

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP**

**CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**APLICAÇÃO DE VINHAÇA LOCALIZADA NA LINHA DA  
CANA-DE-AÇÚCAR CULTIVADA EM SOLO ARGILOSO E ARENOSO**

**Mariele Monique Honorato Fernandes  
Engenheira Agrônoma**

**2023**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP**

**CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**APLICAÇÃO DE VINHAÇA LOCALIZADA NA LINHA DA  
CANA-DE-AÇÚCAR CULTIVADA EM SOLO ARGILOSO E ARENOSO**

**Mariele Monique Honorato Fernandes**

**Orientadora: Dra. Carolina Fernandes**

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

**2023**

F363a Fernandes, Mariele Monique Honorato  
Aplicação de vinhaça localizada na linha da  
cana-de-açúcar cultivada em solo argiloso e arenoso  
/ Mariele Monique Honorato Fernandes. --  
Jaboticabal, 2023  
90 p. : tabs., fotos

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista  
(Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e  
Veterinárias, Jaboticabal

Orientadora: Carolina Fernandes

1. Agricultura. 2. Cana-de-açúcar. 3. Vinhaça. 4.

Física do solo. 5. Química do solo. I. Título.  
Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp.  
Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias,  
Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal




CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

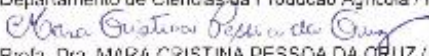
TÍTULO DA TESE: APLICAÇÃO DE VINHAÇA LOCALIZADA NA LINHA DA CANA-DE-AÇÚCAR CULTIVADA EM SOLO ARGILOSO E ARENOSO

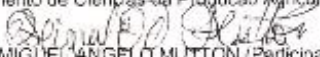
AUTORA: MARIELE MONIQUE HONORATO FERNANDES

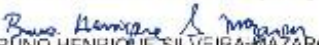
ORIENTADORA: CAROLINA FERNANDES

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em Agronomia (Produção Vegetal), pela Comissão Examinadora:

  
Prof. Dra. CAROLINA FERNANDES (Participação Presencial)  
Departamento de Ciências da Produção Agrícola / FCAV - UNESP - Jaboticabal

  
Prof. Dra. MARA CRISTINA PESSOA DA CRUZ (Participação Presencial)  
Departamento de Ciências da Produção Agrícola / FCAV - UNESP - Jaboticabal

  
Prof. Dr. MIGUEL ANGELO MUTTON (Participação Presencial)  
Departamento de Ciências da Produção Agrícola / FCAV / UNESP - Jaboticabal

  
Dr. BRUNO HENRIQUE SILVEIRA MAZARON (Participação Presencial)  
Grupo São Martinho S.A. / Pradópolis/SP

Prof. Dr. DANIEL PEREIRA PINHEIRO (Participação Presencial)  
Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA) / Capanema/PA



Documento assinado digitalmente  
DANIEL PEREIRA PINHEIRO  
Data: 02/04/2023 12:28:09-0300  
Verifique em: <https://revalida.ufpa.gov.br>

Jaboticabal, 03 de abril de 2023

## **DADOS CURRICULARES DA AUTORA**

**MARIELE MONIQUE HONORATO FERNANDES** – Nascida em 19 de janeiro de 1990, Porto Ferreira - São Paulo. Em março de 2010, ingressou no curso de Graduação em Agronomia na Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Campus Jaboticabal, e em janeiro de 2017 obteve o título de Engenheira Agrônoma. Durante a graduação realizou intercâmbio sanduíche na École Agrocampus Ouest na cidade de Rennes – França de agosto de 2013 a agosto de 2015. Em agosto de 2016, ingressou no mestrado em Agronomia (Ciência do Solo) da Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Campus Jaboticabal, com bolsa da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), e em 12 de dezembro de 2018 obteve o título de Mestre em Agronomia (Ciência do Solo). Em março de 2019, ingressou no doutorado em Agronomia (Produção Vegetal) da Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Campus Jaboticabal, com bolsa da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes). Em fevereiro de 2023 foi admitida como docente da Faculdade Associadas de Uberaba (FAZU) em Uberaba – Minas Gerais.

A paciência tudo alcança,  
Quem a Deus tem, nada lhe falta,  
Só Deus basta.

**Santa Teresa D'Ávila – Doutora da igreja**

“O correr da vida embrulha tudo,  
a vida é assim:  
esquenta e esfria,  
aperta e daí afrouxa,  
sossega e depois desinquieta.

O que ela quer da gente é coragem.”

**José Guimarães Rosa. Grande Sertão: Veredas.**

## DEDICO

Aos meus pais, **Mário Fernandes** (*in memoriam*) e **Fatima Aparecida Honorato Fernandes**, e às minhas irmãs **Carina Kelly Honorato Fernandes** e **landra Marcela Honorato Fernandes**, por todo amor, fé e confiança a mim transmitidos, pelo incentivo e pelos esforços dedicados todos esses anos da minha formação, por serem meu porto seguro. Obrigada por tanto e por tudo. A vocês o meu amor e mais sinceros agradecimentos por toda minha vida.

## **OFEREÇO**

A todas as pessoas que acreditaram e acreditam na ciência, e que, por meio de suas pesquisas e comprometimento com seus trabalhos, transformam a sociedade. Ofereço também, em especial, às mulheres que quiseram seguir a carreira científica e por muitos motivos, principalmente sociais e econômicos, não puderam. E por fim, ofereço às mulheres cientistas que me precederam, que com muita inteligência, coragem, perseverança e resiliência abriram as portas e aplainaram os caminhos para que hoje as mulheres possam fazer parte do meio científico e possam alcançar a maior titulação oferecida a um cientista. A todas essas mulheres minha eterna gratidão.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida e por sua graça e misericórdia que sempre me sustentaram e conduziram. E a Maria Santíssima, por interceder a seu filho, Amado Jesus, em todas as minhas preces e pelo seu cuidado e amor de mãe.

Aos meus pais Mário Fernandes (*in memoriam*) e Fatima Aparecida Honorato Fernandes, e às minhas irmãs Carina Kelly Honorato Fernandes e Iandra Marcela Honorato Fernandes, por tudo que fizeram para que eu alcançasse meus sonhos e objetivos relacionados a minha formação acadêmica, e por todo amor, suporte e confiança transmitidos.

Ao Mateus Borges Asmus por todo amor, suporte e incentivo.

A toda minha família, pelo suporte, incentivo, amor e orações.

À minha orientadora, Carolina Fernandes, por todos os seus ensinamentos, pelo seu exemplo de profissionalismo, por todo seu suporte, atenção e amizade.

À minha querida amiga Amanda Manduca Rosa da Silva por sua preciosa e sincera amizade, por sua mão sempre estendida e por todo seu cuidado e amor. Ao meu amigo Matheus Flavio da Silva, por suas orações, amizade sincera e apoio em todos os momentos.

Ao meu amigo Anderson Prates Coelho pela grande ajuda nas análises estatísticas e por sua amizade.

Aos meus amigos, por tornarem minha caminhada mais leve, pelo amor e apoio transmitidos.

Aos membros da banca do exame geral de qualificação, Dra. Mara Cristina Pessôa da Cruz e Dr. Adolfo Valente Marcelo, por suas valiosas contribuições.

Aos membros da banca examinadora, Dra. Mara Cristina Pessôa da Cruz, Dr. Miguel Angelo Mutton, Dr. Bruno Henrique Silveira Mazaron e Dr. Daniel Pereira Pinheiro, por suas valiosas contribuições.

À FCAV, representada por seus professores, servidores que tanto contribuíram para o meu crescimento pessoal e amadurecimento profissional. Em especial a Claudia, Adauto e Mauro, servidores do Departamento de Ciências da Produção Agrícola, setor Ciência do Solo, pela amizade e no suporte nas análises de laboratório.

Ao Francisco, servidor da Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão, pela preciosa ajuda na coleta das amostras de solo.

À São Martinho, pela parceria e por ceder as áreas para o desenvolvimento deste trabalho. Ao Bruno Mazaron, por ser o elo entre a usina e a Unesp e por toda a equipe de campo da Usina Santa Cruz, que tanto nos ajudou na coleta das amostras de solo.

E finalmente, a todas as pessoas que encontrei durante minha trajetória acadêmica, que deixaram algo de bom na minha vida e que contribuíram para minha formação e realização deste trabalho, minha sincera gratidão.

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

## SUMÁRIO

RESUMO.....	ii
ABSTRACT.....	iii
1 INTRODUÇÃO .....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA .....	4
2.1 Cana-de-açúcar: mudanças e evoluções.....	4
2.2 Vinhaça: da indústria ao campo.....	7
2.3 Aplicação de vinhaça e seus efeitos no solo .....	8
3 MATERIAL E MÉTODOS .....	14
3.1 Descrição das áreas experimentais e dos tratamentos .....	14
3.2 Condução do experimento.....	16
3.3 Amostragem do solo e avaliações dos atributos do solo .....	18
3.4 Avaliação da produtividade da cana-de-açúcar e do açúcar total recuperável (ATR).....	20
3.5 Análise estatística.....	20
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	21
4.1 Atributos químicos .....	21
4.2 Agregação do solo.....	35
4.3 Porosidade do solo.....	52
4.4 Açúcar total recuperável (ATR) e Produtividade da cana-de-açúcar .....	64
5 CONCLUSÃO .....	70
REFERÊNCIAS.....	71

## APLICAÇÃO DE VINHAÇA LOCALIZADA NA LINHA DA CANA-DE-AÇÚCAR CULTIVADA EM SOLO ARGILOSO E ARENOSO

**RESUMO:** O consumo de biocombustíveis, como o etanol derivado de plantas como a cana-de-açúcar, está consolidado devido à crescente demanda global em reduzir o consumo de combustíveis fósseis. Neste cenário, o Brasil ocupa posição de destaque por ser o segundo maior produtor de etanol, derivado da cana-de-açúcar, do mundo. No entanto, o crescente aumento na produção de etanol reflete também em maior geração de subprodutos da indústria sucroenergética, como a vinhaça. No Brasil, a principal utilização da vinhaça é a aplicação em canaviais por fertirrigação em área total. Contudo, com este estudo a proposta foi avaliar a possibilidade de aplicação da vinhaça localizada na linha de cultivo da cana-de-açúcar. Assim, objetivou-se avaliar a contribuição da aplicação de vinhaça nos atributos físicos e químicos de solos de textura argilosa e arenosa cultivados com cana-de-açúcar, comparando os efeitos dos métodos de aplicação da vinhaça sobre i-) os atributos do solo e ii-) no açúcar total recuperável e na produtividade da cana-de-açúcar. O estudo foi realizado em duas áreas localizadas no Estado de São Paulo, Brasil, uma com solo de textura argilosa (350 g kg<sup>-1</sup> de areia, 120 g kg<sup>-1</sup> de silte e 530 g kg<sup>-1</sup> de argila) e outra com solo de textura arenosa (850 g kg<sup>-1</sup> de areia, 40 g kg<sup>-1</sup> de silte e 110 g kg<sup>-1</sup> de argila). Nas duas áreas foram instalados os tratamentos: sem aplicação de vinhaça; aplicação de vinhaça em área total por aspersão e aplicação de vinhaça localizada na linha da cultura. Foram coletadas amostras de solo em dez pontos, em cada tratamento, nas camadas 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m para a avaliação dos atributos físicos e químicos do solo. Também foram avaliados o açúcar total recuperável e a produtividade de colmos da cana-de-açúcar. Os dados foram submetidos à análise estatística utilizando o modelo linear generalizado (GLM) ao nível de 5% de probabilidade e quando os efeitos simples, bem como a interação entre eles, foram significativos, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Os atributos do solo argiloso que foram responsivos a aplicação localizada da vinhaça foram estabilidade dos agregados do solo, macroporosidade, densidade do solo sobretudo na camada de 0,00-0,10 m do solo e teor de potássio na camada 0,10-0,20 m. Para o solo arenoso, a vinhaça aplicada pelo método localizado foi efetiva na formação dos agregados do solo e na estabilidade dos agregados na camada 0,00-0,10 m do solo e na capacidade de troca de cátions nas duas camadas do solo avaliadas. A aplicação de vinhaça não resultou em aumento de produtividade e de açúcar total recuperável da cana-de-açúcar cultivada em solo argiloso. No solo arenoso, a aplicação localizada de vinhaça proporcionou maior valor de produtividade de cana-de-açúcar, mas não resultou em maior valor de açúcar total recuperável. Os resultados das avaliações dos atributos físicos e químicos do solo, do açúcar total recuperável e da produtividade da cana-de-açúcar que ocorreram até a primeira colheita, confirmaram que o método de aplicação localizada de vinhaça pode substituir o método de aplicação de vinhaça em área total em solo de textura argilosa e arenosa.

**PALAVRAS-CHAVE:** método de aplicação, agregação do solo, porosidade do solo, fertilidade do solo

## APPLICATION OF VINASSE LOCATED ON THE SUGARCANE LINE CULTIVATED IN CLAY AND SANDY SOIL

**ABSTRACT:** The consumption of biofuels, such as ethanol derived from plants such as sugarcane, is consolidated due to the growing global demand to reduce the consumption of fossil fuels. In this scenario, Brazil stands out for being the second largest producer of ethanol, derived from sugarcane, in the world. However, the growing increase in ethanol production is also reflected in a greater generation of by-products from the sugar-energy industry, such as vinasse. In Brazil, the main use of vinasse is the application in sugarcane fields by fertirrigation in a total area, however, this study aimed to evaluate the possibility of applying vinasse located in the sugarcane cultivation line. Thus, the objective was to evaluate the contribution of vinasse application on the physical and chemical attributes of soils with clayey and sandy texture cultivated with sugarcane, comparing the effects of vinasse application methods on i-) soil attributes and ii-) in total recoverable sugar and in sugarcane productivity. The study was carried out in two areas located in the state of São Paulo, Brazil, one with clayey soil (350 g kg<sup>-1</sup> of sand, 120 g kg<sup>-1</sup> of silt and 530 g kg<sup>-1</sup> of clay) and the other area with sandy soil texture (850 g kg<sup>-1</sup> of sand, 40 g kg<sup>-1</sup> of silt and 110 g kg<sup>-1</sup> of clay). Treatments were installed in both areas: without vinasse application; vinasse application in the total area by sprinkling and application of vinasse located in the crop row. Soil samples were collected in ten points, in each treatment, in the layers 0.00-0.10 m and 0.10-0.20 m for the evaluation of the physical and chemical attributes of the soil. Total recoverable sugar and sugarcane stalk productivity were also evaluated at each point of each treatment. The data were submitted to statistical analysis using the generalized linear model (GLM) at the 5% probability level and when the simple effects, as well as the interaction between them, were significant, the means were compared using the Tukey test at the 5% probability level. Clay soil attributes that were responsive to localized vinasse application were soil aggregate stability, macroporosity, soil bulk density, especially in the 0.00-0.10 m layer of the soil, and potassium content in the 0.10- 0.20 m. For the sandy soil, the vinasse applied by the localized method was effective in the formation of soil aggregates and in the stability of the aggregates in the 0.00-0.10 m layer of the soil and in the cation exchange capacity in the two evaluated soil layers. Vinasse application did not increase productivity and total recoverable sugar in sugarcane cultivated in clayey soil. In sandy soil, localized application of vinasse provided higher sugarcane productivity, but did not result in higher total recoverable sugar from sugarcane. The results of the evaluations of the physical and chemical attributes of the soil, the total recoverable sugar and the sugarcane productivity that occurred until the first harvest, confirmed that the method of localized application of vinasse can replace the method of application of vinasse in total area in clayey and sandy texture soil.

**KEYWORDS:** application method, soil aggregation, soil porosity, soil fertility

## 1 INTRODUÇÃO

O consumo de biocombustíveis, como o etanol derivado de plantas como a beterraba e a cana-de-açúcar, está consolidado devido à crescente demanda global em reduzir o consumo de combustíveis fósseis e pela necessidade da mitigação dos gases do efeito estufa, estratégia que faz parte dos objetivos de desenvolvimento sustentável da ONU (ONU, 2022). O Brasil é o segundo maior produtor de etanol do mundo, responsável por 27% da produção mundial (RFA, 2022). O Estado de São Paulo é o maior produtor de cana-de-açúcar do Brasil, com produção estimada de 283.406,8 mil toneladas e 3.986,4 mil hectares de área cultivada, representando 49% da área total brasileira, com produção estimada de mais de 10 bilhões de litros de etanol na safra 2022/2023 (CONAB, 2022).

O crescente aumento na produção de etanol reflete também em maior geração de subprodutos da indústria sucroenergética, como a vinhaça, que é um líquido derivado da destilação do vinho resultante da fermentação do caldo da cana-de-açúcar. Para cada litro de etanol produzido são gerados de 10 a 15 litros de vinhaça, dependendo da natureza da matéria-prima processada e da eficiência industrial. À medida que o setor sucroenergético produz volume considerável de vinhaça, também utiliza o subproduto em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. No Brasil, o principal uso da vinhaça é sua aplicação em canaviais por fertirrigação, devido ao seu teor de nutrientes (Moore et al., 2017) sobretudo o potássio (Prado et al., 2013).

Melhorias na qualidade do solo em decorrência do uso desse subproduto dependem de fatores como a composição e o volume de vinhaça aplicado, a classe e as propriedades químicas e físicas do solo, o relevo e a cultura (Christofolletti et al., 2013). Segundo a norma técnica P4.231 em uso no Estado de São Paulo (CETESB, 2015), as doses de vinhaça devem ser aplicadas de modo a impedir doses excessivas de potássio no solo, acúmulo superficial de vinhaça e ocorrência de processos erosivos.

De acordo com Cherubin et al. (2016), para obter segurança energética de longo prazo, os sistemas de bioenergia precisarão ser agronomicamente e ambientalmente sustentáveis. Por esse motivo, a aplicação de vinhaça é uma prática que deve ser monitorada sobretudo em relação ao seu impacto no solo, uma vez que

tem implicações nos atributos físicos, químicos e biológicos (Christofoletti et al., 2013; Cardin et al., 2016; Hoarau et al., 2018; Cardoso et al., 2021), e conseqüentemente na qualidade do solo e na produtividade da cana-de-açúcar.

Assim como para qualquer resíduo ou subproduto, a aplicação da vinhaça no solo tem efeitos diferentes de acordo com cada classe de solo, já que o teor de argila, o valor de pH, teores de matéria orgânica e a aeração atuam como fatores ambientais no processo de decomposição (Possignolo-Vitti et al., 2017) e são variáveis de acordo com a textura do solo. Portanto, torna-se importante avaliar o impacto da aplicação da vinhaça em solos de diferentes classes texturais para a geração de informação e recomendação específica para cada classe de solo e, assim, proporcionar benefícios para a qualidade do solo com a utilização do subproduto.

A aplicação da vinhaça em área total nos canaviais é um dos principais sistemas de gestão industrial utilizados (Hoarau et al. 2018), e no Brasil a aplicação normalmente ocorre via aspersão em todo o canavial em áreas adjacentes a usina. Contudo, o que este estudo propõe é a investigação de um novo método de aplicação, pois assim como outras práticas agrícolas, o método de aplicação pode ser aprimorado.

Neste sentido, este estudo se propôs avaliar a possibilidade de aplicação da vinhaça localizada na linha de cultivo da cana-de-açúcar. Dentre os possíveis ganhos com a aplicação localizada da vinhaça estão o menor volume aplicado, e com isso a viabilidade de aplicar esse subproduto em solos de áreas mais distantes da usina que nunca receberam o subproduto. Com essa prática evita-se que o solo de áreas próximas a usina fique saturado de potássio devido ao excesso de aplicações de vinhaça, e evita-se a aplicação em áreas com o lençol freático mais aflorado, e por isso, mais susceptíveis à contaminação por lixiviação de nutrientes presentes na vinhaça (Cherubin et al., 2021). A vinhaça é um subproduto que contém nutrientes em sua composição, tornando-se um veículo de fertilizantes que serão depositados na linha de cultivo. Ressalta-se também que com esse método de aplicação ainda é necessário a construção de lagoas impermeabilizadas, mas os canais, o uso de canhões de aspersão, tubulações e bombas são dispensados.

A aplicação de vinhaça localizada é um método que já está sendo utilizado em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. Contudo, pouco se conhece sobre os efeitos

nos atributos do solo e na produtividade da cana-de-açúcar quando comparado com a aplicação em área total, por se tratar de um método que utiliza uma dose menor de vinhaça e que é aplicado diretamente na linha de cultivo, diferentemente da aplicação em área total. Por esse motivo, é necessário avaliar e comparar os dois métodos de aplicação de vinhaça nos atributos do solo e na produtividade da cana-de-açúcar para auxiliar na tomada de decisão e na sustentabilidade do sistema de produção de cana-de-açúcar.

Assim, a hipótese deste trabalho é que a aplicação localizada de vinhaça na linha da cana-de-açúcar é um método que pode substituir a aplicação de vinhaça em área total em solos com classes texturais distintas cultivados com cana-de-açúcar. Portanto, o objetivo foi avaliar a contribuição da aplicação de vinhaça nos atributos físicos e químicos de solos de textura argilosa e arenosa cultivados com cana-de-açúcar, comparando os efeitos dos métodos de aplicação da vinhaça sobre i-) os atributos do solo e ii-) o açúcar total recuperável e a produtividade da cana-de-açúcar.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Cana-de-açúcar: mudanças e evoluções

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) é uma gramínea C4 altamente produtiva e utilizada como principal fonte para a produção de açúcar e etanol, que é reconhecido mundialmente como uma fonte de energia limpa e renovável (Altpeter e Oraby, 2010; Oliveira Filho et al., 2021). A cana-de-açúcar foi considerada por muitos anos a cultura mais importante para a economia brasileira, e ainda continua tendo papel de destaque no setor econômico do País, uma vez que o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar (Santos et al., 2020; IEA, 2022).

Para a safra 2022/2023 estima-se 8.127,7 mil hectares de área cultivada com cana-de-açúcar destinada ao setor sucroenergético, com produção de 572.874,9 mil toneladas de cana-de-açúcar que será destinada a produção de etanol e açúcar, com estimativa de 25,83 bilhões de litros de etanol e 33.893,3 mil toneladas de açúcar (CONAB, 2022). Para o Estado de São Paulo, maior produtor nacional, a área cultivada será de 3.986,4 mil hectares, representando 49% da área total brasileira (CONAB, 2022).

O cultivo da cana-de-açúcar e o setor sucroenergético passaram por muitas mudanças e evoluções ao longo dos anos. Entre as mudanças que colaboraram para a evolução e o avanço do cultivo de cana no Brasil estão as pesquisas no desenvolvimento, seleção de variedades de cana e no melhoramento genético, com o objetivo de alcançar alta produtividade, resistência a pragas e doenças e para que a cultura se adaptasse a fatores abióticos (Cursi et al., 2022).

Houve também mudanças e evolução no plantio e na colheita da cana que passaram de manuais para processos mecanizados, além da utilização nos canaviais de subprodutos derivados dos processos industriais na geração de açúcar e etanol. O conjunto dessas mudanças e evoluções no setor sucroenergético, juntamente com condições edafoclimáticas favoráveis para o cultivo da cana-de-açúcar, foram fundamentais para que o Brasil se tornasse o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo. Nesta revisão de literatura será abordado como a adoção de algumas práticas impactaram não somente a produtividade da cana como também a qualidade do solo.

O processo de colheita passou por mudanças em relação a queima na pré-colheita, que por décadas foi uma prática muito difundida para eliminar as folhas e facilitar a colheita manual (Santos et al., 2020). No entanto, essa prática se mostrou negativa devido aos impactos ambientais e sociais, causados pelo aumento na emissão de gases como dióxido de carbono, metano, óxido nitroso e, também, por ocasionar efeitos negativos na qualidade do solo (Santos et al., 2020). Diante dos impactos negativos causados pelas queimadas nos canaviais, em 19 de setembro de 2002 foi outorgada a lei nº 11.241 no Estado de São Paulo, proibindo gradativamente a queima da cultura da cana-de-açúcar na pré-colheita (Ribeiro e Ficarelli, 2010).

A prática da queima na pré-colheita diminui a quantidade de resíduo vegetal depositado sobre o solo, ocasionando assim menor ciclagem de nutrientes (Santos et al., 2020), menor aporte de matéria orgânica no solo, impactando negativamente a estrutura do solo. Contudo, essa prática tem sido substituída pela colheita mecanizada em todo o Brasil, com aumento de 24,4% em 2007/2008 para 88,4% em 2019/2020 (Cursi et al., 2022).

Na colheita mecanizada a palhada da cana-de-açúcar é depositada na superfície do solo. A palhada e o sistema radicular da cana são fontes importantes de matéria orgânica para o solo e, conseqüentemente, são as principais entradas de carbono orgânico nos canaviais (Carvalho et al., 2013). Na palhada estão todos os nutrientes de plantas (Menandro et al., 2017) e compostos como celulose, hemicelulose e lignina (Pimentel et al., 2019). A celulose e a hemicelulose, juntamente com açúcares e proteínas, são facilmente decomponíveis pelos microrganismos do solo. Deste modo, grandes quantidades de palha fornecem maior quantidade de carbono e energia para os microrganismos do solo, resultando em maior abundância e atividade microbiana (Pimentel et al., 2019). A lignina faz parte de estruturas complexas da palhada, não sendo facilmente degradada pelos microrganismos, o que contribui para a formação e estabilização da matéria orgânica, refletindo na qualidade do solo (Pimentel et al., 2019).

A palhada, por ser constituída de compostos que são fonte de carbono e energia para os microrganismos do solo, tem importância fundamental para a agregação do solo. Observa-se que a palhada tem função indireta na agregação do solo, pois a sua presença no solo estimula a atividade dos microrganismos que, por

sua vez, liberam compostos extracelulares contribuindo de forma direta na união e estabilidade dos agregados do solo.

Como observado, a mudança no processo de colheita da cana ocasionou mudanças importantes para a qualidade do solo, em relação ao aporte de matéria orgânica. Contudo, o aporte de matéria orgânica no solo provém de diferentes fontes orgânicas, seja pela deposição de resíduos orgânicos vegetais na superfície do solo, como pela adição de subprodutos, como a vinhaça. Neste sentido, outra importante mudança no cenário canavieiro que trouxe significativas contribuições para a qualidade do solo foi a fertirrigação dos canaviais com vinhaça.

Com a criação do Programa Nacional do Álcool (PROÁLCOOL) pelo governo brasileiro na década de 70, durante a crise do petróleo, houve expansão do setor sucroenergético para a produção de etanol como fonte de energia alternativa aos derivados do petróleo (Casarini et al., 1987; Christofolletti et al., 2013). Por consequência do aumento na produção de etanol houve aumento na produção de vinhaça que, a princípio, foi descartada em rios, causando sérios problemas de poluição, como a desoxigenação e a perda de vida aquática. Por esse motivo, em 1978 foi implementada uma lei federal: “Proibido lançamento de vinhoto nos rios” (Casarini et al., 1987). A fim de encontrar soluções para o uso da vinhaça, após anos de pesquisa, os cientistas descobriram a importância da vinhaça como fertilizante rico em potássio e, como alternativa, passou-se a aplicá-la nos canaviais (Casarini et al., 1987; Demattê et al., 2004a).

Houve e ainda há avanço nas pesquisas a fim de encontrar alternativas para o uso da vinhaça de cana-de-açúcar. Dentre as alternativas estão a aerobiose, reciclagem na fermentação, combustão da vinhaça, produção de leveduras, construção civil, produção de ração animal, digestão anaeróbia, incineração, fertirrigação, entre outras (Robertiello, 1982; Laime et al., 2011; Christofolletti et al., 2013). Contudo, no Brasil, a vinhaça é utilizada principalmente em canaviais por fertirrigação devido à sua composição de nutrientes (Moore et al., 2017), sobretudo o potássio.

## 2.2 Vinhaça: da indústria ao campo

A vinhaça, também chamada de vinhoto, restilo, caldo ou garapão (Laime et al., 2011), é considerada um subproduto e é obtida a partir de sólidos solúveis de diferentes matérias-primas vegetais como cana-de-açúcar, beterraba, sorgo sacarino, uva e agave (Parsaee et al., 2019). As propriedades, composição e quantidade de vinhaça produzida depende, principalmente, das matérias-primas e do processo de produção do álcool (Parsaee et al., 2019). O objeto de estudo do presente trabalho é a vinhaça gerada a partir da cana-de-açúcar.

A cana-de-açúcar colhida é transportada para as usinas de açúcar e álcool onde passa pelo processo de moagem para a extração do caldo. O caldo extraído segue para os tanques de clarificação e depois de clarificado segue para os tanques de fermentação. Após a fermentação, o vinho extraído segue para os tanques de destilação, nos quais após a destilação, é gerado o etanol e, como subproduto desse processo, a vinhaça. No processo industrial para a geração de etanol são gerados de 10 a 15 litros de vinhaça por litro de etanol produzido (Silva et al., 2013).

Apesar de haver variações em sua composição, a vinhaça é composta por cerca de 93% de água e 7% de sólidos e dessa porção sólida 75% corresponde a matéria orgânica (Pazuch et al., 2017). A vinhaça possui coloração escura, pH baixo, alta condutividade elétrica, alta demanda química por oxigênio, quantidade considerável de matéria orgânica e composição variável de íons ( $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  e  $SO_4^{2-}$ ) (Moran-Salazar et al., 2016; Ortegón et al., 2016). O potássio é o elemento mineral mais importante para o aproveitamento agrícola da vinhaça, contribuindo assim, para a redução do uso de fertilizantes inorgânicos de potássio (Prado et al., 2013).

Devido a sua composição variável, a vinhaça é classificada como efluente complexo, pois tanto efeitos positivos quanto negativos já foram observados com a irrigação sob certas condições (Moran-Salazar et al., 2016).

Quando aplicada ao solo a vinhaça não deve exceder a capacidade de retenção de íons do solo. Neste sentido, as doses devem ser determinadas de acordo com os atributos de cada solo (Christofolletti et al., 2013). A Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) é a agência responsável pela fiscalização e criação de

normas para fertirrigação da vinhaça nos canaviais no Estado de São Paulo. Segundo a norma técnica P4.231 (CETESB, 2015), que descreve os critérios e procedimentos para a aplicação de vinhaça no solo, as doses de vinhaça devem ser calculadas em função da necessidade potássica da cultura, das concentrações desse nutriente no solo e na vinhaça, a fim de impedir o excesso de potássio no solo, acúmulo superficial de vinhaça e ocorrência de processos erosivos.

A aplicação de vinhaça é conhecida como fertirrigação, pois o subproduto é utilizado como fertilizante, podendo substituir parte da adubação mineral (Poveda, 2014). A fertirrigação pode ocorrer por meio de diferentes métodos, contudo o mais comum é armazenar a vinhaça em lagoas a céu aberto e o seu transporte para o canal ocorre por meio de canais, dutos, caminhões-tanque e rodotrem (Poveda, 2014).

Muito difundida, a fertirrigação por aspersão pode ocorrer por meio de sistema de montagem direta ou carretel enrolador (Poveda, 2014). A aspersão com montagem direta consiste em um conjunto motobomba com um aspersor tipo canhão-hidráulico, montado em chassi com rodas aspergindo vinhaça sugada diretamente de um canal (Poveda, 2014). No sistema de carretel enrolador também se utiliza uma motobomba que alimenta as tubulações nas quais são acoplados estes equipamentos, e possui um aspersor tipo canhão montado em um pequeno chassi com rodas que se desloca continuamente puxado pela própria mangueira ao ser enrolado no carretel (Poveda, 2014).

Em contrapartida, o novo método que este estudo se propôs a estudar, a aplicação localizada de vinhaça na linha de cultivo da cana-de-açúcar, utiliza um conjunto trator e tanque abastecido com vinhaça, em que o trator traciona o tanque que possui uma barra com saídas direcionadas nas linhas de cultivo. As doses são reguladas e a vinhaça é distribuída de forma homogênea.

### **2.3 Aplicação de vinhaça e seus efeitos no solo**

A estrutura do solo é um fator chave no funcionamento do solo, na sua capacidade de suportar a vida vegetal e animal e a qualidade ambiental, com ênfase

particular no sequestro de carbono do solo e na qualidade da água (Bronick e Lal, 2005). Segundo os autores, a estrutura favorável do solo e a alta estabilidade dos agregados são importantes para melhorar a fertilidade do solo, aumentar a produtividade agrônômica, aumentar a porosidade e diminuir a erodibilidade do solo. O declínio da estrutura do solo está frequentemente relacionado com o uso da terra e com práticas de manejo do solo/cultura (Bronick e Lal, 2005). Por esse motivo, é necessário adotar práticas de manejo que aumentem os teores de matéria orgânica do solo, contribuindo para a melhor estruturação do solo.

Nas áreas cultivadas com cana-de-açúcar a manutenção da palhada sobre o solo após a colheita e a utilização de fertilizantes orgânicos, como a vinhaça, são práticas importantes para aumentar os teores de matéria orgânica e a ciclagem de nutrientes do solo das áreas cultivadas (Oliveira Filho et al., 2017; Oliveira Filho et al., 2021). A aplicação da vinhaça em área total nos canaviais é um dos principais sistemas de gestão industrial utilizados (Hoarau et al., 2018), e no Brasil a aplicação normalmente ocorre via aspersão em todo o canavial em áreas adjacentes a usina. A vinhaça aplicada em área total já foi objeto de muitos estudos, sobretudo no que diz respeito aos seus efeitos nos atributos físicos e químicos, e na produtividade da cana-de-açúcar.

Os benefícios da aplicação de vinhaça para o solo em curto prazo são resultado direto do aporte de matéria orgânica, que incluem aumento do potencial do solo em reter água, melhoria na estrutura física dos agregados do solo e aumento na atividade microbiana (Fuess e Garcia 2014). A respeito dos efeitos da aplicação de vinhaça nos atributos químicos, ou seja, na fertilidade do solo, esta pode aumentar ou diminuir com a aplicação de vinhaça, dependendo do tipo e das taxas de aplicação, composição química, características do relevo, tipo de solo, tipo de cultura e condições climáticas (Moran-Salazar et al., 2016).

Hoarau et al. (2018) em uma revisão avaliaram os avanços no conhecimento sobre tratamento e uso da vinhaça relatados na literatura nos últimos vinte anos. Os autores relataram que a matéria orgânica que faz parte da composição da vinhaça afeta diretamente a comunidade microbiana do solo e afeta indiretamente os atributos físicos do solo. O maior teor de carbono orgânico pode estimular a atividade

microbiana e a secreção de polissacarídeos refletindo na formação de agregados maiores e na maior estabilização dos agregados do solo (Hoarau et al., 2018).

Gravina et al. (2021) avaliaram atributos físicos do solo sob cultivo de cana-de-açúcar fertirrigada com vinhaça em cinco áreas, cada uma com seu respectivo ciclo de cultivo, sendo um, três, cinco, sete e doze anos em comparação com uma área sob vegetação nativa do Cerrado, em solo classificado como Latossolo Vermelho acriférico típico. O solo da área sob doze anos de cultivo apresentou maior porcentagem de agregados maiores que 2 mm, 56,75%, e maior diâmetro médio ponderado dos agregados, 3,14 mm, em relação aos valores das outras áreas, e esses valores foram significativamente iguais aos da vegetação nativa, principalmente na camada de 0,00-0,10 m.

Os autores constataram que esses resultados podem estar relacionados com maior teor de matéria orgânica, menor preparo do solo, adição de palha ao solo, efeito positivo das raízes da cana e maior tempo de aplicação de vinhaça (Gravina et al., 2021). O maior teor de matéria orgânica do solo na camada 0,00-0,10 m ocorreu na área sob um e doze anos de cultivo, 37,00 g kg<sup>-1</sup> em ambas as áreas, e não houve diferença do teor de matéria orgânica do solo dessas duas áreas com a área sob vegetação nativa (Gravina et al., 2021).

Os atributos relacionados a porosidade do solo também foram avaliados por Gravina et al. (2021). A área com um ano de cultivo apresentou a menor densidade do solo, 1,17 g cm<sup>-3</sup> na camada 0,00-0,10 m, em relação ao valor das outras áreas, e não houve diferença significativa do valor encontrado na área sob vegetação nativa (Gravina et al., 2021). Na camada 0,00-0,10 m o valor da macroporosidade não diferiu entre as áreas de cultivo e o maior valor da microporosidade, 0,42 g g<sup>-1</sup>, foi observado nas áreas com um e três anos de cultivo, que não diferiram entre si (Gravina et al., 2021).

Em relação a agregação, Jiang et al. (2012) observaram em duas áreas com solo de textura muito argilosa (área A solo com 71% de argila, e área B com 82% de argila) que após 2 a 3 anos de aplicação contínua de vinhaça nos canaviais houve aumento na porcentagem de agregados grandes (> 1 mm) peneirados à úmido no solo da área A (34,05%) e na área B (36,09%) quando comparada ao tratamento que recebeu somente aplicação de água (área A, 17,78% e área B, 17,13%). Também

mediram o grau de obliteração em água dos agregados com diâmetro maior que 1 mm, no tratamento com aplicação de vinhaça a obliteração dos agregados foi menor, área A: 50,79% e área B: 55,60%, comparada ao tratamento que não recebeu o subproduto, área A: 74,48% e área B: 77,76%. Segundo os autores, esse resultado pode estar relacionado à disponibilidade de umidade suficiente no solo e ao teor de matéria orgânica proporcionados pela aplicação de vinhaça. Na área A, a densidade do solo foi menor no solo que recebeu a aplicação de vinhaça,  $1,19 \text{ g cm}^{-3}$ , em relação a densidade do solo do tratamento que recebeu somente água,  $1,26 \text{ g cm}^{-3}$ ; e na área B não houve diferença entre os tratamentos (Jiang et al., 2012).

A acidificação do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar devido a aplicação de vinhaça, por ser um subproduto com acidez alta, é um fator preocupante (Jiang et al., 2012). No entanto, os autores observaram que após 2 a 3 anos de aplicação de vinhaça os valores de pH nas áreas A, 4,93 e B, 4,89 não diferiram dos valores encontrados no tratamento que não recebeu o subproduto, área A, 4,86 e área B, 4,64. Em relação ao teor de potássio (K) o tratamento com aplicação de vinhaça foi significativamente maior na área B,  $7,11 \text{ g kg}^{-1}$ , do que o tratamento que não recebeu a aplicação do subproduto,  $5,17 \text{ g kg}^{-1}$  o que indica claramente que a aplicação de vinhaça em canaviais pode aumentar significativamente o teor de K no solo (Jiang et al., 2012).

Silva et al. (2006) estudaram sistemas de manejo em cana-de-açúcar sendo área não irrigada, área irrigada, área com aplicação de vinhaça e área sob floresta. O solo foi classificado como Argissolo Amarelo coeso latossólico textura média/argilosa. Os autores constataram que o sistema de manejo com vinhaça proporcionou maiores valores de macroagregados obtidos por peneiragem via úmida e maior índice de estabilidade em água das unidades estruturais do solo quando comparado com sistema não irrigado e irrigado. No solo que recebeu aplicação de vinhaça a macroagregação foi de 75,9% e o índice de estabilidade foi de 0,83, no solo não irrigado os valores foram 67,4% e 0,74 e no solo irrigado 71,3% e 0,78 de macroagregação e índice de estabilidade, respectivamente (Silva et al., 2006).

Em relação aos atributos químicos, Silva et al. (2006) observaram que a CTC do solo foi maior no solo que recebeu aplicação de vinhaça,  $10,92 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  em relação ao manejo sem irrigação  $7,70 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  e com irrigação  $8,21 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ .

Contudo, o pH do solo foi menor no manejo com aplicação de vinhaça em relação aos manejos sem e com irrigação, sendo 5,1; 5,2 e 5,3, respectivamente.

Cardoso et al. (2021) avaliaram áreas de solo argiloso (420 g kg<sup>-1</sup> de areia, 90 g kg<sup>-1</sup> de silte e 490 g kg<sup>-1</sup> de argila) e solo arenoso (860 g kg<sup>-1</sup> de areia, 60 g kg<sup>-1</sup> de silte e 80 g kg<sup>-1</sup> de argila) cultivadas com cana-de-açúcar e com aplicação de vinhaça a mais de dez anos. No solo argiloso, os autores observaram maior teor de CO: 21 g kg<sup>-1</sup>, maior CTC: 130 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> e maior teor de K: 4,5 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> no solo da área com aplicação de vinhaça. Na área que não recebeu o subproduto foram obtidos, CO: 15 g kg<sup>-1</sup>; CTC: 100 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> e K: 3 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> na camada 0,00-0,10 m. A macroporosidade, a microporosidade, a resistência do solo à penetração (RP) e o pH não diferiram entre as duas áreas.

Na área de solo arenoso que recebeu a aplicação de vinhaça houve maior teor de CO nas camadas 0,10-0,20 m: 4,5 g kg<sup>-1</sup> e 0,20-0,30 m: 3,5 g kg<sup>-1</sup> em relação ao teor de CO na área sem aplicação de vinhaça, camada 0,10-0,20 m: 3 g kg<sup>-1</sup> e 0,20-0,30 m: 2,2 g kg<sup>-1</sup> (Cardoso et al., 2021). Na área com aplicação de vinhaça houve maior CTC: 35 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; maior teor de K: 0,7 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> e maior pH: 5,5 em relação ao solo da área sem vinhaça, CTC: 22 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; K: 0,4 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> e pH: 5,1 na camada 0,00-0,10 m (Cardoso et al., 2021). A macroporosidade foi menor e a microporosidade e a RP foram maiores no solo da área com aplicação de vinhaça em todas as camadas avaliadas. O valor médio da macroporosidade foi de 0,18 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, o da microporosidade foi de 0,23 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> e a RP foi de 3,2 MPa (Cardoso et al., 2021).

Devido ao aporte de matéria orgânica proporcionado pela adição de vinhaça, há aumento na CTC do solo, o que melhora a capacidade do solo em reter nutrientes para as plantas, especialmente potássio, cálcio e magnésio (Fuess e Garcia, 2014). Os autores também observaram aumento do pH do solo por causa da maior atividade microbiana ao consumir a acidez da vinhaça.

Em relação ao aporte de potássio no solo por meio da fertirrigação com vinhaça, Cardin et al. (2016) avaliaram os impactos da aplicação de vinhaça e da forma de colheita da cana-de-açúcar na disponibilidade de K em Argissolo Vermelho-Amarelo com teores médios de 840 g kg<sup>-1</sup> de areia, 55 g kg<sup>-1</sup> de silte e 105 g kg<sup>-1</sup> argila, na camada de 0,00-0,25 m. Os autores observaram maior teor de K no tratamento com aplicação de vinhaça e com colheita mecanizada, com teor médio de K de 3,83

$\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ . No tratamento sem aplicação de vinhaça e com colheita mecanizada o teor médio de K foi de  $0,48 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ .

Como observado, muitos estudos foram realizados a fim de avaliar os efeitos da vinhaça, aplicada em área total, nos atributos do solo. Por essa razão, há necessidade de avaliar a aplicação da vinhaça localizada na linha de cultivo da cana-de-açúcar, a fim de observar se os efeitos da vinhaça aplicada por esse novo método terão impacto semelhante nos atributos físicos e químicos, e na produtividade da cana-de-açúcar, como nos estudos anteriormente citados.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Descrição das áreas experimentais e dos tratamentos

O experimento foi conduzido em duas áreas localizadas na região de Araraquara, Estado de São Paulo, próxima às coordenadas geodésicas 21°47'40"S e 48°10'32"W, com 664 m de altitude média. O clima da região é classificado como Cwa, segundo Köppen, clima subtropical úmido com inverno seco e verão quente, com temperaturas médias de 22,8°C no mês mais quente e 16,8°C no mês mais frio, e precipitação média anual de 1.352 mm. Os dados de precipitação mensal de 2019 estão representados na Figura 1.

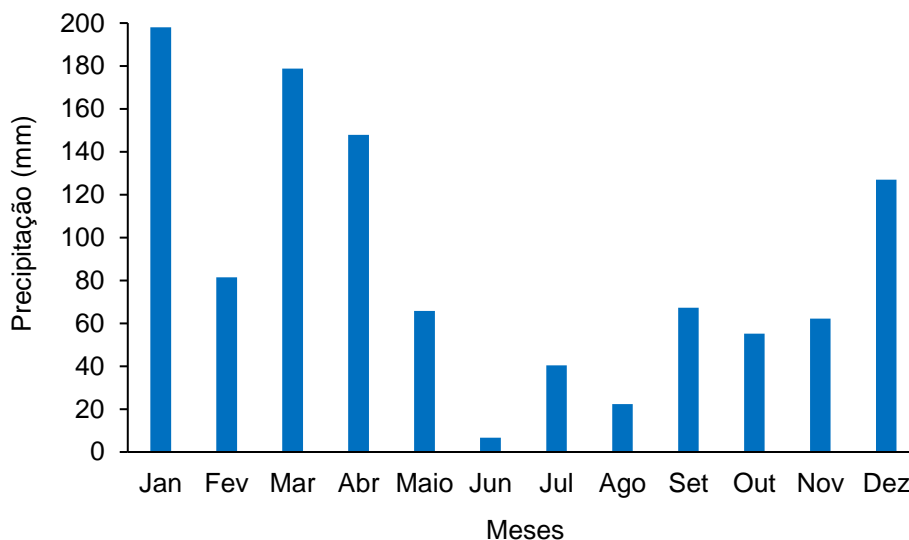


Figura 1: Soma dos valores diários de precipitação (mm), em cada mês de 2019.

As áreas possuem solo com classe textural distinta, sendo uma com solo de textura argilosa (350 g kg<sup>-1</sup> de areia, 120 g kg<sup>-1</sup> de silte e 530 g kg<sup>-1</sup> de argila, na camada 0-0,20 m de profundidade), classificado como Latossolo Vermelho e a outra área com solo de textura arenosa (850 g kg<sup>-1</sup> de areia, 40 g kg<sup>-1</sup> de silte e 110 g kg<sup>-1</sup> de argila, na camada 0-0,20 m de profundidade), classificado como Neossolo Quartzarênico. Foi realizada análise química do solo das duas áreas experimentais,

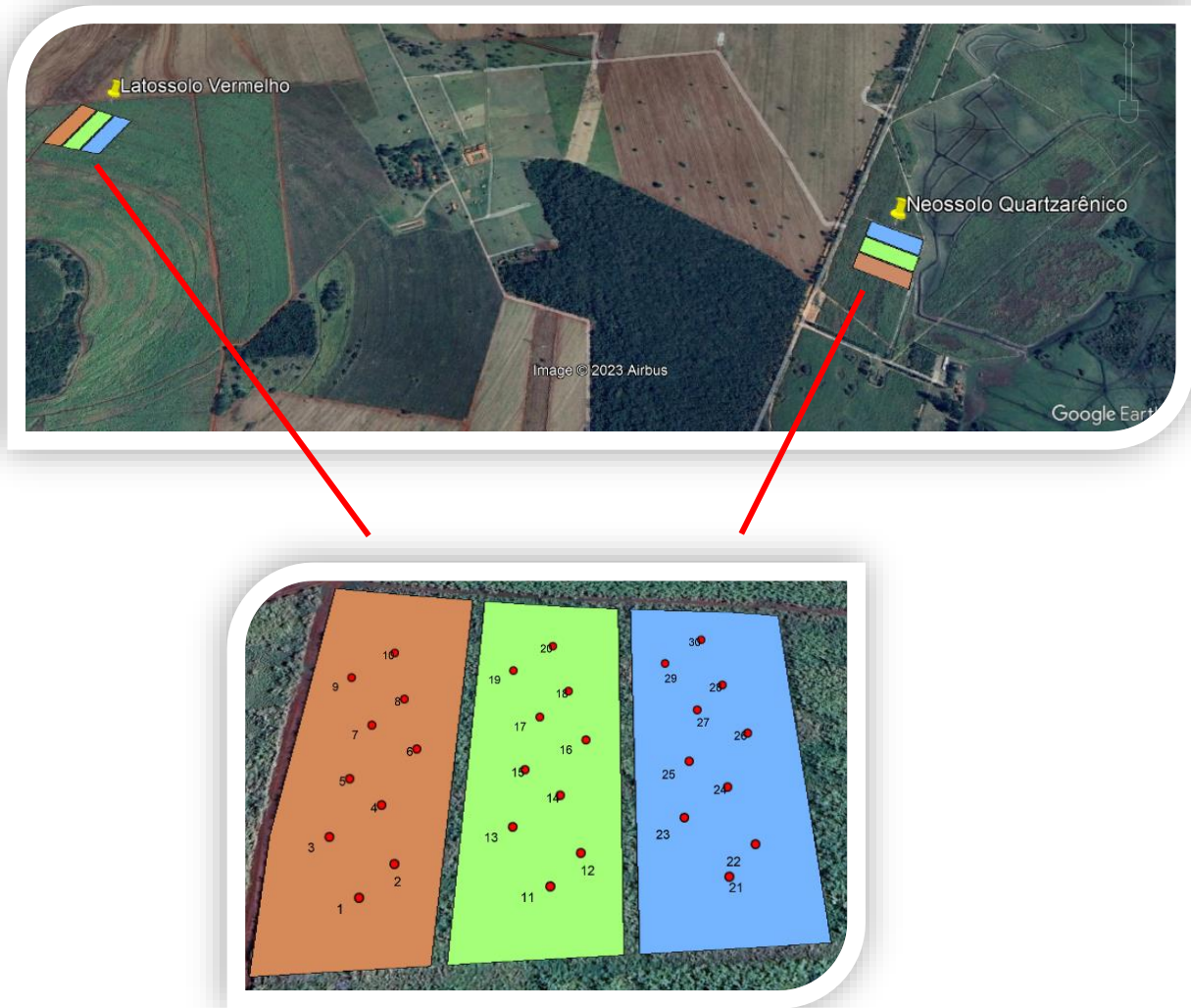
antes da instalação do experimento, e os resultados se encontram na Tabela 1. Nas duas áreas é cultivada cana-de-açúcar há mais de vinte anos, com colheita de cana crua mecanizada desde 2005 e as áreas não receberam nenhuma aplicação de vinhaça anteriormente à instalação do experimento.

Tabela 1. Atributos químicos do solo argiloso (Latosolo Vermelho) e do solo arenoso (Neossolo Quartzarênico) na camada 0,00-0,20 m de profundidade, antes da instalação do experimento.

Solo	pH CaCl <sub>2</sub>	H+Al	Al <sup>3+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	SB	CTC	Na <sup>+</sup>	V
		-----			mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>		-----			%
Latosolo Vermelho	5,20	20	0	2,2	18	10	31	51	0	61
Neossolo Quartzarênico	4,40	36	5	0,9	3	2	6	42	0	15

SB: soma de bases; CTC: capacidade de troca de cátions; V: saturação por bases.

Cada área experimental ocupou 22.500 m<sup>2</sup> (150 m de comprimento e 150 m de largura), onde foram instalados três tratamentos: sem aplicação de vinhaça (SV), aplicação de vinhaça em área total por aspersão (VT) e aplicação de vinhaça localizada na linha da cultura (VL) (Figura 2). Cada tratamento ocupou 7.500 m<sup>2</sup> (150 m de comprimento e 50 m de largura) compreendendo 100 linhas de cana-de-açúcar com espaçamento entrelinhas de 1,5 m. As bordaduras compreenderam 10 linhas externas de cana-de-açúcar de cada lado e 10 m no início e no final de cada linha de cana-de-açúcar. Portanto, a área útil de cada tratamento foi de 3.600 m<sup>2</sup> (80 linhas de cana-de-açúcar com 30 m de comprimento e 1,5 m de espaçamento entre linhas).



- Pontos de Amostragem do solo
- Tratamento Sem Vinhaça
- Tratamento Vinhaça Aspersão
- Tratamento Vinhaça Localizada

Figura 2: Localização das duas áreas experimentais com solo de classe texturais distintas (Latossolo Vermelho e Neossolo Quartzarênico), com a divisão de cada área em três tratamentos, com 10 pontos amostrados em cada tratamento.  
Fonte: Imagens extraídas do Google Earth Pro.

### 3.2 Condução do experimento

Antes da instalação dos tratamentos, nas duas áreas experimentais, houve a destruição da soqueira do ciclo anterior da cana-de-açúcar com a utilização de

eliminador mecânico. O preparo do solo para o plantio da cana-de-açúcar foi localizado, com mobilização do solo apenas no sulco de plantio, por meio de operação de escarificação no sentido das linhas, com a utilização de equipamento com pares de hastes espaçados de 1,50 m, com mobilização de 0,80 m de largura e profundidade de trabalho de 0,30 m.

Após o preparo do solo, foi realizada a aplicação de corretivos, com o propósito de elevar a saturação por bases a 70%, e a adubação de plantio foi feita de acordo com os resultados da análise química do solo. As correções e as adubações do solo foram realizadas segundo Spironello et al. (1997). Posteriormente, foi realizado o plantio da cana-de-açúcar no sistema mecanizado, com espaçamento entrelinhas de 1,50 m.

Na área com solo argiloso foi plantada, em fevereiro de 2017, a variedade de cana-de-açúcar RB866928 e na área com solo arenoso foi plantada, em março de 2018, a variedade de cana-de-açúcar RB867515. A cultura foi conduzida segundo as recomendações fitotécnicas específicas segundo Spironello et al. (1997). A colheita ocorreu em 22/06/2019 na área de solo argiloso e em 24/06/2019 na área de solo arenoso.

Após a colheita da cana-de-açúcar foram instalados, em cada área, os três tratamentos. No tratamento SV a adubação da soqueira foi realizada com o propósito de aplicar 80 kg ha<sup>-1</sup> de N, 20 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 80 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O, seguindo os resultados das análises químicas de solo.

Nos tratamentos VT e VL a adubação da soqueira foi realizada com o propósito de aplicar 80 kg ha<sup>-1</sup> de N e 20 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Para o fornecimento de K, no tratamento VT, foram aplicados 70 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> de vinhaça, por meio do conjunto rolobomba e canhão aspersor autopropelido (Figura 3.1). Devido às limitações do conjunto de aspersão, para que a vinhaça fosse distribuída de maneira uniforme foi padronizado o volume de 70 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> de vinhaça. Para o fornecimento de K, no tratamento VL, foram aplicados 30 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> de vinhaça, por meio do conjunto trator e tanque de aplicação localizada, direcionados na linha da cultura (Figura 3.2), com largura de 0,20 m. A vinhaça utilizada foi obtida a partir da destilação do vinho resultante da fermentação do caldo, e a composição química da vinhaça aplicada se encontra na Tabela 2.



Figura 3: Imagem da aplicação de vinhaça em área total por aspersão (1) e aplicação de vinhaça localizada na linha da cultura (2).

Fonte: Acervo pessoal do autor.

A aplicação da vinhaça nos tratamentos VT e VL de cada área ocorreu dia 29/06/2019. Os resultados do presente estudo são referentes ao ano agrícola 2019/2020.

Tabela 2. Composição química da vinhaça.

N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	Na	Cu	Fe	Mn	Zn	pH
----- kg m <sup>-3</sup> -----					----- mg dm <sup>-3</sup> -----					
0,64	0,20	5,10	1,05	1,28	0,08	4,10	35,16	5,20	2,28	4,32

### 3.3 Amostragem do solo e avaliações dos atributos do solo

A amostragem do solo aconteceu em dois períodos, sendo que a primeira amostragem ocorreu nos dias 01 e 02 de julho de 2019 nas áreas de solo arenoso e argiloso, respectivamente, e a segunda amostragem do solo ocorreu nos dias 03 e 04 de dezembro de 2019, nas áreas de solo arenoso e argiloso, respectivamente, quando a cana-de-açúcar se encontrava no período de máximo desenvolvimento vegetativo.

Para a avaliação dos atributos do solo foram coletadas, em cada período, em 10 pontos previamente georreferenciados na área útil de cada tratamento (Figura 2),

amostras preservadas, indeformadas e deformadas, distantes 0,15 m do centro da linha (touceira) da cana-de-açúcar, nas camadas 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m.

As amostras preservadas de solo foram coletadas com auxílio de pá reta para preservar os torrões do solo. Em laboratório, parte das amostras coletadas em torrões, ainda úmidas, foram destorroadas manualmente e passadas por peneiras com malha de 6,3 e 4 mm para o solo argiloso e com malha de 4 e 2 mm para o solo arenoso. Houve essa diferença nas malhas das peneiras entre os solos, pois os agregados do solo arenoso não ficaram retidos na peneira de 4 mm.

Os agregados retidos na peneira de malha de 4 mm, do solo argiloso, e 2 mm, do solo arenoso, foram secos ao ar, e posteriormente, utilizados na análise do diâmetro médio ponderado dos agregados do solo (DMP) (Nimmo e Perkins, 2002). A partir do resultado do DMP, foram calculadas as classes de agregados, determinando assim a massa de agregados (MA) que ficou retida nas classes de agregados: MA com diâmetro  $> 2$  mm ( $g\ g^{-1}$  solo), MA com diâmetro entre 2 e 1 mm ( $g\ g^{-1}$  solo), MA com diâmetro entre 1 e 0,500 mm ( $g\ g^{-1}$  solo) e MA com diâmetro  $< 0,500$  ( $g\ g^{-1}$  solo).

A outra parte das amostras em torrões do solo argiloso e arenoso foi seca ao ar e posteriormente passada por peneiras com malha de 2 e 1 mm. Os agregados retidos na peneira com malha de 1 mm foram utilizados na análise do índice de estabilidade de agregados em água (IEA) (Nimmo e Perkins, 2002).

As amostras indeformadas foram coletadas em anéis volumétricos (dimensões: 5 cm de altura e 5 cm de diâmetro) com o auxílio de amostrador tipo Uhland. A partir destas amostras foram determinados: microporosidade, macroporosidade (Almeida et al., 2017a), densidade do solo ( $D_s$ ) (Almeida et al., 2017b) e resistência do solo à penetração (RP) (Tormena et al., 1998).

A RP foi determinada nas amostras indeformadas, após submetê-las à tensão de 100 hPa, em penetrômetro eletrônico de bancada, com velocidade de deslocamento de 1 cm por minuto e uma leitura por segundo. O penetrômetro gerou aproximadamente 300 leituras para cada amostra, pois o anel volumétrico tem 5 cm de altura. Portanto, a RP foi calculada utilizando uma média de 180 leituras, desconsiderando as leituras correspondentes aos centímetros superiores e inferiores do anel, ou seja, as primeiras e últimas 60 leituras.

As amostras deformadas foram coletadas com auxílio do trado holandês e, em laboratório, as amostras foram secas ao ar e passadas por peneira com malha de 2 mm e submetidas às análises do carbono orgânico do solo pelo método colorimétrico (Yeomans e Bremner, 1988), teor de potássio, cálcio e magnésio, pH em  $\text{CaCl}_2$  (Raij et al., 2001) e cálculo da capacidade de troca de cátions (CTC), que consiste no somatório das bases ( $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) com a acidez potencial ( $\text{H}^+$  +  $\text{Al}^{3+}$ ).

### **3.4 Avaliação da produtividade da cana-de-açúcar e do açúcar total recuperável (ATR)**

A colheita ocorreu de forma mecanizada sem queima da palha, por meio de colhedora Austoft 9000 da Case IH e a pesagem foi realizada em transbordo equipado com balança eletrônica. A cana-de-açúcar foi colhida linha por linha em cada ponto georeferenciado de cada tratamento. O valor da produtividade por ponto foi calculado levando em consideração o comprimento da linha e o peso da cana-de-açúcar colhida. A produtividade da cana-de-açúcar foi expressa em  $\text{t ha}^{-1}$ . A variável tecnológica açúcar total recuperável (ATR) foi avaliada segundo o método da Consecana (2003). Para a análise de ATR, amostraram-se 10 colmos de cana-de-açúcar em sequência, em uma linha em cada ponto dentro de cada tratamento.

### **3.5 Análise estatística**

Os valores das variáveis referentes aos atributos físicos e químicos do solo, do ATR e da produtividade da cana-de-açúcar foram submetidos à análise do modelo linear generalizado (GLM) ao nível de 5% de probabilidade, utilizando o software Statistica7®. Quando os efeitos simples de aplicação de vinhaça e período de amostragem do solo, bem como a interação entre eles, foram significativos, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Atributos químicos

Quanto aos atributos químicos do solo argiloso na camada 0,00-0,10 m, a interação da aplicação de vinhaça com o período de amostragem do solo foi significativa para o pH do solo e a aplicação de vinhaça proporcionou diferença significativa para o teor de K (Tabela 3).

Tabela 3. Análise do modelo linear generalizado (GLM) ao nível de 5% de probabilidade para carbono orgânico do solo (CO), pH, teor de potássio (K) e capacidade de troca de cátions (CTC) em função da aplicação de vinhaça e do período de amostragem em solo em duas camadas do solo argiloso.

SOLO ARGILOSO								
0,00-0,10 m								
Causas de Variação	CO		pH		K		CTC	
	F	Valor-p	F	Valor-p	F	Valor-p	F	Valor-p
Aplicação de vinhaça (AV)	1,61	0,208	0,21	0,810	6,33	<b>0,003*</b>	0,86	0,428
Período Amostragem (PA)	0,18	0,673	12,98	<b>&lt;0,001*</b>	2,17	0,146	1,94	0,168
AV x PA	2,71	0,075	4,37	<b>0,017*</b>	0,67	0,514	0,62	0,539
0,10-0,20 m								
Causas de Variação	CO		pH		K		CTC	
	F	Valor-p	F	Valor-p	F	Valor-p	F	Valor-p
Aplicação de vinhaça (AV)	1,42	0,250	0,53	0,590	3,55	<b>0,035*</b>	0,58	0,560
Período Amostragem (PA)	1,60	0,211	10,62	<b>0,001*</b>	7,98	<b>0,006*</b>	5,45	<b>0,023*</b>
AV x PA	2,32	0,107	0,94	0,396	0,58	0,559	0,38	0,684

ns - não significativo \* - significativo a 5% de probabilidade.

O pH foi significativamente igual nos três tratamentos, tanto na primeira, quanto na segunda amostragem do solo (Figura 4). No entanto, observando o pH em cada tratamento, constatou-se que no solo sob SV o pH foi maior na primeira amostragem do solo (5,25) e menor, ou seja, mais ácido, na segunda amostragem do solo (4,81), e não foi verificada diferença nos valores de pH nos tratamentos que receberam a aplicação de vinhaça do primeiro período de amostragem, VT: 5,25 e VL: 5,22 para o segundo período de amostragem, VT: 5,08 e VL: 5,14 (Figura 4). Neste sentido, é importante destacar que a aplicação de vinhaça pode ter contribuído para que o pH do solo argiloso sob VT e VL não se alterasse de um período ao outro de amostragem.

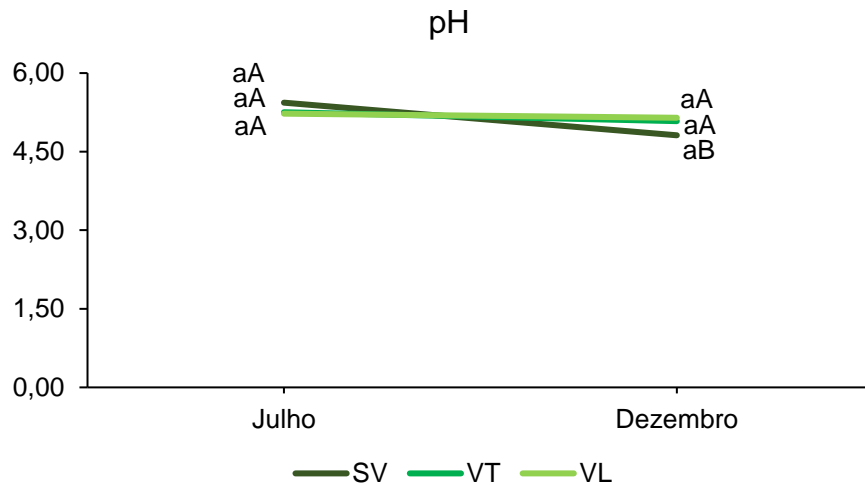


Figura 4: Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para a interação entre aplicação de vinhaça (SV, VT e VL) e período de amostragem (Julho, primeiro período; Dezembro, segundo período) no pH do solo argiloso na camada 0,00-0,10 m. Letras minúsculas iguais indicam que não há diferença entre aplicações de vinhaça em cada período de amostragem e letras maiúsculas iguais indicam que não há diferença na aplicação de vinhaça entre os dois períodos de amostragem.

Embora a vinhaça da cana-de-açúcar seja um subproduto caracterizado com pH baixo, ela contém matéria orgânica e quando adicionada ao solo proporciona um aumento na atividade microbiana que, por sua vez, gera um ambiente redutor consumindo íons  $H^+$ , o que resulta em maior pH do solo (Mattiazzo e da Gloria, 1987).

A aplicação de vinhaça e seu efeito na acidificação do solo foi investigada e resultados diferentes foram encontrados. Jiang et al. (2012) observaram em duas áreas com solo de textura argilosa que após 2 anos de aplicação de vinhaça os valores de pH nas áreas A: 4,93 e B: 4,89 não diferiram dos valores encontrados no tratamento que não recebeu o subproduto, área A: 4,86 e área B: 4,64. Cardoso et al. (2021) verificaram que o pH do solo argiloso, com mais de dez anos de aplicação de vinhaça, não diferiu do pH da área onde nunca foi aplicado o subproduto, com valor médio do pH igual a 6 nas duas áreas.

Resultados contrários aos observados pelos trabalhos citados anteriormente foram constatados por Silva et al. (2006), pois os autores observaram que o pH do solo de textura média/argilosa foi menor no tratamento com aplicação de vinhaça, com valor de pH de 5,1 em relação ao tratamento sem vinhaça, com pH de 5,2. Yi et al. (2019) também constataram acidificação do solo após dois anos de aplicação de

vinhaça com pH do solo de 4,69, contrastando com o pH de 6,45 do tratamento que não recebeu a aplicação do subproduto. As razões dessas diferenças podem estar relacionadas com a capacidade tampão de cada solo, como também pelo volume de vinhaça aplicada e com o tempo de aplicação da vinhaça.

O teor de K na camada 0,00-0,10 m do solo argiloso sob VT ( $2,98 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) foi maior em relação a SV ( $1,35 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) e VL ( $1,51 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) (Figura 5). Esses resultados confirmam a contribuição da vinhaça no aporte de K no solo, assim como observado por Jiang et al. (2012), que relataram que o teor de K no tratamento com dois anos de aplicação de vinhaça foi de  $7,11 \text{ g kg}^{-1}$ , significativamente maior que no tratamento sem aplicação que foi de  $5,17 \text{ g kg}^{-1}$ . Cardoso et al. (2021) também constataram aumento no teor de K de solo argiloso com dez anos de aplicação de vinhaça ( $4,5 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) em relação a área que nunca recebeu o subproduto ( $3 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) na camada 0,00-0,10 m do solo.

No entanto, o teor de K pode ter sido maior no solo sob VT na primeira camada do solo argiloso em relação aos outros dois tratamentos, pois a vinhaça aplicada em área total pode estar adicionando K no solo em quantidade maior que a absorvida pela cana-de-açúcar. O K é um nutriente móvel no floema e as plantas o absorvem em quantidades excessivas em relação às suas necessidades, se estiver prontamente disponível, em uma espécie de consumo de luxo (Andrade et al., 2021). Por esse motivo, observou-se que possivelmente o K foi absorvido pela cana-de-açúcar como consumo de luxo, mas, ainda assim, constatou-se maior teor de K no solo sob VT por causa do maior volume de vinhaça aplicado, em relação aos tratamentos SV e VL.

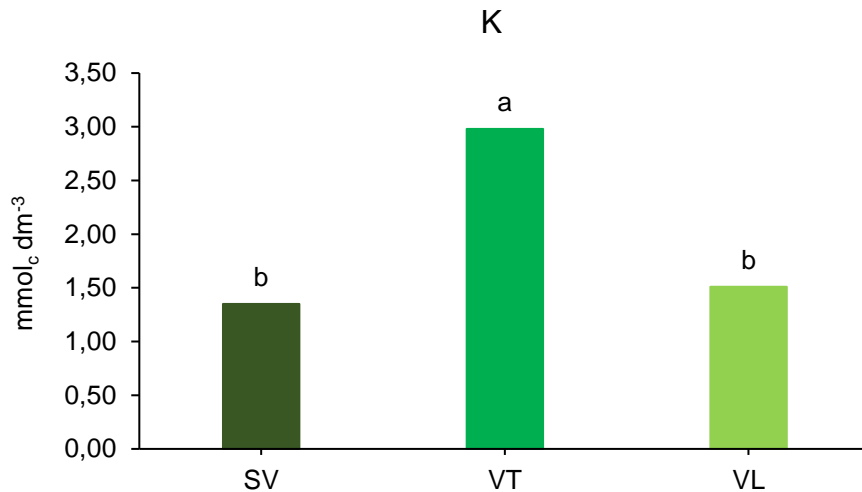


Figura 5: Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para aplicação de vinhaça (SV, VT e VL) em relação ao teor de potássio (K) do solo argiloso na camada 0,00-0,10 m. Letras minúsculas iguais indicam que não há diferença entre aplicações de vinhaça.

O menor teor de K no solo sob VL em relação a VT pode indicar que o K foi mais absorvido pelo sistema radicular da cana-de-açúcar, uma vez que, a vinhaça foi aplicada diretamente na linha de cultivo da cana-de-açúcar, entrando em maior contato com as raízes. O que reforça essa ideia é que o tratamento SV também recebeu K, mas na forma de adubação mineral, e apresentou valores significativamente iguais a VL.

Na camada 0,10-0,20 m do solo argiloso, a aplicação de vinhaça proporcionou diferença significativa no teor de K do solo, e o período de amostragem do solo promoveu diferença significativa no pH do solo, no teor de K e na capacidade de troca de cátions (CTC) do solo (Tabela 3).

Os resultados mostraram que a vinhaça acrescentou potássio ao solo pelo menos até vinte centímetros de profundidade, independentemente do método de aplicação utilizado, pois não houve diferença do teor de K no solo sob VT (1,66 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) e VL (1,02 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) na camada 0,10-0,20 m (Figura 6).

O teor de K do solo sob VT foi maior em relação ao tratamento SV, contudo, o teor de K não diferiu entre os tratamentos SV e VL. Esses resultados reforçam o que foi discutido anteriormente na camada 0,00-0,10 m, que possivelmente a aplicação de vinhaça em área total adiciona K no solo em quantidade maior que a absorvida pela cana-de-açúcar.

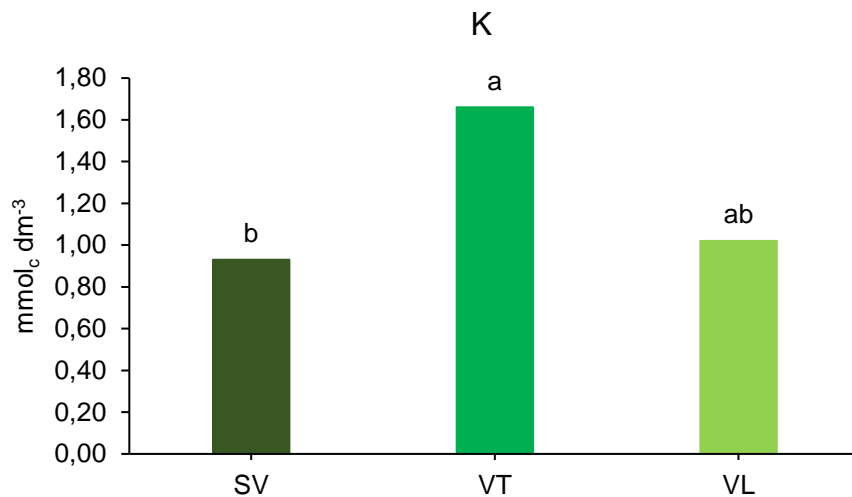


Figura 6: Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para aplicação de vinhaça (SV, VT e VL) em relação ao teor de potássio (K) do solo argiloso na camada 0,10-0,20 m. Letras minúsculas iguais indicam que não há diferença entre aplicações de vinhaça.

Em relação ao período de amostragem, o teor de K foi menor na segunda amostragem do solo,  $0,86 \text{ mmol}_c \text{dm}^{-3}$  de K em relação a primeira amostragem,  $1,55 \text{ mmol}_c \text{dm}^{-3}$  de K (Figura 7). A segunda amostragem do solo ocorreu quando a cana-de-açúcar estava no período de máximo crescimento vegetativo, que é fase de máxima absorção de K pela cana-de-açúcar. Medina et al. (2013) mediram a concentração de potássio nas diferentes partes da planta por meio da espectrometria gama e observaram que aos 154 dias houve a maior concentração de nutriente nas folhas e no caule. Essa máxima absorção de K pode explicar o menor teor de K observado na camada 0,10-0,20 m na segunda amostragem do solo.

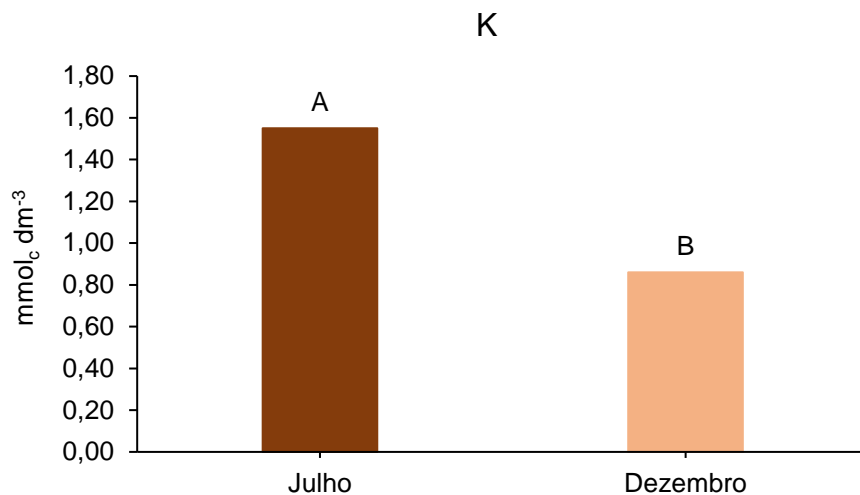


Figura 7: Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para período de amostragem (Julho, primeiro período; Dezembro, segundo período) em relação ao teor de potássio (K) do solo argiloso na camada 0,10-0,20 m. Letras maiúsculas diferentes indicam diferença entre os períodos de amostragem.

O pH foi menor na segunda amostragem do solo (Figura 8), e muitas são as razões para a diminuição do pH, ou seja, para a acidificação do solo, apesar das correções que são realizadas nas áreas por meio da aplicação de calcário. A medida que é cultivado o solo torna-se mais ácido, pois íons como  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{K}^{+}$  são absorvidos pela cultura e podem ser substituídos por  $\text{Al}^{3+}$  e  $\text{H}^{+}$  (Ronquim, 2021).

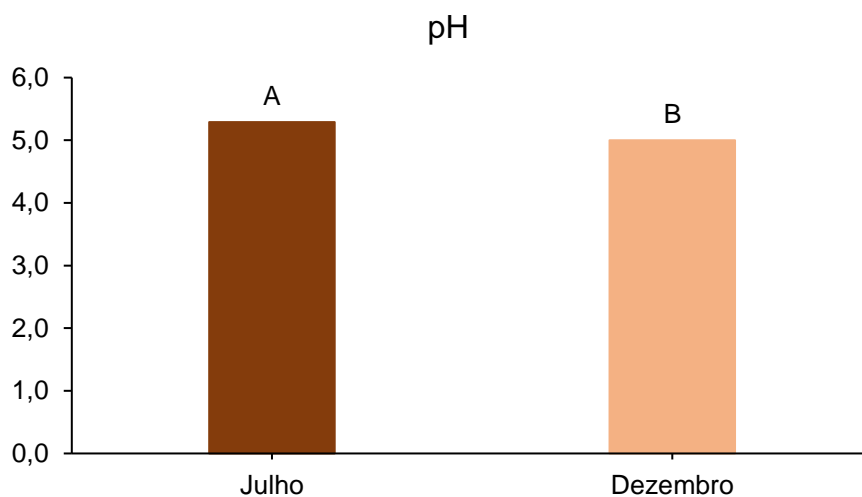


Figura 8: Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para período de amostragem (Julho, primeiro período; Dezembro, segundo período) em relação ao pH do solo argiloso na camada 0,10-0,20 m. Letras maiúsculas diferentes indicam diferença entre os períodos de amostragem.

A aplicação de vinhaça no solo nos tratamentos VT e VL não alterou o pH do solo, pois não se observou diferença dos valores de pH do solo desses dois tratamentos em relação ao tratamento que não recebeu a aplicação de vinhaça. Esse resultado pode estar relacionado com a capacidade tampão do solo argiloso, que geralmente possui maior quantidade de cargas negativas em relação ao solo arenoso, gerando maior resistência do solo em alterar o pH (Cardoso et al., 2021).

A CTC do solo foi menor no segundo período de amostragem (63,7 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) em relação ao primeiro período (67,9 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) na camada 0,10-0,20 m do solo argiloso (Figura 9). Contudo, observou-se que a diferença entre os valores foi pequena, e possivelmente o que justifica a maior CTC do solo no primeiro período de amostragem foi a maior presença de sais solúveis presentes na vinhaça que tinha sido aplicada três dias antes da primeira amostragem do solo.

A CTC do solo depende do teor e do tipo de argila e da quantidade de matéria orgânica presente no solo, pois um solo com alto teor de argila retém mais cátions trocáveis comparado a um solo com baixo teor de argila (Ronquim, 2021). Além disso, a CTC também aumenta com incrementos nos teores de matéria orgânica do solo (Ronquim, 2021). Aumentos na CTC de solos muito intemperizados, como os Latossolos, deve-se principalmente ao aporte de matéria orgânica no solo (Oorts et al., 2003).

Normalmente, são nos primeiros centímetros do solo que ocorre maior concentração de matéria orgânica e maior atividade microbiana, pois a maioria dos resíduos vegetais é adicionada na superfície do solo e com a sua decomposição pode haver aumento no teor de matéria orgânica na camada superficial (Fageria, 2012). Em sistema de colheita de cana-de-açúcar sem queima, no qual a palhada é mantida sobre a superfície do solo, Cerri et al. (2011) observaram acúmulo de carbono em solo de textura argilosa.

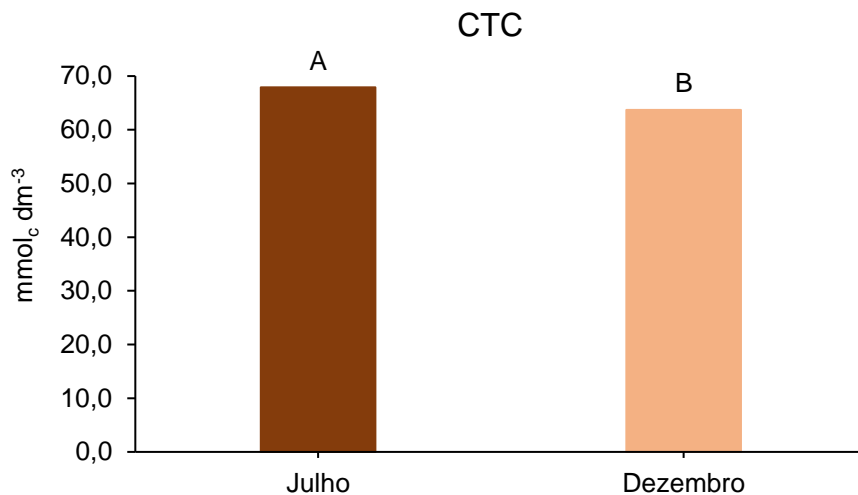


Figura 9: Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para período de amostragem (Julho, primeiro período; Dezembro, segundo período) em relação a CTC do solo argiloso na camada 0,10-0,20 m. Letras maiúsculas diferentes indicam diferença entre os períodos de amostragem.

Signor et al. (2016) constataram que a área de cana-de-açúcar cultivada ao longo de 12 anos de colheita sem queima apresentou maiores teores de carbono em relação à área com 12 anos de queima na camada de 0,00-0,10 m em Latossolo de textura argilosa, mostrando o efeito do manejo da cana-de-açúcar quando a palha é depositada sobre a superfície do solo, ao longo do tempo, como uma importante ferramenta para aumentar o teor de carbono no solo. Os autores apontaram que houve redução da CTC do solo com a profundidade do solo na área colhida sem queima com 12 anos, refletindo a contribuição da matéria orgânica do solo promovida pela manutenção da palhada na superfície do solo.

Em experimento de longo prazo, 60 anos de condução, foram observados maiores teores de carbono orgânico na camada de 0,00-0,10 m em um Vertissol com 62 % de argila em área com manutenção da palhada da cana-de-açúcar após a colheita (Graham et al., 2002). Os autores observaram que com o aumento da matéria orgânica promovida pela deposição da palhada houve aumento da CTC nos 10 cm superficiais do solo.

A vinhaça, pode contribuir com o aporte de matéria orgânica no solo, por ser um subproduto que contém matéria orgânica na sua composição, e assim contribuir indiretamente para o aumento da CTC do solo, como observado por Cardoso et al.

(2021). Segundo os autores, a CTC do solo argiloso com dez anos de aplicação de vinhaça foi em média de  $130 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , enquanto na área que não recebeu o subproduto a CTC foi em média de  $105 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$  na camada 0,10-0,20 m. No entanto, como observado pelos autores, são necessárias sucessivas aplicações de vinhaça, pois somente com uma aplicação e um espaço de tempo de cinco meses não foi possível observar o efeito da vinhaça na CTC do solo argiloso.

Quanto ao solo arenoso, na camada 0,00-0,10 m, houve interação significativa para o teor de K, e a aplicação de vinhaça e o período e amostragem promoveram diferença significativa na CTC do solo (Tabela 4).

Tabela 4. Análise do modelo linear generalizado (GLM) ao nível de 5% de probabilidade para carbono orgânico do solo (CO), pH, teor de potássio (K) e capacidade de troca de cátions (CTC) em função da aplicação de vinhaça e do período de amostragem em solo em duas camadas do solo arenoso.

<b>SOLO ARENOSO</b>									
<b>0,00-0,10 m</b>									
Causas de Variação	CO		pH		K		CTC		
	F	Valor-p	F	Valor-p	F	Valor-p	F	Valor-p	
Aplicação de vinhaça (AV)	0,57	0,565	3,12	0,052	13,99	<b>&lt;0,001*</b>	4,30	<b>0,018*</b>	
Período Amostragem (PA)	0,42	0,519	1,21	0,274	13,16	<b>&lt;0,001*</b>	10,65	<b>0,001*</b>	
AV x PA	0,44	0,640	0,60	0,547	5,98	<b>0,004*</b>	1,71	0,188	
<b>0,10-0,20 m</b>									
Causas de Variação	CO		pH		K		CTC		
	F	Valor-p	F	Valor-p	F	Valor-p	F	Valor-p	
Aplicação de vinhaça (AV)	0,16	0,849	1,58	0,213	11,39	<b>&lt;0,001*</b>	6,03	<b>0,004*</b>	
Período Amostragem (PA)	2,71	0,105	1,75	0,191	3,81	0,055	16,70	<b>&lt;0,001*</b>	
AV x PA	1,65	0,199	0,89	0,415	2,52	0,890	3,10	0,052	

\* - significativo a 5% de probabilidade.

O teor de K foi maior sob VT ( $5,91 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) na primeira amostragem do solo em relação aos tratamentos SV ( $0,59 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) e VL ( $3,03 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ), mas no segundo período de amostragem não houve diferença entre os tratamentos (Figura 10).

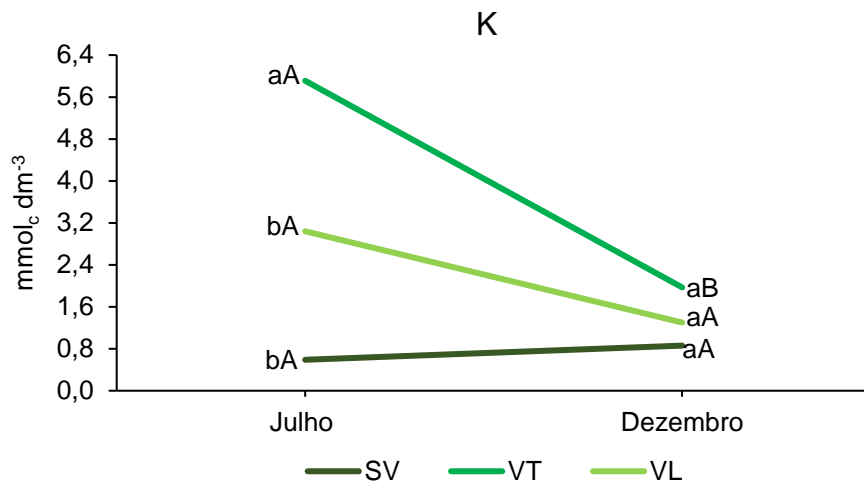


Figura 10: Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para a interação entre aplicação de vinhaça (SV, VT e VL) e período de amostragem (Julho, primeiro período; Dezembro, segundo período) do teor de potássio (K) do solo arenoso na camada 0,00-0,10 m. Letras minúsculas iguais indicam que não há diferença entre aplicações de vinhaça em cada período de amostragem e letras maiúsculas iguais indicam que não há diferença na aplicação de vinhaça entre os dois períodos de amostragem.

O maior aporte de K proporcionado pela aplicação de vinhaça no solo também foi observado por Cardin et al. (2016). Os autores observaram maior teor de K em solo de textura arenosa no tratamento com aplicação de vinhaça e com colheita mecanizada ( $3,83 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ), em relação ao tratamento com colheita mecanizada, mas sem a aplicação de vinhaça ( $0,48 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ). Cardoso et al. (2021) constataram teor de K em solo arenoso com dez anos de aplicação de vinhaça de  $0,7 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , enquanto que na área sem aplicação de vinhaça o teor de K foi de  $0,4 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ .

Segundo os resultados, o teor de K foi maior no solo sob VT em relação a SV e VL no primeiro período de amostragem (Figura 10), e, assim como observado para o solo argiloso, possivelmente a vinhaça aplicada em área total está adicionando K no solo em quantidade maior que a absorvida pela cana-de-açúcar. Por esse motivo, o teor de K no solo sob o tratamento VT foi maior em relação ao teor de K do solo sob VL.

Os resultados mostraram também que somente no solo sob VT houve diminuição do teor de K do primeiro para o segundo período de amostragem (Figura 10). Neste sentido, destaca-se que o menor teor de K na segunda amostragem pode

indicar maior absorção do nutriente pela cana-de-açúcar, mas também pode indicar a lixiviação desse nutriente, uma vez que a vinhaça é aplicada em maior volume.

A CTC não diferiu no solo sob VT e VL na camada 0,00-0,10 m do solo arenoso (VT: 45,1  $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ ; VL: 44,1  $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ ) (Figura 11). Cardoso et al. (2021) verificaram na camada 0,00-0,10 m do solo arenoso CTC de 35  $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$  na área com dez anos de aplicação de vinhaça e CTC de 22  $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$  na área que não recebeu aplicação de vinhaça.

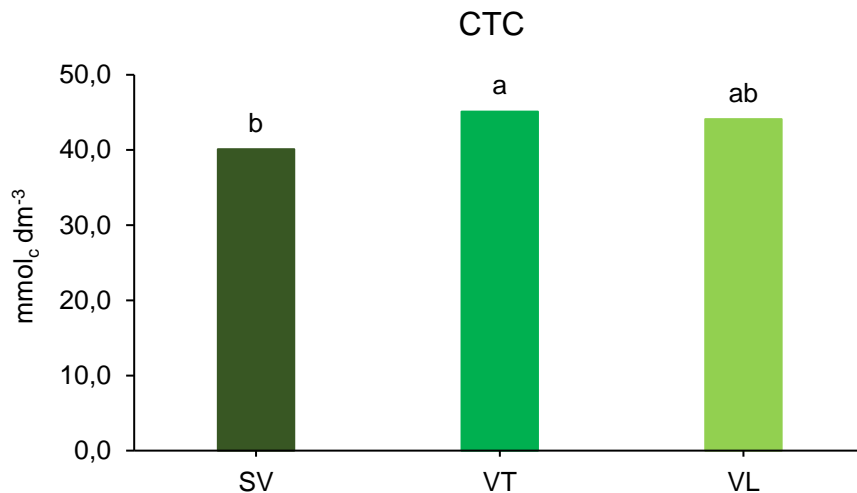


Figura 11: Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para aplicação de vinhaça (SV, VT e VL) em relação a CTC do solo arenoso na camada 0,00-0,10 m. Letras minúsculas iguais indicam que não há diferença entre aplicações de vinhaça.

Diferentemente do que ocorreu no solo argiloso, no solo arenoso verificou-se aumento na CTC do solo nos tratamentos que receberam a aplicação vinhaça. O solo arenoso normalmente possui baixa CTC por ser um solo com menor quantidade de minerais de argila e matéria orgânica, por isso observou-se que a matéria orgânica presente na composição da vinhaça foi importante para aumentar a CTC do solo. A matéria orgânica que faz parte da composição da vinhaça contribui com a elevação da CTC do solo. No entanto, o teor de matéria orgânica não tem ação prolongada no solo, pois é constituída numa fonte de carbono solúvel prontamente disponível para os microrganismos do solo (Prata et al., 2001). Essa constatação foi observada no presente estudo, pois não houve aumento significativo nos teores de CO do solo.

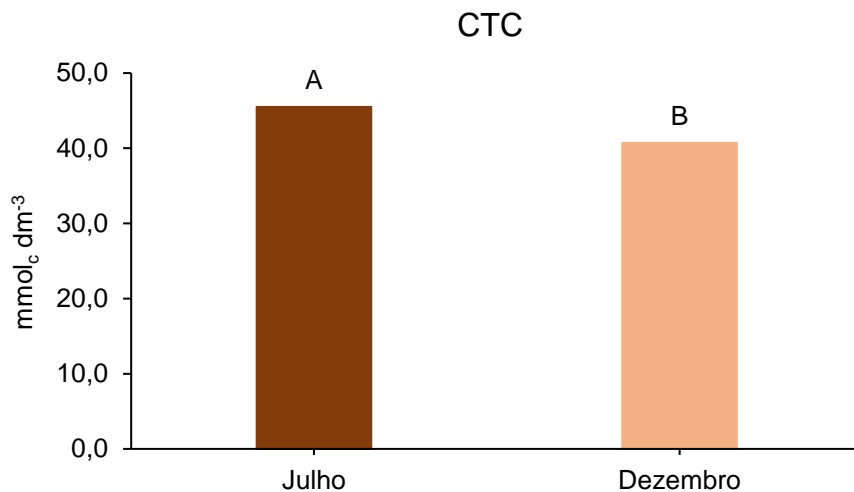


Figura 12: Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para período de amostragem (Julho, primeiro período; Dezembro, segundo período) em relação a CTC do solo arenoso na camada 0,00-0,10 m. Letras maiúsculas diferentes indicam diferença entre os períodos de amostragem.

A CTC foi maior somente no primeiro período de amostragem (45,5 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), com diminuição no segundo período de amostragem (40,7 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) na camada 0,00-0,10 m do solo arenoso (Figura 12). A segunda amostragem ocorreu depois de cinco meses da colheita da cana-de-açúcar e da aplicação de vinhaça, duas práticas que aportam matéria orgânica ao solo. Além disso, em solos arenosos as taxas de decomposição são maiores devido a maior aeração do solo, menor quantidade de partículas de argila, conseqüentemente menor formação de agregados e por isso baixa proteção a alta decomposição da matéria orgânica pelos microrganismos.

Na camada 0,10-0,20 m do solo arenoso a aplicação de vinhaça proporcionou diferença significativa para o teor de K e para a CTC do solo e o período de amostragem promoveu diferença significativa na CTC (Tabela 4).

Assim como na primeira camada do solo arenoso, o teor de K foi maior na camada 0,10-0,20 m no solo sob VT (2,32 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) em relação a SV (0,60 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) e VL (1,29 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) (Figura 13).

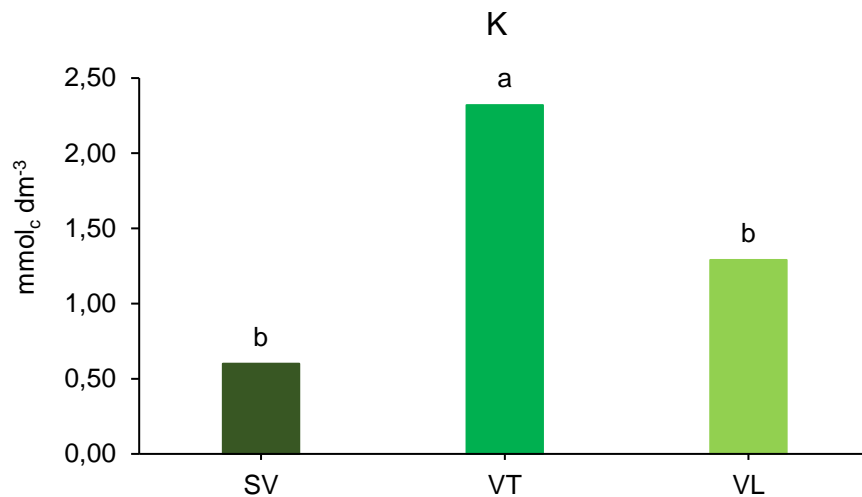


Figura 13: Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para aplicação de vinhaça (SV, VT e VL) em relação ao teor de potássio (K) do solo arenoso na camada 0,10-0,20 m. Letras minúsculas iguais indicam que não há diferença entre aplicações de vinhaça.

Na camada 0,10-0,20 m do solo argiloso não foi observada diferença no teor de K sob VT e VL, mas foi observada para o solo arenoso. No solo argiloso, a infiltração acontece de forma mais lenta e gradual devido a maior presença de microporos que podem contribuir com maior retenção e menor infiltração da vinhaça. Possivelmente por esse motivo o teor de K na camada 0,10-0,20 m não diferiu entre os tratamentos VT e VL. O solo arenoso tem como característica possuir maior espaço poroso, que pode facilitar a infiltração da vinhaça, reforçando que no tratamento VT o volume de vinhaça aplicado pode adicionar maior quantidade de K no solo.

O teor de K no solo sob o tratamento VL não diferiu do teor de K do tratamento SV na camada 0,10-0,20 m (Figura 13), demonstrando que nesse método de aplicação a vinhaça infiltrou até a camada de vinte centímetros, mas o teor de K nessa camada do solo foi menor que o teor de K do tratamento VT, portanto com menor potencial de lixiviação.

A CTC do solo não diferiu entre os tratamentos VT e VL na camada 0,10-0,20 m (VT: 40,6 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; VL: 41,5 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) e foi maior em relação a CTC do solo sob o tratamento SV (Figura 14), o que confere contribuição importante da vinhaça para aumento da CTC do solo arenoso. Cardoso et al. (2021) verificaram na camada 0,10-0,20 m do solo arenoso que a CTC do solo da área com aplicação de vinhaça foi de 32 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> e 25 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> na área sem a aplicação do subproduto. Andreotti

et al. (2015) observaram aumento linear na CTC do solo de textura arenosa na camada 0,00-0,20 m em virtude das doses de aplicação de vinhaça, na dose de 50  $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$  de vinhaça o valor de CTC foi de  $47,8 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$  e na dose de  $200 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1}$  a CTC foi de  $49,4 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ . A CTC em solos arenosos é amplamente determinada pela matéria orgânica do solo (Yost e Hartemimk 2019).

Os resultados mostraram que a vinhaça aplicada de forma localizada pode contribuir para a CTC do solo arenoso. Ao ser aplicada diretamente na linha de cultivo da cana-de-açúcar, a vinhaça pode contribuir para o aumento da matéria orgânica próxima do sistema radicular da cana ao longo de sucessivas aplicações. Por esse motivo é importante a continuidade deste estudo, a fim de observar possíveis aumentos no teor de matéria orgânica em solo de textura arenosa que, conseqüentemente, pode aumentar os valores da CTC do solo.

Assim como observado na camada 0,00-0,10 m, a contribuição da matéria orgânica da vinhaça para a CTC do solo não teve uma ação prolongada no solo, pois não refletiu em maior teor de carbono no solo na camada 0,10-0,20 m. Em relação ao período de amostragem do solo, o valor da CTC na camada 0,10-0,20 m foi menor no segundo período de amostragem ( $37,2 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) em relação ao primeiro período ( $42,0 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) (Figura 15). Assim como observado para a CTC na camada 0,00-0,10, a diminuição pode estar relacionada com menores teores de matéria orgânica no solo nesse período.

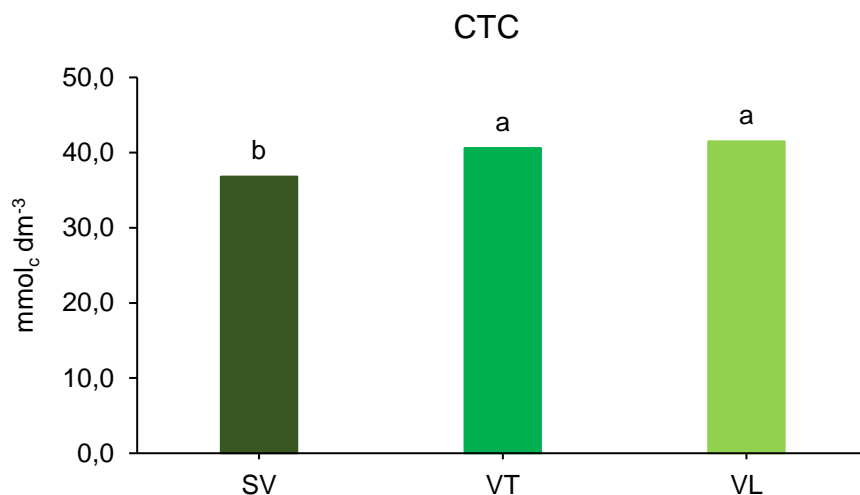


Figura 14: Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para aplicação de vinhaça (SV, VT e VL) em relação a CTC do solo arenoso na camada 0,10-0,20 m. Letras minúsculas iguais indicam que não há diferença entre aplicações de vinhaça.

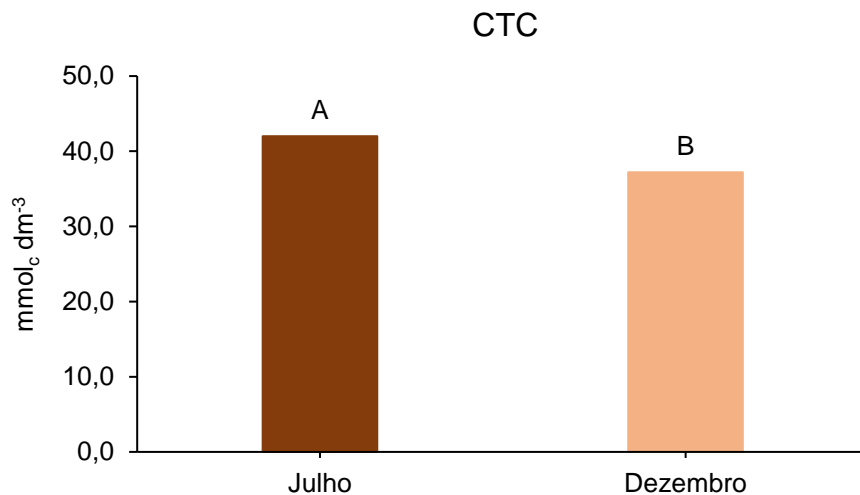


Figura 15: Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para período de amostragem (Julho, primeiro período; Dezembro, segundo período) em relação a CTC do solo arenoso na camada 0,10-0,20 m. Letras maiúsculas diferentes indicam diferença entre os períodos de amostragem.

A vinhaça não contribui para o aporte de carbono orgânico tanto no solo argiloso, quanto no solo arenoso nas duas camadas avaliadas. A vinhaça possui em sua composição a matéria orgânica, contudo, a fonte de carbono é solúvel e prontamente disponível para os microrganismos do solo (Prata et al., 2001) dificultando seu acúmulo no solo. O aumento nos teores de carbono orgânico no solo pode ocorrer, mas os resultados geralmente indicam que o acúmulo ocorre após alguns anos de sucessivas aplicações de vinhaça (Cardoso et al., 2021; Gravina et al., 2021; Jiang et al., 2012), o que não ocorreu no presente trabalho, onde a vinhaça foi aplicada pela primeira vez nas áreas experimentais.

#### 4.2 Agregação do solo

No solo argiloso, a aplicação de vinhaça proporcionou diferença significativa para o atributo índice de estabilidade de agregados (IEA) na camada 0,00-0,10 m e houve interação significativa entre aplicação da vinhaça e período de amostragem do solo para o IEA na camada 0,10-0,20 m (Tabela 5).

Na camada 0,00-0,10 do solo sob o tratamento SV observou-se menor valor de IEA em relação aos valores de IEA do solo sob VT e VL, que não diferiram entre si (Figura 16). Esses resultados indicam, independentemente do método de aplicação,

Tabela 5. Análise do modelo linear generalizado (GLM) ao nível de 5% de probabilidade para diâmetro médio ponderado dos agregados do solo (DMP), massa de agregados (MA) com diâmetro > 2 mm (MA > 2), MA com diâmetro entre 2 e 1 mm (MA 2 - 1), MA com diâmetro entre 1 e 0,500 mm (MA 1 - 0,5), MA com diâmetro < 0,500 mm (MA < 0,5) e índice de estabilidade dos agregados do solo (IEA) em função da aplicação de vinhaça e do período de amostragem em solo em duas camadas do solo argiloso.

SOLO ARGILOSO												
0,00-0,10 m												
Causas de Variação	DMP		MA > 2		MA 2 - 1		MA 1 - 0,5		MA < 0,5		IEA	
	F	Valor-p	F	Valor-p	F	Valor-p	F	Valor-p	F	Valor-p	F	Valor-p
Aplicação de vinhaça (AV)	1,03	0,361	0,86	0,425	1,78	0,176	1,08	0,343	1,03	0,362	12,92	<0,001*
Período Amostragem (PA)	26,35	<0,001*	26,84	<0,001*	5,52	0,022*	17,00	<0,001*	31,32	<0,001*	3,41	0,070
AV x PA	2,25	0,115	2,04	0,138	1,28	0,285	2,07	0,135	1,86	0,165	0,09	0,911
0,10-0,20 m												
Causas de Variação	DMP		MA > 2		MA 2 - 1		MA 1 - 0,5		MA < 0,5		IEA	
	F	Valor-p	F	Valor-p	F	Valor-p	F	Valor-p	F	Valor-p	F	Valor-p
Aplicação de vinhaça (AV)	0,40	0,666	0,34	0,707	0,71	0,493	0,35	0,700	0,188	0,828	11,71	<0,001*
Período Amostragem (PA)	22,17	<0,001*	21,39	<0,001*	4,69	0,034*	10,22	0,002*	26,47	<0,001*	5,71	0,020*
AV x PA	0,16	0,844	0,21	0,810	0,11	0,893	0,006	0,993	0,51	0,602	4,11	0,021*

\* significativo a 5% de probabilidade.

a vinhaça contribuiu para a estabilidade dos agregados do solo argiloso. Hoarau et al. (2018) observaram que a vinhaça, por conter matéria orgânica na sua composição, afeta diretamente a comunidade microbiana do solo e afeta indiretamente os atributos físicos do solo. Segundo os autores, o maior teor de carbono orgânico, proporcionado pela adição de vinhaça no solo, pode estimular a atividade microbiana e a secreção de polissacarídeos refletindo na maior estabilização dos agregados do solo. A vinhaça também possui compostos orgânicos que cimentam os microagregados e também favorecem a floculação da fração argila (Ribeiro et al., 2013).

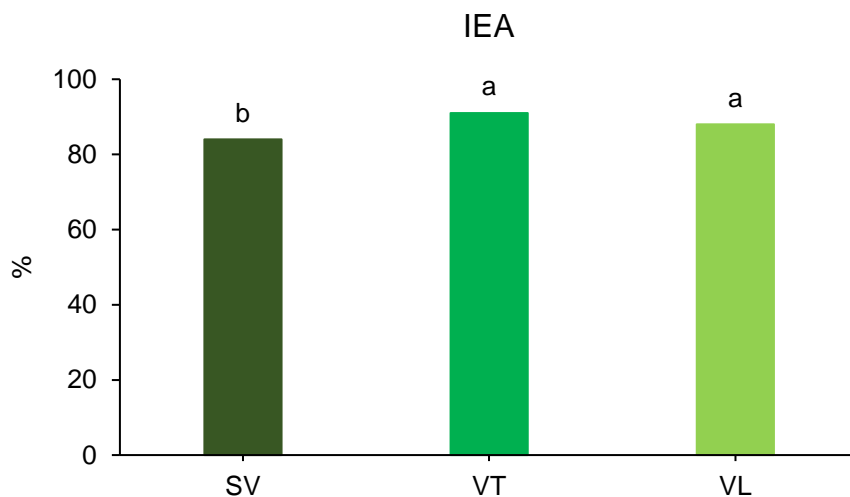


Figura 16: Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para aplicação de vinhaça (SV, VT e VL) em relação ao índice de estabilidade de agregados (IEA) do solo argiloso na camada 0,00-0,10 m. Letras minúsculas iguais indicam que não há diferença entre aplicações de vinhaça.

Jiang et al. (2012) mediram o grau de obliteração dos agregados do solo em água em duas áreas, A e B, com solo de textura argilosa, e observaram, em ambas as áreas, que no tratamento com aplicação de vinhaça a obliteração dos agregados com diâmetro maior que 1 mm foi menor, área A: 50,79% e área B: 55,60%, comparada ao tratamento que não recebeu o subproduto, área A: 74,48% e área B: 77,76%. Os autores relataram que a porcentagem de agregados grandes estáveis em água aumentou após a aplicação contínua de vinhaça, o que pode estar relacionado com a disponibilidade de água no solo e teor de matéria orgânica proporcionado pela aplicação da vinhaça.

Na camada 0,10-0,20 m, o valor de IEA não diferiu entre os três tratamentos no primeiro período de amostragem, mas no segundo observou-se menor valor de IEA no solo sob o tratamento SV em relação a VT e VL, que não diferiram (Figura 17). Por meio desses resultados fica evidente que o efeito da aplicação da vinhaça na estabilidade dos agregados no solo argiloso ocorreu ao longo do tempo, tanto no método de aplicação em área total, quanto no método de aplicação localizada da vinhaça, pois não houve diferença dos valores de IEA entre os três tratamentos na primeira amostragem, ficando clara a diferença entre os valores na segunda amostragem com IEA de 76% no solo sob SV, 85% no solo sob VT e 82% no solo sob VL.

Neste sentido, compreende-se que a vinhaça contribuiu para a estabilidade dos agregados nas duas camadas do solo de forma indireta, pois a adição da vinhaça no solo contribui diretamente com o aumento na atividade microbiana, por ser fonte de matéria orgânica (Prata et al., 2001; Hoarau et al., 2018), devido ao fornecimento de energia e carbono solúvel prontamente disponível aos microrganismos (Prata et al., 2001). O aumento da atividade microbiana e o crescimento das raízes, por sua vez, contribuem diretamente com a estabilidade dos agregados do solo por meio do emaranhado físico de raízes e hifas de fungos (Tisdall e Oades, 1982) e pela deposição de mucilagens de raízes e microrganismos (Tisdall e Oades, 1982; Oades, 1993; Vezzani et al., 2018).

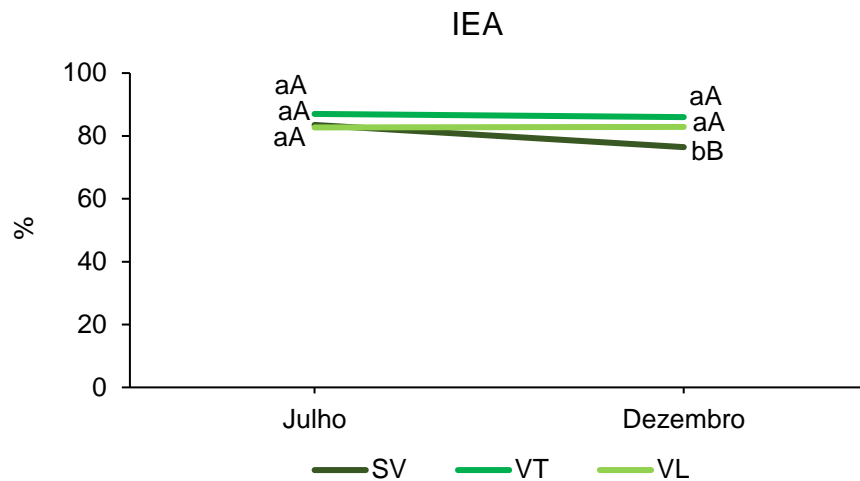


Figura 17: Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para a interação entre aplicação de vinhaça (SV, VT e VL) e período de amostragem (Julho, primeiro período; Dezembro, segundo período) do índice de estabilidade de agregados (IEA) do solo argiloso na camada 0,10-0,20 m. Letras minúsculas iguais indicam que não há diferença entre aplicações de vinhaça em cada período de amostragem e letras maiúsculas iguais indicam que não há diferença na aplicação de vinhaça entre os dois períodos de amostragem.

Além disso, observou-se também que por ser um subproduto líquido, a vinhaça pode então percolar por camadas mais profundas do solo, diferentemente da palhada da cana-de-açúcar que também é fonte de matéria orgânica, mas que dificilmente é depositada abaixo dos dez centímetros do solo, pois sua deposição ocorre na superfície do solo em decorrência da colheita mecanizada da cana-de-açúcar.

Esse fato pode explicar os maiores valores de IEA no solo sob VT e VL na camada 0,10-0,20 m, pois observou-se que em ambos os métodos de aplicação houve a infiltração de vinhaça pelo menos até a camada de vinte centímetros, contribuindo assim com a atividade microbiana. Já o menor valor de IEA no solo sob SV na camada 0,10-0,20 m pode indicar menor atividade microbiana devido a menor quantidade de matéria orgânica presente nesta camada.

Em relação aos outros atributos relacionados à agregação do solo: diâmetro médio ponderado dos agregados do solo (DMP), massa de agregados (MA) com diâmetro maior que 2 mm (MA > 2), MA com diâmetro entre 2 e 1 mm (MA 2-1), MA com diâmetro entre 1 e 0,5 mm (MA 1-0,5) e MA com diâmetro menor que 0,5 mm (MA < 0,5), observou-se diferença significativa somente para o período de amostragem, nas duas camadas avaliadas (Tabela 5).

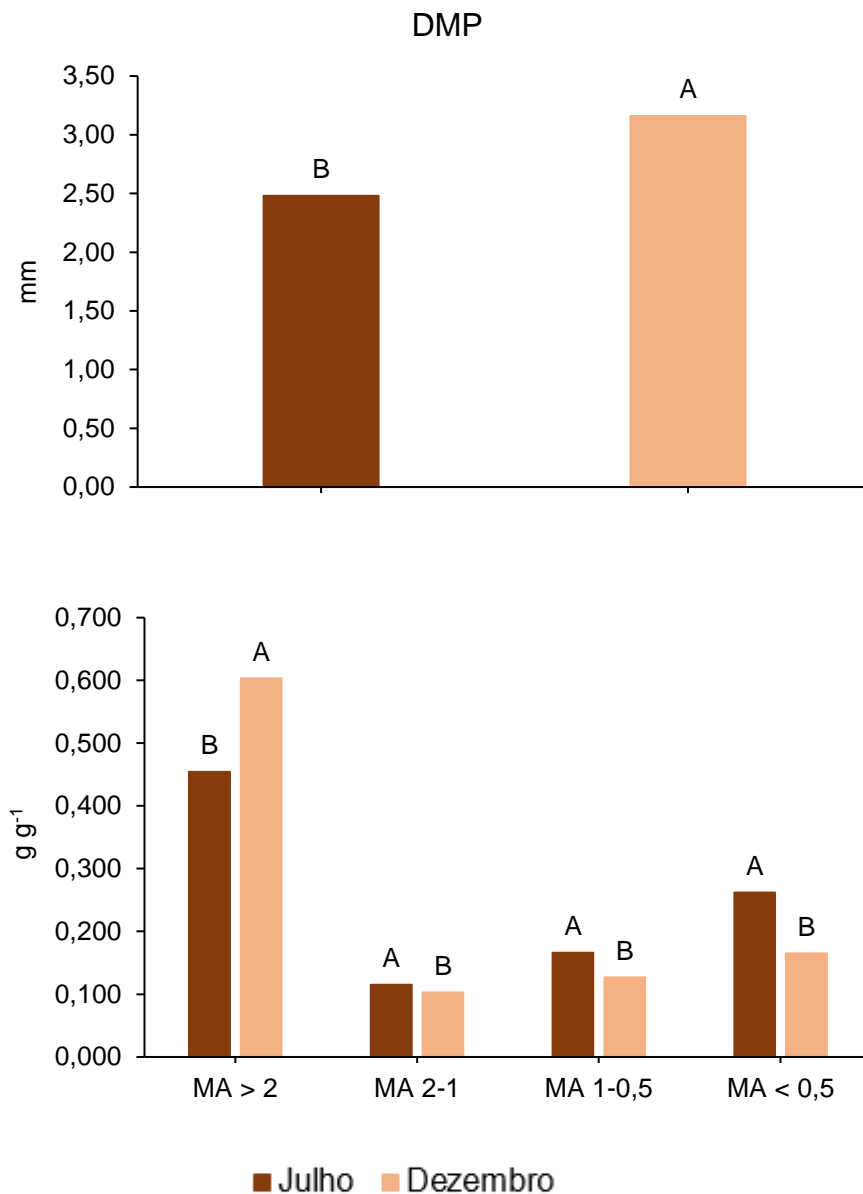


Figura 18: Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para período de amostragem (Julho, primeiro período; Dezembro, segundo período) em relação ao diâmetro médio ponderado dos agregados (DMP) e Massa de agregados (MA) do solo argiloso na camada 0,00-0,10 m. Letras maiúsculas diferentes indicam diferença entre os períodos de amostragem.

Acerca da formação dos agregados, observou-se que nas duas camadas do solo argiloso, independentemente da aplicação de vinhaça, os valores de DMP e MA > 2 foram maiores e os valores de MA 2-1, MA 1-0,5 e MA < 0,5 foram menores na segunda amostragem do solo em relação a primeira amostragem (Figura 18 e 19). Esses resultados mostram que à medida que ocorreu o processo de agregação do

solo, a MA < 2 mm diminuiu, ao passo que agregados maiores que 2 mm foram formados.

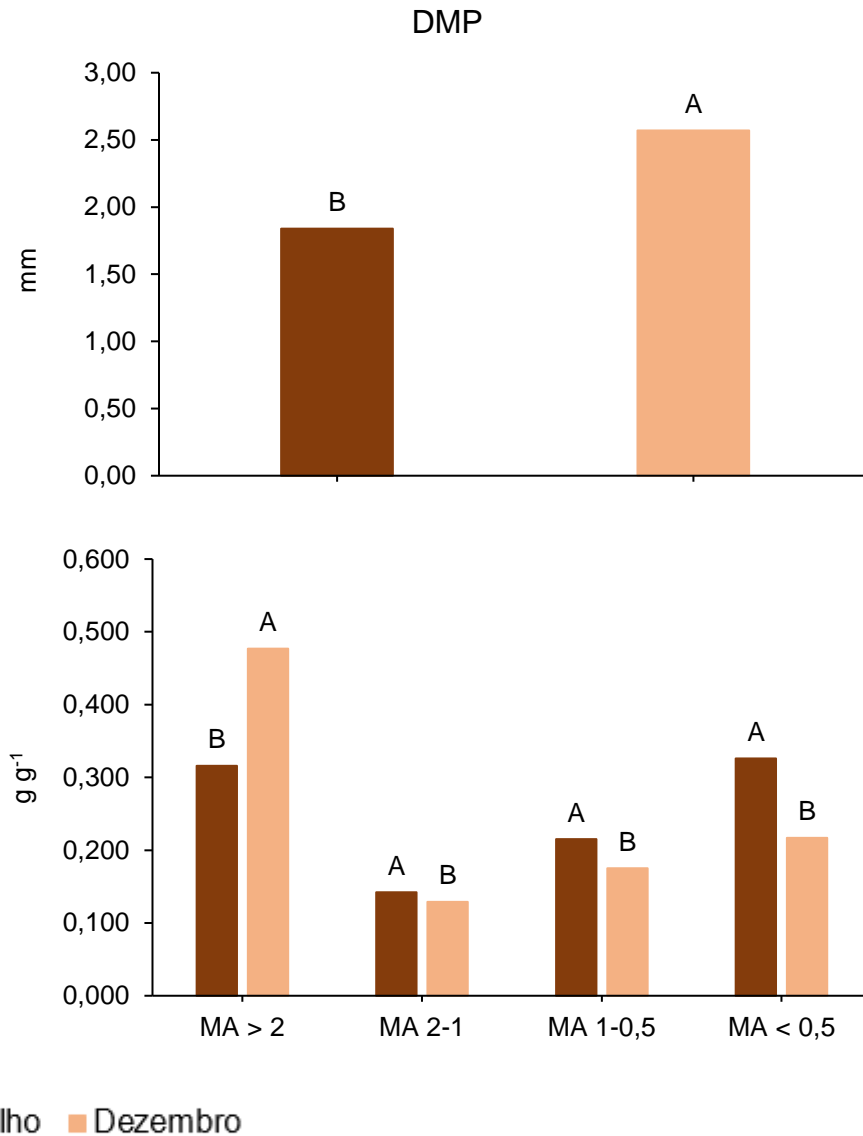


Figura 19: Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para período de amostragem (Julho, primeiro período; Dezembro, segundo período) em relação ao diâmetro médio ponderado dos agregados (DMP) e Massa de agregados (MA) do solo argiloso na camada 0,10-0,20 m. Letras maiúsculas diferentes indicam diferença entre os períodos de amostragem.

A formação dos macroagregados do solo acontece pela união de microagregados durante o crescimento das raízes de plantas vivas e hifas de fungos rizosféricos, considerados agentes de ligação temporários, no processo conhecido

como hierarquia dos agregados (Tisdall e Oades, 1982; Vezzani e Mielniczuk, 2011a). Outro processo de formação de macroagregados ocorre quando microagregados e partículas simples interagem com polissacarídeos extracelulares produzidos ao redor de fragmentos de plantas em decomposição e colônias de bactérias (Vezzani e Mielniczuk, 2011a).

Os resultados mostraram que quanto a formação dos agregados, não houve diferença entre os três tratamentos no solo argiloso. Portanto, entende-se que a contribuição para a formação dos agregados foi proveniente sobretudo do crescimento radicular da cana-de-açúcar e do aporte de matéria orgânica derivada da palhada resultante da colheita mecanizada e presente nos três tratamentos. O aporte de matéria orgânica no solo provém de diferentes fontes orgânicas, seja pela adição de subprodutos, como a vinhaça, como pela deposição de resíduos orgânicos vegetais na superfície do solo. Após a adição de matéria orgânica no solo, há melhorias na agregação devido ao aumento da biomassa microbiana e aos metabólitos sintetizados durante a mineralização da matéria orgânica (Tisdall, 1991; Oades, 1993).

Os maiores valores de DMP e  $MA > 2$  foram observados na segunda amostragem do solo, cinco meses após a colheita da cana-de-açúcar (Figura 18 e 19). Castioni et al. (2018), avaliaram a agregação de um Latossolo de textura argilosa e constataram que quatro anos de remoção total da palhada reduziu a agregação do solo na camada 0,10-0,20 m, no tratamento com remoção total o DMP foi de 1,64 mm e no tratamento sem remoção da palhada o DMP foi de 2,68 mm.

Segundo Carvalho et al. (2013), a palhada da cana-de-açúcar deixada sobre a superfície do solo após a colheita, e o sistema radicular, são as principais entradas de carbono orgânico nos canaviais. A celulose e a hemicelulose, juntamente com açúcares e proteínas presentes na palhada da cana-de-açúcar são facilmente decomponíveis pelos microrganismos do solo, deste modo, grandes quantidades de palha fornecem maior quantidade de carbono e energia para os microrganismos do solo, resultando em maior abundância e atividade microbiana (Pimentel et al., 2019) que, por sua vez, libera compostos extracelulares contribuindo para a união dos agregados.

Em relação ao solo arenoso, na camada 0,00-0,10 m, houve interação significativa para os atributos relacionados à agregação do solo, DMP,  $MA > 2$ ,  $MA 2-$

1, MA 1-0,5 e IEA (Tabela 6). A vinhaça e o período de amostragem proporcionaram diferença significativa para o atributo MA < 0,5 (Tabela 6). Ao contrário do que ocorreu no solo argiloso, no solo arenoso os valores de DMP, MA > 2, MA 2-1, MA 1-0,5 e IEA diferiram entre os tratamentos logo no primeiro período de amostragem (Figura 20).

Os valores de DMP, MA > 2 e IEA foram maiores, enquanto os valores de MA 2-1, MA 1-0,5 foram menores no solo sob VT e VL em relação aos valores encontrados no solo sob SV no primeiro período de amostragem. (Figura 20). No segundo período de amostragem, os atributos da agregação do solo não diferiram entre os tratamentos (Figura 20).

Esses resultados indicam que a vinhaça contribuiu de forma indireta na estabilidade dos agregados e na formação de agregados maiores no solo arenoso, pois essa contribuição foi observada logo na primeira amostragem do solo.

Quando ocorreu a aplicação da vinhaça, o solo estava coberto pela palhada da cana-de-açúcar proveniente da colheita mecanizada, e havia o sistema radicular da cana soca em desenvolvimento, ou seja, a biota do solo tinha disponível duas fontes orgânicas, tanto a vinhaça, fonte de carbono solúvel, responsável por estimular e aumentar a atividade microbiana do solo, quanto o resíduo vegetal representado pela palhada e também o sistema radicular da cana-de-açúcar. Segundo Vezzani e Mielniczuk (2011b), o favorecimento do aporte vegetal e da biota edáfica é fundamental para suprir o sistema solo de compostos orgânicos, de hifas e de raízes, os quais constituem os agentes ligantes e formadores dos agregados do solo.

Neste sentido, a presença da vinhaça no solo pode ter estimulado a atividade microbiana, que tinha disponível material vegetal para a decomposição, além de estimular o crescimento radicular da cana-de-açúcar por ser um subproduto líquido constituído por íons e 93% de água. Desta forma, a vinhaça, em ambos os métodos de aplicação (VT e VL), pode ter contribuído de forma indireta com a constituição de agentes ligantes fundamentais para a estabilidade e formação dos agregados no solo.

Tabela 6. Análise do modelo linear generalizado (GLM) ao nível de 5% de probabilidade para diâmetro médio ponderado dos agregados do solo (DMP), massa de agregados (MA) com diâmetro > 2 mm (MA > 2), MA com diâmetro entre 2 e 1 mm (MA 2 - 1), MA com diâmetro entre 1 e 0,500 mm (MA 1 - 0,5), MA com diâmetro < 0,500 mm (MA < 0,5) e índice de estabilidade dos agregados do solo (IEA) em função da aplicação de vinhaça e do período de amostragem em solo em duas camadas do solo arenoso.

SOLO ARENOSO												
0,00-0,10 m												
Causas de Variação	DMP		MA > 2		MA 2 – 1		MA 1 – 0,5		MA < 0,5		IEA	
	F	Valor-p	F	Valor-p	F	Valor-p	F	Valor-p	F	Valor-p	F	Valor-p
Aplicação de vinhaça (AV)	6,24	0,003*	6,33	0,003*	3,74	0,030*	4,57	0,014*	4,87	<b>0,011*</b>	7,01	0,001*
Período Amostragem (PA)	16,80	<0,001*	24,02	<0,001*	55,91	<0,001*	16,72	<0,001*	6,11	<b>0,016*</b>	0,03	0,847
AV x PA	5,18	<b>0,008*</b>	6,09	<b>0,004*</b>	5,90	<b>0,004*</b>	5,98	<b>0,004*</b>	3,00	0,058	5,59	<b>0,006*</b>
0,10-0,20 m												
Causas de Variação	DMP		MA > 2		MA 2 – 1		MA 1 – 0,5		MA < 0,5		IEA	
	F	Valor-p	F	Valor-p	F	Valor-p	F	Valor-p	F	Valor-p	F	Valor-p
Aplicação de vinhaça (AV)	0,73	0,484	1,21	0,305	8,88	<b>&lt;0,001*</b>	0,41	0,663	0,23	0,791	1,32	0,276
Período Amostragem (PA)	16,04	<b>&lt;0,001*</b>	23,38	<b>&lt;0,001*</b>	64,62	<b>&lt;0,001*</b>	14,69	<b>&lt;0,001*</b>	4,14	<b>0,046*</b>	2,26	0,138
AV x PA	0,74	0,480	0,92	0,401	1,24	0,297	0,80	0,452	0,37	0,692	0,89	0,418

\* significativo a 5% de probabilidade.

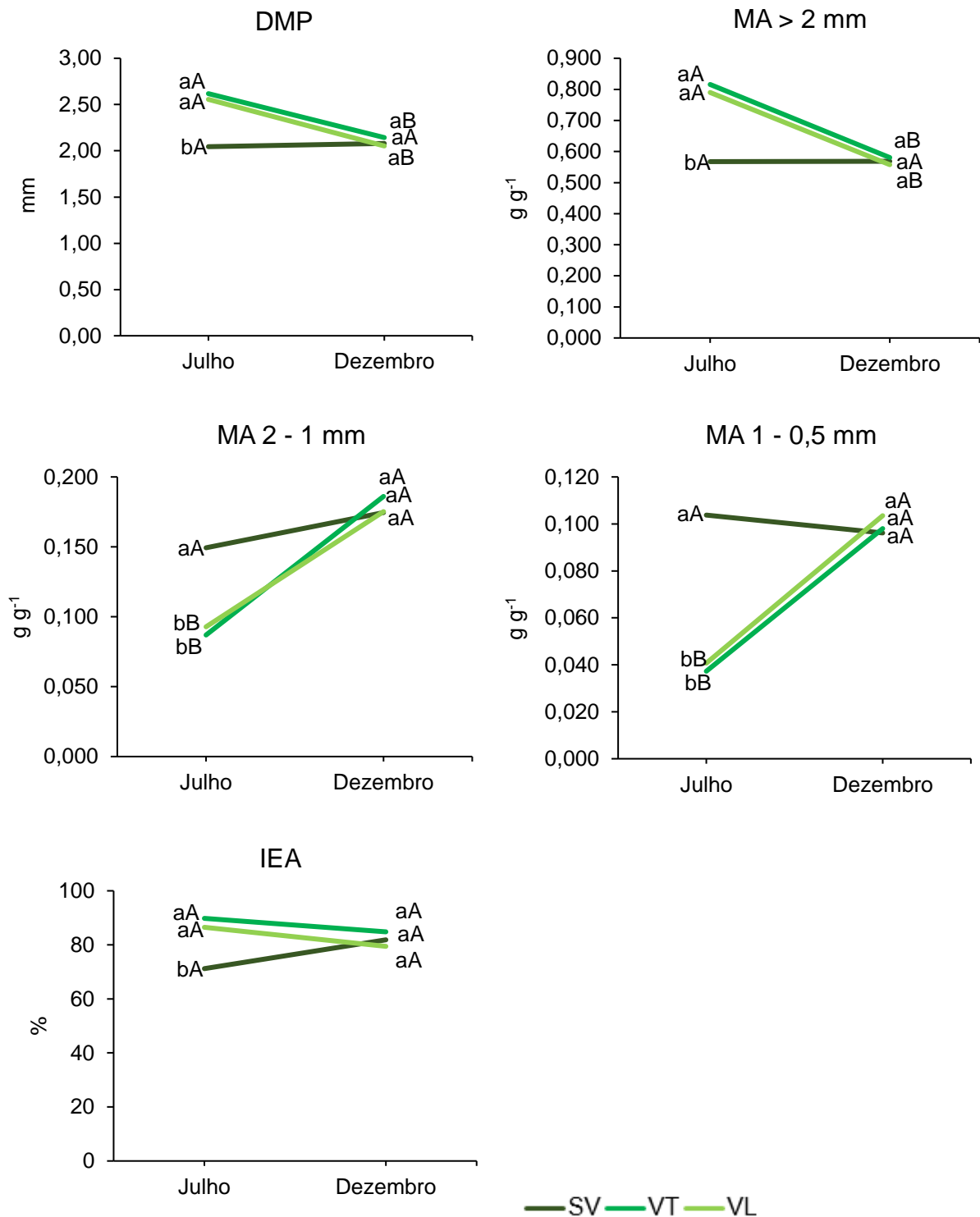


Figura 20: Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para a interação entre aplicação de vinhaça (SV, VT e VL) e período de amostragem (Julho, primeiro período; Dezembro, segundo período) do DMP, Massa de agregados (MA) e IEA solo arenoso na camada 0,00-0,10 m. Letras minúsculas iguais indicam que não há diferença entre aplicações de vinhaça em cada período de amostragem e letras maiúsculas iguais indicam que não há diferença na aplicação de vinhaça entre os dois períodos de amostragem

Os valores de DMP,  $MA > 2$  e IEA foram maiores, enquanto os valores de  $MA_{2-1}$ ,  $MA_{1-0,5}$  foram menores no solo sob VT e VL em relação aos valores encontrados no solo sob SV no primeiro período de amostragem. (Figura 20). No segundo período de amostragem, os atributos da agregação do solo não diferiram entre os tratamentos (Figura 20).

Esses resultados indicam que a vinhaça contribuiu de forma indireta na estabilidade dos agregados e na formação de agregados maiores no solo arenoso, pois essa contribuição foi observada logo na primeira amostragem do solo.

Quando ocorreu a aplicação da vinhaça, o solo estava coberto pela palhada da cana-de-açúcar proveniente da colheita mecanizada, e havia o sistema radicular da cana soca em desenvolvimento, ou seja, a biota do solo tinha disponível duas fontes orgânicas, tanto a vinhaça, fonte de carbono solúvel, responsável por estimular e aumentar a atividade microbiana do solo, quanto o resíduo vegetal representado pela palhada e também o sistema radicular da cana-de-açúcar. Segundo Vezzani e Mielniczuk (2011b), o favorecimento do aporte vegetal e da biota edáfica é fundamental para suprir o sistema solo de compostos orgânicos, de hifas e de raízes, os quais constituem os agentes ligantes e formadores dos agregados do solo.

Neste sentido, a presença da vinhaça no solo pode ter estimulado a atividade microbiana, que tinha disponível material vegetal para a decomposição, além de estimular o crescimento radicular da cana-de-açúcar por ser um subproduto líquido constituído por íons e 93% de água. Desta forma, a vinhaça, em ambos os métodos de aplicação (VT e VL), pode ter contribuído de forma indireta com a constituição de agentes ligantes fundamentais para a estabilidade e formação dos agregados no solo.

A maior presença dos agentes ligantes pode ter contribuído para que agregados com diâmetro de 2 a 0,5 mm se unissem para formar agregados com diâmetro maior que 2 mm, uma vez que houve a diminuição da massa de agregados de 2 a 0,5 mm e aumento da massa de agregados maior que 2 mm e conseqüentemente maior valor de DMP na camada 0,00-0,10 m. A formação de agregados maiores que 2 mm acontece pela ação mecânica das raízes e hifas de fungos, que, quando se desenvolvem no solo, entrelaçam agregados menores que 2 mm (Vezzani e Mielniczuk, 2011b).

Como observado, a vinhaça pode ter contribuído indiretamente na formação e estabilidade dos agregados, mas as plantas têm contribuição direta, pois fornecem energia e carbono para a atividade microbiana, raízes e matéria orgânica particulada contribuindo assim, para a formação dos macroagregados. Além disso, os resíduos das plantas são fonte de alimento para macro e mesorganismos do solo, os quais excretam compostos orgânicos que atuam como agentes ligantes na classe de agregados maior que 2 mm e realizam a quebra física inicial dos resíduos orgânicos (Vezzani e Mielniczuk, 2011b). Acerca de solos arenosos, as partículas de quartzo, além de servir como núcleo de cimentação das interações organominerais, podem também ser englobadas por hifas e raízes, compondo a estrutura dos macroagregados (Vezzani e Mielniczuk, 2011b).

No entanto, a contribuição da vinhaça para a estabilidade e formação de agregados foi observada somente no primeiro período de amostragem, pois no segundo período, cinco meses após a aplicação da vinhaça, os três tratamentos não apresentaram diferença significativa em relação aos atributos DMP, MA > 2, MA 2-1, MA 1-0,5 e IEA na camada 0,00-0,10 m (Figura 20). Logo, observou-se que a adição de vinhaça no solo arenoso sob os tratamentos VT e VL contribuiu para maior estabilidade e formação de agregados na camada 0,00-0,10 m após a aplicação do subproduto. Segundo Christofolletti et al. (2013), a aplicação da vinhaça de cana-de-açúcar no solo provoca alterações temporárias na população de microrganismos do solo, resultando em alterações de processos biológicos e químicos como a decomposição da matéria orgânica e facilita indiretamente a ação dos microrganismos na aglutinação de partículas do solo, contribuindo para a estruturação do solo.

Observando os atributos do solo em cada tratamento na camada 0,00-0,10 m, verificou-se que os valores de DMP e MA > 2 cinco meses após a aplicação da vinhaça diminuíram e os valores de MA 2-1 e MA 1-0,5 aumentaram no solo sob VT e VL em relação a primeira amostragem e os valores dos atributos no solo sob SV não diferiram entre os dois períodos de amostragem (Figura 20).

A diminuição do DMP e a maior presença de agregados menor que 2 mm podem indicar menor agregação, ou seja, a destruição de macroagregados. Essa destruição pode ocorrer devido a diminuição da matéria orgânica que é fonte de energia para os microrganismos, que está presente na vinhaça e é resultante da

decomposição da palhada da cana-de-açúcar. Quando a quantidade de energia e material orgânico do solo não é suficiente para suprir a demanda da biota edáfica, os microrganismos acabam utilizando como fonte de energia e carbono os agentes ligantes e a matéria orgânica particulada, dessa forma os macroagregados são os primeiros a serem destruídos (Vezzani e Mielniczuk, 2011b). Isso pode explicar o aumento da massa de agregados menor que 2 mm no solo.

Um segundo ponto a ser observado é que nos solos de textura arenosa o teor de matéria orgânica é geralmente baixo, pois normalmente a matéria orgânica está associada principalmente a partículas de argila ou protegida fisicamente pelos agregados do solo da decomposição. Assim, nos solos com maiores quantidades de areia a matéria orgânica está pouco protegida resultando em rápida renovação (Puttaso et al., 2011) o que dificulta a formação e a estabilidade dos agregados no solo.

Quanto ao atributo  $MA < 0,5$  observou-se maiores valores no solo sob o tratamento SV em relação ao tratamento VT (Figura 21). O solo sob VL apresentou  $MA < 0,5$  em quantidade intermediária, pois não diferiu dos valores encontrados nos tratamentos SV e VT (Figura 21). Esses resultados indicam que a vinhaça pode contribuir com a formação dos agregados, pois valores menores de  $MA < 0,5$  indicam menor presença de agregados com diâmetro menor que 0,5 mm no solo, que, por sua vez, uniram-se no processo de agregação dando origem a agregados de maior diâmetro.

Ainda foi observado que a  $MA < 0,5$  foi menor no primeiro período de amostragem em relação ao segundo período (Figura 22). No primeiro período houve maior formação de agregados maiores, o que refletiu na menor  $MA < 0,5$ . Já no segundo período de amostragem o aumento da  $MA < 0,5$  indica menor agregação do solo, possivelmente devido a menor oferta de matéria orgânica no solo.

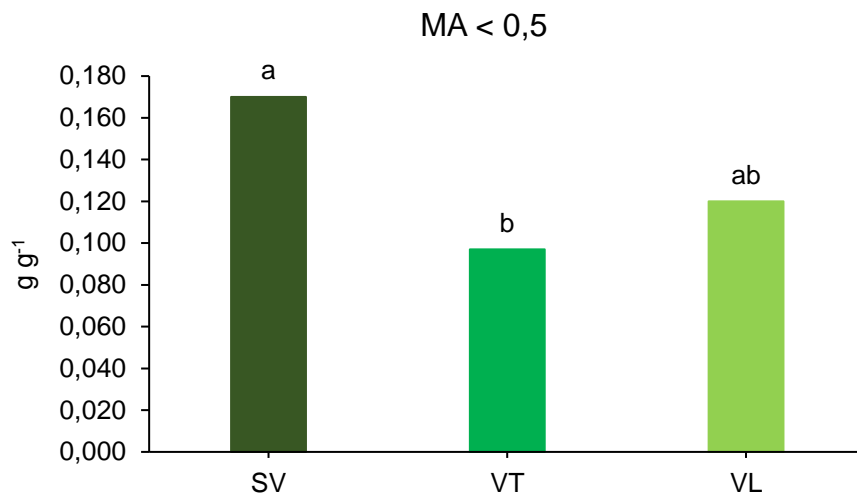


Figura 21: Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para aplicação de vinhaça (SV, VT e VL) em relação a Massa de agregados (MA) < 0,500 mm do solo arenoso na camada 0,00-0,10 m. Letras minúsculas iguais indicam que não há diferença entre aplicações de vinhaça.

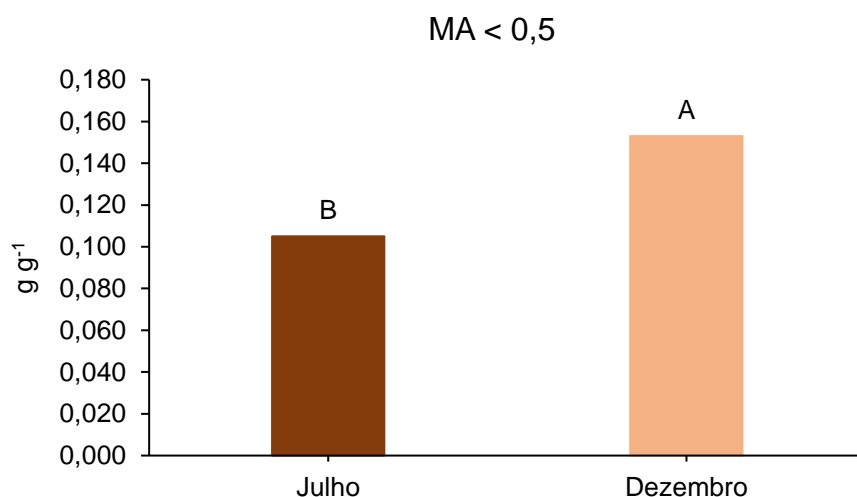


Figura 22: Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para período de amostragem (Julho, primeiro período; Dezembro, segundo período) em relação a Massa de agregados (MA) < 0,500 mm do solo arenoso na camada 0,00-0,10 m. Letras maiúsculas diferentes indicam diferença entre os períodos de amostragem.

Na camada 0,10-0,20 m do solo arenoso, a aplicação de vinhaça assim como o período de amostragem proporcionou diferença significativa para o atributo MA 2-1 (Tabela 6). Os maiores valores de MA 2-1 foram observados no solo sob SV e VT e o menor valor ocorreu no solo sob VL (Figura 23). Segundo os resultados, no solo VL

houve menor quantidade de agregados com diâmetro de 2 a 1 mm, no entanto investigações futuras são importantes para compreender se a aplicação de vinhaça localizada contribuirá para a formação de agregados maior ou menor que 2 mm em solo arenoso sobretudo na camada 0,10-0,20 m.

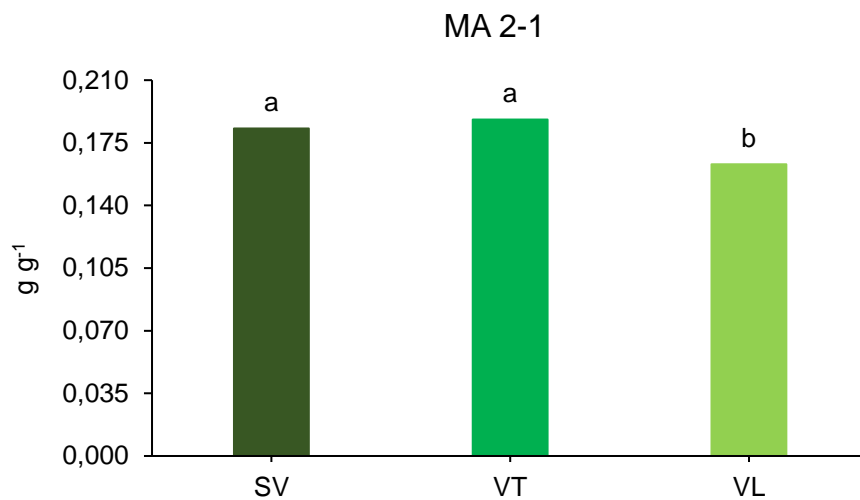


Figura 23: Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para aplicação de vinhaça (SV, VT e VL) em relação a Massa de agregado (MA) 2-1 mm do solo arenoso na camada 0,10-0,20 m. Letras minúsculas iguais indicam que não há diferença entre aplicações de vinhaça.

Ainda na camada 0,10-0,20 m do solo arenoso, observou-se que de acordo com o período de amostragem, houve diferença significativa para os atributos DMP, MA > 2, MA 1-0,5 e MA < 0,5 (Tabela 6). No primeiro período houve maiores valores de DMP e MA > 2 e menores valores de MA 2-1, MA 1-0,5 e MA < 0,5 no solo arenoso em relação ao segundo período de amostragem na segunda camada do solo (Figura 24). Diferentemente do que ocorreu na camada 0,00-0,10 m, observou-se que a aplicação da vinhaça não contribuiu para maior formação de agregados na camada 0,10-0,20 m, uma vez que não houve diferença entre os tratamentos.

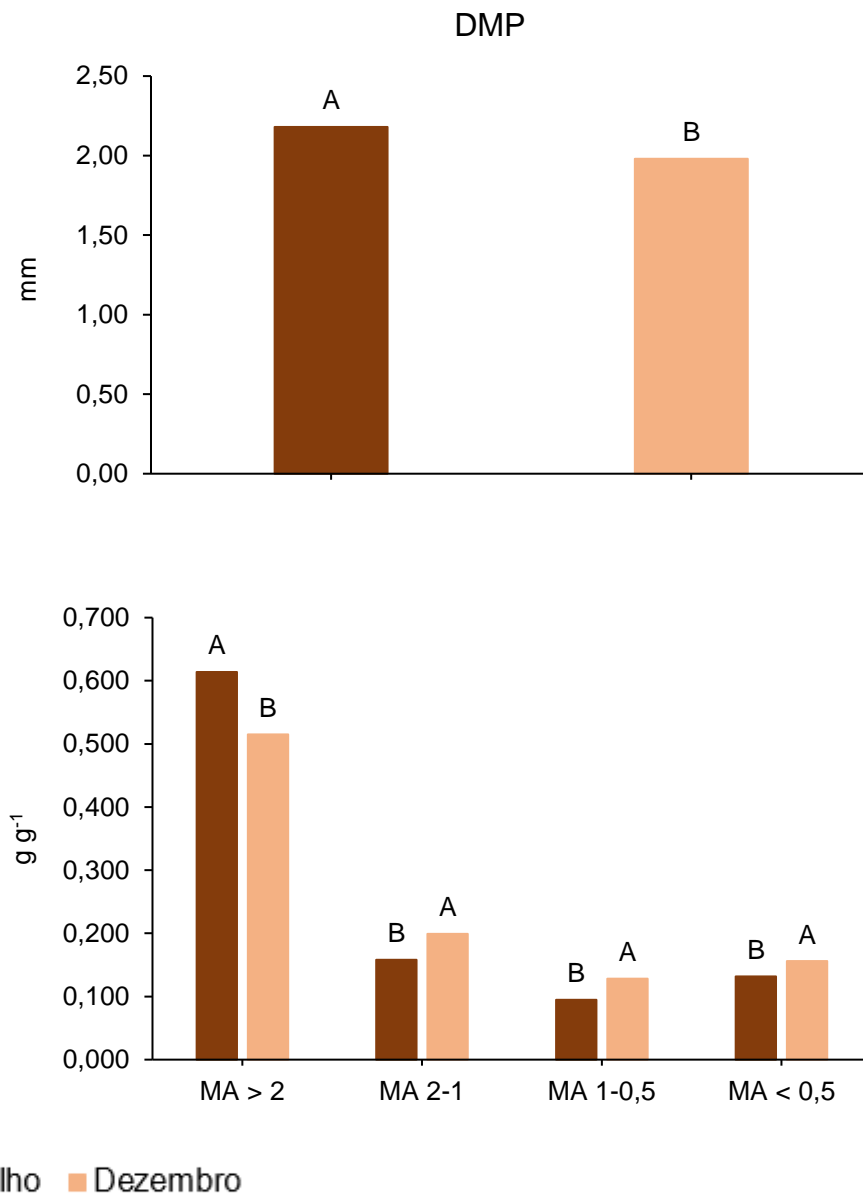


Figura 24: Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para período de amostragem (Julho, primeiro período; Dezembro, segundo período) em relação ao diâmetro médio ponderado dos agregados (DMP) e Massa de agregados (MA) do solo arenoso na camada 0,10-0,20 m. Letras maiúsculas diferentes indicam diferença entre os períodos de amostragem.

O que pode ter contribuído para a formação de agregados com diâmetro maior que 2 mm foram as raízes da cana-de-açúcar e hifas de fungos que são agentes de natureza transitória (Tisdall e Oades 1982). Esses agentes dependem do crescimento do sistema radicular, ou seja, dependem da entrada contínua de material orgânico e atividade microbiana para promoverem a formação e estabilidade dos agregados

(Tisdall e Oades 1982). No segundo período de amostragem houve maior massa de agregados menores que 2 mm, menor DMP que, assim como observado para a camada 0,00-0,10 m, pode ter ocorrido devido a menor aporte de material orgânico no solo, fonte de energia para os microrganismos.

### 4.3 Porosidade do solo

Referente aos atributos relacionados a porosidade do solo argiloso, observou-se na camada 0,00-0,10 m interação da aplicação de vinhaça e período de amostragem para a macroporosidade e para a densidade do solo ( $D_s$ ), enquanto que o período de amostragem proporcionou diferença significativa para a resistência à penetração (RP) (Tabela 7).

A macroporosidade foi igual no solo argiloso sob VT ( $0,163 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) e VL ( $0,155 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), e os valores da macroporosidade nesses tratamentos foram maiores em relação ao tratamento SV ( $0,091 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) no primeiro período de amostragem (Figura 25). Diferentemente dos resultados apresentados, Camilotti et al. (2006) não observaram alteração da macroporosidade do solo de textura argilosa com aplicações de vinhaça com doses de  $435 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  e  $870 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  e associaram esse resultado ao fato da aplicação de vinhaça não ter aumentado a matéria orgânica do solo.

Os maiores valores de macroporosidade nos tratamentos VT e VL podem estar associados com a maior estabilidade dos agregados nesse período, pois o aumento na quantidade de agregados estáveis em água contribui para a distribuição de micro e macroporos do solo (Prado et al., 2014). Como observado, os maiores valores de IEA para o solo argiloso na camada 0,00-0,10 m ocorreram no solo sob os tratamentos VT e VL (Figura 16), pois a matéria orgânica contida na vinhaça estimula a atividade microbiana e a secreção de polissacarídeos refletindo em maior estabilidade do solo (Hoarau et al., 2018). A vinhaça também tem propriedade cimentante devido aos seus compostos orgânicos que cimentam os microagregados e também favorecem a floculação da argila (Ribeiro et al., 2013).

Portanto, observou-se que a contribuição da vinhaça para a macroporosidade ocorreu de forma indireta, uma vez que a vinhaça contribuiu para maior estabilidade dos agregados que foi efetiva para a maior macroporosidade do solo.

Tabela 7. Análise do modelo linear generalizado (GLM) ao nível de 5% de probabilidade para macroporosidade, microporosidade, densidade do solo e resistência do solo à penetração em função da aplicação de vinhaça e do período de amostragem em duas camadas do solo argiloso.

SOLO ARGILOSO									
0,00-0,10 m									
Causas de Variação	Macroporosidade		Microporosidade		Densidade do solo		Resistência à penetração		
	F	Valor-p	F	Valor-p	F	Valor-p	F	Valor-p	
Aplicação de vinhaça (AV)	1,64	0,202	0,84	0,435	2,11	0,131	1,59	0,211	
Período Amostragem (PA)	3,40	0,070	0,20	0,654	10,98	<b>0,001*</b>	9,64	<b>0,003*</b>	
AV x PA	6,35	<b>0,003*</b>	2,02	0,142	6,32	<b>0,003*</b>	4,34	0,017	
0,10-0,20 m									
Causas de Variação	Macroporosidade		Microporosidade		Densidade do solo		Resistência à penetração		
	F	Valor-p	F	Valor-p	F	Valor-p	F	Valor-p	
Aplicação de vinhaça (AV)	0,09	0,905	0,76	0,473	0,88	0,419	0,24	0,785	
Período Amostragem (PA)	36,82	<b>&lt;0,001*</b>	8,36	<b>0,005*</b>	23,14	<b>&lt;0,001*</b>	30,72	<b>&lt;0,001*</b>	
AV x PA	3,17	<b>0,049*</b>	0,98	0,381	1,53	0,224	1,84	0,167	

\* significativo a 5% de probabilidade.

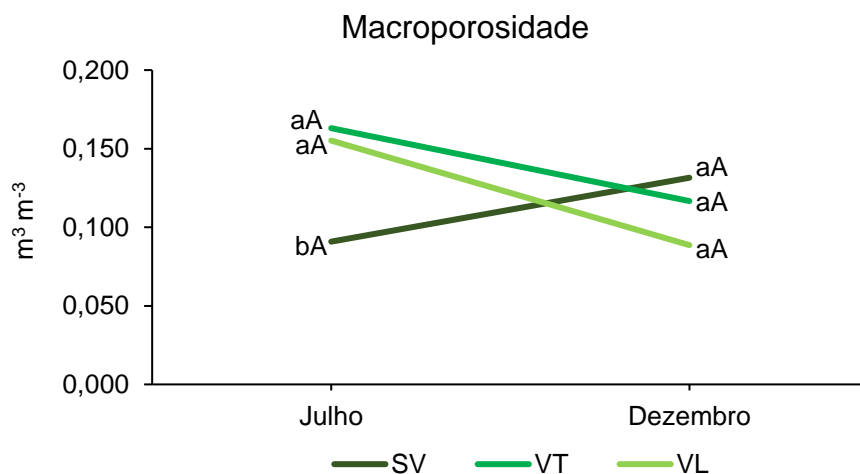


Figura 25: Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para a interação entre aplicação de vinhaça (SV, VT e VL) e período de amostragem (Julho, primeiro período; Dezembro, segundo período) da macroporosidade do solo argiloso na camada 0,00-0,10 m. Letras minúsculas iguais indicam que não há diferença entre aplicações de vinhaça em cada período de amostragem e letras maiúsculas iguais indicam que não há diferença na aplicação de vinhaça entre os dois períodos de amostragem.

No segundo período, não houve diferença dos valores da macroporosidade entre os três tratamentos (Figura 25), e observando os valores da macroporosidade em cada tratamento, não constatou-se diferença significativa dos valores do primeiro para o segundo período de amostragem (Figura 25).

Possivelmente, a macroporosidade está relacionada com a formação de agregados, pois na segunda amostragem houve maior formação de agregados maiores que 2 mm no solo sob os três tratamentos (Figura 18), sobretudo devido ao sistema radicular e o aporte de matéria orgânica derivada da palhada, agentes cimentantes presentes no solo dos três tratamentos. A porosidade tem estreita relação com a agregação do solo, uma vez que os poros são os vazios dentro e entre os agregados, ou seja, a quantidade de agregados e o volume de poros estão relacionados (Regelink et al., 2015).

A densidade do solo argiloso no primeiro período de amostragem foi igual nos tratamentos VT ( $1,26 \text{ g cm}^{-3}$ ) e VL ( $1,29 \text{ g cm}^{-3}$ ), contudo a  $D_s$  em VT foi menor comparada a  $D_s$  do tratamento sem aplicação de vinhaça (SV:  $1,40 \text{ g cm}^{-3}$ ) e não diferiu entre os tratamentos VL e SV (Figura 26). Jiang et al. (2012), observaram menor densidade do solo argiloso na área que recebeu a aplicação de vinhaça ( $1,19 \text{ g cm}^{-3}$ ) em relação a área que recebeu somente aplicação de água ( $1,26 \text{ g cm}^{-3}$ ). Contrariamente, Camilotti et al. (2006) não identificaram influência da aplicação de vinhaça na densidade do solo.

Segundo Vasconcelos et al. (2010), a densidade do solo diminui com o aporte de resíduos orgânicos no solo, no entanto, no presente estudo foi a primeira vez que ocorreu a aplicação de vinhaça nas áreas experimentais sob os tratamentos VT e VL. Neste sentido, como não ocorreu aumento nos teores de carbono orgânico do solo, constatou-se que os menores valores de  $D_s$  não foram resultado direto do aporte de matéria orgânica do solo ocasionado pela aplicação de vinhaça, mas resultado da contribuição da vinhaça para a estabilidade dos agregados. Com maior estabilidade dos agregados, houve maior macroporosidade do solo o que resultou em menor densidade do solo na camada 0,00-0,10 m nos tratamentos VT e VL.

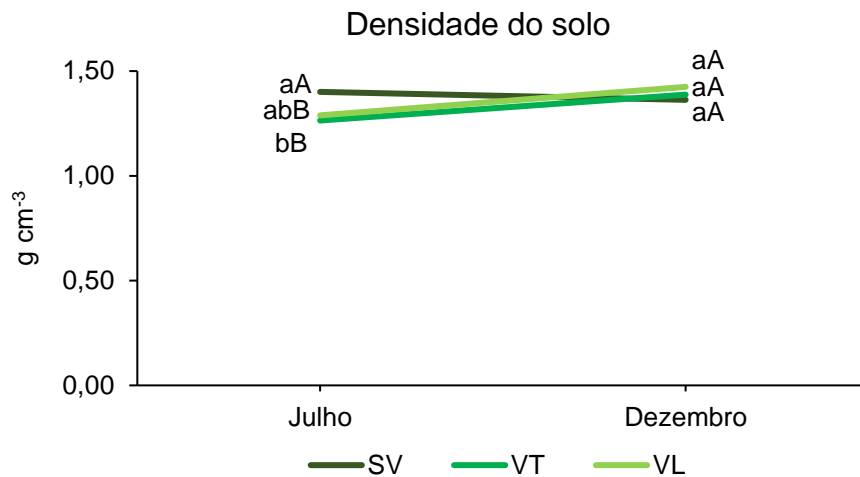


Figura 26: Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para a interação entre aplicação de vinhaça (SV, VT e VL) e período de amostragem (Julho, primeiro período; Dezembro, segundo período) da densidade do solo argiloso na camada 0,00-0,10 m. Letras minúsculas iguais indicam que não há diferença entre aplicações de vinhaça em cada período de amostragem e letras maiúsculas iguais indicam que não há diferença na aplicação de vinhaça entre os dois períodos de amostragem.

No segundo período de amostragem a Ds foi igual nos três tratamentos (Figura 26), como ocorreu para a macroporosidade, reforçando a interação desses dois atributos do solo. Observando a Ds em cada tratamento, constatou-se aumentou da densidade do primeiro para o segundo período de amostragem no solo sob os tratamentos VT e VL e no solo sob SV não foi observada alteração da Ds entre os períodos de amostragem. Esses resultados indicam que a maior contribuição da vinhaça, mesmo que de forma indireta, foi para a diminuição da densidade no solo sob os VT e VL assim que aplicada no solo. No entanto, essa contribuição não perdurou até o segundo período de amostragem.

Em relação a RP, observou-se maior valor no segundo período de amostragem do solo em relação ao primeiro período na camada 0,00-0,10 m do solo argiloso (Figura 27), não havendo contribuição da vinhaça para esse atributo. Corroborando esse resultado, Camilotti et al. (2006) e Cardoso et al. (2021) constataram que a RP não foi alterada com a aplicação de vinhaça.

O aumento da RP pode indicar compactação do solo causada pelo tráfego de máquinas e implementos utilizados nas operações de manejo nos canais. Contudo, a compactação pode diminuir com o incremento de matéria orgânica do solo derivada

de compostos orgânicos, como a palhada da cana-de-açúcar, e subprodutos como a vinhaça. No entanto, são importantes sucessivas aplicações de vinhaça para aumentar o aporte de matéria orgânica no solo, e assim contribuir para a condição física do solo (Canellas et al., 2003; Cardoso et al., 2021), pois somente com uma aplicação não foi possível verificar contribuição da vinhaça na diminuição da RP.

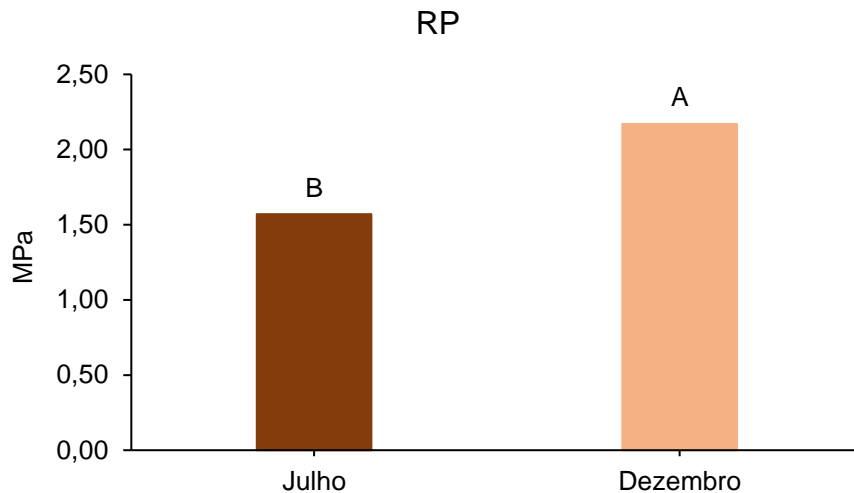


Figura 27: Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para período de amostragem (Julho, primeiro período; Dezembro, segundo período) em relação a resistência do solo à penetração (RP) do solo argiloso na camada 0,00-0,10 m. Letras maiúsculas diferentes indicam diferença entre os períodos de amostragem.

Na camada 0,10-0,20 do solo argiloso houve interação da aplicação de vinhaça com o período de amostragem para a macroporosidade, e o período de amostragem proporcionou diferença significativa para a microporosidade, Ds e RP (Tabela 7).

A macroporosidade foi significativamente igual entre os três tratamentos, tanto no primeiro, quanto no segundo período de amostragem (Figura 28), demonstrando que nessa camada não houve contribuição da vinhaça para esse atributo. Gravina et al. (2021) observaram que na camada 0,10-0,20 m de áreas com um e três anos de cultivo, que receberam aplicação de vinhaça, a macroporosidade foi menor em relação às áreas com cinco, sete e doze anos de cultivo que também receberam a aplicação de vinhaça.

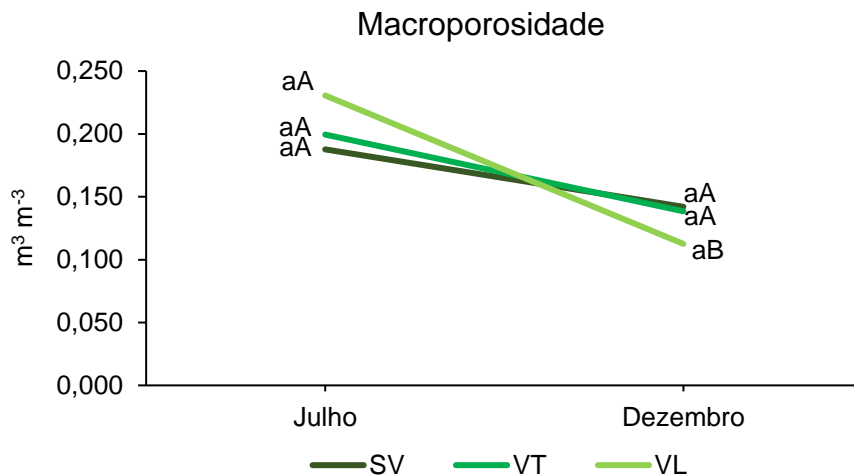


Figura 28: Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para a interação entre aplicação de vinhaça (SV, VT e VL) e período de amostragem (Julho, primeiro período; Dezembro, segundo período) da macroporosidade do solo argiloso na camada 0,10-0,20 m. Letras minúsculas iguais indicam que não há diferença entre aplicações de vinhaça em cada período de amostragem e letras maiúsculas iguais indicam que não há diferença na aplicação de vinhaça entre os dois períodos de amostragem.

Quanto aos valores da macroporosidade em cada tratamento, observou-se diminuição do valor da macroporosidade somente no solo sob VL do primeiro para o segundo período de amostragem, sendo que no primeiro período a macroporosidade foi de  $0,230 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  e no segundo período de  $0,112 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  (Figura 28). Essa diminuição no valor da macroporosidade no solo sob VL pode estar relacionada com a compactação do solo e consequentemente diminuição dos macroporos. A compactação pode ter sido ocasionada pela pressão do conjunto trator e tanque de aplicação localizada. A macroporosidade nos tratamentos SV e VT não apresentaram diferença significativa do primeiro para o segundo período de amostragem (Figura 28) e, ao contrário do tratamento VL, em VT não há tráfego de máquinas para a aspersão da vinhaça.

Os valores da microporosidade, Ds e RP aumentaram no segundo período de amostragem na camada 0,10-0,20 m do solo argiloso (Figura 29,30 e 31). Os maiores valores de microporosidade no segundo período de amostragem do solo pode estar relacionado com a maior formação de agregados, pois na segunda amostragem do solo houve maior presença de agregados com diâmetro maior que 2 mm, maior DMP o que implica em maior microporosidade. Os macroagregados estáveis exercem

influência nos atributos físicos do solo como macro e microporosidade, velocidade de infiltração de água, densidade do solo, resistência do solo à penetração, entre outros (Schiavo e Colodro, 2012). No entanto, a maior formação de agregados não resultou em menores valores de Ds e RP no solo argiloso.

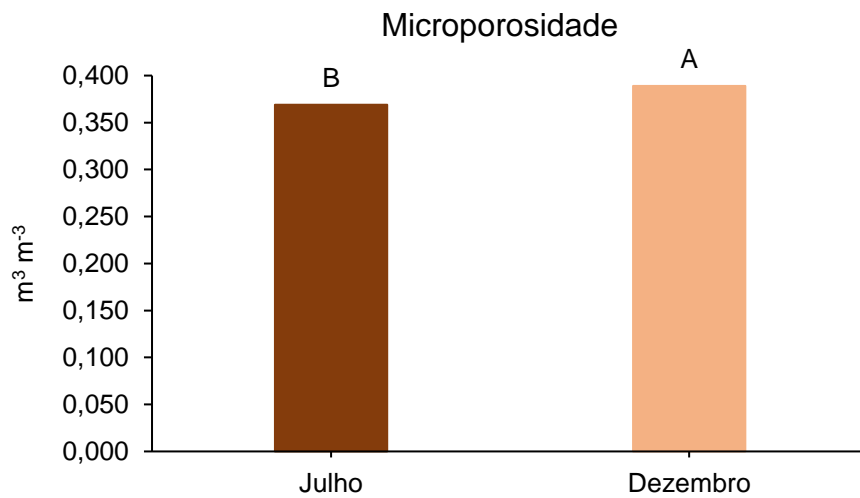


Figura 29: Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para período de amostragem (Julho, primeiro período; Dezembro, segundo período) em relação a microporosidade do solo argiloso na camada 0,10-0,20 m. Letras maiúsculas diferentes indicam diferença entre os períodos de amostragem.

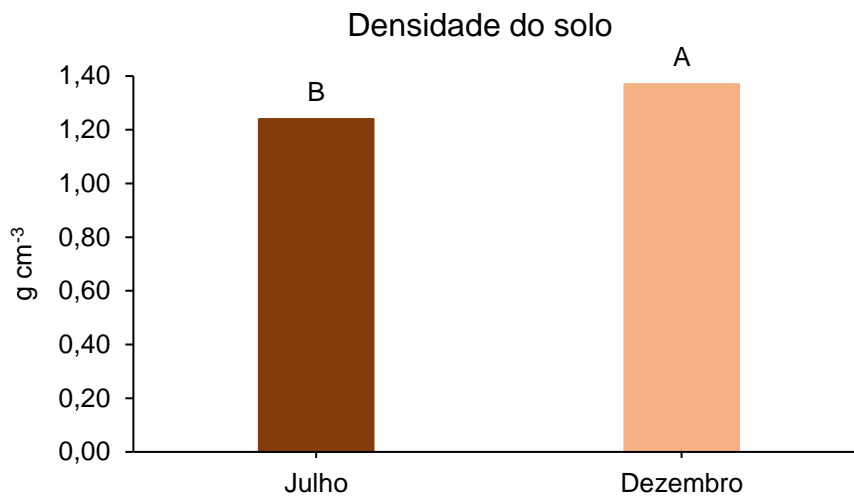


Figura 30: Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para período de amostragem (Julho, primeiro período; Dezembro, segundo período) em relação a densidade do solo argiloso na camada 0,10-0,20 m. Letras maiúsculas diferentes indicam diferença entre os períodos de amostragem.

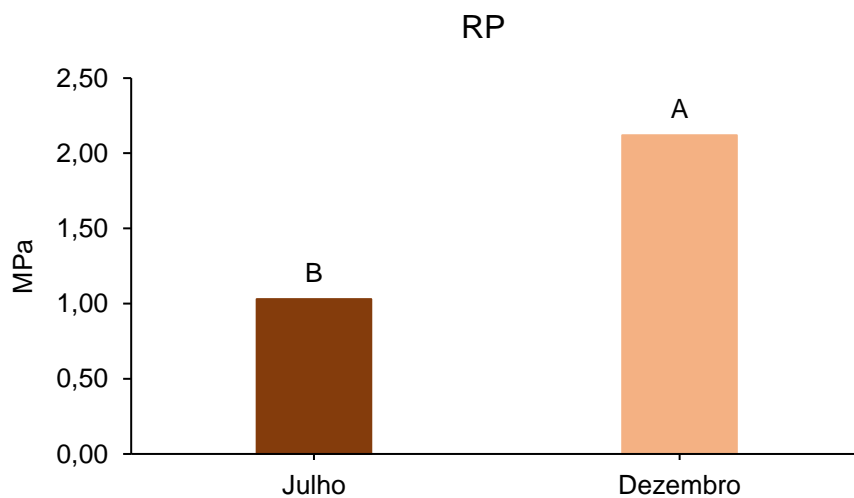


Figura 31: Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para período de amostragem (Julho, primeiro período; Dezembro, segundo período) em relação a resistência do solo à penetração (RP) do solo argiloso na camada 0,10-0,20 m. Letras maiúsculas diferentes indicam diferença entre os períodos de amostragem.

Em relação ao solo arenoso, na camada 0,00-0,10 m, houve interação significativa para a  $D_s$ , e o período de amostragem proporcionou diferença significativa para a microporosidade e para a RP (Tabela 8).

Tabela 8. Análise do modelo linear generalizado (GLM) ao nível de 5% de probabilidade para macroporosidade, microporosidade, densidade do solo e resistência do solo à penetração em função da aplicação de vinhaça e do período de amostragem em duas camadas do solo arenoso.

SOLO ARENOSO									
0,00-0,10 m									
Causas de Variação	Macroporosidade		Microporosidade		Densidade do solo		Resistência à penetração		
	F	Valor-p	F	Valor-p	F	Valor-p	F	Valor-p	
Aplicação de vinhaça (AV)	0,17	0,842	0,35	0,700	3,35	<b>0,042*</b>	2,15	0,125	
Período Amostragem (PA)	1,85	0,179	4,56	<b>0,037*</b>	7,52	<b>0,008*</b>	4,71	<b>0,034*</b>	
AV x PA	0,98	0,381	0,54	0,585	7,50	<b>0,001*</b>	3,07	0,054	
0,10-0,20 m									
Causas de Variação	Macroporosidade		Microporosidade		Densidade do solo		Resistência à penetração		
	F	Valor-p	F	Valor-p	F	Valor-p	F	Valor-p	
Aplicação de vinhaça (AV)	0,01	0,981	0,58	0,560	2,38	0,101	1,90	0,158	
Período Amostragem (PA)	2,94	0,091	16,72	<b>&lt;0,001*</b>	0,83	0,365	0,003	0,956	
AV x PA	0,80	0,452	0,50	0,607	2,13	0,128	1,50	0,231	

\* significativo a 5% de probabilidade.

A Ds foi significativamente igual no solo dos três tratamentos no primeiro período de amostragem, mas no segundo período, a Ds no solo sob VL foi maior em relação aos tratamentos SV e VT (Figura 32). A maior Ds no tratamento com aplicação de vinhaça localizada pode estar associada com uma possível compactação do solo causada pelo conjunto de máquinas utilizadas nesse método, como também observado no solo argiloso.

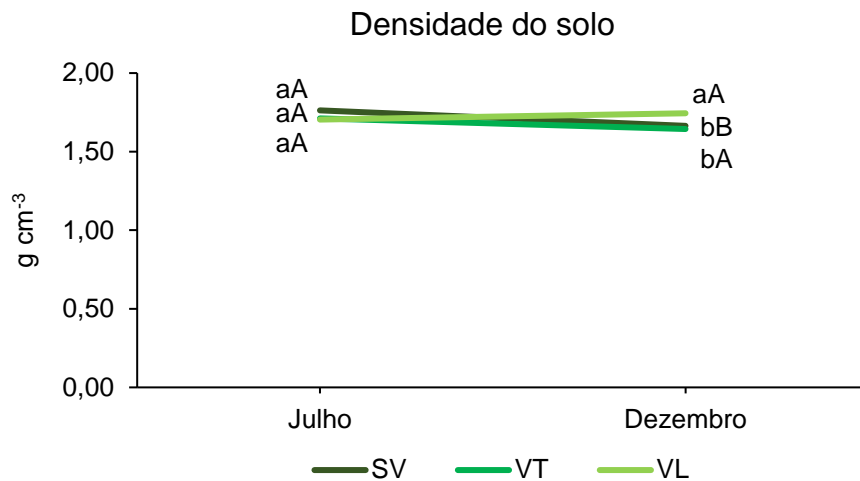


Figura 32: Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para a interação entre aplicação de vinhaça (SV, VT e VL) e período de amostragem (Julho, primeiro período; Dezembro, segundo período) da densidade do solo arenoso na camada 0,00-0,10 m. Letras minúsculas iguais indicam que não há diferença entre aplicações de vinhaça em cada período de amostragem e letras maiúsculas iguais indicam que não há diferença na aplicação de vinhaça entre os dois períodos de amostragem.

O valor da microporosidade foi menor no segundo período de amostragem (Figura 33), o que pode estar relacionado com a menor agregação do solo no segundo período de amostragem na camada 0,00-0,10 m, na qual houve menores valores de DMP e  $MA > 2$  e maior formação de agregados com  $MA < 2$ .

Cardoso et al. (2021) observaram maior microporosidade no solo arenoso em área com histórico de dez anos de aplicação de vinhaça. Portanto, entende-se que não houve contribuição da vinhaça para a microporosidade, pois, o aumento do valor desse atributo ocorre após sucessivas aplicações do subproduto no solo. Principalmente em solo arenoso, o teor de matéria orgânica do solo é baixo, resultando em menor agregação do solo e conseqüentemente menor microporosidade.

O solo arenoso é caracterizado como um solo que possui naturalmente maior volume de macroporos e menor volume de microporos. Os microporos são importantes para a retenção de água no solo e os macroporos são fundamentais para a drenagem da água no perfil do solo, aeração (Brady, 1979) e para o crescimento radicular.

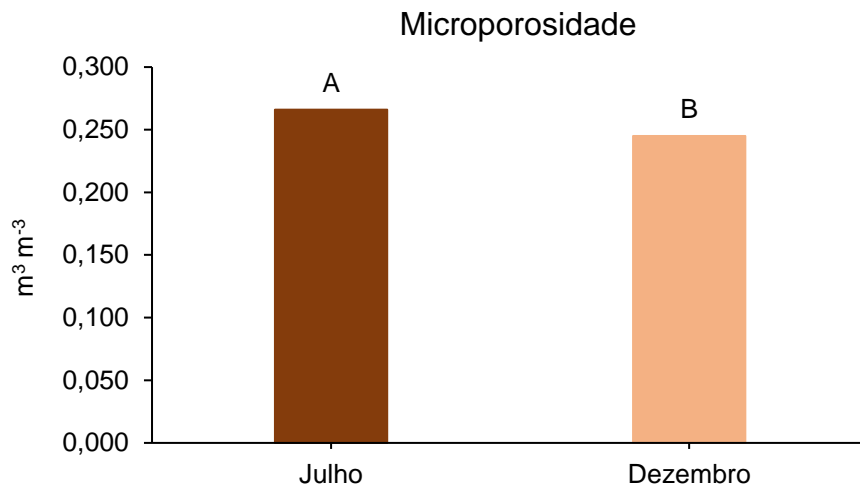


Figura 33: Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para período de amostragem (Julho, primeiro período; Dezembro, segundo período) em relação a microporosidade do solo arenoso na camada 0,00-0,10 m. Letras maiúsculas diferentes indicam diferença entre os períodos de amostragem.

A RP foi menor no segundo período de amostragem em relação ao primeiro período (Figura 34) na camada 0,00-0,10 m, possivelmente devido a característica do solo arenoso que possui, naturalmente maior volume de macroporos, facilitando assim o crescimento radicular, o que refletiu em menor RP.

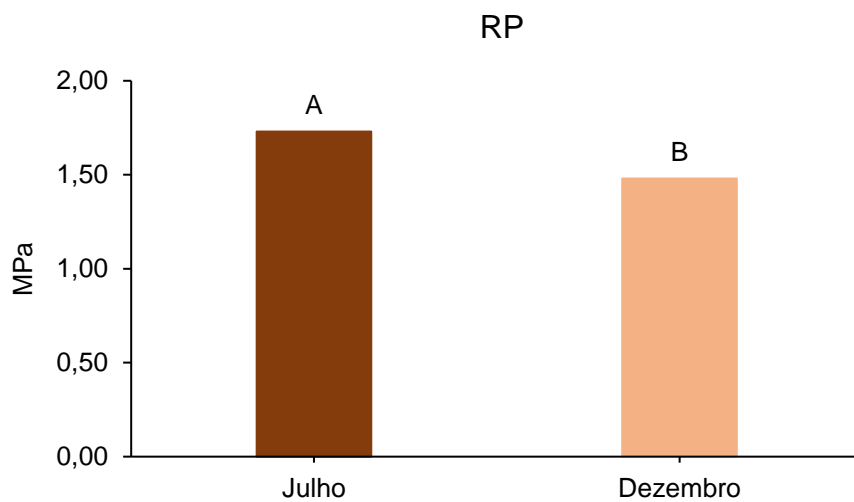


Figura 34: Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para período de amostragem (Julho, primeiro período; Dezembro, segundo período) em relação a resistência do solo à penetração (RP) do solo arenoso na camada 0,00-0,10 m. Letras maiúsculas diferentes indicam diferença entre os períodos de amostragem.

Na camada 0,10-0,20 m do solo arenoso o período de amostragem proporcionou diferença significativa para a microporosidade do solo (Tabela 8). A microporosidade foi menor no segundo período de amostragem (Figura 35) que pode estar relacionado com a menor formação de agregados nessa camada. Em solos de textura arenosa, maior volume de microporos é fundamental para a retenção de água (Blanco-Canqui, 2017), pois solos arenosos possuem geralmente poros maiores em sua estrutura do que solos argilosos (Yi et al., 2019).

A microporosidade do solo é influenciada pela textura e pelo teor de matéria orgânica do solo (Blanco-Canqui, 2017). Por esse motivo é importante observar o comportamento do solo arenoso com aplicações sucessivas de vinhaça e, sobretudo, investigar qual método de aplicação favorece a formação de microporos ao longo do perfil do solo. Em solo de textura arenosa com aplicação de vinhaça há mais de 10 anos, Cardoso et al. (2021) observaram maior microporosidade no solo comparado ao tratamento sem aplicação do subproduto.

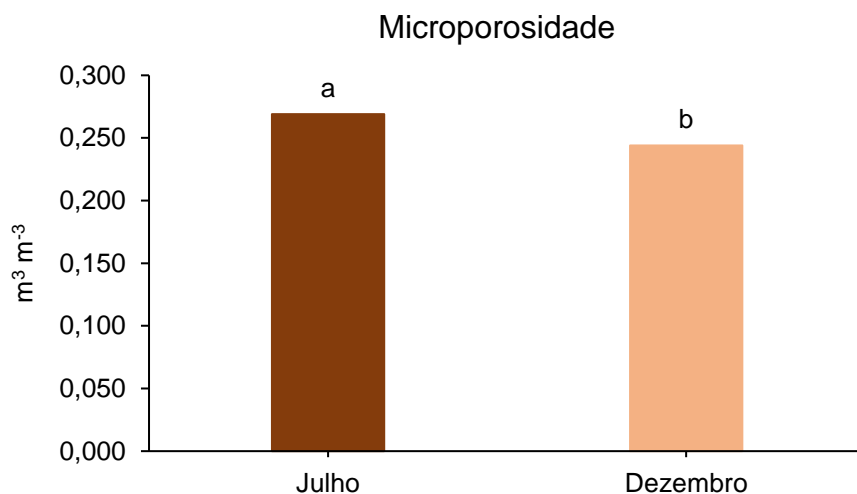


Figura 35: Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para período de amostragem (Julho, primeiro período; Dezembro, segundo período) em relação a microporosidade do solo arenoso na camada 0,10-0,20 m. Letras maiúsculas diferentes indicam diferença entre os períodos de amostragem.

#### 4.4 Açúcar total recuperável (ATR) e Produtividade da cana-de-açúcar

O açúcar total recuperável (ATR) representa todos os açúcares na forma de açúcares invertidos que são recuperados na indústria sucroenergética (Tasso Júnior et al., 2007). Os resultados mostraram que a aplicação de vinhaça não proporcionou diferença significativa para o ATR tanto no solo argiloso quanto no solo arenoso (Tabela 9). No solo argiloso os valores de ATR ficaram acima dos 150 kg t<sup>-1</sup> nos três tratamentos, sendo 153,1 kg t<sup>-1</sup> no tratamento SV, 155,6 kg t<sup>-1</sup> no tratamento VT e 151,4 kg t<sup>-1</sup> no tratamento VL (Figura 36). No solo arenoso os valores de ATR ficaram acima dos 140 kg t<sup>-1</sup> sendo SV: 143,8 kg t<sup>-1</sup>, VT: 142,1 kg t<sup>-1</sup> e VL: 142,2 kg t<sup>-1</sup> (Figura 37).

Tabela 9. Análise do modelo linear generalizado (GLM) ao nível de 5% de probabilidade para o açúcar total recuperável (ATR) e produtividade da cana-de-açúcar em função da aplicação de vinhaça em solo argiloso e arenoso.

SOLO ARGILOSO				
Causa de Variação	ATR		Produtividade	
	F	Valor-p	F	Valor-p
Aplicação de vinhaça	2,21	0,129	0,070	0,932
SOLO ARENOSO				
Causa de Variação	ATR		Produtividade	
	F	Valor-p	F	Valor-p
Aplicação de vinhaça	0,142	0,868	3,58	<b>0,041*</b>

\* significativo a 5% de probabilidade.

Barbosa et al. (2012) avaliaram o ATR da cana planta cultivada em solo de textura argilosa (187 g kg<sup>-1</sup> de areia, 290 g kg<sup>-1</sup> de silte e 523 g kg<sup>-1</sup> de argila) e constataram que os valores de ATR entre os tratamentos não apresentaram diferenças significativas. O ATR da cana sob o tratamento sem aplicação de vinhaça foi de 143,4 kg t<sup>-1</sup> enquanto o ATR da cana sob o tratamento que recebeu a dose de 200 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> de vinhaça foi de 152,8 kg t<sup>-1</sup> (Barbosa et al., 2012), valores semelhantes aos encontrados no presente trabalho.

Em solo de textura arenosa, Andreotti et al. (2015) observaram que os valores de ATR da cana soca de terceiro corte não foram significativos para as doses de vinhaça de 50; 100 e 200 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, e o valor médio de ATR foi de 157 kg t<sup>-1</sup>.

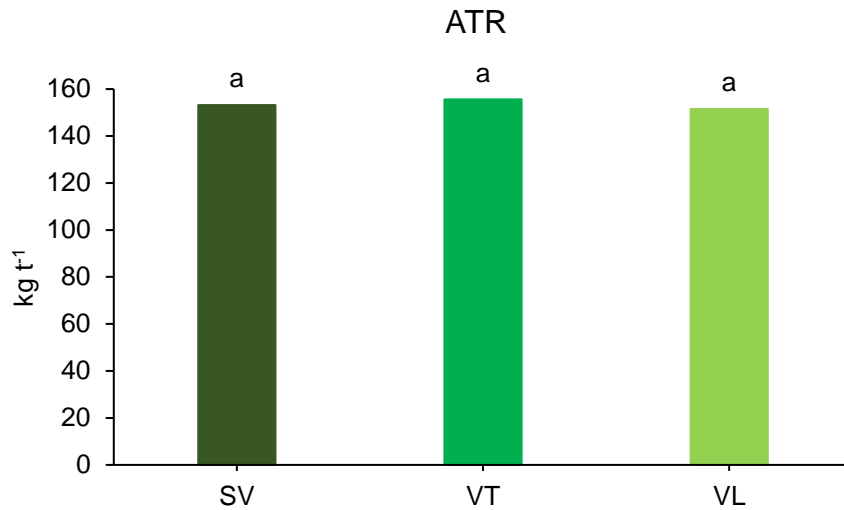


Figura 36: Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para aplicação de vinhaça (SV, VT e VL) em relação ao açúcar total recuperável (ATR) da cana-de-açúcar cultivada em solo argiloso. Letras minúsculas iguais indicam que não há diferença entre aplicações de vinhaça.

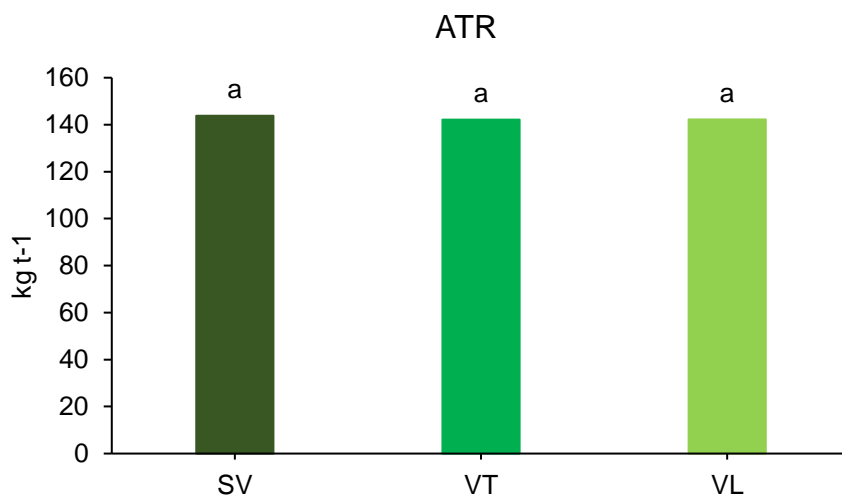


Figura 37: Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para aplicação de vinhaça (SV, VT e VL) em relação ao açúcar total recuperável (ATR) da cana-de-açúcar cultivada em solo arenoso. Letras minúsculas iguais indicam que não há diferença entre aplicações de vinhaça.

Diferentemente dos resultados apresentados, Prado et al. (2017) constataram aumento nos valores de ATR de acordo com o aumento das doses de vinhaça aplicadas em área cultivada com cana-de-açúcar. Os autores avaliaram o ATR da cana-de-açúcar de terceiro ciclo cultivada em Latossolo Vermelho distroférico, de textura franco argilo arenosa (540 g kg<sup>-1</sup> de areia, 100 g kg<sup>-1</sup> de silte e 360 g kg<sup>-1</sup> de

argila). Os valores de ATR variaram de 122 kg t<sup>-1</sup>, no tratamento que não recebeu aplicação de vinhaça, para 128 kg t<sup>-1</sup> no tratamento que recebeu a maior dose de vinhaça (750 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>) (Prado et al., 2017). No entanto, destaca-se que houve aumento nos valores de ATR com a utilização da dose de 750 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, que é uma dose elevada em relação as utilizadas no presente estudo, que foram de 70 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> no tratamento com aplicação de vinhaça em área total e 30 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> no tratamento com aplicação localizada da vinhaça.

Neste sentido, entende-se que a vinhaça pode contribuir para aumentar características tecnológicas da cana-de-açúcar, como o ATR, no entanto é importante considerar que o ATR é uma variável influenciada pelas características varietais da cana-de-açúcar, bem como pelas condições de clima e tipo de solo (Prado et al., 2017).

Em relação a produtividade da cana-de-açúcar, a aplicação de vinhaça não proporcionou diferença significativa para a produtividade da cana-de-açúcar cultivada em solo argiloso, mas proporcionou para a produtividade da cana cultivada em solo arenoso (Tabela 9). Na área de solo argiloso a produtividade da cana-de-açúcar na safra 2019/2020 foi de 98,9 t ha<sup>-1</sup> no tratamento SV, 100,5 t ha<sup>-1</sup> no tratamento VT e 98,6 t ha<sup>-1</sup> no tratamento VL (Figura 38).

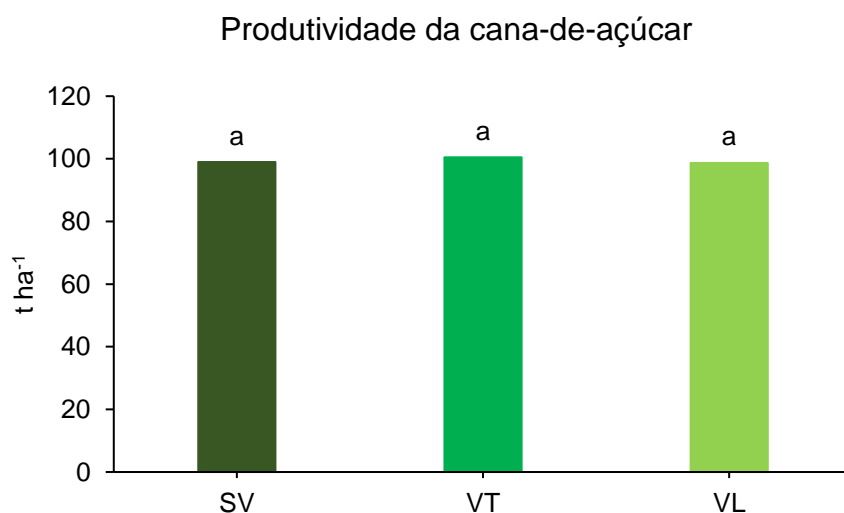


Figura 38: Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para aplicação de vinhaça (SV, VT e VL) em relação a produtividade da cana-de-açúcar cultivada em solo argiloso. Letras minúsculas iguais indicam que não há diferença entre aplicações de vinhaça.

Na área de solo arenoso, a produtividade da cana-de-açúcar foi maior no tratamento VL na safra 2019/2020 com  $120,8 \text{ t ha}^{-1}$ , enquanto a produtividade do tratamento SV foi de  $107 \text{ t ha}^{-1}$  e do tratamento VT foi de  $104,7 \text{ t ha}^{-1}$  (Figura 39). Ao contrário do solo argiloso, no solo arenoso o método de aplicação localizada de vinhaça foi efetivo no aumento da produtividade da cana-de-açúcar.

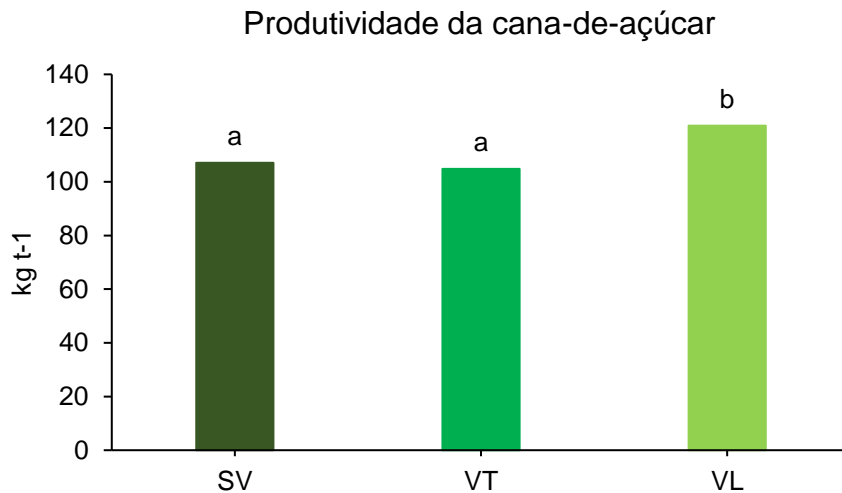


Figura 39: Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade para aplicação de vinhaça (SV, VT e VL) em relação a produtividade da cana-de-açúcar cultivada em solo arenoso. Letras minúsculas iguais indicam que não há diferença entre aplicações de vinhaça.

A produtividade da cana-de-açúcar deve-se a vários fatores, dentre eles a variedade da cana-de-açúcar utilizada, condições climáticas, tipo de solo e práticas de manejo. No que se refere às práticas de manejo do solo é importante avaliar a contribuição do método de aplicação VL nos atributos físicos e químicos do solo, e assim avaliar o impacto dos atributos no desenvolvimento do sistema radicular e conseqüentemente no crescimento e na produtividade da cana-de-açúcar. Os fatores físicos do solo que influenciaram as propriedades do solo e o crescimento das plantas incluem aeração, água, temperatura, resistência e compactação que, por sua vez, são afetados por mudanças na porosidade, continuidade dos poros, estabilidade de agregados e densidade do solo (Braunack, 1991).

O aumento da  $D_s$  pode ser conseqüência da compactação do solo que é algo indesejado nas áreas agrícolas, pois afeta negativamente o desenvolvimento

radicular. Segundo Demattê (2004b), a compactação do solo é um dos fatores limitantes para o aumento da produtividade da cana-de-açúcar, pois altera muitos atributos do solo que podem restringir o crescimento radicular. No entanto, observou-se que apesar da Ds (camada 0,00-0,10 m) ter sido maior no solo sob VL em relação aos outros tratamentos, ela não foi limitante a ponto de interferir na produtividade.

Observou-se também que o solo sob o tratamento VL apresentou teor de K menor que no solo sob o tratamento VT nas duas camadas do solo arenoso, mas que esse fator também não afetou a produtividade da cana-de-açúcar, corroborando com a ideia anteriormente discutida de que a quantidade de vinhaça aplicada em área total pode estar adicionando potássio ao solo em quantidade maior que a exigida pela cana-de-açúcar. No método de aplicação localizada, a vinhaça é aplicada diretamente na linha de cultivo, aumentando o contato do subproduto com o sistema radicular da cana-de-açúcar, o que pode contribuir para a melhor absorção do potássio pelas raízes. Resende et al. (2006) observaram que a aplicação de vinhaça foi benéfica para produtividade da cana-de-açúcar devido, principalmente, ao alto teor de potássio.

A maior produtividade de cana-de-açúcar na área sob o tratamento VL ocorreu no solo arenoso e não foi observada no solo argiloso, possivelmente devido a maior infiltração de vinhaça no solo arenoso que possui maior espaço poroso em relação ao solo argiloso. No solo argiloso a infiltração de água acontece de forma mais lenta e gradual devido a maior presença de microporos, que tem como característica maior retenção e menor infiltração de água, e no caso do presente trabalho, pode ter dificultado a infiltração da vinhaça. Com a maior infiltração da vinhaça no solo arenoso, e o maior contato do subproduto com o sistema radicular devido a aplicação localizada, é provável que houve maior disponibilidade de água, proporcionada pela vinhaça, para a cana-de-açúcar, refletindo em maior produtividade.

Neste contexto, observando os resultados referentes aos atributos químicos e físicos do solo, ATR e produtividade até a primeira colheita da cana-de-açúcar, constatou-se que a hipótese do presente trabalho de que a aplicação localizada de vinhaça na linha da cana-de-açúcar é um método que pode substituir a aplicação de vinhaça em área total foi confirmada.

Os atributos do solo argiloso que foram responsivos a aplicação localizada da vinhaça foram teor de potássio na camada 0,10-0,20 m, estabilidade dos agregados

do solo, macroporosidade e densidade do solo sobretudo na camada de 0,00-0,10 m do solo.

Para o solo arenoso, a vinhaça aplicada pelo método localizado foi efetiva na capacidade de troca de cátions nas duas camadas do solo avaliadas, na formação e estabilidade dos agregados na camada 0,00-0,10 m do solo e na maior produtividade de colmos.

Com a aplicação de vinhaça localizada substituindo a aplicação de vinhaça em área total é possível viabilizar a aplicação desse subproduto em solos de áreas mais distantes da usina que nunca receberam o subproduto, evitando que os solos de áreas próximas a usina fiquem saturados de potássio devido ao excesso de aplicações. Evita-se também a aplicação em áreas com o lençol freático mais aflorado, susceptíveis à contaminação por lixiviação.

## **5 CONCLUSÃO**

Após a primeira aplicação de vinhaça, os resultados das avaliações dos atributos químicos e físicos do solo, do açúcar total recuperável e da produtividade da cana-de-açúcar que ocorreram até a primeira colheita, confirmaram a hipótese do trabalho que, o método de aplicação localizada de vinhaça na linha da cana-de-açúcar pode substituir o método de aplicação de vinhaça em área total em solo de textura argilosa e em solo de textura arenosa.

## REFERÊNCIAS

- Almeida BG, Freitas PL, Teixeira WG, Viana JHM, Domagemma GK (2017a) Porosidade. In.: Teixeira PC, Domagemma GK, Fontana A, Teixeira WG (Eds.) **Manual de métodos de análise do solo**. Brasília: Embrapa, p. 82-94.
- Almeida BG, Viana JHM, Teixeira WG, Domagemma GK (2017b) Densidade do solo. In.: Teixeira PC, Domagemma GK, Fontana A, Teixeira WG (Eds.) **Manual de métodos de análise do solo**. Brasília: Embrapa, p.65-75.
- Altpeter F, Oraby H (2010). Sugarcane. In.: Kempken F, Jung, C (Eds.) **Genetic modification of plants**. Berlin: Springer, p. 453-472.
- Andrade AF, Flores RA, Casaroli D, Bueno AM, Pessoa-de-Souza MA, Lima FSR, Marques EP (2021) K dynamics in the soil–plant system for sugarcane crops: A current field experiment under tropical conditions. **Sugar Tech** 23:1247-1257.
- Andreotti M, Soria JE, Costa NR, Gameiro RDA, Rebonatti MD (2015) Acúmulo de nutrientes e decomposição do palhicho de cana em função de doses de vinhaça. **Bioscience Journal** 563-576.
- Barbosa EA, Arruda FB, Pires R, Silva, TJ, Sakai E (2012) Cana-de-açúcar fertirrigada com vinhaça e adubos minerais via irrigação por gotejamento subsuperficial: ciclo da cana-planta. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 16:952-958.
- Blanco-Canqui H. (2017) Biochar and soil physical properties. **Soil Science Society of America Journal** 81:687-711.
- Brady NC (1979) **Natureza e propriedades dos solos**. São Paulo: F. Bastos, 647 p.
- Braunack MV (1991). **The effect of soil physical properties on growth and yield of sugarcane**. Bureau of sugar experiment stations Queensland, Australia.
- Bronick CJ, Lal R (2005) Soil structure and management: a review. **Geoderma** 124:3-22.

Camilotti F, Andrioli I, Marques MO, Silva ARD, Tasso Júnior LC, Nobile FOD (2006) Atributos físicos de um latossolo cultivado com cana-de-açúcar após aplicações de lodo de esgoto e vinhaça. **Engenharia Agrícola** 26:738-747.

Canellas LP, Velloso ACX, Marciano CR, Ramalho JFGP, Rumjanek VM, Rezende CE, Santos GDA (2003) Propriedades químicas de um Cambissolo cultivado com cana-de-açúcar, com preservação do palhicho e adição de vinhaça por longo tempo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 27:935-944.

Cardin CA, Santos CHD, Escarmínio MA (2016) Impacts of vinasse and methods of sugarcane harvesting on the availability of K and carbon stock of an Argisol. **Revista Ceres** 63: 95-102.

Cardoso E, Coelho AP, Fernandes C (2021) What Are the Impacts of Long-Term Vinasse Application on Clayey and Sandy Soils? **Sugar Tech** 24:602-613.

Carvalho JLN, Otto R, Franco HCJ, Trivelin PCO (2013) Input of sugarcane post-harvest residues into the soil. **Scientia Agricola** 70:336-344.

Casarini DC, Cunha RDA, Maset Filho B (1987) Effects of Irrigation with Vinasse and the Dynamics of its Constituents in the Soil: II—Microbiological Aspects. **Water Science and Technology** 19:167-176.

Castioni GA, Cherubin MR, Menandro LMS, Sanches GM, Bordonal RO, Barbosa LC, Franco HCJ, Carvalho JLN (2018) Soil physical quality response to sugarcane straw removal in Brazil: A multi-approach assessment. **Soil and Tillage Research** 184:301-309.

Cerri CC, Galdos MV, Maia SMF, Bernoux M, Feigl BJ, Powlson D, Cerri CEP (2011) Effect of sugarcane harvesting systems on soil carbon stocks in Brazil: an examination of existing data. **European Journal of Soil Science** 62:23-28.

CETESB Companhia Ambiental do Estado De São Paulo (2015) **Norma Técnica P4.231**: Vinhaça: Critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola. São Paulo: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 15 p.

Cherubin MR, Karlen DL, Cerri CE, Franco AL, Tormena CA, Davies CA, Cerri CC (2016) Soil quality indexing strategies for evaluating sugarcane expansion in Brazil. **PloS one** 11:e0150860.

Cherubin MR, Carvalho JLN, Cerri CEP, Nogueira LAH, Souza GM, Cantarella H (2021) Land use and management effects on sustainable sugarcane-derived bioenergy. **Land** 10:72.

Christofoletti CA, Escher JP, Correia JE, Marinho JFU, Fontanetti CS (2013) Sugarcane vinasse: environmental implications of its use. **Waste management** 33:2752-2761.

CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento (2022) **Safra brasileira de cana-de-açúcar, safra 2022/2023, 2º levantamento**. Disponível em <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>> Acesso em 20 de setembro de 2022.

CONSECANA (2003). **Manual de Instruções**. Piracicaba: CONSECANA. 115 p.

Cursi DE, Hoffmann HP, Barbosa GVS, Bressiani JA, Gazaffi R, Chapola RG, Carneiro MS (2022) History and current status of sugarcane breeding, germplasm development and molecular genetics in Brazil. **Sugar Tech** 24:112-133.

Demattê JAM, Gama MAP, Cooper M, Araújo JC, Nanni MR, Fiorio PR (2004a) Effect of fermentation residue on the spectral reflectance properties of soils. **Geoderma** 120:187-200.

Demattê JLI (2004b). Manejo e conservação de solos, na cultura da cana. **Visão agrícola** 1: 8-17.

Fageria NK (2012) Role of soil organic matter in maintaining sustainability of cropping systems. **Communications in Soil Science and Plant Analysis** 43:2063-2113.

Fuess LT, Garcia ML (2014) Implications of stillage land disposal: a critical review on the impacts of fertigation. **Journal of Environmental Management** 145:210-229.

Graham MH, Haynes RJ, Meyer JH (2002) Changes in soil chemistry and aggregate stability induced by fertilizer applications, burning and trash retention on a long-term sugarcane experiment in South Africa. **European Journal of Soil Science** 53:589-598.

Gravina OS, Santos GG, Correchel V, Silva GCD, Medrado LDC, Flores RA, Severiano EDC (2021). Physical Attributes of Ferralsol in Fertigated Sugarcane Production Environments for Bioethanol in the Midwest of Brazil. **Agronomy** 11:1641.

Hoarau J, Caro Y, Grondin I, Petit T (2018) Sugarcane vinasse processing: Toward a status shift from waste to valuable resource. A review. **Journal of water process engineering** 24:11-25.

IEA, Instituto de economia agrícola (2022) **Alta na Produção e nas Exportações de Açúcar Marca a Safra 2020/21 de Cana**. Disponível em <<http://www.iea.sp.gov.br/out/TerTexto.php?codTexto=15925#:~:text=O%20Brasil%20%C3%A9%20o%20maior,de%20litros%20de%20etanol1>> Acesso em 15 de setembro de 2022.

Jiang ZP, Li YR, Wei GP, Liao Q, Su TM, Meng YC, Zhang HY, Lu CY (2012) Effect of long-term vinasse application on physico-chemical properties of sugarcane field soils. **Sugar Tech** 14:412-417.

Laime EM, Fernandes PD, Oliveira DCS, Freire EA (2011). Possibilidades tecnológicas para a destinação da vinhaça. **Revista Trópica: Ciências Agrárias e Biológicas** 5.

Mattiazzo ME, Gloria NA (1987) Effect of vinasse on soil acidity. **Water science and technology**, 19:1293-1296.

Medina NH, Branco ML, Silveira MAG, Santos RBB (2013) Dynamic distribution of potassium in sugarcane. **Journal of Environmental Radioactivity** 126:172-175.

Menandro, LMS, Cantarella H, Franco HCJ, Kölln OT, Pimenta MTB, Sanches GM, Rabelo SC, Carvalho JLN (2017) Comprehensive assessment of sugarcane straw: implications for biomass and bioenergy production. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining** 11:488-504.

Moore CCS, Nogueira AR, Kulay L (2017) Environmental and energy assessment of the substitution of chemical fertilizers for industrial wastes of ethanol production in sugarcane cultivation in Brazil. **The International Journal of Life Cycle Assessment** 22:628-643.

Moran-Salazar RG, Sanchez-Lizarraga AL, Rodriguez-Campos J, Davila-Vazquez G, Marino-Marmolejo EN, Dendooven L, Contreras-Ramos SM (2016) Utilization of vinasses as soil amendment: consequences and perspectives. **SpringerPlus** 5:1-11.

Nimmo JR, Perkins KS (2002) 2.6 Aggregate stability and size distribution. In.: Dane JH, Topp CG (Eds.) **Methods of soil analysis: part 4**. New Jersey: John Wiley & Sons, p. 317-328.

Oades JM (1993) The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. In.: Brussaard L, Kooistra MJ (Eds.) **Soil structure/soil biota interrelationships**. USA: Elsevier, p. 377-400.

Oliveira Filho JS, Pereira MG, Aquino BF (2017). Organic matter labile fractions and carbon stocks in a typical quartzipsamment cultivated with sugarcane harvested without burning. **Revista Caatinga**, 30:24-31.

Oliveira Filho JS, Santos OAQ, Rossi CQ, Diniz YVDFG, Fagundes HS, Pinto, LADSR, Pereira MG (2021). Assessing the effects of harvesting with and without burning and vinasse application in sugarcane crops: evaluation of soil fertility and phosphorus pools in different ethanol production systems. **Agriculture, Ecosystems & Environment** 307:107233.

ONU, Organização das nações unidas (2022). **Os objetivos de desenvolvimento sustentável no Brasil**. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>> Acesso em 23 de outubro de 2022.

Oorts, K, Vanlauwe, B, Merckx, R (2003). Cation exchange capacities of soil organic matter fractions in a Ferric Lixisol with different organic matter inputs. **Agriculture, Ecosystems & Environment** 100:161-171.

Ortegón GP, Arboleda FM, Candela L, Tamoh K, Valdes-Abellan J (2016) Vinasse application to sugar cane fields. Effect on the unsaturated zone and groundwater at Valle del Cauca (Colombia). **Science of the Total Environment** 539:410-419.

Parsaee M, Kiani MKD, Karimi K (2019). A review of biogas production from sugarcane vinasse. **Biomass and bioenergy** 122:117-125.

Pazuch FA, Nogueira CEC, Souza SNM, Micuanski VC, Friedrich L, Lenz AM (2017). Economic evaluation of the replacement of sugar cane bagasse by vinasse, as a source of energy in a power plant in the state of Paraná, Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 76:34-42.

Pimentel LG, Cherubin MR, Oliveira DM, Cerri CE, Cerri CC (2019) Decomposition of sugarcane straw: Basis for management decisions for bioenergy production. **Biomass and Bioenergy** 122:133-144.

Possignolo-Vitti NV, Bertoncini EI, Vitti AC (2017). Decomposition of the organic matter of natural and concentrated vinasse in sandy and clayey soils. **Water Science and Technology** 76:728-738.

Poveda MMR (2014) **Análise econômica e ambiental do processamento da vinhaça com aproveitamento energético**. 160 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo, São Paulo.

Prado EAF, Vitorino ACT, Mauad M, Ensinas SC, Paim LR (2017) Características tecnológicas da cana-de-açúcar sob aplicação de doses de vinhaça em Latossolo Vermelho distroférrico. **Revista de ciências agroveterinárias** 16:386-395.

Prado EAF, Vitorino ACT, Oliveira WH, Espindola DLP, Arantes HP (2014) Índice de dispersão de agregados de um Latossolo Vermelho distroférrico cultivado com cana sob aplicação de vinhaça. **Semina: Ciências Agrárias** 35: 2347-2356.

Prado RDM, Caione G, Campos CNS (2013) Filter cake and vinasse as fertilizers contributing to conservation agriculture. **Applied and Environmental Soil Science** 2013:1-8.

Prata F, Lavorenti A, Reginato JB, Tornisielo VL (2001) Degradação e sorção de ametrina em dois solos com aplicação de vinhaça. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 36:975–981.

Puttaso A, Vityakon P, Saenjan P, Trelo-Ges V, Cadisch G (2011) Relationship between residue quality, decomposition patterns, and soil organic matter accumulation in a tropical sandy soil after 13 years. **Nutrient cycling in agroecosystems** 89:159-174.

Raij B, Andrade JC, Cantarella H, Quaggio JA (2001) **Análise Química para Avaliação da Fertilidade de Solos Tropicais**. Campinas: Instituto Agrônômico.

Regelink IC, Stoof CR, Rousseva S, Weng L, Lair GJ, Kram P, Comans RN (2015) Linkages between aggregate formation, porosity and soil chemical properties. **Geoderma** 247:24-37.

Resende AS, Xavier RP, de Oliveira OC, Urquiaga S, Alves BJ, Boddey RM (2006) Long-term effects of pre-harvest burning and nitrogen and vinasse applications on yield of sugar cane and soil carbon and nitrogen stocks on a plantation in Pernambuco, NE Brazil. **Plant and soil** 281:339-351.

RFA, Renewable Fuels (2022) **Association, Annual world fuel ethanol production**. Disponível em <<https://ethanolrfa.org/markets-and-statistics/annual-ethanol-production>> Acesso em 02 fevereiro de 2022.

Ribeiro H, Ficarelli TRDA (2010). Queimadas nos canaviais e perspectivas dos cortadores de cana-de-açúcar em Macatuba, São Paulo. **Saúde e sociedade** 19:48-63.

Ribeiro BT, Lima JMD, Curi N, Oliveira GCD (2013). Aggregate breakdown and dispersion of soil samples amended with sugarcane vinasse. **Scientia Agricola** 70: 435-441.

Robertiello A (1982). Upgrading of agricultural and agro-industrial wastes: The treatment of distillery effluents (vinasses) in Italy. **Agricultural Wastes** 4:387-395.

Ronquim CC (2021) **Fertility concepts and adequate management for soils in tropical regions**. Campinas: EMBRAPA, 36 p.

Santos OAQ, Tavares OCH, García AC, Rossi CQ, Moura OVT, Pereira W, Pereira MG (2020). Fire lead to disturbance on organic carbon under sugarcane cultivation but is recovered by amendment with vinasse. **Science of the Total Environment** 739:140063.

Schiavo JA, Colodro G (2012). Agregação e resistência à penetração de um Latossolo Vermelho sob sistema de integração lavoura-pecuária. **Bragantia** 71:406-412.

Signor D, Czycza RV, Milori DMBP, Cunha TJF, Cerri CEP (2016) Atributos químicos e qualidade da matéria orgânica do solo em sistemas de colheita de cana-de-açúcar com e sem queima. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 51:1438-1448.

Silva AJ, Cabeda MS, Carvalho FGD, Lima JF (2006) Alterações físicas e químicas de um Argissolo Amarelo sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 10:76-83.

Silva A, Rossetto R, Bonnecine J, Piemonte M, Muraoka T (2013). Net and potential nitrogen mineralization in soil with sugarcane vinasse. **Sugar tech**, 15:159-164.

Spironello A, Raij B, Penatti CP, Cantarella H, Morelli JL, Orlando Filho J, Landell MGA, Rossetto V (1997) Cana-de-açúcar. In.: Raij B, Cantarella H, Quaggio JÁ, Furlani AMC (Eds.) **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônômico: Fundação IAC, p. 237-239.

Tasso Júnior LC, Marques MO, Franco A, Nogueira GDA, Nobile FOD, Camilotti F, Silva ARD (2007) Produtividade e qualidade de cana-de-açúcar cultivada em solo tratado com lodo de esgoto, vinhaça e adubos minerais. **Engenharia Agrícola** 27: 276-283.

Tisdall JM (1991) Fungal hyphae and structural stability of soil. **Soil Research** 29:729-743.

Tisdall JM, Oades JM (1982) Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Journal of soil science** 33:141-163.

Tormena CA, Silva AD, Libardi PL (1998) Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do solo** 22:573-581.

Vasconcelos RFBD, Cantalice JRB, Oliveira VSD, Costa YDJD, Cavalcante DM (2010). Estabilidade de agregados de um Latossolo Amarelo distrocioso de tabuleiro costeiro sob diferentes aportes de resíduos orgânicos da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 34:309-316.

Vezzani FM, Anderson C, Meenken E, Gillespie R, Peterson M, Beare MH (2018) The importance of plants to development and maintenance of soil structure, microbial communities and ecosystem functions. **Soil and Tillage Research** 175:139-149.

Vezzani FM, Mielniczuk J (2011a) Agregação e estoque de carbono em Argissolo submetido a diferentes práticas de manejo agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 35:213-223.

Vezzani FM, Mielniczuk J (2011b) **O solo como sistema**. Curitiba: Edição dos autores, 104p.

Yeomans JC, Bremner JM (1988) A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in soil science and plant analysis** 19:1467-1476.

Yi J, Yang Y, Liu M, Hu W, Lou S, Zhang H, Zhang D (2019) Characterising macropores and preferential flow of mountainous forest soils with contrasting human disturbances. **Soil Research** 57:601-614.

Yost JL, Hartemink AE (2019) Soil organic carbon in sandy soils: A review. **Advances in agronomy** 158: 217-310.