

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP**

**CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**IMPACTOS DA APLICAÇÃO DA VINHAÇA POR LONGO  
PERÍODO EM SOLOS DE TEXTURA ARGILOSA E  
ARENOSA**

**Edmilson N'dami Lopes Cardoso**

**Agrônomo**

**2021**

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

**IMPACTOS DA APLICAÇÃO DA VINHAÇA POR LONGO  
PERÍODO EM SOLOS DE TEXTURA ARGILOSA E  
ARENOSA**

**Discente: Edmilson N'dami Lopes Cardoso**

**Orientadora: Profa. Dra. Carolina Fernandes**

**Dissertação apresentada à Faculdade de  
Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp,  
Câmpus de Jaboticabal, como parte das  
exigências para a obtenção do título de  
Mestre em Agronomia (Ciência do Solo)**

C268i

Cardoso, Edmilson N'dami Lopes

Impactos da aplicação da vinhaça por longo período em solos de textura argilosa e arenosa / Edmilson N'dami Lopes Cardoso. -- Jaboticabal, 2021

37 p. : tabs., fotos

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientadora: Carolina Fernandes

1. Acidez do solo. 2. Macronutrientes. 3. Estrutura do solo. 4. Latossolo. 5. Neossolo. 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 DISSERTAÇÃO: IMPACTOS DA APLICAÇÃO DA VINHAÇA POR LONGO PERÍODO EM SOLOS DE TEXTURA ARGILOSA E ARENOSA

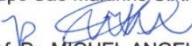
**AUTOR: EDMILSON N'DAMI LOPES CARDOSO**

**ORIENTADORA: CAROLINA FERNANDES**

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em AGRONOMIA (CIÊNCIA DO SOLO), pela Comissão Examinadora:

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

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

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

Jaboticabal, 24 de fevereiro de 2021

## **DADOS CURRICULARES DO AUTOR**

Edmilson N'dami Lopes Cardoso, nascido no dia 27 de maio de 1992 em Guiné-Bissau, na cidade de Bissau, Costa Ocidental de África. Concluiu o ensino médio no Liceu Nacional KWAME N'KRUMAH em Guiné-Bissau no ano de 2010. Ingressou no curso de Agronomia da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB) em janeiro de 2014, no edital 2013.3. Trabalhou 6 meses como voluntário no projeto de pesquisa intitulado "Variedades crioulas de fava e arranjos populacionais em consórcio com a cultura do milho melhoram a produção e qualidade fisiológica das sementes". Desempenhou o papel de bolsista PIBIC/UNILAB durante 1 ano, setembro de 2015 à setembro de 2016 no projeto da cultura do Girassol cuja o título "Eficiência dos compostos orgânicos e produção de grãos do girassol em déficit hídrico". Trabalhou novamente como bolsista no projeto de pesquisa intitulado Eficiência residual dos compostos orgânicos na produtividade do arroz e feijão-caupi em consórcio. Trabalhou de novo pela terceira vez como bolsista do projeto intitulado O aumento da densidade do milho no consorcio com a fava suprime as plantas espontâneas e melhora a eficiência de produção. Participou na II, III e IV semana universitária da universidade em estudo, apresentando trabalhos relativamente aos projetos de pesquisa enquadrado. Participou-se da XXX Congresso Brasileiro de Agronomia, realizado na cidade de Fortaleza - capital do Estado de Ceará no ano 2017. Graduado no curso de Agronomia no dia 23/11/2018 pela Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB), no Estado do Ceará. Em agosto de 2019 ingressou na pós-graduação, Mestrado em Ciências do Solo na Universidade Estadual Paulista (UNESP) SP, a concluir em 24 de fevereiro de 2021.

## DEDICO

A minha família no geral, em especial aos meus pais, **David Carlos Lopes Cardoso** e **Maria Mané**, de estarem se sentindo orgulhosos, por motivo de eu ter saído um fruto bom de suas arvores, e de ter conseguido atingir algumas metas traçadas, seguindo os conselhos e as orientações concebidas por eles.

A minha professora e orientadora, **Dra. Carolina Fernandes**, pela atenção, serenidade e profissionalismo prestado a minha pessoa, durante toda a trajetória do curso.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus em primeiro lugar por ter me concebido essa vida preciosa e por me acompanhar com a sua benção durante toda o meu percurso até o exato momento. Aos meus pais, David Carlos Lopes Cardoso e Maria Mané, por terem cumprido um papel de extrema importância em me colocar nesse mundo, ainda a eles, pela educação e sustento que me deram, pela preocupação e interesse que tiveram perante toda a minha vida acadêmica e por estarem sempre por perto, mesmo estando longe, sempre que eu precisar.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Sendo assim, o nosso muito obrigado.

De uma forma especial, meu muito obrigado a todos os meus familiares e amigos, Edson, Erica, Gregório, Raissa, Bruno, Emanuel, Inácio, Naniniquio, Carlos e entre outros, por serem aquelas pessoas apoiadores, amigáveis, compreensíveis e respeitosas.

Agradeço a Universidade Estadual Paulista UNESP por me abrir as suas portas, por todos os seus funcionários e colaboradores, em especial o departamento de Ciências da Produção Agrícola.

Meu muito obrigado a Usina São Martinho, por terem disponibilizado suas áreas de produção, possibilitando a coleta das amostras do solo para a realização da nossa pesquisa.

De modo geral, agradeço o grupo de pesquisa – GPFIS, em especial a coordenadora e orientadora professora Dra. Carolina Fernandes e os demais membros, meu muito obrigado pelo apoio, carinho e principalmente pela troca de conhecimentos. Ao Anderson pelo apoio na parte estatística do trabalho. A todos meu muito obrigado.

## SUMÁRIO

<b>RESUMO .....</b>	<b>ii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>iii</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>01</b>
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>03</b>
<b>2.1 A CULTURA DE CANA-DE-AÇÚCAR .....</b>	<b>03</b>
<b>2.2 O SUBPRODUTO VINHAÇA .....</b>	<b>04</b>
<b>2.3 SOLO SOB APLICAÇÃO DE VINHAÇA .....</b>	<b>07</b>
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>11</b>
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>5. CONCLUSÃO .....</b>	<b>32</b>
<b>6. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>33</b>



## IMPACTOS DA APLICAÇÃO DA VINHAÇA POR LONGO PERÍODO EM SOLOS DE TEXTURA ARGILOSA E ARENOSA

**RESUMO** - A avaliação do efeito da aplicação de vinhaça por longo período nos atributos químicos e físicos de solos com diferentes texturas é fundamental para abalizar a recomendação da aplicação desse subproduto. Objetivou-se avaliar se a aplicação de vinhaça por longo período altera os atributos químicos e físicos de solos de textura argilosa e arenosa cultivados com cana-de-açúcar. O experimento foi realizado em duas áreas na região Sudeste do Brasil em solos com textura arenosa (80 g kg<sup>-1</sup> de argila) e argilosa (490 g kg<sup>-1</sup> de argila). Em cada um dos solos, encontraram-se duas condições de manejos na cana-de-açúcar, sendo uma com aplicação de vinhaça, por mais de 10 anos, e outra sem aplicação de vinhaça. Foram coletadas 10 amostras deformadas e indeformadas de solo em cada área nas camadas 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m para a avaliação dos atributos químicos e físicos do solo. Devido à estrutura de dependência das variáveis, aplicou-se a análise exploratória multivariada de fatores. A aplicação de vinhaça aumentou, em média, 23% os teores dos macronutrientes no solo argiloso e 80% no solo arenoso. Além disso, a aplicação de vinhaça por longo período incrementou a microporosidade do solo arenoso em 22%, possibilitando maior disponibilidade de água para a cana-de-açúcar. A aplicação de vinhaça por longo período é um manejo sustentável para áreas de cana-de-açúcar, independentemente da textura do solo, pois incrementa a fertilidade do solo por meio do aumento dos teores de carbono orgânico e dos macronutrientes, também promove melhorias na estrutura de solos arenosos, aumentando a microporosidade e, conseqüentemente, a capacidade de armazenamento de água e a capacidade produtiva desse tipo de solo.

**Palavras chaves:** acidez do solo, macronutrientes, estrutura do solo, Latossolo, Neossolo

## IMPACTS OF LONG-TERM VINASSE APPLICATION ON CLAYEY AND SANDY SOILS

**ABSTRACT** - Evaluating the effect of long-term vinasse application on the chemical and physical attributes of soils with different textures is fundamental to support the recommendation of the application of this waste. The objective was to evaluate whether long-term vinasse application alters the chemical and physical attributes of clayey and sandy soils cultivated with sugarcane. The experiment was carried out in two areas in the Southeast region of Brazil in soils with sandy (80 g kg<sup>-1</sup> clay) and clayey (490 g kg<sup>-1</sup> clay) textures. In each of the soils, there were two sugarcane management conditions, one with vinasse application for more than 10 years and the other without vinasse application. Ten disturbed and undisturbed soil samples were collected in each area in the 0.00-0.10 m, 0.10-0.20 m and 0.20-0.30 m layers to evaluate soil chemical and physical attributes. Due to the dependence structure of the variables, multivariate factor analysis was applied. Vinasse application increased the contents of macronutrients, on average, by 23% in the clayey soil and 80% in the sandy soil. In addition, long-term vinasse application increased the microporosity of the sandy soil by 22%, enabling greater availability of water for sugarcane. Long-term vinasse application is a sustainable management for sugarcane areas, regardless of soil texture, as it increases soil fertility by increasing organic carbon and macronutrient contents, it also promotes improvements in the structure of sandy soils, increasing microporosity and, consequently, the water storage capacity and the productive capacity of this type of soil.

**KEYWORDS:** Soil acidity, macronutrients, soil structure, Oxisol, Quartzipsamment

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, caracterizando-se como primeiro exportador de açúcar e referência na produção de agroenergia. No contexto nacional, a região sudeste destaca-se como a maior produtora de cana-de-açúcar, tendo o estado de São Paulo como seu mais importante representante.

A cana-de-açúcar é uma das culturas mais utilizadas pelas indústrias sucroenergéticas, gerando subprodutos atualmente utilizados na produção agrícolas, entre eles destaca-se a vinhaça. Nessas mesmas regiões, o destino adequado desse subproduto proveniente da fabricação do etanol é um desafio para as unidades produtoras, visto as implicações que o uso inadequado pode acarretar. A vinhaça, produzida a partir da destilação do etanol, apresenta elevada quantidade de matéria orgânica e nutrientes, podendo acarretar eutrofização e contaminação de cursos hídricos, quando descartada incorretamente (Fuess et al., 2017), a produção de vinhaça é elevada, variando de 10 a 15 litros por litro de etanol produzido. Portanto, constata-se a suma importância em desenvolver e adotar técnicas viáveis para utilização desses subprodutos, a fim de atender aos requisitos sustentáveis para que o setor contribua para a mitigação do impacto ambiental.

A utilização desse subproduto na agricultura tem apresentado benefícios econômicos e ambientais mundialmente (Tessaro et al., 2016; Jaramillo e Restrepo, 2017). A vinhaça possui um elevado potencial de fornecer água e nutrientes para o crescimento das culturas, reduzindo o custo com fertilizantes minerais e o impacto ambiental que causaria o lançamento desses subprodutos diretamente em cursos hídricos (Jorge et al., 2017; Soltangheisi et al., 2019; Yin et al., 2019; Coelho et al., 2020). Nesse sentido, estudos com esse subproduto são necessários para fornecer informações técnicas para a aplicação nas diversas culturas e para avaliar o impacto da aplicação nos atributos do solo.

No entanto, a vinhaça tem sido utilizada como fonte de nutrientes nos canaviais, especialmente o potássio, promovendo benefícios econômicos e ambientais (Canellas et al., 2003; Christofolletti et al., 2013; Silva et al., 2014). Considerando a aplicação de vinhaça como estratégia de irrigação, a cana-de-açúcar é a cultura com maior área irrigada do Brasil, com 1,7 milhões de ha (ANA, 2017), demonstrando a importância de estudos para abalizar a recomendação desse subproduto na agricultura.

Alguns estudos avaliaram o efeito da aplicação da vinhaça por longo período nos atributos físicos e químicos de diferentes tipos de solo (Canellas et al., 2003; Barros et al., 2010; Silva et al., 2014; Yin et al., 2019). Entretanto, não existem estudos comparando a aplicação de vinhaça por longo período em solos de diferentes texturas. Isso se faz necessário, pois existem resultados contrastantes quanto ao benefício ou não da aplicação de vinhaça em diferentes solos cultivados com cana-de-açúcar (Jiang et al., 2012; Yin et al., 2019), podendo gerar benefícios como a melhoria da qualidade física do solo (Jiang et al., 2012), mas malefícios como a acidificação do solo podem ser encontrados (Yin et al., 2019).

Dessa maneira, é fundamental a avaliação do impacto da aplicação desse subproduto em solos de diferentes texturas, podendo gerar informações para recomendações específicas da aplicação de vinhaça dependendo da classe textural do solo. De acordo com o potencial de resposta desses solos à aplicação de vinhaça, as unidades produtoras podem selecionar o solo no qual o subproduto será aplicado, uma vez que nem sempre o volume de vinhaça produzido durante a safra agrícola atende à demanda requerida.

Para testar a hipótese de que a aplicação de vinhaça por longo período promove melhorias na fertilidade e na estrutura de solos de textura argilosa e textura arenosa cultivados com cana-de-açúcar, objetivou-se avaliar os efeitos da aplicação de vinhaça por longo período nas alterações dos atributos químicos e físicos de solos com textura argilosa e arenosa cultivados com cana-de-açúcar.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 A cultura da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*), cultura classificada como semi-perene, pertence à família poaceae, de característica perfilhadora, e contem colmos que apresentam formato cilíndrico, compostos por nós e entrenós. As folhas alternadas opostas presas aos nós dos colmos são divididas em duas partes: superior, chamadas de lâminas, e inferior, chamada de bainha. A cana-de-açúcar possui sistema radicular do tipo fasciculado e sua floração é indesejável, devido ao consumo de energia, às perdas de açúcares e à alteração da matéria prima (Topa et al., 2010).

Na literatura, encontram-se várias hipóteses quanto à origem e à expansão da cana-de-açúcar, no entanto a mais provável é que sua originalidade pertence às regiões quentes e tropicais da Ásia, expandindo depois para outras regiões com características climáticas idênticas até ser apontada na Índia como a planta produtora de açúcar (Ripoli et al., 2007).

Ao longo do tempo, foram desenvolvidas diversas pesquisas objetivando a modificação genética da planta, incrementando cada vez mais sua capacidade produtiva. Destes estudos, também foi possível descobrir outras utilidades de muita relevância dessa planta no consumo do dia-a-dia, como por exemplo a produção da energia (etanol), a partir dos derivados da matéria prima, o que contribui muito para a posição do Brasil no cenário mundial. O país possui 8.605 mil hectares ocupados com o cultivo de cana-de-açúcar na safra 2020/2021 (CONAB, 2021).

O Estado de São Paulo destaca-se na produção desta cultura, sendo que este possui 51,4% da área produzida em todo o país, com 4.302,2 mil hectares ocupados com o cultivo de cana-de-açúcar (CONAB, 2021). A Companhia Nacional de Abastecimento ainda estima que, a expectativa da produtividade desta safra para a região Sudeste, na qual se localiza o Estado de São Paulo, pode atingir 81.380 kg ha<sup>-1</sup> de cana-de-açúcar.

Dessa forma, estima-se para toda área plantada do país uma colheita de 665.105,0 mil toneladas de cana-de-açúcar para safra 2020/2021, aproximadamente 92% proveniente da região Sudeste do país, o que corresponde a 436.420,0 mil toneladas. Com isso, esses dados apontam para uma previsão da produção de etanol

numa quantia de 17,8 bilhões de litros, oriundos da cultura de cana-de-açúcar (CONAB, 2021).

A cultura de cana-de-açúcar tornou-se fundamental no cenário do agronegócio brasileiro devido ao seu importante papel para as agroindustriais do país, não só pelos produtos finais gerados para o consumo, mas também pelo aproveitamento de quase toda a matéria prima produzida, destacando os subprodutos gerados pelas indústrias (Lima, 2016).

Durante o processo de produção no setor sucroenergético, são gerados como subprodutos o bagaço, as cinzas, a torta de filtro e a vinhaça (Lima, 2016). Considerando a sustentabilidade da produção, sabe-se que estes podem ser reciclados e reutilizados principalmente nas atividades agrícolas. Diante dessa realidade, os pesquisadores têm trabalhado em busca das melhores técnicas de utilização desses subprodutos, de modo que possam ter melhor aproveitamento, causando assim menores impactos, principalmente para o solo e o ambiente.

## **2.2 O subproduto vinhaça**

A vinhaça é um subproduto de cor marrom escuro, natureza ácida, proveniente do processo fermentativo da cana-de-açúcar na produção do etanol, que normalmente sai da bica de destilação a temperatura de aproximadamente 107°C (Lima, 2016). As indústrias sucroenergéticas geram de 9 a 14 litros do subproduto para cada 1 litro de etanol produzido (Silva, 2017).

A importância do assunto não se deve apenas à possibilidade do mau uso desse subproduto causar impactos negativos ao meio ambiente, como poluição ou contaminação de recursos hídricos subterrâneos, por meio de percolação e escoamento (Marcato, 2019); mas também, pelas características químicas com potencial aproveitamento nas atividades agrícolas, especificamente na adubação orgânica e atualmente na produção de ração para dieta alimentar de animais com resultados satisfatórios (Martins et al., 2017).

A composição química da vinhaça depende basicamente da origem da matéria prima, da maturação da cana-de-açúcar, da técnica adotada no processo da fermentação, do tipo de levedura e do método de destilação (Silva, 2017).

Quanto à composição da vinhaça, Silva (2017) especificou que a maior parte é constituída por ácidos orgânicos, glicerol, ácido lático, ácido acético, açúcares e sais minerais, com demanda química de oxigênio (DQO) variando de 50 a 150 g L<sup>-1</sup>. Basso;

Soto; Chang, (2017) constataram, para a vinhaça *in natura*, 2.801 mg L<sup>-1</sup> de potássio, 547 mg L<sup>-1</sup> de cálcio, 214 mg L<sup>-1</sup> de magnésio, 30,3 mg L<sup>-1</sup> de sódio e 4,1 para o valor do pH. Por outro lado, Silva et al. (2019) determinaram, na vinhaça *in natura*, diferentes valores para os elementos: 2,89 Kg m<sup>-3</sup> de potássio, 494,32 mg L<sup>-1</sup> de fosfato, 1012,50 mg L<sup>-1</sup> de cálcio, 275 mg L<sup>-1</sup> de magnésio, 41,50 mg L<sup>-1</sup> de nitrogênio amoniacal, 129,50 mg L<sup>-1</sup> de nitrato e 3,98 para o valor do pH.

Alguns pesquisadores recomendam adotar a forma e a quantidade racional de uso da vinhaça, considerando o fato desta ser um subproduto com propriedades que possam ser prejudiciais ao meio ambiente. Lopes et al. (2017) observaram que a aplicação da vinhaça em um Argissolo Amarelo distrófico de textura arenosa, em dose única de 150 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, potencializou o fluxo de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), atingindo valores elevados de 195 µg m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>, enquanto que na área sem aplicação da vinhaça o valor do fluxo de N<sub>2</sub>O foi próximo a zero (0,4 µg m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>).

Considerando ainda a constante preocupação com a preservação do meio ambiente, a dose adequada de vinhaça a ser aplicada em um determinado solo, deve obedecer a legislação definida pela “Norma Técnica CETESB – Portaria P. 4231”, baseando-se principalmente na saturação de potássio (K) e na capacidade de troca catiônica (CTC) de um determinado solo (CETESB, 2015). A norma recomenda que a concentração máxima do K não pode ultrapassar 5% da CTC do solo.

Tratando-se de questões econômicas, o principal problema do uso da vinhaça como fonte de adubo orgânico é o custo de transporte, principalmente para as usinas distantes da área de cultivo. Ultimamente, algumas indústrias optam em concentrar o resíduo, reduzindo o conteúdo da água, o que conseqüentemente aumenta o teor de potássio (Silva et al., 2019).

Pela literatura constata-se que o método de aplicação da vinhaça mais utilizado no Brasil, especificamente no Estado de São Paulo, é a fertirrigação com a vinhaça *in natura*. Contudo, avaliam-se outros métodos de aplicação, além da concentração, com menor custo aos produtores e menores impactos ao meio ambiente, como a biodigestão e a incineração (Poveda, 2014).

Na fertirrigação com a vinhaça *in natura*, a aplicação é feita diretamente no solo sem o subproduto passar por qualquer tratamento prévio. Antigamente as usinas adotavam mais a inundação e a infiltração como sistemas de fertirrigação da vinhaça. Mas, isso vem mudando ao longo do tempo, por conta dos impactos econômicos e ambientais que estes métodos causam. Atualmente, verifica-se mais a utilização de

caminhões-tanque e aspersão como métodos mais eficazes na aplicação deste resíduo via fertirrigação (Silva et al., 2019; Poveda, 2014).

O sistema caminhões-tanque consegue atingir 80% da área total irrigada, possui baixo custo e facilidade na locomoção, mas pode causar compactação no solo durante a aplicação. Por sua vez, o sistema aspersão é montado em um conjunto motobomba com aspersor do tipo canhão-hidráulico acoplado em chassi com rodas soltando a vinhaça diretamente de um determinado canal específico; este sistema possui vantagens como melhor controle da quantidade de vinhaça a ser aplicada na área e menor mão de obra (Poveda, 2014). Sendo assim, os benefícios podem ser diretos, reduzindo o custo com a adubação mineral, ou indiretos, aumentando a fertilidade do solo.

A concentração é uma das técnicas usadas no tratamento da vinhaça antes da sua aplicação como fertilizante, que consiste em reduzir a quantidade de água presente no subproduto para obter um volume menor (Carvalho et al., 2010). Utilizam-se evaporadores para realização desta atividade, no entanto, o tipo a ser usado depende do soluto e do solvente da matéria prima. Tradicionalmente os mais usados são os de película descendente (Falling Film), pois suportam baixas viscosidades e elevadas taxas de evaporação, permitindo as instalações de grande porte concentrar até 150 m<sup>3</sup> de vinhaça *in natura* por hora (Poveda, 2014). Essa estratégia proporciona uma maior flexibilização referente a logística de aplicação no solo, reduzindo principalmente os custos com o transporte para com a aplicação.

A biodigestão ocorre de forma anaeróbica usando reatores anaeróbicos com circulação interna (UASB). No processo, as cargas orgânicas são biodegradadas gerando como resultado biogás (CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>), fluidos com alto teor nutricional NPK. Essa forma possui vantagens como, baixo consumo da energia, baixo potencial poluidor, menor produção de biomassa, redução de carga orgânica da vinhaça facilitando a sua aplicação no solo, por outro lado possui como desvantagem o custo de aquisição do equipamento (Santos, 2020).

Poveda (2014) comparou diferentes alternativas de processamento para o aproveitamento energético da vinhaça, analisando o parâmetro econômico e ambiental. Para isso, foram testadas biodigestão, concentração, incineração e combinação de concentração com biodigestão. O autor constatou que todas as alternativas testadas possibilitaram a melhoria do desempenho ambiental, mas a



concentração foi a que se mostrou mais viável economicamente para o aproveitamento da energia.

### **2.3 O solo sob aplicação de vinhaça**

Cientes da importância das funções do solo para as atividades agrícolas, considera-se especial atenção aos manejos conservacionistas, visando cumprir os requisitos da sustentabilidade, tais como adoção de técnicas com menos revolvimento do solo, uso racional de subprodutos orgânicos usados na agricultura e medidas preventivas para evitar a contaminação de lençol freático.

De modo geral, quando submetido ao constante cultivo de cana-de-açúcar, sem a adoção de nenhum método conservacionista, o solo tende a perder suas propriedades originais, na maioria das vezes, por conta do fracionamento dos agregados, que promove diminuição dos poros e aumento da densidade (Cavalcante, 2018).

Cavalcante (2018), avaliou os atributos físicos e mecânicos de um Argissolo Amarelo distrocoeso, sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar, coletando as amostras nas camadas 0,00-0,20 m e 0,20-0,40 m de profundidade em 5 áreas com números de colheitas distintas (T0 – pousio, T1 – após duas colheitas, T2 – após três colheitas, T3 – após quatro colheitas e T4 – após cinco colheitas). O autor constatou que as áreas com maiores números de colheita apresentaram maior grau de compactação do solo (T0 – 75,16 %; T1 – 74,06 %; T2 – 74,25 %; T3 – 78,76 % e T4 – 85,43%).

Atualmente, o uso dos subprodutos orgânicos como fonte de adubo na agricultura, tem sido um dos métodos mais adotados pelos produtores, principalmente por possuírem potenciais nutrientes para plantas e elevados conteúdos de matéria orgânica, que basicamente ajudam na mineralização dos nutrientes e na estruturação do solo (ROSA et al., 2019; Vendruscolo et al., 2018). Barros et al. (2010), pesquisando os impactos do uso da vinhaça nas alterações dos atributos químicos de um Argissolo Vermelho Amarelo eutrófico, cultivado com cana-de-açúcar, constataram que a aplicação do subproduto proporcionou incrementos da matéria orgânica na camada superficial do solo (0,10-0,15 m), o que conseqüentemente influenciou diretamente na disponibilidade dos macronutrientes Ca, Mg e K, atingindo 300% no teor de Ca+Mg do solo e 230% no teor de K do solo, em relação a área sem aplicação de vinhaça.

Os sistemas de manejo, que envolvem a adição dos subprodutos orgânicos no solo, podem provocar alterações nas suas propriedades físicas e químicas. Silva et al. (2014) constataram que a aplicação de vinhaça, doses 00, 100, 200, 400 e 800  $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ , durante 3 anos em um Neossolo Quartzarênico órtico (argila 130  $\text{g kg}^{-1}$ , silte 30  $\text{g kg}^{-1}$  e areia 840  $\text{g kg}^{-1}$ ), com cultivo de cana-de-açúcar, proporcionou incremento de até 35% nos teores de K do solo, especificamente na camada 0,20-0,40 m de profundidade. Por outro lado, avaliando o efeito da aplicação de vinhaça durante dois anos em um solo argiloso com 750  $\text{g kg}^{-1}$  de argila, Jiang et al. (2012) observaram aumentos nos teores de K do solo, com incrementos até de 35%. Canellas et al. (2003) observaram incrementos de 100% no teor de K, 8% no teor de Ca e 9% no teor de Mg do solo nas camadas 00-0,20 e 0,20-0,40 m de profundidade, aplicando via fertirrigação 120  $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$  de vinhaça durante 35 anos.

Andreotti et al. (2015) avaliaram o efeito das doses de vinhaça (0, 50, 100 e 200  $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ ) nos atributos químicos de um Argissolo Vermelho eutrófico de textura arenosa média, durante um ano de aplicação. Os autores constataram que as doses de 100 e 200  $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$  de vinhaça aplicada influenciaram as propriedades químicas do solo, elevando os teores do pH, P, K, Ca e Mg, com maior aumento no teor de potássio, 1,5  $\text{mg dm}^{-3}$  com 00  $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$  para 3  $\text{mg dm}^{-3}$  com 200  $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ , e no teor de magnésio, 4,4  $\text{mg dm}^{-3}$  com 00  $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$  para 5,8  $\text{mg dm}^{-3}$  com 200  $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ .

Galdeano (2019) constatou a melhoria da fertilidade de um Latossolo Vermelho textura argilosa observando a análise temporal e espacial das propriedades químicas e físicas do solo cultivado com cana-de-açúcar, com aplicação de vinhaça ao longo de 5 anos. O autor verificou aumento nos teores dos macronutrientes avaliados, atingindo valores máximos de 17,43  $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$  para o K, 78,34  $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$  para o Ca e 41,67  $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$  para o Mg, na camada de 0,30 m de profundidade.

Por sua vez, Silva et al. (2019) também constataram o aumento de potássio (K) em um Argissolo Vermelho Amarelo eutrófico típico, com aplicação de vinhaça “in natura” e vinhaça associada com N-fertilizante na cultura de cana-de-açúcar. Foram testados 5 tratamentos: T1 – vinhaça “in natura” (120  $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ ), T2 – vinhaça “in natura” (120  $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ ) + 60  $\text{kg ha}^{-1}$  de N-ureia, T3 – vinhaça concentrada (20  $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ ), T4 – 60  $\text{kg ha}^{-1}$  de N-ureia e T5 – sem aplicação de vinhaça. Os autores observaram diferença significativa para o T1 em relação ao aumento do teor de potássio no solo, com maior valor em todas as camadas avaliadas (74,83  $\text{mg L}^{-1}$  na camada 00-0,20 m, 35,83  $\text{mg L}^{-1}$  na camada 0,20-0,40 m e 32,83  $\text{mg L}^{-1}$  na camada 0,40-0,60 m). Os autores

justificaram que na vinhaça “in natura” há maior teor de potássio na composição, quando comparado aos demais tratamentos avaliados.

Quanto à estrutura do solo, constata-se que na maioria das condições, os solos de textura argilosa apresentam pequenas alterações em função dos manejos aplicados, principalmente devido ao elevado teor de argila e de carbono orgânico que atuam como agente cimentantes unindo as partículas sólidas do solo (Seben Júnior et al., 2016; Blanco-Canqui, 2017).

Quanto aos benefícios da aplicação de vinhaça para com os atributos físicos do solo, Santos et al. (2017) monitoraram as alterações no teor da matéria orgânica e nas propriedades físicas de um Argissolo Vermelho Amarelo textura média (840 g kg<sup>-1</sup> de areia, 55 g kg<sup>-1</sup> de silte e 105 g kg<sup>-1</sup> de argila, na camada 00-0,25 m, e 793 g kg<sup>-1</sup> de areia, 62 g kg<sup>-1</sup> de silte e 145 g kg<sup>-1</sup> de argila, na camada 0,25-0,50 m), sob diferentes usos de vinhaça e sistemas de colheita da cana-de-açúcar (sem aplicação de vinhaça e colheita de cana sem queima, com aplicação de vinhaça e colheita de cana sem queima, com aplicação de vinhaça e colheita de cana queimada, sem aplicação de vinhaça e colheita de cana queimada). Os valores da densidade do solo (Ds), determinados da camada 0,10-0,20 m, foram 1,65 g cm<sup>-3</sup> na área com aplicação de vinhaça e colheita de cana queimada e 1,67 g cm<sup>-3</sup> na área sem aplicação de vinhaça e colheita de cana sem queima. Quanto à porosidade total do solo, observaram redução nos valores de 41,06 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> para 32,65 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>, na camada 0,10-0,20 m de profundidade, independentemente do manejo. Portanto, os autores observaram que a aplicação de vinhaça não evitou a redução da densidade do solo, tão pouco proporcionou aumento do teor de matéria orgânica no solo (9,55 g dm<sup>-3</sup> na área sem vinhaça e sem queima para, 10,58 g dm<sup>-3</sup> na área com vinhaça e sem queima). De acordo com os autores, o tráfego das máquinas e o tempo de 1 ano de aplicação foram os principais fatores que influenciaram o pouco efeito do subproduto no solo estudado.

Geralmente quando se trata dos atributos físicos do solo, é necessário um longo período de aplicação para a observação das alterações, além de depender de fatores como o tipo do subproduto aplicado, a quantidade e a composição química do mesmo e o tipo do solo aplicado (Vendruscolo et al., 2018).

O aumento das doses de vinhaça (0, 450, 600 e 750 mg ha<sup>-1</sup>) aplicados em um Latossolo Vermelho distrófico, durante 111 dias, aumentou a matéria orgânica do solo, de 7 g kg<sup>-1</sup> com 00 mg ha<sup>-1</sup> para 9 g kg<sup>-1</sup> com 750 mg ha<sup>-1</sup>, conseqüentemente

diminuíram a densidade deste solo (Ds), proporcionando valores médios de 1,71 mg m<sup>-3</sup> (00 mg ha<sup>-1</sup>) para 1,60 mg m<sup>-3</sup> (750 mg ha<sup>-1</sup>) na camada 0-0,5 m; de 1,71 mg m<sup>-3</sup> (00 mg ha<sup>-1</sup>) para 1,62 mg m<sup>-3</sup> (750 mg ha<sup>-1</sup>) na camada 0,5-0,10 m; de 1,73 mg m<sup>-3</sup> (00 mg ha<sup>-1</sup>) para 1,60 mg m<sup>-3</sup> (750 mg ha<sup>-1</sup>) na camada 0,10-0,20 m; de 1,68 mg m<sup>-3</sup> (00 mg ha<sup>-1</sup>) para 1,55 mg m<sup>-3</sup> (750 mg ha<sup>-1</sup>) na camada 0,20-0,40 m (Prado et al., 2017).

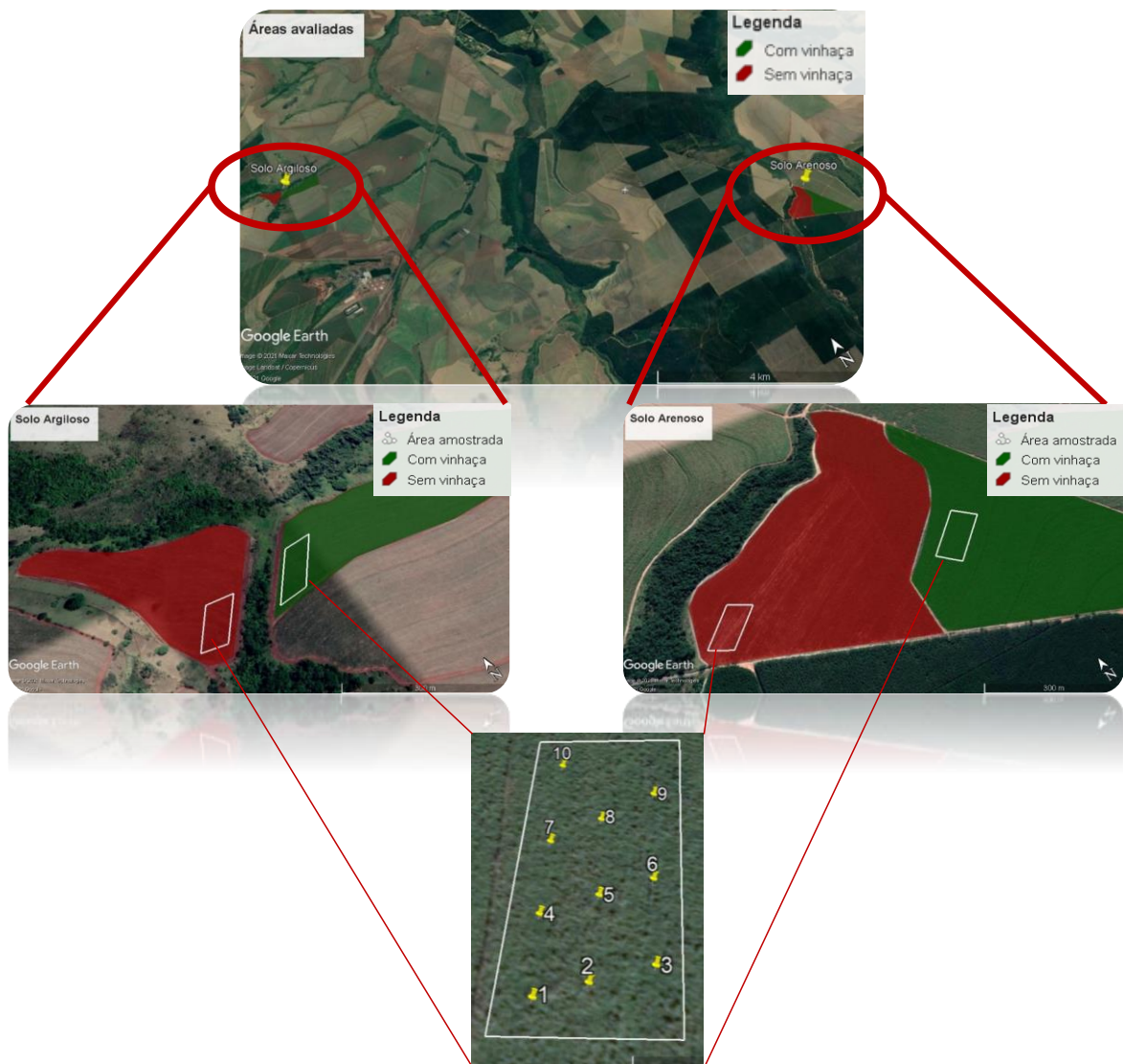
### 3. MATERIAL E MÉTODOS

A avaliação dos atributos dos solos foi realizada em duas áreas agrícolas localizadas no estado de São Paulo (Figura 1). O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Cwa, subtropical úmido com inverno seco e verão quente, com temperatura média do mês mais quente de 22,8 °C, temperatura média do mês mais frio de 16,8 °C e precipitação média anual de 1352 mm.

As duas áreas agrícolas apresentaram solos com classes texturas distintas, ambas destinadas à produção de cana-de-açúcar por mais de 20 anos, com colheita de cana-de-açúcar crua mecanizada desde 2005. Na área 1, o solo de textura argilosa apresentou 490 g kg<sup>-1</sup> de argila, 420 g kg<sup>-1</sup> de areia e 90 g kg<sup>-1</sup> de silte, na camada 0,00-0,20 m e na área 2, o solo de textura arenosa apresentou 80 g kg<sup>-1</sup> de argila, 860 g kg<sup>-1</sup> de areia e 60 g kg<sup>-1</sup> de silte, na camada 0,00-0,20 m.

Na área de solo argiloso, o solo é um Latossolo Vermelho distroférico típico, classificado como ambiente de produção A para o cultivo de cana-de-açúcar, enquanto na área de solo arenoso, o solo é um Neossolo Quartzarênico órtico, classificado como ambiente de produção E para o cultivo de cana-de-açúcar (Prado et al., 2008; Santos et al., 2018).

Em cada uma das áreas acima mencionadas, encontram-se duas condições de manejos, sendo uma com aplicação de vinhaça, por mais de 10 anos, e outra sem aplicação de vinhaça. Assim, as áreas agrícolas avaliadas foram: área com solo argiloso com aplicação de vinhaça (ArgCV), área com solo argiloso sem aplicação de vinhaça (ArgSV), área com solo arenoso com aplicação de vinhaça (AreCV), área com solo arenoso sem aplicação de vinhaça (AreSV). A área total com cultivo de cana-de-açúcar avaliada foi de aproximadamente 20 ha, sendo 10 ha com solo de textura argilosa e 10 ha com solo de textura arenosa. Dentro de cada área com solo distinto, existem 5 ha com cultivo de cana-de-açúcar com aplicação de vinhaça e 5 ha com cultivo de cana-de-açúcar sem aplicação de vinhaça.



**Figura 1.** Localização das áreas avaliadas, com detalhes das duas condições de manejo (com aplicação de vinhaça e sem aplicação de vinhaça) e dos dez pontos amostrados.

Há mais de 20 anos, a cultura da cana-de-açúcar foi conduzida nessas áreas, segundo as recomendações fitotécnicas específicas, assim como as correções e as adubações do solo (Spironello et al., 1997). Durante as operações de preparo de solo nas renovações das áreas nos 20 anos, realizou-se a aplicação de corretivos, com o propósito de elevar a saturação por bases a 70% e a adubação de plantio realizou-se de acordo com os resultados da análise química de solo. O plantio da cana-de-açúcar ocorreu no sistema semi-mecanizado, que consiste na mecanização das operações

de preparo de solo e transporte das mudas de cana-de-açúcar, com exceção da distribuição de mudas nos sulcos de plantio, realizada de forma manual.

O espaçamento entre linhas utilizado no plantio foi de 1,5 m. Todas as operações agrícolas, durante o ciclo produtivo da cana-de-açúcar, foram realizadas nas linhas de cultivo. A colheita da cana-de-açúcar foi mecanizada sem a queima da palha. Na área de solo argiloso, a última reforma do canavial foi realizada em 2018, com plantio da cultivar de cana-de-açúcar CTC9005 HP, enquanto na área de solo arenoso a última reforma do canavial foi realizada em 2017, utilizando-se a cultivar de cana-de-açúcar RB86-7515.

Os tratos culturais da soqueira da cana-de-açúcar também seguiram as recomendações fitotécnicas específicas e as correções e as adubações do solo também foram realizadas segundo Spironello et al. (1997). Entretanto, nas áreas com aplicação de vinhaça, o fornecimento de potássio ocorreu exclusivamente via fertirrigação, sem nenhuma adição de adubo potássico mineral. Nessas áreas com aplicação de vinhaça, realizou-se a adubação da soqueira, com o propósito de aplicar  $80 \text{ kg ha}^{-1}$  de N e  $20 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ . Para o fornecimento de K, aplicou-se em torno de  $70 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  de vinhaça, com teor médio de  $4,83 \text{ kg m}^{-3}$  de  $\text{K}_2\text{O}$ , por meio do conjunto rolobomba e canhão aspersor autopropelido, aplicando  $338 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{O}$  por ano. A aplicação da vinhaça ocorreu sempre no período da safra, entre os meses de abril a novembro, não ultrapassando 15 dias após o corte mecanizado da cultura. A colheita da cana-de-açúcar foi realizada no mês de maio na área de solo argiloso e em agosto na área de solo arenoso. Nas áreas sem aplicação de vinhaça, realizou-se a adubação da soqueira, aplicando-se  $80 \text{ kg ha}^{-1}$  de N,  $20 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  e  $80 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{O}$ .

A composição química média da vinhaça aplicada anualmente na soqueira da cana-de-açúcar por mais de 10 anos foi:  $0,55 \text{ kg m}^{-3}$  de N,  $0,16 \text{ kg m}^{-3}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $4,83 \text{ kg m}^{-3}$  de  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $0,96 \text{ kg m}^{-3}$  de CaO,  $1,10 \text{ kg m}^{-3}$  de MgO,  $0,10 \text{ kg m}^{-3}$  de Na,  $3,90 \text{ mg dm}^{-3}$  de Cu,  $29,88 \text{ mg dm}^{-3}$  de Fe,  $4,79 \text{ mg dm}^{-3}$  de Mn,  $2,37 \text{ mg dm}^{-3}$  de Zn e pH de 4,21. As amostras de solo, deformadas e indeformadas, foram coletadas no mês de novembro de 2019, após a colheita da cana-de-açúcar e após a aplicação anual de vinhaça, a 0,20 m do centro da touceira da cana-de-açúcar. Em cada área, ArgCV, ArgSV, AreCV, AreSV foram coletados 10 pontos em cada uma das camadas 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m de profundidade.

As amostras deformadas foram coletadas utilizando um trado do tipo holandês, e as amostras indeformadas com amostrador tipo Uhland em anéis volumétricos com dimensões de 0,05 m x 0,05 m.

Nas amostras deformadas de solo foram avaliados cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K), enxofre (S), ferro (Fe), cobre (Cu) manganês (Mn), zinco (Zn), pH, acidez potencial (H+Al), capacidade de troca catiônica (CTC), soma de bases (SB) e saturação de bases (V) de acordo com Raij et al. (2001) e carbono orgânico (CO) do solo, segundo Yeomans e Bremner (1988).

Nas amostras indeformadas de solo foram avaliados os atributos macroporosidade (macro) e microporosidade (micro) do solo, de acordo com Teixeira et al. (2017) e resistência do solo à penetração (RP), segundo Tormena et al. (1998), após submeter as amostras à tensão de 100 hPa, utilizando-se um penetrômetro eletrônico estático de laboratório.

Inicialmente, aplicou-se a estatística descritiva dos atributos químicos e físicos do solo, a fim de determinar a média e o erro padrão da média para cada variável, em cada camada (0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m), nas quatro áreas avaliadas (ArgCV, ArgSV, AreCV e AreSV).

Devido à estrutura de dependência contida no conjunto original de variáveis, os dados foram submetidos à análise exploratória multivariada de fatores, que possibilitou projetar toda informação contida nas variáveis originais em novas variáveis latentes, denominadas de fatores, visando identificar possíveis processos contidos no conjunto de variáveis originais.

A análise de fatores foi realizada para cada tipo de solo, com as 60 amostras coletadas em cada um. Assim, para não ultrapassar o número mínimo de 5 amostras para cada variável (Hair Júnior et al., 2009), foram utilizadas 12 variáveis na análise de fatores de cada solo. As 12 variáveis foram escolhidas após uma pré-análise por meio de matriz de correlação das variáveis em cada solo, descartando-se as variáveis que menos se correlacionaram com as demais. Assim, as variáveis selecionadas para a análise de fatores foram CO, K, Ca, Mg, S, pH, Cu, Mn, Zn, macro, micro e RP. Como em análise exploratória multivariada de fatores não podem ser utilizadas variáveis cujos resultados são provenientes de outras variáveis presentes no conjunto de dados, a CTC, SB e V não foram incluídas na análise, apresentando-se somente a estatística descritiva dessas variáveis. Além dessas variáveis, apresentou-se a estatística descritiva da variável H+Al.



A análise de fatores foi realizada após a padronização dos dados, gerando média nula e variância unitária (Hair Júnior et al., 2009). A adequação desta análise foi verificada pela quantidade da informação total das variáveis originais retida nos fatores, construídos com autovalores maiores que 1 (Kaiser, 1958), pois os autovalores inferiores a 1 não agregam informações relevantes. Os autovalores foram extraídos da matriz de covariância das variáveis originais e os fatores foram submetidos à rotação pelo método varimax raw. As análises estatísticas foram processadas no software Statistica v. 7.0. Foram consideradas como relevantes dentro de cada fator as variáveis com carga fatorial acima de 0,600.

A partir da análise de fatores, foram utilizados os escores gerados para cada amostra em cada fator para a realização do teste de médias para cada fator (Milstein et al., 2005). No teste das médias, foram realizadas uma análise de variância para cada fator, comparando as áreas e as camadas avaliadas. Essas análises foram realizadas seguindo o modelo linear generalizado (GLM) a 5% de probabilidade e, quando necessário, aplicou-se o teste de médias de Tukey a 5% de probabilidade.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na análise multivariada de fatores para o solo argiloso, verificaram-se três fatores relevantes para a explicação da variabilidade dos dados, ou seja, com autovalores superiores a 1 (Tabela 1). O fator 1 representou 30,20% da variabilidade explicada, o fator 2 representou 24,10% da variabilidade explicada e o fator 3 representou 19,90% da variabilidade explicada, totalizando 74,20% da variabilidade total dos atributos do solo. Os três fatores independem um do outro, ou seja, a ocorrência de um não interfere nos demais.

**Tabela 1.** Cargas fatoriais das variáveis analisadas do solo argiloso com aplicação de vinhaça e sem aplicação de vinhaça.

Variáveis	Fator 1	Fator 2	Fator 3
Carbono orgânico (CO)	0,226	<b>0,759</b>	-0,179
Potássio (K)	<b>0,847</b>	0,163	0,098
Cálcio (Ca)	<b>0,841</b>	0,308	0,092
Magnésio (Mg)	<b>0,743</b>	0,439	-0,008
Enxofre (S)	<b>0,899</b>	0,348	0,079
pH	<b>0,754</b>	-0,389	-0,008
Cobre (Cu)	0,230	0,494	0,323
Manganês (Mn)	0,172	<b>0,844</b>	0,101
Zinco (Zn)	0,318	<b>0,848</b>	0,127
Macroporosidade (Macro)	-0,083	-0,122	<b>-0,901</b>
Microporosidade (Micro)	0,161	-0,146	<b>0,848</b>
Resistência do solo à penetração (RP)	-0,074	0,135	<b>0,818</b>
Variância explicada	3,628	2,892	2,388
% da variância explicada	30,20	24,10	19,90

No fator 1, destacaram-se como as variáveis com autovalores acima de 0,600 o pH e os macronutrientes K, Ca, Mg, S. As cinco variáveis apresentaram cargas fatoriais positivas nesse fator e foram correlacionadas diretamente entre si, ou seja, se uma aumentar, todas aumentarão, e se uma diminuir, todas diminuirão. No fator 2, os atributos CO, Mn e Zn foram os mais relevantes e apresentaram cargas fatoriais positivas, ou seja, se correlacionaram diretamente entre si. Assim, constatou-se que o aumento de teor de CO do solo influenciou diretamente a disponibilidade dos

micronutrientes Mn e Zn. No fator 3, observou-se a relevância dos atributos relacionados a estrutura do solo, sendo eles a macroporosidade, microporosidade e resistência do solo à penetração. Nesse fator, a variável macroporosidade apresentou carga fatorial negativa, enquanto a microporosidade e a resistência do solo à penetração apresentaram cargas fatoriais positivas. Isso significa correlação direta entre microporosidade e resistência do solo à penetração e correlação inversa dessas variáveis com a macroporosidade do solo.

A partir da análise de variância dos escores gerados pela análise multivariada de fatores dentro de cada fator no solo argiloso, constatou-se que, para os fatores 1 e 2 somente ocorreu diferenças entre áreas e não houve diferença entre as camadas avaliadas quanto à aplicação da vinhaça. Por outro lado, para o fator 3, ocorreu diferença significativa a 1% de probabilidade somente entre as camadas (Tabela 2). Ressalta-se que em nenhum dos fatores ocorreu a interação entre os fatores estudados.

**Tabela 2.** Modelo linear generalizado dos escores gerados, a partir da análise multivariada de fatores para os fatores com autovalores acima de 1, para o solo argiloso com aplicação de vinhaça e sem aplicação de vinhaça.

Fontes de variação	Fator 1		Fator 2		Fator 3	
	F	valor-p	F	valor-p	F	valor-p
Área (A)	7,73**	0,007	25,53**	<0,001	0,09ns	0,768
Camada (C)	0,08ns	0,916	1,52ns	0,227	10,82**	<0,001
A x C	0,02ns	0,984	0,01ns	0,991	0,36ns	0,697

\*\*Significativo a 1% de probabilidade; ns: não significativo

No teste de comparação das médias dos escores para o solo argiloso, observou-se que nos fatores 1 e 2, a área com aplicação de vinhaça apresentou média superior em relação à área sem aplicação de vinhaça (Tabela 3). As médias dos escores com valores positivos, dentro do fator 1, estão associados diretamente às variáveis com cargas fatoriais positivas e indiretamente com as variáveis com cargas fatoriais negativas dentro do mesmo fator (Tabela 1). Portanto, a área com aplicação de vinhaça, com escore positivo, apresentou maiores valores para os teores de K, Ca, Mg, S e pH.

**Tabela 3.** Teste de média dos escores gerados, a partir da análise multivariada de fatores para os fatores com autovalores superior a 1, para o solo argiloso com aplicação de vinhaça e sem aplicação de vinhaça.

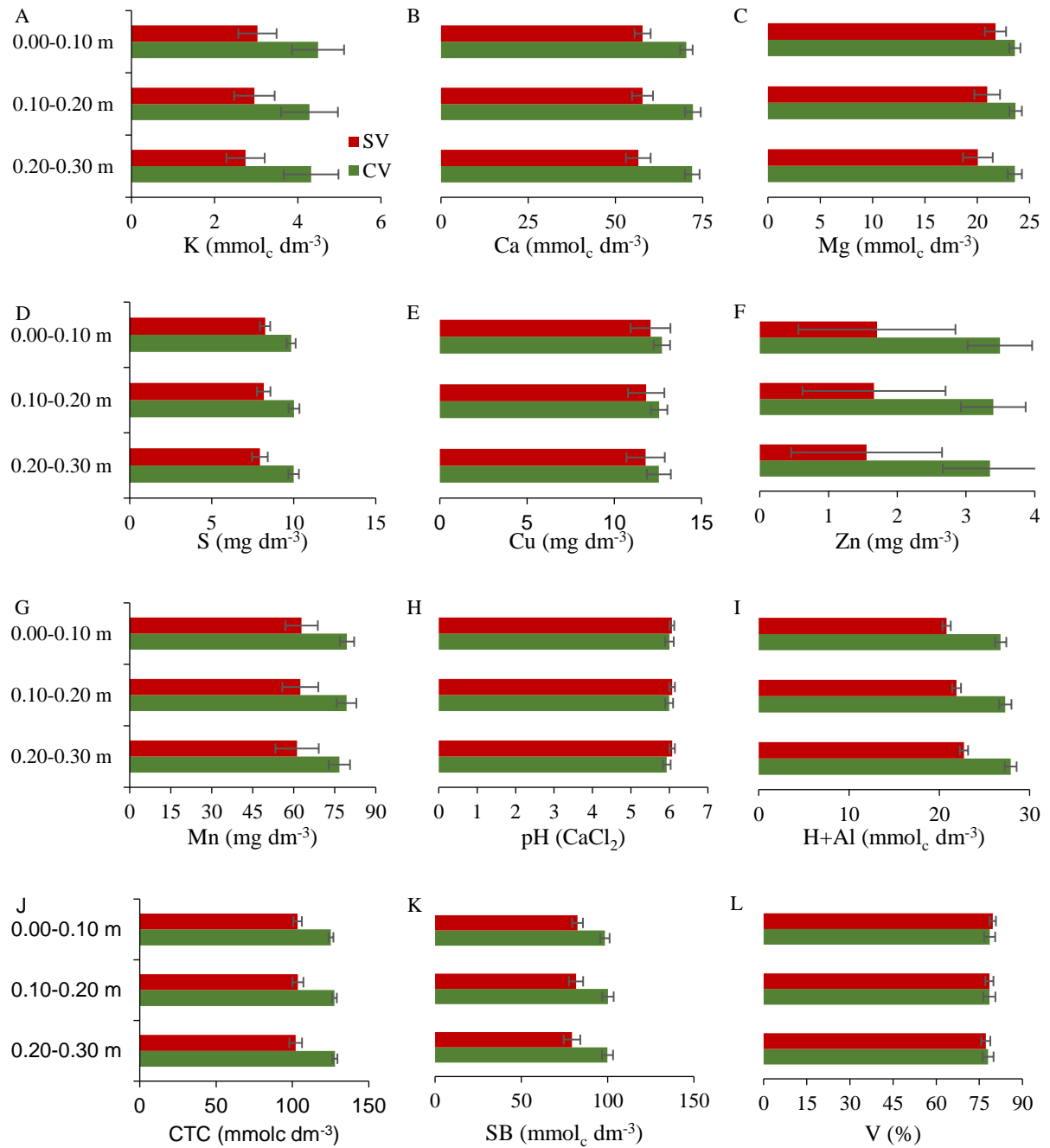
Tratamentos	Fator 1	Fator 2	Fator 3
Área			
Com vinhaça	0,35 a	0,55 a	0,03
Sem vinhaça	-0,35 b	-0,55b	-0,03
Camada (m)			
0,00-0,10	0,04	0,25	-0,72 a
0,10-0,20	0,04	-0,06	0,23 b
0,20-0,30	-0,07	-0,20	0,50 b

Letras distintas na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

No fator 2, o escore positivo da área com aplicação de vinhaça correlacionou-se diretamente com maiores valores de carbono orgânico e teores dos micronutrientes Mn e Zn, em comparação à área sem aplicação de vinhaça.

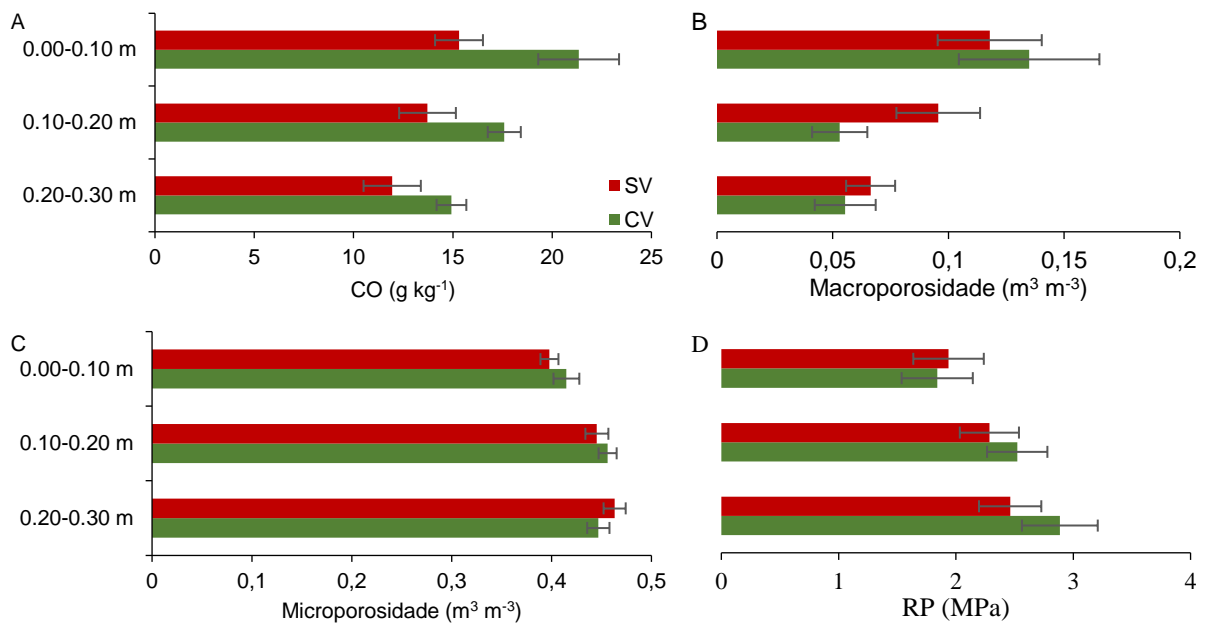
No fator 3, constatou-se que a camada do solo superficial (0,00-0,10 m) apresentou diferenças em relação às demais camadas avaliadas (0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m) (Tabela 3). Ressalta-se que com o escore negativo verificado na camada (0,00-0,10 m), houve associação desta com maiores valores de macroporosidade e menores valores de microporosidade e de resistência do solo à penetração.

Na estatística descritiva, constatou-se no solo argiloso que, a área com a aplicação da vinhaça apresentou, de forma geral, maiores médias para os atributos químicos avaliados (Figura 2). Estes resultados demonstram que a aplicação da vinhaça por longo período aumentou os teores dos macros e micronutrientes, independentemente da camada do solo avaliada. Além disso, independentemente da camada do solo, a aplicação de vinhaça aumentou o teor de H+Al, capacidade de troca catiônica (CTC), soma de bases (SB) e não influenciou nos teores de Cu e valores de pH e saturação por bases (V) do solo.



**Figura 2.** Estatística descritiva para os atributos químicos do solo argiloso com aplicação de vinhaça (CV) e sem aplicação de vinhaça (SV). CTC: Capacidade de troca catiônica; SB: soma de bases; V: saturação de bases.

No solo argiloso, verificou-se em média, para as duas áreas e em todas as camadas avaliadas, valores entre 0,40 e 0,45  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  para o atributo microporosidade do solo (Figura 3C). Por outro lado, a aplicação do subproduto aumentou a macroporosidade na camada superficial do solo argiloso (0,00-0,10 m), atingindo o valor de 0,14  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  (Figura 3B) e, em contrapartida, a resistência do solo a penetração foi maior nas camadas mais profundas do solo argiloso (0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m) (Figura 3D).



**Figura 3.** Estatística descritiva para o carbono orgânico, macroporosidade, microporosidade e resistência do solo à penetração do solo argiloso com aplicação de vinhaça (CV) e sem aplicação de vinhaça (SV). CO: Carbono orgânico; RP: resistência do solo à penetração.

Na análise multivariada de fatores do solo arenoso, constataram-se quatro fatores com autovalores superiores a 1, significativos para explicar a variabilidade obtida do conjunto das variáveis originais (Tabela 4). A soma total dos quatro fatores explicou 76,90% da variabilidade total, sendo 28,20% para o fator 1, 23,40% para o fator 2, 15,30% para o fator 3 e 10,00% para o fator 4. Vale destacar que os fatores são independentes, ou seja, a ocorrência de um não interfere nos demais.

**Tabela 4.** Cargas fatoriais das variáveis analisadas do solo arenoso com aplicação de vinhaça e sem aplicação de vinhaça.

Variáveis	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 4
Carbono orgânico (CO)	<b>0,797</b>	0,050	0,296	-0,106
Potássio (K)	0,249	0,073	0,036	<b>0,893</b>
Cálcio (Ca)	<b>0,898</b>	0,263	-0,008	0,129
Magnésio (Mg)	<b>0,758</b>	0,418	-0,089	0,284
Enxofre (S)	<b>0,892</b>	0,325	-0,032	0,233
pH	0,287	0,390	<b>-0,600</b>	0,042
Cobre (Cu)	-0,127	-0,192	<b>0,653</b>	0,072
Manganês (Mn)	0,326	0,550	0,475	0,112
Zinco (Zn)	0,190	0,127	<b>0,819</b>	-0,020
Macroporosidade (Macro)	-0,363	<b>-0,866</b>	0,087	-0,080
Microporosidade (Micro)	0,334	<b>0,771</b>	0,186	-0,249
Resistência do solo à penetração (RP)	0,163	<b>0,777</b>	-0,151	0,396
Variância explicada	3,386	2,813	1,835	1,204
% da variância explicada	28,20	23,40	15,30	10,00

No fator 1, os atributos com maior relevância, ou seja, aqueles com autovalores acima de 0,600 foram CO, Ca, Mg e S, que apresentaram cargas fatoriais positivas, indicando correlação direta entre si. Ao comparar os dois solos avaliados, observou-se que para o solo arenoso a disponibilidade de nutrientes decorreu principalmente do CO.

No fator 2, os atributos relevantes foram os relacionados a estrutura do solo, macroporosidade, microporosidade e resistência do solo à penetração. As variáveis microporosidade e resistência do solo à penetração apresentaram cargas fatoriais positivas, e a macroporosidade apresentou carga fatorial negativa, assim como observado no fator 3 para o solo argiloso. Isso indica que microporosidade e resistência do solo à penetração se correlacionaram diretamente entre si e inversamente com a macroporosidade do solo.

No fator 3, observou-se correlação inversa entre o atributo pH, com carga fatorial negativa, com os atributos Cu e Zn, com cargas fatoriais positivas. Isso indica que o aumento do pH reduz a disponibilidade de micronutrientes e vice-versa. Diferentemente do solo argiloso, não houve interação desses atributos de acidez do solo e micronutrientes com o carbono orgânico do solo.

No fator 4 para o solo arenoso, apenas o teor de potássio (K) apresentou carga fatorial acima de 0,600, considerada relevante. Vale destacar para a análise

exploratória multivariada de fatores do solo arenoso que os fatores 1, 2 e 3 identificaram processos dentro do solo, pois esses fatores apresentaram mais de uma variável relevante, identificando as relações entre elas. O fator 4 não identificou um fator, pois somente o K foi relevante dentro desse fator. Entretanto, isso demonstra a importância dessa variável (K) para o solo arenoso, visto que a mesma permaneceu em um fator específico.

Na comparação de médias dos escores para cada fator no solo arenoso, constataram-se diferenças significativas a 1% de probabilidade para os fatores área e camada no fator 1 (Tabela 5). Para os fatores 2, 3 e 4, ocorreram diferenças para o fator área (Tabela 5). Essas diferenças observadas para os dois solos avaliados decorrem da influência da textura no comportamento do solo quanto à resposta à aplicação da vinhaça. Destaca-se também para o solo arenoso que as interações entre as fontes de variação não foram significativas em nenhum dos quatro fatores.

**Tabela 5.** Análise de variância dos escores gerados, a partir da análise multivariada de fatores para os fatores com autovalores acima de 1, para o solo arenoso com aplicação de vinhaça e sem aplicação de vinhaça.

Fontes de variação	Fator 1		Fator 2		Fator 3		Fator 4	
	F	valor-p	F	valor-p	F	valor-p	F	valor-p
Área (A)	22,26**	<0,001	38,92**	<0,001	4,69*	0,034	5,22*	0,026
Camada (C)	7,94**	<0,001	1,02ns	0,367	2,21ns	0,119	0,26ns	0,766
A x C	0,12ns	0,891	0,55ns	0,582	1,35ns	0,267	0,79ns	0,458

\*Significativo a 5% de probabilidade; \*\*Significativo a 1% de probabilidade; ns: não significativo

Para o solo arenoso dentro do fator 1 (Tabela 6), constataram-se maiores médias na área com aplicação de vinhaça em relação a área sem aplicação de vinhaça e na camada superficial (0,00-0,10 m) em relação à camada mais profunda (0,20-0,30 m). Tal resultado corrobora a influência da vinhaça no incremento da fertilidade do solo arenoso.



**Tabela 6.** Teste de média dos escores gerados, a partir da análise multivariada de fatores para os fatores com autovalores superior a 1, para o solo arenoso com aplicação de vinhaça e sem aplicação de vinhaça.

Tratamentos	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 4
<b>Área</b>				
Com vinhaça	0,48 a	0,63 a	-0,26 a	0,29 a
Sem vinhaça	-0,48 b	-0,63 b	0,26 b	-0,29 b
<b>Camada (m)</b>				
0,00-0,10	0,49 a	-0,19	0,27	-0,08
0,10-0,20	0,02 ab	0,03	0,07	-0,05
0,20-0,30	-0,51 b	0,16	-0,34	0,13

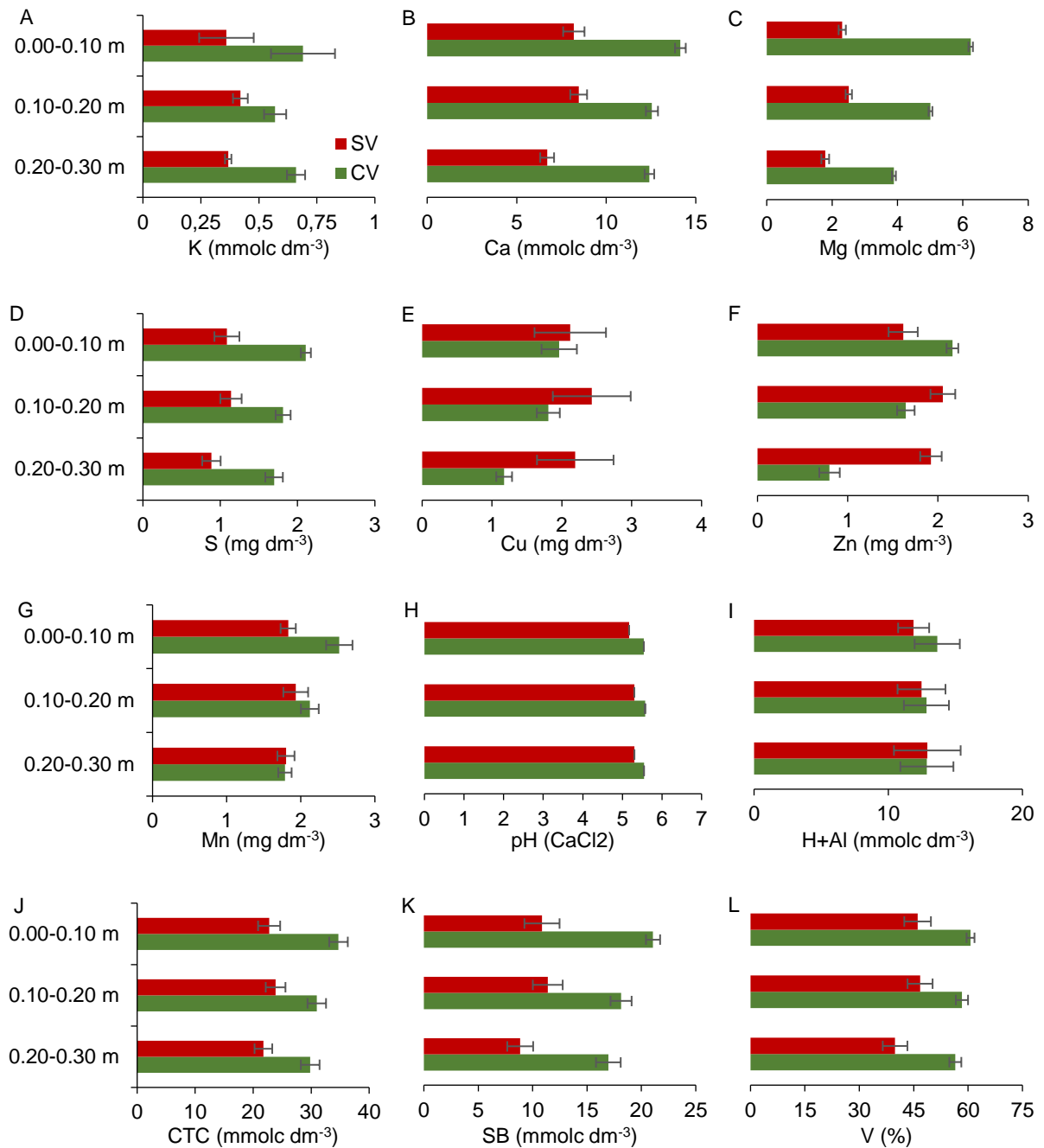
Letras distintas na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

Para o fator 2, a área com aplicação de vinhaça apresentou maior escore em relação a área sem aplicação de vinhaça. O escore positivo da área com aplicação de vinhaça está diretamente associado às variáveis da análise de fatores que com cargas fatoriais positivas (microporosidade e resistência do solo à penetração) e indiretamente com a variável com carga fatorial negativa (macroporosidade). Sendo assim, pode-se observar que a aplicação de vinhaça no solo arenoso promoveu aumento da microporosidade e da resistência do solo à penetração, em decorrência da redução da macroporosidade do solo (Figura 5). No fator 3, observou-se que a área com aplicação de vinhaça apresentou escore inferior à área sem aplicação de vinhaça. Portanto, para o solo arenoso, a área com aplicação de vinhaça promoveu maiores valores de pH e menores de Cu e Zn em relação à área sem aplicação.

Para o fator 4, verificou-se maior escore para a área com aplicação de vinhaça, em relação à área sem aplicação de vinhaça, ou seja, a aplicação de vinhaça aumentou o teor de K no solo arenoso (Figura 4A). Ressalta-se que o atributo com maior quantidade na composição da vinhaça K ficou em um fator isolado no solo de textura arenosa, diferente do ocorrido no solo argiloso, onde o K ficou no mesmo fator envolvendo outros macronutrientes.

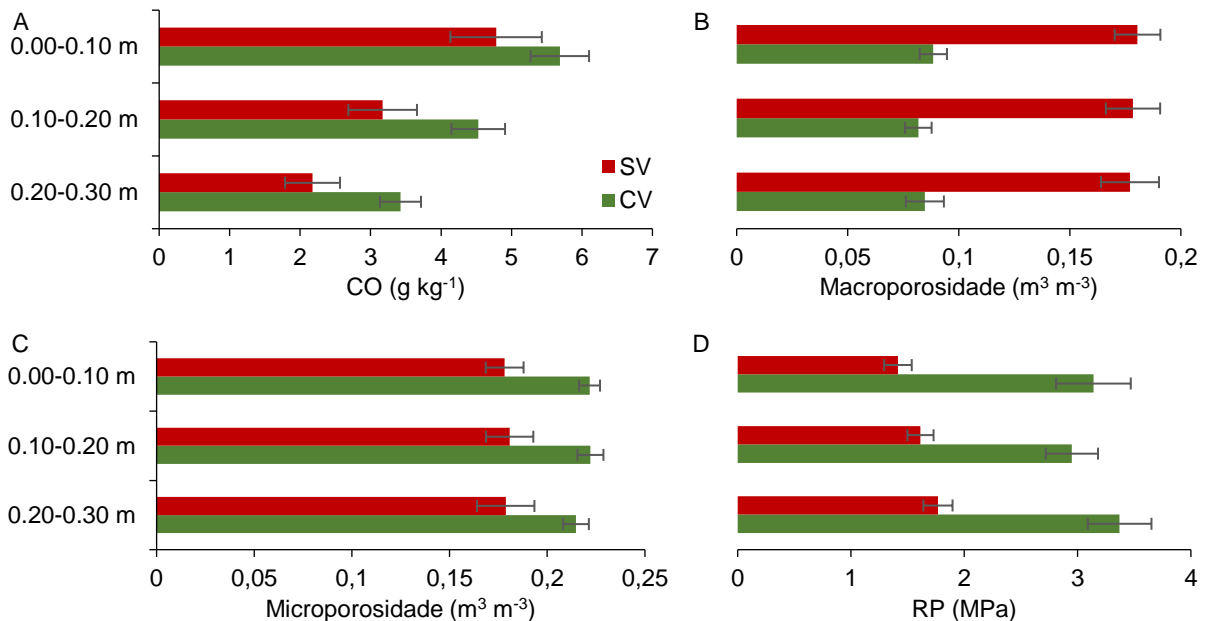
Por meio da estatística descritiva, observou-se que a área com aplicação de vinhaça apresentou maiores médias para a maioria dos atributos químicos avaliados no solo arenoso, em relação à área sem aplicação de vinhaça, com valores superiores na camada superficial (Figura 4). Exceção pode ser feita para o Cu, em que a área sem aplicação de vinhaça apresentou maiores teores, especialmente nas camadas mais subsuperficiais, e para o Zn nas camadas 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m, em que

área sem aplicação de vinhaça apresentou maiores valores. Além disso, não foram observadas diferenças nos teores de H+Al entre as áreas, independentemente da camada do solo.



**Figura 4.** Estatística descritiva para os atributos químicos do solo arenoso com aplicação de vinhaça (CV) e sem aplicação de vinhaça (SV). CTC: Capacidade de troca catiônica; SB: soma de bases; V: saturação de bases.

No geral, a área sob aplicação de vinhaça no solo arenoso promoveu incremento no teor de CO, microporosidade e resistência do solo à penetração, independentemente da camada do solo (Figura 5). Por aumentar a microporosidade do solo, a aplicação de vinhaça no solo arenoso reduziu a macroporosidade do mesmo, independentemente da camada avaliada (Figura 5B).



**Figura 5.** Estatística descritiva para o carbono orgânico, macroporosidade, microporosidade e resistência do solo à penetração no solo arenoso com aplicação de vinhaça (CV) e sem aplicação de vinhaça (SV). CO: Carbono orgânico; RP: resistência do solo à penetração.

Nos dois tipos de solo (argiloso e arenoso), a aplicação de vinhaça por longo período promoveu incrementos na fertilidade do solo, especialmente nos macronutrientes, visto que o fator com esses nutrientes foi estatisticamente superior nas áreas com aplicação de vinhaça (Tabelas 1 e 4). Além disso, os macronutrientes utilizados na análise (K, Ca, Mg e S) foram os mais afetados pela aplicação de vinhaça, pois para os dois solos esses nutrientes ficaram no fator 1, sendo o fator que mais explica a variabilidade total dos dados, exceção feita ao K no solo arenoso, que foi significativo no fator 4. Isso pode ser explicado pela elevada quantidade aplicada desses nutrientes no solo ao longo de 10 anos por meio da vinhaça. Aplicando-se a dose de 70 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> de vinhaça por ano e considerando a composição média dos nutrientes presentes no subproduto, foram aplicados no solo das áreas que receberam vinhaça durante os 10 anos 3.381 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O, 672 kg ha<sup>-1</sup> de CaO e 770 kg ha<sup>-1</sup>

de MgO, enquanto nas áreas que não receberam vinhaça ocorreu a aplicação apenas de K<sub>2</sub>O, no total de 800 kg ha<sup>-1</sup>.

Avaliando o efeito da aplicação de vinhaça durante dois anos em solos argilosos (750 g kg<sup>-1</sup> de argila), Jiang et al. (2012) observaram aumentos nos teores de K do solo, com incrementos de até 35%. Em solo arenoso (130 g kg<sup>-1</sup> de argila), Silva et al. (2014) observaram incrementos nos teores de K no solo, especialmente na camada 0,20-0,40 m, após 3 anos de aplicações de doses de vinhaça. De acordo com os autores, os maiores incrementos nos teores de K devido à aplicação de vinhaça na camada 0,20-0,40 m pode estar associado ao solo da área experimental ser arenoso e apresentar elevado potencial de lixiviação desse nutriente. Estudando a aplicação de vinhaça em área de cana-de-açúcar por 10 anos na fertilidade de um Argissolo, Barros et al. (2010) observaram incrementos de 300% no teor de Ca+Mg do solo e de 230% no teor de K do solo em relação a área sem aplicação de vinhaça. Após a aplicação de vinhaça por 35 anos em um Cambissolo (380 g kg<sup>-1</sup> de argila), Canellas et al. (2003) observaram incrementos de 100% no teor de K, 8% no teor de Ca e 9% no teor de Mg do solo em relação a área sem aplicação de vinhaça. Esses estudos confirmam o observado no presente experimento, em que, independentemente da textura e tipo de solo, a aplicação de vinhaça aumenta os teores dos macronutrientes do solo.

A existência de um fator específico para o K no solo arenoso pode ser explicada pela dinâmica desse nutriente nesse tipo de solo. Mesmo sendo um cátion no solo, as perdas de K por lixiviação são relevantes e, em solos arenosos, podem representar até 57% do total aplicado (Mendes et al., 2016). Assim, a aplicação de elevadas quantidades desse nutriente em solos arenosos pode gerar perdas por lixiviação e o mesmo se encontrar em elevados teores em camadas mais profundas do solo, menos disponíveis para as plantas. Silva et al. (2014) observaram, em solo arenoso (130 g kg<sup>-1</sup> de argila), que as maiores diferenças entre o teor de K em áreas com e sem aplicação de vinhaça ocorreu na camada do solo 0,20-0,40 m. Segundo os autores, isso ocorreu devido ao efeito de percolação do K no perfil do solo.

Dentre os teores dos macronutrientes avaliados no presente estudo (Ca, Mg, S e K) para o solo arenoso (Figura 4), observou-se que o K foi o que menos apresentou incrementos devido à aplicação de vinhaça em relação a área sem aplicação. Verificou-se na camada 0,10-0,20 que o teor de K no solo arenoso ficou semelhante entre as áreas com e sem aplicação de vinhaça, diferentemente dos macronutrientes

Ca, Mg e S no solo arenoso e para todos os macronutrientes no solo argiloso (Figuras 2 e 4), em que para todas as camadas os teores foram superiores na área com aplicação de vinhaça por longo período. Isso justifica o fato desse nutriente estar sozinho em um fator da análise exploratória multivariada no solo arenoso, pois, mesmo que a aplicação de vinhaça por longo período aumentou o teor de K no solo arenoso, esse incremento foi proporcionalmente menor do que para os demais macronutrientes.

Outra diferença entre os solos avaliados para o fator 1, referente aos macronutrientes, foi entre as camadas do solo. Verificou-se que não ocorreram diferenças entre camadas para os macronutrientes no solo argiloso, enquanto no solo arenoso a camada superficial (0,00-0,10 m) apresentou maior teor de macronutrientes do que as demais camadas. Ao comparar os dois solos avaliados, observou-se que para o solo arenoso a disponibilidade de nutrientes decorreu principalmente do CO, enquanto para o solo argiloso o CO não atuou na disponibilidade de macronutrientes (fator 1). Normalmente os solos de textura arenosa possuem baixa fertilidade, principalmente em decorrência da menor capacidade de troca catiônica (CTC), quando comparados aos solos argilosos (Figura 2J e 4J). Dessa maneira, os maiores valores de CO na camada 0,00-0,10 m nas áreas com e sem aplicação de vinhaça do solo arenoso (Figura 5A) promoveram maior disponibilidade de macronutrientes nessa camada. Quanto ao solo argiloso, o elevado teor de argila entre as camadas promoveu quantidade de cargas negativas semelhantes que não acarretaram em diferenças relevantes na disponibilidade dos macronutrientes do solo entre as camadas avaliadas (Figura 2).

Quanto ao fator 3 do solo arenoso, relacionado a acidez (pH) e disponibilidade de micronutrientes, observou-se que a área com aplicação de vinhaça apresentou menor acidez e menor disponibilidade dos micronutrientes Cu e Zn em relação à área sem aplicação de vinhaça (Tabela 6). Isso ocorre, pois com o aumento do pH na área com aplicação de vinhaça, a disponibilidade de micronutrientes é indiretamente afetada, conforme relatado por Raij et al. (2011). Entretanto, mesmo reduzindo a disponibilidade de micronutrientes na área com aplicação de vinhaça devido ao aumento do pH, verificou-se diferenças pequenas nos teores dos micronutrientes em relação à área sem aplicação de vinhaça. Devido ao fornecimento de micronutrientes pela vinhaça, houve a mitigação desse efeito do pH sobre a disponibilidade dos micronutrientes no solo.

Quanto ao solo argiloso, verificou-se que o pH ficou associado ao primeiro fator, com correlação direta na disponibilidade dos macronutrientes do solo. Isso ocorreu, pois não se verificou diferenças relevantes nos valores de pH entre as áreas (Figura 2H), fato que não acarretou alteração na disponibilidade dos micronutrientes. As maiores diferenças de pH no solo argiloso ocorreram entre as camadas do solo, assim como para alguns macronutrientes, justificando a presença do pH no primeiro processo do solo. Observa-se que o pH atua diretamente na disponibilidade dos macronutrientes do solo, ou seja, com o aumento do pH, até próximo de 7,0, ocorre aumento dos teores de macronutrientes (Raij et al., 2011).

Mesmo a vinhaça sendo um subproduto ácido, apresentando pH igual a 4,21 no presente estudo, alguns trabalhos demonstram que após algum tempo de sua aplicação, o pH aumenta e a acidez do solo diminui em solos de diferentes texturas (Mattiazzo e Glória, 1987; Silva et al. 2014; Aquino et al., 2015). Isso ocorre, pois a vinhaça apresenta outros compostos, como material orgânico e açúcares, que promovem maior atividade microbiana no solo. De acordo com Mattiazzo e Glória (1987), avaliando o efeito da aplicação de vinhaça no pH de três tipos de solo, essa maior atividade microbiana gera um ambiente redutor no solo, que consome íons  $H^+$ . Entretanto, Yin et al. (2019) observaram que após dois anos de aplicação de vinhaça, a acidez do solo aumentou com a aplicação de vinhaça, enquanto Jian et al. (2012) não observaram diferenças na acidez do solo entre áreas sem e com aplicação de vinhaça por dois anos.

A diferença em relação à acidez (pH) e disponibilidade de micronutrientes entre os solos provavelmente ocorreu devido ao poder tampão de cada solo. Possignolo et al. (2017) avaliando a decomposição da matéria orgânica da vinhaça em solo arenoso ( $120 \text{ g kg}^{-1}$  de argila) e argiloso ( $630 \text{ g kg}^{-1}$  de argila) observaram que o pH do solo argiloso não aumentou com a aplicação de vinhaça, enquanto no solo arenoso o valor aumentou em até 0,8 unidades. Isso é justificado pela maior quantidade de cargas negativas (CTC) no solo argiloso em relação ao solo arenoso, gerando maior resistência do solo argiloso em alterar o pH em função de manejos aplicados, fenômeno conhecido como poder tampão do solo.

Destaca-se que os valores de pH no solo argiloso nas três camadas do solo e nas duas áreas avaliadas ficaram dentro da faixa entre 5,5 e 6,5, considerada ideal para a cana-de-açúcar (Spironello et al., 1997). Confirmando a semelhança da acidez do solo argiloso, verificou-se que a saturação por bases foi semelhante entre as áreas

avaliadas. Isso ocorreu, pois a aplicação de vinhaça aumentou a CTC do solo argiloso, entretanto, o aumento dos teores de Ca, Mg, K e de H+Al nessa área foi proporcional (23%) ao aumento da CTC (23%), gerando saturação por bases semelhante à área sem aplicação.

Devido a maior quantidade de cargas negativas no solo argiloso com aplicação de vinhaça, aumentando a CTC do solo (Figura 2J), o fornecimento de 3,35 kg ha<sup>-1</sup> de Mn e 1,66 kg ha<sup>-1</sup> de Zn pela vinhaça nos 10 anos de aplicação do subproduto incrementou o teor desses micronutrientes na área com aplicação de vinhaça do solo argiloso.

No solo arenoso a aplicação de vinhaça aumentou o pH do solo nas três camadas avaliadas (Figura 4H), sendo que somente na área com aplicação de vinhaça o pH do solo ficou dentro do valor mínimo de 5,5 (Figura 4H) estabelecido como ideal para a cana-de-açúcar (Spironello et al., 1997). Esse aumento de pH, associado com a menor quantidade de cargas negativas do solo arenoso em relação ao argiloso (Figura 4J), reduziu a disponibilidade dos micronutrientes Cu e Zn. Entretanto, o fornecimento desses micronutrientes pela vinhaça durante os 10 anos de aplicação ajudou a mitigar a diferença entre as áreas, em que os teores, embora maiores na área sem aplicação de vinhaça, ficaram próximos entre as áreas, conforme discutido anteriormente.

A presença do CO no fator 2 do solo argiloso, juntamente com os micronutrientes Mn e Zn, é devido a semelhança na variação dessas variáveis entre as áreas e camadas do solo. Verifica-se que o CO, Mn e Zn apresentam maiores valores médios na área com aplicação de vinhaça, independentemente da camada do solo, e que nas duas áreas avaliadas ocorre um decréscimo nos valores médios conforme aumentou a profundidade da camada do solo. Esse fenômeno é distinto ao padrão observado nos macronutrientes, em que, mesmo que a área com aplicação de vinhaça apresente maiores teores, independentemente da camada avaliada, existe maior semelhança nos teores entre as camadas avaliadas, justificando o porquê da participação do CO no fator 2 do solo argiloso.

O aumento de CO nas áreas com aplicação de vinhaça ocorre de maneira indireta. Como a vinhaça é um resíduo líquido, ocorre rápida decomposição desse subproduto pelos microrganismos do solo. Essa rápida decomposição da vinhaça não justifica o aumento do CO do solo em função da sua aplicação. Como a aplicação de vinhaça fornece grande quantidade de nutrientes para a cana-de-açúcar, áreas com

aplicação desse subproduto apresentam maior produção de biomassa em relação a áreas sem aplicação. Soobadar et al. (2012) avaliando a produtividade da cana-de-açúcar em áreas com aplicação de vinhaça em relação a áreas com adubação mineral convencional, observaram incrementos na produtividade de até 16% devido à aplicação de vinhaça. Assim, ao longo dos anos as áreas com aplicação de vinhaça apresentam maior quantidade de material orgânico sobre o solo em relação a áreas sem aplicação que serão decompostos pelos microrganismos do solo e, conseqüentemente, convertidos em CO<sub>2</sub>.

É importante destacar que em função do CO<sub>2</sub> da vinhaça ser proveniente de açúcares e não de fibras, ocorre elevada atividade microbiana no solo após a aplicação desse subproduto, degradando-o rapidamente. Para essa decomposição, como a vinhaça apresenta relação C/N elevada, próxima de 19 (Silva et al., 2020), os microrganismos do solo consomem grande quantidade de N disponível na solução do solo (Silva et al., 2020), podendo causar deficiência de N na cana-de-açúcar. Entretanto, como a vinhaça é aplicada somente em canaviais a partir do segundo corte, não se verifica deficiência de N na cana-de-açúcar devido à adubação nitrogenada de cobertura.

Em relação à estrutura do solo, observou-se para o solo argiloso diferenças somente entre camadas, com melhor estrutura na camada 0,00-0,10 m (Tabela 3), devido aos maiores valores de macroporosidade nessa camada. A maior macroporosidade na camada superficial do solo de textura argilosa pode estar relacionada a agressividade do sistema radicular da cana-de-açúcar nessa camada do solo. Solos argilosos podem apresentar maior distribuição radicular nas camadas mais superficiais do solo em relação a solos arenosos (Rossi Neto et al., 2018), justificando a maior macroporosidade do solo argiloso na camada mais superficial do solo, enquanto no solo arenoso não foram observadas diferenças entre camadas (Tabela 6).

Normalmente os solos de textura argilosa são bem estruturados e apresentam pequena alteração na sua estrutura em função do manejo aplicado, principalmente devido ao elevado teor de argila e carbono orgânico. Como a fração argila do solo e o CO<sub>2</sub> são os principais agentes na formação e manutenção da estrutura do solo (Bronick e Lal, 2005; Seben Júnior et al., 2016), manejos agrícolas em solos argilosos tendem a gerar poucas alterações quando comparado a solos arenosos (Bronick e Lal, 2005; Blanco-Canqui, 2017), que apresentam menor teor de argila e CO<sub>2</sub>, justificando a



semelhança na estrutura do solo entre as áreas com e sem aplicação de vinhaça por longo período no solo argiloso. A maior importância da aplicação de vinhaça para a melhoria dos atributos físicos em solos arenosos, em relação a solos argilosos, pode ser observada no presente estudo, em que para o solo arenoso o fator relacionado à estrutura do solo foi o segundo que mais explicou a variabilidade total dos dados (Tabela 4), enquanto no solo argiloso as variáveis referentes a estrutura do solo ficaram no terceiro fator (Tabela 1).

Para o solo arenoso foi observado que a área com aplicação de vinhaça gerou melhor estrutura do que a área sem aplicação de vinhaça, apresentando maior microporosidade do solo (Tabela 6). Para solos arenosos, que naturalmente apresentam maior quantidade de macroporos do que microporos, o aumento da microporosidade do solo é essencial para melhorar a capacidade de armazenamento de água do solo. O aumento da microporosidade em solos arenosos promove maior disponibilidade de água para as culturas, fato que minimiza os efeitos do déficit hídrico no crescimento e desenvolvimento das plantas. De acordo com Blanco-Canqui (2017), a adição de material orgânico em solos arenosos promove o aumento de microporos, melhorando consequentemente a capacidade de retenção da água e sua disponibilidade para as plantas. Nesse contexto, a aplicação de vinhaça por longo período é um manejo fundamental para a melhoria da capacidade produtiva de solos arenosos, podendo deslocar favoravelmente o ambiente de produção da cana-de-açúcar. Assim, dependendo do volume de vinhaça produzido durante a safra de cana-de-açúcar, da capacidade operacional e logística, as unidades produtoras deveriam priorizar a aplicação de vinhaça em solos arenosos, uma vez que esse tipo de solo apresenta maior potencial de resposta à aplicação do subproduto, principalmente em função da melhoria na capacidade de armazenamento de água em solos arenosos.

## 5. CONCLUSÃO

A aplicação de vinhaça por longo período é um manejo sustentável para áreas de cana-de-açúcar, independentemente da textura do solo, pois incrementa a fertilidade do solo por meio do aumento dos teores de carbono orgânico e dos macronutrientes e não gera potencial de acidificação do solo.

A aplicação de vinhaça por longo período promove melhorias na estrutura de solos arenosos, aumentando a microporosidade e, conseqüentemente, a capacidade de armazenamento de água e a capacidade produtiva desse tipo de solo.

## 6. REFERÊNCIAS

- ANA (Agência Nacional de Águas) (2017) **Levantamento da cana-de-açúcar irrigada na região centro-sul do Brasil**. Brasília: ANA, 31 p. Relatório síntese.
- 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** 31:563-576.
- Aquino GS, Conti Medina C, Brito OR, Batista Fonseca IC (2015) Changes in soil chemical reactions in response to straw sugar cane and vinasse. **Semina: Ciências Agrárias** 36(4):2493-2505.
- Barros RPD, Viégas PRA, Silva TLD, Souza RMD, Barbosa LT, Viégas RA, Barreto MCV, Melo ASD (2010) Alterações em atributos químicos de solo cultivado com cana-de-açúcar e adição de vinhaça. **Pesquisa Agropecuária Tropical** 40(3):341-346.
- Basso JB, Soto MAA, Chang HK (2017) Percolação de vinhaça em coluna de solo arenoso da formação Rio Claro. **Águas Subterrâneas** 31(1):52-65.
- Blanco-Canqui H (2017) Biochar and soil physical properties. **Soil Science Society of America Journal** 81(4):687-711.
- Bronick CJ, Lal R (2005) Soil structure and management: a review. **Geoderma** 124(1-2):03-22.
- 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(5):935-944.
- Carvalho TC, Da Silva CL (2010) Redução da quantidade de vinhaça através da evaporação. **Fórum Ambiental da Alta Paulista** 6(1).
- Cavalcanti RQ (2018) **Atributos físicos e mecânicos do solo sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar em tabuleiro costeiro**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - UFRPE, Recife.
- CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo) (2015) **Vinhaça: critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola**. São Paulo: Cetesb. 15p. Norma Técnica.
- Christofolletti CA, Escher JP, Correia JE, Marinho JFU, Fontanetti CS (2013) Sugarcane vinasse: environmental implications of its use. **Waste Management**, 33(12):2752-2761.
- Coelho AP, Silva MF da, Faria RT de, Fernandes C, Figueiredo Dantas G de, Santos GO (2020) Long-term impact of fertigation with treated sewage effluent on the physical soil quality. **Environmental Pollution** 266:115007.
- CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento) (2021) **Acompanhamento da Safra Brasileira: cana-de-açúcar - Safra 2020/2021 - primeiro levantamento**. Brasília:

CONAB. Disponível em <<<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar>>>.pdf. Acesso em: 27 de fevereiro 2021.

Fuess, LT, Rodrigues, IJ, & Garcia, ML (2017) Fertirrigation with sugarcane vinasse: foreseeing potential impacts on soil and water resources through vinasse characterization. **Journal of Environmental Science and Health, Part A**, 52(11), 1063-1072.

Galdeano, LR (2019) **Fertilidade e mineralogia do solo sujeito à disposição de vinhaça de uma fazenda em Santa Cruz das Palmeiras**. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista.

Hair Júnior, JF, BLACK, WC, BABIN, BJ, ANDERSON, RE, TATHAM, RL (2009) Data multivariate analysis. Bookman Editora. 536 p.

Jaramillo, MF, & Restrepo, I (2017) Wastewater reuse in agriculture: A review about its limitations and benefits. **Sustainability**, 9(10), 1734.

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(4), 412-417.

Jorge, MF, Pinho, CF, Nascentes, AL, Alves, DG, Almeida, GV, Silva, JB, & Silva, LD (2017) Tomato fertigation with dairy cattle wastewater. **Horticultura Brasileira**, 35(2), 230-234.

KAISER, HF (1958) The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. *Psychometrika*. v. 23, n. 3, p. 187-200.

Lima, AF, dos Santos Junior, AC, Martins, LC, Sarrouh, B, & Lofrano, RCZ (2016) Revisão sobre a toxicidade e impactos ambientais relacionados à vinhaça, efluente da indústria sucroalcooleira. **Cadernos UniFOA**, 11(32), 27-34.

Lopes, IM, Pinheiro, EFM, Lima, E, Ceddia, MB, Campos, DV, & Alves, BJR (2017) Emissões de N<sub>2</sub>O em Solos sob Cultivo de Cana-de-Açúcar no bioma Mata Atlântica: Efeito dos Sistemas de Colheita e da Adubação com Vinhaça. **Revista Virtual de Química**.

Marcato, ACDC (2019) **Utilização de um sistema híbrido de tratamento para biorremediação da vinhaça e avaliação da sua toxicidade por meio de análises histológicas e moleculares**. Tese de doutorado. Instituto de Biociências, Câmpus de Rio Claro, Universidade Estadual Paulista.

Martins, PC, de-Oliveira, MC, da-Silva, DM, Mesquita, SA, Oliveira, HC, & Marchesin, WA (2017) Use of liquid vinasse as a feed additive for Japanese quails. **Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias**, 30(4), 278-285.

Mattiazzo, ME, & Da Gloria, NA (1987) Effect of vinasse on soil acidity. **Water science and technology**, 19(7), 1293-1296.

Mendes, WDC, Alves Júnior, J, Da Cunha, PC, Silva, ARD, Evangelista, AW, & Casaroli, D (2016) Potassium leaching in different soils as a function of irrigation depths. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 20(11), 972-977.

Milstein, A, Islam, MS, Wahab, MA, Kamal, AHM., Dewan, S (2005) Characterization of water quality in shrimp ponds of different sizes and with different management regimes using multivariate statistical analysis. **Aquaculture International**, v. 13, n. 6, p. 501-518.

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(3), 728-738.

Poveda, MMR (2014) **Análise econômica e ambiental do processamento da vinhaça com aproveitamento energético**. Dissertação de Mestrado. Instituto de Energia e Ambiente, Universidade São Paulo.

Prado, H.; Junior, A. L. P.; Garcia, J. C.; Moraes, J. F. L. de; Carvalho, J. P. de; Donzeli, P. L. (2008) Solos e ambientes de produção. In: Dinardo-Miranda, L. L.; Vasconcelos, A. C. M.de; Landell, M. G. de A. (ed.). **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônomo, p.179-204.

Prado, EAF., Vitorino, ACT, Colman, BA, Ensinas, SC, & Cortez, JW (2017) Doses of vinasse and its effects at the physical attributes of rhodic hapludox under sugar cane. *Brazilian journal of agriculture-Revista de Agricultura*, 92(2), 115-131.

Raij, BV; Andrade, JC; Cantarella, H; Quaggio, JA (2001) Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas: Instituto Agrônomo. 285p.

Raij, BV (2011) Fertilidade do solo e manejo de nutrientes. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 420p.

Rípoli, ML, Rípoli, TC, Casagrandi, DV, & Ide, BY (2007) Avaliação de cinco plantadores de cana-de-açúcar. Em 2007 Reunião Anual da ASAE (p. 1). **American Society of Agricultural and Biological Engineers**.

Rosa, LO, de Souza, TP, de Oliveira, VF, Corrêa, LB, & Corrêa, ÉK (2019) Valorização dos resíduos orgânicos do setor de hortifrutigranjeiro pelo processo de compostagem doméstica. **Semioses**, 13(2), 1-12.

Rossi Neto, J, de Souza, ZM, Kölln, OT, Carvalho, JLN, Ferreira, DA, Castioni, GAF, Barbosa, LC, Castro, SGQ, Braunbeck, OA, Garside, AL, & Franco, HCJ (2018) The arrangement and spacing of sugarcane planting influence root distribution and crop yield. **Bioenergy Research**, 11(2), 291-304.

Santos, CH, Cardin, CA, Creste, JE, Mativi, WL, Moreira, ACM, & Escarmínio, MA (2017) Propriedades físicas de um argissolo após fertirrigação com vinhaça e sistema de colheita da cana de açúcar. In COLLOQUIUM AGRARIAE. ISSN: 1809-8215 (Vol. 13, No. 3, pp. 58-66).

Santos, HG; Jacomine, PKT; Anjos, LHC; Oliveira, VA; Lumbreras, JF; Coelho, MR; Cunha, TJF (2018) Sistema brasileiro de classificação de solo. 3 ed. Brasília, Embrapa, 390p.

Santos, IWS (2020) **Viabilidade técnica e econômica do aproveitamento da vinhaça de usinas de álcool para a produção de energia**. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista.

Seben Junior, GDF, Corá, JE, & Lal, R (2016) Qualidade física de Latossolo sob plantio direto submetido a diferentes sistemas de cultivo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 51(9), 1568-1574.

Silva, APD, Bono, JA, & Pereira, FDA (2014) Aplicação de vinhaça na cultura da cana-de-açúcar: Efeito no solo e na produtividade de colmos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 18(1), 38-43.

Silva, JLD (2017) **Desenvolvimento de detectores nanoestruturados de óxidos metálicos em grafeno para detecção eletroquímica de aminoácidos em vinhaça de cana-de-açúcar utilizando cromatografia líquida de alta eficiência**. Tese de Doutorado. Instituto de Química, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista.

Silva, GSPL, da Silva, FC, Alves, BJR, Tomaz, E, Berton, RS, Marchiori, LFS, & da Silveira, FG (2019) Efeitos da aplicação de vinhaça "in natura" ou concentrada associado ao N-fertilizante em soqueira de cana-de-açúcar e no ambiente. **Embrapa Informática Agropecuária-Artigo em periódico indexado (ALICE)**.

Silva, PC, da Costa, AR, de Freitas Silva, F, Giongo, PR, Silva, PC, dos Santos, BC, & de Almeida, TM (2020) Matéria orgânica e acidez em um latossolo vermelho cultivado com sorgo sacarino sob níveis de vinhaça. **Brazilian Journal of Development**, 6(8), 59103-59114.

Soobadar, A, & Ng Kee Kwong, KR (2012) Impact of high rates of vinasse on some pertinent soil characteristics and on sugarcane yield in Mauritius. **Journal of Sustainable Agriculture**, 36(1), 36-53.

Soltangheisi, A, Santos, VRD, Franco, HCJ, Kolln, O, Vitti, AC, Dias, CTDS, Herrera, WFB, Rodrigues, M, Soares, TM, Withers, PJA, & Pavinato, PS (2019) Phosphate sources and filter cake amendment affecting sugarcane yield and soil phosphorus fractions. **Revista Brasileira De Ciência do Solo**, 43, e0180227.

Spironello, A; Raij, B van; Penatti, CP; Cantarella, H; Morelli, JLM; Orlando Filho, J; Landell, MGA; Rosseto, R Outras culturas industriais. In: Raij, B.van; Cantarella, H; Quaggio, JA; Furlani, AMC **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed. Campinas: Instituto Agrônômico, 1997. p.237-239. (Boletim técnico, 100).

Teixeira, PC, Donagemma, GK, Fontana, A, & Teixeira, WG (2017) Manual de métodos de análise de solo. **Rio de Janeiro**, Embrapa. 573p.

Tessaro, D, Sampaio, SC, & Castaldelli, APA (2016). Wastewater use in agriculture and potential effects on meso and macrofauna soil. **Ciência Rural**, 46(6), 976-983.

Toppa, EVB, Jadoski, CJ, Julianetti, A, Hulshof, T, Ono, EO, & Rodrigues, JD (2010) Aspectos da fisiologia de produção da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.). **Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia**, 215-221.

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(4), 573-581.

Vendruscolo, PE, Alves, MC, Freitas Leal, AJ, de Souza, EJ, & Souto Filho, SN (2018) Efeitos do biochar, culturas de cobertura e lodo de esgoto nos atributos físicos do solo. **Ciencia del suelo**, 36(1), 01-10.

YEOMANS, JC, BREMNER, JMA rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 19, n. 13, p. 1467-1476, 1988.

Yin, J, Deng, CB, Wang, XF, Chen, GL, Mihucz, VG, Xu, GP, & Deng, QC (2019) Effects of long-term application of vinasse on physicochemical properties, heavy metals content and microbial diversity in sugarcane field soil. **Sugar Tech**, 21(1), 62-70.