrientes no solo (P, K, Ca, Mg e Mn), eventualmente esse manejo proporcionará maiores benefícios na fertilidade do solo na medida que o sistema se torna mais estabelecido.

A análise multivariada ADC foi empregada no estudo de Satiro et al. (2017) para analisar os efeitos da remoção da palha de cana-de-açúcar nos atributos do solo. No referido estudo, os autores conseguiram analisar os efeitos da remoção de palha de forma integrada, com a deterioração da qualidade do solo (depleção de nutrientes e C, e aumento da resistência à penetração) na medida que maiores taxas de remoção foram adotadas. De maneira similar, a ADC empregada neste estudo revelou um agrupamento muito discrepante entre as soqueiras e adubação nitrogenada, as quais estão possivelmente associadas à dinâmica de nutrientes do solo atrelada às condições meteorológicas específicas de cada safra (Figura 3). Na primeira soqueira, o volume de chuvas acumulado entre setembro e março foi menor que a segunda soqueira. A maior concentração de chuvas logo no início do desenvolvimento da segunda soqueira (outubro e novembro) influenciou no desempenho da cultura, com maiores valores

de produtividade encontrados para a segunda soqueira. Situação semelhante foi encontrado no estudo de Boschiero et al. (2020), onde uma boa distribuição de chuvas no início do período de crescimento, associada à permanência de palhada na superfície do solo e maior perfilhamento, proporcionaram maiores níveis de produtividade.

A separação de macronutrientes (como Ca, Mg e K), atributos de acidez, matéria orgânica, e fósforo na análise multivariada ADC também foi identificada no estudo de Satiro et al. (2017). Isso evidencia que a análise multivariada de atributos químicos é bastante útil para analisar de forma sistemática os efeitos experimentais empregados no cultivo de cana-de-açúcar e compreender a dinâmica de nutrientes no solo. Embora muitos nutrientes presentes na palhada de cana não são prontamente disponíveis para às plantas, a sua contribuição precisa ser contabilizada no manejo de adubação (Trivelin et al., 2013).

Por fim, a aplicação de N proporcionou maior disponibilidade de N-mineral no solo, mas reduziu a participação da fração amoniacal (Tabela 9). A atividade enzimática do solo foi alterada pela interação de fatores, especialmente para soqueira, cultura antecessora e adubação nitrogenada. A adubação nitrogenada aumentou a atividade da β -glucosidase para PC e PD, bem como para a segunda soqueira (Figura 9). Na segunda soqueira, as crotalárias favoreceram a atividade β -glucosidase, promovendo diferenciação em relação ao grupo de sucessões comerciais, soja e amendoim. A utilização de adubos verdes tem sido apontada como uma estratégia essencial para promover a qualidade biológica do solo com diversidade microbiana e enzimática, o que pode proporcionar maior longevidade do canavial e altos níveis de produtividade a longo prazo (Vuyyuru et al., 2020).

A atividade da fosfatase ácida foi alterada pela adubação nitrogenada, mas apresentou variações contrárias entre ciclos (Figura 10). Nesse sentido, os sistemas com respostas mais pronunciadas foram os sem aplicação de N, para segunda soqueira, e os com aplicação de N, para terceira soqueira. Em sistemas não adubados, a atividade da fosfatase ácida das sucessões com CO e CS foi superior à soja. Já para sistemas com N, a soja apresentou menor atividade da fosfatase ácida, em relação a CO.

4.5. Conclusões

As combinações associadas ao efeito de soqueira evidenciaram as diferenças existentes de acordo com a safra. Sob plantio direto, a sucessão com amendoim não foi benéfica comparado aos tratamentos com crotalária e das demais culturas antecessoras sob plantio convencional. De modo geral, o plantio direto favoreceu a disponibilidade de

nutrientes no solo. Entretanto, a ausência de N desfavoreceu os benefícios desse sistema. A aplicação de N aumentou a disponibilidade de N-mineral no solo e a atividade da β -glucosidase nos dois tipos de manejo do solo. A atividade enzimática do solo foi alterada pela interação de fatores, especialmente para soqueira, cultura antecessora e adubação nitrogenada.

Referências

- Alvares, C.A., J.L. Stape, P.C. Sentelhas, J.L. de Moraes Gonçalves, and G. Sparovek. 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorol. Zeitschrift* 22(6): 711–728. doi: 10.1127/0941-2948/2013/0507.
- Ambrosano, E.J., P.C.O. Trivelin, H. Cantarella, G.M.B. Ambrosano, E.A. Schammas, et al. 2005. Utilization of nitrogen from green manure and mineral fertilizer by sugarcane. *Sci. Agric.* 62(6): 534–542. doi: 10.1590/S0103-90162005000600004.
- Ambrosano, E.J., P.C.O. Trivelin, H. Cantarella, G.M.B. Ambrosano, E.A. Schammas, et al. 2011. ^{15}N -labeled nitrogen from green manure and ammonium sulfate utilization by the sugarcane ratoon. *Sci. Agric.* 68(3): 361–368. doi: 10.1590/S0103-90162011000300014.
- Awe, G.O., J.M. Reichert, L.C. Timm, and O.O. Wendroth. 2015a. Temporal processes of soil water status in a sugarcane field under residue management. *Plant Soil* 387(1–2): 395–411. doi: 10.1007/s11104-014-2304-5.
- Awe, G.O., J.M. Reichert, and O.O. Wendroth. 2015b. Temporal variability and covariance structures of soil temperature in a sugarcane field under different management practices in southern Brazil. *Soil Tillage Res.* 150: 93–106. doi: 10.1016/j.still.2015.01.013.
- Bordonal, R. de O., R. Lal, C.C. Ronquim, E.B. de Figueiredo, J.L.N. Carvalho, et al. 2017. Changes in quantity and quality of soil carbon due to the land-use conversion to sugarcane (*Saccharum officinarum*) plantation in southern Brazil. *Agric. Ecosyst. Environ.* 240: 54–65. doi: 10.1016/j.agee.2017.02.016.
- Boschiero, B.N., E. Mariano, L.O. Torres-Dorante, T.M.S. Sattolo, R. Otto, et al. 2020. Nitrogen fertilizer effects on sugarcane growth, nutritional status, and productivity in tropical acid soils. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* 117(3): 367–382. doi: 10.1007/s10705-020-10074-w.
- Cantarella, H., and R. Rosseto. 2014. Fertilizers for sugarcane. In: Cortez, L.A.B., editor, *Sugarcane bioethanol — R&D for Productivity and Sustainability*. Editora Edgard Blücher, São Paulo. p. 405–422

- Cantarella, H., P.C.O. Trivelin, T.L.M. Contin, F.L.F. Dias, R. Rossetto, et al. 2008. Ammonia volatilisation from urease inhibitor-treated urea applied to sugarcane trash blankets. *Sci. Agric.* 65(4): 397–401. doi: 10.1590/S0103-90162008000400011.
- Carvalho, J.M., M. Andreotti, S. Buzetti, and M. de P. e Carvalho. 2013. Produtividade de cana soca sem queima em função do uso de gesso e vinhaça. *Pesqui. Agropecuária Trop.* 43(1): 1–9. doi: 10.1590/S1983-40632013000100001.
- Cerri, C.E.P., M.V. Galdos, J.L.N. Carvalho, B.J. Feigl, and C.C. Cerri. 2013. Quantifying soil carbon stocks and greenhouse gas fluxes in the sugarcane agrosystem: point of view. *Sci. Agric.* 70(5): 361–368. doi: 10.1590/S0103-90162013000500011.
- Cherubin, M.R., D.L. Karlen, A.L.C. Franco, C.A. Tormena, C.E.P. Cerri, et al. 2016. Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil. *Geoderma* 267: 156–168. doi: 10.1016/j.geoderma.2016.01.004.
- CONAB. 2021. Companhia Nacional de Abastecimento: Portal de informações agropecuárias. <https://portaldeinformacoes.conab.gov.br/index.php/>.
- Dias, H.B., and P.C. Sentelhas. 2017. Evaluation of three sugarcane simulation models and their ensemble for yield estimation in commercially managed fields. *F. Crop. Res.* 213: 174–185. doi: 10.1016/j.fcr.2017.07.022.
- Duarte Júnior, J.B., and F.C. Coelho. 2010. Avaliação de atributos químicos do solo após a colheita da cana-planta em sistema de plantio direto e convencional. *Científica* 38(1/2): 69–77.
- Egeskog, A., F. Freitas, G. Berndes, G. Sparovek, and S. Wirsenius. 2014. Greenhouse gas balances and land use changes associated with the planned expansion (to 2020) of the sugarcane ethanol industry in Sao Paulo, Brazil. *Biomass and Bioenergy* 63: 280–290. doi: 10.1016/j.biombioe.2014.01.030.
- Farhate, C.V.V., Z.M. de Souza, M.R. Cherubin, L.H. Lovera, I.N. de Oliveira, et al. 2022. Soil physical change and sugarcane stalk yield induced by cover crop and soil tillage. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 46. doi: 10.36783/18069657rbcs20210123.
- Farinelli, J.B. de M., D.F.L. Santos, C. Fernandes, M.M.H. Fernandes, and M.F. da Silva. 2018. Crop Diversification Strategy to Improve Economic Value in Brazilian Sugarcane Production. *Agron. J.* 110(4): 1402–1411. doi: 10.2134/agronj2017.10.0578.
- Ferreira, D.A., H.C.J. Franco, R. Otto, A.C. Vitti, C. Fortes, et al. 2016. Contribution of N from green harvest residues for sugarcane nutrition in Brazil. *GCB Bioenergy* 8(5): 859–866. doi: 10.1111/gcbb.12292.

- Filoso, S., J.B. do Carmo, S.F. Mardegan, S.R.M. Lins, T.F. Gomes, et al. 2015. Reassessing the environmental impacts of sugarcane ethanol production in Brazil to help meet sustainability goals. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 52: 1847–1856. doi: 10.1016/j.rser.2015.08.012.
- Fortes, C., P.C.O. Trivelin, A.C. Vitti, R. Otto, H.C.J. Franco, et al. 2013. Stalk and sucrose yield in response to nitrogen fertilization of sugarcane under reduced tillage. *Pesqui. Agropecuária Bras.* 48(1): 88–96. doi: 10.1590/S0100-204X2013000100012.
- Franco, H.C.J., I.R. Bologna, C.E. Faroni, A.C. Vitti, and P.C.O. Trivelin. 2007. Acúmulo de macronutrientes em cana-de-açúcar em função da adubação nitrogenada e dos resíduos culturais incorporados ao solo no plantio. *Bragantia* 66(4): 669–674. doi: 10.1590/S0006-87052007000400017.
- Franco, H.C.J., R. Otto, A.C. Vitti, C.E. Faroni, E.C. de A. Oliveira, et al. 2015. Residual recovery and yield performance of nitrogen fertilizer applied at sugarcane planting. *Sci. Agric.* 72(6): 528–534. doi: 10.1590/0103-9016-2015-0170.
- Franco, H.C.J., M.T.B. Pimenta, J.L.N. Carvalho, P.S.G. Magalhães, C.E.V. Rossell, et al. 2013. Assessment of sugarcane trash for agronomic and energy purposes in Brazil. *Sci. Agric.* 70(5): 305–312. doi: 10.1590/S0103-90162013000500004.
- Giné, M.F., H. Bergamin F, E.A.G. Zagatto, and B.F. Reis. 1980. Simultaneous determination of nitrate and nitrite by flow injection analysis. *Anal. Chim. Acta* 114: 191–197. doi: 10.1016/S0003-2670(01)84290-2.
- Hoorman, J.J., J.C.M. Sá, and R. Reeder. 2011. The biology of soil compaction. *Science* (80-.). 68: 49–57.
- Hothorn, T., F. Bretz, and P. Westfall. 2008. Simultaneous Inference in General Parametric Models. *Biometrical J.* 50(3): 346–363. doi: 10.1002/bimj.200810425.
- Kuznetsova, A., P.B. Brockhoff, and R.H.B. Christensen. 2017. lmerTest Package: Tests in Linear Mixed Effects Models. *J. Stat. Softw.* 82(13). doi: 10.18637/jss.v082.i13.
- Lenth, R., H. Singmann, and J. Love. 2021. Emmeans: Estimated marginal means, aka least-squares means. : R package version 1.4.
- Malavolta, E., G.C. Vitti, and S.A. Oliveira. 1997. Avaliação do estado nutricional de plantas: princípios e aplicações. Potafos, Piracicaba.
- Oliveira Filho, J.D.S., M.G. Pereira, B.F. de Aquino, and T.V. de A. Viana. 2017. Phosphorus forms and adsorption in a typical quartzipsamment cultivated with sugarcane harvested without burning. *Rev. Caatinga* 30(2): 343–352. doi: 10.1590/1983-21252017v30n209rc.

- Otto, R., S.A.Q. Castro, E. Mariano, S.G.Q. Castro, H.C.J. Franco, et al. 2016. Nitrogen Use Efficiency for Sugarcane-Biofuel Production: What Is Next? *BioEnergy Res.* 9(4): 1272–1289. doi: 10.1007/s12155-016-9763-x.
- Otto, R., G.L. Pereira, S. Tenelli, J.L.N. Carvalho, J. Lavres, et al. 2020. Planting legume cover crop as a strategy to replace synthetic N fertilizer applied for sugarcane production. *Ind. Crops Prod.* 156: 112853. doi: 10.1016/j.indcrop.2020.112853.
- Pereira, A.R., L.R. Angelocci, and P.C. Sentelhas. 2002. *Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas*. Agropecuária, Guaíba.
- Prado, E.A.F. do, A.C.T. Vitorino, R.A. Garcia, C.J. da Silva, and M. Mauad. 2019. Structural Quality of an Oxisol Under Conventional Soil Tillage and Predecessor Crops in Sugarcane Rotation. *Sugar Tech* 21(1): 93–103. doi: 10.1007/s12355-018-0626-y.
- R Core Team. 2021. R: A language and environment for statistical computing. <https://www.r-project.org/>.
- Raij, B. van, J.C.C. Andrade, H. Cantarella, and J.A.A. Quaggio. 2001. *Análise química para avaliação de solos tropicais*. Instituto Agronômico de Campinas, Campinas.
- Reis, B.F., J.A. Vieira, F.J. Krug, and M.F. Giné. 1997. Development of a flow injection system with two analytical paths for ammonium determination in soil extracts by conductometry. *J. Braz. Chem. Soc.* 8(5): 523–528. doi: 10.1590/S0103-50531997000500015.
- Santos, H.G. dos, P.K.T. Jacomine, L.H.C. dos Anjos, V.Á. de A. Oliveira, J.F. Lumbrreras, et al. 2018. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 5 ed. rev. Embrapa, Brasília, DF.
- Satiro, L.S., M.R. Cherubin, J.L. Safanelli, I.P. Lisboa, P.R. da Rocha Junior, et al. 2017. Sugarcane straw removal effects on Ultisols and Oxisols in south-central Brazil. *Geoderma Reg.* 11: 86–95. doi: 10.1016/j.geodrs.2017.10.005.
- Silva-Olaya, A.M., C.E.P. Cerri, N. La Scala Jr, C.T.S. Dias, and C.C. Cerri. 2013. Carbon dioxide emissions under different soil tillage systems in mechanically harvested sugarcane. *Environ. Res. Lett.* 8(1): 015014. doi: 10.1088/1748-9326/8/1/015014.
- Soil Survey Staff. 2014. *Keys to Soil Taxonomy*. 12th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.
- Tabatabai, M.A. 1994. Soil enzymes. In: Weaver, R.W., Scott, A., and Bottomeley, P.J., editors, *Methods of soil analysis: microbiological and biochemical properties*. Soil Science Society of America, Madison, WI. p. 778–835
- Teixeira, P.C., G.K. Donagema, A. Fontana, and W.G. Teixeira. 2017. *Manual de métodos de análise de solo*. 3rd ed. Embrapa, Brasília, DF.

- Tenelli, S., R. Otto, R.O. Bordonal, and J.L.N. Carvalho. 2021. How do nitrogen fertilization and cover crop influence soil C-N stocks and subsequent yields of sugarcane? *Soil Tillage Res.* 211: 104999. doi: 10.1016/j.still.2021.104999.
- Tognon, A.A., J.L.I. Demattê, and J.A.M. Demattê. 1998. Teor e distribuição da matéria orgânica em latossolos das regiões da floresta amazônica e dos cerrados do Brasil central. *Sci. Agric.* 55(3): 343–354. doi: 10.1590/S0103-90161998000300001.
- Trivelin, P.C.O., H.C.J. Franco, R. Otto, D.A. Ferreira, A.C. Vitti, et al. 2013. Impact of sugarcane trash on fertilizer requirements for São Paulo, Brazil. *Sci. Agric.* 70(5): 345–352. doi: 10.1590/S0103-90162013000500009.
- Trivelin, P.C.O., M.W. de Oliveira, A.C. Vitti, G.J. de C. Gava, and J.A. Bendassolli. 2002. Perdas do nitrogênio da uréia no sistema solo-planta em dois ciclos de cana-de-açúcar. *Pesqui. Agropecuária Bras.* 37(2): 193–201. doi: 10.1590/S0100-204X2002000200011.
- Veloso, C.A.C., A.L. Borges, A.S. Muniz, and I.A. de J.M. Veigas. 1992. Efeito de diferentes materiais no pH do solo. *Sci. Agric.* 49(spe): 123–128. doi: 10.1590/S0103-90161992000400016.
- Vitti, A.C., H.C.J. Franco, P.C.O. Trivelin, D.A. Ferreira, R. Otto, et al. 2011. Nitrogênio proveniente da adubação nitrogenada e de resíduos culturais na nutrição da cana-planta. *Pesqui. Agropecuária Bras.* 46(3): 287–293. doi: 10.1590/S0100-204X2011000300009.
- Vitti, G.C., J.A. Mazza, T.A. Quintino, and R. Otto. 2006. Nutrição e adubação. In: Ripoli, T.C.C., Ripoli, M.L.C., Casagrandi, D. V., and Ide, B.Y., editors, *Plantio da cana-de-açúcar: estado da arte*. ESALQ, Piracicaba. p. 102–144
- Vuyyuru, M., H.S. Sandhu, J.E. Erickson, and A. V. Ogram. 2020. Soil chemical and biological fertility, microbial community structure and dynamics in successive and fallow sugarcane planting systems. *Agroecol. Sustain. Food Syst.* 44(6): 768–794. doi: 10.1080/21683565.2019.1666075.
- Waclawovsky, A.J., P.M. Sato, C.G. Lembke, P.H. Moore, and G.M. Souza. 2010. Sugarcane for bioenergy production: an assessment of yield and regulation of sucrose content. *Plant Biotechnol. J.* 8(3): 263–276. doi: 10.1111/j.1467-7652.2009.00491.x.
- Wutke, E.B., A. Calegari, and L. do P. Wildner. 2014. Espécies de adubos verdes e plantas de cobertura e recomendações para seu uso. In: Lima Filho, O.F. de, Ambrosano, E.J., Rossi, F., and Carlos, J.A.D., editors, *Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil*. 1st ed. Embrapa, Brasília, DF. p. 59–168

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Atualmente, os desdobramentos geopolíticos e econômicos desfavoráveis associados a crise mundial, a alta dependência nacional por fertilizantes e, conseqüentemente, o aumento dos preços desses insumos, tem ocasionado um grande grau de incertezas no setor do agronegócio. Em vista da necessidade e urgência do presente cenário, especialistas e técnicos de várias vertentes agronômicas vêm propagando métodos alternativos de manejo para o desenvolvimento mais sustentável de produção, acelerando assim a validação de muitas técnicas conservacionistas já estudadas na área, mas pouco implementadas na rotina. Somado a isso, parte da atenção também está voltada para a reação em cadeia de efeitos associados às mudanças climáticas globais e ao aumento da ocorrência de sazonalidades extremas, como secas e chuvas extremas regionais, uma vez que interferem em toda a dinâmica dos ecossistemas e desenvolvimento das culturas.

Na cana-de-açúcar, a introdução em larga escala da colheita mecanizada da cana crua e o avanço do plano para eliminação das queimadas têm impulsionado muitos questionamentos quanto às adaptações a serem adotadas no manejo de solo para o plantio e manutenção de socas. Nesse sentido, em resposta às profundas transformações do sistema produtivo sucroenergético e ao apelo para produção maciça de biocombustíveis, a grande motivação de novos e antigos empreendedores passou a ser a rapidez de respostas aos novos apelos de mercado e, assim, alguns cuidados foram novamente negligenciados no processo. Dentre essas diligências, pode ser destacado o pouco ou ausente interesse à implantação de sistemas de preparo de solo mais conservacionistas, uso de adubação verde e reajuste do plano de adubação de áreas, fatores que foram investigados de forma integrada neste estudo.

Por várias décadas, poucos processos agronômicos de produção de cana-de-açúcar foram alterados, mesmo em regiões com maior desenvolvimento tecnológico, como o estado de São Paulo. Experiências bem-sucedidas em escala comercial mostram que outras estratégias agronômicas podem vantajosamente substituir o sistema convencional que predomina na agricultura canavieira. Parte da resistência à adoção de sistemas mais sustentáveis vem sendo quebrada e o interesse tem aumentado, uma vez que movimentos midiáticos voltados ao setor agropecuário vêm sendo desenvolvidos e os próprios profissionais da área vem se atentando às necessidades de reanálise do que convencionalmente é praticado para produção dos sistemas agrícolas, especialmente em áreas que não apresentam restrição significativa de fertilidade ou barreiras físicas. Nesse contexto, a adoção de práticas conservacionistas, como sulcação direta, reforma com plantas de sucessão

e adubação nitrogenada de soqueira, pode ser encarada de forma análoga a um sistema de seguro. Isso porque são em condições atípicas e de longo prazo que os efeitos benéficos de determinadas tomadas de decisão são evidenciados, garantindo um ambiente mais favorável para produção agrícola.

Em suma, o sistema de plantio direto encontra fundamentações em outras culturas para mostrar que sua introdução na cultura canavieira deve acontecer, mesmo que sejam necessárias adaptações específicas para essa cadeia e existam potenciais barreiras tecnológicas a serem melhoradas. Nesse contexto, os sistemas de controle de tráfego apresentam potencial de viabilidade técnica e econômica para permitir que esse sistema se torne uma realidade em larga escala comercial, juntamente com vantagens próprias em termos de redução de investimentos e custos operacionais. Além disso, deve ser considerada a longo prazo a contribuição da palhada advinda da colheita mecanizada, especialmente em questões físicas do solo e na ciclagem de nutrientes pela biomassa da cana, conforme a estabilização do sistema. A partir da junção dessas estratégias, é esperado diminuir a compactação do solo e aumentar capacidade de retenção de água, condições que favorecem a resiliência das socas e o maior número de colheitas da lavoura.

No presente estudo, é instigado o questionamento de aspectos relacionados a própria etimologia de conceitos. Afinal, é possível o desenvolvimento de um sistema de plantio direto para cana-de-açúcar? Como a cana-de-açúcar é uma cultura semi-perene, o primeiro exercício deve ser voltado para a divergências associadas as janelas de tempo para diversificação de culturas. As premissas básicas do sistema plantio direto para grãos são alicerçados no mínimo revolvimento, rotação de culturas e cobertura do solo. Para cana, duas premissas são atendidas pelo processo de sulcação direta, mesmo com maior mobilização do solo quando comparado às culturas anuais, e o alto aporte de biomassa de baixa relação C/N ao longo dos cortes. Considerando os seguidos ciclos de rebrota, a diversificação de espécies se torna o ponto mais desafiador para validação fidedigna do sistema tradicional de plantio direto. Com maior aplicabilidade para o setor, a sucessão de culturas já é uma proposta bem aceita entre os produtores no período de reforma dos canaviais, tanto em vista a alta rentabilidade da produção de grãos, como soja e amendoim, quanto ao próprio interesse pela diversificação dos negócios. Entretanto, um aspecto ainda pouco explorado recai sobre o uso de adubos verdes, um aspecto que deveria ser melhor avaliado considerando a longevidade dos benefícios oriundos dessa prática, como demonstrado neste estudo.

No primeiro capítulo deste trabalho, foi demonstrado que os parâmetros biométricos foram afetados diretamente pela sazonalidade climática e que as doses de N aumentaram a

biomassa seca e produtividade de colmos ao final de três soqueiras, com reposição de 100 % do N exportado. Não houve efeito do manejo de solo e sucessão de culturas para produtividade de colmos e açúcar da cana-planta, embora tenham sido identificados alguns efeitos em safras específicas subsequentes. Entretanto, ao final de três soqueiras, a sucessão de culturas afetou a produtividade de colmos e açúcar, com destaque para a *Crotalaria ochroleuca*, espécie que apresenta alta rusticidade e proporcionou maior aporte de biomassa no sistema. A adubação nitrogenada de soqueira aumentou de forma crescente os teores de Brix, Pol e ATR.

Já no segundo capítulo, a adubação nitrogenada demonstrou ser o fator mais determinante na dinâmica de acúmulo de nutrientes, apresentando algumas variações de acordo com o manejo de solo e cultura antecessora. A utilização de soja ou pousio como antecessores demonstrou ser a condição mais desfavorável para o acúmulo de N. A adubação nitrogenada garantiu maior acúmulo de P e macronutrientes secundários. Da mesma forma, a adubação nitrogenada proporcionou maior acúmulo de micronutrientes, mas alguns elementos foram prejudicados sob PD.

Por fim, no terceiro capítulo, as combinações associadas ao efeito de soqueira evidenciaram as diferenças existentes de acordo com a safra. Sob plantio direto, a sucessão com amendoim não foi benéfica comparado aos tratamentos com crotalária e das demais culturas antecessoras sob plantio convencional. De modo geral, o plantio direto favoreceu a disponibilidade de nutrientes no solo. Entretanto, a ausência de N desfavoreceu os benefícios desse sistema. A aplicação de N aumentou a disponibilidade de N-mineral no solo e a atividade da β -glucosidase nos dois tipos de manejo do solo. A atividade enzimática do solo foi alterada pela interação de fatores, especialmente para soqueira, cultura antecessora e adubação nitrogenada, o que reafirma a importância desses parâmetros para analisar os impactos de práticas agrícolas sobre a qualidade de solo.

A integração de estratégias agronômicas perfaz uma infinidade de reações biológicas, químicas e físicas no solo e, por isso, agrega um elevado nível de complexidade para os estudos com esse tipo de propósito. Ainda nessa ótica, as combinações do manejo não podem ser balizadas por meio de um somatório lógico, considerando que essas apresentam efeitos sinérgicos, neutros e antagônicos, de acordo com a relação harmônica das tomadas de decisão. Além disso, a variedade de áreas destinadas à produção de cana-de-açúcar ocasiona uma diversificação de possibilidades para condução da cultura e, mediante as circunstâncias de cada momento e localidade, é essencial a análise de cenário caso a caso para escolher as melhores adaptações a serem adotadas.

Os próximos passos desse estudo são direcionados a avaliação a longo prazo da longevidade dos sistemas sustentáveis, dessas ou de outras combinações de estratégias, de modo a esclarecer a nível mais macro e elucidar especialmente dúvidas relacionadas ao tempo de vida dos canais sob novas propostas de sistemas.

ANEXOS

ANEXO A. Descritivo do tratamento fitossanitário e adubações foliares empregadas na condução experimental.

Mês/Ano	Ciclo	Produto (Dose)	Categoria
12/2015	Amendoim	Plateau (124 a 145 g ha ⁻¹)	Herbicida
01/2016	Amendoim	Bioamino Extra (1 L ha ⁻¹) + Nodulus Gold (150 mL ha ⁻¹) + Belt (70 mL ha ⁻¹) + Spheremax (160 mL ha ⁻¹) + Brisa (2,2 kg ha ⁻¹) + Connect (800 mL ha ⁻¹) + PoliPlex (150 mL ha ⁻¹)	Fertilizante foliar + fertilizante foliar + inseticida + fungicida + fungicida + inseticida + adjuvante
01/2016	Soja	Roundup (4 L ha ⁻¹) + Dimilin (50 g ha ⁻¹) + Piretróide (500 mL ha ⁻¹)	Herbicida + inseticida + inseticida
01/2016	Amendoim	Nodulus Gold (150 mL ha ⁻¹) + Belt (70 mL ha ⁻¹) + Fox (300 mL ha ⁻¹) + Brisa (2,2 kg ha ⁻¹) + Evidence (200 g ha ⁻¹) + PoliPlex (150 mL ha ⁻¹)	Fertilizante foliar + inseticida + fungicida + fungicida + inseticida + adjuvante
01/2016	Soja	Dimilin (50 g ha ⁻¹) + Piretróide (500 mL ha ⁻¹) + L1 (500 mL ha ⁻¹)	Inseticida + inseticida + adjuvante
02/2016	Amendoim	Belt (70 mL ha ⁻¹) + Spheremax (160 mL ha ⁻¹) + Brisa (2,2 kg ha ⁻¹) + Comet (800 mL ha ⁻¹) + Cerrado (2 L ha ⁻¹) + PoliPlex (150 mL ha ⁻¹)	Inseticida + fungicida + fungicida + fungicida + fertilizante foliar + adjuvante
02/2016	Soja	Nodulus Gold (150 mL ha ⁻¹) + Nomolt (200 mL ha ⁻¹) + Fox (400 mL ha ⁻¹) + L1 (500 mL ha ⁻¹)	Fertilizante foliar + inseticida + fungicida + adjuvante
02/2016	Amendoim	Belt (70 mL ha ⁻¹) + Fox (300 mL ha ⁻¹) + Brisa (2,2 kg ha ⁻¹) + Evidence (200 g ha ⁻¹) + Cerrado (2 L ha ⁻¹) + PoliPlex (150 mL ha ⁻¹)	Inseticida + fungicida + fungicida + inseticida + fertilizante foliar + adjuvante
02/2016	Soja	Nomolt (200 mL ha ⁻¹) + Evidence (200 g ha ⁻¹) + Fox (400 mL ha ⁻¹) + L1 (500 mL ha ⁻¹)	Inseticida + inseticida + fungicida + adjuvante
05/2016	Cana-planta	Omex Mo (200 mL ha ⁻¹) + YaraVita Zintrac (830 mL ha ⁻¹) + YaraVita Bortrac (1 L ha ⁻¹) + Kingfol CuMnZn (500 mL ha ⁻¹)	Fertilizantes foliares
12/2016	Cana-planta	Mimic (300 mL ha ⁻¹) + [YaraVita Bortrac (800 mL ha ⁻¹) + YaraVita Zintrac (500 mL ha ⁻¹) + YaraVita Molytrac (150 mL ha ⁻¹) + YaraVita Mantrac (800 mL ha ⁻¹)]	Inseticida + [Fertilizantes foliares]
12/2017	1ª soqueira	Mimic (300 mL ha ⁻¹) + [YaraVita Bortrac (800 mL ha ⁻¹) + YaraVita Zintrac (500 mL ha ⁻¹) + YaraVita Molytrac (150 mL ha ⁻¹) + YaraVita Mantrac (800 mL ha ⁻¹)]	Inseticida + [Fertilizantes foliares]
12/2018	2ª soqueira	Belt (100 mL ha ⁻¹) + [Omex B (1 L ha ⁻¹) + Kingfol Zn (700 mL ha ⁻¹) + Kingfol CuMnZn (300 mL ha ⁻¹) + Omex Mo (100 mL ha ⁻¹)]	Inseticida + [Fertilizantes foliares]
12/2019	3ª soqueira	Belt (100 mL ha ⁻¹) + [Omex B (1 L ha ⁻¹) + Kingfol Zn (700 mL ha ⁻¹) + Kingfol CuMnZn (300 mL ha ⁻¹) + Omex Mo (100 mL ha ⁻¹)]	Inseticida + [Fertilizantes foliares]

ANEXO B. Análise de variância com os valores de P ($Pr > F$) da produtividade de colmos (TCH), produtividade de açúcar (TPH), perfilhamento, densidade de colmos, biomassa seca de folha seca + ponteiro [(FS+P)MS], biomassa seca de colmos (ColmoMS), teor de sólidos solúveis (Brix), teor de sacarose aparente da cana (PolCana) e açúcar total recuperável (ATR) para as três primeiras soqueiras.

Fator	TCH	TPH	Perfilhos	Densidade	(FS+P)MS	ColmoMS	Brix	PolCana	ATR
<i>p</i> S* (Soqueira)	0,146	0,107	0,000***	0,106	0,190	0,000***	0,009***	0,000***	0,000***
<i>p</i> M [#] (Manejo)	0,736	0,943	0,149	0,536	0,432	0,998	0,767	0,122	0,144
<i>p</i> A (Antecessora)	0,061*	0,102	0,028**	0,852	0,565	0,154	0,016**	0,110	0,158
<i>p</i> N (Nitrogênio)	0,000***	0,000***	0,000***	0,098*	0,007***	0,000***	0,034**	0,000***	0,000***
<i>p</i> M x A	0,248	0,302	0,562	0,837	0,928	0,121	0,069*	0,657	0,614
<i>p</i> A x N	0,570	0,613	0,146	0,005***	0,288	0,781	0,666	0,187	0,269
<i>p</i> M x N	0,857	0,847	0,375	0,448	0,556	0,698	0,767	0,740	0,842
<i>p</i> S x N	0,261	0,269	0,000***	0,693	0,290	0,351	0,599	0,551	0,421
<i>p</i> S x A	0,776	0,841	0,906	0,999	0,288	0,816	0,411	0,120	0,362
<i>p</i> M x A x N	0,385	0,290	0,305	0,114	0,062*	0,421	0,778	0,691	0,902
<i>p</i> S x A x N	0,343	0,397	0,649	0,444	0,206	0,224	0,272	0,010	0,015
<i>p</i> Shapiro-Wilk	0,515	0,816	0,072	0,405	0,536	0,754	0,361	0,542	0,107
Média geral	98,8 ± 20,7	16,9 ± 3,7	87,0 ± 23,4	12,1 ± 2,9	12,3 ± 2,8	30,8 ± 7,6	22,2 ± 1,0	17,2 ± 1,0	169,3 ± 9,0
CV (%)	21	22	27	24	23	25	4	6	5

S*: efeito aleatório; M[#]: efeito fixo, com aleatorização dependente; Shapiro-Wilk: teste de normalidade; CV: coeficiente de variação.

ANEXO C. Análise de variância com os valores de P ($Pr > F$) da produtividade de colmos (TCH) e produtividade de açúcar (TPH) para a cana-planta e as três soqueiras subsequentes.

Fator	Cana-planta		1ª Soqueira		2ª Soqueira		3ª Soqueira	
	TCH	TPH	TCH	TPH	TCH	TPH	TCH	TPH
<i>p</i> M (Manejo)	0,468	0,349	0,024**	0,012**	0,960	0,753	0,540	1,000
<i>p</i> A (Antecessora)	0,975	0,868	0,140	0,125	0,626	0,372	0,006***	0,010**
<i>p</i> N (Nitrogênio)	-	-	0,338	0,202	0,255	0,072*	0,000***	0,000***
<i>p</i> M x A	0,424	0,354	0,564	0,646	0,761	0,569	0,433	0,479
<i>p</i> A x N	-	-	0,147	0,131	0,410	0,455	0,759	0,777
<i>p</i> M x N	-	-	0,972	0,895	0,491	0,422	0,999	0,987
<i>p</i> M x A x N	-	-	0,226	0,180	0,317	0,293	0,033**	0,043**
<i>p</i> Shapiro-Wilk	0,463	0,902	0,086	0,208	0,953	0,996	0,304	0,358
Média	127,7 ± 19,8	20,2 ± 3,3	94,3 ± 20,1	15,6 ± 3,4	105,0 ± 19,5	17,4 ± 3,3	97,1 ± 21,1	17,7 ± 4,0
CV (%)	16,000	16,000	21,000	22,000	19,000	19,000	22,000	22,000

S*: efeito aleatório; M#: efeito fixo, com aleatorização dependente; Shapiro-Wilk: teste de normalidade; CV: coeficiente de variação.

ANEXO D. Análise de variância com os valores de P (Pr>F) do acúmulo de biomassa seca da parte aérea e produtividade de colmos (TCH) para as duas primeiras soqueiras (safras de 2018 e 2019).

Fator	Folha	Ponteiro	FS+P	Colmo	TCH	PA
<i>p</i> S* (Soqueira)	0,168	0,960	0,215	0,000	0,188	0,001
<i>p</i> M (Manejo)	0,036	0,284	0,023	0,456	0,306	0,143
<i>p</i> A (Antecessora)	0,511	0,789	0,400	0,892	0,726	0,706
<i>p</i> N (Nitrogênio)	0,000	0,485	0,003	0,003	0,009	0,002
<i>p</i> M x A	0,617	0,415	0,400	0,375	0,085	0,277
<i>p</i> A x N	0,750	0,713	0,700	0,773	0,811	0,729
<i>p</i> M x N	0,543	0,884	0,637	0,501	0,829	0,703
<i>p</i> S x N	0,171	0,904	0,334	0,687	0,431	0,561
<i>p</i> S x A	0,284	0,341	0,120	0,573	0,649	0,348
<i>p</i> M x A x N	0,332	0,336	0,352	0,676	0,342	0,574
<i>p</i> S x A x N	0,679	0,324	0,512	0,545	0,325	0,632
<i>p</i> Shapiro-Wilk	0,712	0,774	0,892	0,435	0,872	0,438
Média	8 ± 3	5 ± 1	12 ± 3	32 ± 7	97 ± 20	44 ± 10
CV	32	26	24	23	21	21

S*: efeito aleatório; M#: efeito fixo, com aleatorização dependente; FS+P: folha seca e ponteiro; TCH: produtividade de colmos; PA: parte aérea; Shapiro-Wilk: teste de normalidade; CV: coeficiente de variação.

ANEXO E. Análise de variância com os valores de P (Pr>F) do acúmulo de macronutrientes, boro, cobre e zinco na parte aérea de cana-de-açúcar para as duas primeiras soqueiras (safras de 2018 e 2019).

Fator	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Zn
<i>p</i> S* (Soqueira)	0,857	0,474	0,037**	0,947	0,101	0,337	0,270	0,020**	0,000***
<i>p</i> M [#] (Manejo)	0,906	0,874	0,010**	0,372	0,613	0,445	0,313	0,800	0,048**
<i>p</i> A (Antecessora)	0,207	0,748	0,271	0,800	0,514	0,247	0,638	0,531	0,111
<i>p</i> N (Nitrogênio)	0,076*	0,000***	0,000***	0,022**	0,001***	0,886	0,462	0,000***	0,000***
<i>p</i> M x A	0,185	0,589	0,027**	0,509	0,841	0,249	0,565	0,162	0,359
<i>p</i> A x N	0,508	0,248	0,237	0,500	0,298	0,394	0,431	0,766	0,179
<i>p</i> M x N	0,458	0,001***	0,614	0,263	0,530	0,002***	0,001***	0,000***	0,129
<i>p</i> S x N	0,000***	0,082*	0,134	0,025**	0,000***	0,291	0,000***	0,000***	0,000***
<i>p</i> S x A	0,905	0,209	0,104	0,550	0,536	0,211	0,654	0,536	0,093
<i>p</i> M x A x N	0,202	0,024**	0,710	0,255	0,552	0,264	0,907	0,824	0,155
<i>p</i> S x A x N	0,109	0,725	0,369	0,378	0,454	0,130	0,371	0,899	0,365
<i>p</i> Shapiro-Wilk	0,534	0,171	0,329	0,139	0,440	0,844	0,579	0,274	0,068
Média	84 ± 27	9 ± 3	189 ± 48	68 ± 20	26 ± 9	24 ± 13	410 ± 162	235 ± 152	2655 ± 1860
CV (%)	32	32	26	29	34	53	40	65	70

S*: efeito aleatório; M[#]: efeito fixo, com aleatorização dependente; Shapiro-Wilk: teste de normalidade; CV: coeficiente de variação.

ANEXO F. Análise de variância com os valores de P (Pr>F) do acúmulo de macronutrientes, boro, cobre e zinco no compartimento de folha seca e ponteiro de cana-de-açúcar para as duas primeiras soqueiras (safras de 2018 e 2019).

Fator	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Zn
<i>p</i> S* (Soqueira)	0,010**	0,004***	0,089	0,417	0,304	0,432	0,023**	0,000***	0,311
<i>p</i> M# (Manejo)	0,108	0,005***	0,011**	0,357	0,540	0,407	0,161	0,001***	0,160
<i>p</i> A (Antecessora)	0,545	0,292	0,791	0,889	0,658	0,753	0,684	0,424	0,604
<i>p</i> N (Nitrogênio)	0,082	0,122	0,355	0,101	0,005***	0,073*	0,001***	0,094*	0,001***
<i>p</i> M x A	0,476	0,125	0,047**	0,557	0,943	0,123	0,522	0,741	0,499
<i>p</i> A x N	0,814	0,710	0,320	0,563	0,091*	0,837	0,590	0,581	0,484
<i>p</i> M x N	0,867	0,086*	0,002***	0,026**	0,026**	0,157	0,864	0,528	0,519
<i>p</i> S x N	0,109	0,000***	0,775	0,004***	0,000***	0,405	0,240	0,772	0,003***
<i>p</i> S x A	0,379	0,115	0,085*	0,389	0,527	0,251	0,514	0,765	0,310
<i>p</i> M x A x N	0,049**	0,000***	0,424	0,270	0,304	0,600	0,262	0,613	0,670
<i>p</i> S x A x N	0,739	0,073*	0,687	0,646	0,188	0,545	0,959	0,868	0,908
<i>p</i> Shapiro-Wilk	0,686	0,318	0,608	0,162	0,482	0,127	0,266	0,684	0,715
Média	43 ± 13	4 ± 2	75 ± 19	46 ± 16	10 ± 4	10 ± 5	226 ± 76	83 ± 43	903 ± 392
CV (%)	30	43	25	34	35	50	34	52	43

S*: efeito aleatório; M#: efeito fixo, com aleatorização dependente; Shapiro-Wilk: teste de normalidade; CV: coeficiente de variação.

ANEXO G. Análise de variância com os valores de P (Pr>F) de atributos químicos do solo.

Fator	pH	H+Al	Al	S	P	MOS	Ca	Mg	K
Camada 0-20 cm									
<i>p</i> S* (Soqueira)	0,027**	0,000***	0,000***	0,000***	0,410	0,104	0,011**	0,000***	0,033**
<i>p</i> M (Manejo)	0,248	0,143	0,131	0,000***	0,003***	0,692	0,846	0,629	0,016**
<i>p</i> A (Antecessora)	0,873	0,474	0,869	0,003***	0,261	0,957	0,037**	0,495	0,894
<i>p</i> N (Nitrogênio)	0,000***	0,722	0,000***	0,059*	0,914	0,000***	0,000***	0,129	0,208
<i>p</i> M x A	0,511	0,028**	0,228	0,749	0,012**	0,524	0,505	0,513	0,143
<i>p</i> A x N	0,477	0,528	0,794	0,210	0,001***	0,160	0,348	0,106	0,068*
<i>p</i> M x N	0,135	0,114	0,001***	0,768	0,072*	0,236	0,002***	0,466	0,050***
<i>p</i> S x N	0,522	0,013**	0,000***	0,469	0,000***	0,000***	0,038**	0,122	0,268
<i>p</i> S x A	0,574	0,146	0,836	0,004***	0,883	0,501	0,102	0,298	0,389
<i>p</i> M x A x N	0,741	0,219	0,160	0,269	0,204	0,241	0,248	0,980	0,643
<i>p</i> S x A x N	0,850	0,172	0,032**	0,028**	0,022**	0,308	0,948	0,041**	0,567
<i>p</i> Shapiro-Wilk	0,97	0,34	0,29	0,56	0,48	0,46	0,12	0,10	0,18
CV	4	20	80	45	29	20	39	38	52
Camada 20-40 cm									
<i>p</i> S* (Soqueira)	0,000***	0,000***	0,000***	0,000***	0,410	0,104	0,011**	0,000***	0,033**
<i>p</i> M (Manejo)	0,244	0,143	0,131	0,000***	0,003***	0,692	0,846	0,629	0,016**
<i>p</i> A (Antecessora)	0,374	0,474	0,869	0,003***	0,261	0,957	0,037**	0,495	0,894
<i>p</i> N (Nitrogênio)	0,608	0,722	0,000***	0,059*	0,914	0,000***	0,000***	0,129	0,208
<i>p</i> M x A	0,262	0,028**	0,228	0,749	0,012**	0,524	0,505	0,513	0,143
<i>p</i> A x N	0,382	0,528	0,794	0,210	0,001***	0,160	0,348	0,106	0,068*
<i>p</i> M x N	0,548	0,114	0,001***	0,768	0,072*	0,236	0,002***	0,466	0,050**
<i>p</i> S x N	0,769	0,013**	0,000***	0,469	0,000***	0,000***	0,038**	0,122	0,268
<i>p</i> S x A	0,643	0,146	0,836	0,004***	0,883	0,501	0,102	0,298	0,389
<i>p</i> M x A x N	0,382	0,528	0,794	0,210	0,001***	0,160	0,348	0,106	0,068*
<i>p</i> S x A x N	0,548	0,114	0,001***	0,768	0,072*	0,236	0,002***	0,466	0,050**
<i>p</i> Shapiro-Wilk	0,43	0,34	0,29	0,56	0,48	0,46	0,12	0,10	0,18
CV	4	20	80	45	29	20	39	38	52

Nível de significância: *** 1%; ** 5%; *10. pH: pH em solução de CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹; C orgânico: carbono orgânico pela oxidação com dicromato de potássio; P, Ca, Mg e K: fósforo, cálcio, magnésio e potássio trocáveis com extração por resina trocadora de íons; S: sulfato extraível em solução de Ca(H₂PO₄)₂ 0,01 mol L⁻¹; Al: alumínio trocável em solução de KCl 1 mol L⁻¹; H + Al: acidez potencial com solução-tampão SMP em pH 7.

ANEXO H. Análise multivariada de variância com os valores de P ($Pr > F$) e variância explicada (%) dos fatores e suas interações para as primeiras duas variáveis canônicas relacionadas aos atributos químicos do solo, após a colheita da primeira (2017/2018) e segunda soqueira (2018/2019).

Fator	VC1		VC2		<i>p</i> Shapiro-Wilk
	<i>p</i> -valor	Variância explicada (%)	<i>p</i> -valor	Variância explicada (%)	
<i>p</i> S* (Soqueira)	0	100	-	-	0,000***
<i>p</i> M (Manejo)	0	100	-	-	0,000***
<i>p</i> A (Antecessora)	0,56	49	0,899	25	0,000***
<i>p</i> N (Nitrogênio)	0	100	-	-	0,000***
<i>p</i> M x A	0,001***	46	0,089*	21	0,456
<i>p</i> A x N	0,000***	80	0,092*	9	0,414
<i>p</i> M x N	0,000***	75	0,002***	24	0,167
<i>p</i> S x N	0,000***	97	0,000***	3	0,593
<i>p</i> S x A	0,000***	99	0,291	0	0,781
<i>p</i> M x A x N	0	60	0	15	0,008***
<i>p</i> S x A x N	0	91	0	6	0,002***

Nível de significância: *** 1%; ** 5%; *10%.

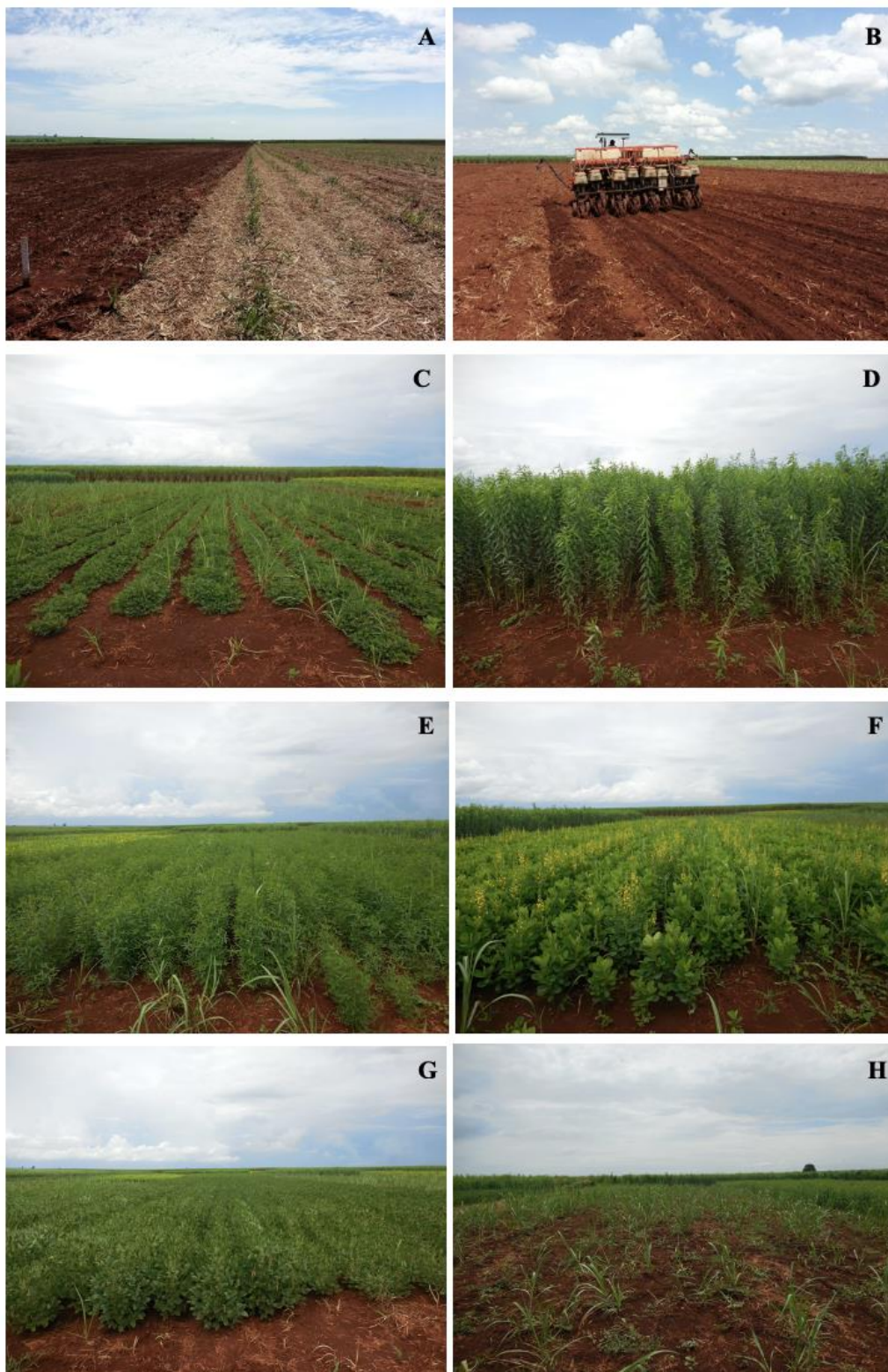
ANEXO I. Análise de variância com os valores de P ($Pr > F$) dos fatores e suas interações para atributos químicos e biológicos do solo, na estação chuvosa da segunda (2018/2019) e terceira soqueira (2019/2020).

Fator	Fosfatase ácida	β -glucosidase ⁽¹⁾	Amônio	Nitrato	N-mineral
<i>p</i> S* (Soqueira)	0,000***	0,000***	0,475	0,012**	0,110
<i>p</i> M (Manejo)	0,290	0,544	0,270	0,011**	0,259
<i>p</i> A (Antecessora)	0,406	0,003***	0,825	0,629	0,309
<i>p</i> N (Nitrogênio)	0,424	0,000***	0,014**	0,000***	0,020**
<i>p</i> M x A	0,050	0,139	0,607	0,540	0,244
<i>p</i> A x N	0,788	0,574	0,941	0,947	0,979
<i>p</i> M x N	0,285	0,035**	0,107	0,824	0,442
<i>p</i> S x N	0,000***	0,000***	0,248	0,016**	0,183
<i>p</i> S x A	0,748	0,016**	0,960	0,420	0,394
<i>p</i> M x A x N	0,143	0,541	0,929	0,737	0,735
<i>p</i> S x A x N	0,008***	0,131	0,482	0,717	0,998
<i>p</i> Shapiro-Wilk	0,45	0,24	0,19	0,62	0,94
CV	18	28	82	21	19

Nível de significância: *** 1%; ** 5%; *10%. ⁽¹⁾ Referente a dados transformados para \sqrt{x} .

APÊNDICES

APÊNDICE A. A. Preparo do solo e dessecação, em novembro de 2015; B. Plantio das culturas antecessoras, em dezembro de 2015; C. Amendoim D. *Crotalaria juncea*; E. *Crotalaria ochroleuca* F. *Crotalaria spectabilis*; G. Soja H. Pousio.



APÊNDICE B. A. Período de rotação de culturas, em abril de 2016; B. Cana-planta, em outubro de 2016; C. e D. 1ª soqueira, na safra de 2017/2018, em junho de 2018; E. e F. 2ª soqueira, na safra de 2018/2019, após a avaliação de parâmetros biométricos, em agosto de 2019; G. e H. 3ª soqueira, na safra de 2019/2020, em dezembro de 2019.

