



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE FILOSOFIA E CIÊNCIAS HUMANAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO E MEIO
AMBIENTE

VALQUÍRIA DO NASCIMENTO TAVARES

**Aplicação de vinhaça no solo: relação com ODS e influência em características
do solo determinadas por tomografia de raio-X**

Recife
2023

VALQUÍRIA DO NASCIMENTO TAVARES

Aplicação de vinhaça no solo: relação com ODS e influência em características do solo determinadas por tomografia de raio-X

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito para obtenção do título de doutora em Desenvolvimento e Meio Ambiente.

Área de concentração: Desenvolvimento e Meio Ambiente

Orientadora: Prof^a. Dr^a Maria do Socorro B. de Araújo

Coorientador : Prof. Dr. Fernando Cartaxo Rolin Neto

Recife

2023

VALQUÍRIA DO NASCIMENTO TAVARES

Aplicação de vinhaça no solo: relação com ODS e influência em características do solo determinadas por tomografia de raio-X

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal de Pernambuco, na área de concentração em Desenvolvimento e Meio Ambiente como requisito para obtenção do título de doutora em Desenvolvimento e Meio Ambiente.

Aprovada em: 01/09/2023

Banca examinadora:

Dr^a. Maria do Socorro Bezerra de Araújo (UFPE)

Dr^a. Ana Lúcia Bezerra Candeias (UFPE)

Dr^a. Maria Cristina Basílio Crispim (UFPB)

Dr^a. Sara Fernandes Flor de Souza (UFRN)

Dr^a. Kátia Cristina Silva de Freitas (UFRPE)

RECIFE
2023

Ao maior e mais importante tesouro da minha vida, meu querido e amado filho Jorge Miguel, pelo amor, paciência e carinho durante a realização dessa Tese.

Ao meu querido e amado esposo Inaldo, pelo amor, carinho, companheirismo, dedicação, apoio, força e suporte durante toda a minha caminhada na realização desse trabalho.

Aos meus queridos e amados pais, Valdi e Cristina, pelo amor incondicional, confiança, incentivo e pela contribuição para minha formação.

Aos meus irmãos Valmir, Valéria e Valter, pelo amor e apoio.

Dedico

AGRADECIMENTOS

Agradeço a DEUS, por ter me concedido essa vitória de concluir o meu doutorado.

Ao meu esposo pelo grande companheirismo, apoio e imenso amor. Muito obrigada por ter contribuído para a realização desse trabalho. Te amo.

Ao meu filho Jorge Miguel pelo amor e paciência. Obrigada meu tesouro, eu te amo muito.

Aos meus pais pela confiança, apoio e imenso amor. Muito obrigada por vocês serem tão presentes na minha vida, amo vocês.

Painho e Naldo muito obrigada pela grande força durante a coleta do meu solo, o trabalho foi grande, mas conseguimos!

Aos meus irmãos pelo amor e apoio durante toda a realização desse trabalho. Amo vocês.

A toda minha família pelo carinho.

Agradeço a minha Orientadora Maria do Socorro e ao meu coorientador Fernando Cartaxo pela paciência, confiança e todos os ensinamentos necessários para realização desse trabalho. Muito obrigada!

Aos Professores por toda dedicação e aprendizado proporcionado, durante as disciplinas cursadas no Doutorado. Gratidão.

As minhas amigas Adriana e Maria Auxiliadora pela amizade construída durante o Doutorado. Vocês foram muito importantes para a realização desse trabalho.

Ao Senhor Jorge Petribu por ter disponibilizado as áreas para coleta do solo e ter se colocado sempre a disposição para ajudar na realização dessa pesquisa. Muito obrigada pelo apoio e confiança!

A todos que de alguma forma contribuíram e torceram para a realização desse trabalho, uma conquista tão importante na minha profissional. Muito obrigada!

“Nenhum homem pode banhar-se duas vezes no mesmo rio... pois na segunda vez o rio já não é o mesmo, nem tão pouco o homem!”

Heráclito de Éfeso

RESUMO

Na indústria sucroalcooleira a gestão responsável dos resíduos é fundamental para garantir um desenvolvimento sustentável. A vinhaça, um subproduto do processamento da cana-de-açúcar, apresenta desafios quanto à sua gestão e impactos ambientais. O presente estudo teve como objetivo investigar a influência do tempo de aplicação da vinhaça em algumas características de solo, utilizando a tecnologia de tomografia computadorizada de raio-X. Foram analisados os efeitos da vinhaça na estrutura do solo, especificamente com relação à macroporosidade, radiodensidade e formação de agregados. Também foi explorada a relação entre as práticas de gestão da indústria sucroalcooleira e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Foram escolhidas quatro áreas de estudo com diferentes períodos de aplicação da vinhaça: sem aplicação, 2 anos, 15 anos, e 30 anos de aplicação. Em cada área foram coletadas quatro amostras de solo, totalizando 16 amostras. Essas amostras foram submetidas à tomografia computadorizada de raio-X, para avaliação dos parâmetros macroporosidade, radiodensidade e distribuição de agregados. Foram analisados aspectos do solo desenvolvendo-se uma metodologia específica para o processamento das imagens de raio-X, sendo utilizado o programa ImageJ, sem a necessidade de plugins adicionais. Os resultados evidenciaram que uma gestão adequada da vinhaça é de grande importância para preservar a qualidade do solo e garantir a sustentabilidade da indústria sucroalcooleira. O tempo de aplicação da vinhaça exerceu mudanças na macroporosidade, radiodensidade e distribuição de agregados do solo, sendo o de 30 anos o que evidenciou melhores resultados.

Palavras-chave: macroporosidade; física do solo; radiodensidade; agregados do solo; análise de imagens.

ABSTRACT

In the sugar and alcohol industry, responsible waste management is essential to ensure sustainable development. Vinasse, a by-product of sugarcane processing, presents challenges in terms of its management and environmental impacts. The present study aimed to investigate the influence of vinasse application time on some soil characteristics, using X-ray computed tomography technology. The effects of vinasse on soil structure were analyzed, specifically with regard to macroporosity, radiodensity and aggregate formation. The relationship between the management practices of the sugar and alcohol industry and the Sustainable Development Goals (SDGs) was also explored. Four study areas were chosen with different periods of vinasse application: no application, 2 years, 15 years, and 30 years of application. In each area, four soil samples were collected, totaling 16 samples. These samples were submitted to X-ray computed tomography, for evaluation of macroporosity, radiodensity and aggregate distribution parameters. Aspects of the soil were analyzed by developing a specific methodology for processing the X-ray images, using the ImageJ program, without the need for additional plugins. The results showed that proper vinasse management is of great importance to preserve soil quality and ensure the sustainability of the sugar and alcohol industries. The time of application of vinasse caused changes in macroporosity, radiodensity and distribution of soil aggregates, with 30 years showing the best results.

Keywords: macroporosity; soil physics; radiodensity; soil aggregates; image analysis.

LISTA DE FIGURA

Figura 1: Procedimento de coleta das amostras indeformadas	59
Figura 2: Estufa a 40°C	60
Figura 3: Visão interna e externa do tomógrafo	61
Figura 4: Imagem após escaneamento	63
Figura 5: reconstrução do volume de interesse	64
Figura 6: Imagem do solo reconstruída em 3D	65
Figura 7: Ferramenta linha e o valor do pixel correspondente a uma distância de 40mm	69
Figura 8: Valores da normalização	69
Figura 9: Valor para o filtro de Gauss	70
Figura 10: Valor filtro de Unsharp Mask	70
Figura 11: Configurações para remoção do fundo da imagem	71
Figura 12: Resultado do método de OTSU	73
Figura 13: Resultado do processamento de imagens	74
Figura 14: Radiodensidade	76
Figura 15: Menu de resultados fornecidos pelo ImageJ	78
Figura 16: Localização do município de Lagoa de Itaenga - PE	86
Figura 17: Localização dos pontos de coleta	86

LISTA DE GRÁFICO

Gráfico 1: Resultado da macroporosidade em cada amostra e as médias	94
Gráfico 2: Box plot da porosidade	97
Gráfico 3: Número de macroporos	106
Gráfico 4: Orientação dos Macroporos	115
Gráfico 5: Resultados da radiodensidade do solo	116
Gráfico 6: Radiodensidade média	119

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Especificações técnicas do tomógrafo	61
Quadro 2: Descrição da área de coleta	87

LISTA DE TABELA

Tabela 1: Classes de poros de acordo com o diâmetro equivalente dos poros no solo	88
Tabela 2: Resultados do processo de limiarização pelo método de Otsu.....	92
Tabela 3: Resultados da macroporosidade	93
Tabela 4: Resultado do teste de Kruskal-Wallis	95
Tabela 5: Resultado do pós teste de Dunn	95
Tabela 6: Distribuição da macroporosidade	101
Tabela 7 – Resultados da ANOVA para macroporos P e M.....	101
Tabela 8: Teste de TUKEY para distribuição dos macroporos P e M.....	102
Tabela 9: Teste de Kruskal-Wallis para a distribuição dos macroporos G	105
Tabela 10: Quantidade de macroporos	106
Tabela 11: Teste da ANOVA.....	107
Tabela 12: Teste de TUKEY HSD/KRAMER	107
Tabela 13: Número de macroporos em função do tamanho dos macroporos	109
Tabela 14: Teste da ANOVA.....	110
Tabela 15: Teste de TUKEY HSD/KRAMER	111
Tabela 16: Resultados da estatística da radiodensidade	117
Tabela 17: Resultados do teste de Shapiro-Wilk	118
Tabela 18: Teste de Levene's	118
Tabela 19: Teste da ANOVA.....	119
Tabela 20: Teste de TUKEY	119

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 JUSTIFICATIVA.....	21
1.2 HIPÓTESE.....	22
1.3 OBJETIVOS.....	23
1.3.1 Objetivo geral	23
1.3.2 Objetivos específicos	23
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	24
2 CAPÍTULO 1 - OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL: PRÁTICAS E EFETIVIDADES NAS INDÚSTRIAS SUCROALCOOLEIRAS	25
2.1 INTRODUÇÃO.....	26
2.2	
METODOLOGIA.....	28
2.3 REFERENCIAL TEÓRICO.....	28
2.3.1 Desenvolvimento e Sustentabilidade: Reflexões e suas relações com os ODS 7, 8 e 13	28
2.3.2 Análise do processo produtivo das indústrias sucroalcooleiras e impactos socioambientais	30
2.3.3 Desafios e Oportunidades para a Sustentabilidade: Integrando os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável nas Indústrias sucroalcooleiras	33
2.4 CONCLUSÕES.....	36
2.5 REFERÊNCIAS.....	38
3 CAPÍTULO 2 - RELAÇÃO DOS OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL COM A GESTÃO DA VINHAÇA	42
3.1 INTRODUÇÃO.....	43
3.2	
METODOLOGIA.....	45

3.3 REFERENCIAL TEÓRICO.....	46
3.3.1 Possíveis benefícios e impactos ambientais da vinhaça no solo.....	46
3.3.2 Aspectos legais relacionado com a política de descarte de resíduo de vinhaça.....	47
3.3.3 Relação do descarte da vinhaça com os ODS.....	50
3.4 CONCLUSÃO.....	52
3.5 REFERÊNCIAS.....	54
4 CAPÍTULO 3 – PROCEDIMENTO METODOLÓGICO PARA O PROCESSO DE OBTENÇÃO E RECONSTRUÇÃO DE IMAGENS E OS RESULTADOS DO PROCESSAMENTO NO SOFTWARE IMAGEJ.....	56
4.1 INTRODUÇÃO.....	57
4.2 METODOLOGIA.....	58
4.2.1 Coleta das amostras de solo.....	58
4.2.2 Preparo das amostras de solo.....	59
4.2.3 Utilização da microtomografia de RAIO X.....	60
4.2.4 Análise de imagens - INSPECT-X - obtenção.....	62
4.2.5 Processo de reconstrução das imagens e uso do software CT PRO 3D e VGSTUDIO MAX 2.2.....	63
4.2.6 Análise de imagens - IMAGE J - Processamento.....	66
4.2.7 Sequência metodológica do software IMAGEJ.....	68
4.2.8 Método de OTSU.....	72
4.2.9 Binarização.....	73
4.2.10 Radiodensidade de solos no IMAGEJ.....	75

4.2.11	Resultados	fornecidos	pelos
IMAGEJ			77
4.3			
CONCLUSÃO.....			79
REFERÊNCIAS.....			81
5	CAPÍTULO 4 - ANÁLISE DA VARIAÇÃO TEMPORAL DA POROSIDADE E RADIODENSIDADE EM SOLOS COM APLICAÇÃO DE VINHAÇA		
			83
5.1	INTRODUÇÃO.....		84
5.2			
METODOLOGIA.....			85
5.2.1	Caracterização	da	área de
estudo			85
5.2.2	Cálculo	da	porosidade e
análise			limitações da
			88
5.2.3	Coleta	das	amostras de
solo			91
5.2.4	Análise estatística		
			91
5.3	RESULTADOS.....		92
5.3.1			
Macroporosidade			93
5.3.1.1	Estatística não paramétrica – teste de Kruss-Wallis para os dados de macroporosidade.....		
			95
5.3.1.2	Análise	dos	dados de
macroporosidade.....			96
5.3.1.3	Análise	da	macroporosidade através do gráfico BOX-PLOT.....
			96
5.3.1.4	Discussão	sobre	os resultados da
macroporosidade:.....			98
5.3.2	Distribuição		da
macroporosidade			100
5.3.2.1	Estatística paramétrica – ANOVA para os dados de distribuição da macroporosidade para os macroporos P e M.....		
			101

5.3.2.2	Análise dos resultados para distribuição dos macroporos (P).....	102
5.3.2.3	Análise dos resultados para distribuição dos macroporos (M).....	103
5.3.2.4	Discussão sobre os resultados da macroporosidade P e M.....	104
5.3.2.5	Estatística não paramétrica – anova para os dados de distribuição da macroporosidade para os macroporos G.....	105
5.3.3	Número de macroporos.....	105
5.3.3.1	Estatística paramétrica – ANOVA para o N° de macroporos.....	107
5.3.3.2	Análise dos resultados para o número de macroporos.....	107
5.3.3.3	Discussão sobre os resultados do número de macroporos.....	108
5.3.4	Distribuição do número de macroporos.....	109
5.3.4.1	Estatística paramétrica – ANOVA para distribuição do número de macroporos.....	110
5.3.4.2	Análise dos resultados para distribuição do número de macroporos (P)...	111
5.3.4.3	Análise dos resultados para distribuição do número de macroporos (M)...	113
5.3.4.4	Discussão sobre os resultados da distribuição do número de macroporos.....	114
5.3.5	Orientação dos macroporos.....	115
5.3.6	Radiodensidade.....	116
5.3.7	RADIODENSIDADE MÉDIA.....	118
6	CONCLUSÃO.....	120
	REFERÊNCIAS.....	122

APÊNDICE	A	–	TESTE	DE
NORMALIDADE				125
APÊNDICE	B	–	TESTE	DE
HOMOGENEIDADE				126

1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar, utilizada como matéria prima para a fabricação de açúcar e álcool, possui destaque para o agronegócio brasileiro devido à geração de emprego e renda. De fato, a mão de obra necessária para o processo de produção, gera empregos desde a produção agrícola até a produção industrial, movimentando diversos eixos profissionais (TAVARES, 2016).

No setor agrícola, um dos principais desafios é conciliar a produção de alimentos e matérias-primas com a preservação do meio ambiente. Nesse contexto, a cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) tem se destacado como uma cultura de grande importância econômica e ambiental. Além de ser uma fonte de energia renovável, a cana-de-açúcar desempenha um papel fundamental na redução das emissões de gases de efeito estufa, na conservação do solo e na promoção do desenvolvimento rural.

De acordo com dados do MTE/RAIS (2021), cerca de 80,0% dos empregos formais gerados pelo setor no Nordeste são na fabricação de açúcar e álcool; no cultivo de cana-de-açúcar, predomina a utilização de mão de obra temporária.

Atualmente, a cana-de-açúcar é considerada uma das grandes alternativas para o setor de biocombustíveis devido ao grande potencial na produção de etanol e dos respectivos subprodutos. Além da produção de etanol e açúcar, as unidades de produção têm buscado operar com maior eficiência, inclusive com geração de energia elétrica, auxiliando na redução dos custos e contribuindo para a

sustentabilidade da atividade. (CONAB, 2020).

Segundo dados da CONAB (2022) estima-se para a safra 2022/23 no Brasil, uma produção de 598.345,4 milhões de toneladas de cana-de-açúcar. Com uma produção estimada em 36,4 milhões de toneladas de açúcar, representando um acréscimo de 4,1% frente à safra 2021/22. Quanto ao etanol total estima-se uma produção de 31,14 bilhões de litros, sendo 12,55 bilhões de anidro e 18,59 bilhões de hidratado. De acordo com os dados obtidos pelo MAPA (2022), para o Estado de Pernambuco estima-se uma produção de 10.991,4936 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, com uma produção de 780.127 mil toneladas de açúcar e 261.337 m³ de etanol.

Apesar dos dados serem animadores na parte econômica, surge uma preocupação na parte ambiental, pois os estudos de Silva et al. (2014) indicam que cada litro de etanol destilado produz cerca de 10 a 15 litros de vinhaça.

A vinhaça é um resíduo altamente poluente, devido à sua alta carga de matéria orgânica e nutrientes, que pode causar impactos negativos nos corpos d'água, à fauna, flora, solo e água, quando descartada inadequadamente. Atualmente, o destino mais comum da vinhaça é a sua utilização na fertirrigação do solo, pois apresenta alto teor de matéria orgânica e fornece nutrientes às culturas, podendo contribuir para o aumento da produtividade agrícola e redução dos custos econômicos, além de evitar impactos ambientais, visto que o solo atua como neutralizador desse efluente (MATHEW et al., 2018). Pode-se citar Freire e Cortez (2000) que apontam que a vinhaça, possui um potencial poluidor, cerca de cem vezes maior que o do esgoto doméstico.

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).

Os atributos físicos, químicos e biológicos do solo são de extrema importância

pois são capazes de mensurar o nível de desequilíbrio ao qual um ambiente está sujeito, bem como os efeitos positivos e negativos sobre a qualidade do mesmo e a sustentabilidade das práticas de manejo (FARIAS, 2018; SILVA, 2019). Todavia, estes fatores podem ser melhorados com a adição de matéria orgânica, e com práticas agroecológicas, sendo que a matéria orgânica do solo é fundamental para os processos produtivos, para a estrutura do solo e sua diversidade biológica (SILVA, 2019).

Pensando na preservação ambiental, em 2015 a Organização das Nações Unidas (ONU) estabeleceu os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que têm como objetivo principal promover a sustentabilidade global até 2030. Os ODS são baseados em uma abordagem holística que reconhece a interconexão entre os diversos desafios socioeconômicos e ambientais enfrentados pela humanidade. Como afirmado pela ONU, "os ODS são uma chamada universal à ação para acabar com a pobreza, proteger o planeta e garantir que todas as pessoas desfrutem de paz e prosperidade" (ONU, 2015).

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) representam uma agenda global ambiciosa para promover a sustentabilidade em todas as suas dimensões: social, econômica e ambiental. Através da promoção desses objetivos, busca-se garantir um futuro mais justo, próspero e equilibrado para as gerações presentes e futuras.

Pode-se pensar diversas propostas para o gerenciamento sustentável da vinhaça, incluindo a compostagem, a fertirrigação controlada e a utilização da vinhaça como fonte de nutrientes na agricultura. Essas práticas visam minimizar os impactos ambientais, promover a reciclagem de nutrientes e contribuir para a sustentabilidade das cadeias produtivas.

A integração dos ODS nas estratégias de gerenciamento da vinhaça é fundamental para garantir a implementação de ações efetivas e alinhadas com os princípios da sustentabilidade. A colaboração entre os setores público e privado, a adoção de políticas e regulamentações eficientes e o investimento em pesquisa e desenvolvimento tecnológico são essenciais para promover o gerenciamento sustentável da vinhaça e contribuir para o alcance dos ODS.

A pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias inovadoras também desempenham um papel fundamental no gerenciamento sustentável da vinhaça. Investimentos em pesquisa e desenvolvimento tecnológico são necessários para

aprimorar as tecnologias existentes e desenvolver novas soluções para o tratamento e aproveitamento da vinhaça.

Nesse contexto, a aplicação da tomografia computadorizada de raio X tem se mostrado promissora para o estudo e monitoramento da cana-de-açúcar e da vinhaça. Essa tecnologia permite a análise não destrutiva de parâmetros importantes no solo, como a distribuição de raízes, a estrutura do solo, a penetração de água, a distribuição de nutrientes e a decomposição da matéria orgânica.

A tomografia computadorizada de raio-X (TC) é uma técnica de imagem não invasiva que permite a visualização tridimensional das estruturas internas do solo. Essa técnica tem sido amplamente utilizada para estudar a distribuição de água, nutrientes e contaminantes no solo, proporcionando informações detalhadas sobre sua heterogeneidade espacial.

Compreender os efeitos da vinhaça no sistema solo-planta e utilizar a tomografia computadorizada de raio-X como uma ferramenta de monitoramento podem contribuir para a adoção de práticas agrícolas mais sustentáveis, alinhadas com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, promovendo a produção de cana-de-açúcar de forma ambientalmente responsável.

Com o intuito de contribuir de maneira categórica a respeito da gestão ambiental de resíduos das indústrias sucroalcooleiras relacionada com os ODS, este trabalho tem como base analisar o potencial da tomografia computadorizada de raio-X como ferramenta para avaliar a influência do tempo de aplicação da vinhaça nas características de radiodensidade e porosidade do solo.

1.1 JUSTIFICATIVA

A crescente demanda por recursos naturais e a necessidade de atingir metas de sustentabilidade têm gerado um interesse renovado na compreensão das interações entre as atividades humanas e o ambiente. No contexto específico da indústria sucroalcooleira, que desempenha um papel significativo no cenário econômico e social do Brasil, a gestão responsável dos resíduos é de extrema importância para garantir um desenvolvimento sustentável.

A vinhaça, um subproduto gerado durante o processamento da cana-de-açúcar, apresenta desafios complexos em relação à sua gestão e impactos ambientais. Sua alta carga de matéria orgânica e nutrientes pode causar efeitos

adversos nos ecossistemas aquáticos, no solo e na biodiversidade quando descartada inadequadamente. A utilização desse resíduo como fertilizante na agricultura, através da fertirrigação, surge como uma alternativa para mitigar os impactos negativos, mas a compreensão dos efeitos de longo prazo dessa prática é essencial.

Nesse contexto, a tecnologia da tomografia computadorizada de raio-X surge como uma ferramenta poderosa para investigar e monitorar as alterações na estrutura do solo resultantes da aplicação contínua da vinhaça. A análise de parâmetros como macroporosidade, radiodensidade e agregados do solo permite entender de que forma a prática da fertirrigação influencia as características físicas do solo ao longo do tempo. Esses dados não apenas fornecem informações fundamentais para a gestão da vinhaça, mas também podem ser utilizados para otimizar as práticas agrícolas e garantir uma produção sustentável de cana-de-açúcar.

Além disso, a conexão entre as práticas de gestão da indústria sucroalcooleira e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) é de suma importância para direcionar as estratégias do setor em direção a um futuro mais sustentável. A compreensão dos impactos da vinhaça no solo, aliada à análise dos ODS, proporciona uma base sólida para a formulação de abordagens mais alinhadas com os princípios de desenvolvimento sustentável, levando em consideração tanto os aspectos econômicos quanto os ambientais.

Desta forma, a pesquisa proposta nesta justificativa busca preencher uma lacuna de conhecimento crítico no que diz respeito à influência da vinhaça no solo e suas implicações para a gestão sustentável na indústria sucroalcooleira. A aplicação da tomografia computadorizada de raio-X como metodologia permite uma análise abrangente e precisa, com potencial para oferecer contribuições substanciais para a tomada de decisões informadas e a promoção de práticas agrícolas mais sustentáveis, alinhadas com os objetivos globais de desenvolvimento sustentável.

1.2 HIPÓTESE

Com base na justificativa apresentada e nas informações disponíveis sobre a aplicação da vinhaça no solo, levanta-se a hipótese de que o tempo de aplicação contínua da vinhaça no solo impacta significativamente a estrutura do solo em

termos de macroporosidade, radiodensidade e agregados. Acredita-se que a utilização da tomografia computadorizada de raio X como ferramenta de análise permitirá observar alterações na distribuição dos poros, na densidade do solo e na formação de agregados ao longo do tempo de exposição à vinhaça. Além disso, pressupõe-se que a relação entre as práticas de gestão da indústria sucroalcooleira e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) será explorada, revelando possíveis estratégias alinhadas com a busca por um desenvolvimento sustentável. Portanto, espera-se que os resultados desta pesquisa forneçam informações valiosas para uma gestão mais eficaz da vinhaça e para a formulação de práticas agrícolas mais sustentáveis no setor sucroalcooleiro.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Investigar os efeitos da aplicação da vinhaça no solo por meio da tomografia computadorizada de raio-X e estabelecer uma relação entre as práticas de gestão dos resíduos das indústrias sucroalcooleiras e os objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

1.3.2 Objetivos específicos

- Analisar as práticas efetivas que as indústrias sucroalcooleiras podem adotar para atender às metas dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.
- Investigar a relação entre os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável e a gestão da vinhaça na indústria sucroalcooleira.
- Desenvolver um procedimento metodológico para obtenção e reconstrução de imagens utilizando a tomografia computadorizada de raio-X, aplicado à análise de solo.
- Avaliar a interferência do tempo de aplicação da vinhaça nos aspectos de macroporosidade, radiodensidade e agregados do solo utilizando a

tomografia computadorizada de raio-X.

Esses objetivos têm como propósito impulsionar o aprofundamento do conhecimento acerca do impacto da aplicação de vinhaça nas propriedades do solo, contribuindo para uma melhor compreensão de sua dinâmica. Além disso, busca-se explorar o potencial da tomografia computadorizada de raio-X na análise do solo, estabelecendo uma conexão entre as indústrias sucroalcooleiras e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho tem como objetivo estudar a aplicação da técnica de tomografia computadorizada de raio-X na análise de solo, especificamente avaliando se o tempo de aplicação da vinhaça no solo influencia a macroporosidade, radiodensidade e agregados do solo. Além disso, será discutida a relação entre a gestão dos resíduos das indústrias sucroalcooleiras e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

Na introdução da tese, é apresentada a importância econômica e ambiental da cultura da cana-de-açúcar, bem como aspectos relacionados à produtividade e à integração dos ODS nas estratégias de gerenciamento da vinhaça. Também será destacada a tomografia computadorizada de raio-X como uma tecnologia inovadora que pode auxiliar no estudo dos atributos do solo.

A tese foi organizada em formato de capítulos. O primeiro capítulo aborda as práticas efetivas que as indústrias sucroalcooleiras podem adotar para alcançar as metas dos ODS. O segundo capítulo discute a relação entre os objetivos de desenvolvimento sustentável e a gestão da vinhaça. Já o terceiro capítulo apresenta o procedimento metodológico para obtenção e reconstrução de imagens utilizando a tomografia computadorizada de raio-X, além dos resultados do processamento no software IMAGEJ. Por fim, o quarto capítulo analisa a influência do tempo de aplicação da vinhaça nos aspectos de macroporosidade, radiodensidade e agregados do solo.

Dessa forma, o trabalho busca contribuir para o conhecimento sobre a aplicação da tomografia computadorizada de raio-X na análise de solo, assim como a relação entre a gestão dos resíduos com foco na descarte da vinhaça, das indústrias sucroalcooleiras e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

2. CAPÍTULO 1 - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável: práticas e efetividades nas indústrias sucroalcooleiras

Resumo: No debate sobre capacidade de gestão ambiental, surgem distintas abordagens, incluindo as empresarial e tecnocrática. O cerne da economia tradicional repousa em um cenário de mercado com sistema fechado, favorecendo as relações de produção em detrimento do consumo, negligenciando as estruturas sociais e ambientais em que estão inseridas e gerando diversas formas de insustentabilidade. Dessa forma, torna-se imperativo repensar estratégias que incorporem o desenvolvimento e a sustentabilidade de maneira integrada. Nesse contexto, este estudo busca analisar os desafios e oportunidades para a sustentabilidade nas indústrias sucroalcooleiras, com ênfase na integração dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). As indústrias sucroalcooleiras têm um papel crucial na economia de muitos países, porém enfrentam desafios significativos de ordem ambiental e social. Através de uma revisão bibliográfica e análise crítica, foram identificadas as principais áreas de atuação e as oportunidades para a implementação dos ODS nas indústrias sucroalcooleiras. Os resultados indicam que a adoção de práticas sustentáveis, como o uso de energias renováveis, a redução das emissões de gases de efeito estufa e o manejo sustentável dos recursos naturais, podem contribuir para a sustentabilidade do setor e para o alcance dos ODS. Contudo, é fundamental ações conjuntas entre governos, empresas e sociedade civil para superar os desafios e promover uma transformação sustentável nas indústrias sucroalcooleiras.

Palavras-chave: energias renováveis, cana-de-açúcar; gases de efeito estufa; recursos naturais.

Objectives of Sustainable Development: practices and effectiveness in the sugar and alcoholic industries

Abstract: Summary: When discussing environmental management capacity, different approaches are portrayed, including the business and technocratic approaches, in which the core of conventional economics is based on a closed-market context, privileging production relationships versus consumption at the expense of social and environmental structures in which they are developed, resulting in various forms of unsustainability. Thus, it is necessary to rethink strategies that involve integrated development and sustainability. In this perspective, this study aims to analyze the challenges and opportunities for sustainability in the sugarcane industry, with a focus on integrating the Sustainable Development Goals (SDGs). The sugarcane industry plays an important role in the economy of many countries but also faces significant environmental and social challenges. Through a literature review and critical analysis, the main areas of action and opportunities for implementing the SDGs in the sugarcane industry were identified. The results show that the adoption of sustainable practices, such as the use of renewable energy, the reduction of greenhouse gas emissions, and the sustainable management of natural resources, can contribute to the sector's sustainability and the achievement of the SDGs. However, joint actions between governments, companies, and civil society are necessary to overcome challenges and achieve a sustainable transformation in the sugarcane industry.

Keywords: renewable energy, sugarcane; greenhouse gases; natural resources.

2.1 INTRODUÇÃO

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), lançados pela Organização das Nações Unidas (ONU) em 2015, representam uma abrangente agenda global direcionada para a promoção do desenvolvimento sustentável até 2030. Esta iniciativa busca enfrentar desafios prementes de ordem socioambiental, abrangendo questões como a erradicação da pobreza, equidade de gênero, acesso à educação de qualidade, proteção do meio ambiente e acesso universal a serviços básicos.

Composto por 17 objetivos interligados e 169 metas específicas, os ODS compreendem as dimensões econômica, social e ambiental do desenvolvimento,

reconhecendo sua interdependência. O propósito central é garantir um futuro sustentável tanto para as atuais quanto para as futuras gerações, por meio da erradicação da pobreza, equidade de gênero, promoção de energia limpa e renovável, entre outros.

As indústrias dedicadas à produção de açúcar, álcool e energia desempenham um papel fundamental no desenvolvimento econômico, emprego e atendimento às demandas energéticas e alimentares. Contudo, elas também enfrentam desafios significativos no que diz respeito à sustentabilidade ambiental e social.

Os ODS representam uma transformação paradigmática ao reconhecer a interconexão entre questões sociais, econômicas e ambientais, exigindo uma abordagem integrada. Isso demanda a colaboração entre governos, setor privado, sociedade civil e indivíduos para a implementação de ações concretas e transformadoras.

No âmbito do ODS 7, destaca-se a importância de incentivar as indústrias a adotar fontes de energia renováveis, como solar, eólica e biomassa, como forma de reduzir as emissões de gases de efeito estufa e diminuir a dependência de combustíveis fósseis. Além disso, promover a eficiência energética é crucial para otimizar o consumo de energia e minimizar impactos ambientais.

O ODS 8 enfatiza a necessidade de fomentar um crescimento econômico sustentável, que implica em melhorar a eficiência no consumo e produção de recursos. Nesse sentido, as indústrias de açúcar, álcool e energia têm a oportunidade de contribuir através da adoção de práticas de consumo e produção responsáveis, incluindo reciclagem, reutilização de resíduos e promoção de cadeias de suprimentos sustentáveis.

No contexto do ODS 13, as indústrias desempenham um papel crítico na mitigação das mudanças climáticas, requerendo a redução das emissões de gases de efeito estufa, investimento em tecnologias limpas e adaptação às transformações climáticas. A integração dos ODS nas operações dessas indústrias pode impulsionar um desenvolvimento mais sustentável, não apenas protegendo o meio ambiente, mas também promovendo uma economia mais equitativa e inclusiva, em sintonia com as metas globais de sustentabilidade.

Este trabalho tem como objetivo analisar a relação entre os ODS 7, 8 e 13 e o desenvolvimento sustentável nas indústrias de açúcar, álcool e energia. Através

dessa análise, busca-se identificar práticas sustentáveis já implementadas por essas indústrias, bem como áreas que necessitam de aprimoramento.

2.2 METODOLOGIA

Foi realizada uma a revisão bibliográfica sobre os temas relacionados aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), indústrias de açúcar, álcool e energia, assim como os desafios e oportunidades para a sustentabilidade do setor sucroalcooleiro. Foi realizada uma busca sistemática em bases de dados acadêmicos, como PubMed, Scopus, Scielo e Google Scholar. A seleção foi restrita a artigos científicos, livros, relatórios técnicos e estudos de caso publicados nos últimos dez anos.

As informações extraídas dos estudos selecionados foram organizadas de acordo com os tópicos estabelecidos.

Os resultados foram integrados para analisar as relações entre os ODS e as indústrias sucroalcooleiras, identificando como as práticas sustentáveis podem ser adotadas para abordar os desafios ambientais e sociais. Foram discutidas as estratégias de integração dos ODS, incluindo exemplos de políticas, práticas inovadoras e parcerias colaborativas.

2.3 – REFERENCIAL TEÓRICO

2.3.1 - Desenvolvimento e Sustentabilidade: Reflexões e suas relações com os ODS 7, 8 e 13.

Ao retratar a problemática ambiental, é necessário compreender a racionalidade econômica como uma das formas de instauração no núcleo da Modernidade, expressando-se como um modo de produção consubstanciado no consumo destrutivo da natureza. Essa forma de racionalidade econômica tem levado à degradação do ordenamento ecológico do planeta, dificultando as condições de

sustentabilidade (LEFF, 2009).

Para desconstruir essa racionalidade econômica, é necessário resgatar e institucionalizar os princípios que norteiam a vida no planeta. Isso envolve a legitimação de valores, direitos e critérios para a tomada de decisões de forma coletiva, bem como a reestruturação de políticas públicas e arranjos institucionais (LEFF, 2010).

Os processos de percepção e uso dos recursos naturais têm gerado e agravado as crises ambientais, relacionando-se as formas de intervenção humana sobre a natureza. Giddens (1996) destaca três formas de degradação do ambiente: constrangimentos e oportunidades econômico-demográficos, impactos diretos à saúde humana e implicações estético-morais.

A capacidade de gestão ambiental é discutida por Rodriguez e Silva (2016) em diferentes visões, como a empresarial e tecnocrática, que priorizam as relações de produção em detrimento das estruturas sociais e ambientais. Leff (2010) destaca as controvérsias entre as prioridades da globalização econômica e os processos de degradação ecológica, ressaltando a necessidade de priorizar a conservação da biodiversidade, o bem-estar da humanidade e o equilíbrio ecológico do planeta.

As causas da insustentabilidade da atual ordem ecológica-social são citadas por Boff (2015), incluindo a visão da Terra como recurso, o antropocentrismo ilusório, o progresso ilimitado impossível, a visão compartimentada, mecanicista e patriarcal da realidade, o individualismo e a dinâmica da competição, e a primazia do desperdício sobre o cuidado do capital material sobre o capital humano. Esses mecanismos têm gerado consequências diversas, como a pobreza incluída, marginalizada e estrutural (SANTOS, 2013).

Diante desse cenário, é importante repensar estratégias para garantir a efetivação dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). O ODS 13 visa promover mecanismos para lidar com as mudanças climáticas, incluindo a resiliência e a capacidade de adaptação, medidas de mitigação e conscientização sobre o tema. O ODS 8 busca melhorar a eficiência dos recursos globais no consumo e produção, dissociando o crescimento econômico da degradação ambiental. Já o ODS 7 almeja aumentar a participação de energias renováveis na matriz energética global (ONU BRASIL).

Para alcançar essas metas, é necessário potencializar os desafios e oportunidades, integrando políticas públicas nacionais e internacionais. Isso implica

valorizar a conservação da biodiversidade, os recursos naturais e os bens ambientais, buscando usos múltiplos integrados e sustentáveis. É importante distinguir o planejamento ambiental do tradicional, para minimizar os impactos socioambientais negativos e atingir as metas estabelecidas nos ODS (VAINER, 1995).

Em conferências mundiais realizadas pela ONU, as questões ambientais e sociais têm sido discutidas, levando à criação dos Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM) e, posteriormente, dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

Em suma, é necessário repensar as estratégias de desenvolvimento, integrando ações que promovam a sustentabilidade ambiental e social. A implementação dos ODS é fundamental para enfrentar os desafios socioambientais e garantir um futuro mais sustentável para todos.

2.3.2 - Análise do processo produtivo das indústrias sucroalcooleiras e impactos socioambientais

A cana-de-açúcar, utilizada como matéria prima para a fabricação de açúcar e álcool, possui destaque para o agronegócio brasileiro devido a geração de emprego e renda. De fato, a mão de obra necessária para o processo de produção, gera empregos desde a produção agrícola até a produção industrial, movimentando diversos eixos profissionais (TAVARES, 2016). De acordo com dados da RAIS (2018), cerca de 80,0% dos empregos formais gerados pelo setor no Nordeste são na fabricação de açúcar e álcool.

Atualmente, a cana-de-açúcar é considerada uma das grandes alternativas para o setor de biocombustíveis devido ao grande potencial na produção de etanol e aos respectivos subprodutos. Além da produção de etanol e açúcar, as unidades de produção têm buscado operar com maior eficiência, inclusive com geração de energia elétrica, auxiliando na redução dos custos e contribuindo para a sustentabilidade da atividade. (CONAB, 2017).

As indústrias sucroalcooleiras desempenham um papel significativo na economia de muitos países, sendo responsáveis pela produção de açúcar e álcool. No entanto, esse setor também está associado a diversos impactos socioambientais negativos, que afetam tanto as comunidades locais quanto o meio ambiente. Nesse

contexto, é fundamental analisar de forma crítica o processo produtivo das indústrias sucroalcooleiras, identificando os principais impactos socioambientais e buscando alternativas mais sustentáveis.

O processo produtivo das indústrias sucroalcooleiras envolve várias etapas, desde o cultivo da cana-de-açúcar até a produção de açúcar e álcool. Durante o cultivo, são utilizados agrotóxicos e fertilizantes químicos, que podem contaminar o solo e a água. Além disso, o desmatamento e a queima da palha da cana-de-açúcar contribuem para a emissão de gases de efeito estufa. Na etapa de produção, são gerados resíduos sólidos e líquidos, que podem poluir o meio ambiente e afetar a qualidade da água.

As indústrias Sucroalcooleiras geram vários resíduos durante todo o seu processo industrial, desde a colheita, até a fabricação de açúcar, álcool e energia.

De acordo com Ana (2009), o processamento industrial da cana-de-açúcar apresenta uma cadeia produtiva em que várias de suas etapas, se não gerenciadas adequadamente, podem provocar impactos ambientais indesejados principalmente associados ao solo e à água.

Dentre as várias etapas do processo produtivo das indústrias sucroalcooleiras, algumas etapas são responsáveis pela formação de alguns resíduos como: CO₂ (oriundo da queima da cana-de-açúcar), bagaço (proveniente da extração do caldo), torta de filtro (resíduo obtido da decantação do caldo) e vinhaça (efluente proveniente da destilação da fermentação do álcool), produzidos em grandes quantidades.

Durante a colheita, utilizando o corte manual, é feito inicialmente a queima do canavial, essa prática gera uma grande liberação de CO₂, contribuindo negativamente para o aumento do efeito estufa no planeta. Uma das alternativas para a erradicação dessa atividade é a utilização do corte mecanizado, onde não se faz necessário a queima dos canaviais. O corte mecanizado também auxilia no aumento da quantidade de matéria orgânica no solo, contribuindo para o aumento de estoque de carbono no solo, aumentando dessa forma a qualidade desse solo.

O bagaço é avaliado como uma fonte de energia renovável, sendo uma alternativa de combustível para a geração de calor por meio da queima em caldeiras, podendo também, ser utilizado de outras formas como, por exemplo, na fabricação de papelão, na construção civil, como fertilizante e na ração animal (COELHO et al., 2016).

De acordo com (Santos, Tiritan, Foloni, & Fabris, 2010) para cada tonelada de cana moída, são geradas de 30 a 40 kg de torta de filtro. A composição orgânica da torta é rica em cálcio, nitrogênio e potássio, tornando-se interessante o seu uso como fertilizante (Rosseto, 2004). Enquanto que para a vinhaça, segundo (Paulino, Zolin, Bertonha, Freitas, & Folegatti, 2011), a produção de vinhaça está na ordem de 13 litros por litro de álcool produzido. A vinhaça é rica em matéria orgânica, potássio, cálcio e enxofre, o que o favorece o desenvolvimento de microrganismos (ALVARENGA & QUEIROZ, 2009).

Segundo Coelho et al. (2016), a torta de filtro, é um resíduo proveniente da fabricação do açúcar, proveniente das borras resultantes da clarificação terem a sacarose residual extraída, podendo ser utilizada na fertilização após o devido tratamento. Para Seixas et al. (2016), a disposição mais utilizada pelas usinas brasileiras é a aplicação da vinhaça na fertirrigação dos canaviais. Essas práticas são desenvolvidas com o intuito de melhorar a qualidade da matéria-prima (cana-de-açúcar).

A prática do plantio da cana-de-açúcar, matéria-prima de grande importância para o setor sucroenergético emprega métodos e processos produtivos de alto potencial de impacto no meio ambiente. Todavia é fato que essas indústrias vêm investindo em tecnologias que visem minimizar ou até mesmo erradicar algumas práticas como a queimada, visando uma melhoria na qualidade do meio ambiente, entretanto vale salientar que a evolução tecnológica gera a redução de determinados empregos, afetando diretamente os trabalhadores do campo.

É indiscutível a importância do setor sucroalcooleiro na sociedade brasileira, seja pelo grande potencial na geração de empregos diretos e indiretos, seja pelas exportações de açúcar e álcool colaborando com o equilíbrio da balança comercial (MARQUES et al., 2006).

Para tanto se faz necessário o envolvimento de políticas públicas ao setor sucroalcooleiro visando planejar, monitorar e regulamentar ações e práticas que contribuam com a preservação do meio ambiente, garantindo dessa forma, uma qualidade de vida para a sociedade, especialmente em ações que se encontrem associadas à gestão e gerenciamento das atividades que visem reduzir os impactos das mudanças climáticas.

2.3.3 - Desafios e Oportunidades para a Sustentabilidade: Integrando os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável nas Indústrias sucroalcooleiras

As indústrias sucroalcooleiras enfrentam desafios ambientais, como a emissão de gases de efeito estufa, a poluição do solo e da água, o desmatamento e a perda de biodiversidade. Além disso, existem desafios sociais, como a exploração de mão de obra, a falta de condições de trabalho adequadas e os conflitos de terra. No entanto, também há oportunidades para a implementação dos ODS nas indústrias sucroalcooleiras, como a adoção de práticas sustentáveis de produção, o uso de energias renováveis, a redução das emissões de carbono e o manejo sustentável dos recursos naturais.

Diante do desafio de conciliar o desenvolvimento econômico e a conservação ambiental, a indústria sucroalcooleira tem-se apresentado aberta para inovações relacionadas ao desenvolvimento sustentável. De acordo com as práticas das indústrias sucroalcooleiras, foram associados os seguintes ODS: objetivo 7 (assegurar acesso confiável, sustentável, moderno e acessível à energia para todos), objetivo 8 (promover o crescimento econômico sustentado, inclusivo e sustentável, emprego pleno e produtivo e trabalho decente para todos) e objetivo 13 (tomar medidas urgentes para combater a mudança climática e seus impactos).

Para cumprir o objetivo 7, tem-se utilizado como fonte energética os resíduos resultantes do processamento da cana-de-açúcar, os quais representam os principais tipos de biomassa para geração de energia renovável. A biomassa, em termos gerais, é qualquer matéria orgânica que pode gerar energia mecânica, térmica ou elétrica, sendo considerada importante alternativa para a diversificação da matriz energética e conseqüentemente minimização do uso de combustíveis fósseis (ANEEL,2008).

O bagaço da cana-de-açúcar, resíduo resultante da extração do caldo da cana realizada durante a produção do álcool e açúcar, é gerado, aproximadamente, 280 kg por tonelada de cana moída, quantidade expressiva de passivo ambiental para a indústria (COELHO et al., 2016; MACEDO et al., 2004). Entretanto, o bagaço, devido ao seu poder calorífico, tem sido utilizado como combustível para a produção de calor por meio da sua queima em caldeiras. A aplicação mais difundida é a cogeração, no qual se baseia na queima para a geração de vapor que aciona geradores elétricos. Comparando com outros usos, a cogeração do bagaço causa

menos impactos ambientais, uma vez que as partículas dispersas na atmosfera são os únicos poluentes gerados (COELHO et al., 2016).

Conforme as projeções da União da Indústria de Cana-de-açúcar (UNIICA, 2010), revelou-se um potencial de exportação de energia a partir do bagaço cerca de 13 gigawatts (GW) médios para a safra de 2020/2021, equivalente a 9,5% do total da matriz energética nacional. Já a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2015) apontou que o potencial de produção de energia para 2023, utilizando o bagaço e a palha da cana, é de 19,5 GW médios, representando 14% da matriz energética (TROMBETA; CAIXETA FILHO, 2017).

Em relação à palha da cana-de-açúcar, resíduo gerado durante a colheita mecanizada, estima-se que, aproximadamente, 200 kg de palha é produzido por tonelada (COELHO et al., 2016), tendo quase o dobro do poder calorífico do bagaço (ÚNICA, 2010). De forma geral, a disponibilidade de palha sofre variações devido a produtividade, a quantidade de cortes e variedade de cana-de-açúcar. Esse grande volume desse resíduo estimulou estudos econômicos, agrônômicos e ambientais com a finalidade de identificar o potencial como biomassa carburante ou matéria-prima para a produção de etanol de segunda geração (TROMBETA; CAIXETA FILHO, 2017).

Um projeto brasileiro de iniciativa do Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bietanol (CTBE) denominada SUCRE (Sugarcane Renewable Electricity) visa o aumento da produção de eletricidade com reduzida emissão de gases de efeito estufa na indústria de cana, por meio da utilização da palha, em complemento ao bagaço. O laboratório atua conjuntamente com usinas parceiras, as quais usam palha para produção de energia, e o projeto é administrado em conjunto com o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) (CNPEM, 2018).

Por tornar passivos ambientais em alternativas menos impactantes ao meio ambiente, o bagaço e a palha contribuem também no cumprimento das metas do objetivo 8 concernente ao crescimento econômico sustentável, visto que o dióxido de carbono produzido durante a combustão da biomassa é compensado pela quantidade de carbono já absorvida no período do cultivo da cana. Além de gerar energia limpa, as usinas colaboram na redução de GEE evitando as queimadas da cana (COSTA; DUARTE, 2010).

Quanto às metas relacionadas ao trabalho decente do mesmo objetivo, as

usinas de cana-de-açúcar são bem conhecidas pela exigência de produtividade, condições análogas à trabalho escravo em ambientes precários (SANTOS JÚNIOR, 2018). Com o aumento da mecanização da colheita e inovações tecnológicas na cadeia produtiva do açúcar e etanol, trouxe relevantes alterações nas relações e condições de trabalho no canavial, entretanto, não obteve melhora significativa às condições de vida e de trabalho dos canavieiros (ABREU et al., 2009). Tais modificações resultaram em quatro impactos imediatos e inter-relacionados a seguir: redução do tempo de realização de certas tarefas; redução da quantidade de mão de obra, uma vez que é substituído por máquinas; minimização da necessidade de mão de obra residente na propriedade; introdução de modificação qualitativa na demanda por trabalhadores, ao empregar trabalhadores com maior qualificação e trabalhadores sem qualificação (ABREU et al., 2009).

Um estudo realizado em uma usina em São Paulo, tem demonstrado que ainda persiste um trabalho com ritmo intenso e ininterrupto durante a jornada de trabalho, diferenciando que na colheita mecanizada existe um controle maior dessa atividade por meio de uma base tecnológica (VERGÍNIO; ALMEIDA, 2013).

Para Abreu et al. (2009), a mecanização da colheita tem causado um aumento na taxa de desemprego de trabalhadores do corte da cana, sendo para Gonçalves (2002) um cenário irreversível. Ainda de acordo com Abreu et al. (2009) é difícil presumir como todos os trabalhadores serão reconduzidos, se no mesmo setor sucroalcooleiro, em outras tarefas agropecuárias ou em outros setores econômicos. Sabe-se que uma parte não será reconduzida devido à baixa instrução escolar, porém a parte que será reinserida, será necessário que os trabalhadores sejam motivados para que compreendam sua função no contexto econômico e a relevância de mudar de serviço, assim como requalificados tendo acesso a cursos profissionalizantes para trabalhar em novos cargos (ABREU et al., 2009).

Por fim, para estar em acordo com as metas do objetivo 13, o setor sucroalcooleiro tem cooperado na redução da emissão de GEE para a atmosfera, por meio do uso de colhedeira mecânica, evitando, desse modo, a queimada da cana. No Brasil, a colheita mecanizada avançou bastante nos anos anteriores, observa-se comparando os índices da safra 2007/2008 que foi de 24,4%, e da safra de 2017/2018 que está estimada em 90,2%. A região de maior índice é o Centro-Sul que ultrapassa os 95%, uma vez que seu relevo favorece a mecanização. Já a Região Norte/Nordeste não atingiu os 25% de área com colheita mecanizada

(CONAB, 2018).

Comparando as emissões dos GEE, em 1990 foram estimadas 58,51 Gg de CH₄, 1993,55 Gg de CO, 1,52 Gg de N₂O e 54,17 Gg de NO_x, minimizando para 32,58 Gg de CH₄, 1.110,14 Gg de CO, 0,84 Gg de N₂O e 30,17 Gg de NO_x em 2015. As emissões totais estimadas concernentes a 2015 representam uma redução de 44,3% em referência a 1990 (LIMA; LUIZ, NEVES, 2016). Considerando que a queimada de canaviais é uma fonte expressiva de emissão de GEE, observa-se uma potencialidade para obtenção de crédito de carbono por meio de projetos de cogeração de energia a partir da biomassa da cana-de-açúcar (MARCONDES et al., 2013).

A integração dos ODS nas indústrias sucroalcooleiras requer uma abordagem holística, que envolve ações em várias áreas, como a gestão ambiental, o uso eficiente dos recursos naturais, a promoção da igualdade de gênero e a melhoria das condições de trabalho. Além disso, é fundamental promover parcerias entre governos, empresas e sociedade civil para superar os desafios e aproveitar as oportunidades para a sustentabilidade. A implementação dos ODS pode levar a benefícios significativos, como a redução do impacto ambiental, a melhoria das condições sociais e a criação de oportunidades econômicas.

2.4 - CONCLUSÕES

Diante das reflexões que norteiam o desenvolvimento, a sustentabilidade e os processos produtivos das indústrias sucroalcooleiras no Brasil, associadas às mudanças climáticas e aos ODS 7, 8 e 13, percebe-se a necessidade de planejar e executar iniciativas que envolvam o aproveitamento sustentável dos recursos naturais. É importante implementar tecnologias limpas que respeitem as especificidades locais e as representatividades sociais de diferentes regiões, visando aprimorar os processos produtivos e minimizar os impactos negativos. Essas ações são essenciais para garantir o desenvolvimento econômico valorizando os trabalhadores, a conservação dos recursos naturais e o desenvolvimento de estratégias acessíveis.

A análise da relação entre os ODS 7, 8 e 13 e as indústrias de produção de açúcar, álcool e energia é essencial para identificar oportunidades de melhoria e

desenvolver estratégias efetivas que promovam a sustentabilidade ambiental, social e econômica em todo o setor. Ao adotar práticas sustentáveis, como o uso de energias renováveis, a eficiência no consumo e produção de recursos e a mitigação das mudanças climáticas, essas indústrias podem contribuir significativamente para alcançar os objetivos globais de desenvolvimento sustentável.

No entanto, é importante ressaltar que a integração dos ODS nas indústrias sucroalcooleiras enfrenta desafios significativos. Um dos principais desafios é a necessidade de mudanças estruturais e culturais dentro das empresas, que muitas vezes estão focadas apenas na maximização dos lucros a curto prazo. Além disso, a falta de incentivos e regulamentações adequadas por parte dos governos pode dificultar a adoção de práticas sustentáveis.

Para superar esses desafios, é fundamental promover a conscientização e a colaboração entre empresas, governos e sociedade civil. É necessário criar um ambiente propício para a transição para práticas mais sustentáveis, por meio de políticas públicas que incentivem a adoção de tecnologias limpas, ofereçam incentivos fiscais e promovam a transparência e a responsabilidade social das empresas.

Além disso, é importante investir em pesquisa e desenvolvimento para aprimorar as tecnologias e práticas sustentáveis nas indústrias sucroalcooleiras. Isso inclui o desenvolvimento de novas variedades de cana-de-açúcar mais produtivas e resistentes a pragas, o uso de técnicas avançadas de cultivo e colheita, e a implementação de processos de produção mais eficientes e menos impactantes.

A integração dos ODS nas indústrias sucroalcooleiras não apenas trará benefícios ambientais e sociais, mas também econômicos. A adoção de práticas sustentáveis pode gerar economia de recursos, reduzir os custos de produção e aumentar a eficiência operacional, tornando as empresas mais competitivas no mercado global.

Em conclusão, a integração dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável nas indústrias sucroalcooleiras é fundamental para promover a sustentabilidade ambiental, social e econômica nesse setor. A adoção de práticas sustentáveis, a colaboração entre os diferentes atores envolvidos e o investimento em pesquisa e desenvolvimento são essenciais para superar os desafios e aproveitar as oportunidades para um futuro mais sustentável nas indústrias sucroalcooleiras.

2.5 - REFERÊNCIAS

ABREU, D.; MORAES, L. A.; NASCIMENTO, E. N.; OLIVEIRA, R. A. Impacto social da mecanização da colheita de cana-de-açúcar. Rev. Bras. Med. Trab., v. 4, 5 e 6, número especial, p. 3-11, 2009.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. Atlas de energia elétrica do Brasil. Brasília: Aneel, 2008. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/documents/656835/14876406/2008_AtlasEnergiaEletricaBrasil3ed/297ceb2e-16b7-514d-5f19-16cef60679fb>. Acesso em 8 dez. 2018.

_____. Capacidade de Geração do Brasil. 2016. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>. Acesso em 8 dez. 2018.

ALVARENGA, R.; QUEIROZ, T. Produção mais limpa e aspectos ambientais na indústria sucroalcooleira. International workshop advances in cleaner production, 2009.

ANA. Manual de conservação e reuso de água na agroindústria sucroenergética/ Agência Nacional de Águas; Federação das Indústrias do Estado de São Paulo; União da Indústria da Cana-de-açúcar; Centro de Tecnologia Canavieira. Brasília, 2009.

AQUINO, A. F.; BIDÔ, E. S.; GALVÃO, M. L. M.; OLIVEIRA, V. N. O etanol da cana de açúcar: possibilidades energéticas da região de Ceará-mirim - RN. HOLOS, v. 1, p. 105-125, 2014. <https://doi.org/10.15628/holos.2014.713>

BARROS, R. P. D.; VIÉGAS, P. R. A.; SILVA, T. L. D.; SOUZA, R. M. D.; BARBOSA, L. T.; VIÉGAS, R. A.; BARRETO, M. C. V.; MELO, A. S. D. Alterações em atributos químicos de solo cultivado com cana-de-açúcar e adição de vinhaça. Pesquisa Agropecuária Tropical 40(3):341-346, (2010). <https://doi.org/10.5216/pat.v40i3.6422>

BOFF, L. Sustentabilidade: o que é o que não é. 4 ed. Petrópolis, RJ: vozes, 2015.

CANELLA, L. P.; VELLOSO, A. C. X.; MARCIANO, C. R.; RAMALHO, J. F. G. P.; RUMIANEK, V. M.; REZENDE, C. E.; SANTOS, G. D. A. 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, (2003) <https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000500018>

CENTRO NACIONAL DE PESQUISA EM ENERGIA E MATERIAIS - CNPEM. Projeto SUCRE. Disponível em: < <https://pages.cnpem.br/sucres/>>. Acesso em 8 dez. 2018.

COELHO, W. L. V.; SILVA, F. S.; DALLACORT, R.; CARNEIRO, P. A. V. Análise do potencial de geração de energia elétrica a partir dos resíduos do setor sucroenergético no estado de Mato Grosso em diferentes cenários produtivos. Revista brasileira de energias renováveis, v.5, n.2, p.332-351, 2016. <https://doi.org/10.5380/rber.v5i2.46305>

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar. v. 4. Brasília: Conab, 2018.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. Safras: Cana: 2015/2016: Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>> Acesso em 03 dez 2018.

COSTA, P. R. O.; DUARTE, F. S. A utilização da biomassa da cana-de-açúcar como fonte de energia renovável aplicada no setor sucroalcooleiro. Revista de Administração da Fatea, v. 3, n. 3, 81-96, 2010.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. Plano decenal de energia 2023 (PDE 2023). Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2015. Disponível em: <www.epe.gov.br>. Acesso em 8 dez. 2018.

FARIAS, F. J. Atributos físicos, químicos e microbiológicos do solo em sistema agroecológico de produção. São Cristóvão, Sergipe. 2018. 41 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Tecnologia em Agroecologia): Instituto Federal de Sergipe, Sergipe. 2018.

JIANG, Z. P.; LI, Y. R.; WEI, G. P.; LIAO, Q.; SU, T. M.; MENG, Y. C.; ZHANG, H. Y.; LU, C. Y. Effect of long-term vinasse application on physico-chemical properties of sugarcane field soils. Sugar Tech, 14(4), 412-417, (2012). <https://doi.org/10.1007/s12355-012-0174-9>

LEFF, E. Ecologia, capital e cultura: a territorialização da racionalidade ambiental. Petrópolis, RJ: Vozes, 2009.

LEFF, E. Discursos sustentáveis. São Paulo. Cortez, 2010.

FREIRE, W. J.; CORTEZ, L. A. B. Vinhaça de cana-de-açúcar. Guaíba: Agropecuária, 2000.

MENEZES, H. Z.; MINILLO, X. K. Pesquisa e extensão como contribuição da universidade na implementação dos objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) no Brasil. Meridiano 47, v. 18, p. 1-16, 2017. <https://doi.org/10.20889/M47e18019>

GONÇALVES, D. B. A regulação das queimadas e as mudanças nos canaviais paulistas. São Carlos: Rima, 2002.

GIDDENS, A. Teoria social, degradação do ambiente e políticas de ambiente: Capitalismo, industrialismo e transformação da natureza. Goldblatt, D. Teoria social e ambiente. Insituto Oiaget: Lisboa, 1996.

MACEDO, I. C.; LEAL, M. R. L. V.; SILVA, J. E. A. R. Balanço das emissões de gases do efeito estufa na produção e uso do etanol no Brasil. São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente. São Paulo, 2004. Disponível em: <file:///C:/Users/adri/Downloads/4633a93a6ddb6381d19eb24db68f5592.pdf>>. Acesso em 8 dez. 2018.

MARCONDES, L. P.; PARISSOTO, I. R. S.; FARIA, S. G. S.; ZUCCO, F. D.; FARAH, O. E. Obtenção de crédito de carbono através de projetos de cogeração de energia a partir do bagaço da cana-de-açúcar em uma agroindústria sucroalcooleira da

região noroeste do estado de São Paulo. Revista Metropolitana de Sustentabilidade, v. 3, n. 3, p. 116-136, 2013.

MARQUES, M.O. Aspectos técnicos e legais da produção, transporte e aplicação de vinhaça. In: SEGATO, S.V.; PINTO, A.S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J.C.M. Atualização em produção de cana-de-açúcar. Piracicaba: Editoral 2006. p.369-375.

MATHEW, A. K.; ABRAHAM, A.; MALLAPUREDDY, K. K.; SUKUMARAN, R. K. (2018) Lignocellulosic Biorefinery Wastes, or Resources? In Lee, D., Bhaskar, T., Pandey, A., Khanal, S. K., Mohan, S. V. (Eds.), Waste Biorefinery: potential and perspectives, Elsevier B.V, 267-297. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63992-9.00009-4>

MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO - MTE. RELAÇÃO ANUAL DE INFORMAÇÕES SOCIAIS (RAIS). Base de dados.

SANTOS, M. Por uma outra globalização: do pensamento único à consciência universal. 23 Ed. Rio de Janeiro: Record, 2013.

SILVA, C. T. C. B. Efeito da cobertura do solo sobre atributos físicos e microbiológicos. São Cristóvão, Sergipe. 2019. 19 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Tecnologia em Agroecologia): Instituto Federal de Sergipe, Sergipe. 2019.

OKADO, G. H. C.; QUINELLI, L. Megatendências mundiais 2030 e os objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS): Uma reflexão preliminar sobre a "nova agenda" das Nações Unidas. Revista Brasileira de Assuntos Regionais e Urbanos, v. 2, n. 2, p. 111-129, 2016. <https://doi.org/10.18224/baru.v2i2.5266>

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS - ONU BRASIL. Objetivo 13. Disponível em: < <https://nacoesunidas.org/pos2015/ods13/> >. Acesso em 2 dez. 2018.

PAULINO, J.; ZOLIN, C.; BERTONHA, A.; FREITAS, P.; FOLEGATTI, M. Estudo Exploratório do uso da vinhaça ao longo do tempo. Características da cana de açúcar, 15 (3). 2011. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000300004>

RODRIGUEZ, L. M. M.; SILVA, E, V.; Educação Ambiental e Desenvolvimento Sustentável. Problemática, Tendências e Desafios. 4.ed. Fortaleza: Expressão gráfica e Editora, 2016.

ROSSETO, R. A cultura da cana, da degradação à conservação. 1 (1). 2004.

SANTOS JÚNIOR, J. A dimensão esquecida: a questão da agência no trabalho do corte da cana de açúcar. Caderno CRH, v. 31, n. 83, p. 389-406, 2018. <https://doi.org/10.1590/s0103-49792018000200014>

SANTOS, D.; TIRITAN, C.; FOLONI, J.; FABRIS, L. Produtividade da cana-de-açúcar sob adubação com torta de filtro enriquecida com fosfato solúvel. Pesquisa Agropecuária Tropical, 40 (4). 2010. <https://doi.org/10.5216/pat.v40i4.7272>

SILVA, A. P. M.; BONO, J. A. M.; PEREIRA, F. A. R. Aplicação de vinhaça na cultura da cana-de-açúcar: Efeito no solo e na produtividade de colmos. Revista Brasileira

de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 18, n. 1, p. 38-43, 2014. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662014000100006>

SEIXAS, F. L.; GIMENES, M. L.; FERNANDES-MACHADO, N. R. C. Tratamento da vinhaça por adsorção em carvão de bagaço de cana-de-açúcar. Quim. Nova, v. 39, n. 2, pp. 172-179, 2016.

TAVARES, V. N. ATRIBUTOS FÍSICOS, QUÍMICOS E ESTOQUE DE CARBONO EM ARGISSOLO SOB DIFERENTES MANEJOS NA ZONA DA MATA DE PERNAMBUCO. 2016, Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) Departamento de Tecnologia Rural, UFRPE.

TROMBETA, N. C.; CAIXETA FILHO, J. V. Potencial e disponibilidade de biomassa de cana-de-açúcar na região Centro-Sul do Brasil: indicadores agroindustriais. RESR, v. 55, n. 3, p. 479-496, 2017. <https://doi.org/10.1590/1234-56781806-94790550304>

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR - UNICA. Bioeletricidade: a energia verde e inteligente do Brasil. São Paulo, 2010, 15 p.

VAINER, C. Planejamento e questão ambiental: qual é o meio ambiente que queremos planejar? In: _____. Encruzilhadas das modernidades e planejamento. Belo Horizonte: ANFUR, 1995. P.556-571.

VERGÍNIO, C. J.; ALMEIDA, L. M. M. C. Exploração do trabalho na colheita mecanizada da cana-de-açúcar: estudo de caso de uma usina localizada no município de Ouroeste, estado de São Paulo. Informações Econômicas, v. 43, n. 5, 2013.

YIN, J.; DENG, C.B.; WANG, X. F.; CHEN, G. L.; MIHUCZ, V. G.; XU, G. P.; DENG, Q. C. (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. <https://doi.org/10.1007/s12355-018-0630-2>

3. CAPÍTULO 2 - Relação dos objetivos de desenvolvimento sustentável com a gestão da vinhaça

Resumo: A vinhaça é rica em nutrientes e matéria orgânica, mas pode representar um desafio ambiental se não for gerenciada adequadamente. A vinhaça é utilizada como fertirrigação nos canaviais devido à sua composição mineral variável e predominância de potássio. Além de ser uma fonte de nutrientes, a vinhaça também possui um alto teor de água, tornando-a uma opção interessante para a irrigação das culturas. Seu uso traz benefícios para as culturas agrícolas, fortalecendo as plantas e melhorando a estrutura do solo. O uso da vinhaça também reduz a dependência de fertilizantes químicos. No entanto, é necessário um manejo adequado para evitar a contaminação do solo e das águas subterrâneas. O objetivo do trabalho é identificar os ODS relacionados ao descarte de vinhaça no solo e propor recomendações para o gerenciamento sustentável desse subproduto. Os resultados mostraram que o gerenciamento sustentável da vinhaça está relacionado a vários Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), como Fome Zero e Agricultura Sustentável, Água Potável e Saneamento, Indústria, Inovação e Infraestrutura, e Vida Terrestre. A implementação dos ODS requer colaboração entre governos, setor privado e sociedade civil. É fundamental adotar uma abordagem integrada e abrangente para alcançar um futuro mais sustentável.

Palavras-chave: fertirrigação, ODS, manejo, indústrias.

Relationship between Sustainable Development Goals and Vinasse Management

Abstract: Vinasse is rich in nutrients and organic matter but can pose an environmental challenge if not properly managed. Vinasse is used for fertigation in sugarcane fields due to its variable mineral composition and high potassium content. In addition to being a nutrient source, vinasse also has a high water content, making it an interesting option for crop irrigation. Its use brings benefits to agricultural crops, strengthening plants and improving soil structure. The use of vinasse also reduces the dependency on chemical fertilizers. However, proper management is necessary to prevent soil and groundwater contamination. The objective of this study is to

identify the Sustainable Development Goals (SDGs) related to vinasse disposal in soil and propose recommendations for the sustainable management of this byproduct. The results show that sustainable vinasse management is related to several SDGs, including Zero Hunger and Sustainable Agriculture, Clean Water and Sanitation, Industry, Innovation and Infrastructure, and Life on Land. The implementation of SDGs requires collaboration between governments, the private sector, and civil society. It is crucial to adopt an integrated and comprehensive approach to achieve a more sustainable future.

Keywords: fertigation, SDGs, management, industries.

3.1 INTRODUÇÃO

A produção de álcool a partir da cana-de-açúcar tem se mostrado uma alternativa promissora para a redução da dependência de combustíveis fósseis e para a mitigação das mudanças climáticas. No entanto, esse processo gera a vinhaça, um subproduto rico em nutrientes e matéria orgânica, mas que pode representar um desafio para o meio ambiente se não for gerenciado adequadamente.

A vinhaça é um resíduo (efluente) líquido, proveniente do processo de destilação do álcool. A proporção média de vinhaça produzida equivale a aproximadamente a 13 litros para cada litro de álcool. Ela é utilizada como fertirrigação nos canaviais, pois possui quantidades significativas de nutrientes como nitrogênio, potássio, cálcio, magnésio e matéria orgânica. Dos resíduos da fabricação do álcool, a vinhaça é, sem dúvida, o mais importante, não só em termos do volume gerado, mas, também, pelo seu enorme potencial poluidor.

A composição da vinhaça é bastante variável e depende da matéria-prima usada, do tipo de destilado a ser obtido e do tipo de fermentação empregada, sendo

normalmente rica em matéria orgânica, com composição mineral variável e predominância do K.

Além de ser uma fonte de nutrientes, a vinhaça também possui um alto teor de água, o que a torna uma opção interessante para a irrigação das culturas. A aplicação da vinhaça no solo ou através de sistemas de irrigação por gotejamento ou fertirrigação ajuda a garantir o suprimento adequado de água para as plantas, especialmente em regiões onde a disponibilidade hídrica é limitada.

A utilização da vinhaça como fonte de água e nutrientes traz diversos benefícios para as culturas agrícolas, por ser composta por alguns nutrientes essenciais para o cultivo da cana-de-açúcar, como o potássio. Esse nutriente ajuda a fortalecer as plantas, aumentando sua resistência a doenças e pragas. A vinhaça também contribui para a melhoria da estrutura do solo, aumentando sua capacidade de retenção de água e melhorando a absorção de nutrientes pelas raízes das plantas.

Outro aspecto positivo do uso da vinhaça é a redução da dependência de fertilizantes químicos. Ao utilizar a vinhaça como adubo orgânico, os agricultores podem diminuir a quantidade de fertilizantes sintéticos aplicados, o que contribui para a redução dos impactos ambientais associados ao uso desses produtos químicos.

No entanto, é importante ressaltar que o uso da vinhaça requer cuidados e manejo adequado. A quantidade e a frequência de aplicação devem ser controladas para evitar a lixiviação de nutrientes e a contaminação do solo e das águas subterrâneas. Além disso, é fundamental realizar análises periódicas da vinhaça para monitorar sua composição e garantir que esteja dentro dos limites aceitáveis para uso agrícola.

Neste contexto, é fundamental explorar as conexões entre o gerenciamento da vinhaça e os ODS, a fim de promover práticas sustentáveis e maximizar os benefícios desse subproduto.

Esses objetivos abrangem uma ampla gama de questões, desde a erradicação da pobreza e da fome até a promoção da igualdade de gênero, o combate às mudanças climáticas e a proteção dos ecossistemas terrestres e marinhos.

Dentre os 17 ODS, o gerenciamento sustentável da vinhaça, um subproduto da indústria sucroalcooleira, está diretamente relacionado a vários objetivos,

incluindo o ODS 2 - Fome Zero e Agricultura Sustentável, ODS 6 - Água Potável e Saneamento, o ODS 9 - Indústria, Inovação e Infraestrutura e o ODS 15 - Vida Terrestre.

A implementação dos ODS exige a colaboração de governos, setor privado, sociedade civil e cidadãos em geral. Como afirmado por Ban Ki-moon, ex-Secretário-Geral das Nações Unidas, "os ODS são uma visão compartilhada de humanidade e um contrato social entre líderes mundiais e as pessoas que eles servem" (ONU, 2015).

Ao adotar uma abordagem integrada e abrangente, os ODS fornecem um roteiro para abordar os desafios globais mais urgentes e criar um mundo mais sustentável para todos. É fundamental que todos os atores envolvidos se comprometam com a implementação e o monitoramento dos ODS, garantindo assim um progresso significativo em direção a um futuro mais sustentável e alinhado com as necessidades e aspirações da humanidade.

O objetivo desse trabalho é identificar os ODS relacionados ao tema do descarte de vinhaça no solo, destacando os impactos ambientais e socioeconômicos propondo recomendações e diretrizes para o gerenciamento sustentável da vinhaça.

3.2 METODOLOGIA

Para esse artigo foi utilizado como metodologia a pesquisa exploratória e bibliográfica, utilizou-se como critérios de inclusão desta pesquisa, artigos científicos através do portal de Periódicos CAPES/MEC. A pesquisa foi refinada utilizando-se preferencialmente artigos com idioma em Português e data de publicação entre 2010 até 2022.

A pesquisa exploratória, consiste na realização de um estudo para a familiarização ou aprofundamento do estudo que está sendo investigado durante a pesquisa.

De acordo com Vergara (2006), a pesquisa bibliográfica consiste no estudo sistematizado desenvolvido com base em material publicado em livros, revistas, jornais, redes eletrônicas, isto é, material acessível ao público em geral. O material publicado pode ser fonte primária ou secundária.

3.3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.3.1 Possíveis benefícios e impactos ambientais da vinhaça no solo

A vinhaça é um líquido de coloração escura com elevada concentração de DQO (100 a 150 g/L), DBO (35 a 50 g/L) e nutrientes como nitrogênio, fósforo e potássio, e pH ácido (3 a 5) (ROBLES-GONZÁLEZ et al., 2012; NETO et al., 2019).

Atualmente, o destino mais comum da vinhaça é a sua utilização na fertirrigação do solo, pois apresenta alto teor de matéria orgânica e fornece nutrientes às culturas, podendo contribuir para o aumento da produtividade agrícola e redução dos custos econômicos, além de evitar impactos ambientais visto que o solo atua como neutralizador desse efluente (MATHEW et al., 2018; LAIME et al., 2011).

A utilização de vinhaça na fertirrigação visa atender uma necessidade na demanda química da planta. Para Silva et al., (2007) um fator que influencia na produtividade é a deficiência de nutriente no sistema solo-planta, que se baseia no balanço de N (nitrogênio) e na carência de K (potássio).

Segundo Eng Sánchez et al., (2021) 97% da vinhaça produzida nos engenhos brasileiros são voltadas para a fertirrigação do próprio cultivo de cana-de-açúcar a fim de fazer a reciclar dos seus nutrientes.

Atualmente, o uso dos de 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).

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).

A prática da fertirrigação necessita de uma gestão que verifique disponibilidade de nutrientes do solo para que não haja uma poluição, com excesso de nutrientes e contaminação dos lençóis freáticos por percolação ou lixiviação.

Pode-se afirmar que o manejo incorreto da vinhaça provoca grandes impactos ambientais, todavia se essa prática for feita de forma correta, ocasiona grandes benefícios ao solo como; melhoria nas propriedades físicas, aumento na disponibilidade de nutrientes e elevação do pH.

Peluco et al., (2013) descreve que a vinhaça deve ser empregada com cuidado, verificando-se os níveis aceitáveis para não causar lixiviação dos nutrientes por ela proporcionada. Dessa maneira, é possível ajudar na produtividade da plantação de cana-deaçúcar e preservar o meio ambiente, sem acarretar desequilíbrio nutricional para as plantas e poluição das águas de superfície e subterrâneas.

A lixiviação de nutrientes varia com os atributos físicos do solo, como textura, estrutura, profundidade do perfil e, principalmente, porosidade. Entre os atributos químicos que afetam a lixiviação, estão a capacidade de retenção de íons e o pH (SANTOS et al., 2009).

Os atributos físicos, químicos e biológicos do solo são de extrema importância pois são capazes de mensurar o nível de desequilíbrio ao qual um ambiente está sujeito e os efeitos positivos e negativos sobre a qualidade do mesmo e a sustentabilidade das práticas de manejo (FARIAS, 2018; SILVA, 2019).

Todavia, estes fatores podem ser melhorados com a adição de matéria orgânica, e com práticas agroecológicas, sendo que a matéria orgânica do solo é fundamental para os processos produtivos, para a estrutura do solo e sua diversidade biológica (SILVA, 2019).

Segundo Gomes et al.,(2018) o excedente de nutrientes decorrente da aplicação inadequada da vinhaça no solo pode beneficiar o processo de lixiviação e escoamento superficial, possibilitando a contaminação das águas superficiais e subterrâneas.

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).

3.3.2 Aspectos legais relacionado com a política de descarte de resíduo de vinhaça

Em 1908 o governador do estado de Pernambuco, Herculano Bandeira lançou uma mensagem a assembleia legislativa estadual reportando sobre o lançamento de vinhaça em água. O decreto que regulamentou o lançamento de vinhaça em rios, cursos de águas e lagoas só veio em 23 de janeiro de 1934.

Na década de 50 e 60 a vinhaça era lançada nos rios acarretando a poluição das águas e a morte dos peixes. Na Portaria do Ministério do Interior n. 323 de 29/11/1978, determinou que, a partir da safra 1979/ 1980, ficaria proibido o lançamento direto ou indireto, do vinhoto, em qualquer coleção hídrica, pelas destilarias de álcool instaladas ou que venham a se instalar no País, dessa forma se fez necessário o desenvolvimento de pesquisas que buscassem formas para a destinação da vinhaça.

Devido ao uso abusivo e descontrolado dos recursos naturais, o homem com a intenção de proteger esses recursos, desenvolveram algumas estratégias a fim de interceder pela preservação e manutenção do meio ambiente.

Para tanto em 1992, na cidade do Rio de Janeiro, Brasil, ocorreu a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (CNUMAD), também intitulada Eco-92, que inaugurou uma nova etapa na perspectiva ambientalista mundial ao propor ações que relacionavam a preservação ambiental com o desenvolvimento econômico, principalmente no caso de países em desenvolvimento (WEHRMANN; DUARTE, 2014).

Em 1997 surge o protocolo de Quioto, criado como uma grande oportunidade, não só para que o mundo começasse a agir efetivamente em prol do meio ambiente, mas também como um meio para que os países em desenvolvimento buscassem o desenvolvimento sustentável, estimulando a produção de energia limpa para a redução das emissões de GEEs e, com base na cooperação internacional com países desenvolvidos, beneficiassem com a transferência de tecnologia e com o comércio de carbono (VIDAL, 2003).

No Brasil, existem algumas leis e regulamentações que tratam do uso e descarte da vinhaça. Abaixo estão alguns dos principais:

Segundo o Artigo 1º da Resolução nº 001/86 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), Impacto Ambiental é qualquer alteração das propriedades físicas, químicas, biológicas do meio ambiente, causado por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que afetem diretamente ou indiretamente, dentre outros fatores, a qualidade dos recursos ambientais.

Com relação ao lançamento de efluentes, o Ministério do Meio Ambiente: “Dispõe sobre condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA (BRASIL, 2005).

Resolução CONAMA nº 357/2005: Essa resolução estabelece a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como os padrões de qualidade da água. A vinhaça é considerada um efluente líquido e, portanto, deve atender aos padrões padrão para a sua descarga em corpos d'água.

- Art. 2º: A disposição de efluentes no solo, mesmo tratados, não está sujeita aos parâmetros e padrões de lançamento dispostos nesta Resolução, não podendo, todavia, causar poluição ou contaminação das águas superficiais e subterrâneas.

- Art. 3º: Os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados diretamente nos corpos receptores após o devido tratamento e desde que obedeçam às condições, padrões e exigências dispostos nesta Resolução e em outras normas aplicáveis.

- Art. 4º: Para efeito desta Resolução adotam-se as seguintes definições, em complementação àquelas contidas no art. 2º da Resolução CONAMA no 357, de 2005:

V - Efluente: é o termo usado para caracterizar os despejos líquidos provenientes de diversas atividades ou processos;

- Art. 5º: Os efluentes não poderão conferir ao corpo receptor características de qualidade em desacordo com as metas obrigatórias progressivas, intermediárias e final, do seu enquadramento”.

A Resolução ANA nº 91/2008 estabelece os critérios e diretrizes gerais para o uso da água na irrigação agrícola. No caso da vinhaça, a resolução estabelece que a sua aplicação no solo deve ser feita de forma controlada, levando em consideração as características do solo e a capacidade de absorção dos nutrientes pela cultura, a fim de evitar a contaminação do solo e das águas subterrâneas.

O Código Florestal (Lei nº 12.651/2012) estabelece normas gerais sobre a proteção da vegetação nativa, incluindo as áreas de preservação permanente (APPs)

e as reservas legais. No caso da vinhaça, a lei determina que o lançamento, a disposição ou o descarte desse resíduo em corpos d'água, solo, ou em qualquer forma que cause danos ao meio ambiente, é proibido.

É importante ressaltar que as leis e regulamentações podem variar de acordo com o estado brasileiro, sendo necessário consultar a legislação específica da região onde a atividade de produção de álcool e açúcar é realizada. Além disso, é fundamental que as empresas e produtores sigam as melhores práticas de gerenciamento da vinhaça, visando a sustentabilidade ambiental e o cumprimento das normas vigentes.

3.3.3 Relação do descarte da vinhaça com os ODS

O gerenciamento adequado da vinhaça, um subproduto da produção de álcool a partir da cana-de-açúcar, está diretamente relacionado aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU). Neste estudo, exploramos as conexões entre o gerenciamento da vinhaça e os ODS, destacando sua importância para uma agricultura sustentável, uma gestão eficiente dos recursos hídricos, a preservação da biodiversidade e a mitigação das mudanças climáticas. Por meio de uma revisão sistemática da literatura científica, identificamos as principais contribuições da vinhaça para a promoção dos ODS e as diretrizes para um gerenciamento sustentável desse resíduo.

A produção de álcool a partir da cana-de-açúcar tem se mostrado uma alternativa promissora para a redução da dependência de combustíveis fósseis e para a mitigação das mudanças climáticas. No entanto, esse processo gera a vinhaça, um subproduto rico em nutrientes e matéria orgânica, mas que pode representar um desafio para o meio ambiente se não for gerenciado por transmissão. Neste contexto, é fundamental explorar as conexões entre o gerenciamento da vinhaça e os ODS, a fim de promover práticas práticas e maximizar os benefícios desse subproduto.

Os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU), têm como objetivo principal promover a sustentabilidade global até 2030. Dentre os 17 ODS, o gerenciamento sustentável

da vinhaça, um subproduto da indústria sucroalcooleira, está diretamente relacionado a vários objetivos, incluindo o ODS 2 - Fome Zero e Agricultura Sustentável, o ODS 6 - Água Potável e Saneamento, o ODS 9 - Indústria, Inovação e Infraestrutura e o ODS 15 - Vida Terrestre.

Um exemplo de ODS é o ODS 2 - Fome Zero e Agricultura Sustentável: A utilização da vinhaça como adubo orgânico na agricultura pode contribuir para aumentar a produtividade agrícola e garantir a segurança alimentar, dependência de fertilizantes químicos. Estudos têm demonstrado que a aplicação adequada da vinhaça no solo pode melhorar a qualidade do solo, aumentar a disponibilidade de nutrientes e promover o crescimento das culturas.

O ODS 13 - Ação contra a mudança global do clima também enquadra-se na gestão da vinhaça. Esse objetivo reconhece a importância de reduzir as emissões de gases de efeito estufa e fortalecer a resiliência dos países às mudanças climáticas. Como afirmado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), "a mudança climática representa uma ameaça sem precedentes ao desenvolvimento sustentável e tem o potencial de reverter os avanços alcançados nas últimas décadas" (IPCC, 2018). A utilização da vinhaça como adubo orgânico pode contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa, uma vez que diminui a necessidade de fertilizantes químicos, que são intensivos em energia na sua produção. Além disso, a incorporação da vinhaça no solo pode promover o sequestro de carbono, certamente para a mitigação das mudanças climáticas.

A vinhaça é um resíduo líquido altamente poluente resultante do processo de produção de etanol a partir da cana-de-açúcar. Devido à sua alta carga de matéria orgânica e nutrientes, a descarga inadequada da vinhaça pode causar eutrofização de corpos d'água, afetando negativamente a qualidade da água e a biodiversidade aquática. Portanto, a gestão adequada da vinhaça é fundamental para o alcance do ODS 6, que visa garantir o acesso universal à água potável e ao saneamento básico. Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), "aproximadamente 2,2 bilhões de pessoas em todo o mundo não têm acesso a serviços de água potável gerenciados com segurança" (OMS, 2019). A falta de acesso à água potável e ao saneamento básico tem impactos significativos na saúde, na educação e no desenvolvimento socioeconômico das comunidades. A vinhaça pode ser utilizada como fonte de água para a irrigação, atendendo a demanda por água potável e confiante para a gestão

eficiente dos recursos hídricos. No entanto, é importante ressaltar a necessidade de monitoramento e controle da quantidade e qualidade da vinhaça aplicada, a fim de evitar a contaminação dos corpos d'água.

Além disso, a aplicação inadequada da vinhaça no solo pode levar à contaminação do lençol freático e à degradação de ecossistemas terrestres. Nesse contexto, o ODS 15, que busca proteger, restaurar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres, também é afetado pela gestão inadequada da vinhaça. Portanto, a adoção de práticas agrícolas sustentáveis e o desenvolvimento de tecnologias de tratamento e uso adequado da vinhaça são essenciais para minimizar os impactos negativos no solo e na biodiversidade terrestre. A aplicação da vinhaça no solo pode promover a melhoria da qualidade do solo, aumentar a biodiversidade e favorecer a recuperação de áreas degradadas. No entanto, é importante ressaltar a necessidade de estudos para avaliar os efeitos da aplicação da vinhaça em diferentes ecossistemas e garantir a preservação da vida terrestre.

O manejo adequado da vinhaça está diretamente relacionado aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), sendo fundamental para a promoção da agricultura sustentável, a gestão eficiente dos recursos hídricos, a preservação da biodiversidade e a mitigação das mudanças climáticas. Neste contexto, é essencial promover pesquisas científicas e ações práticas que visem maximizar os benefícios da vinhaça, garantindo a sustentabilidade econômica, social e ambiental da produção de álcool a partir da cana-de-açúcar.

3.4 CONCLUSÃO

A vinhaça possui um potencial significativo como fonte de nutrientes para a agricultura, quando adequadamente tratada e aplicada. A sua utilização como fertilizante pode contribuir para a redução do uso de fertilizantes químicos, promovendo a conservação do solo e a saúde dos ecossistemas terrestres.

A implementação de práticas como a fertirrigação controlada, que consiste na aplicação da vinhaça de forma controlada e em doses adequadas, pode minimizar os riscos de contaminação do solo e dos recursos hídricos, contribuindo para a gestão sustentável desses recursos.

É importante ressaltar que o gerenciamento sustentável da vinhaça não deve

ser visto apenas como uma obrigação regulatória, mas sim como uma oportunidade para a indústria sucroalcooleira contribuir de forma positiva para o alcance dos ODS. Ao adotar práticas sustentáveis e inovadoras, as empresas podem fortalecer sua posição no mercado, promover a responsabilidade socioambiental e contribuir para um futuro mais sustentável.

O gerenciamento sustentável da vinhaça está intrinsecamente ligado aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente os relacionados à água, indústria, inovação, infraestrutura e vida terrestre. A implementação de práticas e tecnologias sustentáveis para o tratamento e aproveitamento desse subproduto é fundamental para minimizar os impactos ambientais, promover a eficiência dos processos produtivos e contribuir para a conservação dos recursos naturais.

A integração dos ODS nas estratégias de gerenciamento da vinhaça é essencial para garantir uma abordagem abrangente e alinhada com os princípios da sustentabilidade. A promoção de parcerias entre os setores público e privado é fundamental para impulsionar a adoção de práticas sustentáveis e incentivar a inovação na gestão da vinhaça.

Além disso, a conscientização e a educação são importantes para engajar os diversos atores envolvidos, desde produtores de cana-de-açúcar até governos e consumidores.

Ao adotar uma abordagem integrada e considerar os ODS em todas as etapas do gerenciamento da vinhaça, é possível obter benefícios significativos para o meio ambiente, a sociedade e a economia. A redução dos impactos ambientais, a conservação dos recursos naturais e a promoção da sustentabilidade das cadeias produtivas são metas alcançáveis por meio de práticas e políticas adequadas.

No entanto, é importante ressaltar que o gerenciamento sustentável da vinhaça não é uma solução isolada, mas sim parte de um esforço coletivo para alcançar os ODS e promover um desenvolvimento sustentável. Ações coordenadas e colaborativas são necessárias para enfrentar os desafios ambientais, sociais e econômicos relacionados à produção de cana-de-açúcar e ao gerenciamento da vinhaça.

Em conclusão, a relação entre os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável e o gerenciamento sustentável da vinhaça é clara e demonstra a importância de adotar práticas e tecnologias que minimizem os impactos ambientais e promovam a

sustentabilidade da indústria sucroalcooleira. Ao integrar os ODS no gerenciamento da vinhaça, podemos avançar em direção a um futuro mais sustentável, equilibrando as necessidades econômicas, sociais e ambientais.

3.5 REFERÊNCIAS

COELHO, A. P.; SILVA, M. F. Da; FARIA, R. T. De; FERNANDES, C.; FIGUEIREDO, D. G. De; SANTOS, G. O. (2020) Long-term impact of fertigation with treated sewage effluent on the physical soil quality. *Environmental Pollution* 266:115007. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115007>

ENG SÁNCHEZ, F. et al. Value-added soluble metabolite production from sugarcane vinasse within the carboxylate platform: An application of the anaerobic biorefinery beyond biogas production. *Fuel*, v. 286, n. September 2020, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119378>

FARIAS, F. J. Atributos físicos, químicos e microbiológicos do solo em sistema agroecológico de produção. São Cristóvão, Sergipe. 2018. 41 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Tecnologia em Agroecologia): Instituto Federal de Sergipe, Sergipe. 2018.

JORGE, M. F.; PINHO, C. F.; NASCENTES, A. L.; ALVES, D. G.; ALMEIDA, G. V.; SILVA, J. B.; SILVA, L. D. (2017) Tomato fertigation with dairy cattle wastewater. *Horticultura Brasileira*, 35(2), 230-234. <https://doi.org/10.1590/s0102-053620170212>

LAIME, E. M. O.; FERNANDES, D. C. S.; FREIR, E. A. (2011) Possibilidades tecnológicas para a 508 destinação da vinhaça: uma revisão. *Revista Trópica: Ciências Agrárias e Biológicas*, 5, 86-90.

MATHEW, A. K.; ABRAHAM, A.; MALLAPUREDDY, K. K.; SUKUMARAN, R. K. (2018) Lignocellulosic Biorefinery Wastes, or Resources? In Lee, D., Bhaskar, T., Pandey, A., Khanal, S. K., Mohan, S. V. (Eds.), *Waste Biorefinery: potential and perspectives*, Elsevier B.V, 267-297. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63992-9.00009-4>

NETO, C. J. D.; LETTI, L. A. J.; KARP, S. G.; VÍTOLA, F. M. D.; SOCCOL, C. R. (2019) Production of biofuels from algae biomass by fast pyrolysis. In Pandey, A., Mohan, S.V., Chang, J., Hallenbeck, P., Larroche, C. (Eds.), *Biomass, Biofuels, Biochemicals*, Elsevier, 461-473. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64192-2.00018-4>

PELUCO, R. G. Suscetibilidade magnética do solo e estimação da capacidade de suporte à aplicação de vinhaça. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.48, n.6, p.661-672, jun. 2013. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2013000600012>

ROBLES-GONZÁLES, V. R.; GALÍNDEZ-MAYER, J.; RINDERKNECHT-SEIJAS, N.; POGGI-VARALDO, M. (2012) Treatment of mezcal vinasses: A review. *Journal of Biotechnology*, 157(4), 524-546. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2011.09.006>

ROSA, L. O.; SOUZA, T. P.; OLIVEIRA, V. F.; CORRÊA, L. B.; CORRÊA, É. K. (2019) Valorização dos resíduos orgânicos do setor de hortifrutigranjeiro pelo processo de compostagem doméstica. *Semioses*, 13(2), 1-12. <https://doi.org/10.15202/1981996x.2019v13n2p1>

SANTOS, A. B.; FAGERIA, N. K.; ZIMMERMANN, F. J. P. Atributos químicos do solo afetado pelo manejo da água e do fertilizante potássico na cultura de arroz irrigado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.6, n.1, p.12-16, 2002. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662002000100003>

SILVA, C. T. C. B. Efeito da cobertura do solo sobre atributos físicos e microbiológicos. São Cristóvão, Sergipe. 2019. 19 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Tecnologia em Agroecologia): Instituto Federal de Sergipe, Sergipe. 2019.

SILVA, G. S. P. L.; SILVA, F. C.; ALVES, B. J. R.; TOMAZ, E.; BERTON, R. S.; MARCHIORI, L. F. S.; SILVEIRA, F. G. (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). <https://doi.org/10.14295/holos.v19i1.12212>

SOLTANGHEISI, A.; SANTOS, V. R. D.; FRANCO, H. C. J.; KOLLN, O.; VITTI, A. C.; DIAS, C. T. D. S.; HERRERA, W. F. B.; RODRIGUES, M.; SOARES, T. M.; WITHERS, P. J. A.; PAVINATO, P. S. (2019) Phosphate sources and filter cake amendment affecting sugarcane yield and soil phosphorus fractions. *Revista Brasileira De Ciência do Solo*, 43, e0180227. <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20180227>

VENDRUSCOLO, P. E.; ALVES, M. C.; FREITAS, L. A. J.; SOUZA, E. J.; SOUTO FILHO, S. N. (2018) Efeitos do biochar, culturas de cobertura e lodo de esgoto nos atributos físicos do solo. *Ciencia del suelo*, 36(1), 01-10.

VERGARA, S. C. *Projetos e Relatórios de pesquisa em administração*. São Paulo: Atlas, 2006.

VIDAL, J. W. B. A posição do Brasil frente ao novo ambiente mundial. *Revista Eco* 21, ano XIII, n. 75, fev. 2003. Disponível em: <<http://www.ambientebrasil.com.br>>. Acesso em: 27 abr. 2023.

WEHRMANN, M.E.S de F e DUARTE, L.M.G. O que há em comum entre a região das Missões e os Lavrados de Roraima? Os percursos da soja até a Amazônia Legal. In: *Amazônia Cenas e Cenários* - Editora da Universidade de Brasília - 2004.

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. <https://doi.org/10.1007/s12355-018-0630-2>

4. CAPÍTULO 3 – Procedimento metodológico para o processo de obtenção e reconstrução de imagens e os resultados do processamento no software ImageJ

Resumo: A tomografia computadorizada de raio-X é uma técnica amplamente utilizada em estudos geotécnicos para analisar diversas características físicas do solo, como macroporosidade e radiodensidade. Ela se mostra como uma ferramenta eficaz na obtenção de informações detalhadas sobre a estrutura interna do solo, permitindo uma avaliação mais precisa de sua composição e propriedades. O objetivo desse artigo é descrever o procedimento para reconstrução e processamento de imagens utilizando tomografia computadorizada de raio-X. Para a coleta dos solos indeformados, foram utilizados tubos de PVC de 50 mm de diâmetro e 10 cm de altura. Após a coleta, as amostras foram identificadas, postas numa estufa a 40°C até atingirem peso constante. As amostras indeformadas foram levadas até o tomógrafo onde as imagens foram escaneadas e processadas através do software Inspect-X. Com o software CT PRO 3D foram escolhidos os arquivos com extensão xtekct, para se ter acesso a todas as imagens que foram escaneadas. Verificou-se se havia sobreposição de imagens e ajustou-se o centro de rotação da imagem, definindo um subvolume de interesse. No software VGStudio MAX 2.2 as imagens foram reconstruídas em 3D e convertidas na escala Hounsfield, a qual corresponde ao coeficiente de atenuação de raios X em diversos materiais com relação a água. No software Image J Após ajuste de brilho e contraste, foram determinadas as escalas correspondente a cada pixel. As imagens foram normalizadas, processada com o filtro de Gauss e filtro de Unsharp Mask e padronizadas em relação a luz. Esse processo serviu para eliminar artefatos produzidos pelo tomógrafo. Para obter-se o resultado foi usado o plugin *threshold* e escolhido o método de OTSU para estabelecer os limites entre o espaço poroso e o solo.

Palavras-Chave: coeficiente de atenuação de raio-X, Image J, método de OTSU.

Methodological procedure for the process of obtaining, reconstructing and processing soil images using computerized x-ray tomography

Abstract: X-ray computed tomography is a widely used technique in geotechnical studies to analyze various physical characteristics of soil, such as macroporosity and radiodensity. It proves to be an effective tool for obtaining detailed information about the internal structure of the soil, allowing for a more precise evaluation of its

composition and properties. The objective of this article is to describe the procedure for image reconstruction and processing using X-ray computed tomography.

For the collection of undisturbed soil samples, PVC tubes with a diameter of 50 mm and a height of 10 cm were used. After collection, the samples were identified and placed in an oven at 40°C until reaching constant weight. The undisturbed samples were then taken to the tomograph, where the images were scanned and processed using Inspect-X software. The CT PRO 3D software was used to access all the scanned images, which were checked for overlap and the rotation center of the image was adjusted, defining a region of interest.

In VGStudio MAX 2.2 software, the images were reconstructed in 3D and converted to the Hounsfield scale, which corresponds to the X-ray attenuation coefficient in various materials relative to water. In Image J software, after adjusting the brightness and contrast, the corresponding scales for each pixel were determined. The images were normalized, processed with a Gaussian filter and an Unsharp Mask filter, and standardized in terms of lighting. This process aimed to eliminate artifacts produced by the tomograph. To obtain the result, the threshold plugin was used, and the OTSU method was chosen to establish the boundaries between the porous space and the soil.

Keywords: X-ray attenuation coefficient, Image J, OTSU method.

4.1 INTRODUÇÃO

A tomografia computadorizada de raio-X em solos é uma técnica avançada que permite a obtenção de imagens tridimensionais discriminadas do subsolo (TAINÁ; HECK; ELIIOT, 2008). Essa tecnologia tem sido amplamente utilizada em estudos geotécnicos, proporcionando uma visão mais precisa e abrangente das características do solo (PIRES et al., 2010). A técnica é baseada na emissão de feixes de raios X através da amostra de solo e na detecção e registro da atenuação desses feixes (OLIVEIRA 2007).

Durante o processo de tomografia, múltiplas projeções são transmitidas em diferentes ângulos ao redor da amostra, e essas projeções são processadas por um software especializado que reconstrói uma imagem tridimensional da amostra com base nas informações de atenuação dos feixes de raios X (SCARFE et al., 2006).

Essa imagem 3D permite visualizar a estrutura interna do solo de forma não destrutiva e quantitativa (PIRES et al., 2019; HU et al., 2020). Além disso, a tomografia computadorizada de raios X em solos tem evoluído ao longo dos anos,

tanto em termos de resolução espacial quanto em termos de capacidade de análise quantitativa.

No Brasil, a técnica de tomografia computadorizada de raios X em solos foi utilizada em estudos como o de Petrovic, Siebert e Rieke (1982) e Hainsworth e Aylmore (1983), e também por Crestana, Mascarenhas e Pozzi-Mucelli (1985), que utilizaram essa tecnologia na determinação da densidade do solo, distribuição espacial do conteúdo de água, retenção e movimento da água no solo.

No entanto, devido aos altos custos dos tomógrafos comerciais, pesquisadores brasileiros desenvolveram tomógrafos de primeira geração com fontes de raios gama (PIRES et al., 2010). Esses tomógrafos apresentaram limitações em relação aos equipamentos comerciais, como a necessidade de blindagem pesada para o operador e baixa resolução espacial (PIRES et al., 2010).

A tomografia computadorizada de raio-X em solos possui diversas aplicações na área de estudos geotécnicos. Uma das principais é a caracterização de solos, onde essa técnica permite determinar a distribuição de porosidade, permeabilidade e densidade do solo, sendo essenciais para o dimensionamento de fundamentos e estruturas de contenção (PIRES 2019; HU 2020). A tomografia computadorizada de raios X em solos também é empregada na investigação de processos de rastreamento e transporte de solos, permitindo a análise de compactação e proteção do solo (TAINÁ et al., 2013).

Além disso, a técnica de tomografia computadorizada de raios X em solos é utilizada na análise da porosidade, estrutura dos agregados e distribuição de minerais presentes no solo (MACEDO; CRESTANA 2019).

O objetivo deste trabalho é demonstrar uma metodologia para obtenção, reconstrução e processamento de imagens de solos utilizando a técnica de tomografia computadorizada de raio-X.

4.2 METODOLOGIA

4.2.1 Coleta das amostras de solo

Para a realização da coleta dos solos, inicialmente foi realizada a preparação dos materiais. Como forma de padronizar a coleta, foram utilizados tubos de PVC de

50 mm de diâmetro e 10 cm de altura. A figura 1 mostra os passos para a realização de coleta de solo de forma indeformada.

Figura 1: Procedimento de coleta das amostras indeformadas



Fonte: autora

O objetivo da coleta de solos indeformados é para que se mantenha as características do solo em laboratório como é no campo. Assim as imagens mantêm as dimensões de falhas, fraturas e poros.

O tubo foi inserido manualmente no solo com muito cuidado para não o desestruturar. Após a penetração do tubo no solo, colocou-se algodão e fita crepe na borda superior do tubo, em seguida com o auxílio de uma faca, foi feito um toaleta na parte inferior do tubo, deixando apenas o solo que o preenchia.

Para garantir a estabilidade da amostra, também se colocou algodão e fita crepe na parte inferior da amostra. Em seguida as amostras foram identificadas e levadas para o laboratório onde realizaram-se as análises.

A quantidade de amostras, a códição de cada uma e os tipo de tratamentos onde foram realizados as coletas foram colocadas nas amostras.

4.2.2 Preparo das amostras de solo

Após a coleta em campo, as amostras foram colocadas em uma estufa a 40°C até atingirem peso constante, conforme a figura 2.

Figura 2: Estufa a 40°C



Fonte: autora

As amostras foram pesadas diariamente em uma balança analítica de precisão até atingirem um peso constante. Esse processo minimiza a interferência da água na atenuação dos Raios X (CARDUCCI et al., 2014).

4.2.3 Utilização da microtomografia de RAIO X

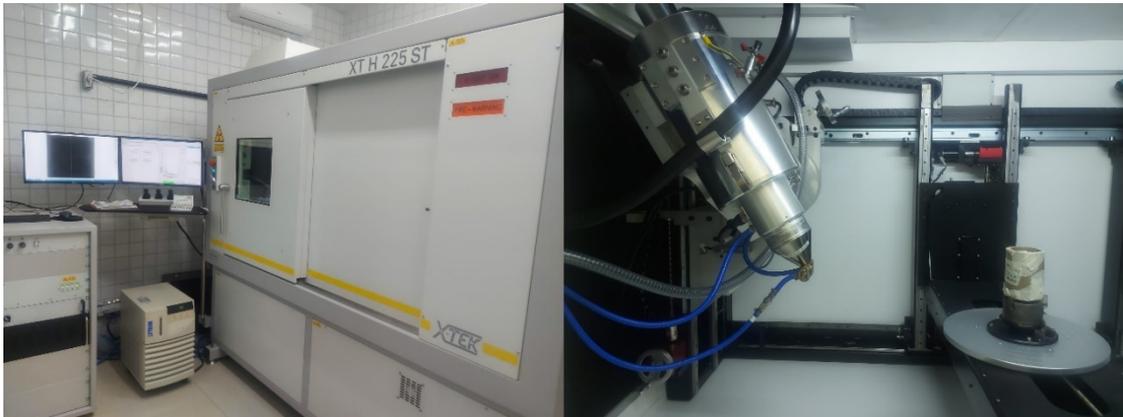
Para a realização das análises, utilizou-se o tomógrafo de raios-X de terceira geração modelo NIKON XT H 225 ST. Esse tomógrafo possui uma geração de raios-X entre um filamento de tungstênio (cátodo) e um alvo de tungstênio (ânodo), operando em tensões de até 225kV e correntes de até 2 mA. O detector do aparelho é composto por sensores 1918 x 1534.

O tomógrafo NIKON XT H 225 ST se destaca por sua alta resolução espacial e capacidade de realizar análises não destrutivas em uma ampla variedade de materiais. Durante o seu funcionamento, utiliza um feixe de raios-X altamente focalizado que atravessa o objeto a ser analisado. Esse feixe é detectado por um conjunto de detectores posicionados em diferentes ângulos ao redor do objeto.

A partir dos dados coletados, é possível reconstruir uma imagem tridimensional da estrutura interna do objeto, revelando detalhes que não seriam visíveis sem o uso desse aparelho.

A figura 3 apresenta as imagens interna e externa do tomógrafo localizado no Departamento de energia nuclear da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE.

Figura 3: Visão interna e externa do tomógrafo



Fonte: autora

A microtomografia de raios X é uma técnica amplamente utilizada na pesquisa de materiais para a obtenção de imagens não destrutivas. Essa técnica envolve a realização de múltiplas varreduras axiais para obter informações de seções transversais 2D ou reconstruções tridimensionais. Por outro lado, a tomografia computadorizada de raios X emprega um mecanismo para obter "fatias" que são posteriormente reconstruídas digitalmente em volumes 3D, com ferramentas avançadas para visualização e quantificação 3D disponíveis.

O sistema XT H 225 é um sistema versátil de nível básico que incorpora uma fonte de raios X de microfoco e possui um volume de inspeção adequado para peças de tamanho pequeno a médio, proporcionando alta resolução de imagem. Esse sistema é especialmente projetado para permitir uma reconstrução ultrarrápida de tomografia computadorizada, sendo aplicável em uma ampla gama de aplicações, como a inspeção de peças plásticas, pequenas peças fundidas, mecanismos complexos, bem como pesquisa de materiais e espécimes naturais.

As especificações técnicas utilizadas nas amostras estão descritas no quadro 1:

Quadro 1: Especificações técnicas do tomógrafo

Especificações	Valores	Unidades
Voltagem da fonte de raio x	150	kV

Corrente da fonte de raio x	180	μA
Espessura do filtro de cobre	0,5	Mm
Largura do detector	1905	Pixel
Altura do detector	1521	Pixel
Tamanho dos pixels	0,127	Mm
Distância da fonte ao detector	1176	Mm

O modelo XT H 225 da Empresa Nikon Metrology é um tomógrafo computadorizado composto por quatro elementos principais. O primeiro elemento é a fonte de Raios-X, responsável por emitir os raios-X utilizados na tomografia. O segundo elemento é o detector de Raios-X, que captura os raios-X após eles atravessarem o objeto em análise.

O terceiro elemento é o sistema de movimentação do tomógrafo de Raios-X, que permite o posicionamento do objeto entre a fonte e o detector, além de proporcionar a rotação necessária para a realização da tomografia computadorizada de terceira geração (TCi - 3ªG).

Por fim, o quarto elemento é um computador que realiza a aquisição dos dados provenientes do detector, reconstrói esses dados digitalmente e permite a análise subsequente desses dados. Esse computador é responsável por processar as informações obtidas durante o processo de tomografia e disponibilizá-las para análise e interpretação.

4.2.4 Análise de imagens - INSPECT-X - obtenção

O software Inspect-X foi desenvolvido para auxiliar na análise e interpretação

de imagens adquiridas por meio da tomografia de raios-X. Por meio do uso de algoritmos avançados de processamento de imagens, o software aprimora a qualidade das radiografias e fornece informações precisas para análise.

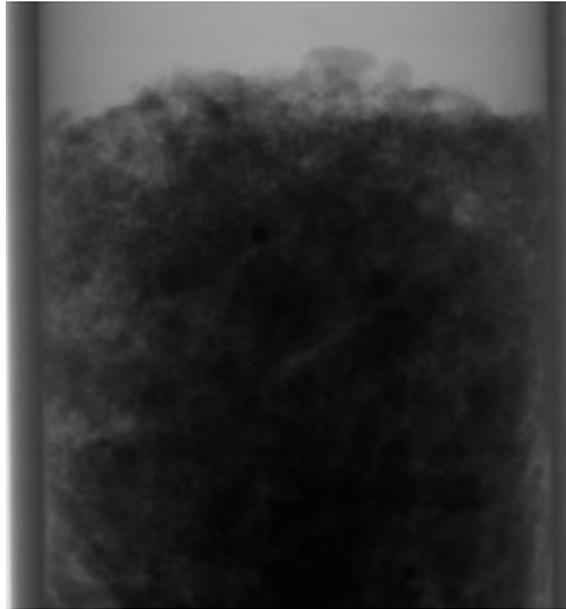
O Inspect-X possui várias técnicas de escaneamento para atender às aplicações mais exigentes. Isso inclui desde o escaneamento convencional de tomografia computadorizada circular até o X.Tend, que estende a altura vertical do escaneamento do sistema de raios-X, e o Limited Angle, um método para melhorar a resolução de regiões menores de interesse em uma amostra.

Para adquirir os dados, o software Inspect-X permite o ajuste dos parâmetros de entrada, como posição, filtração, energia, correntes selecionáveis e tempo de exposição. Antes do escaneamento, é realizada a calibração do equipamento para cada condição de entrada, onde a tensão, filtração e corrente elétrica são ajustadas. Esse processo de escaneamento e calibração é executado no software Inspect-X da Nikon-Metrology, representando a primeira etapa do processamento dos dados. Após a amostra sensibilizar o detector, os sinais são convertidos em dados digitais pelo sistema eletrônico.

4.2.5 Processo de reconstrução das imagens e uso do software CT PRO 3D e VGSTUDIO MAX 2.2

Após o escaneamento foram adquiridas um total de 48272 imagens do tipo TIF com resolução de 1905x1521 pixels e intensidade de 16 bits, o que equivale a 3017 imagens por amostra. A figura 4 apresenta uma das imagens após escaneamento.

Figura 4: Imagem após escaneamento



Fonte: autora

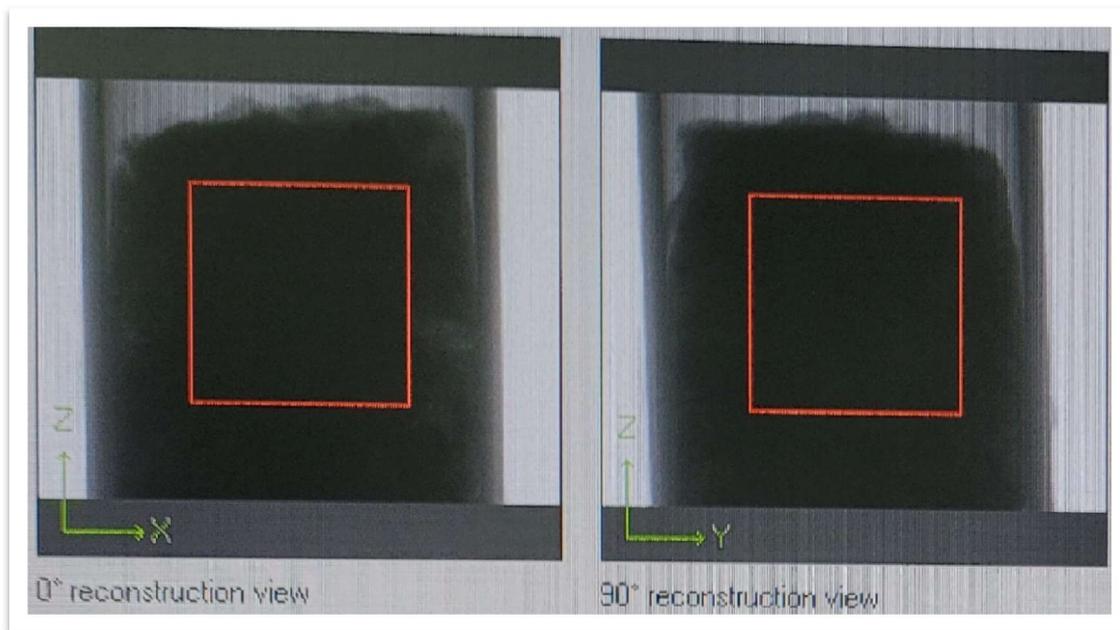
O software CT PRO 3D é uma ferramenta que oferece uma ampla gama de recursos e funcionalidades. É um software avançado de visualização e análise de dados em 3D. Possui a capacidade de importar e processar dados de várias fontes, como imagens tridimensionais do solo.

Com o software CT PRO 3D, segue-se a sequência file> open> e escolhem-se os arquivos com extensão xtekct, tendo dessa forma, acesso a todas as imagens que foram escaneadas. Após esse procedimento, verifica-se se houve alguma alteração na imagem devido a algum movimento indevido durante o escaneamento. Para tanto, compara-se a primeira e última imagem clicando em +/- 1 e inicia-se o procedimento.

Em seguida, verifica-se se as imagens estão se sobrepondo através do objeto escaneado. Finalizado o processo, ajusta-se o centro de rotação. Foi definido um subvolume de interesse de 800 x 800 x 800 voxels.

A figura 5 apresenta uma das etapas do processo de reconstrução das imagens, com área escolhida longe das bordas para evitar o efeito de artefatos.

Figura 5: reconstrução do volume de interesse

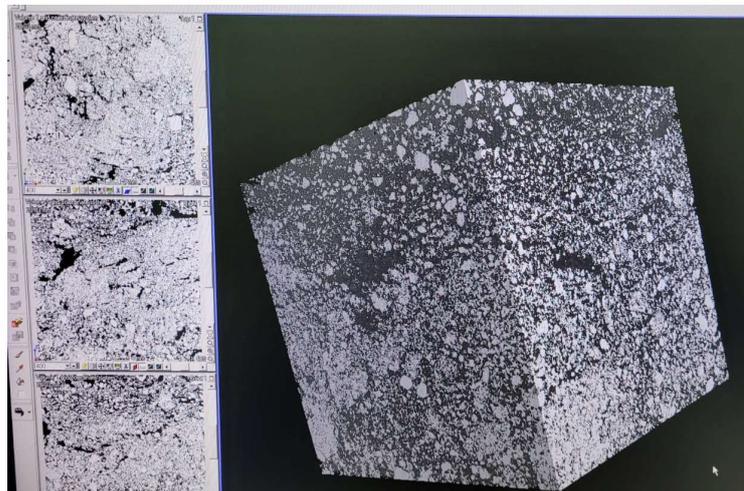


Fon

te: autora

No software VGStudio MAX 2.2 (Volumegraphics, Heidelberg, Alemanha), as imagens foram reconstruídas em 3D conforme figura 6:

Figura 6: Imagem do solo reconstruída em 3D



Fonte: autora

No software VGStudio MAX 2.2, as imagens foram convertidas em uma escala denominada escala Hounsfield, que facilita a leitura dos dados do tomógrafo. Essa escala corresponde ao coeficiente de atenuação dos raios-X em vários materiais em relação à água. Desenvolvida pelo físico inglês Godfrey Hounsfield, a escala Hounsfield desempenha um papel crucial na interpretação dos resultados da

TC.

Através dessa conversão, os valores das intensidades de absorção do ar são definidos como 0 e os da água como 1000. Portanto, materiais com densidade superior à da água, como as rochas analisadas, apresentarão intensidades em tons de cinza acima de 1000.

O VGStudio MAX 2.2 é um software de visualização e análise em 3D que oferece recursos avançados para processamento e interpretação de dados. Ele permite a análise quantitativa de dados, como medições de volumes e densidades.

A visualização e análise de dados em três dimensões (3D) têm se tornado cada vez mais importantes para a realização de pesquisas.

4.2.6 Análise de imagens - IMAGE J - Processamento

O Image J é um software aberto desenvolvido na plataforma Java pelo National Institutes of Health por Wayne Rasband do Instituto Nacional de Saúde (National Institutes of Health (NIH)) em 1997, para análise e processamento de imagens científicas. Pode ser baixado diretamente no site <https://imagej.nih.gov/ij/download.html> nos sistemas operacionais Mac OS X, Linux ou Windows. Esse software é utilizado para o processamento digital de imagens, oferecendo diversas funcionalidades como edição, correção, quantificação e processamento de imagens, correção de brilho e contraste, inserção de escala, obtenção de histogramas, manipulação de arquivos e extração de parâmetros das imagens. O Image J suporta imagens de 8 bits, 16 bits e 32 bits e é compatível com diversos formatos, incluindo TIFF, GIF, JPEG, BMP, DICOM, FITS e "raw". Sua interface intuitiva e fácil de usar permite aos usuários realizar uma variedade de tarefas, desde operações básicas de processamento de imagens até análises complexas de dados. O software também é extensível por meio de plugins, que adicionam funcionalidades extras e personalizadas ao programa. Além disso, o ImageJ possui uma comunidade ativa de usuários que contribuem para o desenvolvimento de novas ferramentas e recursos.

Para utilizar o ImageJ, é necessário importar as imagens para o programa. As etapas metodológicas para análise de uma sequência de imagens de tomografia de solos são as seguintes:

1. Abra as imagens em sequência: vá em "File" (Arquivo) e selecione "Import" (Importar), e depois "Image Sequence" (Sequência de Imagens).
2. Converta a imagem para 8 bits: clique em "Image" (Imagem) no menu superior, selecione "Type" (Tipo) e depois escolha "8-bit" (8 bits). A imagem será convertida para 8 bits, com a faixa de valores ajustada para 0-255.
3. Ajuste o intervalo de intensidade: vá em "Image" (Imagem) no menu superior, selecione "Adjust" (Ajustar) e depois escolha "Brightness/Contrast" (Brilho/Contraste).
4. Ajuste a escala: clique em "Analyze" (Analisar) no menu superior e selecione "Set Scale" (Definir Escala). Uma nova janela será aberta para configurar a escala.
5. Normalize a imagem: vá em "Process" (Processar) e selecione "Enhance Contrast" (Aprimorar Contraste). Uma nova janela será aberta, onde você pode clicar em "Normalize", "Process All Slices" e "Use Stack Histogram".
6. Aplique o filtro de Gauss: no menu "Process" (Processar), vá em "Filters" (Filtros) e selecione "Gaussian Blur" (Desfoque Gaussiano). Configure o filtro e clique em "OK" para aplicá-lo à imagem.
7. Aplique o filtro de Unsharp Mask: no menu "Process" (Processar), vá em "Filters" (Filtros) e selecione "Unsharp Mask" (Máscara de Nitidez). Configure o filtro e clique em "OK" para aplicá-lo à imagem.
8. Subtraia o fundo: acesse o menu "Process" (Processar), clique em "Subtract Background" (Subtrair Fundo). Configure as opções de subtração de fundo e clique em "OK" para aplicá-las à imagem.
9. Limiarize a imagem: vá em "Image" (Imagem) no menu superior, selecione "Adjust" (Ajustar) e depois escolha "Threshold" (Limiar). Configure as opções de limiarização e clique em "Apply" (Aplicar) ou "OK" para aplicar o limiar à imagem.
10. Inverta a imagem: clique na imagem e use o atalho (Ctrl + Shift + I) para inverter as cores (preto e branco).
11. Divida as regiões de acordo com as linhas de contorno: vá em "Process" (Processar), clique em "Binary" e selecione "Watershed".
12. Conte as partículas: clique em "Analyze" (Analisar) no menu superior e selecione "Analyze Particles". Uma nova janela será aberta, onde você pode escolher a opção "Outlines" e clicar em "OK". O ImageJ exibirá os resultados e a

imagem com a contagem de partículas.

O ImageJ é uma ferramenta importante para o tratamento e análise quantitativa de imagens, oferecendo recursos avançados e a possibilidade de personalização por meio de plugins. Sua documentação disponível no site do software é de grande ajuda para os usuários, fornecendo informações detalhadas sobre o seu uso.

4.2.7 Sequência metodológica do software IMAGEJ

Primeiramente, foi necessário ter uma sequência de imagens que representassem diferentes fatias ou planos da imagem em 3D. Essas imagens devem estar em formato de pilha, ou seja, uma série de imagens empilhadas verticalmente ou horizontalmente.

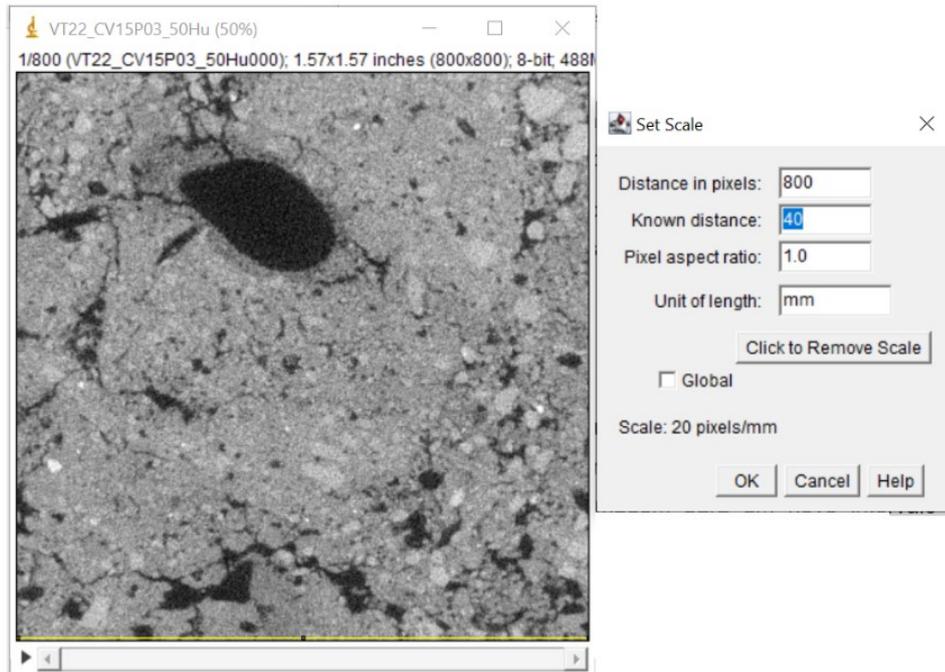
Após importar a sequência de imagens, foi verificado o número de bits da imagem. Caso necessário, a conversão para 8 bits foi realizada. Isso pode ser vantajoso em termos de armazenamento e compatibilidade com diferentes plataformas e aplicativos. No entanto, é importante ressaltar que a conversão de uma imagem de 16 bits para 8 bits resulta em perda de informações.

O ajuste de brilho/contraste foi feito de forma automática para preservar as informações iniciais da distribuição e quantidade de tons de cinza.

Para realizar o ajuste de escala, é feita uma medida conhecida em milímetros e calculado o valor correspondente do pixel dessa medida. Isso é feito utilizando a ferramenta de linha no programa ImageJ, onde é possível visualizar o valor do pixel correspondente a uma determinada distância.

A figura 7 mostra a ferramenta linha e o valor do pixel correspondente a uma distância de 40mm no programa do imageJ.

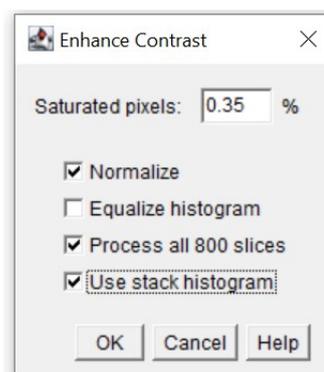
Figura 7: Ferramenta linha e o valor do pixel correspondente a uma distância de 40mm



Fonte: autora

O processo de normalização no ImageJ é feito para ajustar o intervalo de valores de intensidade de uma imagem. Isso é útil para melhorar a visualização, comparar imagens ou facilitar a análise de dados. A normalização é usada para ajustar o intervalo de valores de intensidade de uma imagem para um novo intervalo específico, geralmente de 0 a 255. Esse método é útil quando se deseja melhorar o contraste da imagem ou ajustar os valores de intensidade para um intervalo específico. Para esse trabalho utilizou-se os valores apresentado de acordo com a figura 8.

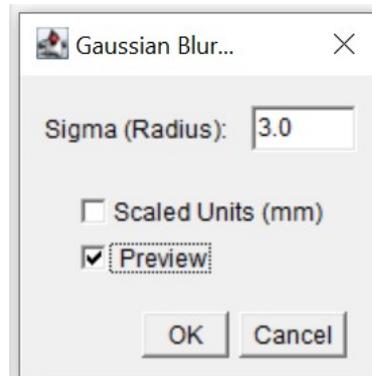
Figura 8: Valores da normalização



Fonte: autora

O filtro de Gauss no ImageJ é uma técnica utilizada no processamento de imagens para realizar a suavização ou desfoque da imagem, com o intuito de remover detalhes finos e reduzir o ruído presente nela. Esse filtro é baseado no conceito matemático da função de distribuição Gaussiana, que é uma função de probabilidade que descreve uma curva simétrica em forma de sino. Nesse trabalho para o filtro de Gauss, utilizou-se um raio de 3, conforme apresentado na figura 9.

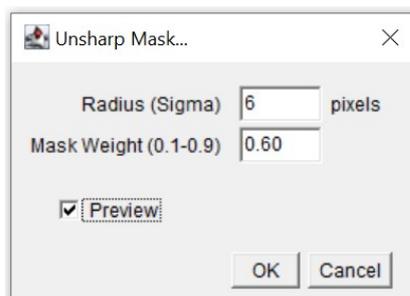
Figura 9: Valor para o filtro de Gauss



Fonte: autora

O filtro "Unsharp Mask" é comumente usado para aumentar a nitidez e o contraste nas bordas da imagem, realçando os detalhes. É importante ajustar os parâmetros do filtro de acordo com a imagem e o resultado desejado, para evitar efeitos indesejados, como halos ou ruídos. Recomenda-se experimentar diferentes configurações e visualizar o resultado em tempo real para obter o melhor resultado. Nesse trabalho utilizou-se o raio de 6 – figura 10.

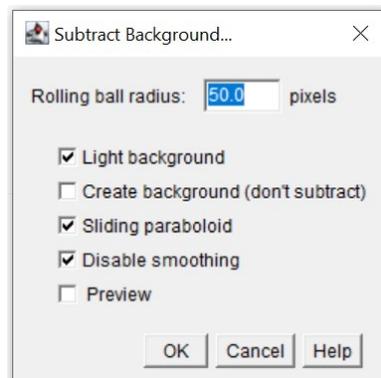
Figura 10: Valor filtro de Unsharp Mask



Fonte: autora

A função "Subtract Background" é usada para remover o fundo da imagem, geralmente um fundo não uniforme ou um ruído de fundo indesejado. Essa função pode ajudar a realçar os objetos de interesse na imagem. É importante ajustar as opções de subtração de fundo de acordo com a imagem e o resultado desejado, para evitar a perda de informações importantes ou a remoção excessiva do fundo. Recomenda-se experimentar diferentes configurações e visualizar o resultado em tempo real para obter o melhor resultado. Utilizou-se as seguintes configurações apresentadas na figura 11.

Figura 11: Configurações para remoção do fundo da imagem



Fonte: autora

Na janela "Threshold", você encontrará várias opções para configurar o limiar. Essas opções podem incluir o método de limiarização (como "Default", "Huang", "Otsu", entre outros), o valor do limiar e outras opções relacionadas ao ajuste do limiar. Aplicar o limiar: Após configurar as opções, clique em "Apply" (Aplicar) ou "OK" para aplicar o limiar à imagem. O ImageJ processará a imagem e exibirá o resultado na janela principal. A função "Threshold" é usada para converter uma imagem em uma imagem binária, onde os pixels são classificados como pertencentes a uma das duas classes (geralmente preto e branco), com base em um valor de limiar. Essa função é útil para segmentar objetos de interesse em uma imagem. É importante ajustar as opções de limiar de acordo com a imagem e o resultado desejado, para obter uma segmentação precisa e adequada. Recomenda-se experimentar diferentes configurações e visualizar o resultado em tempo real para obter o melhor resultado. Para esse trabalho foi aplicado o método de OTSU para todos os slices.

4.2.8 Método de OTSU

O método de Otsu é um algoritmo amplamente utilizado em segmentação de imagem, com o propósito de determinar de forma automática um limiar de intensidade ideal para separar uma imagem em duas classes distintas. Em aplicações de segmentação de solos, o método de Otsu é empregado para distinguir os pixels pertencentes ao solo daqueles que fazem parte de outros materiais ou do fundo da imagem.

O funcionamento do método de Otsu baseia-se na otimização da variância intraclasse. Através do cálculo da variância intraclasse para diferentes valores de limiar, o algoritmo identifica o limiar que maximiza essa variância. A variância intraclasse é uma métrica que avalia a homogeneidade dos pixels dentro de cada classe.

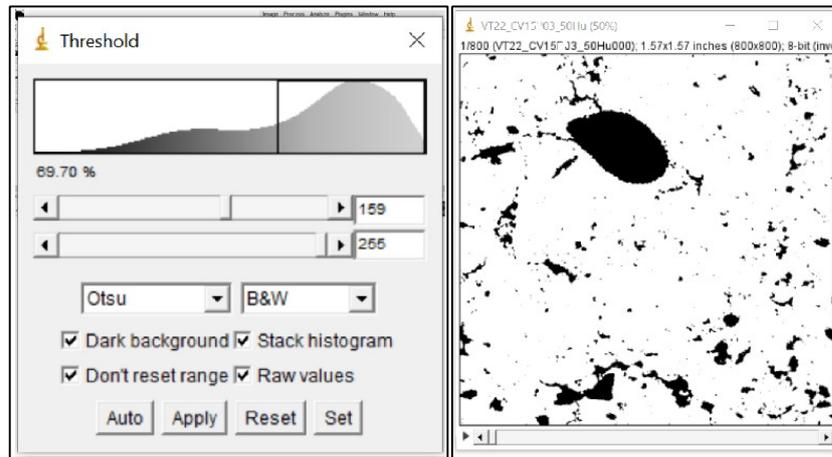
Na análise de segmentação de solos, o método de Otsu é empregado para discriminar os tons de cinza associados ao solo dos tons de cinza correspondentes a outros materiais ou ao fundo da imagem. O limiar determinado pelo algoritmo é então utilizado para criar uma máscara binária, na qual os pixels acima do limiar são classificados como solo, enquanto os pixels abaixo do limiar são categorizados como outros materiais ou fundo.

Em imagens em escala de cinza de 8 bits, os tons de cinza representativos do solo podem variar conforme as características específicas da imagem e do tipo de solo em questão. Em geral, os tons de cinza que representam o solo tendem a se aproximar dos valores mais escuros, ou seja, valores próximos a zero.

Nesse contexto, o valor mínimo é zero, correspondendo ao preto absoluto, enquanto o valor máximo é 255, representando o branco absoluto. Os tons de cinza intermediários, entre zero e 255, denotam diferentes níveis de intensidade de cinza, onde tons mais escuros estão associados a valores mais baixos e tons mais claros estão relacionados a valores mais altos.

A figura 12 apresenta o resultado do método de OTSU para uma análise de solo. Os resultados mostraram que a faixa de 0 – 159 tons de cinza da imagem correspondem a poros e a faixa entre 160 – 255 seria correspondente ao solo. Como resultado da limiarização, a imagem binarizada representa em branco o que seria solo e em preto o que seria poro para o slice 1.

Figura 12: Resultado do método de OTSU

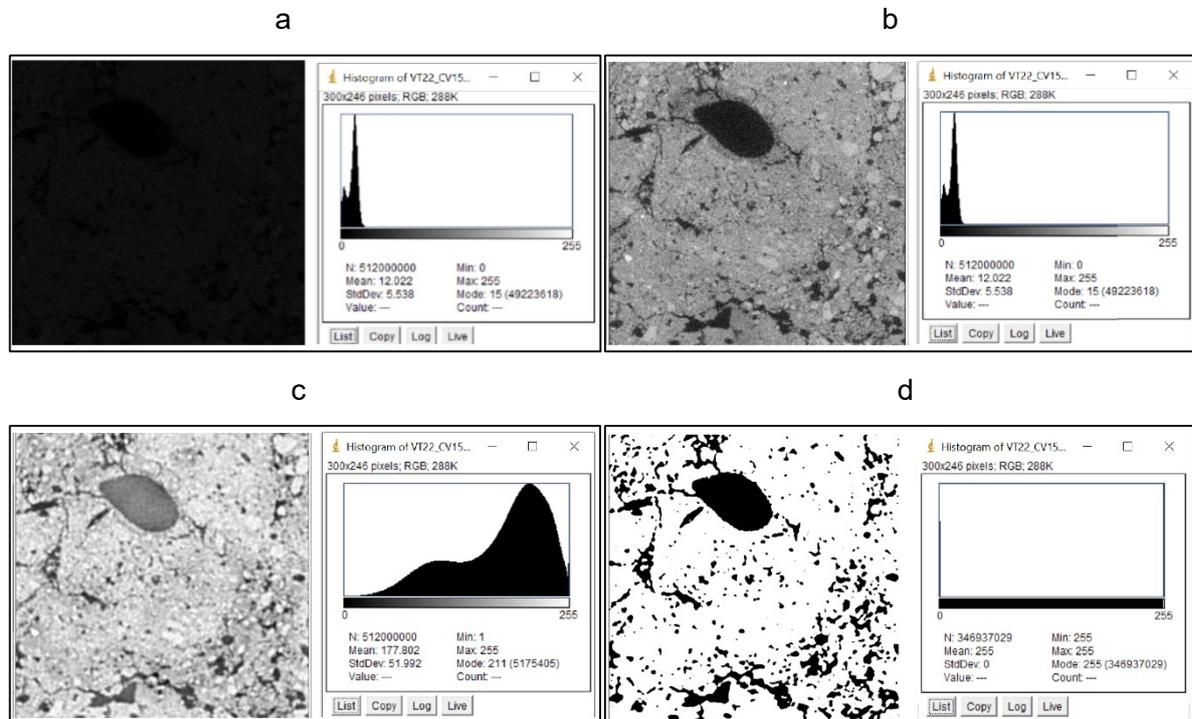


Fonte: autora

4.2.9 Binarização

A binarização é um processo que converte uma imagem em uma imagem binária, onde os pixels são classificados como pertencentes a uma das duas classes (geralmente preto e branco), com base em um valor de limiar. A binarização é útil para segmentar objetos de interesse em uma imagem ou para realizar análises quantitativas. É importante ajustar as opções de binarização de acordo com a imagem e o resultado desejado, para obter uma segmentação precisa e adequada. Recomenda-se experimentar diferentes configurações e visualizar o resultado em tempo real para obter o melhor resultado. A figura 13 apresenta o resultado do processamento de imagem de um solo submetido a tomografia computadorizada de raio X.

Figura 13: Resultado do processamento de imagens



Fonte: autora

A figura (a) mostra a imagem após importação e conversão de 16 bits para 8 bits pelo programa ImageJ. Observa-se que o histograma está localizado à esquerda do gráfico, próximo aos tons de cinza mais baixos.

Para obter uma imagem com melhor visualização, é necessário ajustar o brilho e o contraste. Na figura (b), esse ajuste foi feito automaticamente, preservando as características reais da imagem, sem alterar o histograma.

Na figura (c), é apresentado o resultado após a realização de todo o processo mencionado na metodologia. Observa-se um histograma bimodal redistribuído no intervalo de 0 a 255 tons de cinza.

Na figura (d), foi aplicada a limiarização utilizando o método de OTSU, resultando em uma imagem binarizada com apenas dois tons (branco e preto). Esse resultado é importante para definir, neste caso, o que será considerado solo e o que será considerado poro.

4.2.10 Radiodensidade de solos no IMAGEJ

A radiodensidade dos solos é um parâmetro que desempenha um papel fundamental na caracterização e análise de solos em estudos geotécnicos e agrícolas.

A radiodensidade refere-se à capacidade do solo em absorver radiação e é frequentemente medida usando imagens radiográficas. O software ImageJ oferece uma variedade de ferramentas e recursos que podem ser utilizados para analisar a radiodensidade dos solos de forma precisa e eficiente.

Uma das principais funcionalidades do ImageJ é a capacidade de converter imagens radiográficas em escalas de cinza, permitindo uma melhor visualização e análise. Isso é especialmente útil para a análise de radiografias de solos, onde diferentes tons de cinza podem representar diferentes níveis de radiodensidade.

Além disso, o ImageJ oferece a opção de selecionar regiões de interesse (ROIs) nas imagens radiográficas. Essas ROIs podem ser usadas para isolar áreas específicas do solo para análise de sua radiodensidade. O software é capaz de calcular a média dos valores de radiodensidade dentro das ROIs, fornecendo informações quantitativas sobre a densidade do solo em uma determinada região.

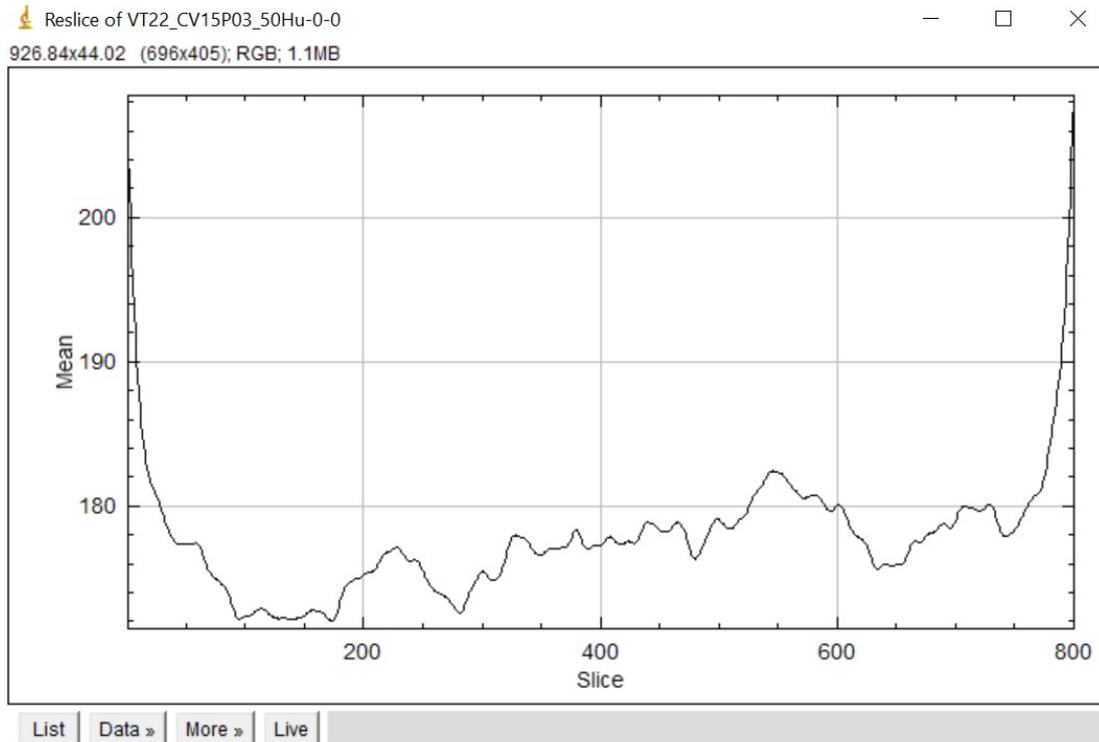
O ImageJ também permite a criação de perfis de radiodensidade, que são gráficos que mostram a variação da radiodensidade ao longo de uma linha ou caminho específico na imagem radiográfica do solo. Esses perfis podem ser úteis para identificar variações na densidade do solo e auxiliar na interpretação de características geotécnicas ou agrícolas.

A análise da radiodensidade dos solos no ImageJ é uma ferramenta valiosa para estudos geotécnicos, agrícolas e ambientais. Ela pode fornecer informações importantes sobre a composição do solo, sua compactação, porosidade e outras propriedades físicas relevantes. Esses dados podem ser usados para tomar decisões informadas em projetos de engenharia, agricultura de precisão e gestão de recursos naturais.

O ImageJ oferece recursos poderosos para a análise da radiodensidade dos solos. Com suas ferramentas de conversão de imagens, seleção de ROIs e criação de perfis, o software permite uma análise detalhada e precisa da radiodensidade dos solos, contribuindo para uma melhor compreensão e utilização dos recursos naturais

A figura 14 apresenta o gráfico da radiodensidade para um tipo de solo no software imageJ.

Figura 14: Radiodensidade



Fonte: autora

O menu Watershed no ImageJ é uma opção de processamento de imagem que permite realizar a segmentação de objetos ou regiões de interesse em uma imagem. O algoritmo de Watershed é baseado em técnicas de segmentação por regiões e é especialmente útil quando há sobreposição de objetos ou regiões na imagem. O algoritmo de Watershed funciona identificando áreas de mínimos locais na imagem e, em seguida, dividindo as regiões de acordo com as linhas de contorno que separam esses mínimos. Isso ajuda a separar objetos ou regiões que estejam conectados ou sobrepostos.

O menu "Analyze Particles" no ImageJ fornece uma variedade de resultados e estatísticas para as partículas ou regiões de interesse (ROIs) que você selecionou em uma imagem. Ao selecionar essa opção, uma janela de configurações será exibida, permitindo que você defina os parâmetros para a análise das partículas. Os resultados são exibidos em uma tabela de resultados que pode ser salva ou exportada para análise posterior.

4.2.11 Resultados fornecidos pelo IMAGEJ

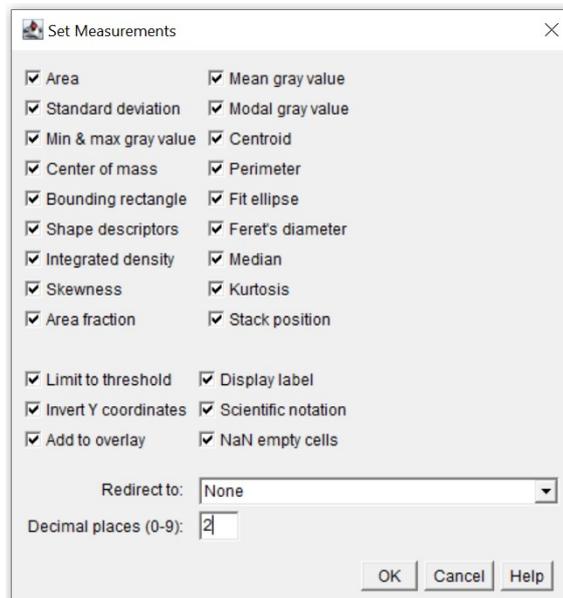
O software ImageJ oferece uma variedade de resultados e informações úteis na análise de imagens. Alguns exemplos desses resultados e dados incluem:

- Centroides: as coordenadas x e y do centro de massa de cada partícula ou região de interesse (ROI).
- Feret: a menor distância entre dois pontos paralelos que tocam as bordas da partícula ou ROI.
- Diâmetro médio: o diâmetro médio da partícula ou ROI.
- Circularidade: uma medida da forma da partícula, variando de 0 a 1, onde 1 indica uma forma circular perfeita.
- Aspect Ratio: a relação entre o comprimento e a largura da partícula ou ROI.
- Sólido: a razão entre a área da partícula e a área do envelope convexo mínimo que a contém.
- Min e Max: os valores mínimos e máximos de intensidade de pixel dentro de cada partícula ou ROI.
- Média: a média das intensidades de pixel dentro de cada partícula ou ROI.
- Área da ROI: a área total da ROI selecionada em pixels.
- Número de partículas: o número total de partículas ou ROIs encontradas na imagem.
- Medidas de área e perímetro: o ImageJ pode ser usado para medir a área e o perímetro de objetos presentes em uma imagem, auxiliando na determinação do tamanho e forma dos objetos.
- Intensidade média de pixels: o programa permite calcular a intensidade média dos pixels em uma região de interesse, útil para análise de intensidade de cor ou brilho em uma imagem.
- Histograma de intensidade: o ImageJ pode gerar um histograma de intensidade de uma imagem, mostrando a distribuição de valores de intensidade dos pixels, fornecendo informações sobre o contraste da imagem e a presença de ruído.
- Contagem de partículas: o programa pode ser usado para contar o número de partículas ou objetos em uma imagem, o que é útil em aplicações como análise de células em biologia ou contagem de partículas em materiais.

- Análise de textura: o ImageJ possui recursos para analisar a textura de uma imagem, fornecendo informações sobre a uniformidade, rugosidade ou padrões presentes na imagem.
- Análise de linhas e bordas: o programa pode ser usado para detectar e analisar linhas e bordas em uma imagem, útil em aplicações como detecção de bordas em imagens médicas ou análise de linhas em materiais.
- Análise de sequência de imagens: o ImageJ permite a análise de sequências de imagens, incluindo medição de movimento, rastreamento de objetos e análise de mudanças temporais nas imagens.

Esses são apenas alguns exemplos dos resultados e informações fornecidos pelo ImageJ. O programa é altamente versátil e pode ser adaptado para atender a uma ampla variedade de necessidades de análise de imagens. A figura 15 apresenta o menu de resultados fornecidos pelo imageJ.

Figura 15: Menu de resultados fornecidos pelo ImageJ



Fonte: autora

O programa ImageJ pode ser utilizado para análise de solos de várias maneiras, fornecendo resultados que auxiliam na caracterização e avaliação dessas amostras. Alguns dos resultados que podem ser obtidos através do ImageJ incluem:

- Análise de textura do solo: O ImageJ pode ser usado para realizar análises de

textura do solo, como a determinação das proporções de areia, silte e argila presentes na amostra. Isso pode ser feito através da segmentação da imagem da amostra de solo e da contagem e medição das partículas correspondentes a cada fração.

- Análise de porosidade do solo: O programa pode ser utilizado para avaliar a porosidade do solo, tanto a porosidade total quanto a porosidade de diferentes tamanhos de poros. Isso envolve a identificação e medição dos poros presentes na imagem da amostra de solo.
- Análise de agregados do solo: O ImageJ pode auxiliar na análise dos agregados do solo, permitindo a contagem, medição e caracterização dos agregados presentes na imagem da amostra. Isso pode fornecer informações sobre a estrutura do solo e sua capacidade de retenção de água e nutrientes.
- Análise de distribuição de tamanho de partículas: O programa pode ser utilizado para realizar análises da distribuição de tamanho de partículas do solo. Isso envolve a segmentação da imagem da amostra de solo e a medição das dimensões das partículas, permitindo a obtenção de dados sobre a distribuição de tamanho.
- Análise de porosidade interconectada: O ImageJ pode ser utilizado para avaliar a porosidade interconectada do solo, que está relacionada à capacidade de armazenamento de água e aeração do solo. Isso envolve a identificação e medição dos poros interconectados presentes na imagem da amostra.

Esses são apenas alguns exemplos de análises que podem ser realizadas no ImageJ para caracterização e avaliação de solos. O programa oferece uma ampla gama de recursos e funcionalidades que podem ser adaptados de acordo com as necessidades específicas de cada análise.

4.3 CONCLUSÃO

A tomografia computadorizada de raios-x em solos oferece várias vantagens em relação a outras técnicas de análise de solo. Uma das principais vantagens é a capacidade de visualizar e quantificar a distribuição espacial de diferentes componentes do solo, como partículas, poros e raízes. Isso permite uma melhor

compreensão da estrutura do solo e de como ela influencia suas propriedades físicas, como a capacidade de retenção de água e a permeabilidade. Além disso, a tomografia computadorizada de raios-x em solos é uma técnica não destrutiva, o que significa que uma amostra de solo não é danificada durante o processo de análise. Isso é especialmente importante em estudos de longo prazo, nos quais é necessário monitorar a evolução das propriedades do solo ao longo do tempo.

Os dados obtidos podem ser analisados quantitativamente para determinar parâmetros como porosidade total, porosidade conectada e tamanho médio de poros. Além disso, a tomografia computadorizada de raios-x em solos pode ser combinada com outras técnicas, como a análise de textura de solo, para fornecer uma compreensão mais completa das propriedades do solo. Em resumo, a tomografia computadorizada de raios-x em solos é uma técnica poderosa para a análise de amostra de solo, permitindo a visualização e quantificação de sua estrutura interna e propriedades físicas.

O emprego do software Inspect-X contribui para a melhoria da qualidade das imagens e proporciona recursos avançados de análise, incluindo reconstruções tridimensionais e segmentação. Além disso, o software CT PRO 3D e o VGStudio MAX 2.2 são ferramentas essenciais para a reconstrução das imagens em três dimensões, permitindo uma interpretação mais detalhada dos dados obtidos.

Em conclusão, o software ImageJ se destaca como uma ferramenta poderosa e versátil no campo da análise e processamento de imagens científicas. Desenvolvido pelo National Institutes of Health, o ImageJ oferece uma série de funcionalidades que abrangem desde operações básicas de processamento até análises complexas de dados. Através de sua interface intuitiva e recursos avançados, o programa permite aos usuários realizar uma ampla gama de tarefas, incluindo edição, correção, quantificação e processamento de imagens.

O método sequencial apresentado neste contexto, usando o ImageJ, demonstra uma abordagem sistemática para a análise de imagens de tomografia de solos. Começando pela importação e conversão das imagens, o processo passa por ajustes de brilho e contraste, aplicação de filtros de Gauss e Unsharp Mask, subtração de fundo, limiarização e segmentação de regiões de interesse através do algoritmo Watershed. O uso do método de Otsu para segmentação automática, seguido pela análise de partículas e contagem, revela a utilidade do ImageJ em tarefas de análise quantitativa.

Além disso, o programa também se destaca na análise de radiodensidade de solos, permitindo a conversão de imagens radiográficas em escalas de cinza e fornecendo ferramentas para calcular médias de radiodensidade, criar perfis de radiodensidade e analisar variações dentro de uma imagem. A ampla variedade de resultados e informações fornecidas pelo ImageJ possibilita uma análise detalhada das características das amostras de solo, sendo aplicável em estudos geotécnicos, agrícolas e ambientais.

Em suma, o ImageJ desempenha um papel fundamental na análise e processamento de imagens científicas, proporcionando aos pesquisadores uma plataforma flexível para realizar análises detalhadas e obter insights valiosos a partir de dados visuais. Sua capacidade de adaptar-se às necessidades específicas de cada análise e sua ativa comunidade de usuários contribuem para sua relevância contínua no campo da pesquisa e análise de imagens.

REFERÊNCIAS

ELLIOT, T. R.; HECK, R. J. A comparison of optical and X-ray CT technique for void analysis in soil thin section. *Geoderma*, Elsevier, v. 141, n. 1-2, p. 60-70, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.05.001>

HAINSWORTH, J. M.; AYLMORE, L. A. G. The use of computerassisted tomography to determine spatial distribution of soil water content. *Australian Journal of Soil Research*, v.21, p.435-443, 1983. <https://doi.org/10.1071/SR9830435>

HU, X.; LI, X. Y.; LI, Z. C.; GAO, Z.; WU, X. C.; WANG, P.; LIU, L. Y. Linking 3-D soil macropores and root architecture to near saturated hydraulic conductivity of typical meadow soil types in the Qinghai Lake Watershed, northeastern Qinghai-Tibet Plateau. *Catena*, v. 185, p.104287, 2020 <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104287>

MACEDO, A.; CRESTANA, S. Avaliação da macroporosidade e da densidade de partículas do solo através da microtomografia de raios-X. *Revista brasileira de ciência do solo*, v. 23, n. 4, p. 763-771, 1999. <https://doi.org/10.1590/S0100-06831999000400002>

OLIVEIRA, J. S. *Reconstrução Tridimensional de Imagens obtidas por tomografia computadorizada*. Monte Carlos, 2007.

PETROVIC, A. M.; SIEBERT, J. E.; RIEKE, P. E. Soil bulk density analysis in three dimensions by computed tomographic scanning. Soil Science Society of America Journal, v.46, p.445-450, 1982. <https://doi.org/10.2136/sssaj1982.03615995004600030001x>

PIRES, L. F. Twenty-five years of computed tomography in soil physics: A literature review of the Brazilian contribution. Soil and Tillage Research, Elsevier, v. 110, n. 2, p. 197-210, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.still.2010.07.013>

PIRES, L. F.; ROQUE, W. L.; ROSA, J. A.; MOONEY, S. J. 3D analysis of the soil porous architecture under long term contrasting management systems by X-ray computed tomography. Soil and Tillage Research, v. 191, p. 197-206, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.02.018>

SCARFE, W. C.; FARMAN, A. G.; SUKOVIC, P. Clinical applications of cone-beam computed tomography in dental practice. J Can. Dent Assoc., v.72, p.75-80, 2006.

TAINA, I.; HECK, R.; ELLIOT, T. R. Application of X-ray computed tomography to soil science: A literature review. Canadian Journal of Soil Science, NRC Research Press, v. 88, n. 1, p. 1-19, 2008. <https://doi.org/10.4141/CJSS06027>

TAINA, I. A.; HECK, R. J.; DEEN, W.; MA, E. Y. T. Quantification of freeze-thaw related structure in cultivated topsoils using X-ray computer tomography. Canadian Journal of Soil Science, v.93, p.533-553, 2013. <https://doi.org/10.4141/cjss2012-044>

5 CAPÍTULO 4 - Análise da variação temporal da porosidade e radiodensidade em solos com aplicação de vinhaça

Resumo: A vinhaça é um subproduto da produção de etanol a partir da cana-de-açúcar e é amplamente utilizada como fertilizante agrícola. Compreender como a vinhaça afeta essas propriedades do solo é fundamental para avaliar seu impacto no ambiente agrícola e garantir um manejo adequado do solo. Este trabalho tem como objetivo analisar o efeito da aplicação de vinhaça em diferentes períodos na porosidade e na radiodensidade do solo. O estudo foi realizado na zona rural da Usina Petribú, localizada no município de Lagoa de Itaenga. Foram realizados estudos com diferentes tratamentos, incluindo área sem aplicação de vinhaça, área com 2 anos de aplicação de vinhaça, área com 15 anos de aplicação de vinhaça e área com mais de 30 anos de aplicação de vinhaça. Para cada tratamento, foram coletadas quatro amostras para análise. Os resultados obtidos permitiram observar os efeitos da vinhaça na macroporosidade e na radiodensidade do solo, fornecendo informações relevantes para a compreensão dos processos envolvidos. Os resultados indicaram que a aplicação de vinhaça ao longo do tempo teve um efeito significativo na macroporosidade e na radiodensidade do solo. Em conclusão, a porosidade e a radiodensidade do solo desempenham um papel crucial na compreensão da estrutura e composição do solo. A aplicação de vinhaça pode afetar essas propriedades, tornando necessário considerar seus efeitos no manejo agrícola. Este estudo contribui para o conhecimento científico sobre a relação entre porosidade e radiodensidade do solo, bem como os efeitos da aplicação de vinhaça.

Palavras-chave: fertilizante agrícola, manejo do solo, agricultura sustentável, estrutura do solo, composição do solo.

Analysis of the Temporal Variation of Porosity and Radiodensity in Soils with Vinasse Application.

Abstract: Vinasse is a byproduct of ethanol production from sugarcane and is widely used as an agricultural fertilizer. Understanding how vinasse affects soil properties is crucial for assessing its impact on the agricultural environment and ensuring proper soil management. This study aims to analyze the effect of vinasse application at different intervals on soil porosity and radiodensity. The study was conducted in the

rural area of Petribú Plant, located in the municipality of Lagoa de Itaenga. Different treatments were examined, including an area without vinasse application, an area with 2 years of vinasse application, an area with 15 years of vinasse application, and an area with over 30 years of vinasse application. Four samples were collected for analysis for each treatment. The results obtained allowed for the observation of the effects of vinasse on soil macroporosity and radiodensity, providing relevant information for understanding the underlying processes. The findings indicated that the long-term application of vinasse had a significant effect on soil macroporosity and radiodensity. In conclusion, soil porosity and radiodensity play a crucial role in understanding soil structure and composition. The application of vinasse can impact these properties, necessitating the consideration of its effects in agricultural management. This study contributes to the scientific knowledge regarding the relationship between soil porosity, radiodensity, and the effects of vinasse application.

Keywords: agricultural fertilizer, soil management, sustainable agriculture, soil structure, soil composition.

5.1 INTRODUÇÃO

A porosidade do solo e a radiodensidade do solo são atributos essenciais para a compreensão da estrutura e composição do substrato terrestre (REICHARDT, 2008; HILLEL, 1998). A radiodensidade do solo, que pode ser medida por meio de técnicas de radiografia, tomografia computadorizada ou outras técnicas de imagem, fornece informações sobre a composição do solo, teor de umidade, porosidade e mineralogia (DOYON et al., 2004). A tomografia computadorizada (TC) é um método radiológico que permite a avaliação precisa da radiodensidade das estruturas avaliadas por meio da medição da absorção de raios-X (DOYON et al., 2004). Embora amplamente utilizada na medicina humana (KODAMA et al., 2007) e em diagnósticos de tecidos ósseos e moles em animais (SILVA, 2015; MARCHIOR et al., 2015), a utilização da tomografia computadorizada na avaliação da radiodensidade do solo é pouco explorada na literatura.

A porosidade do solo é definida como a proporção de espaços vazios preenchidos por ar ou água, desempenhando um papel crucial nos processos de infiltração, drenagem e disponibilidade de água e nutrientes para as plantas (PAGLIAI et al., 2000). Diversos fatores, como textura, estrutura, teor de matéria orgânica, compactação, umidade e atividade biológica, influenciam a porosidade do solo (PAGLIAI et al., 2003; PAGLIAI et al., 2004). A formação de agregados estáveis no solo favorece a criação de macroporos, facilitando a infiltração de água e a circulação de ar, enquanto a compactação do solo pode reduzir significativamente a

porosidade, limitando a infiltração de água e a penetração das raízes das plantas (PAGLIAI et al., 2000; PAGLIAI et al., 2003; PAGLIAI et al., 2004).

A análise da porosidade e da radiodensidade do solo pode ser realizada por meio de técnicas de imagem digital, permitindo a determinação da porosidade, dimensão, forma e número de poros presentes no solo (AMZIANE et al., 2017). Essa abordagem tem sido amplamente utilizada em estudos agrícolas e geológicos para avaliar a qualidade do solo, mapear a distribuição espacial da porosidade e radiodensidade, bem como investigar os efeitos de diferentes práticas de manejo do solo (GARBOUET et al., 2013; BERALDO et al., 2014).

A estrutura do solo é determinada pela organização, orientação e arranjo de partículas com diferentes composições químicas, tamanhos e formas, as quais, quando agregadas, determinam a porosidade do solo (REICHARDT, 2008; HILLEL, 1998). Estudos têm demonstrado a aplicabilidade da tomografia computadorizada de raios-X na investigação das modificações na morfologia dos agregados do solo em diferentes tipos de manejo (MARCHIN et al., 2015).

A utilização da vinhaça como adubo orgânico pode aumentar a atividade microbiana do solo devido à adição de matéria orgânica (PASSARIN et al., 2007). A matéria orgânica é um dos principais componentes do solo que influencia a formação e a estabilização dos agregados (BRONICK & LAL, 2005).

Portanto, a análise da porosidade e radiodensidade do solo desempenham um papel fundamental na compreensão da estrutura e composição do substrato terrestre. Essas características são cruciais para a disponibilidade de água e nutrientes para as plantas, a drenagem do solo, a resistência à compactação e a identificação de áreas contaminadas. O estudo desses atributos é essencial para o manejo adequado do solo e a preservação do meio ambiente (REICHARDT, 2008; HILLEL, 1998). O objetivo deste artigo é analisar o comportamento da porosidade e radiodensidade em solos com aplicação de vinhaça em diferentes períodos.

5.2 METODOLOGIA

5.2.1 Caracterização da área de estudo

A Usina Petribu está localizada na Zona da Mata Norte do Estado de Pernambuco - Brasil, cuja sede está às margens da Rodovia Paulo Petribú, PE - 53,

na Zona Rural do município de Lagoa do Itaenga. A figura 16 representa a localização da área de estudo.

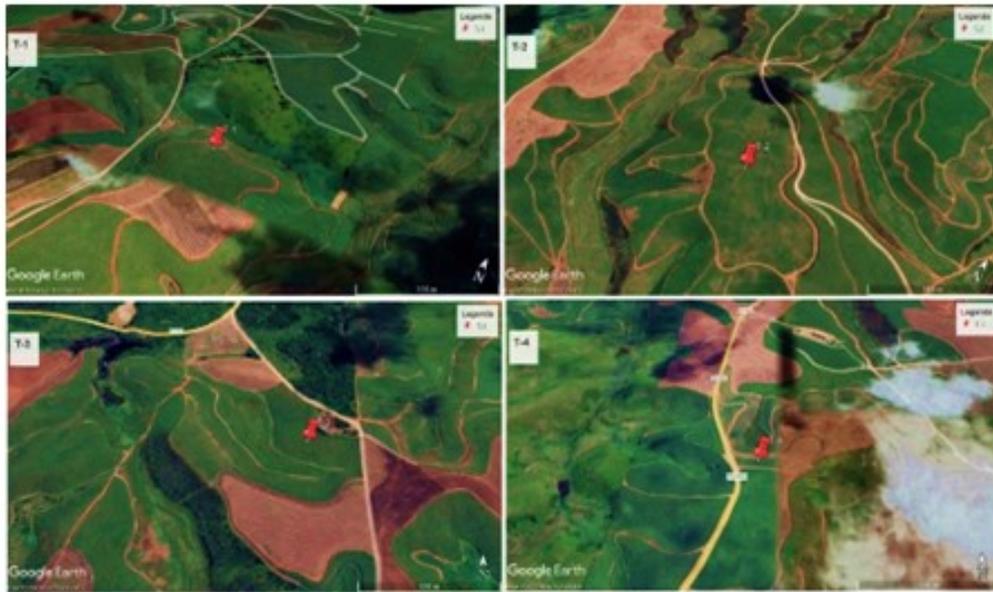
Figura 16: Localização do município de Lagoa de Itaenga - PE



Fonte: autora

Essa indústria é voltada para a produção de açúcar, álcool, energia e CO₂ com vendas tanto para o mercado interno quanto para o externo. As atividades da empresa são divididas em safra e entressafra. A safra corresponde ao período de produção dos produtos, sendo geralmente realizada entre os meses de setembro a fevereiro, pois nesse período o ciclo de chuva é menor. Durante o período da safra a indústria sucroalcooleira gera um número significativo de empregos para a região. A entressafra corresponde ao período de manutenção dos equipamentos da indústria, sendo geralmente realizada entre os meses de março a agosto. A figura 17, apresenta os pontos de coleta das amostras de solos.

Figura 17: Localização dos pontos de coleta



Fonte: Maxar Technologies / Landsat

Adaptado pela autora

Essas imagens foram extraídas através do satélite Landsat e max tecnologias em imagens pelo programa Google Earth.

Os solos foram classificados de acordo com Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS, 2006) através do **Mapa de reconhecimento de baixa e média intensidade de solos do estado de Pernambuco.**

Os pontos, tipo de tratamento, tipo de solo, latitude, longitude e altitude dos locais de coleta estão distribuídos indicado no quadro 2.

Quadro 2: Descrição da área de coleta

PONTO	TRATAMENTO	TIPO DE SOLO	LATITUDE	LONGITUDE	ALTITUDE
T1	Sem aplicação de vinhaça	ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO	7°49'5.64"S	35°13'3.56"O	157 m
T2	Em torno de 2 anos de aplicação de vinhaça	ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO	7°57'41.18"S	35°14'25.14"O	134 m
T3	Em torno de 15 anos de aplicação de vinhaça	ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO	7°53'57.62"S	35°14'17.89"O	118 m

T4	Mais de 30 anos de aplicação de vinhaça	ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO	7°54'21.88"S	35°15'12.97"O	140 m
-----------	---	----------------------------	--------------	---------------	-------

Fonte: autora

Para a realização das análises foram escolhidas áreas com diferentes tempos de aplicação de vinhaça. A classificação do solo se deu através do mapa de solos da EMBRAPA e com ajuda do software LANDSAT. Foram definidas áreas onde todos os tipos de solos fossem o mesmo. Todos os solos foram classificados como ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO.

5.2.2 Cálculo da porosidade e limitações da análise

A classificação dos poros quanto ao tamanho é uma abordagem essencial para a compreensão da estrutura do solo e suas propriedades físicas. Essa classificação permite uma melhor compreensão da capacidade do solo em relação à aeração, drenagem e armazenamento de água, bem como à disponibilidade de nutrientes para as plantas. Com base nos dados fornecidos, podemos classificar os poros em diferentes categorias de acordo com seus diâmetros equivalentes. A tabela 1 apresenta a classificação das classes dos poros de acordo com o diâmetro.

Tabela 1: Classes de poros de acordo com o diâmetro equivalente dos poros no solo

Classe dos poros	diâmetro equivalente μm
Macroporo Grande	> 5000
Médio	5000 – 2000
Pequeno	2000 – 1000
Muito pequeno	1000 – 74
Mesoporos	74 – 30
Microporos	30 – 6
Ultramicroporos	6 - 0,1
Criptoporos	< 0,1

Fonte: (BREWER, 1964)

A primeira categoria é a dos macroporos, que são poros de tamanho maior, com diâmetro equivalente acima de 5000 μm . Dentro dessa categoria, podemos subdividir os macroporos em três classes: grande (diâmetro $> 5000 \mu\text{m}$), médio (diâmetro entre 5000 μm e 2000 μm) e pequeno (diâmetro entre 2000 μm e 1000 μm). Esses poros são responsáveis pela rápida drenagem de água no solo, bem como pela circulação de ar, permitindo a respiração das raízes e a penetração de raízes mais profundas.

A segunda categoria é a dos mesoporos, que são poros de tamanho intermediário, com diâmetro equivalente entre 74 μm e 30 μm . Esses poros desempenham um papel importante na retenção e liberação de água no solo, atuando como canais de transporte de água entre os macroporos e os microporos. Os mesoporos também fornecem espaço para o crescimento das raízes e a penetração de microrganismos benéficos.

A terceira categoria é a dos microporos, que são poros de tamanho menor, com diâmetro equivalente entre 30 μm e 6 μm . Esses poros são responsáveis pela retenção de água no solo, atuando como reservatórios que fornecem água para as plantas durante períodos de seca. Os microporos também desempenham um papel fundamental na retenção de nutrientes, permitindo que as raízes tenham acesso a eles.

A quarta categoria é a dos ultramicroporos, que são poros de tamanho muito pequeno, com diâmetro equivalente entre 6 μm e 0,1 μm . Esses poros também desempenham um papel na retenção de água e nutrientes, mas em menor escala.

A última categoria é a dos criptoporos, que são poros extremamente pequenos, com diâmetro equivalente inferior a 0,1 μm . Esses poros são de difícil acesso para a água e as raízes das plantas, mas ainda podem influenciar a retenção de água e nutrientes no solo.

A classificação dos poros quanto ao tamanho de acordo com os dados fornecidos permite uma melhor compreensão da distribuição e proporção dos poros no solo. Essa informação é fundamental para avaliar a capacidade do solo em realizar funções como aeração, drenagem, armazenamento de água e disponibilidade de nutrientes.

A presença de macroporos é essencial para evitar a compactação do solo e favorecer a infiltração de água durante chuvas intensas. A classificação em diferentes tamanhos de macroporos, como grande, médio e pequeno, permite uma

análise mais detalhada da contribuição de cada faixa de tamanho para a drenagem e circulação de ar no solo.

Os mesoporos, por sua vez, desempenham um papel importante na retenção e liberação de água no solo. Eles atuam como canais de transporte de água entre os macroporos e os microporos, permitindo uma distribuição eficiente da água no perfil do solo. A classificação dos poros nessa faixa de tamanho fornece informações valiosas sobre a capacidade do solo em armazenar e disponibilizar água para as plantas.

Os microporos são responsáveis pela retenção de água e nutrientes no solo, fornecendo um ambiente favorável para o crescimento das raízes das plantas. A classificação dos poros nessa faixa de tamanho nos permite avaliar a proporção de poros que contribuem para a retenção de água e nutrientes no solo, sendo essencial para entender a disponibilidade desses recursos para as plantas.

Os ultramicroporos e criptoporos, embora sejam poros de tamanho muito pequeno, também desempenham um papel na retenção de água e nutrientes no solo, mesmo que em menor escala. A classificação desses poros ajuda a identificar a presença dessas estruturas no solo e sua possível contribuição para as propriedades físicas e hidrológicas.

Para este estudo, a resolução espacial da reconstrução das imagens obtidas por tomografia computadorizada de raio-X foi baseada na relação de 40 mm equivalendo a 800 pixels. Conseqüentemente, a resolução da imagem resultante foi de 50 μm . Ao analisar a tabela 1 e considerar a resolução da imagem, observa-se que as análises ficam limitadas a poros com diâmetros equivalentes maiores que 50 μm . No entanto, a classificação será realizada apenas para os macroporos, sendo eles classificados como pequenos, médios e grandes.

Em relação ao volume, observa-se a seguinte relação:

$$V = N_{\text{VOXELS}} * (\delta r)^3$$

Onde: (δr) = resolução espacial

N_{voxels} = N de voxel

Logo, 1 voxel corresponde a $12,5 \times 10^{-5} \text{ mm}^3$, visto que, a resolução das imagens é de $50 \text{ }\mu\text{m}$. Portanto, para esse estudo, percebe-se que as análises ficam limitadas para volumes maiores que $12,5 \times 10^{-5} \text{ mm}^3$. Contudo, Para calcular os dados de macroporosidade, foi feita a razão entre a soma dos volumes dos macroporos e o volume total da amostra (V_t).

$$P(\%) = \frac{V_p}{V_t} * 100$$

Em resumo, a classificação dos poros de acordo com os dados fornecidos permite uma análise mais detalhada da estrutura do solo e de suas propriedades físicas. Essa classificação fornece informações valiosas sobre a distribuição e proporção dos poros no solo, sendo essencial para compreender como o solo desempenha funções como aeração, drenagem, armazenamento de água e disponibilidade de nutrientes. No entanto, é importante ressaltar que a técnica da tomografia computadorizada de raio-X possui limitações na análise devido à resolução da imagem.

5.2.3 Coleta das amostras de solo

As coletas dos solos foram realizadas conforme procedimento descrito no capítulo 3.

5.2.4 Análise estatística

Para avaliar a existência de diferença significativa entre os tratamentos: SV, 2 anos, 15 anos e 30 anos, em relação à macroporosidade, distribuição dos agregados e radiodensidade, foram realizadas as seguintes etapas. Primeiro, a normalidade dos dados foi verificada utilizando o teste de Shapiro-Wilk. Em seguida, a homogeneidade das variâncias foi avaliada por meio do teste de Levene. Também foi assegurada a independência dos dados.

Se todos esses critérios fossem cumpridos, os dados seriam submetidos à análise de variância (ANOVA) com um nível de significância de 5%. Posteriormente,

para comparar as médias entre os grupos, o teste de Tukey seria aplicado, com um nível de significância de 5%.

Caso os critérios de normalidade ou homogeneidade não fossem satisfeitos, os dados passariam pelo teste não paramétrico de Kruskal-Wallis, com um nível de significância de 5%. Após isso, o teste de Dunn seria aplicado para a comparação das medianas, também com um nível de significância de 5%.

Os resultados detalhados desses testes podem ser encontrados nos apêndices A e B.

5.3 RESULTADOS

Os resultados a seguir apresentam o processo de limiarização pelo método de OTSU. O método de Otsu é um algoritmo de segmentação de imagem que busca encontrar automaticamente um limiar de intensidade ótimo para separar uma imagem em duas classes distintas baseado nos tons de cinza. No caso desse estudo, as classes distintas foram classificadas como solo e poro.

Segundo o método de OTSU, os tons de cinza que correspondem ao solo são mais próximos dos valores mais escuros, ou seja, valores próximos a zero.

Os valores intermediários correspondem a tons de cinza que podem ser consideradas poros ou solo dependendo da fatia analisada. Os valores considerados solos apresentam os tons de cinza que representa solo para qualquer fatia da imagem. Os valores considerados poros representam os tons de cinzas que representam poros para qualquer fatia da imagem.

Os resultados do programa ImageJ apresenta o limiar de OTSU por fatia de solo. Após calculado os resultados da faixa de limiarização por fatia, ordenou-se esses resultados do menor para o maior.

A tabela 2, apresenta os resultados do processo de limiarização que representa a faixa de poro, solo e valores intermediários.

Tabela 2: Resultados do processo de limiarização pelo método de Otsu.

	SV			2 ANOS			15 ANOS			30 ANOS		
	SOLO	INTER	PORO									
P1	0 - 153	154 - 195	196 - 255	0 - 140	141 - 195	196 - 255	0 - 153	154 - 197	198 - 255	0 - 135	136 - 153	154 - 255
P2	0 - 164	165 - 186	187 - 255	0 - 157	158 - 185	186 - 255	0 - 153	154 - 173	174 - 255	0 - 137	138 - 157	158 - 255

P3	0 - 148	149 - 191	192 - 255	0 - 148	149 - 207	208 - 255	0 - 143	144 - 180	181 - 255	0 - 155	156 - 179	180 - 255
P4	0 - 160	161 - 196	197 - 255	0 - 160	161 - 197	198 - 255	0 - 135	136 - 163	164 - 255	0 - 152	153 - 169	170 - 255
Média	0 - 156	157 - 192	193 - 255	0 - 151	152 - 196	197 - 255	0 - 146	147 - 178	179 - 255	0 - 145	146 - 164	165 - 255

Fonte: autora

Com base nos dados apresentados, podemos observar as faixas de limiarização pelo método de OTSU para cada grupo de amostras (SV, 2 ANOS, 15 ANOS e 30 ANOS) e para cada tipo de região (SOLO, INTER e PORO).

As faixas de limiarização são definidas por intervalos de tons de cinza (0 a 255) que correspondem a cada região de interesse. Por exemplo, para a amostra P1, a região SOLO é definida pelos tons de cinza de 0 a 153, a região INTER é definida pelos tons de cinza de 154 a 195, e a região PORO é definida pelos tons de cinza de 196 a 255.

Essas faixas de limiarização são importantes para segmentar as imagens em diferentes regiões de interesse, permitindo a análise e quantificação de características específicas em cada região. No caso em questão, as regiões de interesse são SOLO, INTER e PORO.

A média das faixas de limiarização para cada grupo de amostras mostra uma variação nos valores de tons de cinza que definem cada região. Por exemplo, a média da faixa de limiarização para a região SOLO varia de 0 a 156 para o grupo SV, de 0 a 151 para o grupo 2 ANOS, de 0 a 146 para o grupo 15 ANOS e de 0 a 145 para o grupo 30 ANOS.

Essas diferenças nas faixas de limiarização podem indicar diferentes níveis de intensidade de tons de cinza nas imagens para cada grupo de amostras. Isso pode estar relacionado a diferenças nas características das amostras, como a presença de diferentes materiais ou a variação na composição do solo ao longo do tempo de aplicação de vinhaça.

5.3.1 MACROPOROSIDADE

A tabela a seguir apresenta os dados da macroporosidade por volume da amostra para as 4 repetições.

Tabela 3: Resultados da macroporosidade

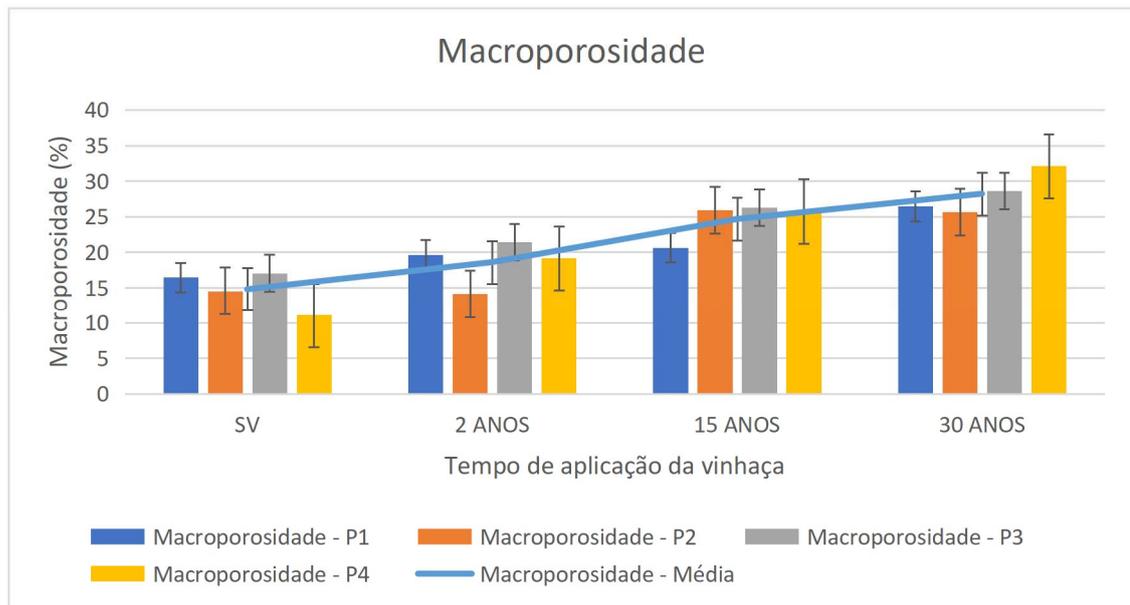
Macroporosidade

	SV	2 ANOS	15 ANOS	30 ANOS
P1	16,45	19,67	20,65	26,46
P2	14,53	14,12	25,92	25,66
P3	17,06	21,43	26,30	28,62
P4	11,08	19,14	25,74	32,09
Média	14,78	18,59	24,65	28,21

Fonte: autora

O gráfico 1 apresenta a variação da macroporosidade e a média em todas as repetições.

Gráfico 1: Resultado da macroporosidade em cada amostra e as médias



Fonte: autora

Ao realizar uma análise descritiva, é possível perceber que a macroporosidade aumenta à medida que o tempo de aplicação da vinhaça é prolongado. Para obter uma validação estatística dessas observações, os dados referentes à macroporosidade foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk, visando determinar qual teste estatístico seria mais adequado (ver Apêndice A).

Ao examinar especificamente os dados referentes a 15 anos de aplicação de vinhaça, constatou-se que não apresentavam distribuição normal, com um valor p inferior a 0,05. Como consequência, a escolha do teste foi direcionada para métodos estatísticos não paramétricos. Dado que estamos lidando com quatro tratamentos

independentes, a escolha recaiu sobre o teste de Kruskal-Wallis, sendo seguido pelo pós-teste de Dunn.

5.3.1.1 Estatística não paramétrica – teste de Kruskal-Wallis para os dados de macroporosidade

A tabela 4 apresenta os resultados do teste de Kruskal-Wallis.

Tabela 4: Resultado do teste de Kruskal-Wallis

Kruskal-Wallis Test					
	SV	2 ANOS	15 ANOS	30 ANOS	
Median	15,49	19,405	25,83	27,54	
rank sum	13	24	44	55	
Count	4	4	4	4	16
r ² /n	42,25	144	484	756,25	1426,5
H-stat					11,93382
H-ties					11,93382
Df					3
p-value					0,007613
Alpha					0,05
Sig					yes

Fonte: autora

Observa-se pelos resultados que $p < 0,05$, logo rejeita-se a hipótese nula e verifica-se pelo teste de Dunn, quais grupos apresentaram diferença significativa. Conforme apresentado na tabela 5.

Tabela 5: Resultado do pós teste de Dunn

D TEST						
group 1	group 2	R-mean	std err	z-stat	R-crit	p-value
SV	2 ANOS	2,75	3,366502	0,816872	6,598222	0,414002
SV	15 ANOS	7,75	3,366502	2,302093	6,598222	0,02133
SV	30 ANOS	10,5	3,366502	3,118965	6,598222	0,001815
2 ANOS	15 ANOS	5	3,366502	1,485221	6,598222	0,137485
2 ANOS	30 ANOS	7,75	3,366502	2,302093	6,598222	0,02133
15 ANOS	30 ANOS	2,75	3,366502	0,816872	6,598222	0,414002

Fonte: autora

5.3.1.2 Análise dos dados de macroporosidade

SV vs. 2 ANOS: O valor de D para essa comparação é 2,75, o que indica uma diferença média de 2,75 unidades entre os grupos SV e 2 ANOS. O valor-p (0,816872) não é estatisticamente significativo (maior que 0,05), sugerindo que não há diferença significativa na macroporosidade entre esses dois tratamentos.

SV vs. 15 ANOS: Nesta comparação, o valor de D é 7,75, indicando uma diferença média de 7,75 unidades entre os grupos SV e 15 ANOS. O valor-p (0,02133) é menor que 0,05, o que sugere uma diferença significativa na macroporosidade entre esses dois tratamentos. Portanto, há indícios de que a macroporosidade pode ser diferente entre esses dois períodos.

SV vs. 30 ANOS: O valor de D é 10,5, indicando uma diferença média de 10,5 unidades entre os grupos SV e 30 ANOS. O valor-p (0,001815) é menor que 0,05, o que sugere uma diferença significativa na macroporosidade entre esses dois tratamentos. Isso implica que a macroporosidade pode ter aumentado ao longo dos 30 anos de aplicação de vinhaça.

2 ANOS vs. 15 ANOS: O valor de D é 5, indicando uma diferença média de 5 unidades entre os grupos 2 ANOS e 15 ANOS. O valor-p (0,137485) não é estatisticamente significativo, sugerindo que não há diferença significativa na macroporosidade entre esses dois tratamentos.

2 ANOS vs. 30 ANOS: Nesta comparação, o valor de D é 7,75, indicando uma diferença média de 7,75 unidades entre os grupos 2 ANOS e 30 ANOS. O valor-p (0,02133) é menor que 0,05, indicando uma diferença significativa na macroporosidade entre esses dois tratamentos.

15 ANOS vs. 30 ANOS: O valor de D é 2,75, indicando uma diferença média de 2,75 unidades entre os grupos 15 ANOS e 30 ANOS. O valor-p (0,414002) não é estatisticamente significativo, sugerindo que não há diferença significativa na macroporosidade entre esses dois tratamentos.

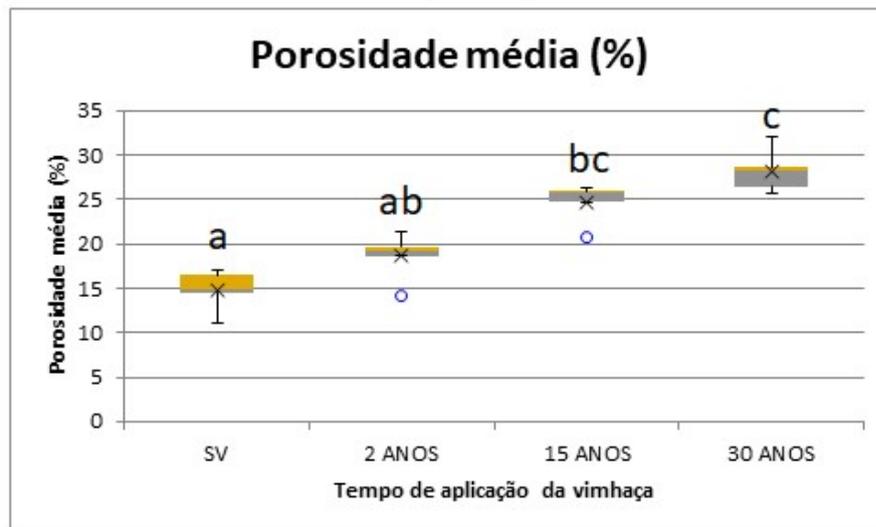
5.3.1.3 Análise da macroporosidade através do gráfico BOX-PLOT

Além da análise estatística não paramétrica realizada anteriormente, também podemos fazer uma análise visual dos dados por meio do gráfico boxplots, que nos ajudarão a visualizar a variação da macroporosidade entre os diferentes grupos.

Um gráfico de boxplot pode ser utilizado para visualizar a distribuição da macroporosidade em cada grupo. Ele mostra a mediana, o intervalo interquartil e os valores mínimo e máximo. Além disso, pontos fora do intervalo interquartil são indicados como outliers, ou seja, valores que estão fora do padrão da distribuição.

Esses gráficos (gráfico -2) podem fornecer uma visão mais clara das diferenças entre os grupos e ajudar na interpretação dos resultados da análise estatística.

Gráfico 2: Box plot da porosidade



Fonte: autora

Grupo SV (Sem Vinhaça):

A macroporosidade média deste grupo é de 16,45. A ausência de outliers indica uma relativa uniformidade nos dados. O intervalo interquartil (IQR) de 2,53 mostra uma dispersão moderada dos valores ao redor da mediana. Isso sugere que a macroporosidade do solo sem aplicação de vinhaça não apresenta grande variação interna.

Grupo 2 ANOS de Aplicação de Vinhaça:

Neste grupo, a macroporosidade média é de 18,83. A presença de um outlier indica que existe um valor discrepante que se afasta da tendência geral do grupo. O

IQR de 4,55 mostra uma maior variação nos valores ao redor da mediana. Isso pode ser influenciado por fatores não considerados, como variações locais ou heterogeneidades do solo.

Grupo 15 ANOS de Aplicação de Vinhaça:

A macroporosidade média deste grupo é de 25,96. Similarmente ao grupo anterior, há um outlier identificado, indicando uma possível influência externa. O IQR muito baixo, de apenas 0,78, sugere que a maioria dos valores está muito próxima da mediana. Isso pode indicar uma maior uniformidade na macroporosidade em comparação com outros grupos.

Grupo 30 ANOS de Aplicação de Vinhaça:

Neste grupo, a macroporosidade média é de 27,64. Não há outliers, indicando uma distribuição mais compacta dos valores. O IQR de 2,485 sugere uma variação moderada dos valores em torno da mediana. Isso pode indicar que a aplicação de vinhaça ao longo de 30 anos contribuiu para um aumento na macroporosidade com uma certa variabilidade.

5.3.1.4 Discussão sobre os resultados da macroporosidade:

As comparações entre os tratamentos SV e 30 anos, bem como 2 anos e 30 anos, mostraram diferenças significativas na macroporosidade. Isso sugere que ao longo dos 30 anos de aplicação de vinhaça, houve um aumento na macroporosidade do solo. Esse resultado pode ser associado à decomposição dos resíduos orgânicos presentes na vinhaça, que ao longo do tempo contribuíram para uma maior formação de espaços porosos no solo, os quais são característicos das macroporosidades.

Segundo Bronick e Lal (2005) a matéria orgânica é um dos principais componentes do solo que influencia a formação e estabilidade dos agregados.

Apesar da pouca contribuição em termos de massa total em solos minerais a fração orgânica pode exercer acentuada influência nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, bem como nos processos de funcionamento do ecossistema (STEVENSON, 1994; BALDOCK e NELSON, 2000).

A comparação entre 15 anos e 30 anos também mostrou diferenças significativas na macroporosidade. Isso sugere que a aplicação de vinhaça por 15 anos já estava começando a impactar a macroporosidade do solo, mas essa diferença se intensificou ao longo de 30 anos. É importante notar que a macroporosidade também aumentou entre 2 anos e 15 anos, embora não tenha atingido significância estatística. Isso pode indicar um processo gradual de alteração na estrutura do solo com a aplicação contínua de vinhaça.

Portanto, a análise dos dados de macroporosidade com base na análise do solo sugere que a aplicação contínua de vinhaça ao longo do tempo pode estar relacionada ao aumento gradual da macroporosidade do solo. Essa alteração na macroporosidade pode ter diversas implicações para o solo, como melhorias na drenagem, na aeração e na capacidade de retenção de água, o que poderia impactar positivamente a produtividade das culturas e a saúde do ecossistema em questão.

A porosidade e a densidade do solo têm sido utilizadas como indicadoras da qualidade do solo, por tratar-se de propriedades dinâmicas, suscetíveis ao uso e de fácil determinação, estando relacionadas, à compactação e à relativa restrição ao crescimento radicular (ARSHAD et al., 1996).

Os resultados do teste D sugerem que há diferenças significativas na macroporosidade entre alguns dos tratamentos. Notavelmente, há diferenças significativas quando se comparam os tratamentos SV com 15 anos e 30 anos de aplicação de vinhaça. Isso sugere que a aplicação de vinhaça ao longo do tempo pode ter impactado a macroporosidade do solo, levando a diferenças observadas.

Essa tendência pode ser explicada pelo fato de que a vinhaça é rica em nutrientes, como potássio e fósforo, que podem promover o desenvolvimento de microrganismos benéficos e a formação de agregados no solo, favorecendo a porosidade.

De acordo com Rossetto et al., (2008), os macronutrientes presentes na vinhaça seguem essa ordem de concentração: K, S, Ca, N, Mg e P.

Analisando os grupos individualmente, é notável que a macroporosidade tende a aumentar com o tempo de aplicação de vinhaça. Esse resultado corrobora com o estudo de Canellas et al., (2003), o qual avaliou o solo de uma região em que se cultivava cana fertilizada com vinhaça a 35 anos. Os autores verificaram que a adição de vinhaça promoveu acréscimo nos teores de carbono orgânico,

macronutrientes e micronutrientes do solo, com melhoria na qualidade da matéria orgânica.

Os grupos de 15 ANOS e 30 ANOS exibem as maiores medianas e, conseqüentemente, as maiores médias de macroporosidade. A presença de outliers nos grupos de 2 ANOS e 15 ANOS indica que esses grupos podem ser mais influenciados por fatores variáveis ou locais que impactam a macroporosidade.

Em resumo, a análise por grupo confirma a tendência de aumento na macroporosidade do solo com a aplicação de vinhaça. A análise dos dados de porosidade média entre os grupos denominados SV, 2 ANOS, 15 ANOS e 30 ANOS, em relação à aplicação de vinhaça, revelou diferenças estatisticamente significativas entre os grupos. Estes resultados são pertinentes para a compreensão dos efeitos da aplicação de vinhaça no solo ao longo do tempo.

Os resultados obtidos sugerem que a aplicação de vinhaça pode exercer um efeito positivo na porosidade do solo, contribuindo para aprimorar suas propriedades físicas.

Em suma, a análise dos dados indica que a aplicação de vinhaça ao longo do tempo pode ter efeitos significativos na porosidade média do solo, com uma tendência de aumento da porosidade com a aplicação contínua. Esses resultados fornecem dados importantes para a compreensão dos efeitos da aplicação de vinhaça na qualidade do solo, contribuindo para a adoção de práticas agrícolas mais sustentáveis e eficientes.

5.3.2 DISTRIBUIÇÃO DA MACROPOROSIDADE

A tabela 6 apresenta os dados da distribuição da macroporosidade por volume da amostra para as 4 repetições.

Tabela 6: Distribuição da macroporosidade

	SV			2 ANOS			15 ANOS			30 ANOS		
	P	M	G	P	M	G	P	M	G	P	M	G
P1	12,68	3,5	0,28	15,33	3,61	0,73	15,57	4,54	0,1	19,11	6,85	0,51
P2	11,19	3,2	0,14	9,25	4,47	0,4	17,11	8,57	0,24	20,99	4,53	0,15
P3	13,79	2,38	0,15	14,71	6,42	0,3	16,63	9,36	0,31	23,38	5,02	0,22
P4	7,76	3,24	0,08	11,85	6,28	1,02	14,81	10,58	0,35	26,02	5,96	0,1
Média	11,36	3,08	0,16	12,79	5,20	0,61	11,87	5,92	0,17	22,38	5,59	0,25

Fonte: autora

Analisando os dados descritivamente, observa-se que o tratamento com mais de 30 anos de vinhaça apresenta o maior valor relativo aos macroporos P, o tratamento com 15 anos de vinhaça apresenta o maior valor relativo aos macroporos M e o tratamento com 2 anos de vinhaça apresenta o maior valor relativo aos macroporos G. Para se ter uma certeza estatística, os dados da distribuição da macroporosidade foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk com o objetivo de verificar o teste estatístico a ser usado (Apêndice A). Os testes compararam os macroporos P de todas as amostras, os macroporos M de todas as amostras e os macroporos G de todas as amostras.

Foi observado que os dados atenderam aos critérios de normalidade (Apêndice A), no entanto os macroporos G não atenderam ao critério da homogeneidade pelo teste de Levene's (Apêndice B), logo, os dados da distribuição dos macroporos P e M foram submetidos a ANOVA e a distribuição dos macroporos G foram submetidos ao teste de Kruskal-Wallis.

5.3.2.1 Estatística paramétrica – ANOVA para os dados de distribuição da macroporosidade para os macroporos P e M

A tabela 7 apresenta os dados de distribuição da macroporosidade para os macroporos P e M.

Tabela 7 – Resultados da ANOVA para macroporos P e M

ANOVA – P								
Surces	SS	Df	MS	F	P value	Eta-sq	RMSSE	Omega Sq
Between Groups	288,0981	3	96,03269	15,51206	0,000198	0,794999	1,969267	0,731256
Within Groups	74,2901	12	6,190842					

Total 362,3882 15 24,15921

ANOVA – M								
Sources	SS	Df	MS	F	P value	Eta-sq	RMSSE	Omega Sq
Between Groups	54,33947	3	18,11316	7,215924	0,005025	0,643364	1,343124	0,53821
Within Groups	30,12198	12	2,510165					
Total	84,46144	15	5,630763					

Fonte: autora

Observa-se pelos resultados que $p < 0,05$, logo rejeita-se a hipótese nula. O teste de TUKEY HSD/KRAMER foi usado para verificar quais grupos dos macroporos P e M apresentaram diferença significativa. Os dados do teste de Tukey são apresentados na tabela 8.

Tabela 8: Teste de TUKEY para distribuição dos macroporos P e M

Q TEST – P

group 1	group 2	mean	std err	q-stat	Lower	upper	p-value	mean-crit	Cohen d
SV – P	2 anos - P	1,43	1,24407	1,149453	-3,79385	6,65385	0,847292	5,22385	0,574726
SV – P	15 anos - P	4,675	1,24407	3,757827	-0,54885	9,89885	0,085066	5,22385	1,878913
SV – P	30 anos - P	11,02	1,24407	8,858022	5,79615	16,24385	0,000211	5,22385	4,429011
2 anos – P	15 anos - P	3,245	1,24407	2,608374	-1,97885	8,46885	0,300957	5,22385	1,304187
2 anos – P	30 anos - P	9,59	1,24407	7,708569	4,36615	14,81385	0,000734	5,22385	3,854284
15 anos – P	30 anos - P	6,345	1,24407	5,100195	1,12115	11,56885	0,016427	5,22385	2,550097

Q TEST – M

group 1	group 2	mean	std err	q-stat	Lower	upper	p-value	mean-crit	Cohen d
SV – M	2 anos – M	2,115	0,792175	2,669865	-1,21134	5,441343	0,283248	3,326343	1,334932
SV – M	15 anos – M	5,1825	0,792175	6,542116	1,856157	8,508843	0,002829	3,326343	3,271058
SV – M	30 anos – M	2,51	0,792175	3,168492	-0,81634	5,836343	0,167521	3,326343	1,584246
2 anos – M	15 anos – M	3,0675	0,792175	3,872251	-0,25884	6,393843	0,074217	3,326343	1,936125
2 anos – M	30 anos – M	0,395	0,792175	0,498627	-2,93134	3,721343	0,984232	3,326343	0,249314
15 anos – M	30 anos – M	2,6725	0,792175	3,373623	-0,65384	5,998843	0,133064	3,326343	1,686812

Fonte: autora

5.3.2.2 Análise dos resultados para distribuição dos macroporos (P)

SV vs. 2 ANOS: A média da distribuição de macroporos (P) para a condição "2 anos de aplicação de vinhaça" é 1,43. O valor de p (p-value) é 0,847292, que é maior que o nível de significância de 0,05. Isso indica que não há diferença estatisticamente significativa na distribuição de macroporos entre a condição "sem vinhaça" (SV) e a condição "2 anos de aplicação de vinhaça".

SV vs. 15 ANOS: A média da distribuição de macroporos (P) para a condição "15 anos de aplicação de vinhaça" é 4,675. O valor de p é 0,085066, que é maior que 0,05. Isso indica que não há diferença estatisticamente significativa na distribuição de macroporos entre a condição "sem vinhaça" (SV) e a condição "15 anos de aplicação de vinhaça".

SV vs. 30 ANOS: A média da distribuição de macroporos (P) para a condição "30 anos de aplicação de vinhaça" é 11,02. O valor de p é 0,000211, que é menor que 0,05. Isso indica que há uma diferença estatisticamente significativa na distribuição de macroporos entre a condição "sem vinhaça" (SV) e a condição "30 anos de aplicação de vinhaça". O valor q-stat (8,858022) também é alto, reforçando a significância estatística.

2 ANOS vs. 15 ANOS: Não há diferença estatisticamente significativa na distribuição de macroporos entre as condições "2 anos de aplicação de vinhaça" e "15 anos de aplicação de vinhaça", pois o valor de p é maior que 0,05.

2 ANOS vs. 30 ANOS: A média da distribuição de macroporos (P) para a condição "30 anos de aplicação de vinhaça" é 9,59, enquanto para a condição "2 anos de aplicação de vinhaça" é 1,43. O valor de p é 0,000734, indicando uma diferença estatisticamente significativa. O valor q-stat (7,708569) é alto, reforçando a significância estatística.

15 ANOS vs. 30 ANOS: A média da distribuição de macroporos (P) para a condição "30 anos de aplicação de vinhaça" é 9,59, enquanto para a condição "15 anos de aplicação de vinhaça" é 4,675. O valor de p é 0,016427, indicando uma diferença estatisticamente significativa. O valor q-stat (5,100195) também é alto, reforçando a significância estatística.

5.3.2.3 Análise dos resultados para distribuição dos macroporos (M)

SV vs. 2 ANOS: A média da distribuição de macroporos (M) para a condição "2 anos de aplicação de vinhaça" é 2,115. O valor de p é 0,283248, que é maior que 0,05. Isso indica que não há diferença estatisticamente significativa na distribuição de macroporos entre a condição "sem vinhaça" (SV) e a condição "2 anos de aplicação de vinhaça". O valor q-stat (2,669865) é moderado.

SV vs. 15 ANOS: A média da distribuição de macroporos (M) para a condição "15 anos de aplicação de vinhaça" é 5,1825. O valor de p é 0,002829, que é menor que 0,05. Isso indica que há uma diferença estatisticamente significativa na distribuição de macroporos entre a condição "sem vinhaça" (SV) e a condição "15 anos de aplicação de vinhaça". O valor q-stat (6,542116) é alto, reforçando a significância estatística.

SV vs. 30 ANOS: A média da distribuição de macroporos (M) para a condição "30 anos de aplicação de vinhaça" é 2,51. O valor de p é 0,167521, que é maior que 0,05. Isso indica que não há diferença estatisticamente significativa na distribuição de macroporos entre a condição "sem vinhaça" (SV) e a condição "30 anos de aplicação de vinhaça". O valor q-stat (3,168492) é moderado.

2 ANOS vs. 15 ANOS: A média da distribuição de macroporos (M) para a condição "15 anos de aplicação de vinhaça" é 5,1825, enquanto para a condição "2 anos de aplicação de vinhaça" é 2,115. O valor de p é 0,074217, que é maior que 0,05. Isso indica que não há diferença estatisticamente significativa na distribuição de macroporos entre essas duas condições. O valor q-stat (3,872251) é moderado.

2 ANOS vs. 30 ANOS: A média da distribuição de macroporos (M) para a condição "30 anos de aplicação de vinhaça" é 2,51, enquanto para a condição "2 anos de aplicação de vinhaça" é 0,395. O valor de p é 0,984232, que é maior que 0,05. Isso indica que não há diferença estatisticamente significativa na distribuição de macroporos entre essas duas condições. O valor q-stat (0,498627) é baixo.

15 ANOS vs. 30 ANOS: A média da distribuição de macroporos (M) para a condição "30 anos de aplicação de vinhaça" é 2,51, enquanto para a condição "15 anos de aplicação de vinhaça" é 2,6725. O valor de p é 0,133064, que é maior que 0,05. Isso indica que não há diferença estatisticamente significativa na distribuição de macroporos entre essas duas condições. O valor q-stat (3,373623) é moderado.

5.3.2.4 Discussão sobre os resultados da macroporosidade P e M

Para a distribuição de macroporos (P), observou-se um impacto estatisticamente significativo da aplicação de vinhaça ao longo de 30 anos em comparação com a condição "sem vinhaça" (SV). Não foram observadas diferenças significativas na distribuição de macroporos entre as condições de "2 anos de aplicação de vinhaça" e "15 anos de aplicação de vinhaça". No entanto, ambas as

condições apresentaram diferenças significativas em relação à condição de "30 anos de aplicação de vinhaça". Esses resultados sugerem que a aplicação de vinhaça por um período mais prolongado pode ter um impacto mais significativo na distribuição.

Já para a distribuição de macroporos (M), os resultados indicaram uma diferença estatisticamente significativa entre a condição "sem vinhaça" (SV) e a condição de "15 anos de aplicação de vinhaça". Não foram encontradas diferenças nas outras comparações. Isso sugere que a aplicação de vinhaça ao longo de 15 anos teve um impacto significativo na distribuição de macroporos em comparação com a condição sem vinhaça. As outras condições de aplicação de vinhaça (2 anos e 30 anos) não tiveram uma diferença significativa em relação à distribuição.

5.3.2.5 Estatística não paramétrica – anova para os dados de distribuição da macroporosidade para os macroporos G

A tabela 9 apresenta o teste de Kruskal-Wallis da distribuição dos macroporos (G).

Tabela 9: Teste de Kruskal-Wallis para a distribuição dos macroporos G

Kruskal-Wallis Test

	SV	2 ANOS	15 ANOS	30 ANOS	
Median	0,145	0,565	0,275	0,185	
rank sum	19,5	54	33,5	29	
Count	4	4	4	4	16
r ² /n	95,0625	729	280,5625	210,25	1314,875
H-stat					7,009191
H-ties					7,029867
Df					3
p-value					0,070952
Alpha					0,05
Sig					No

Fonte: autora

Observa-se pelos resultados que $p > 0,05$, logo aceita-se a hipótese nula. Portanto, não há diferença significativa entre os macroporos G.

5.3.3 NÚMERO DE MACROPOROS

A tabela 10 apresenta o somatório do número de macroporos de todas as fatias para as 4 repetições.

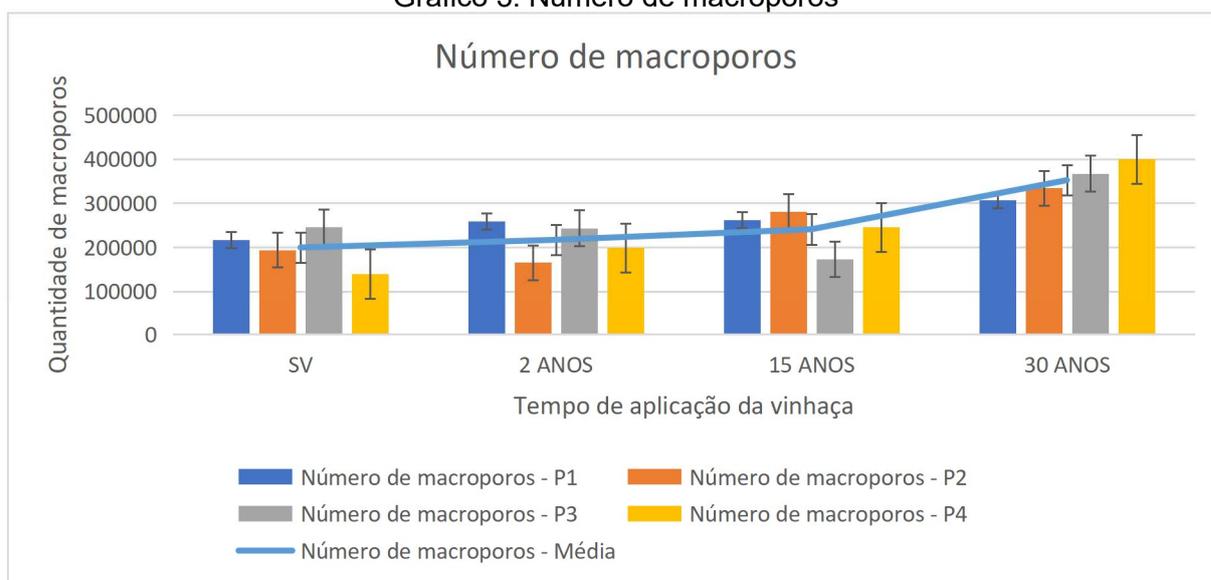
Tabela 10: Quantidade de macroporos

Número de macroporos	Número de macroporos			
	SV	2 ANOS	15 ANOS	30 ANOS
P1	217447	259459	262647	306699
P2	194060	165298	281536	334354
P3	246313	243685	173688	367669
P4	139896	199092	245636	400102
Média	199429	216883,5	240876,75	352206

Fonte: autora

O gráfico 3 apresenta a variação da macroporidade e a média em todas as repetições.

Gráfico 3: Número de macroporos



Fonte: autora

Analisando descritivamente, observa-se que o número de macroporos aumenta com o aumento do tempo de aplicação da vinhaça. Para se ter uma certeza estatística, os dados dos números de macroporos foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk com o objetivo de verificar o teste estatístico a ser usado (Apêndice A).

Observa-se que todos os p-values foram maiores do que 0,05 ($p > 0,05$), com isso, todos os tratamentos possuem distribuição normal. Os parâmetros do teste de Levene's foram maiores que 0,05, logo, considera-se a hipótese nula, onde as

variâncias dos grupos apresentam homogeneidade conforme (Apêndice B). Como os dados são independentes, pode-se concluir que as exigências da análise de variância foram atendidas, logo os dados foram submetidos a ANOVA.

5.3.3.1 Estatística paramétrica – ANOVA para o N° de macroporos

A tabela 11 apresenta o teste da ANOVA para o número de macroporos.

Tabela 11: Teste da ANOVA

ANOVA								
Sources	SS	Df	MS	F	P value	Eta-sq	RMSSE	Omega Sq
Between Groups	7,08E+10	3	2,36E+10	16,28363	4,05E-05	0,75328	1,80464	0,696283
Within Groups	2,32E+10	16	1,45E+09					
Total	9,4E+10	19	4,95E+09					

Fonte: autora

Observa-se pelos resultados que $p < 0,05$, logo rejeita-se a hipótese nula e verifica-se pelo teste de TUKEY HSD/KRAMER quais grupos apresentam diferença significativa. A tabela 12 apresenta os dados do teste de Tukey para o número de macroporos.

Tabela 12: Teste de TUKEY HSD/KRAMER

Q TEST									
group 1	group 2	Mean	std err	q-stat	Lower	Upper	p-value	mean-crit	Cohen d
SV	2 ANOS	17454,5	21980,66	0,794085	-74842,3	109751,3	0,94157	92296,78	0,397042
SV	15 ANOS	41447,75	21980,66	1,885647	-50849	133744,5	0,560742	92296,78	0,942823
SV	30 ANOS	152777	21980,66	6,95052	60480,22	245073,8	0,001748	92296,78	3,47526
2 ANOS	15 ANOS	23993,25	21980,66	1,091562	-68303,5	116290	0,865602	92296,78	0,545781
2 ANOS	30 ANOS	135322,5	21980,66	6,156436	43025,72	227619,3	0,004494	92296,78	3,078218
15 ANOS	30 ANOS	111329,3	21980,66	5,064874	19032,47	203626	0,017162	92296,78	2,532437

Fonte: autora

5.3.3.2 Análise dos resultados para o número de macroporos

SV vs. 2 ANOS: Não foi encontrada uma diferença estatisticamente significativa no número de macroporos entre a condição "sem vinhaça" (SV) e a condição "2 anos de aplicação de vinhaça". Isso sugere que a aplicação de vinhaça

por 2 anos não resultou em uma alteração estatisticamente significativa no número de macroporos em comparação com a ausência de vinhaça.

SV vs. 15 ANOS: Da mesma forma, não foi encontrada uma diferença estatisticamente significativa no número de macroporos entre a condição "sem vinhaça" (SV) e a condição "15 anos de aplicação de vinhaça". Isso sugere que a aplicação de vinhaça por 15 anos também não resultou em uma alteração estatisticamente significativa no número de macroporos em comparação com a ausência de vinhaça.

SV vs. 30 ANOS: Por outro lado, houve uma diferença estatisticamente significativa no número de macroporos entre a condição "sem vinhaça" (SV) e a condição "30 anos de aplicação de vinhaça". Isso indica que após 30 anos de aplicação de vinhaça, houve uma alteração estatisticamente significativa no número de macroporos em comparação com a ausência de vinhaça. Além disso, o tamanho do efeito (Cohen d) é muito grande, indicando que essa diferença é de magnitude considerável.

2 ANOS vs. 15 ANOS: Não foi encontrada uma diferença estatisticamente significativa no número de macroporos entre as condições "2 anos de aplicação de vinhaça" e "15 anos de aplicação de vinhaça". Isso sugere que a aplicação de vinhaça por 2 anos e 15 anos não resultou em uma alteração estatisticamente significativa no número de macroporos.

2 ANOS vs. 30 ANOS: Houve uma diferença estatisticamente significativa no número de macroporos entre as condições "2 anos de aplicação de vinhaça" e "30 anos de aplicação de vinhaça". Isso indica que após 30 anos de aplicação de vinhaça, houve uma alteração estatisticamente significativa no número de macroporos em comparação com a aplicação de vinhaça por apenas 2 anos. O tamanho do efeito é muito grande, indicando uma diferença substancial.

15 ANOS vs. 30 ANOS: Da mesma forma, houve uma diferença estatisticamente significativa no número de macroporos entre as condições "15 anos de aplicação de vinhaça" e "30 anos de aplicação de vinhaça". Isso sugere que após 30 anos de aplicação de vinhaça, houve uma alteração estatisticamente significativa no número de macroporos em comparação com a aplicação de vinhaça por 15 anos.

5.3.3.3 Discussão sobre os resultados do número de macroporos

Em resumo, a aplicação de vinhaça ao longo de 30 anos mostrou ter um impacto significativo no número de macroporos do solo, com um aumento substancial em comparação com as condições "sem vinhaça" e com períodos mais curtos de aplicação (2 anos e 15 anos). Esse aumento sugere que a longo prazo, a aplicação de vinhaça pode afetar positivamente o número de macroporos, o que pode ter implicações importantes para a qualidade do solo e da água subterrânea.

5.3.4 DISTRIBUIÇÃO DO NÚMERO DE MACROPOROS

A tabela 13 apresenta os resultados da distribuição do número de macroporos em diferentes condições: "sem vinhaça" (SV), "2 anos de aplicação de vinhaça", "15 anos de aplicação de vinhaça" e "30 anos de aplicação de vinhaça".

Para cada condição, são apresentados os valores de P, M e G, representando respectivamente o número de macroporos nas profundidades P1, P2, P3 e P4.

Tabela 13: Número de macroporos em função do tamanho dos macroporos

	SV			2 ANOS			15 ANOS			30 ANOS		
	P	M	G	P	M	G	P	M	G	P	M	G
P1	202295	14941	211	243297	15722	439	241801	20753	91	278968	27326	405
P2	179184	14740	135	146492	18515	291	245494	35848	194	311932	22324	98
P3	226095	11384	106	217317	26152	216	141571	31461	656	343191	24321	157
P4	126551	13350	95	173110	25379	603	204029	41304	357	371000	29019	82
Média	183531,25	13603,75	136,75	195054	21442	387,25	208223,75	32341,5	324,5	326272,75	25747,5	185,5

Fonte: autora

Analisando os resultados, podemos observar que, em geral, o número de macroporos é maior nas condições de aplicação de vinhaça em comparação com a condição "sem vinhaça".

No entanto, é importante destacar que os valores variam dependendo do ponto de coleta e do período de aplicação da vinhaça. Por exemplo, no ponto P1, o número de macroporos é maior na condição de "30 anos de aplicação de vinhaça" em comparação com as outras condições. Já, no ponto P2, o número de macroporos é maior na condição de "15 anos de aplicação de vinhaça".

A média geral dos valores indica que, em média, a condição de "30 anos de aplicação de vinhaça" apresenta o maior número de macroporos, seguida pela

condição de "15 anos de aplicação de vinhaça". A condição de "2 anos de aplicação de vinhaça" apresenta uma média maior do que, a condição "sem vinhaça" que apresenta a menor média de macroporos.

Esses resultados sugerem que a aplicação de vinhaça ao longo do tempo pode aumentar a distribuição de macroporos no solo, sendo que períodos mais longos de aplicação tendem a ter um impacto maior nessa distribuição.

Para se ter uma certeza estatística, os dados da Distribuição do número de macroporos foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk com o objetivo de verificar o teste estatístico a ser usado. Os testes compararam os macroporos P de todas as amostras, os macroporos M de todas as amostras e os macroporos G de todas as amostras.

Observa-se que todos os p-values foram maiores do que 0,05 ($p > 0,05$), com isso, todos os tratamentos tiveram distribuição normal. Com isso, verifica-se a homogeneidade dos dados através do teste de Levene's.

Os parâmetros do teste de Levene's foram maiores que 0,05, logo, considera-se a hipótese nula, onde as variâncias dos grupos apresentam homogeneidade. Como os dados são independentes, pode-se concluir que as exigências da análise de variância foram atendidas, logo os dados foram submetidos a ANOVA.

5.3.4.1 Estatística paramétrica – ANOVA para distribuição do número de macroporos

A tabela 14 apresenta a ANOVA para distribuição do número de macroporos.

Tabela 14: Teste da ANOVA

ANOVA – P								
<i>Sources</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P value</i>	<i>Eta-sq</i>	<i>RMSSE</i>	<i>Omega Sq</i>
Between Groups	5,24E+10	3	1,75E+10	9,201251	0,001952	0,696998	1,516678	0,605948
Within Groups	2,28E+10	12	1,9E+09					
Total	7,52E+10	15	5,02E+09					

ANOVA – M								
<i>Sources</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P value</i>	<i>Eta-sq</i>	<i>RMSSE</i>	<i>Omega Sq</i>
Between Groups	7,41E+08	3	2,47E+08	8,672761	0,002476	0,684362	1,472478	0,589936
Within Groups	3,42E+08	12	28473414					
Total	1,08E+09	15	72167356					

ANOVA – G

Sources	SS	df	MS	F	P value	Eta-sq	RMSSE	Omega Sq
Between Groups	164338,5	3	54779,5	1,900507	0,183383	0,322092	0,689294	0,144455
Within Groups	345883,5	12	28823,63					
Total	510222	15	34014,8					

Fonte: autora

Observa-se pelos resultados que $p < 0,05$ para a distribuição do número de macroporo P e M, logo rejeita-se a hipótese nula e verifica-se pelo teste de TUKEY HSD/KRAMER (tabela 15) quais grupos apresentam diferença significativa. Para o número de macroporos G $p > 0,05$, logo aceita-se a hipótese nula de que não há diferença significativa entre os tratamentos.

Tabela 15: Teste de TUKEY HSD/KRAMER

Q TEST – P

group 1	group 2	Mean	std err	q-stat	Lower	upper	p-value	mean-crit	Cohen d
SV	2 ANOS	11522,75	21794,05	0,528711	-79990,5	103036	0,981335	91513,22	0,264355
SV	15 ANOS	24692,5	21794,05	1,132993	-66820,7	116205,7	0,852603	91513,22	0,566496
SV	30 ANOS	142741,5	21794,05	6,549562	51228,28	234254,7	0,002804	91513,22	3,274781
2 ANOS	15 ANOS	13169,75	21794,05	0,604282	-78343,5	104683	0,972671	91513,22	0,302141
2 ANOS	30 ANOS	131218,8	21794,05	6,020852	39705,53	222732	0,005296	91513,22	3,010426
15 ANOS	30 ANOS	118049	21794,05	5,41657	26535,78	209562,2	0,011106	91513,22	2,708285

Q TEST – M

group 1	group 2	Mean	std err	q-stat	Lower	upper	p-value	mean-crit	Cohen d
SV	2 ANOS	7838,25	2668,024	2,937848	-3364,78	19041,28	0,215048	11203,03	1,468924
SV	15 ANOS	18737,75	2668,024	7,023081	7534,716	29940,78	0,001607	11203,03	3,51154
SV	30 ANOS	12143,75	2668,024	4,551589	940,7161	23346,78	0,032408	11203,03	2,275795
2 ANOS	15 ANOS	10899,5	2668,024	4,085233	-303,534	22102,53	0,057404	11203,03	2,042616
2 ANOS	30 ANOS	4305,5	2668,024	1,613741	-6897,53	15508,53	0,672585	11203,03	0,80687
15 ANOS	30 ANOS	6594	2668,024	2,471492	-4609,03	17797,03	0,343139	11203,03	1,235746

Fonte: Autora

5.3.4.2 Análise dos resultados para distribuição do número de macroporos (P)

Grupo SV vs. 2 Anos de Aplicação de Vinhaça:

P-valor: 0,981335

Discussão: O p-valor alto indica que não há diferença significativa entre os grupos SV e 2 Anos de Aplicação de Vinhaça em relação à distribuição do número de macroporos.

Grupo SV vs. 15 Anos de Aplicação de Vinhaça:

P-valor: 0,852603

Discussão: O p-valor alto indica que não há diferença significativa entre os grupos SV e 15 Anos de Aplicação de Vinhaça em relação à distribuição do número de macroporos.

Grupo SV vs. 30 Anos de Aplicação de Vinhaça:

P-valor: 0,002804

Discussão: O p-valor baixo sugere que há uma diferença significativa entre os grupos SV e 30 Anos de Aplicação de Vinhaça em relação à distribuição do número de macroporos. A aplicação de vinhaça por 30 anos parece estar associada a uma alteração nas características da distribuição de macroporos.

Grupo 2 Anos vs. 15 Anos de Aplicação de Vinhaça:

P-valor: 0,972671

Discussão: O p-valor alto indica que não há diferença significativa entre os grupos de 2 Anos e 15 Anos de Aplicação de Vinhaça em relação à distribuição do número de macroporos.

Grupo 2 Anos vs. 30 Anos de Aplicação de Vinhaça:

P-valor: 0,005296

Discussão: O p-valor baixo sugere que há uma diferença significativa entre os grupos de 2 Anos e 30 Anos de Aplicação de Vinhaça em relação à distribuição do número de macroporos. Isso pode indicar uma influência da aplicação de vinhaça ao longo de 30 anos na distribuição dos macroporos.

Grupo 15 Anos vs. 30 Anos de Aplicação de Vinhaça:

P-valor: 0,011106

Discussão: O p-valor baixo sugere que há uma diferença significativa entre os grupos de 15 Anos e 30 Anos de Aplicação de Vinhaça em relação à distribuição do número de macroporos. Isso também indica que a aplicação prolongada de vinhaça pode estar relacionada a mudanças na distribuição dos macroporos.

5.3.4.3 Análise dos resultados para distribuição do número de macroporos (M)

Grupo SV vs. 15 Anos de Aplicação de Vinhaça:

O p-valor muito baixo (0,001607) indica que há uma diferença significativa na distribuição do número de macroporos entre o grupo SV (sem aplicação de vinhaça) e o grupo com 15 anos de aplicação de vinhaça. Esse resultado sugere que a aplicação de vinhaça ao longo de 15 anos teve um impacto significativo nas características dos macroporos do solo. A média dos macroporos no grupo de 15 anos (18737,75) é consideravelmente maior do que a média no grupo SV (7838,25).

Grupo SV vs. 30 Anos de Aplicação de Vinhaça:

O p-valor de 0,032408 indica uma diferença significativa entre o grupo SV e o grupo com 30 anos de aplicação de vinhaça. Isso sugere que a aplicação de vinhaça ao longo de 30 anos também teve um impacto nas características dos macroporos do solo. A média no grupo de 30 anos (12143,75) é maior em comparação com o grupo SV.

Grupo 2 Anos vs. 15 Anos de Aplicação de Vinhaça:

O p-valor de 0,057404 indica uma possível diferença entre o grupo com 2 anos de aplicação de vinhaça e o grupo com 15 anos de aplicação de vinhaça. A

média nos macroporos para o grupo de 15 anos (18737,75) é maior do que no grupo de 2 anos (10899,5).

Grupo 2 Anos vs. 30 Anos de Aplicação de Vinhaça:

O p-valor alto (0,672585) indica que não há uma diferença significativa na distribuição dos macroporos entre o grupo com 2 anos e o grupo com 30 anos de aplicação de vinhaça.

Grupo 15 Anos vs. 30 Anos de Aplicação de Vinhaça:

O p-valor de 0,343139 indica que não há uma diferença significativa na distribuição dos macroporos entre o grupo com 15 anos e o grupo com 30 anos de aplicação de vinhaça.

5.3.4.4 Discussão sobre os resultados da distribuição do número de macroporos

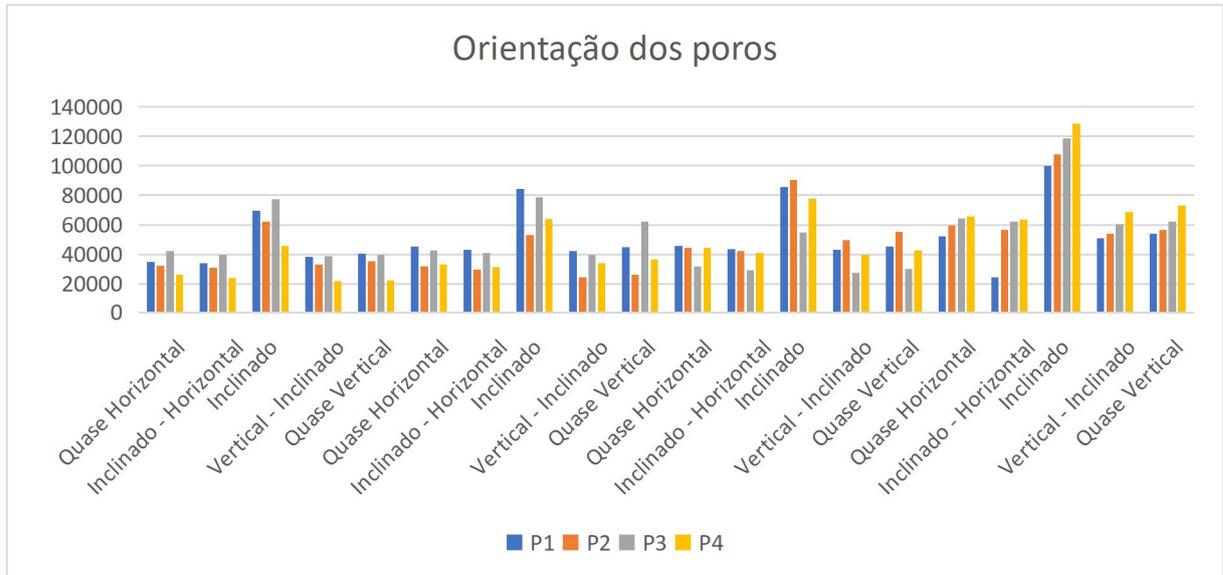
Ao analisar os resultados relacionados às propriedades do solo para a distribuição dos macroporos (P), podemos inferir que a aplicação de vinhaça pode ter exercido um impacto positivo na estrutura do solo ao longo do tempo. A melhoria na distribuição dos macroporos sugere um aumento na porosidade do solo, o que, por sua vez, pode resultar em uma melhor taxa de infiltração de água, maior disponibilidade de oxigênio e favorecimento do desenvolvimento das raízes das plantas.

Em síntese, os resultados do teste Q evidenciaram diferenças significativas entre os grupos de aplicação de vinhaça no que diz respeito à distribuição dos macroporos. Isso sugere que o tempo de aplicação de vinhaça pode ter influenciado as características dos macroporos no solo.

Ainda é possível concluir que os resultados do teste Q para a distribuição dos macroporos (M) indicaram que a aplicação de vinhaça ao longo do tempo pode ter impactado as características dos macroporos do solo. Os grupos que receberam a aplicação de vinhaça por 15 anos e 30 anos apresentaram médias mais altas em comparação com o grupo que não recebeu aplicação de vinhaça (SV).

5.3.5 ORIENTAÇÃO DOS MACROPOROS

Gráfico 4: Orientação dos Macroporos



Fonte: autora

A orientação dos macroporos é um fator importante na estrutura do solo e pode influenciar diretamente suas propriedades físicas e hidrológicas. Os dados fornecidos apresentam a distribuição dos macroporos em diferentes faixas de orientação em quatro períodos de tempo: SV, 2 anos, 15 anos e 30 anos.

No período de 2 anos, podemos notar que a maioria dos macroporos está concentrada nas faixas de orientação de 0-15 e 165-180 graus. Isso indica uma tendência de orientação preferencial dos macroporos nessa direção. Essa distribuição pode estar relacionada a fatores como o movimento da água no solo, a compactação do solo e as características do material parental.

Ao longo de 15 e 30 anos, observamos uma variação na distribuição dos macroporos. Embora a faixa de orientação de 0-15 e 165-180 graus ainda apresente uma quantidade significativa de macroporos, outras faixas de orientação, como 15-30 e 150-165 graus, 30-60 e 120-165 graus, e 60-75 e 105-120 graus, também começam a mostrar uma presença considerável de macroporos. Isso sugere uma

maior diversificação na orientação dos macroporos ao longo do tempo, possivelmente devido a processos como a atividade biológica, a ação das raízes das plantas e a evolução natural do solo.

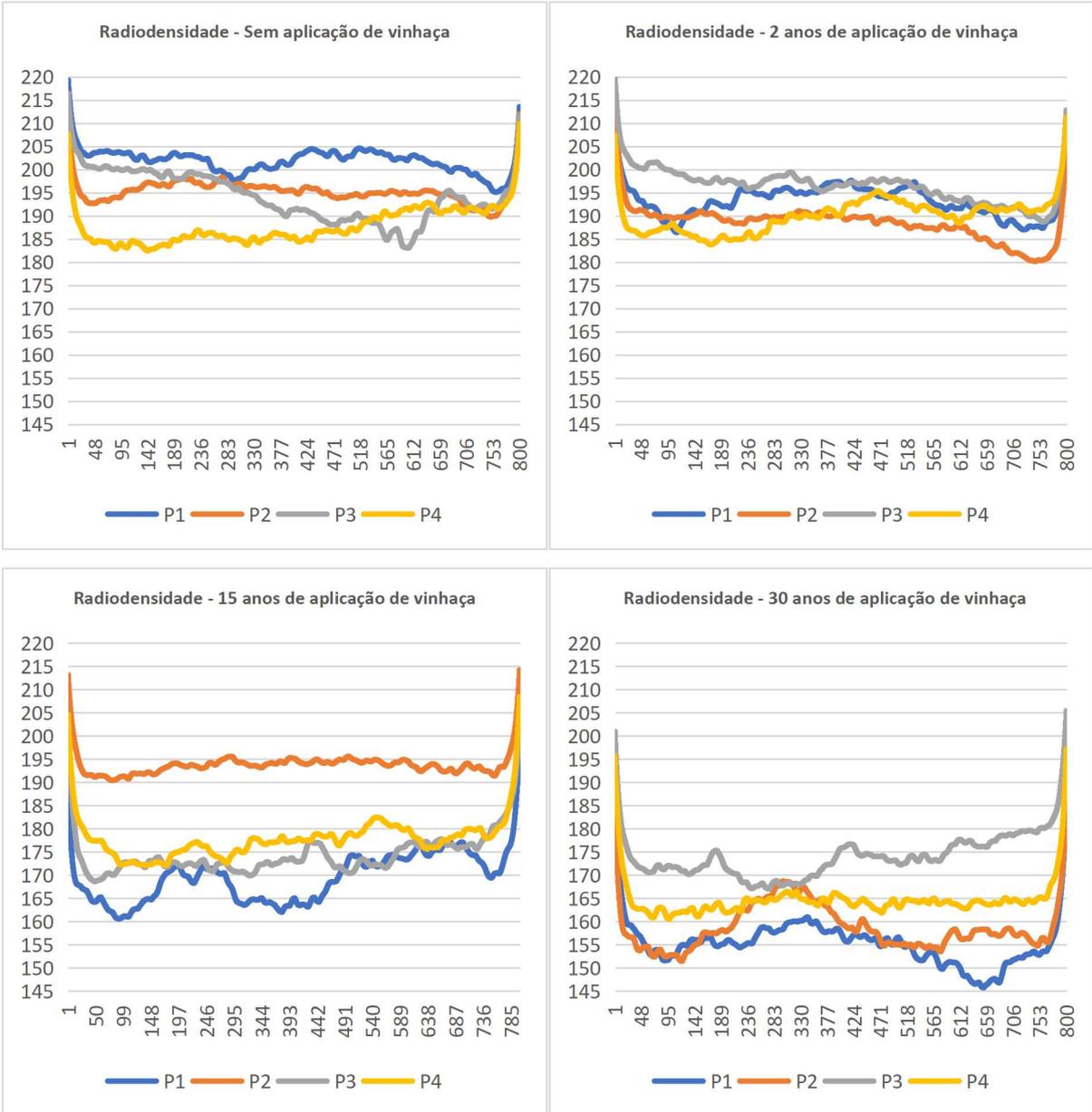
É interessante observar que, em alguns períodos, como 15 anos, a distribuição dos macroporos apresenta uma maior concentração em faixas específicas de orientação, enquanto em outros períodos, como 30 anos, a distribuição parece mais uniforme entre diferentes faixas de orientação. Essas variações podem estar relacionadas a fatores como as práticas de manejo adotadas, a vegetação presente e as condições climáticas.

Em resumo, a distribuição dos macroporos em diferentes faixas de orientação ao longo do tempo indica uma possível evolução na estrutura do solo. A presença de macroporos é fundamental para a aeração, drenagem e infiltração de água no solo, influenciando diretamente a produtividade das culturas e a sustentabilidade do sistema agrícola.

5.3.6 RADIODENSIDADE

Os gráficos a seguir apresentam a radiodensidade de cada amostra de solo com suas respectivas repetições.

Gráfico 5: Resultados da radiodensidade do solo



Fonte: autora

A tabela 16 apresenta os dados da estatística descritiva da radiodensidade.

Tabela 16: Resultados da estatística da radiodensidade

	SV				2 anos				
Média	201,86	195,28	194,20	187,62	Média	193,19	188,39	196,53	189,95
Erro padrão	0,09	0,08	0,19	0,14	Erro padrão	0,12	0,13	0,13	0,13
Desvio padrão	2,63	2,38	5,33	3,83	Desvio padrão	3,51	3,77	3,75	3,61
Variância amostral	6,90	5,67	28,43	14,70	Variância amostral	12,34	14,20	14,03	13,03
Amplitude	22,50	22,24	31,70	27,43	Amplitude	24,66	31,49	29,42	27,49
Máximo	217,59	211,98	214,74	209,87	Máximo	211,04	211,61	218,12	211,24

	15 anos				30 anos				
	SV	2 ANOS	15 ANOS	30 ANOS	SV	2 ANOS	15 ANOS	30 ANOS	
Mínimo	195,09	189,74	183,04	182,44	Mínimo	186,38	180,12	188,70	183,75
Média	169,50	193,80	174,27	177,77	Média	155,25	158,73	174,09	164,58
Erro padrão	0,19	0,09	0,16	0,15	Erro padrão	0,17	0,18	0,18	0,13
Desvio padrão	5,36	2,42	4,39	4,28	Desvio padrão	4,91	4,97	5,02	3,79
Variância amostral	28,70	5,84	19,30	18,31	Variância amostral	24,10	24,66	25,21	14,37
Amplitude	37,16	23,80	34,38	36,41	Amplitude	40,31	36,38	38,39	36,57
Máximo	197,70	214,19	203,00	208,46	Máximo	186,02	187,81	205,40	197,07
Mínimo	160,54	190,39	168,62	172,05	Mínimo	145,71	151,43	167,01	160,50

Fonte: autora

RADIODENSIDADE MÉDIA

A tabela 17 apresenta os dados do teste de Shapiro-Wilk para radiodensidade média.

Tabela 17: Resultados do teste de Shapiro-Wilk

Shapiro-Wilk Test				
	SV	2 ANOS	15 ANOS	30 ANOS
W-stat	0,974007	0,961409	0,897395	0,952321
p-value	0,866116	0,787774	0,418235	0,730638
Alpha	0,05	0,05	0,05	0,05
Normal	Yes	Yes	Yes	yes

Fonte: autora

Observa-se que todos os p-values foram maiores do que 0,05 ($p > 0,05$), com isso, todos os tratamentos tem distribuição normal. Com isso, verifica-se a homogeneidade dos dados através do teste de Levene's conforme tabela 18.

Tabela 18: Teste de Levene's

Levene's Tests

Type	p-value
means	0,414555
medians	0,607298
trimmed	0,414555

Fonte: autora

Os parâmetros do teste de Levene's foram maiores que 0,05, logo, considera-se a hipótese nula, onde as variâncias dos grupos apresentam homogeneidade. Como os dados são independentes, pode-se concluir que as exigências da análise de variância foram atendidas, logo os dados foram submetidos a ANOVA conforme tabela 19.

Tabela 19: Teste da ANOVA

ANOVA								
Sources	SS	df	MS	F	P value	Eta-sq	RMSSE	Omega Sq
Between Groups	2506,937	3	835,6455	14,80091	0,000246	0,787244	1,923598	0,721268
Within Groups	677,5086	12	56,45905					
Total	3184,445	15	212,2963					

Fonte: autora

Observa-se pelos resultados que $p < 0,05$, logo rejeita-se a hipótese nula e verifica-se pelo teste de TUKEY HSD/KRAMER quais grupos apresentam diferença significativa, conforme tabela 20.

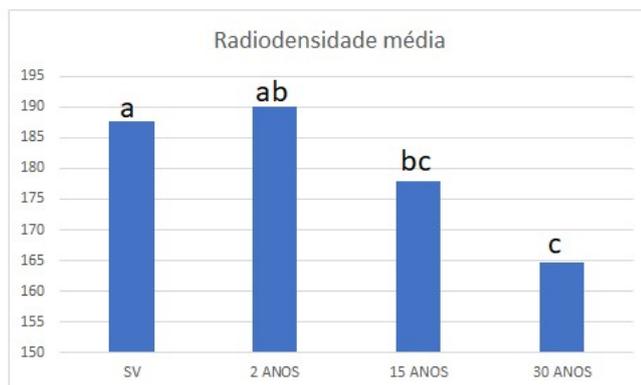
Tabela 20: Teste de TUKEY

Q TEST									
group 1	group 2	Mean	std err	q-stat	Lower	Upper	p-value	mean-crit	Cohen d
SV	2 ANOS	2,722062	3,756962	0,724538	-13,0534	18,49754	0,954559	15,77548	0,362269
SV	15 ANOS	15,89926	3,756962	4,231945	0,123774	31,67474	0,048008	15,77548	2,115973
SV	30 ANOS	31,5612	3,756962	8,400725	15,78572	47,33669	0,000343	15,77548	4,200363
2 ANOS	15 ANOS	13,17719	3,756962	3,507407	-2,59829	28,95268	0,114111	15,77548	1,753703
2 ANOS	30 ANOS	28,83914	3,756962	7,676187	13,06366	44,61462	0,000762	15,77548	3,838093
15 ANOS	30 ANOS	15,66195	3,756962	4,16878	-0,11354	31,43743	0,051856	15,77548	2,08439

Fonte: autora

O gráfico 6 apresenta os dados referente a estatística relativo as médias da radiodensidade.

Gráfico 6: Radiodensidade média



Fonte: autora

Com base nos resultados do Q Test, que é um teste de comparação múltipla, pode-se representar as diferenças significativas entre os grupos por letras.

SV e 2 ANOS: Não há diferença significativa ($p > 0,05$).

SV e 15 ANOS: Diferença significativa ($p < 0,05$).

SV e 30 ANOS: Diferença significativa ($p < 0,05$).

2 ANOS e 15 ANOS: Não há diferença significativa ($p > 0,05$).

2 ANOS e 30 ANOS: Diferença significativa ($p < 0,05$).

15 ANOS e 30 ANOS: Não há diferença significativa ($p > 0,05$).

A diminuição da radiodensidade observada nos grupos de 15 anos e 30 anos pode indicar uma maior porosidade do solo. A aplicação de vinhaça pode contribuir para a formação de macroporos, que são poros de tamanho maior que facilitam a movimentação da água e do ar no solo. Essa maior porosidade pode resultar em uma menor densidade do solo, refletida pela radiodensidade.

Além disso, a aplicação de vinhaça ao longo do tempo pode ter outros efeitos no solo, como o aumento da atividade microbiana e a liberação de nutrientes. Esses fatores podem contribuir para a formação de agregados de solo e a melhoria da estrutura, o que também pode influenciar na radiodensidade.

CONCLUSÃO

Este estudo investigou a influência do tempo de aplicação da vinhaça no solo por meio da tecnologia de tomografia computadorizada de raio-X, com o objetivo de compreender seus efeitos na estrutura do solo em relação à macroporosidade, radiodensidade e formação de agregados. Além disso, explorou a relação entre as práticas de gestão da indústria sucroalcooleira e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), visando contribuir para estratégias alinhadas com o desenvolvimento sustentável.

Os resultados obtidos confirmaram a hipótese levantada, demonstrando que o tempo de aplicação da vinhaça exerce uma influência significativa na estrutura do solo. A análise por tomografia computadorizada de raio-X revelou mudanças na distribuição dos poros, na radiodensidade e na formação de agregados do solo ao longo do tempo de exposição à vinhaça. Esses resultados destacam a importância de considerar o gerenciamento da vinhaça como um fator crítico na manutenção da qualidade do solo e na sustentabilidade do setor sucroalcooleiro.

Além disso, a exploração da relação entre as práticas de gestão e os ODS revelou que a adoção de estratégias alinhadas com o desenvolvimento sustentável é fundamental para enfrentar os desafios ambientais e socioeconômicos. A integração dos ODS nas práticas de manejo da indústria sucroalcooleira pode resultar em benefícios tanto econômicos quanto ambientais, contribuindo para um futuro mais equilibrado e próspero.

Em síntese, este estudo reforça a importância da pesquisa interdisciplinar e da aplicação de tecnologias inovadoras para compreender as interações complexas entre práticas agrícolas, impactos ambientais e desenvolvimento sustentável. Os resultados oferecem dados valiosos para a gestão responsável da vinhaça e para a formulação de estratégias que permitam o crescimento do setor sucroalcooleiro de forma ambientalmente responsável e socialmente benéfica, em sintonia com os objetivos globais de sustentabilidade.

O método de Otsu mostrou-se eficaz na segmentação automática de imagens em regiões de interesse (SOLO, INTER e PORO). As variações nas faixas de limiarização entre os grupos de amostras indicam possíveis diferenças nas características das amostras e ressaltam a importância de considerar essas variações ao realizar análises quantitativas ou qualitativas das imagens. A análise das faixas de limiarização pode fornecer informações valiosas sobre as propriedades das amostras e suas variações ao longo do tempo.

Os resultados do teste de normalidade de Shapiro-Wilk mostraram que os dados do grupo de 15 anos não apresentaram distribuição normal, justificando a escolha de métodos não paramétricos para análise estatística. O teste de Kruskal-Wallis seguido pelo teste de Dunn confirmou que as diferenças de macroporosidade entre os grupos eram estatisticamente significativas.

A análise estatística demonstrou que a macroporosidade do solo aumenta de maneira significativa com o aumento do tempo de aplicação de vinhaça. A aplicação contínua da vinhaça vem influenciando positivamente a estrutura do solo, resultando em uma maior porosidade.

O gráfico de boxplot complementou a análise, permitindo a visualização da distribuição da macroporosidade e destacando as diferenças entre os grupos. A presença de outliers em alguns grupos indica a presença de valores discrepantes, o que pode estar relacionado a fatores locais ou heterogeneidades do solo.

Com base nos resultados estatísticos, pode-se concluir que a aplicação de vinhaça ao longo do tempo tem um impacto significativo na radiodensidade das amostras de solo. Os grupos com maior tempo de aplicação de vinhaça (15 anos e 30 anos) apresentaram médias significativamente menores de radiodensidade em comparação com os grupos de SV e 2 anos.

Em conclusão, a análise científica dos dados de macroporosidade por volume, juntamente com a combinação de análise estatística e visualização gráfica, evidenciou que a aplicação de vinhaça ao longo do tempo está associada ao aumento da macroporosidade do solo. Isso reforça a importância da análise detalhada das características do solo em resposta a práticas agrícolas, fornecendo informações relevantes para o manejo sustentável e produtivo das áreas agrícolas.

REFERÊNCIAS

AMZIANE, S. Bio-aggregates Based Building Materials. [s.l: s.n.]. v. 23

ARSHAD, M. A.; MARTIN, S. Identifying critical limits for soil quality indicators in agro-ecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v.88, n.2, p.153-160, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00252-3](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00252-3)

BALDOCK, J. A.; NELSON, P. N. Soil organic matter. In: SUMMER, M.E. (Ed.). *Handbook of soil science*. Georgia, USA: University of Georgia, 2000. p.B25-B84.

BERALDO, J. M. G; SCANNAVINO JUNIOR, F. DE A.; CRUVINEL, P. E. Application of x-ray computed tomography in the evaluation of soil porosity in soil management systems. *Engenharia Agrícola*, v. 34, n. 6, p. 1162-1174, 2014. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162014000600012>

BRONICK, C. J.; Lal, R. (2005) Estrutura e manejo do solo: uma revisão. *Geoderma*, 124, 3-22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.03.005>

DOYON, D. Tomografia computadorizada 2.ed. Rio de Janeiro: MEDSI, 2004. 392p.

GARBOUT, A.; MUNKHOLM, L. J.; HANSEN, S. B. Tillage effects on topsoil structural quality assessed using X-ray CT, soil cores and visual soil evaluation. *Soil and Tillage Research*, v. 128, p. 104-109, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.11.003>

HILLEL, D. Environmental soil physics: Fundamentals, applications, and environmental considerations. Academic press, 1998.

KODAMA, Y.; AYERS, G. D.; CURLEY, S. A.; ABDALLA, E. K.; VAUTHEY, J. N.; CHARNSANGAVEJ, C. Comparison of CT methods for determining the fat content of the liver. *Am J Roentgenol*, v. 188, n.5, p. 1307-1321, 2007. <https://doi.org/10.2214/AJR.06.0992>

MARCHINI, D. C.; LING, T. C.; ALVES, M. C.; CRESTANA, S.; FILHO, S. N. S.; ARRUDA, O. G. Matéria orgânica, infiltração e imagens tomográficas de Latossolo em recuperação sob diferentes tipos de manejo. *R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental*, v. 19, n. 6, p. 574-580, 2015. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n6p574-580>

MARCHIORI, A.; SILVA, I. C. C.; BONELLI, M. A.; ZANOTTI, L. C. R. A.; SIQUEIRA, D. B.; ZANOTTI, A. P.; COSTA, F. S. Use of computed tomography for investigation of hepatic lipidosis in captive chelonoidis carbonaria (spix, 1824). *Journal of Zoo and Wildlife Medicine*. v. 46. n. 2. p.320-324, 2015. <https://doi.org/10.1638/2014-0178R2.1>

PAGLIAI, M.; MARSILI, A.; SERVADIO, P.; VIGNOZZI, N.; PELLEGRINI, S. Changes in some physical properties of a clay soil in Central Italy following the passage of rubber tracked and wheeled tractors of medium power. *Soil and Tillage Research*, v. 73, n. 1, p. 119-129, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(03\)00105-3](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(03)00105-3)

PAGLIAI, M.; PELLEGRINI, S.; VIGNOZZI, N.; ROUSSEVA, S.; GRASSELLI, O. The quantification of the effect of subsoil compaction on soil porosity and related physical

properties under conventional to reduced management practices. *Advances in GeoEcology*, n. 32, p. 305-313, 2000.

PAGLIAI, M.; VIGNOZZI, N.; PELLEGRINI, S. Soil structure and the effect of management practices. *Soil and Tillage Research*, v. 79, n. 2, p. 131-143, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.07.002>

PASSARIN, A. L.; RODRIGUEIRO, E. L.; PAZZOTTI, C. R.; MEDINA, C. C. Caracterização de agregados em um Latossolo Vermelho distroférico típico submetido a diferentes doses de vinhaça. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.31, n.6, p. 1255-1260, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000600004>

REICHARDT, K. *Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera*, 1976.

SILVA, I. C. C. Tomografia computadorizada pulmonar de testalines brasileiros hígidos *Disertação (Mestrado em Ciência Veterinária) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife*, p. 63, 2015.

STEVENSON, F. J. *Humus chemistry: genesis, composition, reactions*. New York: John Wiley, 1994. 496 p.

APÊNDICE A – TESTE DE NORMALIDADE

A				
Macroporosidade	SV	2 ANOS	15 ANOS	30 ANOS
W-stat	0,903305	0,885495	0,711341	0,92213
p-value	0,447658	0,362637	0,015613	0,548953
alpha	0,05	0,05	0,05	0,05
normal	yes	Yes	no	yes
B				
Distribuição da Macroporosidade P	SV	2 ANOS	15 ANOS	30 ANOS
W-stat	0,935472	0,921114	0,95825	0,986655
p-value	0,626922	0,543208	0,767893	0,93977
alpha	0,05	0,05	0,05	0,05
normal	yes	yes	Yes	yes
C				
Distribuição da Macroporosidade M	SV	2 ANOS	15 ANOS	30 ANOS
W-stat	0,853275	0,873611	0,893733	0,967318
p-value	0,236944	0,312066	0,400603	0,824813
alpha	0,05	0,05	0,05	0,05
normal	yes	yes	yes	yes
d				
Distribuição da macroporosidadeG	SV	2 anos	15 anos	30 anos
W-stat	0,909685	0,937902	0,930568	0,853686
p-value	0,480733	0,641576	0,597742	0,238324
alpha	0,05	0,05	0,05	0,05
normal	Yes	yes	yes	yes
E				
Nº de macroporos	SV	2 ANOS	15 ANOS	30 ANOS
W-stat	0,973951	0,945935	0,888905	0,988954
p-value	0,865776	0,690823	0,378063	0,952051
alpha	0,05	0,05	0,05	0,05
normal	yes	yes	yes	yes
F				
Distribuição do Nº de Macroporos P	SV	2 ANOS	15 ANOS	30 ANOS
W-stat	0,962305	0,965385	0,866471	0,991597
p-value	0,793407	0,812728	0,284068	0,965505
alpha	0,05	0,05	0,05	0,05
normal	yes	yes	yes	yes
g				
Distribuição do Nº de Macroporos M	SV	2 ANOS	15 ANOS	30 ANOS
W-stat	0,888227	0,876271	0,969608	0,96693
p-value	0,374964	0,322953	0,839051	0,822388
alpha	0,05	0,05	0,05	0,05
normal	yes	yes	yes	yes
h				
Distribuição do Nº de Macroporos G	SV	2 ANOS	15 ANOS	30 ANOS
W-stat	0,871876	0,962742	0,946438	0,798073
p-value	0,305097	0,796151	0,693943	0,098809
alpha	0,05	0,05	0,05	0,05
normal	yes	yes	yes	yes

APÊNDICE B – TESTE DE HOMOGENEIDADE

A		C		d	
Levene's Tests – Macroporosidade		Levene's Tests – Distribuição dos macroporos M		Levene's Tests – Distribuição dos macroporos G	
type	p-value	type	p-value	type	p-value
means	0,993887	means	0,109463	means	0,03029
medians	0,968447	medians	0,297174	medians	0,071353
trimmed	0,993887	trimmed	0,109463	trimmed	0,03029
B		E		h	
Levene's Tests – Distribuição dos macroporos P		Levene's Tests – N° de macroporos		Levene's Tests - Distribuição do número de macroporos P	
type	p-value	type	p-value	type	p-value
means	0,286442	means	0,997409	means	0,997409
medians	0,344195	medians	0,997138	medians	0,997138
trimmed	0,286442	trimmed	0,997409	trimmed	0,997409
F		g		h	
Levene's Tests – Distribuição do número de macroporos P		Levene's Tests – Distribuição do número de macroporos M		Levene's Tests - Distribuição do número de macroporos G	

type	p-value	type	p-value	type	p-value
means	0,977658	means	0,083901	means	0,170179
medians	0,982913	medians	0,104761	medians	0,279026
trimmed	0,977658	trimmed	0,083901	trimmed	0,170179