



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

ALANE SILVA DE AQUINO DOS SANTOS

**PLANTIO DE EUCALIPTO EM SUBSTITUIÇÃO AO CULTIVO DA CANA-DE-
AÇÚCAR E SEU IMPACTO NAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO SOLO NA
ZONA DA MATA DE PERNAMBUCO**

Recife

2023

ALANE SILVA DE AQUINO DOS SANTOS

**PLANTIO DE EUCALIPTO EM SUBSTITUIÇÃO AO CULTIVO DA CANA-DE-
AÇÚCAR E SEU IMPACTO NAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO SOLO NA
ZONA DA MATA DE PERNAMBUCO**

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

Orientadora: Prof.^a Maria do Socorro Bezerra de Araújo

Coorientador: Prof^o. Antonio Celso Dantas Antonino

Recife

2023

Catálogo na Fonte
Bibliotecário: Rodrigo Leopoldino Cavalcanti I, CRB4-1855

S237p

Santos, Alane Silva de Aquino dos.

Plantio de eucalipto em substituição ao cultivo da cana-de-açúcar e seu impacto nas características físicas do solo na Zona da Mata de Pernambuco / Alane Silva de Aquino dos Santos. – 2023.

96 f. : il. ; tab. ; 30 cm.

Orientadora : Maria do Socorro Bezerra de Araújo.

Coorientador : Antonio Celso Dantas Antonino.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, CFCH. Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Recife, 2023.

Inclui referências e apêndices.

1. Meio ambiente. 2. Mudança de uso. 3. Carbono. 4. Voxel. 5. Lacunaridade. 6. Sucularidade. 7. Zona da Mata (PE : Mesorregião). I. Araújo, Maria do Socorro Bezerra de (Orientadora). II. Antonino, Antonio Celso Dantas (Coorientador). III. Título.

363.7 CDD (22.ed.)

UFPE (BCFCH2023-164)

ALANE SILVA DE AQUINO DOS SANTOS

**PLANTIO DE EUCALIPTO EM SUBSTITUIÇÃO AO CULTIVO DA CANA-DE-
AÇÚCAR E SEU IMPACTO NAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO SOLO NA
ZONA DA MATA DE PERNAMBUCO**

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

Aprovado em: 24/08/2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Maria do Socorro Bezerra de Araújo (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Prof^a. Dr^a. Maria do Carmo Martins Sobral (Examinadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Prof. Dr. Brivaldo Gomes de Almeida (Examinador Externo)
Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE

Prof. Dr. Leandro Ricardo Rodrigues de Lucena (Examinador Externo)
Unidade Acadêmica de Serra Talhada - UFRPE

Prof. Dr. Rafael Rodolfo de Melo (Examinador Externo)
Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA

Prof. Dr. Wagner Luís da Silva Souza (Examinador Externo)
Instituto Federal de Pernambuco/Campus Barreiro

Dedico esta tese,

A minha mãe, Anacleia Chaves, por ser meu alicerce, minha protetora e por acreditar no meu potencial sempre.

A mãezinha, Fransquinha Gomes, como presente de aniversário dos seus 96 anos e pelo seu exemplo de resiliência.

Ao paizinho, Manoel Rodrigues (in memoriam) pelo exemplo de coragem.

Ao meu amado e amigo, Carlos Renato dos Santos, por todo companheirismo e dedicação.

A minha irmã Andressa Rochelle pela cumplicidade e amizade.

Aqueles que são esperança e me estimulam a correr atrás do futuro, minhas filhas Francivane Carvalho (Anny), Aryadne Clear Chaves e meu filho Arthur Ben Chaves.

Amo vocês!

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me fazer forte e sempre ter me guiado em todos os momentos de decisões durante essa jornada.

A minha família, mãe Anacleia Chaves, avó Fransquinha Gomes, avô Manoel Rodrigues (*in memoriam*), irmã Andressa Rochelle, filhas Anny Carvalho, Aryadne Chaves e filho Arthur Chaves pelo apoio, torcida e confiança que depositam em mim e obrigada pela compreensão, pelos momentos que não pude estar junto a vocês.

Ao Carlos Renato, por me incentivar a seguir nas horas de aflição, quando eu achava que ia dar tudo errado e que queria desistir. Obrigada por ajudar nas coletas das amostras de solo, por lavar minhas vidrarias no laboratório e por estar sempre disposto a ajudar.

A minha sogra Maria Aparecida Pereira e ao Francisco Pereira (tio Chico) por todo apoio durante estes anos. Agradeço a paciência que tiveram, em ver eu transformar o lar de vocês em uma casa de vegetação. Obrigada por todo apoio logístico para que realizasse minhas coletas de uma forma menos dispendiosa

A minha orientadora, professora Socorro Bezerra por todos os direcionamentos e pela paciência durante estes anos de orientação.

Ao Laboratório de Física do Solo/UFRPE pelo apoio logístico para realização das análises de granulometria dos solos. Ao professor Brivaldo Almeida por ceder o laboratório e ao técnico Eudes por auxiliar nessas análises.

Ao Laboratório de Física do Solo/UFPE pelo apoio logístico para obtenção das imagens tomográficas do solo. Ao Professor Antônio Antonino por ceder o microtomógrafo de raios-X e ao técnico Daniel por auxiliar nas imagens.

Ao colega Dário Primo pelo auxílio nas análises de estoque C dos solos.

Ao Manoel Vitalino (Irmão Manoel) que com seu conhecimento empírico, não menos importante, me ajudou nos dias de coleta das amostras do solo. Com ele a chegada nos locais de coleta foi mais fácil, devido sua experiência com área de cana-de-açúcar e mata.

Agradeço aos amigos e amigas que fiz durante esse período, que quero levar para a vida. Elise Dias, obrigada pela companhia e disposição em me ajudar nas análises do solo, por construir meus mapas, inclusive os mais lindos. Conte comigo sempre!

Agradeço a Ana Paula Gondra, Héilton Santos e Marcela Sales, sempre unidos, principalmente durante a pandemia, o período mais difícil, tempo de incertezas, inseguranças, mas ninguém soltou a mão de ninguém. Obrigada, vocês tornaram os dias de desânimo mais leves.

Aos avaliadores desta Tese, professores Brivaldo Almeida, Leandro Lucena, Wagner Souza, Rafael Melo e a professora Maria do Carmo Sobral, por terem aceitado o convite e pelas valiosas considerações para este trabalho.

A todos meus professores da Pós-graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente/UFPE, que contribuíram na minha formação.

Sinto-me muito feliz por este momento e muita gratidão por todos aqueles que colaboraram direta ou indiretamente para conclusão desse trabalho.

RESUMO

A mudança do uso solo tem causado a redução do estoque de carbono (C), contribuindo para emissão dos gases de efeito estufa para atmosfera, principalmente o dióxido de carbono (CO₂). Além disso, tem impactado negativamente o espaço poroso do solo. Deste modo, o presente estudo tem como objetivo avaliar o impacto da conversão da cana-de-açúcar para eucalipto no estoque de C e o espaço poroso do solo. Este estudo foi realizado nos municípios de Chã de Alegria e Paudalho, localizados na Zona da Mata pernambucana. Foi selecionada uma área de mata, duas áreas de eucalipto com sete anos de plantio e duas áreas de cana-de-açúcar, com 15 e 17 anos de plantio. Em cada uso foram coletadas amostras deformadas para determinação do carbono orgânico e granulometria, e amostras indeformadas, para obtenção das imagens tomográficas e densidade, nas profundidades 0-10 e 10-20 cm, exceto, as amostras para tomografia que foram coletadas apenas na camada 0-10 cm. O estoque de C foi determinado a partir da densidade e carbono orgânico total do solo. O espaço poroso foi avaliado através da porcentagem de espaços vazios nos solos e medidas de lacunaridade e sucolaridade. Observou-se que as áreas cultivadas com eucalipto estocaram mais carbono que os plantios de cana-de-açúcar na classe argissolo, mostrando que o eucalipto tem potencial de melhorar o estoque de C no solo. Porém, no latossolo o estoque de C foi maior na área com plantio de cana-de-açúcar, mostrando que o potencial do eucalipto de estocar carbono, depende das condições do ambiente em que o plantio está inserido. A porcentagem de vazios das imagens, valores de lacunaridade e sucolaridade, obtiveram melhores desempenhos nos solos cultivados por eucalipto, apresentando melhor distribuição de poros e maior capacidade de um líquido atravessar o solo, mostrando que o eucalipto tem potencial de melhorar o espaço poroso do solo.

Palavras-chave: mudança de uso; carbono; *voxel*; lacunaridade; sucolaridade.

ABSTRACT

The change in land use has caused a reduction in carbon (C) stocks, contributing to the emission of greenhouse gases into the atmosphere, mainly carbon dioxide (CO₂). Furthermore, it has negatively impacted the soil pore space. Therefore, the present study aims to evaluate the impact of converting sugar cane to eucalyptus on C stock and soil pore space. This study was carried out in the municipalities of Chã de Alegria and Paudalho, located in the Zona da Mata of Pernambuco. An area of forest was selected, two areas of eucalyptus with seven years of planting and two areas of sugar cane, with 15 and 17 years of planting. In each use, deformed samples were collected to determine organic carbon and particle size, and undeformed samples, to obtain tomographic images and density, at depths 0-10 and 10-20 cm, except for tomography samples that were collected only in the layer 0-10cm. The soil's density and total organic carbon determined the C stock. The pore space was evaluated through the percentage of empty spaces in the soil and measurements of lacunarity and susolarity. It was observed that areas cultivated with eucalyptus stored more carbon than sugar cane plantations in the argisol class, showing that eucalyptus has the potential to improve C stock in the soil. However, in the oxisol the C stock was higher in the area with sugarcane planting, showing that the potential of eucalyptus to store carbon depends on the environmental conditions in which the plantation is located. The percentage of voids in the images, lacunarity and susolarity values, obtained better performances in soils cultivated with eucalyptus, presenting a better distribution of pores and greater capacity for a liquid to pass through the soil, showing that eucalyptus has the potential to improve the pore space of the soil.

Keywords: use change; carbon; voxel; lacunarity; secularity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	A: Floresta plantada por Mesorregião-Pernambuco, em hectares; B: Área de plantação de eucalipto na Zona da Mata pernambucana, em hectares.....	18
Figura 2:	Área plantada com eucalipto por município da Zona da Mata Norte Pernambucana (LI- Lagoa de Itaenga, CA- Chã de Alegria, TR- Tracunhaém, CP- Carpina, PD-Paudalho, NM-Nazaré da Mata)	19
Figura 3:	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) inclusos na Agenda 30	29
Figura 4:	Modelo da forma de avaliação do grau de percolação de uma imagem: (a) imagem original (9x9): pixels pretos representam posições vazias ou lacunas; (b) mostra as quatro direções possíveis que um fluido pode inundar a imagem.....	35
Figura 5:	Exemplos de possíveis caminhos de percolação de um fluido (inundação) em uma imagem.....	35
Figura 6:	Indicação do sentido da ordem de pressão sobre as caixas: (a) Exemplo de pressão sobre caixas 3x3 para a figura 5a; (b) Exemplo de pressão sobre caixas 1x1 para a figura 5c.....	36
Figura 7:	Exemplo da forma de divisão das imagens intermediárias da figura 7 em caixas de tamanhos diferentes: (a) Figura 7a com $d=3$, produzindo caixas de tamanho 3x3 pixels; (b) Figura 7b com $d=9$, produzindo caixas de 1x1 pixels.....	36
Figura 8:	Localização geográfica dos municípios de Chã de Alegria e Paudalho em Pernambuco, com indicação das áreas de coletas das amostras de solo.....	49
Figura 9:	Aspecto da área próxima ao local de coleta dos solos após o recolhimento da cana cortada, no município de Chã de Alegria-PE.....	40
Figura 10:	Características climáticas de janeiro- outubro de 2022, dos municípios de Chã de Alegria e Paudalho. A: temperatura; B: precipitação.....	41
Figura 11:	Classes dos solos das áreas de coletas na Usina Petribu, nos municípios de Chã de Alegria e Paudalho-PE.....	42
Figura 12:	Coleta de amostras indeformadas de solo com cilindro de PVC, em Argissolo e Latossolo sob mata nativa e cultivo com eucalipto e cana-de-açúcar, nos municípios de Chã de Alegria e Paudalho, Pernambuco.....	47

Figura 13:	Coleta de amostras indeformadas de solo com cilindro de PVC, em Argissolo e Latossolo sob mata nativa e cultivo com eucalipto e cana-de-açúcar, nos municípios de Chã de Alegria e Paudalho, Pernambuco.....	48
Figura 14:	Posição do cilindro branco de pvc contendo a amostra de solo, dentro do tomógrafo de raio-X para escaneamento e obtenção das imagens.....	49
Figura 15:	Escala de Hounsfield.....	50
Figura 16:	Exemplo de segmentação de imagens via Entropic Plans Correlations (EPC) obtidas por tomografia de raios-X.....	54
Figura 17:	Estoque de C do solo (Mg ha^{-1}) em Argissolo e Latossolo sob mata e cultivo com eucalipto e cana-de-açúcar, nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm, coletados nos municípios de Chã de Alegria e Paudalho-PE.....	55
Figura 18:	Correlação entre concentração de carbono orgânico total e estoque de C em Argissolo e Latossolo sob mata (M=verde) e cultivo com eucalipto (E1 e E2= azul) e cana-de-açúcar (C1 e C2= vermelho), nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm, coletados nos municípios de Chã de Alegria e Paudalho, Pernambuco.....	56
Figura 19:	Percentual de poros de Latossolo e Argissolo sob mata (lilás), cultivo com eucalipto (laranja) e cultivo com cana-de-açúcar (verde), coletados nos municípios de Chã de Alegria e Paudalho, Pernambuco.....	56
Figura 20:	Impacto no expoente beta ajustado dos dados após a conversão do canavial por eucalipto, em Argissolo e Latossolo sob mata e cultivo com eucalipto e cana-de-açúcar, coletados nos municípios de Chã de Alegria e Paudalho, Pernambuco.....	57
Figura 21:	Sucolaridade de Argissolo e Latossolo sob mata (lilás) e cultivo com eucalipto (laranja) e cana-de-açúcar (verde), coletados nos municípios de Chã de Alegria e Paudalho, Pernambuco.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1:	Áreas de florestas plantadas nos estados do Nordeste, em hectares.....	18
Tabela 2:	Produção dos principais produtos oriundos da silvicultura no Brasil.....	19
Tabela 3:	Participação dos grupos florestais no valor da produção da silvicultura (R\$)..	23
Tabela 4:	Características de manejo e práticas fitossanitárias dos usos e cobertura do solo, nas áreas de coleta dos solos na Usina Petribu, nos municípios de Chã de Alegria e Paudalho, Pernambuco.....	40
Tabela 5:	Atributos das classes de solo nas áreas de coletas de Chã de Alegria e Paudalho- PE.....	43
Tabela 6:	Granulometria, densidade (Ds) e carbono orgânico total (COT) em amostras de Argissolo e Latossolo sob mata nativa e cultivo com eucalipto e cana-de-açúcar, coletados nos municípios de Chã de Alegria e Paudalho, Pernambuco.....	53
Tabela 7:	Análise de variância dos dados de para comparação do percentual de poros, lacunaridade e sucularidade de amostras de Latossolo sob mata e cultivo com eucalipto e cana-de-açúcar, coletado nos municípios de Chã de Alegria e Paudalho, Pernambuco.....	59
Tabela 8:	Teste T para comparação do percentual de poros, lacunaridade e sucularidade de amostras de Argissolo sob mata nativa e cultivo com eucalipto e cana-de-açúcar, coletado nos municípios de Chã de Alegria e Paudalho, Pernambuco	59

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
2.1	IMPLANTAÇÃO DA SILVICULTURA DE EUCALIPTO NO BRASIL.....	17
2.2	IMPACTOS SOCIOECONÔMICOS E AMBIENTAIS NEGATIVOS GERADOS PELO PLANTIO DE EUCALIPTO.....	20
2.3	IMPACTOS SOCIOECONÔMICOS E AMBIENTAIS POSITIVOS GERADOS PELO PLANTIO DE EUCALIPTO.....	22
2.4	IMPACTOS DO PLANTIO DE EUCALIPTO NO ESTOQUE DE C DO SOLO E NAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS.	25
2.4.1	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e os solos.....	27
2.5	IMPACTO DO PLANTIO DE EUCALIPTO NO ESPAÇO POROSO DO SOLO.....	30
2.6	IMPACTOS SOCIOECONÔMICOS E AMBIENTAIS NEGATIVOS ORIUNDOS DO PLANTIO DE CANA-DE- AÇÚCAR.....	31
2.7	ESTUDO DOS SOLOS E AS MEDIDAS DE LACUNARIDADE E SUCOLARIDADE.....	32
2.7.1	Lacunaridade.....	33
2.7.1.1	Método fixed grid (MFG).....	34
2.7.2	Sucolaridade.....	34
2.7.2.1	Análise da sucolaridade de uma imagem binária na direção de cima para baixo.....	36
3	OBJETIVOS.....	38
3.1	GERAL.....	38
3.2	ESPECÍFICOS.....	38
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	39
4.1	ÁREAS DE ESTUDO.....	39
4.2	ANÁLISE DE ESTOQUE DE CARBONO.....	43
4.2.1	Coleta.....	43
4.2.2	Procedimentos em laboratório.....	43
4.2.3	Determinação do estoque de C dos diferentes usos dos solos.....	45
4.3	GRANULOMETRIA.....	45
4.3.1	Procedimentos em laboratório.....	46

4.4	TOMOGRAFIA DE SOLOS.....	47
4.4.1	Coleta das amostras.....	47
4.4.2	Aquisição e reconstrução de imagens 3D.....	47
4.4.3	Reconstrução das imagens.....	48
4.4.4	Segmentação das imagens.	49
4.4.5	Porcentagem de vazios nas imagens dos diferentes usos do solo.....	50
4.5	OBTENÇÃO DA MEDIDA DE LACUNARIDADE.....	51
4.6	OBTENÇÃO DA MEDIDA DE SUCULARIDADE.....	52
4.7	ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....	52
5	RESULTADOS.....	53
5.1	GRANULOMETRIA, CARBONO ORGÂNICO TOTAL E DENSIDADE NOS DIFERENTES USOS E CLASSES DE SOLOS.....	53
5.2	ESTOQUES DE C DOS DIFERENTES USOS E CLASSES DE SOLO.....	54
5.3	AVALIAÇÃO DO PERCENTUAL DOS POROS, LACUNARIDADE E SUCULARIDADE NOS DIFERENTES USOS E CLASSES DO SOLO.....	55
6	DISCUSSÃO.....	61
6.1	CARBONO ORGÂNICO TOTAL, DENSIDADE E ESTOQUE DE C NOS DIFERENTES USOS E CLASSES DE SOLOS.....	61
6.2	AVALIAÇÃO DOS POROS, LACUNARIDADE E SUCULARIDADE NOS DIFERENTES USOS DO SOLO.....	65
7	CONCLUSÕES.....	68
	REFERÊNCIAS.....	71
	APÊNDICE A - Tabela 9 e 10.....	79
	APÊNDICE B- Análise de lacunaridade com cubos de lado 2,4,8,16,32,6....	80
	APÊNDICE C- Artigo da esse publicado na revista contribuciones a las ciencias Sociales.....	81

1 INTRODUÇÃO

A silvicultura de eucalipto no Brasil vem se expandindo e fatores como, a adoção de boas práticas de manejo, o melhoramento genético e as condições edafoclimáticas do País, fazem da produtividade brasileira a mais alta em relação a outros países, levando em conta o volume de madeira produzido por área anualmente e o menor ciclo entre o plantio e a colheita do mundo (IBÁ, 2020). Além disso, o aproveitamento quase total dos produtos extraídos do eucalipto, o alto valor agregado na sua madeira para os diversos setores como construção civil, fins energéticos e para fabricação de papel e celulose, tornam essa atividade economicamente viável e altamente lucrativa, impulsionando investimentos em plantações de eucalipto (DE MOURA & ZAIDAN, 2017).

Em Pernambuco, na Zona da Mata, sua formação econômica desde o período colonial foi baseada na cana-de-açúcar. Nos últimos anos, parte do seu canavial está sendo convertido em eucalipto, principalmente em áreas declivosas. Essa substituição foi impulsionada pela crise econômica sobre o setor sucroenergético, pela redução de áreas cultivadas e devido ao fechamento de usinas, que tem levado ao empobrecimento na região, bem como, pelos altos custos operacionais da colheita de cana-de-açúcar em áreas de declive. Essas áreas necessitam de mais horas de mão de obra humana e de máquina. Com isso, a conversão do cultivo de cana-de-açúcar em plantios silviculturais, é vista como uma boa estratégia para economia e diversificação de matriz energética da região (JORNAL CANA, 2015).

Apesar das vantagens econômicas, a literatura tem reportado impactos socioambientais gerados pela plantação de eucalipto como a desapropriação de terras de camponeses, quilombolas e indígenas, bem como, a redução da oferta de emprego e êxodo rural, devido a expansão do eucalipto (LIMA et al., 2016; FANTINI et al., 2017; SENA et al., 2017; LIMA & BARBOSA, 2019). Além disso, acredita-se que o plantio de eucalipto consome muita água e contribuem para a diminuição do fluxo de rios, córregos e lençóis freáticos, causando desertificação do solo (AMAZONAS et al., 2017; CHRISTINA et al., 2017; LIMA, 2016; RAMOS et al., 2022). Para mais, o valor agregado da sua madeira, estimula o desmatamento de novas áreas de florestas nativas para implementação do plantio de eucalipto, culminando na perda da biodiversidade e impactando negativamente nas funções físico-químicas e biológicas do solo (AMSALU & HAILU, 2019; FENTIE et al., 2020; PEREIRA-SILVA et al., 2021; RODRIGUES et al., 2021; RAMOS et al., 2022; SOUZA et al., 2022).

Dentre as ameaças ao solo, a perda da matéria orgânica do solo (MOS) tem recebido mais atenção, devido ao importante papel que desempenha no ciclo do C e nas propriedades físicas do solo, sendo responsável por sua fertilidade (SANDERMAN et al., 2017). A MOS é

considerada o maior sumidouro de carbono (C) dentre os ecossistemas terrestres e atua na formação e estabilidade dos agregados do solo (JANZEN, 2004; SENA et al., 2017). O arranjo desses agregados, atuam na formação do espaço poroso, que influencia no comportamento físico-hídrico do solo atuando na produtividade do solo (BRADY & WEIL, 2013).

Mesmo com essas funções, a MOS tem sofrido degradação, induzida principalmente pela mudança do uso e cobertura da terra, onde são adotadas práticas de manejo tradicionais (aração e gradagem do solo) que realizam o revolvimento do solo e o desarranjo dos seus agregados. Como consequência, a oxidação da MOS libera CO₂ para atmosfera, diminuindo o estoque de C no solo, colaborando para as mudanças climáticas globais (PEREIRA-SILVA et al., 2021; AHMED et al., 2022). Além disso, afetam negativamente o espaço poroso do solo, causando sua compactação e influenciando negativamente na sua dinâmica físico-hídrica, assim como, no potencial agrícola do solo (SOARES et al., 2022).

Vale ressaltar, que esses impactos negativos não são específicos da conversão da vegetação nativa para eucalipto e sim de toda atividade comercial oriunda do desmatamento, inclusive da monocultura de cana-de-açúcar (ANDRADE & MATOS, 2018). Segundo Gurgel et al. (2022), a utilização de agrotóxicos e fertilizantes químicos nos solos dos canaviais contaminam o solo, água e ar. Para mais, com a queima é emitido gases do efeito estufa para atmosfera, contribuindo para o aquecimento global, além de gerar fumaça causando doenças respiratórias em pessoas que residem nas proximidades do canavial (GURGEL et al., 2022). Além disso, com a queima a MOS é removida juntamente com os nutrientes, deixando o solo mais compacto, prejudicando o desenvolvimento das plantas, além de diminuir drasticamente o estoque de carbono (GURGEL et al., 2022).

Por outro lado, estudos têm mostrado impactos ambientais positivos do cultivo de eucalipto, sendo destaque como uma atividade de baixo carbono (IBÁ, 2020). Logo, é utilizado no reflorestamento de áreas degradadas por outras atividades como pastagem e agricultura (IBÁ, 2022). Os impactos positivos estão relacionados ao aumento do sequestro e estoque de CO₂, tendo em vista o aumento desse gás na atmosfera, respondendo as esperadas elevações de temperatura, mitigando as mudanças climáticas (GHANNOUM et al., 2010; PAULUCIO et al., 2017; SENA et al., 2017; RAMOS et al., 2022). Segundo Ibá (2020), o setor de árvores comerciais no Brasil, que inclui o plantio de eucalipto, favorece a mitigação das mudanças climáticas através da remoção e estoque de C pelas árvores plantadas, onde o CO₂ atmosférico é convertido em biomassa através da fotossíntese. Com isso, o potencial da plantação de eucalipto em estocar C se alinha as metas dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Os ODS estão inclusos na Agenda 2030, adotada em 2015 pelos governantes de países

que formam a Organização das Nações Unidas (ONU), com a finalidade de acabar com a pobreza, impulsionar a proteção do meio ambiente e contribuir para o clima (IBÁ, 2021; ONU, 2023).

Além disso, o plantio de eucalipto em áreas degradadas, aumentou o teor de MOS, juntamente com estoque de C, reduziu a densidade, aumentou a porosidade do solo, impactando positivamente na sua infiltração, retenção de água e aeração (AMSALU & HAILU, 2019; FENTIE et al., 2020; PEREIRA-SILVA et al., 2021; RODRIGUES et al., 2021). Diante do exposto, a conversão de áreas degradadas para modelos florestais, principalmente para silvicultura de eucalipto está sendo realizada, com intuito de aumentar o estoque de C do solo e melhorar sua estrutura, bem como sua permeabilidade, fluxo de água e ar (RAMOS et al., 2022). Diante disso, o presente trabalho é fundamentado na seguinte hipótese: a substituição de áreas de canavial para plantio de eucalipto, contribui para o aumento do C no solo e melhorias no seu espaço poroso.

Em estudos de porosidade, erosão, escoamentos bifásicos, composição granulométrica, compactação e estrutura do solo (estabilidade dos agregados), técnicas fractais têm sido bastante utilizadas (SANTOS et al., 2020; OLIVEIRA et al., 2022; SINGH et al., 2022; CHEN & FENG et al., 2023; WANG et al., 2023; WU et al., 2023). Essas técnicas são capazes de caracterizar as formas naturais irregulares encontradas no espaço poroso do solo com mais precisão. Esta é uma de suas principais vantagens, tendo em vista que as técnicas convencionais que utilizam as formas geométricas regulares (cilindros, círculos, esferas e segmentos) como base para mensurar e representar as formas naturais do solo, causando imprecisão nas medições (PACHEPSKY et al., 2000). Além disso, este estudo ressalta a importância dos cálculos de lacunaridade e sucularidade para avaliar as alterações no sistema de poros após a mudança do uso do solo, bem como, propõe o estudo da sucularidade como relevante, uma vez que, poucos são os estudos utilizando essa medida fractal, incluindo estudos de solo.

Em virtude das vantagens em relação as técnicas fractais, nesse trabalho foram utilizadas duas delas: a lacunaridade, que se baseia no estudo da invariância translacional da distribuição de lacunas ao longo de um determinado domínio em uma faixa de escala e sucularidade, que indica a capacidade de um fluxo atravessar o conjunto e é definida como a avaliação do grau de filamentos que permitem a percolação (ALLAIN & CLOITRE, 1991; DE MELO & CONCI, 2008 e 2011). Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o estoque de C e a distribuição de poros no solo, após a conversão de áreas de cana-de-açúcar para eucalipto.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 IMPLANTAÇÃO DA SILVICULTURA DE EUCALIPTO NO BRASIL.

Fatores como as mudanças nos conceitos econômicos, o crescimento populacional, a transformação do estilo de vida das pessoas, a expansão agropecuária, o rápido processo de urbanização e modernização têm contribuído para a exploração das florestas (LAURANCE et al., 2014; LONG et al., 2014; CARRERO et al., 2020). Para atender a alta demanda do mercado, a pressão sobre os produtos florestais, principalmente sobre a madeira, vem se intensificando juntamente com o desmatamento (ARAÚJO et al., 2015).

Diante desse problema, as indústrias madeireiras, pressionadas pelos ambientalistas, passaram a priorizar o uso da madeira oriunda de florestas plantadas, tendo percebido que essa é uma boa solução para suprir a demanda crescente de madeira (SCHUMACHER e VIEIRA, 2016). A justificativa para isso, segundo Araújo et al. (2015), é que a silvicultura intensiva é realizada com base em um plano de manejo florestal, preocupando-se com a sustentabilidade desde o planejamento do plantio até a comercialização dos produtos florestais, principalmente da madeira. É possível sua implementação em áreas com relevo acentuado, que são inadequados para o plantio de muitos cultivos agrícolas, ampliando o fornecimento de madeira e diminuindo a pressão sobre florestas nativas (ARAÚJO et al., 2015).

A silvicultura intensiva utiliza espécies nativas, como araucária e paricá, bem como exóticas, como eucalipto, pinus, teca e acácia (IBÁ, 2020). Entretanto, o eucalipto se destaca, devido seu crescimento rápido e uniforme, durabilidade da madeira, capacidade de regeneração após a colheita, auto-fecundidade e adaptação a uma ampla gama de condições climáticas e do solo, garantindo a expansão dessa espécie em vários países (STANTURF, 2013).

Segundo o IBGE (2021), a expansão da silvicultura intensiva no Brasil é constante, alcançando em 2021 aproximadamente 9,5 milhões de hectares de área de florestas plantadas, onde as Regiões Sudeste e Sul retêm maior parte da área ocupada pela silvicultura no país, correspondendo a 38% e 33%, respectivamente e a região Nordeste fica em quarto lugar no ranking de área plantada com 10%. Destes 9,5 milhões ha de área de florestas plantadas, aproximadamente 7,3 milhões são de eucalipto, onde a maior parte desse total pertence à região Sudeste, com 3.309.640 ha, seguida do Centro-Oeste com 1.385.448 ha e o Nordeste é o quarto nesse ranking com 905.984 ha (IBGE, 2021).

Dessa forma, os estados brasileiros que apresentam maior área plantada de eucalipto são Minas Gerais, seguido de Mato Grosso do Sul e São Paulo, com 2 milhões, 1 milhão e 983.760 hectares, respectivamente (IBGE, 2021). Entre os estados nordestinos, a Bahia é o que mais

planta eucalipto (576.428 ha), seguido do Maranhão (272.157 ha), Piauí (27.427 ha) e Alagoas (20.989 ha). Pernambuco é o 6º no ranking com 1.109 hectares de área plantada com esta cultura (IBGE, 2021) (Tabela 1).

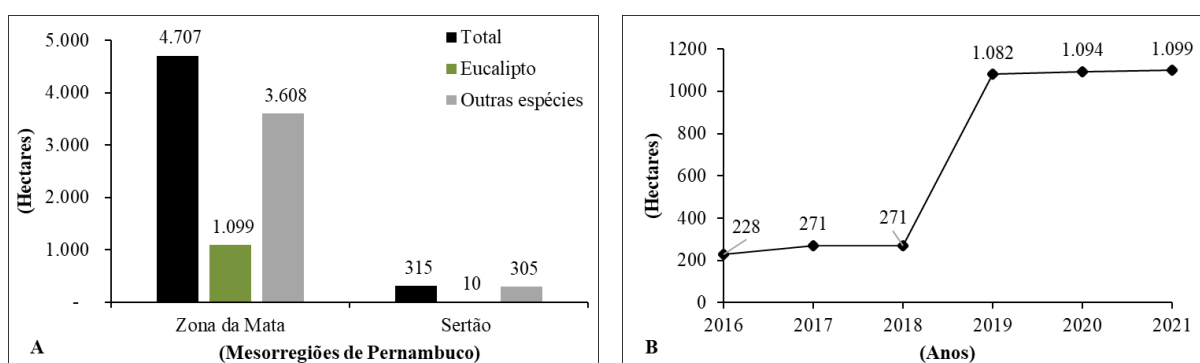
Tabela 1. Áreas de florestas plantadas nos estados do Nordeste, em hectares.

Estados	Total	Eucalipto	Pinus	Outras espécies
Maranhão	272.163	272.157	0	6
Piauí	27.427	27.427	0	0
Ceará	1.992	621	0	1.371
Paraíba	2.635	1.092	0	1.543
Pernambuco	5.022	1.109	0	3.913
Alagoas	24.296	20.989	17	3.290
Sergipe	6.185	6.161	0	24
Bahia	576.431	576.428	0	3
NORDESTE	916.151	905.984	17	10.150
BRASIL	9.486.839	7.295.309	1.810.837	380.693

Fonte: IBGE-Produção da extração vegetal e da silvicultura 2021.

Em relação ao Sertão, a Zona da Mata pernambucana apresenta maior área de floresta plantada (4.707 ha), sendo 1.099 ha com eucalipto (Figura 1A). A expansão da plantação de eucalipto nessa mesorregião é recente, com início em 2015. Em 2016, totalizou uma área plantada de 228 ha e em 2021, esta área aumentou em quase 5 vezes (Figura 1B).

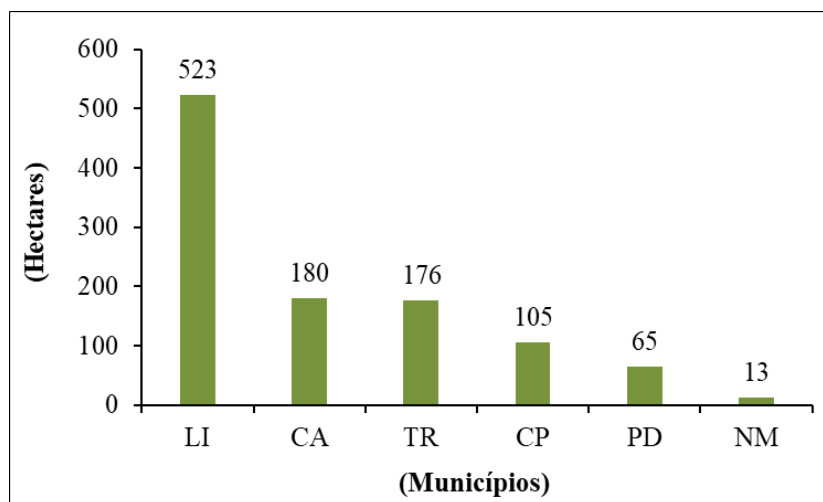
Figura 1: A: Floresta plantada por Mesorregião-Pernambuco, em hectares; B: Área de plantação de eucalipto na Zona da Mata pernambucana, em hectares.



Fonte: IBGE-Produção da extração vegetal e da silvicultura 2021.

Entre os municípios da Zona da Mata Norte, Lagoa de Itaenga apresenta a maior área de eucalipto, seguido de Chã de Alegria com 523 e 180 ha, respectivamente (Figura 2).

Figura 2: Área plantada com eucalipto por município da Zona da Mata Norte Pernambucana (LI- Lagoa de Itaenga, CA- Chã de Alegria, TR-Tracunhaém, CP- Carpina, PD-Paudalho, NM-Nazaré da Mata).



Fonte: IBGE-Produção da extração vegetal e da silvicultura 2021.

Atualmente, a silvicultura de eucalipto tem um importante papel na produção de produtos não madeireiros (cosméticos, material de limpeza, corantes naturais, medicamentos) e madeireiros para construção civil (painéis de madeira, vigas, janelas, portas, pisos laminados e molduras), para fins energéticos (carvão vegetal e lenha) e industriais (papel e celulose) (IBÁ, 2019). Os principais produtos da silvicultura são carvão vegetal, lenha e madeira em tora para fabricação de papel e celulose e a maior parte desses produtos é oriunda da madeira de eucalipto (IBGE, 2021) (Tabela 2). Entretanto, o grupo da madeira em tora para outras finalidades em sua maioria é oriunda da madeira do pinus (IBGE, 2021).

Tabela 2: Produção dos principais produtos oriundos da silvicultura no Brasil.

	Carvão vegetal	Lenha	Madeira em tora
Total	6.857.324	51.529.310	148.486.911
Eucalipto	6.802.374	45.585.962	101.056.673
Pinus	6.176	2.712.380	44.866.814
Outras	48.774	3.230.968	2.563.424

Fonte: IBGE-Produção da extração vegetal e da silvicultura 2021.

2.2 IMPACTOS SOCIOECONÔMICOS E AMBIENTAIS NEGATIVOS GERADOS PELA SILVICULTURA DE EUCALIPTO.

Quando a silvicultura de eucalipto é trazida para uma área, principalmente quando esta é próxima de comunidades tradicionais e rurais, gera muitos conflitos por conta das apropriações de terras pelas indústrias. Nesse contexto, esses grupos sentem-se sufocados pelo complexo industrial e percebem que sua cultura, autoidentificação e sentimento de pertencimento do lugar são dizimados. Dessa forma, tornam-se resistência a fim de garantirem seu território (BARBOSA et al., 2019).

No Espírito Santo e na Bahia, a silvicultura de eucalipto tem causado conflito entre as indústrias de papel e celulose, comunidades quilombolas e indígenas. O maior problema é a invasão de terra desses grupos, pela expansão dessa atividade (BARBOSA et al, 2019).

No Leste do Maranhão não foi diferente, depois da extinção de grande parte do seu cerrado pela siderurgia, programas de restauração foram desenvolvidos pelo setor de papel celulose, com a finalidade de produzir madeira. Entretanto, usar uma atividade destruidora para resolver os problemas deixado por outra, não é uma boa solução, pois, o domínio de indígenas e camponeses sobre suas terras foi ameaçado, bem como, os líderes desses grupos. O espaço designado para agricultura familiar foi vetado, tirando deles seu sustento e seus postos de trabalho (JÚNIOR et al., 2014).

Com a territorialização das indústrias e papel e celulose no Espírito Santo, algumas famílias quilombolas foram convencidas a venderem suas terras e migraram para os grandes centros urbanos. Entretanto, os valores recebido pela suas propriedades foram insuficientes para se acomodarem em locais adequados e acabaram ocupando áreas periféricas, causando outros problemas socioambientais (BARBOSA et al., 2019).

No município de Messias-AL, famílias do Assentamento Flor do Bosque, tiveram um grande prejuízo, pois, o uso de agrotóxico liberado pelos aviões agrícolas, atingiu seus corpos d'água e plantios de frutas, legumes e raízes, acarretando a perda de seus produtos e trazendo preocupação aos camponeses que almejam possuir o selo de certificação para produtos orgânicos (LIMA & BARBOSA, 2019).

Com o declínio dos cultivos agrícolas, agricultores chegam a trocar o plantio de hortaliças por eucalipto devido suas vantagens econômicas, causando a redução das áreas com produção alimentícia, além de, potencializar o trabalho informal e aumentar ainda mais as preocupações com a perspectiva de conservação (FANTINI et al., 2017; SENA et al., 2017).

No Estado de Alagoas, devido à crise do setor sucroenergético, houve a substituição de parte de seu canavial por eucalipto em 2013, incentivado pelo Estado e por investidores do

agronegócio. Entretanto, a produção de alimento no Estado está ameaçada, principalmente de feijão e milho, pois a expectativa é tornar a silvicultura de eucalipto umas das atividades mais plantadas no estado, perdendo apenas para cana-de-açúcar (LIMA & BARBOSA, 2019).

Em Três Lagoas-MS, por falta d' água, a produção dos agricultores foi prejudicada e no Maranhão o desmatamento de áreas de cerrado e chapadas, pelo setor celulósico, trouxe prejuízos ao extrativismo e o modo de vida dos camponeses foi ameaçado, acabando com seus postos de trabalhos e com sua fonte de sustento, acarretando na sua migração (CAMACHO, 2012).

Além disso, existe uma controvérsia sobre o uso de água em monoculturas de eucalipto. Zegeye (2010), argumenta que a árvore possui um crescimento muito acelerado e por isso sua demanda por água pode ser maior, mas não necessariamente seca o solo e os lençóis freáticos. Almeida & Soares (2003), mostraram que essa monocultura é mais eficiente no uso de água do que muitas espécies nativas e que as reservas hídricas do solo podem ser utilizadas pelas duas espécies, diante de menor precipitação.

Entretanto, tem sido argumentado que espécies de eucalipto consomem muita água, desde as plantações das mudas até no final da produção (AMAZONAS et al., 2017; LIMA, 2016), podendo secar corpos d'água. Piyaruwan et al. (2020), relataram que os moradores dos arredores dessa monocultura, nos municípios de Diyatalawa e Haputale no Sri Lanka, observaram o esgotamento de poços e indisponibilidade de água para as atividades domésticas, além do esgotamento do lençol freático ao longo do tempo.

Segundo Júnior et al. (2014), no Leste do Maranhão a captação de água dos ecossistemas aquáticos pela indústria de papel e celulose, prejudicou o abastecimento da população e no município de Três Lagoas localizado no estado de Mato Grosso do Sul, onde nascentes, açudes e lagoas foram extintos (CAMACHO, 2012). Vale lembrar que esse é um dos municípios que concentra a maior parte da produção de papel e celulose do Brasil, além de ter a maior parte de árvores plantadas, principalmente com eucalipto (IBÁ, 2020).

A valorização da madeira tem estimulado a conversão das florestas nativas em cultivos de eucalipto, gerando implicações diretas na conservação da biodiversidade. No Brasil, os plantios de eucalipto tem tomado cada vez mais grandes extensões do Cerrado, devido aos solos e clima favoráveis, assim como os lucros crescentes das empresas de papel e celulose (GAINSBURY & COLLI, 2019). Na Bahia, a degradação da Mata Atlântica está associada ao desenvolvimento de agropecuária e setor florestal, como expansão do eucalipto (RAMOS et al., 2022).

No Sul do Brasil, o eucalipto é reconhecido por gerar intensa perturbação e degradação da Mata Atlântica, colocando em risco a diversidade de espécies da fauna e flora (SOUZA et al., 2022). No Maranhão, as chapadas foram apropriadas, desmatadas e queimadas pelo setor de papel e celulose, para instalação de silvicultura de eucalipto, o que contribuiu para a extinção de espécies animais e vegetais (JÚNIOR et al., 2014). Cordero–Rivera et al. (2019), observaram a redução da diversidade de macroinvertebrados em pequenos riachos florestados por eucalipto em Portugal. Além disso, os maciços florestais dessa monocultura suportam menor riqueza e abundância de gafanhotos e borboletas, reduzindo a diversidade de insetos (VASCONCELOS et al., 2019).

Além da biodiversidade, a alta taxa de erosão do solo e o declínio da sua produtividade estão relacionados ao desmatamento e às mudanças do uso do solo (FENTIE et al., 2020). Quando ocorre a conversão da floresta nativa para dar espaço a terras de cultivos, são adotadas práticas de manejo do solo (aração, gradagem, subsolagem) que realizam seu revolvimento, causando erosão, resultando no aumento do escoamento superficial, transportando a matéria orgânica (FENTIE et al., 2020).

Dessa forma, a estabilidade dos agregados do solo, é reduzida devido a perda da MOS, aumentando a densidade e reduzindo a porosidade. Além disso, o desarranjo dos agregados do solo expõe a MOS as ações dos microrganismos, acarretando na acelerada oxidação da MOS, reduzindo o estoque de C no solo e liberando CO₂ para atmosfera, colaborando para as mudanças climáticas globais (FENTIE et al., 2020; LIANG et al., 2016; SENA et al., 2017).

Fentie et al., (2020), mostrou que o solo na bacia hidrográfica de Tejibara, na Etiópia, cultivado com eucalipto e outras culturas, tinha menor teor de MOS do que no solo de mata nativa, reduzindo a produtividade do solo da região. Segundo Amsalu & Hailu (2019), o eucalipto aumentou a densidade do solo, indicando baixa capacidade de retenção de água. Além disso, Rodrigues et al. (2021) relata que o eucalipto reduz a porosidade do solo e o estoque C no solo. A silvicultura de eucalipto afetou áreas naturais do Cerrado brasileiro diminuindo o potencial regional de captura e estocagem de C, contribuindo para as mudanças climáticas (PEREIRA-SILVA et al., 2021).

2.3 IMPACTOS SOCIOECONÔMICOS E AMBIENTAIS POSITIVOS DA SILVICULTURA DE EUCALIPTO NO BRASIL.

A produção primária florestal no Brasil, em 2021, correspondeu a 30,1 bilhões de reais, sendo a silvicultura responsável pela maior parte desse valor, com R\$ 23,8 bilhões, superando mais uma vez, o valor da extração vegetal com R\$ 6,2 bilhões. As regiões Sul e Sudeste

apresentaram a maior parte do valor de produção, com 34,6% e 34,3% do valor total, respectivamente. O Nordeste fica em quarto lugar, com 9,6%. Os produtos oriundos do eucalipto representaram a maior participação nesse valor (IBGE, 2021).

Os produtos madeireiros, em 2021, geraram maior valor na produção da silvicultura com R\$ 95,6% do valor da produção florestal. Dentre os produtos madeireiros, a madeira em tora apresentou a maior participação no valor da produção da silvicultura com R\$ 13,5 bilhões, principalmente a voltada para fabricação de papel e celulose, com R\$ 7,2 bilhões (IBGE, 2021). Os produtos madeireiros oriundos do eucalipto apresentaram maior participação no valor de produção. A madeira em tora para papel e celulose foi a que mais contribuiu com 5,9 milhões. Entretanto, no grupo da madeira em tora para outras finalidades, a participação do pinus foi maior com R\$ 3,1 milhões para 2, 6 milhões de eucalipto (Tabela 3).

Tabela 3: Participação dos grupos florestais no valor da produção da silvicultura (R\$).

Produtos	Eucalipto	Pinus	Outras
Madeira em tora para papel e celulose	5.917.295	1.300.233	10.220
Madeira em tora para outras finalidades	2.688.930	3.157.246	468.749
Carvão Vegetal	6.532.055	4.033	48.169
Lenha	2.323.956	131.687	203.006

Fonte: IBGE-Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura 2021.

Os produtos do setor de floresta plantada estão em todo mundo, contribuindo em 4,8% no total de exportações brasileiras em 2020, com China e Estados Unidos considerados os principais compradores, contribuindo para as exportações brasileira com US\$ 5,1 bilhões (IBÁ, 2021). O sucesso nas exportações deve-se principalmente à exportação de celulose. Dessa forma, o Brasil é referência na produção de celulose, considerado o maior produtor mundial e líder na exportação desse produto com US\$ 1,2 bilhão a mais do que o Canadá que é segundo colocado, sendo China e Estados Unidos os principais compradores desse produto no Brasil (IBÁ, 2021).

As indústrias do setor de cultivos de árvores contribuíram com R\$ 12,1 bilhões em tributos federais, que equivale a 0,9% da arrecadação total do país, em 2020. O setor de papel e celulose apresentou maior participação nesse valor correspondendo a 67% (IBÁ, 2021). Essa valorização da madeira produzida no Brasil para o mercado de papel e celulose é oriunda da atração de investidores e corporações nacionais e internacionais, que enxergaram o potencial florestal no país. O Brasil apresenta condições ideais de clima e solo e as florestas plantadas

têm maior produtividade e rotação mais curta que outros países do mundo, como Estados Unidos e Canadá (IBÁ, 2019).

Segundo Silva (2018), o Estado também apresentou um papel influente na consolidação das indústrias de papel e celulose no Brasil, pois, elas utilizaram-se dos programas que tiveram como objetivo mitigar a emissão de gás carbônico e pagam um valor aos países em desenvolvimento, que apresentam resultados satisfatórios em relação ao estoque de carbono. Através desses programas, as indústrias de papel e celulose utilizam os incentivos fiscais oferecidos pelo Estado, aumentando as florestas homogêneas e áreas plantadas, principalmente com eucalipto (SILVA, 2018). Com isso, dos 10 milhões de ha de florestas plantadas no Brasil, aproximadamente 40% pertencem as indústrias de celulose e papel (IBÁ, 2019).

Além disso, a fusão de importantes indústrias produtoras de celulose, como a Suzano e a Fibria, que fundou a maior indústria de celulose em nível global, consolidou as suas instalações e a posição do Brasil, no mercado mundial de florestas plantadas para fins industriais (IBÁ, 2019). Uma das áreas mais expressivas na produção de papel e celulose encontra-se nos municípios de Três Lagoas e Ribas do Rio Pardo, ambos do Mato Grosso do Sul, bem como, em Telêmaco Borba, no Paraná, que são donos das maiores áreas de árvores plantadas, principalmente com eucalipto (IBÁ, 2020). A produção de papel também está em alta e totalizou 18% das exportações em 2020, tendo a América do Sul como principal comprador de papel. Estados Unidos e México, são os principais compradores de painéis de madeira, madeira serrada e compensada (IBÁ, 2021).

Além disso, o setor de florestas plantadas tem gerado emprego direto e indireto, e renda para o Brasil. Dessa forma, gerou mais de 536 mil empregos diretos e 1,5 milhão de postos de trabalho indiretos. A geração de emprego é reflexo das cadeias produtivas longas e ramificadas, que supri os mais variados ramos como os de móveis, embalagens em geral, construção civil, papeis higiênicos, têxtil, siderurgia, automóveis e livros (IBÁ, 2021). O setor valoriza seus funcionários e comunidades próximas as indústrias, financiando projetos e programas educacionais, socioculturais, de saúde e meio ambiente, de geração de renda para a comunidade local e de fomento, melhorando a relação dos pequenos produtores com o abastecimento das indústrias e propiciando emprego e renda para comunidade, bem como, uma variação da produção florestal (IBÁ, 2019; IBÁ, 2020).

Para mais, estudiosos acreditam que a silvicultura de eucalipto quando bem organizada pode gerar impactos ambientais positivos. A exemplo disso, Moledo et al., (2016) defende que, para mitigar os impactos ambientais e chegar em uma gestão sustentável, é necessário uma boa

elaboração e execução de um plano de manejo florestal, baseado nas particularidades geoambiental dos locais explorados pelas plantações.

Além disso, estudos tem mostrado que o plantio de eucalipto está sendo utilizado no reflorestamento de áreas degradadas por outras atividades, como pastagem, agricultura, extração de argila, por empresas de cerâmicas, com o objetivo de sequestrar e estocar CO₂ atmosférico, em caso de aumento desse gás na atmosfera e de estocá-lo no solo, contribuindo para mitigação das mudanças climáticas (GHANNOUM et al., 2010; PAULUCIO et al., 2017; SENA et al., 2017).

Essa cultura tem potencial de recuperar a MOS, aumentar a estabilidade de agregados, reduzir a densidade e aumentar a porosidade do solo, melhorando seu comportamento físico-hídrico e impulsionando seu potencial agrícola (GHANNOUM et al., 2010; PAULUCIO et al., 2017; SENA et al., 2017).

2.4 IMPACTOS DO PLANTIO DE EUCALIPTO NO ESTOQUE DE C DO SOLO E NAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS.

As mudanças climáticas e a mitigação da emissão dos gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, principalmente do CO₂ tornaram-se preocupação mundial. O CO₂ é responsável por cerca de 80% da elevação da temperatura global. Em 2022, foi registrado um pico de 421 ppm de CO₂ na atmosfera, um aumento de 1,8 ppm em relação a 2021 (NOAA, 2022). Estima-se que as maiores emissões de CO₂ atmosfera derivam da mudança do uso e cobertura do solo, principalmente da conversão de vegetação nativa para agropecuária (NOAA, 2022), causando perdas consideráveis de C nos solos, estimados em 133 Pg C nos usos de terras agrícolas, sendo um fator significativo para as alterações nos níveis de estoque de C no solo (SANDERMAN et al., 2017).

Ao mesmo tempo que os solos podem ser um emissor de CO₂, eles podem sequestrar o CO₂ da atmosfera e estocá-lo na MOS. A MOS é formada a partir dos restos animais e vegetais que são adicionados no solo e juntamente com a fração mineral, constituem a parte sólida do solo, correspondendo apenas 5% desse todo. É composta de carbono em aproximadamente 60% de sua massa, seguido de oxigênio, hidrogênio e nitrogênio, apresentando importantes funções sobre as propriedades químicas (ciclagem, absorção e retenção dos nutrientes no solo), biológicas e físicas do solo, sendo responsável por sua fertilidade (JANZEN, 2004; BRADY & WEIL, 2013).

A MOS é considerada o maior sumidouro de carbono (C) dentre os ecossistemas terrestres, com cerca de 2000 Pc C, enquanto a biomassa vegetal reserva aproximadamente 500

Pg C (JANZEN, 2004). Nos ecossistemas terrestres, o CO₂ atmosférico é fixado pelas plantas através da fotossíntese, é convertido em compostos orgânicos, que servem de fonte de energia para os heterotróficos ao longo da cadeia alimentar. Por fim, esses compostos são utilizados durante a decomposição, onde, uma parcela do C é estocado no solo formando a MOS e a outra volta para atmosfera. Outra forma do C ser liberado para atmosfera é através da respiração dos organismos, onde ele é novamente fixado pelas plantas, retornando ao solo (JIA et al., 2019). Dessa forma, a conversão do CO₂ atmosférico em compostos orgânicos pela fotossíntese das plantas é essencial para que haja o equilíbrio da entrada e saída de C para atmosfera, fazendo do solo um sumidouro de carbono orgânico (JIA et al., 2019).

É possível, o solo sequestrar da atmosfera entre 0,79 e 1,54 Gt C ano⁻¹ e os solos agrícolas apresentam um grande potencial no sequestro de carbono, especialmente aqueles com grandes perdas de carbono. Para isso, práticas sustentáveis de sequestro de carbono do solo necessitam ser aplicadas, com intuito de aumentar os níveis de estoque de C e mitigar as mudanças climáticas (AMELUNG et al., 2020). Diante dessa importante função, os solos passaram a fazer parte da agenda global de carbono, para mitigação das mudanças climáticas, através de iniciativas como The International “4 per 1000” Initiative, Koronivia workshops e FAO launched RECSOIL (AMELUNG et al., 2020). O objetivo em comum dessas três iniciativas é aumentar o carbono orgânico no solo (COS), que colabora para a mitigação das emissões de CO₂ e estimula o ajuste dos sistemas agrícolas às alterações climáticas, bem como, abastece o solo com nutrientes necessários para o sucesso da produção agrícola (AMELUNG et al., 2020).

Diante disso, o setor brasileiro de florestas plantadas é visto com grande potencial de remover e estocar C, sendo responsável pelo estoque de 1,79 bilhão de toneladas de CO₂ atmosférico equivalentes, bem como, por manter o estoque de 2,6 bilhões de toneladas de CO₂ equivalentes, em 6 milhões de ha por meio da Reserva Legal (RL), Áreas de Proteção Permanente (APP) e demais locais de conservação (IBÁ, 2022). Com isso, através do reflorestamento com florestas plantadas (plantio e colheita renováveis), do gerenciamento sustentável das matas nativas e da autossuficiência energética renovável (conversão das fontes energéticas fósseis por biomassa), o setor florestal reduz a emissão dos GEE, colaborando para o enfrentamento das mudanças climáticas (IBÁ, 2022).

Com isso, dentre as espécies utilizadas no setor florestal, o plantio eucalipto possui um grande potencial para responder aos aumentos previstos do CO₂ atmosférica e da temperatura (GHANNOUM et al., 2010), bem como, é destaque em relação a sua capacidade de estocar de C, principalmente em áreas degradadas por outras atividades. Por exemplo, Ramos et al., (2022)

observaram que a conversão de área degradada por pastagem em eucalipto aumentou a concentração de C, no Sul da Bahia. Da mesma forma, o carbono do solo de uma área degradada pela extração de argila no norte do Rio de Janeiro, foi recuperado através do seu reflorestamento com eucalipto (PAULUCIO et al., 2017).

Para mais, Almeida et al. (2021) mostraram que os estoques de C aumentaram, quatro anos após a conversão de pastagens degradadas para sistema silvipastoril (eucalipto com capim) e concluíram, que a introdução do sistema melhorou a qualidade da MOS. Assim, a quantificação do estoque de C é importante, para o conhecimento e acompanhamento do solo de uma área em relação sua qualidade, uma vez que o estoque de C é considerado um indicador de qualidade do solo e depende de boas práticas de manejos agrícolas (OLIVEIRA et al., 2017).

Além disso, devido a capacidade de mitigar as mudanças climáticas através do sequestro de carbono, investir em florestas e silvicultura, incluindo o plantio de eucalipto, representa uma boa estratégia para se alcançar o desenvolvimento sustentável. Por isso, o futuro das florestas e da silvicultura no desenvolvimento sustentável em todos os níveis foi pauta de discussão no XIV World Forestry, realizado em Durban em 2015 (UNITED NATIONS, 2023). Segundo Ibá (2020), o setor de florestas plantadas (incluindo o plantio de eucalipto), associa a produção com mitigação das mudanças climáticas. A mitigação ocorre através da prevenção das emissões nas indústrias e a partir do carbono estocado nos bioprodutos, sendo um setor importante para o cumprimento do Acordo de Paris e Objetivos do Desenvolvimento Sustentável da ONU (IBA, 2020).

2.4.1 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e os solos.

Diante de um desenvolvimento insustentável associado ao progresso econômico, onde os recursos naturais, indispensáveis para a população, são explorados de forma desenfreada, causou preocupação em relação ao esgotamento dos recursos não renováveis na natureza e a insegurança alimentar. A partir disso, no século XX a Organização das Nações Unidas (ONU) realizou conferências e assembleias com o objetivo de acabar com o modelo insustentável de progresso econômico (ARANTES et al., 2018).

Dessa forma, em 1972 em Estocolmo na Suécia, aconteceu a 1ª Conferência das Nações Unidas com foco no Meio Ambiente Humano, onde debateu-se as alterações no meio ambiente causadas pelas atividades antrópicas. Em 1987, Harlem Brundtland, líder da Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento, divulgou o relatório “Nosso Futuro Comum”, onde o conceito de desenvolvimento sustentável foi definido como o desenvolvimento com potencial de atender as necessidades da sociedade atual, sem prejudicar o potencial de suprir as demandas

da geração futura e foi baseado em três eixos: conservação do meio ambiente, bem-estar social e desenvolvimento econômico (STADLER & MAIOLI, 2011).

Em 1992 no Rio de Janeiro, aconteceu a 2ª Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento (Rio 92), onde foram criados documentos como, “Convenção do Clima” com objetivo de mitigar as imissões de gases do efeito estufa (GEEs), responsáveis pelo aquecimento global e a Agenda 21 com o objetivo de acabar com o modelo insustentável de progresso econômico e estimular um inédito modelo de desenvolvimento, chamado de desenvolvimento sustentável que associa práticas de proteção ambiental, justiça social e eficiência econômica (ROMA, 2019).

A expressão “Agenda 21” foi criado já com esperança e vontade de mudança para esse novo padrão de desenvolvimento para o século XXI. No ano de 2000 em Nova Iorque, governantes 191 países se reuniram na Cúpula do Milênio das Nações Unidas, onde durante a Assembleia Geral da ONU através da "Declaração do Milênio das Nações Unidas", foram criados oito Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM) que apresentavam 21 metas e 60 indicadores a serem alcançados até 2015, onde o foco era acabar com a pobreza e fome mundial, promover saúde, assegurar a sustentabilidade ambiental (ROMA, 2019).

O século XXI foi marcado por relevantes debates em relação ao desenvolvimento sustentável. Em 2002, aconteceu a Cúpula Mundial sobre Desenvolvimento Sustentável realizada em Joanesburgo, na África do Sul, como o objetivo de melhorar a qualidade de vida da população e conservar o meio ambiente diante do crescimento populacional e do aumento das demandas por recursos (alimentos, água potável, moradia, saúde e segurança econômica) (ROMA, 2019). Em 2012, aconteceu a Conferência das Nações Unidas (Rio +20) no Rio de Janeiro, que originou o documento “O Futuro que Queremos” que trazia ações claras e práticas para a realização do desenvolvimento sustentável (ROMA, 2019).

Diante do fim do prazo para execução dos Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM) e a necessidade de elaboração de uma nova agenda, o ano de 2015 foi marcado por relevantes debates em relação as metas a serem alcançadas após 2015. Com isso, em julho de 2015 na Etiópia, aconteceu a 3ª Conferência Internacional sobre Financiamento ao Desenvolvimento, com o objetivo de assegurar o progresso dos países, principalmente daqueles com dificuldades econômicas (MENEZES, 2019).

Por outro lado, em setembro de 2015 aconteceu a 70ª Assembléia Geral da ONU, onde foi adotado o documento "Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável", que inclui 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) (Figura 3) com 169 metas a serem alcançados até 2030, com intuito de acabar com a

pobreza, impulsionar a proteção do meio ambiente e contribuir para o clima (ROMA, 2019). Além disso, em dezembro de 2015 em Paris, aconteceu a 21ª Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), onde o Acordo de Paris foi adotado com o objetivo de alcançar a mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEEs), impedindo as mudanças climáticas. Os debates realizados nessas reuniões resultaram em uma inédita agenda mundial de desenvolvimento, onde destaca os fatores socioeconômicos e ambientais, a fim de alcançar um mundo sustentável e inclusivo (MENEZES, 2019).

Figura 3: Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) inclusos na Agenda 30.



Fonte: Nações Unidas-Brasil (2023)

A proteção do solo e terra para a Agenda 2030 certamente é um fator importante, uma vez que está expressa de forma direta e indireta nos ODS 2 “Fome Zero e Agricultura Sustentável”, ODS 12 “Consumo e Produção Responsáveis”, ODS 13 “Ação Climática” e ODS 15 “Vida Terrestre”. Segundo a European Environment Agency (2023), o solo é a fonte de 90% da produção de alimentos, abriga os microorganismos e no solo que os nutrientes são transformados e absorvidos pelas plantas, formando biomassa e armazenando carbono, bem como, a água potável inicia o seu processo natural de purificação. Com isso, os ODS não podem ser alcançadas sem solos com boa qualidade e sem o uso sustentável do solo.

O objetivo 2 pretende-se acabar com a fome, alcançar a segurança alimentar e melhorar a nutrição, bem como, promover a agricultura sustentável. Para alcançar esse objetivo, os sistemas agrícolas precisam produzir mais alimentos e desperdiçar menos, e para isso são necessários insumos como terra, solos saudáveis e água. Diante da escassez desses insumos, é

pertinente utilizá-los de forma sustentável, elevando os rendimentos das terras agrícolas já existentes (incluindo a restauração de terras degradadas) através de práticas sustentáveis, o que diminuiria o desmatamento para dar espaço a produção agrícola (UNITED NATIONS, 2023).

Para mais, o objetivo 12 pretende chegar a produção e consumo responsáveis, bem como, garantir padrões sustentáveis de consumo e produção, onde na meta 12.4 almeja alcançar a gestão ambiental saudável dos produtos químicos e todos os resíduos e reduzir sua liberação para o ar, à água e ao solo, a fim de diminuir seus impactos negativos na saúde humana e no meio ambiente (UNITED NATIONS, 2023).

O objetivo 13 explana sobre a ação climática, isto é, almeja tomar medidas urgentes para combater as mudanças climáticas e seus impactos. O solo, por exemplo, apresenta um grande potencial na redução das emissões globais de gases de efeito estufa através do sequestro de CO₂, do gerenciamento dos recursos e da recuperação dos solos degradados (UNITED NATIONS, 2023). O objetivo 15, fala sobre a vida terrestre, ou seja, proteger, restaurar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres, gerir de forma sustentável as florestas, combater a desertificação, deter e reverter a degradação da terra, bem como, deter a perda de biodiversidade (UNITED NATIONS, 2023).

2.5 IMPACTO DO PLANTIO DE EUCALIPTO NO ESPAÇO POROSO DO SOLO.

Além da importância no estoque de C, a MOS é um dos relevantes constituintes do solo que atua na formação e estabilidade dos agregados do solo. A agregação do solo proporciona proteção física contra a biodegradação da MOS e sua manutenção é essencial para a estrutura, fertilidade do solo e sustentabilidade dos sistemas agrícolas (SENA et al., 2017). Segundo Braida et al. (2011), a formação dos agregados segue uma ordem de diferentes tamanhos e inicia-se pela ligação de partículas individuais de argila, óxidos e MOS humificada, formando os complexos organo-minerais (BRAIDA et al., 2011).

Posteriormente, os microagregados são formados, através de processos físico-químicos tendo a MOS humificada, os minerais e polissacarídeos microbianos como estabilizantes. Por último, há a formação dos macroagregados, que depende do crescimento radicular, do desenvolvimento de hifas fúngicas, da atuação mecânica de animais maiores, como formação de túneis e da adição de polissacarídeos microbianos, onde estes também são responsáveis pela sua estabilidade (BRAIDA et al., 2011).

O arranjo desses agregados, atuam na formação do espaço poroso do solo (distribuição do tamanho de poros), que é representado por espaços vazios de diferentes tamanhos e formas, chamados de microporos e macroporos. O espaço poroso do solo influencia na retenção e

armazenamento de água, na infiltração e aeração do solo, no desenvolvimento radicular e na resistência do solo à compactação, influenciando no crescimento e produtividade dos cultivos agrícolas (BRADY & WEIL, 2013).

Com isso, o comportamento físico do solo está associado com os aspectos de seu espaço poroso, no que diz respeito a distribuição do tamanho dos poros, sua continuidade no perfil do solo e sua estabilidade no tempo (BRAIDA et al., 2011). Dessa forma, a análise da porosidade do solo é fundamental em estudos de solos, que tenham sofrido degradação, causada por eventos naturais ou antrópicos, pois, é possível fornecer informações sobre a mecânica do solo e sobre a forma como pode cumprir sua função (OJEDA-MAGAÑA et al., 2014).

Além do estoque de C, o reflorestamento com eucalipto é considerado um método eficaz para melhorar a qualidade do solo. A exemplo disso, SENA et al., (2017) observaram que o plantio de eucalipto na área de pastagem, foram observados sinais de recuperação de algumas propriedades físicas do solo, por exemplo, redução da densidade do solo e aumento da porosidade total. Da mesma forma, Medeiros et al., (2021) mostraram que a conversão da área de canavial para eucalipto, aumentou a estabilidade dos agregados e reduziu a densidade do solo, concluindo que o plantio de eucalipto é capaz de melhorar as propriedades físicas do solo.

2.6 IMPACTOS SOCIOECONÔMICOS E AMBIENTAIS NEGATIVOS ORIUNDOS DO PLANTIO DE CANA-DE-AÇÚCAR.

Um estudo realizado na Zona da Mata pernambucana, mais precisamente no distrito de Tejucupapo, localizado em Goiana, próximo aos plantios de cana-de-açúcar, observou-se uma disputa entre a população de Tejucupapo e os empresários do setor sucroalcooleiro, devido sua apropriação das terras, acabando a cultura histórica da população, refletindo na extinção da sua identidade cultural, além de comprometer o modo de vida tradicional (GURGEL et al., 2022).

Além disso, segundo Gurgel et al. (2022), o canavial tem estimulado o desmatamento, a destruição dos mangues, assoreamento dos rios, redução de peixes e contaminação das águas por agrotóxicos e esgoto. Durante a queima da palha de cana-de-açúcar são liberados gases do efeito estufa para a atmosfera, contribuindo para aquecimento global (GURGEL et al., 2022). Além disso, a fumaça liberada polui o ar e causa problemas respiratórios em pessoas que residem próximos aos canaviais (GURGEL et al., 2022).

Benites-Lazaro et al. (2018), observaram nas empresas brasileiras sucroenergéticas, práticas de produção insustentáveis que podem afetar a imagem da empresa, bem como, prejudicar as relações socioambientais.

2.7 ESTUDO DOS SOLOS E AS MEDIDAS DE LACUNARIDADE E SUCOLARIDADE.

Segundo Pachepsky et al. (2000), a geometria fractal têm sido cada vez mais aplicada para identificar e descrever padrões espaciais na ciência dos solos. Os motivos que despertaram o interesse dos pesquisadores de solo na geometria fractal, é a sua capacidade de caracterizar as formas naturais irregulares com nível de especificidade maior e como as formas encontradas nos solos são irregulares as medições através dos fractais são mais precisas. Ao contrário, das técnicas convencionais que tem como base as formas geométricas regulares (cilindros, círculos, esferas e segmentos) para mensurar e representar as propriedades do solo, deixando incertezas sobre as medições. Com isso, técnicas geométricas que consideram as irregularidades das formas em diferentes escalas são mais interessantes (PACHEPSKY et al., 2000).

Além disso, com a geometria fractal é possível observar as formas naturais em diferentes escalas (PACHEPSKY et al., 2000). Como os solos são investigados em escalas espaciais que vão de nanômetros a megametros, associar as propriedades do solo as diferentes escalas era uma dificuldade. Com isso, com a utilização da geometria fractal nos estudos de solo é possível associar processos e propriedades entre escalas (PACHEPSKY et al., 2000). Segundo Oliveira et al. (2022), através da abordagem fractal é possível realizar um estudo detalhado sobre os sistemas de poros do solo sob diferentes usos e manejos. O oposto das características morfológicas e geométricas, a abordagem fractal é sensível para identificar alterações na complexidade do espaço poroso (até grau de anisotropia) em amostras de solos (OLIVEIRA et al., 2022).

O termo fractal vem do latim *fractus*, do verbo *franger*, que significa *quebrar* ou *fraturar* e foi criado por Mandelbrot em 1975, com objetivo de dar nome para a geometria que procurava representar as formas reais e irregulares, encontradas no ambiente. Ou seja, a geometria fractal abrange formas imperfeitas, ao contrário da geometria euclidiana, que aborda a perfeição das formas (MANDELBROT, 1982). Um fractal compreende a um objeto que contém invariância no seu formato conforme a escala é alterada, mantendo sua estrutura igual à inicial. Logo, apresenta propriedades como auto-semelhança, complexidade infinita e dimensão (MANDELBROT, 1982).

A auto-semelhança refere-se a similaridade que o fragmento de um objeto tem com o todo em uma escala menor, ou seja, a estrutura fractal se repete em escalas diferentes (LESNE & LAGÜES, 2012). A complexidade infinita quer dizer que, o processo gerador dos fractais é recursivo e pode se repetir de forma ilimitada e a dimensão (atributo mais importante de um fractal) corresponde ao nível de ocupação espacial do fractal e as irregularidades ou rugosidade de um sinal, imagem ou conjunto de dados (MANDELBROT, 1982).

Segundo Lesne & Lagües (2012), número real da dimensão fractal (d_f), (em geral não inteiro e inferior a dimensão euclidiana) descreve a forma como o valor da medição varia com a resolução a do aparelho de medição: $L(a) \sim a^{1-d_f}$. Portanto, o elo entre os valores $L(a)$ e $L(ka)$, obtidos com diferentes resoluções a e ka , que dão uma característica intrínseca da curva, a dimensão fractal d_f , através da relação (LESNE & LAGÜES, 2012):

$$L(ka) = k^{1-d_f}$$

Há diferentes métodos para determinar a d_f de uma forma ou imagem, onde o mais aplicado é o *box counting* (contagem de caixas), por ser simples e de fácil execução. Através desse método é possível fazer o preenchimento do espaço e sobrepor a imagem a um amalha de uma malha de quadrados de lado L gradativamente menores, onde n é o número de quadrados essenciais para ocupar inteiramente a forma (LESNE & LAGÜES, 2012).

2.7.1 Lacunaridade

Técnicas fractais têm sido cada vez mais aplicadas com sucesso para identificar e descrever padrões espaciais em ciências naturais. Devido seu arranjo espacial, os objetos com dimensões fractais iguais podem apresentar propriedades geométricas e texturais diferenciadas (MANDELBROT, 1982; ALLAIN & CLOITRE, 1991). Com isso a dimensão fractal torna-se insatisfatória no detalhamento da textura de objetos fractais, sendo necessário novas análises fractais com intuito de detalhar estruturas geométricas fractais (ALLAIN & CLOITRE, 1991).

Diante disso, como complemento da dimensão fractal, Mandelbrot (1982) propôs o estudo da lacunaridade (do latim *lacuna*, que significa vazio), que auxilia na distinção entre padrões com as mesmas dimensões fractais, mas estruturas diferentes (em aparência e heterogeneidade), fornece conhecimento sobre a textura, bem como, relata como o espaço é ocupado, analisando a distribuição espacial das lacunas e mede o grau de invariância translacional de um objeto fractal, o qual poderá ser caracterizado por assumir uma, duas ou três dimensões (GEFEN et al., 1983). Sua medida pode ser baseada na ocupação de cubos que podem deslizar por toda a imagem, método *gliding box* (MGB) proposto e apresentado por Allain & Cloitre (1991) ou a partir de grades ou cubos fixos, método *fixed grid* (MFG), apresentado por Sebők et al. (2021).

2.7.1.1 Método fixed grid (MFG)

A tomografia microcomputadorizada (micro-CT) além de fornecer imagens 3D de objetos com estrutura interna completa, fornece dados quantitativos sobre diversos atributos estruturais, incluindo a lacunaridade, onde frequentemente é mensurada através do método da caixa deslizante (*gliding box*). Entretanto, quando executado em grandes conjuntos de dados 3D de micro-CT, os custos operacionais (tempo computacional e aplicabilidade) desse método são maiores (SEBÖK et al., 2021). Por tanto, para reduzir a demanda computacional em 3D, Sebök et al. (2021) apresentou um método alternativo mais rápido, eficiente, preciso e viável computacionalmente, baseado no algoritmo da grade fixa (*fixed grid*), onde as caixas não se sobrepõem, portanto o número de caixas e os requisitos de recursos computacionais diminuem drasticamente, tornando exequíveis os cálculos de lacunaridade em imagens 3D de micro-CT através desse método (SEBÖK et al., 2021).

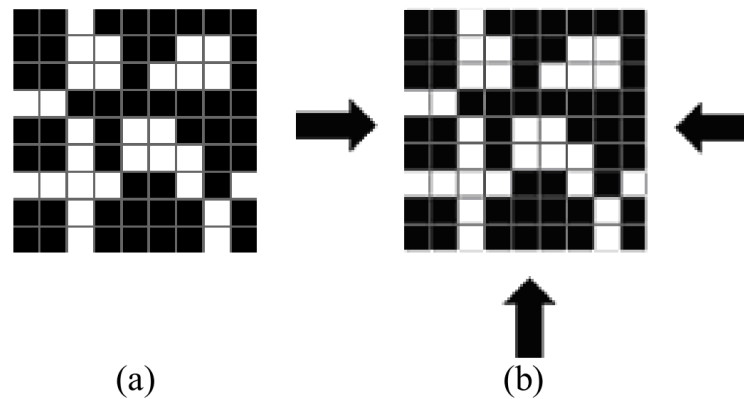
2.7.2 Sucularidade

Três aspectos da textura são distinguidos pela geometria fractal: dimensão fractal (DF), lacunaridade e sucularidade. Enquanto, a DF é bem estudada e a lacunaridade é constantemente aplicada, a sucularidade é pouco abordada. Entretanto, a sucularidade é outro parâmetro fractal conectado a imagem tomografia que gera informações estruturais importantes, que caracteriza o quão fácil ou difícil será a penetração de um líquido através do espaço poroso em diversas direções, onde a conectividade é fator importante de ser avaliado, ou seja, a sucularidade indica a capacidade de um fluxo atravessar o conjunto e é definida como a avaliação do grau de filamentos que permitem a percolação ou o fluxo (DE MELO & CONCI, 2008 e 2011). Manbelbrot (1982) definiu um fractal suculento como aquele que possui os filamentos ou a textura capaz de permitir a percolação ou fluidez.

A sucularidade é uma técnica fractal única e importante em estudos que necessite diferenciar imagens com alguma informação direcional ou de fluxo associada a ela, o que não é possível determinar através da DF ou lacunaridade (DE MELO & CONCI, 2008 e 2011). Além disso, calcular a sucularidade é fácil e rápido, podendo ser considerada uma evolução da DF e da lacunariadade. Dessa forma, a técnica proposta por De Melo & Conci (2008) para este cálculo, foi baseada na contagem de caixa (*box counting*) e adaptada para a sucularidade, onde a pressão do fluido foi considerada para avaliar a relação entre direção e percolação. Da mesma forma que a lacunaridade, os cálculos de sucularidade consideram o uso de bi logaritmos ($\ln x \ln$) ou gráficos lineares x log. Na Figura 4a os pixels pretos são considerados pixels vazios e pixels

brancos preenchidos com massa impenetrável e dependendo das direções do fluido a serem consideradas na Figura 4b, podem ser obtidos quatro pontos de inundação (Figura 4).

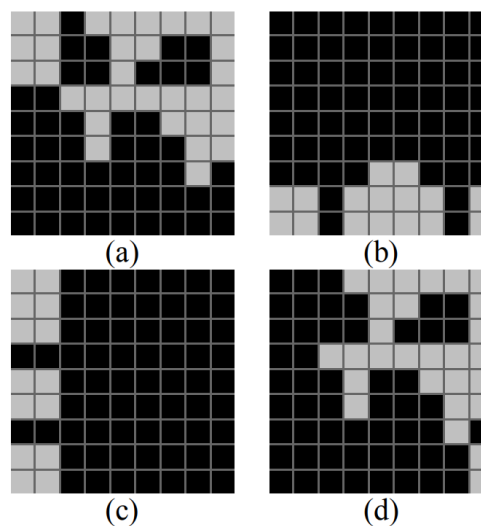
Figura 4: Modelo da forma de avaliação do grau de percolação de uma imagem: (a) imagem original (9x9): pixels pretos representam posições vazias ou lacunas; (b) mostra as quatro direções possíveis que um fluido pode inundar a imagem.



Fonte: De Melo & Conci (2008).

As imagens da Figura 5, mostram que um fluido pode percolar (inundar) a imagem original em quatro direções, verticalmente, de cima para baixo (a) e de baixo para cima (b), bem como, horizontalmente, da esquerda para a direita (c) e da direita para a esquerda (d). Os pixels cinza representam a área inundada (DE MELO & CONCI, 2008).

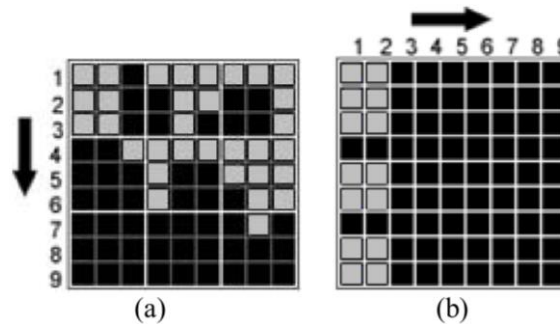
Figura 5: Exemplos de possíveis caminhos de percolação de um fluido (inundação) em uma imagem.



Fonte: De Melo & Conci (2008)

Além da direção do fluido, é considerado que exista a força de uma pressão, onde é representada pelas setas na Figura 6. A pressão cresce de cima para baixo na caixa vertical (Figura 6a) e da esquerda para a direita na caixa horizontal (Figura 6b) (DE MELO & CONCI, 2008).

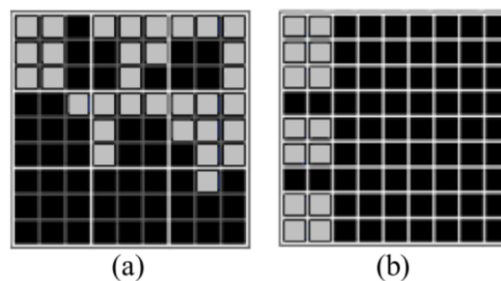
Figura 6. Indicação do sentido da ordem de pressão sobre as caixas: (a) Exemplo de pressão sobre caixas 3x3 para a figura 5a; (b) Exemplo de pressão sobre caixas 1x1 para a figura 5c.



Fonte: De Melo & Conci (2008)

Além disso, a sucularidade apresenta propriedade de escala. Com isso, a sucularidade do conjunto pode ser calculada cobrindo-o com caixas de vários tamanhos. São dois modos de dividir a imagem da figura 4a em caixas de tamanhos iguais. Com um fator de divisão, d , de 9 obtendo caixas de 1x1 pixels e por $d = 3$ obtendo caixas de 3x3 pixels (Figura 7) (DE MELO & CONCI, 2008).

Figura 7: Exemplo da forma de divisão das imagens intermediárias da figura 7 em caixas de tamanhos diferentes: (a) Figura 7a com $d = 3$, produzindo caixas de tamanho 3x3 pixels; (b) Figura 7b com $d = 9$, produzindo caixas de 1x1 pixels.



Fonte: De Melo & Conci (2008)

2.7.2.1 Análise da sucularidade de uma imagem binária na direção de cima para baixo.

Vindo da parte superior da imagem, todos os pixels de contorno são considerados. O pixel preto é visto como pixel vazio na imagem, onde um fluido atravessa e inunda essa área. Os pixels brancos são vistos como pixels preenchidos por algum material, logo são tidos como

barreiras ao fluido. Todas as áreas de inundação de um limite têm seus vizinhos (4 vizinhos para cada pixel: Superior; Inferior; Esquerda e Direita) considerados na próxima etapa e este processo é executado nessa ordem. Com isso, a área de inundação de cada imagem é dividida em tamanhos iguais de caixas (box sizes (BS (n)), onde n é o número de divisões possíveis de uma imagem) e a porcentagem de ocupação (PO) é mensurada em cada tamanho de caixa de cada imagem (DE MELO & CONCI, 2008).

A partir disso, para cada tamanho de caixa, k , é realizada a soma das multiplicações do $PO(BS(k))$, onde k é um número de 1 a n , pela pressão $PR(BS(k), pc)$, onde pc é a posição em x ou y do centróide da caixa na escala de pressão) aplicada à caixa. Para tornar o valor da sucularidade adimensional é dividido o valor, obtido em (1), por PR , levando em consideração que a imagem foi inteiramente preenchida pelo fluido (como se a imagem de entrada fosse totalmente preta). O cálculo é indicado em (1), segundo De Melo & Conci, (2008).

$$(1) \quad \sigma(BS(k), dir) = \frac{\sum_{k=1}^n OP(BS(k)) \times PR(BS(k), pc)}{\sum_{k=1}^n PR(BS(k), pc)}$$

onde dir = direção.

3 OBJETIVOS

3.1 GERAL

Avaliar os impactos no solo após o plantio de eucalipto em substituição ao cultivo da cana-de-açúcar.

3.2 ESPECÍFICOS

I- Quantificar os estoques de C dos solos, a partir da densidade e carbono orgânico total.

II- Calcular a porcentagem de poros dos solos, a partir do percentual de *voxels* vazios de imagens tomográficas.

III- Analisar a variabilidade da distribuição de poros dos solos através da medida de lacunaridade.

IV-Verificar a capacidade de um líquido atravessar os solos, a partir da medida de sucularidade.

4 MATERIAL E MÉTODOS

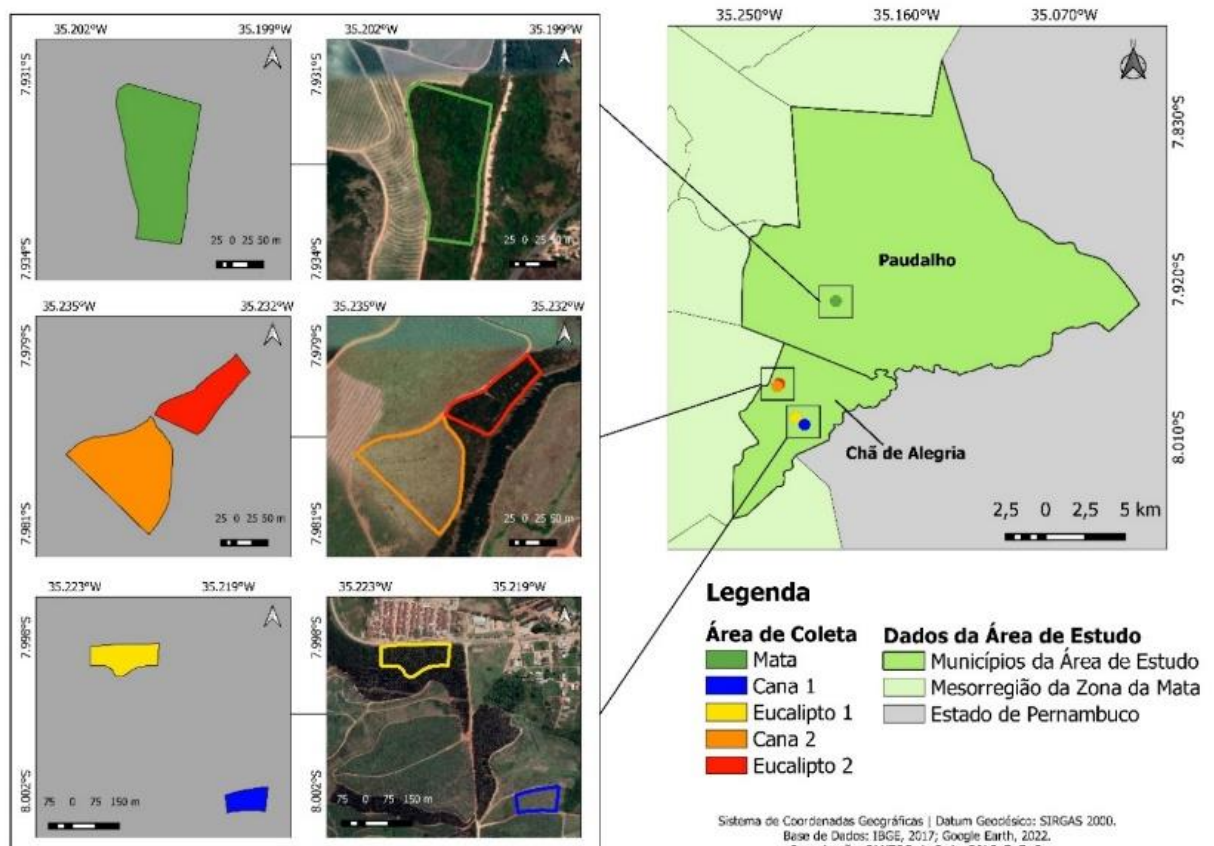
4.1 ÁREAS DE ESTUDO.

O presente estudo foi desenvolvido em Chã de Alegria e Paudalho, municípios pernambucanos situados na mesorregião da Mata Norte (Figura 8). Chã de Alegria foi escolhido por ser o segundo município, com a maior parte das plantações de eucalipto originadas da conversão de canaviais, perdendo apenas para Lagoa de Itaenga, outro município vizinho nessa mesorregião.

Cinco áreas de aproximadamente 1,5 ha cada, com relevo ondulado foram estudadas, sendo duas de cana-de-açúcar e duas de eucalipto localizadas em Chã de Alegria e uma de mata, localizada em Paudalho (Figura 8). Todas as áreas fazem parte da Usina Petribú e são assim definidas para melhor entendimento deste trabalho:

- Cana 1 (C1) e Eucalipto 1 (E1) pertencentes ao Engenho Brasil,
- Cana 2 (C2) e Eucalipto 2 (E2) pertencentes ao Engenho Bom Jesus,
- Mata (M) localizada na estrada de Muriongo e conhecida por Mata de Arara.

Figura 8: Localização geográfica dos municípios de Chã de Alegria e Paudalho em Pernambuco, com indicação das áreas de coletas das amostras de solo.



As áreas cultivadas com C1 e C2 apresentam 17 e 15 anos de plantio, respectivamente. Ao longo dos anos, essas áreas passaram por ciclos de colheitas, rebrota e renovação do canavial com subsolagem e gradagem na preparação do solo. É realizado a queima da palha antes do corte manual da cana, depois são usadas carregadeiras para recolhimento das canas cortadas (Figura 9). E1 e E2 apresentam 7 anos de cultivo, foi realizado o plantio direto das mudas em covas manuais com ausência de subsolagem e gradagem. Informações sobre as características fitossanitárias dos usos e cobertura do solo estão na tabela 4.

Figura 9: Aspecto da área próxima ao local de coleta dos solos após o recolhimento da cana cortada, no município de Chã de Alegria-PE.



Fonte: da autora

Tabela 4. Características de manejo e práticas fitossanitárias dos usos e cobertura do solo, nas áreas de coleta dos solos na Usina Petribu, nos municípios de Chã de Alegria e Paudalho, Pernambuco.

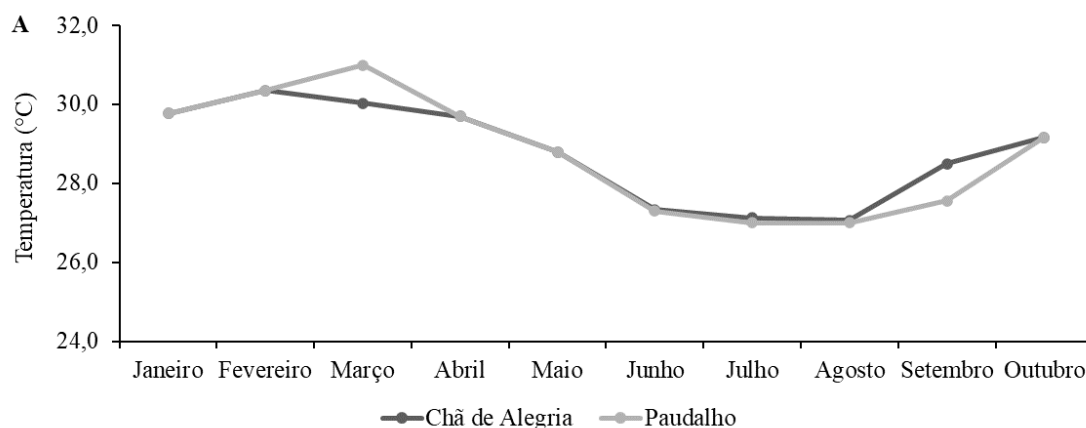
Usos	Características
M	Mancha de mata densa, sem exploração.
C1 e C2	▪ Adubação manual soca: Adubo fórmula 20 00 00 / 21 00. ▪ Combate as formigas/cupins: Inseticidas regent 800wg, karate 50 CE, isca formicida, diluente termonebulização. ▪ Aplicação Herbicida Pré-Manejo: Água, Herbicidas 2,4D, Herburon 500 BR e Roundup Glifosato. ▪ Aplicação Herbicida Pós-Manejo: Herbicidas Sencor e Callisto, redutor pH lower 7. ▪ Adubação Manual : Adubo fórmula 06 28 22. ▪ Catação capim na soca: Herbicida Velpar K=Hexazin. ▪ Adubação mecanizada na soca: Adubo fórmula 27 00 00 NITRA.

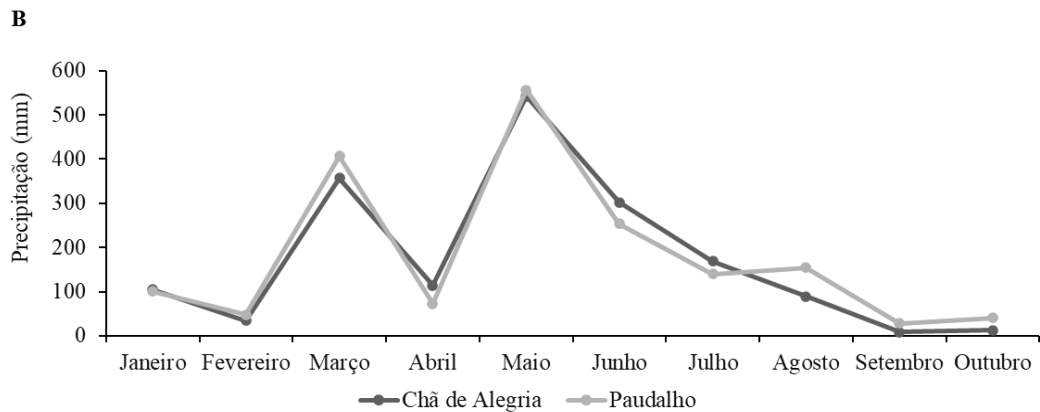
	▪ Aplicação aérea: Espalhantes adesivo disperse e Folder Atumus G, fungicida nativo, fertilizantes Mag 8 ms Boro e MS cana, enraizador Kymon plus – UB e Potamol – Ubyfo, ▪ Cortador de Soqueira: Enraizadores Potamol – Ubyfo e Kymon plus-UB, inseticida prêmio e fungicida Unizeb Glory.
E1 e E2	▪ Adubação completa pré-plantio: adubo fórmula 20 05 20 + 0,5% ▪ Combate a formiga: Inseticida Karete 50 CE, Inseticida Isca Formicida ATT e diluente termonebulização. ▪ Aplicação de pré-emergência: Água e Herbicida Heat. ▪ Aplicação pós-emergência: Herbicida Boral e Roundup Zapp QI 62 (impedem o desenvolvimento de plantas infestantes). ▪ Catação Glifosato: Água, Herbicida Roundup glifosato, redutor pH lower 7 e Herbicida Roundup Zapp QI 62 (controle de ervas daninhas em plantio direto).

Fonte: Acervo Usina Petribu.

A temperatura média máxima em Chã de Alegria-PE em março foi de 30 °C e em abril 29,7 °C. De maio a julho foi de 28,8; 27,3 e 27,1 °C, respectivamente (Figura 10A). A precipitação média em Chã de Alegria foi de 356,5 mm em março e 113,5 mm em abril. De maio a julho foi de 541,6, 301,6 e 168,7 mm, respectivamente (Figura 10B).

Figura 10. Características climáticas de janeiro- outubro de 2022, dos municípios de Chã de Alegria e Paudalho.
A: temperatura; B: precipitação.





Fonte: Apac (2022).

Segundo Ab’Sáber (2003), o relevo dos municípios de Chã de Alegria e Paudalho fazem parte do domínio morfoclimático de mares de morros que compreendem platôs de origem sedimentar, com vales estreitos, contando com encostas abruptas ou suaves, com fundos de várzeas. Geologicamente, suas glebas encontram-se inseridas na província Borborema, formada por litotipos do complexo Salgadinho e vertentes, composta por sedimentos da formação do grupo Barreiras. As classes de solos encontradas nas áreas de coletas foram Argissolo e Latossolo situados em relevo ondulado (ZAPE, 2001) (Figura 11) e seus principais atributos encontram-se detalhados na Tabela 5.

Figura 11: Classes dos solos das áreas de coletas na Usina Petribu, nos municípios de Chã de Alegria e Paudalho-PE.

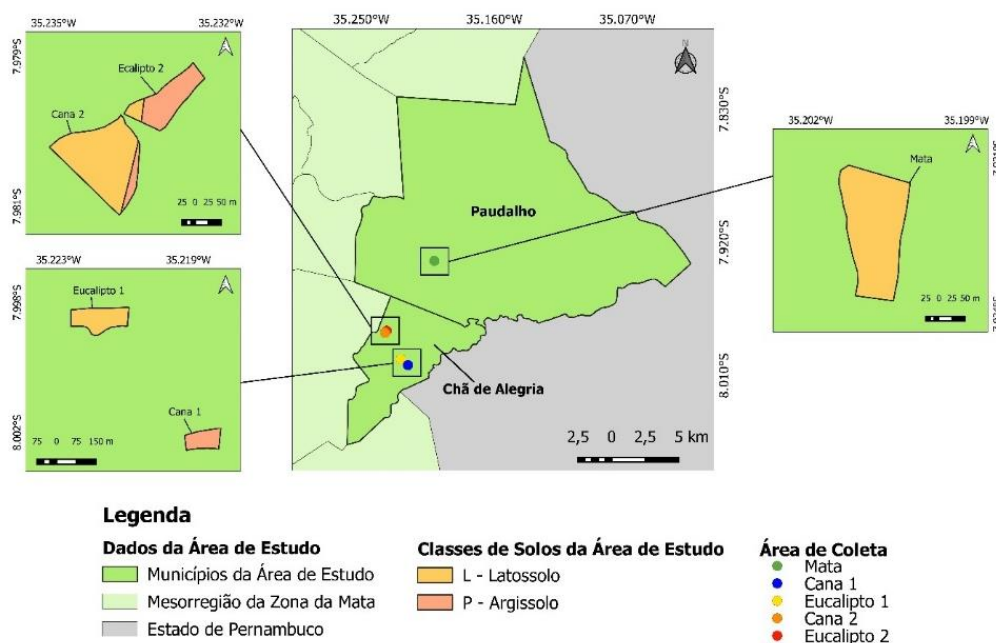


Tabela 5: Atributos das classes de solo nas áreas de coletas de Chã de Alegria e Paudalho- PE.

Classes	Atributos
Argissolo	Solos com processo de acumulação de argila, profundidade variável, desde forte a imperfeitamente drenados, a textura varia de arenosa a argilosa, forte a moderadamente ácidos, com presença de horizonte B textural de argila de atividade baixa. São típicos de relevo plano a muito acidentado.
Latossolo	Solos em avançado estágio de intemperização, muito evoluídos e profundos, fortemente ácidos, destituídos de minerais primários ou secundários, com estrutura granular, porosos, fortemente a bem drenados, com textura arenosa a argilosa, tem sequência de horizontes A, B, C com pouca diferenciação de sub-horizontes e transições usualmente difusas ou graduais. São típicos em relevo plano e suave ondulado. Mas, podem ocorrer em áreas mais acidentadas, inclusive em relevo montanhoso.

Fonte: EMBRAPA, 2018.

4.2 ANÁLISE DE ESTOQUE DE CARBONO.

Para realização dos cálculos dos estoques de C é necessário a determinação da concentração do carbono orgânico total (COT) e da densidade do solo.

4.2.1 Coleta.

O período de amostragem ocorreu entre março e agosto de 2022. As coletas foram realizadas em três linhas perpendiculares ao declive. Aleatoriamente, foram coletadas em cada linha, 7 amostras compostas oriundas de 5 amostras simples, em duas profundidades (0-10 e 10-20 cm), totalizando 42 amostras deformadas por uso de solo. As amostras foram transferidas para sacos plásticos identificados. Paralelamente, foram coletadas amostras de solo com auxílio de um cilindro metálico para determinação da densidade.

4.2.2 Procedimentos em laboratório.

- Determinação do carbono orgânico total (COT) dos solos de cana, eucalipto e Mata.

O COT foi determinado por oxidação via úmida com dicromato de potássio e ácido sulfúrico e titulação com sulfato ferroso amoniacal segundo a metodologia adaptada de Yeomans e Bremner (1988).

No laboratório, as amostras deformadas passaram pelo processo de secagem ao ar e foram peneiradas em malha de 2 mm. Posteriormente, foi pesado 0,5 g de solo e transferido para tubos de digestão, juntamente com 5 ml de dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$) a 0,167 mol L^{-1} e 7,5 ml de ácido sulfúrico (H_2SO_4) concentrado. Após o pré-aquecimento até a temperatura

de 170°C, os tubos foram colocados no bloco digestor e mantidos nessa temperatura por 30 minutos. Em seguida, depois de frios os conteúdos dos tubos foram transferidos para erlenmeyers de 250 ml, utilizando-se água destilada suficiente para um volume final de 80 ml. Em seguida, foram adicionados 0,3 ml da solução indicadora de Ferroin.

Por fim, as amostras foram tituladas com a solução de sulfato ferroso amoniacal 0,2 mol L⁻¹. Para cada bateria de análises foram feitos brancos, onde uns eram levados para digestão e outros permaneceram sem aquecimento, em temperatura ambiente. Este branco controle não aquecido é importante para o cálculo do total de dicromato perdido no aquecimento na ausência da amostra. Para o cálculo da porcentagem de carbono orgânico total (COT) foi utilizado a seguinte equação:

$$A = \frac{(V_{ba} - V_{am}) * (V_{bn} - V_{ba})}{V_{bn}} + (V_{ba} - V_{am})$$

Em que:

V_{ba} = volume gasto na titulação do branco controle com aquecimento;

V_{bn} = volume gasto na titulação do branco controle sem aquecimento;

V_{am} = Volume gasto na titulação da amostra.

$$COT = \frac{(A)(\text{molaridade Sulf. Ferroso})(3)(100)}{\text{Peso da amostra (mg)}}$$

Em que:

3 é o resultado da relação entre o número de mols de Cr_2O_7^- que reagem com Fe^{2+} (1/6), multiplicado pelo número de mols de Cr_2O_7^- que reagem com o C^0 (3/2), multiplicado pela massa atômica do C (12);

100 = fator de conversão de unidade (mg mg⁻¹ para dag kg⁻¹).

- *Determinação da densidade dos solos de cana, eucalipto e Mata.*

A amostragem é a mesma descrita no item 4.2.1. Os solos contidos no cilindro, foram transferidos para latas com peso conhecido e levados para secagem em estufa a 105°C. Após 72 horas, as amostras secas foram transferidas para o dessecador para esfriar. Na sequência, foram pesadas e para termos conhecimento da massa do solo seco.

A densidade foi determinada através do método do cilindro volumétrico (EMBRAPA, 2017), que se baseia na relação entre a massa de sólidos (representada pela massa do solo seco em estufa a 105 °C, expressa em g) e o volume do solo, assumido como volume interno do cilindro ($V = \pi \cdot r^2 \cdot h$), de acordo com a equação:

$$D_s = \frac{m_s}{V}$$

Em que:

D_s — densidade do solo, expressa em g cm⁻³;

m_s — massa de sólidos, expressa em g;

V — volume do solo, expressa em cm³.

4.2.3 Determinação do estoque de C dos diferentes usos dos solos

Os teores de COT (g kg⁻¹) foram convertidos em estoque de C (Mg ha⁻¹), baseado na espessura da camada e densidade do solo, através da equação (VELDKAMP, 1994):

$$Est. C = \frac{COT \cdot D_s \cdot e}{10}$$

Em que:

$Est. C$ é o estoque de C em Mg ha⁻¹;

COT é o carbono orgânico total em g kg⁻¹;

D_s é a densidade do solo em g cm⁻³;

e é a espessura da camada em cm.

4.3 GRANULOMETRIA

A amostragem é a mesma descrita no item 4.2.1. Entretanto, as amostras do terço superior do declive foram transformadas em uma amostra composta, nas duas profundidades (0-10 e 10-20 cm). Isso também foi realizado com as amostras do terço médio e inferior, totalizando seis amostras por área.

4.3.1 Procedimentos em laboratório.

A análise granulométrica, foi realizada pelo método do densímetro, segundo Geer & Or (2002) e modificado por Almeida (2008).

- *Dispersão das amostras e determinação da argila total.*

Foram pesadas 50,0 g de TFSA em garrafas e adicionou-se 25ml do dispersante Calgon (hexametáfosfato de sódio + carbonato de sódio), juntamente com 100 ml de água. Para a amostra testemunha foram adicionados apenas, 25ml de dispersante e 100mL de água. Na sequência, as garrafas foram agitadas em agitador do tipo Wagner (MA 160/24) à 50rpm por 16h. Na ordem, os conteúdos das garrafas foram transferidos para provetas de 1 L juntamente com água para um volume final de 940ml, foram agitadas manualmente e repousaram por 24 h. Posteriormente, foi realizado a leitura da suspensão de argila dispersa, com auxílio de um densímetro (modelo nº 152H), para determinação da argila total.

- *Separação da areia.*

As amostras contidas nas provetas foram peneiradas (peneira com malha de 53 µm), lavadas (para descarte do silte e argila), secas em estufa a 105°C por 24h e pesadas para determinação da areia total.

- *Determinação do silte*

A porcentagem de silte foi calculada pela diferença entre argila e areia, através da expressão:

$$\text{Silte (\%)} = 100 - (\% \text{ areia total} + \% \text{ argila total})$$

- *Determinação do fator F.*

Em uma lata com peso conhecido, foram pesadas 20,0 g de TFSA e colocadas para secar em estufa à 105°C. Após, 24 h foram transferidas para o dessecador por 30 min. Depois de frias, as latas com as amostras foram pesadas e o valor foi anotado para calcular o valor da TFSE, onde, TFSE é o peso da lata com amostras secas menos o peso da lata vazia. Conhecido o valor da TFSE, foi calculado o fator F da seguinte forma:

$$\text{Fator } F = \frac{\text{Massa TFSA}}{\text{Massa TFSE}}$$

Onde:

TFSA é terra fina seca ao ar;

TFSE é terra fina seca em estufa.

4.4 TOMOGRAFIA DE SOLOS

4.4.1 Coleta das amostras.

Foram coletadas 5 amostras de solo em cada uso e classe de solo, totalizando 25 amostras. Para obtenção das amostras indeformadas, foi escavada a camada superficial de 0-10 cm, com auxílio de cilindros de PVC de 7,5 cm de altura por 7,5 cm de diâmetro acoplados a uma lâmina (Figura 12). Os cilindros com as amostras indeformadas de solo foram identificados, vedados com algodão e fita crepe, acondicionados de forma a não sofrer impactos e transportados para o laboratório.

Figura 12: Coleta de amostras indeformadas de solo com cilindro de PVC, em Argissolo e Latossolo sob mata nativa e cultivo com eucalipto e cana-de-açúcar, nos municípios de Chã de Alegria e Paudalho, Pernambuco.



Fonte: da autora

4.4.2 Aquisição e reconstrução de imagens 3D.

No laboratório os cilindros com solo foram secos em estufa a 45 °C por 72 horas. Para obtenção das imagens do solo, as amostras secas foram escaneadas através de um microtomógrafo de raios-X de terceira geração modelo Nikon XT H 225 ST (Figura 13),

presente no Departamento de Energia Nuclear da UFPE, utilizando uma tensão de 150 kV, corrente 180 μ A e tempo de exposição de 500 ms, com uma resolução de 50 μ m para os voxels. Foi utilizado, um filtro de cobre com espessura de 0,5 mm para minimizar os fótons de baixa intensidade, causadores dos artefatos do tipo feixe de endurecimento (beam hardening) (SCARFE & FARMA, 2008) e maximizar o contraste entre diferentes fases do solo (sólidos e ar).

Figura 13: Posição do cilindro branco de pvc contendo a amostra de solo, dentro do tomógrafo de raio-X para escaneamento e obtenção das imagens.



Fonte: da autora

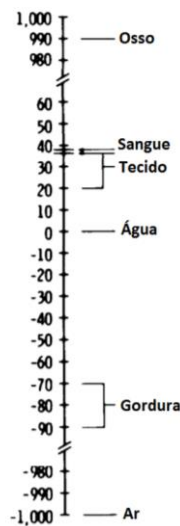
4.4.3 Reconstrução das imagens.

Após o escaneamento do volume total do cilindro, na aquisição preliminar, um sub-volume de interesse foi reconstruído por meio do software CTPro 3D XT 3.0.3 (Nikon Metrology NV), dando ênfase à parte mais central do cilindro, evitando assim alguma influência das bordas. As projeções axiais 2D reconstruídas teve a mesma resolução espacial da aquisição, ou seja, de 50 μ m, sendo salvas a uma resolução radiométrica de 16 bits e o volume final ficou com 800 projeções (stacks) de 800 x 800 pixels, totalizando assim um volume final de 800^3 voxels.

As imagens passaram por procedimentos a fim de assegurar a uniformização e a qualidade dos conhecimentos. Com a uniformização, os valores assumidos pelos voxels tornam-se interpretáveis através da radiodensidade real de materiais proposta por Hounsfield (1992), que se refere a uma escala de cinza que diversifica entre preto (ar), cinza e branco (sólido de

elevada radiodensidade), onde os valores dos *voxels* são transformados em unidades de Hounsfield (HU) (Figura 14). O número de tons de cinzas depende da resolução radiométrica (HOUNSFIELD, 1992) e nas imagens do presente estudo é possível mostrar até 2^{16} cores. Essa análise foi realizada no software VGStudio MAX 2.2, para uniformização em HU e aplicabilidade do filtro de Gauss para redução de ruídos. Os valores foram colocados em 1000 HU, e portanto, o ar e água passaram a ser representados por 0 e 1000 HU, respectivamente.

Figura 14: Escala de Hounsfield



Fonte: Hounsfield (1992).

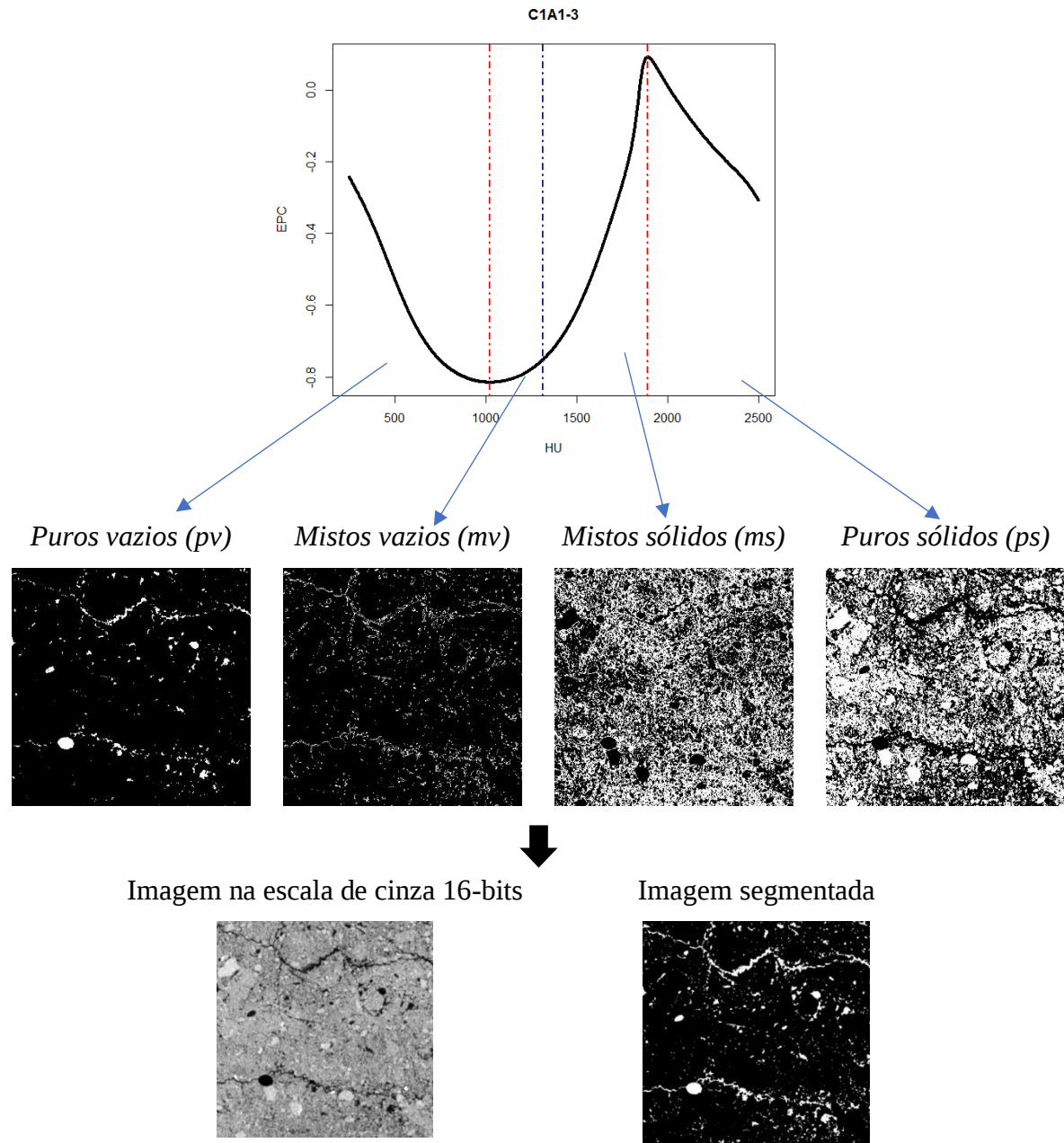
4.4.4 Segmentação das imagens.

As imagens foram segmentadas com a finalidade de separar os vazios e os sólidos a partir do método de correlação de planos de entropia, ou *Entropic Plans Correlations* (EPC) (Figura 15), baseado nas entropias de Shannon e Amostral. Este método faz a busca por regiões de *voxels* puros, que podem ser puros vazios (pv), todos os *voxels* menores ou iguais ao vale da curva de multissegmentação e puros sólidos (ps), todos aqueles maiores ou iguais ao pico da curva de multissegmentação (SANTOS, 2017). Uma calibração deste método pelo método *Pure Voxels Extraction* (PVE) demonstrou que uma boa segmentação a partir do vale é dada por:

$$EPC_{HU} = Vale_{curva} + (Sd_{imagem} * 0.0012)$$

Onde $Vale_{curva}$ é o valor assumido pelo vale e Sd_{imagem} é o desvio padrão da imagem. Este procedimento foi realizado para as 25 imagens, obtendo-se uma média de 1315 HU, o qual foi adotado como *threshold* para segmentação destas imagens.

Figura 15: Exemplo de segmentação de imagens via Entropic Plans Correlations (EPC) obtidas por tomografia de raios-X.



Fonte: Adaptado de Santos (2017).

4.4.5 Porcentagem de vazios nas imagens dos diferentes usos do solo.

A partir da segmentação das imagens foi possível determinar a porcentagem de vazios nas imagens dos solos. Uma vez que cada imagem dispõe de 800^3 *voxels*, essa porcentagem foi assim definida:

$$Vazios = \frac{Voxels_{vazios}}{800^3}$$

Onde $Voxels_{vazios}$ é quantidade de *voxels* vazios encontrados na imagem.

4.5 OBTENÇÃO DA MEDIDA DE LACUNARIDADE.

O algoritmo adotado para obtenção da medida de lacunaridade do solo, foi o método *fixed grid* (MFG), segundo Sebők et al. (2021). Uma vez fixados cubos de lado r , ou seja, de dimensões $r \times r \times r$, o número de *voxels* representados por poros é contado em cada um dos cubos. Cada cubo vai possuir sua taxa de ocupação com poros (p), onde $0 \leq p \leq r^3$ e ao final será possível quantificar quantos cubos de lado r obtiveram determinada taxa p de ocupação, ou seja, $n(p, r)$. Dividindo cada $n(p, r)$ pelo total de cubos fixos possíveis de lado r (T_r), é possível obter a probabilidade de ocorrer determinada taxa de ocupação, ou seja:

$$Q(p, r) = \frac{n(p, r)}{T_r}$$

Com os possíveis valores p e a probabilidade de suas respectivas ocorrências é possível obter o primeiro ($Z^{(1)}$) e o segundo ($Z^{(2)}$) momentos desta distribuição discreta, ou seja:

$$Z^{(1)} = \sum_r p * Q(p, r)$$

$$Z^{(2)} = \sum_r p^2 * Q(p, r)$$

O valor de lacunaridade para cubos de lado r , é dada por:

$$\Lambda(r) = \frac{Z^{(2)}}{(Z^{(1)})^2}$$

O MGF foi implementado em linguagem computacional R conforme (SEBŐK et al., 2021) e valores de lacunaridade foram obtidos para cubos de lado 2, 4, 8, 16, 32, 64 e 128 *voxels*. Uma vez obtidos todos os valores de lacunaridade nestes diferentes tamanhos de lado de cubo, utilizou-se a inclinação da reta de regressão linear simples entre o logaritmo natural do lado da caixa (independente) e logaritmo natural do valor de lacunaridade (dependente) para estimativa conjunta da lacunaridade em cada uma das imagens dos solos.

4.6 OBTENÇÃO DA MEDIDA DE SUCOLARIDADE.

Os cálculos para obtenção dos valores de sucularidade foram realizados a partir de cubos de acordo com o apresentado em De Melo & Conci (2008 e 2011) no item 2.5.2. Neste trabalho, a penetração de um líquido através do espaço poroso foi avaliada apenas na direção da gravidade, ou seja, do topo para baixo (*top to bottom*). A busca por clusters conectados no espaço poroso foi realizada a partir do algoritmo de Hoshem-Kopelman (HOSHEN & KOPELMAN, 1976). Os métodos foram implementados na linguagem computacional R. A sucularidade foi obtida para cubos de tamanhos de lado 2, 4, 8, 16, 20, 25, 40, 80 e 100 e a média destes achados foi utilizada como a sucularidade em cada imagem.

4.7 ANÁLISES ESTATÍSTICAS.

Todos os testes foram realizados em linguagem R e em todos os casos a normalidade das variáveis foi testada pelo teste de Shapiro-Wilk.

Para comparar a concentração de carbono orgânico total (COT), estoque de carbono (C) e os valores de densidade (D_s) no argissolo, entre duas amostras, foi utilizado o teste T para amostras dependentes com intuito de avaliar diferentes profundidades e o teste T para amostras independentes para comparar diferentes usos. Ainda para duas amostras, em caso de normalidade não observada utilizou-se o teste de Wilcoxon para avaliar diferentes profundidades e o teste de Mann-Whitney para comparar diferentes usos. Para comparações no latossolo, entre três amostras, em caso de normalidade observada utilizou a ANOVA seguida do teste de Scott-Knott e em caso de normalidade não observada utilizou-se o teste de Kruskal-Wallis seguido do teste de Dunn. Em todos os testes, adotou-se 5% de significância na decisão final. Para avaliar a correlação linear entre os valores de estoque de C e COT, foi utilizado o coeficiente de correlação de Pearson.

Para a comparação do comportamento do percentual de poros, lacunaridade e sucularidade em latossolo, os três usos do solo foram comparados através da análise de variância e as diferenças detalhadas a partir do pós-teste de Tukey. Para argissolos, os dois usos do solo foram comparados através do teste T para amostras independentes.

5 RESULTADOS

5.1 GRANULOMETRIA, CARBONO ORGÂNICO TOTAL E DENSIDADE NOS DIFERENTES USOS E CLASSES DE SOLOS.

As análises realizadas demonstraram que o teor de areia foi maior em todos os usos e classes de solo, na camada 0-10 cm (Tabela 6). No Argissolo, E2 e C1 apresentaram textura franco argilosa arenosa na profundidade de 0-10 cm, enquanto na camada 10-20cm predominou-se argilosa e argilosa arenosa, respectivamente. No que concerne ao Latossolo, o solo de E1 apresentou maior porcentagem de areia e menor concentração de argila, quando comparado com o solo de M e C2, nas duas profundidades (Tabela 6).

No Argissolo, a Ds foi menor em E2 quando comparado a C1, com $1,34 \text{ g cm}^{-3}$, na camada superficial do solo e $1,54 \text{ g cm}^{-3}$ de 10-20 cm, apresentando diferença significativa entre usos do solo ($p < 0,001$). No Latossolo, M apresentou menor densidade, com $1,28 \text{ g cm}^{-3}$ em relação aos solos sob C2 e E1 na camada 0-10 cm. Comparando eucalipto e cana-de-açúcar, E1 apresentou menor Ds em relação a C2, com $1,37$ e $1,43 \text{ g cm}^{-3}$, respectivamente. Na profundidade de 10-20 cm os valores da Ds não apresentaram diferença significativa entre os usos do solo (Tabela 6).

Com relação ao COT, no Argissolo, E2 apresentou significativamente maiores teores de COT quando comparado com C1, nas duas profundidades, com $12,84$ e $7,92 \text{ g kg}^{-1}$ ($p < 0,001$). No Latossolo, M apresentou maior teor de COT, com $18,18$ e $11,18 \text{ g kg}^{-1}$, do que C2 e E1 nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm, respectivamente. Entre eucalipto e cana-de-açúcar verificamos que, E1 apresentou menor teor de COT do que C2 na profundidade de 0-10 cm, com $8,35 \text{ g kg}^{-1}$ e 10-20 cm, com $6,85 \text{ g kg}^{-1}$ (Tabela 6).

Tabela 6: Granulometria, densidade (Ds) e carbono orgânico total (COT) em amostras de Argissolo e Latossolo sob mata nativa e cultivo com eucalipto e cana-de-açúcar, coletados nos municípios de Chã de Alegria e Paudalho, Pernambuco.

Latossolo						
Manejos	M		C2		E1	
Profundidades (cm)	0-10	10-20	0-10	10-20	0-10	10-20
Argila (%)	28,14	40,52	42,68	50,12	14,07	28,26
Areia (%)	62,05	51,24	49,05	41,98	74,53	68,19
Silte (%)	9,81	8,24	8,27	7,90	11,40	3,55
Textura	FGA	GA	GA	G	FA	FGA
Ds (g cm^{-3})	1,28Cb	1,50Aa	1,43Ab	1,52Aa	1,37Bb	1,52Aa
COT (g kg^{-1})	18,18Aa	11,18Ab	11,55Ba	8,69Bb	8,35Ca	6,85Cb
Argissolo						
Manejos	E2		C1			

Profundidades (cm)	0-10	10-20	0-10	10-20
Argila (%)	34,73	48,82	29,32	39,61
Areia (%)	49,77	40,22	59,04	50,06
Silte (%)	15,50	10,96	11,64	10,33
Textura	FGA	G	FGA	GA
Ds (g cm ⁻³)	1,34Bb	1,54Ba	1,45Ab	1,64Aa
COT (g kg ⁻¹)	12,84Aa	7,92Ab	9,07Ba	7,05Bb

M=mata; C1= cana da área I; C2=cana da área II; E1=eucalipto da área I; E2= eucalipto da área II; FGA= franco argiloso arenoso; GA= argiloso arenoso; G= argilosa; FA= franco arenosa; Ds=densidade; COT=carbono orgânico total. C2 – Cana na área 2, E1 – Eucalipto na área 1, M – Mata. Letras maiúsculas (A e B) na linha comparam entre os usos de solo e as minúsculas (a e b) comparam entre profundidades. Letras diferentes mostram que houve diferenças estatísticas entre os usos do solo e profundidades.

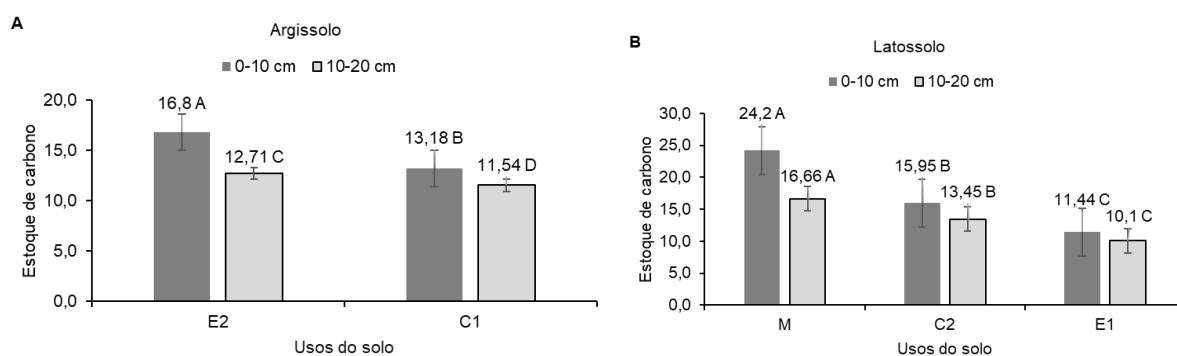
Fonte: da autora.

5.2 ESTOQUES DE C DOS DIFERENTES USOS E CLASSES DE SOLO.

No que se refere ao estoque de C no solo, foi observado no Argissolo que a área com eucalipto apresentou maior estoque de C nas duas profundidades (0-10 e 10-20 cm), com 16,81 e 12,71 Mg ha⁻¹, respectivamente. Enquanto na área com cana-de-açúcar esses valores foram 13,18 Mg ha⁻¹ na camada 0-10 cm e 11,54 Mg ha⁻¹ de 10-20 cm (Figura 16A).

No Latossolo, a área com mata apresentou maior estoque de C em relação à área com cana-de-açúcar (C2) e à área com eucalipto (E1), com 24,20 e 16,66 Mg ha⁻¹, na camada de 0-10 e 10-20 cm, respectivamente (Figura 16B), havendo diferença significativa entre os usos do solo ($p<0,001$). Na comparação entre eucalipto e cana-de-açúcar, o estoque de C foi maior em C2 nas duas profundidades, com 15,95 Mg ha⁻¹ e 13,45 Mg ha⁻¹ do que em E1 com 11,44 Mg ha⁻¹ e 10,1 Mg ha⁻¹ nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm, respectivamente. Houve diferença significativa entre os usos do solo ($p<0,05$) (Figura 16B).

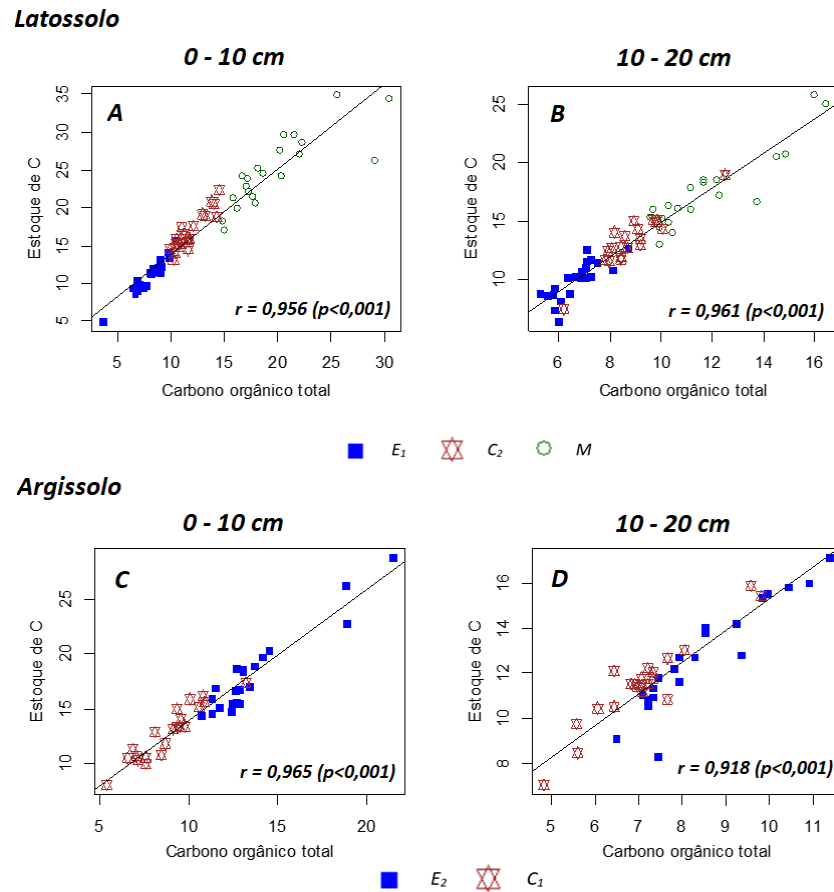
Figura 16: Estoque de C do solo (Mg ha⁻¹) em Argissolo e Latossolo sob mata e cultivo com eucalipto e cana-de-açúcar, nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm, coletados nos municípios de Chã de Alegria e Paudalho-PE.



Fonte: da autora.

Na Figura 17, foi observado uma alta correlação entre COT e estoque de C, nas duas classes e diferentes usos dos solos, nas profundidades 0-10 cm e 10-20 cm. Mostrando que, conforme o COT no solo aumenta o estoque de C cresce e o inverso.

Figura 17: Correlação entre concentração de carbono orgânico total e estoque de C em Argissolo e Latossolo sob mata (M=verde) e cultivo com eucalipto (E1 e E2= azul) e cana-de-açúcar (C1 e C2= vermelho), nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm, coletados nos municípios de Chã de Alegria e Paudalho, Pernambuco.



Fonte: da autora.

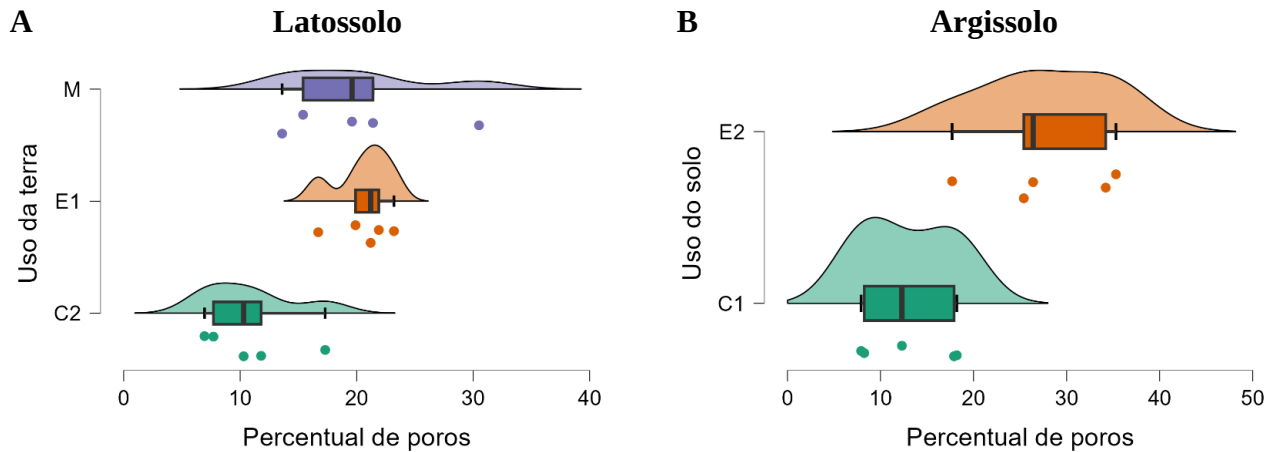
5.3 AVALIAÇÃO DO PERCENTUAL DOS POROS, LACUNARIDADE E SUCULARIDADE EM SOLOS SOB DIFERENTES USOS E CLASSES DE SOLOS.

Um resumo descritivo de medidas de centralidade, variabilidade e separatrizes para os valores de percentual de poros, lacunaridade e sucularidade em diferentes usos e classes de solo, encontram-se no apêndice A.

No Latossolo, o maior percentual de poros foi observado em E1 que variou entre 16,7%-23,2%, quando comparado a C2 com 6,9%-17,3%. Para mais, o solo de mata nativa (M= entre 13,6%-30,5%) e eucalipto (E1) apresentaram um percentual de poros semelhantes (Figura

18A). No Argissolo, o percentual de poros foi maior em E2 e variou entre 17,7%-35,3%, enquanto C1 variou entre 7,92%-18,2% (Figura 18B).

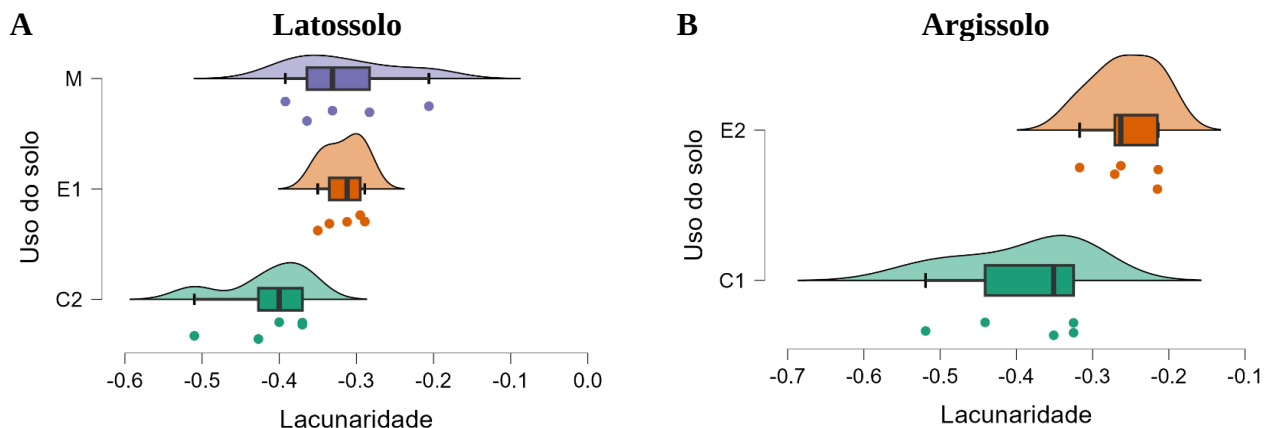
Figura 18: Percentual de poros de Latossolo e Argissolo sob mata (lilás), cultivo com eucalipto (laranja) e cultivo com cana-de-açúcar (verde), coletados nos municípios de Chã de Alegria e Paudalho, Pernambuco.



Fonte: da autora.

Em relação a lacunaridade, no Latossolo o eucalipto (E1 variou entre -0,35 e -0,289) apresentou menores valores em relação ao solo de cana-de-açúcar (C2 entre -0,51 e -0,37). O solo de mata nativa (variou entre -0,392 e -0,206) e eucalipto (E1) apresentaram valores aproximados (Figura 19A). No Argissolo, a lacunaridade do solo de E2 (variou entre -0,317 e -0,214) foi menor que no solo de C1 (variou entre -0,519 e -0,325) (Figura 19B). Os valores de lacunaridade podem ser consultados no Apêndice B, ao final deste trabalho.

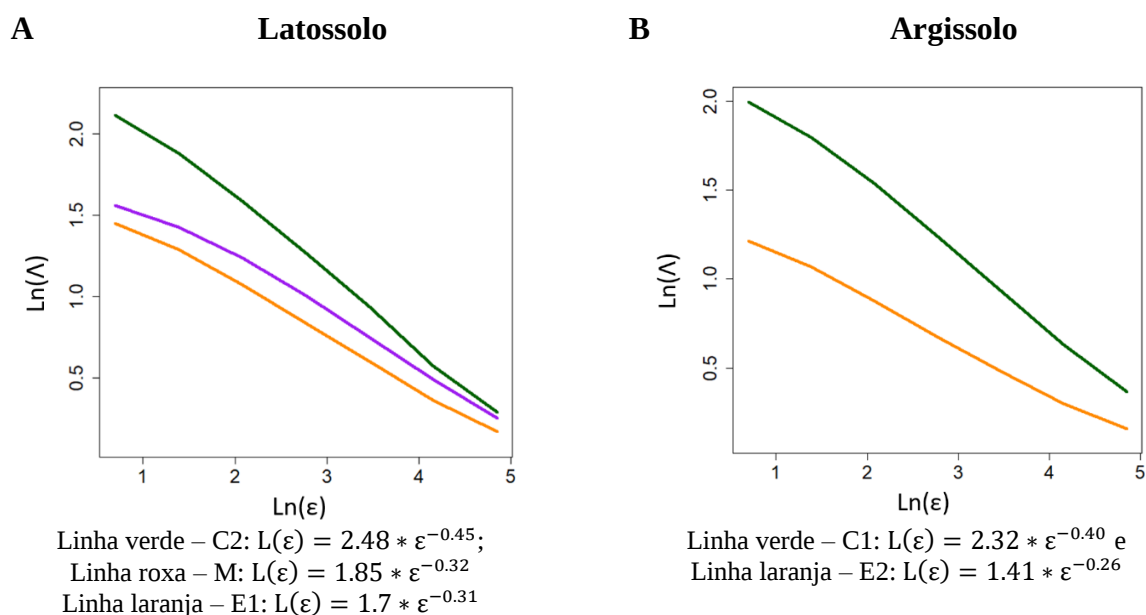
Figura 19: Lacunaridade em Argissolo e Latossolo sob mata (lilás) e cultivo com eucalipto (laranja) e cana-de-açúcar (verde), coletados nos municípios de Chã de Alegria e Paudalho, Pernambuco.



Fonte: da autora.

Através dos valores médios de lacunaridade, o expoente de regressão foi ajustado para cada uso da terra. As figuras 20A e B, mostram que os solos de eucalipto (E1 e E2) que antes eram cultivados com cana-de-açúcar, apresentaram maiores expoentes de lacunaridade beta (-0,31 e -0,26, respectivamente), enquanto os solos de cana-de-açúcar (C2 e C1) apresentaram menores expoentes de lacunaridade beta de -0,45 e -0,40. O maior expoente beta nos solos de eucalipto indica uma distribuição uniforme dos poros, enquanto o menor expoente beta de lacunaridade nos solos de cana-de-açúcar, confirma a maior heterogeneidade na distribuição de poros.

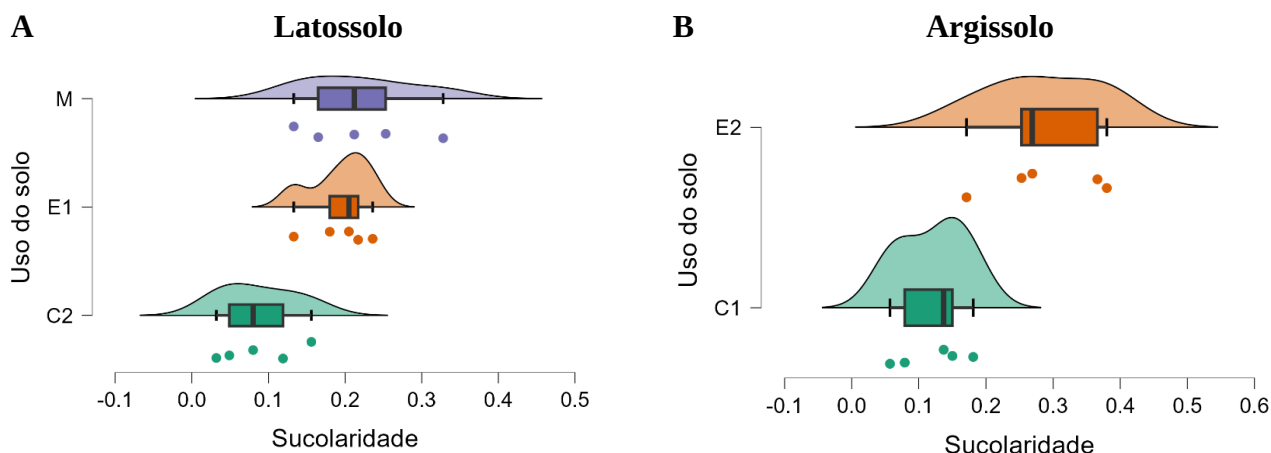
Figura 20: Impacto no expoente beta ajustado dos dados após a conversão do canavial por eucalipto, em Argissolo e Latossolo sob mata e cultivo com eucalipto e cana-de-açúcar, coletados nos municípios de Chã de Alegria e Paudalho, Pernambuco.



Fonte: da autora.

Em relação a sucularidade, no Latossolo o solo de eucalipto (E1 entre 0,133 e 0,236) apresentou maior sucularidade do que o solo de cana-de-açúcar (C2 entre 0,032 e 0,156) (Figura 21A). O solo de mata nativa (M entre 0,133 e 0,328) e eucalipto (E1) apresentaram sucularidades parecidas (Figura 21A). No argissolo, a sucularidade do solo de E2 variou entre 0,171 e 0,38, sendo maior do que no solo de C1, onde foi observado entre 0,057 e 0,181 (Figura 21B).

Figura 21: Sucularidade de Argissolo e Latossolo sob mata (lilás) e cultivo com eucalipto (laranja) e cana-de-açúcar (verde), coletados nos municípios de Chã de Alegria e Paudalho, Pernambuco.



Fonte: da autora.

As Tabelas 7 e 8 fazem a comparação do comportamento do percentual de poros, lacunaridade e sucularidade entre os diferentes usos para cada classe de solo. Para o percentual de poros, no Latossolo, entre E1 e M não houve diferença significativa ($p\text{-valor} > 0,005$) e apresentaram maiores percentuais com, $20,58 \pm 2,47$ e $20,1 \pm 6,6$, respectivamente (Tabela 7). Na comparação entre eucalipto e cana-de-açúcar, o percentual de poros em E1 foi superior, enquanto C2 apresentou $10,8 \pm 4,12$ (Tabela 7). Para o Argissolo, os resultados foram similares aos observados em Latossolos, com cana-de-açúcar ($C1=12,9 \pm 4,99$) apresentando menos percentual de poros em relação ao eucalipto ($E2= 27,8 \pm 7,19$) (Tabela 8).

Em relação a lacunaridade, no Latossolo, o eucalipto ($E1= -0,316 \pm 0,02$) apresentou menores inclinações negativas da reta do que a cana-de-açúcar ($C2= -0,415 \pm 0,06$), havendo diferença significativa entre esses usos ($p\text{-valor} < 0,005$). Entre mata e eucalipto não houve diferença significativa ($p\text{-valor} > 0,005$), onde M e E1 apresentaram menores inclinações negativas de reta, assumindo assim solos com menores lacunaridades e consequentemente com arranjos de poros maiores, mesmo quando observados em variadas escalas (Tabela 7). No Argissolo, os resultados entre eucalipto e cana-de-açúcar foram semelhantes aos encontrados no latossolo, com C1 apresentando maiores inclinações negativas de reta ($-0,392 \pm 0,085$) em relação a E2 ($-0,256 \pm 0,043$) (Tabela 8). Ou seja, o solo de cana-de-açúcar nas duas classes, apresentaram maiores lacunaridades, devido os arranjos menores ou mesmo raros de poros (Tabela 7 e 8). Os valores de lacunaridade podem ser consultados no Apêndice II, ao final deste trabalho.

A respeito da sucularidade, no Latossolo, o solo de eucalipto ($E1 = 0.194 \pm 0.04$) mostrou maiores valores do que o solo de cana-de-açúcar ($C2 = 0.087 \pm 0.05$), havendo diferença significativa entre esses usos ($p\text{-valor} < 0,005$) (Tabela 7). Os solos de eucalipto e mata ($M = 0.218 \pm 0.07$) apresentaram maiores valores de sucularidade, não havendo diferenças significativas entre eles ($p\text{-valor} > 0,005$). No Argissolo, os resultados entre eucalipto e cana-de-açúcar foram semelhantes aos encontrados no latossolo, com solo de C1 apresentando menor sucularidade ($0,121 \pm 0.051$) em relação a E2 ($0,288 \pm 0.086$) (Tabela 8). Dessa forma, os solos de cana-de-açúcar tanto no Latossolo como Argissolo, apresentaram menores sucularidades e consequentemente uma maior dificuldade de penetração por um líquido.

Tabela 7: Análise de variância dos dados de para comparação do percentual de poros, lacunaridade e sucularidade de amostras de Latossolo sob mata e cultivo com eucalipto e cana-de-açúcar, coletado nos municípios de Chã de Alegria e Paudalho, Pernambuco.

Variável	F	p	$\bar{X} \pm \sigma$		
			C2	E1	M
Percentual de poros	6.819	0.011*	10.8 ± 4.12 (B)	20.58 ± 2.47 (A)	20.1 ± 6.6 (A)
Lacunaridade	5.283	0.023*	-0.415 ± 0.06 (B)	-0.316 ± 0.02 (A)	-0.315 ± 0.07 (A)
Sucularidade	7.291	0.008*	0.087 ± 0.05 (B)	0.194 ± 0.04 (A)	0.218 ± 0.07 (A)

F – Valor da estatística do teste da ANOVA, p – p-valor da ANOVA, $\bar{X}$ – Valor médio, σ – Desvio padrão, C2 – Cana na área 2, E1 – Eucalipto na área 1, M – Mata, A e B grupos de similaridade definidos pelo pós-teste de Tukey, * Significativo a 5%.

Fonte: da autora.

Tabela 8: Teste T para comparação do percentual de poros, lacunaridade e sucularidade de amostras de Argissolo sob mata nativa e cultivo com eucalipto e cana-de-açúcar, coletado nos municípios de Chã de Alegria e Paudalho, Pernambuco.

Variável	T	p	$\bar{X} \pm \sigma$	
			C1	E2
Percentual de poros	-3.801	0.005*	12.9 ± 4.99 B	27.8 ± 7.19 A
Lacunaridade	-3.183	0.019*	-0.392 ± 0.085 B	-0.256 ± 0.043 A
Sucularidade	-3.717	0.006*	0.121 ± 0.051 B	0.288 ± 0.086 A

T – Valor da estatística do teste T para amostras independentes, p – p-valor do teste T para amostras dependentes, $\bar{X}$ – Valor médio, σ – Desvio padrão, C1 – Cana na área 1, E2 – Eucalipto na área 2, * Significativo a 5%.

Fonte: da autora.

Diante do exposto, é possível observar que os solos de eucalipto e mata apresentaram desempenhos semelhantes no percentual de poros totais, com presença de arranjos de poros mesmo em variadas dimensões a partir da análise de lacunaridade e com maior facilidade de percolação pela análise de sucularidade. Por sua vez, os solos de eucalipto, atingiram menores

inclinações negativas médias para os ajustes de regressão linear $\log(\text{lacunaridade}) \times \log(\text{tamanho do lado do cubo})$, sendo esperado menores valores de lacunaridade nestes usos, devido a presença de mais poros e/ou arranjos maiores de poros, o que contribuem para uma maior facilidade de penetração de um líquido (com maiores sucolaridades) em relação aos solos de cana-de-açúcar.

6 DISCUSSÃO

6.1 CARBONO ORGÂNICO TOTAL, DENSIDADE E ESTOQUE DE C NOS DIFERENTES USOS E CLASSES DE SOLOS.

A menor densidade do solo (D_s) em área com eucalipto, na profundidade de 0-10 cm, nas duas classes de solo, pode ser explicado pelo maior acúmulo de MO, devido ao crescimento das árvores e pela ausência do uso de máquinas durante o cultivo (MEDEIROS et al., 2021). Da mesma forma, foi observado por Medeiros et al. (2021) que a D_s do solo de eucalipto foi menor nas camadas 0-10 cm e 10-20 cm quando comparada com a solo de cana-de-açúcar mostrando que, a partir de 3 anos de cultivo a densidade inicial e outros atributos físicos do solo podem ser recuperados, evitando ou minimizando sua compactação. Da mesma forma, SENA et al. (2017) observaram sinais de recuperação da densidade do solo, após 15 anos de cultivo de eucalipto em áreas que antes eram ocupadas por pastagem.

A menor D_s do solo na área de mata nativa é justificada pela ausência de práticas de manejos que agredem o solo, o que preserva sua estrutura intacta. Além disso, a menor D_s no solo de *M* é oriunda das elevadas concentrações de MO (SOARES et al., 2022). O preparo convencional do solo para renovação do plantio de C1 pode ser a causa da menor concentração de COT do solo em relação a área de E2, no Argissolo (SOARES et al., 2022). Com isso, o plantio de eucalipto, considerado um sistema conservacionista, contribui para recuperação do COT, colaborando positivamente nos fatores físicos, químicos e biológicos do solo (ZHANG et al., 2019). Os resultados deste estudo estão de acordo com Medeiros et al. (2021), pois indicam que a conversão de cana-de-açúcar para eucalipto representa uma alternativa de manejo com potencial de acumular COT no solo. Da mesma forma, Assefa et al. (2022) observaram que a concentração de COT no solo de eucalipto foi 25 % maior quando comparado a área de pastagem. As menores concentrações de COT em E1, no Latossolo podem estar associados à área em que está sendo cultivado, pois apresenta sinais de erosão hídrica, propiciando a perda da camada superficial e fértil do solo, reduzindo a concentração de COT do solo (FENTIE et al., 2020).

O histórico de uso ou o manejo do solo contribui para o elevado estoque C no solo de eucalipto, pois seu período de rotação é mais longo, permitindo o aumento da deposição de serrapilheira conforme as árvores crescem (SHIBABAW et al., 2023). Com isso, o maior estoque de C em E2, no Argissolo, pode estar associado ao manejo do solo, onde foi realizado plantio direto, com redução do revolvimento do solo, resultando na contínua deposição de resíduos orgânicos ao longo dos 7 anos de cultivo.

Esses resultados estão de acordo com Shibabaw et al. (2023), pois observaram que a conversão de terras de cultivos para plantio de eucalipto, aumenta o estoque de C em 3% ou 1,6 Mg ha⁻¹, ao longo de 100 anos. Além disso, esses dados corroboram os resultados de Medeiros et al. (2021), que encontraram maior estoque C em solo de eucalipto com 3 anos (123,2 Mg ha⁻¹) e 6 anos (131 Mg ha⁻¹) de plantio, do que no canavial (107,9 Mg ha⁻¹) em uma profundidade até 60 cm, mostrando que o estoque de C no solo de eucalipto aumenta de acordo com o tempo de cultivo, em Alagoas. Diferente do cultivo anual de cana-de-açúcar com preparo convencional (queima de palha, gradagem e uso de máquinas) do solo, que é capaz de reduzir o estoque de C, afetando tanto a camada superficial quanto a mais profunda do solo segundo (MEDEIROS et al., 2022).

Para mais, Valente et al. (2023) destacaram o potencial do eucalipto para recuperação do estoque de C em solo degradado pela extração de bauxita, na Mata Atlântica brasileira. O mesmo, foi observado por Sena et al. (2017) onde o estoque de C aumentou após o plantio de eucalipto em áreas que anteriormente foram degradadas por pastagens, em Mato Grosso do Sul. Semelhantemente, Du Preez et al. (2022) relataram menor estoque de C em solo de pastagem com 43,6 Mg ha⁻¹ e maior em solo de eucalipto 91,6 Mg ha⁻¹, no Sul da África.

Diante do exposto, os resultados no Argissolo, mostraram o grande potencial do eucalipto em aumentar o armazenamento e fixação global de carbono no solo, contribuindo para a mitigação do aquecimento global. Entretanto, mostrou a insustentabilidade dos sistemas de produção de cana-de-açúcar com manejo convencional, o que tem sido preocupante para os ambientalistas. Segundo Medeiros et al. (2022), mais de 40% dos solos de cultivos anuais no Brasil, encontram-se sob preparo convencional, sendo necessário a aplicação de práticas agrícolas conservacionistas com o objetivo de recuperar o estoque de C no solo e contribuir para aumentar a produtividade e mitigar o aquecimento global.

Estão disponíveis práticas para o aprimoramento sustentável do ramo sucroenergético, como o uso de controle biológico para reduzir as aplicações de inseticidas (LENANCKER & POWELL, 2023; PABÓN-VALVERDE et al., 2022), o aproveitamento de resíduos agroindustriais (KEE et al., 2022), fixação biológica de nitrogênio para diminuir a utilização de fertilizantes nitrogenados (SARANRAJ et al., 2021) e a extinção da queima da palha que antecede a colheita. O manejo do canavial com manutenção da palha no solo e sem queima, contribui para o não revolvimento do solo ao longo do tempo de cultivo até a próxima renovação do canavial e estimula a adoção do plantio direto, resultando na preservação da estrutura e carbono do solo, ao longo do tempo (SOARES et al., 2022).

Segundo Dornfeld et al. (2021), que o uso de estratégias e práticas ambientais no setor sucroalcooleiro ajuda no aumento da competitividade e no desempenho operacional da usina, bem como, reduz as pressões sociais e alcança uma produção sustentável.

No Latossolo, o maior estoque de C em M pode ser explicado pela constante entrada de resíduos orgânicos e ausência das intervenções antrópicas neste sistema, que aumentam o teor de C no solo (ALMEIDA et al., 2021). Para mais, Shibabaw et al. (2023) observaram que o estoque de C no solo de floresta natural ($66,9 \text{ Mg ha}^{-1}$) foi maior do que no solo de eucalipto ($50,8 \text{ Mg ha}^{-1}$) e em terras cultivos ($48,1 \text{ Mg ha}^{-1}$).

O menor estoque de C em E1 foi inesperado, pois este resultado é o oposto dos achados por Medeiros et al. (2021), que ao estudarem os impactos da conversão do canavial em plantio de eucalipto em Latossolo, mostraram que o solo de eucalipto estocou mais C que o solo de cana-de-açúcar, em Alagoas. Os menores estoque de C em E1, podem estar associados a ausência de terraceamento, aos sinais de erosão hídrica com presença de ravinas, onde a MO do solo é exposta às ações microbianas acelerando sua decomposição e liberando C para atmosfera durante o cultivo, contribuindo para as mudanças climáticas (GMACH et al., 2018). Terraceamento é uma prática conservacionista, que impede o escoamento de água devido a infiltração ou drenagem no canal do terraço, contribuindo para redução da erosão hídrica (MACHADO & WADT, 2021).

Aliado a isso, a temperatura pode ter interferido no estoque de C de E1, uma vez que, a amostragem do E1 foi realizada em período quente, com temperaturas entre $29,7$ e 30°C . Este resultado está de acordo com Shibabaw et al. (2023), em que mostraram uma redução de 8% a 9% no estoque de C apenas com as mudanças climática e quando associada a baixa produção de serrapilheira, essa redução foi para 14% a 15% nos solos de floresta natural, eucalipto e terras de cultivos, sugerindo que as altas temperaturas aceleram a decomposição da MO do solo e respiração microbiana, resultando em uma perda maior do estoque de C. Do mesmo modo, Wei et al. (2014) indicaram que a redução do estoque de C do solo de terras agrícolas foi determinada pelas condições climáticas, pois a umidade e altas temperaturas anuais aumentaram a decomposição da MO e tal redução é maior, quando a conversão do uso do solo ocorre em regiões tropicais, devido às altas temperaturas.

Para mais, a textura franco arenosa do solo de E1, com alto teor de areia e baixo teor de argila pode ter influenciado na redução do estoque C, pois solos franco arenosos geralmente apresentam escassez tanto de MO como de nutrientes, devido solos com mais de 70% de areia na sua composição serem muito permeáveis, com baixa capacidade de retenção de água e serem mais suscetíveis à erosão (CENTENO et al., 2017). Este resultado está de acordo com outros

trabalhos. Por exemplo, no Cerrado brasileiro o baixo estoque de C no solo com 15 anos de plantio de eucalipto foi atribuído a sua textura franco arenosa. Da mesma forma, Wang et al. (2023) concluíram que a baixa precipitação, textura arenosa, remoção de resíduos, monocultura promoveram maior perda de estoque de C em comparação com a alta precipitação, textura fina do solo, resíduos retidos, cultivo duplo.

Igualmente, em sistemas integrados com eucalipto e capim em áreas que antes foi desenvolvida a pastagem, encontraram menor estoque de C na fração areia da MO do solo e confirmaram que o C está contido nas frações granulométricas mais estáveis (argila+silte) e mostra a importância dessas frações para agregação do solo, estabilidade da MO e proteção do C no solo (ALMEIDA et al., 2021). Segundo Cook et al. (2016), os estoques de C estão associados a porcentagem de argila e os solos com maior teor de argila tendem a ter mais C, onde o aumento de 1% da argila pode elevar o estoque de C entre 0,6 a 0,7 Mg ha⁻¹ no solo. Estes resultados no Latossolo mostram que, apesar do plantio de eucalipto ser considerado um sistema conservacionista, não foi capaz de estocar C no solo, tendo em vista que, as condições climáticas, textura e presença de erosão influenciaram no desempenho do carbono no solo.

Para mais, os valores de estoque de C nas duas classes e diferentes usos do solo, obtiveram desempenho semelhante as concentrações de COT, pois os aumentos do estoque C estão positivamente correlacionados com o incremento do COT no solo. Estes resultados estão de acordo com Wei et al. (2014), onde os estoques de C após a conversão de floresta em terra agrícola, foram significativos e positivamente correlacionados com a concentração de COT, mostrando que, em geral solos com maior estoque de C estão associados a maiores concentrações de COT.

Por meio dos resultados no solo de eucalipto (E1) no latossolo, foi possível perceber que o desempenho do estoque de C em solos de eucalipto depende das condições climáticas, da textura do solo e do seu manejo ao longo do período de cultivo. Além disso, a presença de ravinas e ausência de terraceamento na área do E1, chama atenção para uma manutenção ao longo do cultivo de eucalipto, com o intuito de evitar a perda de MOS por erosão, juntamente com o estoque de C no solo.

Com isso, sugere-se que para alcançar o sucesso da produção de eucalipto e colaborar para redução das emissões de CO₂ para atmosfera, contribuindo para mitigação das mudanças climáticas, são necessários estudos mais aprofundados sobre as condições do solo da região da Zona da Mata pernambucana, para a criação e aplicação de um plano florestal adequado às especificidades da área e alinhado aos objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS), para o

alcance de uma produção florestal mais sustentável, que considera além do progresso econômico, o sucesso socioambiental.

Para mais, o sinal de degradação do solo na área de eucalipto (E1) no Latossolo, mostra a necessidade da usina (proprietária das áreas de estudo desse trabalho) em investir em práticas de manejo sustentáveis, para melhorar a qualidade do solo e alcançar uma produção sustentável. Campanha et al. (2020) avaliaram o plantio de eucalipto em sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) diante de vários níveis de investimento tecnológico de manejo da fertilidade do solo e mostraram que a ILPF com vários arranjos e manejos gera competitividade, benefícios socioeconômicos e ambientais em comparação com os outros modelos de produção. Além disso, esse estudo alinhou-se aos (ODS), e cumpriu a meta 2.4 do ODS 2 “Fome Zero e Agricultura Sustentável” e a meta 15.3 do ODS 15 “Vida Terrestre”, pois utilizou um modelo para recuperação de pastagens com tecnologias de manejo da fertilidade do solo utilizando o sistema ILPF (CAMPANHA et al., 2020).

Dessa forma, é interessante que a usina adote o compromisso de alcançar as metas da Agenda 2030, associando seu plano de desenvolvimento aos ODS. Ao adotar práticas de manejos conservacionistas para evitar a erosão e recuperar o estoque de C do solo, a usina colaborará para o cumprimento do ODS 13 “Ações contra a mudança global do clima”, uma vez que o solo tem um importante papel na mitigação das mudanças climáticas (NAÇÕES UNIDAS-BRASIL, 2023). Além disso, ao assegurar a conservação e preservação das suas áreas de florestas nativas e implementar uma gestão sustentável dos seus plantios de eucaliptos, colaborará para o cumprimento das metas 15.1; 15.2 e 15.3 do ODS 15 “Vida Terrestre” (NAÇÕES UNIDAS-BRASIL, 2023). Inclusive, os bons resultados encontrados no solo da mata nativa desse estudo, mostra a importância da sua conservação e preservação.

É importante que empresas de base florestal apresentem um bom gerenciamento das florestas, dos ecossistemas aquáticos, do uso do solo e suas ações precisam ser planejadas de forma eficiente na redução de emissões de CO₂, para alcançar uma economia de baixo carbono. Dessa forma, o alinhamento do setor de base florestal com os ODS é uma forma de contribuir com a sociedade em geral e colaborar para o enfrentamento das mudanças climáticas.

6.2 AVALIAÇÃO DOS POROS, LACUNARIDADE E SUCULARIDADE NOS DIFERENTES USOS DO SOLO.

Os maiores percentuais de poros, os menores valores de lacunaridade e os maiores valores de sicularidade em solo das áreas com eucalipto (E1 e E2) podem ser explicados pela prática de manejo, uma vez que, foi realizado o plantio direto das mudas de eucalipto em covas

manuais sem subsolagem, o que conserva a estrutura do solo. Para mais, o maior percentual de poros encontrados nos solos de eucalipto também pode explicar o melhor desempenho de lacunaridade e sucolaridade. Esses resultados estão de acordo com os dados de Oliveira et al. (2022), que apresentaram melhores desempenhos de lacunaridade em plantio direto quando comparados com cultivos convencionais, indicando degradação da estrutura do solo em cultivo convencional e conservação em plantio direto.

O plantio direto normalmente não causa alterações severas na estrutura do solo. Por isso, é denominado como uma técnica conservacionista, pois é usado para diminuir o preparo do solo e as despesas no campo, bem como, conservar a estrutura do solo, diante do controle da perturbação (PIRES et al., 2019). Além do aumento de estoque de C e redução das emissões de CO₂, os resíduos de produções anteriores deixados no solo, a ausência de gradagem e subsolagem contribuem para estabilidade dos agregados, para os fluxos de água e ar pelo solo (PIRES et al., 2019).

Por outro lado, a cana-de-açúcar é plantada de modo convencional com utilização de máquinas pesadas (subsolagem e gradagem na preparação do solo, bem como, uso de carregadeiras após o corte da cana, que quebram os agregados, alterando a estrutura e influenciando na compactação do solo (SOARES et al., 2022). O preparo convencional é representado pela perda da camada superficial do solo, por causa da realização da aração e gradagem que reviram o solo, interrompendo a continuidade dos poros, prejudicando o fluxo da água e ar, bem como, a resistência do solo à erosão (PIRES et al., 2019).

Com isso, através dos resultados de percentual de poros, lacunaridade e sucolaridade em solos de E1 e E2 desse trabalho, foi possível observar que o plantio de eucalipto tem capacidade de melhorar o espaço poroso do solo, que antes era cultivado com cana-de-açúcar. Estudos que utilizaram métodos de avaliação convencionais (tamanho das partículas caracterizadas pelo método da pipeta; morfologia dos agregados por microscopia eletrônica de varredura; mesa de tensão), mostraram o potencial do eucalipto de melhorar o espaço físico do solo. Por exemplo, Medeiros et al., (2021), observaram após a conversão de áreas de canavial por eucalipto, o aumento dos agregados no solo de eucalipto com 3 e 6 anos de plantio. Da mesma forma, Rezende et al., (2022) observaram que o plantio de eucalipto obteve desempenho parecido ao solo de mata nativa, preservando mais as propriedades físicas do solo em comparação com cultivo convencional de mandioca.

Sena et al. (2017) observaram a redução da densidade e aumento da porosidade total no solo, após o plantio de eucalipto em área que antes era pastagem, no município de Três Lagoas-Mato Grosso do Sul. Sem excessiva interferência do homem (aração e tráfego de máquinas),

com ação das raízes na superfície do solo do eucalipto e mata nativa, e maior incremento da matéria orgânica do solo (MOS) podem contribuir para maior agregação e estruturação do solo, recuperando sua qualidade física (MEDEIROS et al., 2021; REZENDE et al., 2022).

Além disso, a recuperação do espaço poroso em solos de eucalipto, pode estar associada a quantidade de matéria orgânica. Segundo Oliveira et al. (2022), em sistemas conservacionistas geralmente são encontradas maiores quantidades de matéria orgânica, que associada a ação da fauna e penetração de raízes, contribuem para formação dos poros. Nesse estudo, o plantio direto realizado nas áreas de eucalipto e a falta de intervenção humana contribuíram para constante deposição de resíduos vegetais ao longo dos sete anos de cultivo, permitindo que a cobertura do solo fosse mantida permanentemente e influenciando na ação da fauna do solo juntamente com penetração de raízes, o que colabora para o melhoramento da aeração, drenagem e infiltração de água no solo, devido aos poros criados, por essa dinâmica (ROGASIK et al., 2014).

Além disso, no Latossolo, a semelhança das percentagens de poros, dos valores de lacunaridade e sucolaridade dos solos de eucalipto com a mata e a diferença entre esses últimos com o solo de cana-de-açúcar, confirma que cultivos com menos interferência humana são os que alcançam melhor distribuição de poros e maior capacidade de infiltração, contribuindo para melhor qualidade física do solo. Esses resultados corroboram os achados de Oliveira et al. (2022), onde observaram melhores desempenhos de lacunaridade em solos de mata nativa e em cultivos de plantio direto, do que em cultivos com manejo convencional. Da mesma forma, Santos et al., (2020) mostraram que os solos de floresta nativa são mais porosos, com distribuição espacial mais uniforme dos poros, enquanto o solo de cana-de-açúcar aponta maiores valores de lacunaridade com menor porosidade e distribuição heterogênea dos poros.

7 CONCLUSÕES

A conversão de áreas cultivadas com cana-de-açúcar para eucalipto, representa uma alternativa com significativo potencial de estocar C, contribuindo para a mitigação das emissões de gases do efeito estufa na atmosfera, em especial o CO₂.

Além disso, o plantio de eucalipto mostrou potencial de melhorar o espaço poroso do solo, que antes foi cultivado com cana-de-açúcar.

REFERÊNCIAS

- AB'SÁBER, Aziz Nacib. **Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas**. 4 ed. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003.
- ALLAIN, C.; CLOITRE, M. Characterizing the lacunarity of random and deterministic fractal sets. **Physical review A**, v. 44, n. 6, p. 3552, 1991.
- ALMEIDA, A.C.; SOARES, J.V. Comparação entre uso de água em plantações de *Eucalyptus grandis* e floresta ombrófila densa (Mata Atlântica) na costa leste do Brasil. **Revista Árvore**, v. 27, n. 2, 2003.
- ALMEIDA, B. G. Métodos alternativos de determinação de parâmetros Físicos do solo e uso de condicionadores químicos no estudo da qualidade do solo. Tese Doutorado. ESALQ/USP. São Paulo, p. 105. 2008.
- ALMEIDA, L. L.; FRAZÃO, L. A.; LESSA, T. A. M.; FERNANDES, L. A.; DE CARVALHO VELOSO, A. L.; LANA, A. M. Q.; FERREIRA, E. A. Soil carbon and nitrogen stocks and the quality of soil organic matter under silvopastoral systems in the Brazilian Cerrado. **Soil and Tillage Research**, v. 205, p. 104785, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104785>.
- AHMED, I. U.; ASSEFA, D.; GODBOLD, D. L. Land-Use Change Depletes Quantity and Quality of Soil Organic Matter Fractions in Ethiopian Highlands. *Forests*, 13(1), p.1–20, 2022. <https://doi.org/10.3390/f13010069>
- AMAZONAS, N. T.; FORRESTER, D. I.; OLIVEIRA, R. S.; BRANCALION, P. H. Combining Eucalyptus wood production with the recovery of native tree diversity in mixed plantings: Implications for water use and availability. **Forest Ecology and Management**, 418, 34-40, 2017. [doi:10.1016/j.foreco.2017.12.006](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.12.006)
- AMELUNG, W.; BOSSIO, D.; DE VRIES, W.; KÖGEL-KNABNER, I.; LEHMANN, J.; AMUNDSON, R.; CHABBI, A. Towards a global-scale soil climate mitigation strategy. **Nature communications**, v. 11, n. 1, p. 1-10, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18887-7>
- AMSALU, A.; HAILU, S. Effect of Eucalyptus Plantations on Soil Properties: The Case of Entoto Area, Northern Addis Ababa, Ethiopia. 2019. DOI: 10.7176/JEES.
- ANDRADE, V.C.S.; MATOS, P.F. A expansão canavieira e as alterações em áreas de preservação permanente em reservatórios artificiais. *Geo UERJ* 2018; (33):e34109.
- APAC. **Boletim pluviométrico diário**. Disponível em: <https://www.apac.pe.gov.br/uploads/Boletim-Pluviometrico-11-11-2022.pdf>. Acesso em: 11/11/2022.

ARANTES, Elaine Cristina; STADLER, Adriano; MAIOLI, Marcos Rogério.

Desenvolvimento Sustentável e Agenda 21. 2018. Disponível em:

https://drive.google.com/file/d/1uDHWxdeOwWaNduJz_pRvWLTCCOXXKpeJ/view.

Acessado em: 31/07/2023.

ARAUJO, I. S; OLIVEIRA, I. M; ALVES, K.S. **Silvicultura: Conceitos, regeneração da mata ciliar, produção de mudas florestais e unidades de conservação ambiental.** 1. ed. São Paulo: Érica, 2015, ISBN 978-85-365-3126-7.

ASSEFA, D., MENTLER, A., SANDÉN, H., REWALD, B.; GODBOLD, D. L. (2022). The Biological Origins of Soil Organic Matter in Different Land-Uses in the Highlands of Ethiopia. *Forests*, 13(4). <https://doi.org/10.3390/f13040560>.

BARBOSA, R. A. et al. Expansão Da Monocultura De Eucalipto Das Indústrias De Papel E Celulose: Uma Arena De Conflitos Ambientais. **Polêmica**, v. 19, n. 1, p. 069–090, 2019.

BENITES-LAZARO, L. L.; GIATTI, L.; GIAROLLA, A. Sustainability and governance of sugarcane ethanol companies in Brazil: Topic modeling analysis of CSR reporting. **Journal of Cleaner Production**, 197, 583–591, 2018. DOI:10.1016/j.jclepro.2018.06.212.

BRADY, N.C.; WEIL, R.R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos.** 3.ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 704p.

BRAIDA, João.; BAYER, Cimélio; ALBUQUERQUE, Jackson; REICHERT, José. Matéria orgânica e seu efeito na física do solo. *In: FILHO, Osmar; MAFRA, Álvaro; GATIBONI, Luciano. Tópicos em Ciência do Solo*, Viçosa-MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2011, v. 7, p. 221-278.

CAMACHO, R. S. a Insustentabilidade Social E Ambiental Do Agronegócio: a Territorialização Do Complexo Celulose-Papel Na Região Leste De Mato Grosso Do Sul. **Revista Científica ANAP Brasil**, v. 5, n. 6, p. 29–45, 2012.

CAMPANHA, M. M.; COSTA, T.; NETO, M.; REZENDE, A.; SIMÃO, E. D. P.; BORGHI, E.; OLIVEIRA, A.C; KALITA, L. Intensificação agropecuária no Cerrado: crescimento do eucalipto em ILPF sob diferentes níveis de investimento tecnológico. **Embrapa Milho e Sorgo-Circular Técnica (INFOTECA-E)**, 2020.

CARRERO, G. C.; FEARNside, P. M.; DO VALLE, D. R.; DE SOUZA ALVES, C. Deforestation trajectories on a development frontier in the brazilian amazon: 35 years of settlement colonization, policy and economic shifts, and land accumulation. **Environmental Management**, v. 66, n.6, p. 966-984. 2020, doi:10.1007/s00267-020-01354-w.

CENTENO, L. N., GUEVARA, M. D. F., CECCONELLO, S. T., SOUSA, R. O. DE, TIMM, L. C. Textura Do Solo: Conceitos E Aplicações Em Solos Arenosos. *Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade*, 4(1), 31, 2017. <https://doi.org/10.15210/rbes.v4i1.11576>.

CHEN, HE; FENG, SHI-JIN. Evaluation and application of fractal-based hydraulic constitutive model for unsaturated flow in heterogeneous soils. **Computers and Geotechnics**, v. 159, p. 105497, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2023.105497>.

CORDERO-RIVERA, A.; MARTÍNEZ ÁLVAREZ, A.; ÁLVAREZ, M. Eucalypt plantations reduce the diversity of macroinvertebrates in small forested streams. **Animal Biodiversity and Conservation**, v. 40, n. 1, p. 87–97, 2019.

COOK RL, BINKLEY D, STAPE JL. Eucalyptus plantation effects on soil carbon after 20 years and three rotations in Brazil. *Forest Ecology and Management*. 359:92-98, 2016. doi: 10.1016/j.foreco.2015.09.035

CHRISTINA, M.; NOUVELLON, Y.; LACLAU, J. P.; STAPE, J. L.; BOUILLET, J. P.; LAMBAIS, G. R.; LE MAIRE, G. Importance of deep water uptake in tropical eucalypt forest. **Functional Ecology**, v. 31, n. 2, p. 509-519, 2017. doi: 10.1111/1365-2435.12727.

DE MOURA, A. B. A. P.; ZAIDAN, R. T. Análise multitemporal e possíveis impactos da expansão da silvicultura de eucalipto no município de Carrancas – MG, um estudo para os anos de 2005, 2008, 2013 e 2015 / Analysis multitemporal and possible impacts of the expansion of forestry (...). **Caderno de Geografia**, v. 27, n. 48, p. 142–155, 2017.

DE MELO, R. H. C.; CONCI, A. **Succolarity: Defining a method to calculate this fractal measure**. 2008 15th International Conference on Systems, Signals and Image Processing. Anais... Em: 2008 INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEMS, SIGNALS AND IMAGE PROCESSING (IWSSIP). Bratislava, Slovakia: IEEE, jun. 2008. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/4604424/>>. Acesso em: 9 dez. 2022

DE MELO, R. H. C.; CONCI, A. How Succolarity could be used as another fractal measure in image analysis. **Telecommunication Systems**, v. 52, n. 3, p. 1643–1655, mar. 2011.

DORNFELD, H. C.; DA SILVA MANSANO, A.; BORGES, R. C.; OLIVEIRA, M. S.; PAULILLO, L. F. O. Impact of environmental strategies and practices on the socioeconomic development of the Brazilian sugar-energy sector. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 23, n. 9, p. 2655-2668, 2021.

DU PREEZ, C. C., LEBENYA, R. M., VAN HUYSSSTEEN, C. W. Change in total carbon stocks eight years after afforestation of a sub-humid grassland catchment with Pinus and Eucalyptus species. *New Forests*, 53(2), 267–284, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11056-021-09854-1>.

EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solo. 3. ed. Brasília, DF : Embrapa, p. 574 2017.

EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. **Centro Nacional de Pesquisa de Solos: Rio de Janeiro**, 5 ed, 2018.

EMBRAPA. Manejo e Conservação do Solo. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/centeio/producao/manejo-do-solo-e-adubacao/manejo-e-conservacao-do-solo>. Acessado em:15/06/2023.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. Soil. 2023. Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/en/topics/in-depth/soil>. Acesso em: 03/08/2023.

FANTINI, A. C. et al. The demise of swidden-fallow agriculture in an Atlantic Rainforest region: Implications for farmers' livelihood and conservation. **Land Use Policy**, v. 69, n. September, p. 417–426, 2017.

FENTIE, S. F. et al. Land Use and Land Cover Dynamics and Properties of Soils under Different Land Uses in the Tejibara Watershed, Ethiopia. **The Scientific World Journal**, v. 2020, p. 1-12, 2020.

GMACH, M. R., DIAS, B. O., SILVA, C. A., NÓBREGA, J. C. A., LUSTOSA-FILHO, J. F., SIQUEIRA-NETO, M. Soil organic matter dynamics and land-use change on Oxisols in the Cerrado, Brazil. *Geoderma Regional*, 14, e00178, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2018.e00178>.

GAINSBURY, A. M.; COLLI, G. R. Phylogenetic community structure as an ecological indicator of anthropogenic disturbance for endemic lizards in a biodiversity hotspot. **Ecological Indicators**, v. 103, n. February, p. 766–773, 2019.

GEER, G. W.; OR, D. Particle-size analysis. In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. (Ed.). *Methods of soil analysis. Part 4. Physical methods*. Madison: SSSA Book Series No. 5, 2002. p. 255- 293.

GEFEN, Y.; Y. Meir, B.B. Mandelbrot, A. Aharony, Geometric implementation of hypercubic lattices with noninteger dimensionality by use of low lacunarity fractal lattices, *Phys. Rev. Lett.* 50 (1983) 145–148, doi:10.1103/PhysRevLett.50. 145.

GHANNOUM, O.; PHILLIPS, N. G.; CONROY, J. P.; SMITH, R. A.; ATTARD, R. D.; WOODFIELD, R.; TISSUE, D. Exposure to preindustrial, current and future atmospheric CO₂ and temperature differentially affects growth and photosynthesis in Eucalyptus. **Global Change Biology**, v. 16, n. 1, p. 303-319, 2010. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2009.02003.x.

GURGEL, A. D. M.; SOUTO, A. D. S.; GUEDES, C. A.; GUEDES, G. H. F.; PEREIRA, J. A. D. S.; BEZERRA, V. C. R. Espelho sem reflexos: conflitos e vulnerabilidades socioambientais em uma região produtora de cana-de-açúcar. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 27, p. 1049-1060, 2022. DOI: 10.1590/1413-81232022273.27502020.

HOSHEN, J.; KOPELMAN, R. Percolation and cluster distribution. I. Cluster multiple labeling technique and critical concentration algorithm. **Physical Review B**, 14, n. 8, p. 3438-3445, 10/15/ 1976.

HOUNSFIELD, G. N. Godfrey N. Hounsfield - Nobel Lecture: Computed Medical Imaging. Nobel Lectures, Physiology or Medicine 1971-1980. Singapore: Editor Jan Lindsten, World Scientific Publishing Co. 1992.

IBÁ. **Relatório Anual 2019**. IBÁ: Brasília, 2019. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/iba-relatorioanual2019.pdf> Acesso em: 14/01/2021.

IBÁ. **Relatório Anual 2020**. IBÁ: Brasília, 2020. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-iba-2020.pdf>. Acesso em: 14/01/2021.

IBÁ. **Relatório Anual 2021**. IBÁ: Brasília, 2021. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorioiba2021-compactado.pdf>. Acesso em: 11/11/22.

IBÁ. **Relatório Anual 2022**. IBÁ: Brasília, 2022. Disponível em: [relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf](#). Acesso em: 28/06/2023.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura (PEVS) 2021**, IBGE: Rio de Janeiro, v. 36, p. 1-8, 2021. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/74/pevs_2021_v36_informativo.pdf. Acesso em: 11/11/22.

JANZEN, H. H. Carbon cycling in earth systems—a soil science perspective. **Agriculture, ecosystems & environment**, v. 104, n. 3, p. 399-417, 2004. doi:10.1016/j.agee.2004.01.040

JIA, G., E. SHEVLIAKOVA, P. ARTAXO, N. DE NOBLET-DUCOUDRÉ, R. HOUGHTON, J. HOUSE, K. KITAJIMA, C. LENNARD, A. POPP, A. SIRIN, R. SUKUMAR, L. VERCHOT. 2019: **Land–climate interactions**. In: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems [P.R. SHUKLA, J. SKEA, E. CALVO BUENDIA, V. MASSON-DELMOTTE, H.-O. PÖRTNER, D.C. ROBERTS, P. ZHAI, R. SLADE, S. CONNORS, R. VAN DIEMEN, M. FERRAT, E. HAUGHEY, S. LUZ, S. NEOGI, M. PATHAK, J. PETZOLD, J. PORTUGAL PEREIRA, P. VYAS, E. HUNTLEY, K. KISSICK, M. BELKACEMI, J. MALLEY, (eds.)].

JORNAL CANA, 2015. “Eucalipto começa a substituir cana-de-açúcar em áreas de declive da Zona da Mata.” Editada pelo Jornal do Commercio, julho 13, 2015. Disponível em: <https://jornalcana.com.br/eucalipto-comeca-a-substituir-cana-de-acucar-em-areas-de-declive-da-zona-da-mata/>. Acesso: 14/01/2021.

JÚNIOR, J.; OLIVEIRA, D.; TEMPORE, S. C.-G. O. Desenvolvimento, conflitos e impactos ambientais: a territorialização da Suzano e a resistência camponesa na mesorregião Leste Maranhense. **Uel.Br**, 2014.

KEE, S. H., GANESON, K., RASHID, N. F. M., YATIM, A. F. M., VIGNESWARI, S., AMIRUL, A. A. A., RAMAKRISHNA, S., BHUBALAN, K. A review on biorefining of palm oil and sugar cane agro-industrial residues by bacteria into commercially viable bioplastics and biosurfactants. *Fuel*, 321, 124039, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124039>.

LAURANCE, W. F.; SAYER, J.; CASSMAN, K. G. Agricultural expansion and its impacts on tropical nature. **Trends in ecology & evolution**, v. 29, n. 2, p. 107-116, 2014. doi:10.1016/j.tree.2013.12.001.

LENANCKER, Pauline; POWELL, Kevin S. A method for rearing and assessing the health of the sugarcane pest *Dermolepida albohirtum* (Coleoptera: Scarabaeidae). **Journal of Applied Entomology**, v. 147, n. 1, p. 94-103, 2023. DOI: 10.1111/jen.13077.

LESNE, Annick; LAGUËS, Michel. **Scale invariance: From phase transitions to turbulence**. Springer Science & Business Media, p.397, 2012. DOI: 10.1007/978-3-642-15123-1.

LIANG, J. et al. Effects of exotic em *Eucalyptus* spp. em plantations on soil properties in and around sacred natural sites in the northern Ethiopian Highlands. **AIMS Agriculture and Food**, v. 1, n. 2, p. 175–193, 2016.

LIMA, A. R. ET AL. Impactos da monocultura de eucalipto sobre a estrutura agrária nas regiões norte e central do Espírito Santo. **Revista NERA**, nº. 34, p. 12–36, 2016.

LIMA, L. G.; BARBOSA, J. L. Do monocultivo da cana ao monocultivo do eucalipto, duas faces de uma mesma tragédia: considerações sobre o complexo madeira-papel-celulose em Alagoas. In: ix Simpósio Internacional de Geografia Agrária/ x Simpósio Nacional de Geografia Agrária, IX, 2019, Recife. Anais...Recife:2019. Disponível em: file:///C:/Users/estat/Downloads/Domonocultivodacanaaomonocultivodoeucaliptoduasfacesda mesmatragdia-consideraessobreocomplexomadeira-papel-celuloseemAlagoas.pdf. Acessado em:09/02/2021.

LONG, H.; LIU, Y.; HOU, X.; LI, T.; LI, Y. Effects of land use transitions due to rapid urbanization on ecosystem services: Implications for urban planning in the new developing area of China. **Habitat International**, v. 44, p. 536-544, 2014. doi:10.1016/j.habitatint.2014.10.011.

MACHADO, P. L. O. A.; WADT, P. G. S. Terraceamento. 2021. **Site da Embrapa**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/arroz/producao/sistema-de-cultivo/arroz-de-terras-altas/terraceamento>. Acesso em: 28/06/2023.

MANDELBROT, B. B. *The Fractal Geometry of Nature*. W. H. Freeman, New York, 1982.

MEDEIROS, A. D. S.; FERRAZ, R. L. D. S.; SILVA, T. S. D.; SILVA, A. V. L. D.; MAIA, S. M. F. Impact of converting areas cultivated with sugarcane to eucalypt plantations on soil quality in Northeastern Brazil. **Revista Árvore**, v. 45, 2021. <http://dx.doi.org/10.1590/1806-908820210000017>.

MEDEIROS, A.; DOS SANTOS, T. C.; MAIA, S. M. F. Effect of long-term and soil depth on soil organic carbon stocks after conversion from native vegetation to conventional tillage

systems in Brazil. *Soil and Tillage Research*, 219, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105336>.

MENEZES, Henrique. **Os objetivos de desenvolvimento sustentável e as relações internacionais**. UFPB: João Pessoa, 2019.

MOLEDO, J. C.; SAAD, A. R.; DALMAS, F. B.; ARRUDA, R. D. O. M.; CASADO, F. Impactos ambientais relativos à silvicultura de eucalipto: uma análise comparativa do desenvolvimento e aplicação no plano de manejo florestal. **Geociências= Geociências**, v. 35, n. 4, p. 512-530, 2016.

NAÇÕES UNIDAS-BRASIL. Sobre o nosso trabalho para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil. 2023. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 31/07/2023.

NOAA. Carbon dioxide now more than 50% higher than pre-industrial levels. 2022. Disponível em: <https://www.noaa.gov/news-release/carbon-dioxide-now-more-than-50-higher-than-pre-industrial-levels> <https://www.noaa.gov/news-release/carbon-dioxide-now-more-than-50-higher-than-pre-industrial-levels>. Acesso em: 11/11/2022.

OJEDA-MAGAÑA, B. et al. Identification of pore spaces in 3D CT soil images using PFCM partitional clustering. **Geoderma**, v. 217–218, p. 90–101, 2014.

OLIVEIRA, E. S.; REATTO, A.; ROIG, H. L. Estoques de carbono do solo segundo os componentes da paisagem. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 32, n. 1/2, p. 71-93, 2017. <https://dx.doi.org/10.35977/0104-1096.cct2015.v32.23296>.

OLIVEIRA, J. A.; PIRES, L. F.; CÁSSARO, F. A.; GASPARETO, J. V.; POSADAS, A. N.; MOONEY, S. J. Soil pore system complexity and heterogeneity as affected by contrasting management practices. **Soil and Tillage Research**, v. 224, p. 105497, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105497>.

ONU. Sobre o nosso trabalho para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil. Nações Unidas Brasil, 2023. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 26/07/2023.

PABÓN-VALVERDE, A. H., MICHAUD, J. P., VARGAS, G. Cultural Control of Giant Sugarcane Borer, *Telchin licus* (Lepidoptera: Castniidae), by Soil Mounding to Impede Adult Emergence. **Florida Entomologist**, 105(1), 22–26, 2022. <https://doi.org/10.1653/024.105.0104>

PACHEPSKY, Y. A., GIMÉNEZ, D., CRAWFORD, J. W., RAWLS, W. J. Conventional and fractal geometry in soil science. In: **Developments in Soil Science**, v. 27, p. 7-18, 2000.

PAULUCIO, V. D. O.; SILVA, C. F. D.; MARTINS, M. A.; PEREIRA, M. G.; SCHIAVO, J. A.; RODRIGUES, L. A. Reforestation of a degraded area with Eucalyptus and Sesbania: microbial activity and chemical soil properties. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 41, 2017. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20160239>

PEREIRA-SILVA, E. F.; GARDON, F. R.; HARDT, E.; KELLER, V. C.; DOS SANTOS, R. F. Carbon ecosystem services and cellulose income from natural and commercial forests in the Brazilian savanna. **Forest Ecology and Management**, v. 499, p. 119582, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119582>.

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**, 191, p. 197–206, 2019. Doi:10.1016/j.still.2019.02.018

PIYARUWAN, H. I. G. S.; JAYASINGHE, P. K. S. C.; LEELAMANIE, D. A. L. Water repellency in eucalyptus and pine plantation forest soils and its relation to groundwater levels estimated with multi-temporal modeling. **Journal of Hydrology and Hydromechanics**, v. 68, n. 4, p. 382–391, 2020.

RAMOS, E.; NUVOLONI, M.; LOPES, R. Landscape Transformations and loss of Atlantic Forests: challenges for conservation. **Journal for Nature Conservation**, v. 66, p. 126152, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2022.126152>.

REZENDE, J., FREIRE, F. J., DE ARAÚJO FILHO, J. C., DOS SANTOS FREIRE, M. B. G., GOMES DE ALMEIDA, B., COSTA SANTOS, L. R. Impact of deforestation on the soil physical and chemical attributes, and humic fraction of organic matter in dry environments in Brazil. **IForest**, 15(6), 465–475, 2022. <https://doi.org/10.3832/ifor4016-015>.

RODRIGUES, G. S. S. C. et al. **Eucalipto no Brasil: expansão geográfica e impactos ambientais**. *Uberlândia: Composer*, 2021.

ROGASIK, H., SCHRADER, S., ONASCH, I., KIESEL, J., GERKE, H.H. Micro-scale dry bulk density variation around earthworm (*Lumbricus terrestris* L.) burrows based on X-ray computed tomography. **Geoderma**, 213, 471–477, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.08.034>.

ROMA, J. C. Os objetivos de desenvolvimento do milênio e sua transição para os objetivos de desenvolvimento sustentável. **Ciência e cultura**, v. 71, n. 1, p. 33-39, 2019.

SANDERMAN, J.; HENGL, Tomislav; F.; Gregory J. Soil carbon debt of 12,000 years of human land use. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 114, n. 36, p. 9575-9580, 2017.

STADLER, Adriano. MAIOLI, Marcos Rogério. **Organizações e Desenvolvimento Sustentável**. Curitiba: Editora IBPEX, 2011.

SANTOS, C. R. **Classificação e segmentação de imagens de tomografia de solos via planos de entropia**. Orientador: MENEZES, R. S. C. 2017. (Tese de doutorado) - Departamento de Estatística e Informática, Universidade Federal Rural de Pernambuco Disponível em: <http://www.tede2.ufrpe.br:8080/tede2/handle/tede2/7242>.

SANTOS, C. R. D., ANTONINO, A. C. D., HECK, R. J., LUCENA, L. R. R. D., OLIVEIRA, A. C. H. D., SILVA, A. S. A. D., MENEZES, R. S. C. 3D soil void space lacunarity as an index of degradation after land use change. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 42, 2020.

SCARFE, W. C.; FARMAN, A. G. What is Cone-Beam CT and How Does it Work? **Dental Clinics of North America**, v. 52, n. 4, p. 707-730, 2008/10/01/ 2008. ISSN 0011-8532. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001185320800044X> >.

SCHUMACHER, M.V; VIEIRA. M. **Silvicultura do eucalipto no Brasil**. Santa Maria-RS:Editora da UFSM, 2016, ISBN 978-85-7391-231-9.

SARANRAJ, P., JAYAPRAKASH, A., DEVI, V. D., AL-TAWAHA, A. R. M., AL-TAWAHA, A. R. Isolation and nitrogen fixing efficiency of *Gluconacetobacter diazotrophicus* associated with sugarcane: A review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 788(1), 2021. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/788/1/012171>

SEBŐK, D. et al. Fast and accurate lacunarity calculation for large 3D micro-CT datasets. **Acta Materialia**, v.214, p. 116970, 1 ago. 2021.

SENA, K. N.; MALTONI, K. L.; FARIA, G. A.; CASSIOLATO, A. M. R. Organic Carbon and Physical Properties in Sandy Soil after Conversion from Degraded Pasture to Eucalyptus in the Brazilian Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência Do Solo [online]**. vol.41, 2017. doi.org/10.1590/18069657rbcs20150505.

SHIBABAW, T.; RAPPE GEORGE, M. O.; GÄRDENÄS, A. I. The combined impacts of land use change and climate change on soil organic carbon stocks in the Ethiopian highlands. *Geoderma Regional*, 32, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2023.e00613>.

SILVA, T. A. L. A apropriação capitalista da Silvicultura no Brasil e sua lógica de produção do espaço. **Terra Livre**, v. 1, n. 50, p. 159-199, 2018.

SINGH, N., JHA, M., TIGNATH, S., SINGH, B. N. Multifractal approach to gully network interpretation of an alluvial badland terrain. **Geoderma**, 424, 116021, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116021>.

SOARES, V. A. S. F.; FRAZÃO, L. A.; PEGORARO, R. F.; SAMPAIO, R. A.; FERNANDES, L. A. Irrigated sugarcane crops improve the quality of soil organic carbon over time. **Semina: Ciênc. Agrár. Londrina**, v. 43, n. 1, p. 283-296. 2022. DOI: 10.5433/1679-0359.2022v43n1p283.

SOUZA, D. C.; SOUZA, L. R.; COUTO, E. V.; CAXAMBÚ, M. G.; PERON, A. P. Effect of slope on the forest structure of the Atlantic Forest domain in southern Brazil. **Brazilian Journal of Biology**, v. 84, 2022. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.258048>.

STANTURF, J. A.; VANCE, E. D.; FOX, T. R.; KIRST, M. Eucalyptus beyond its native range: Environmental issues in exotic bioenergy plantations. **International Journal of Forestry Research**, p. 1-5, 2013. doi.org/10.1155/2013/463030.

UNITED NATIONS: Department of Economic and Social Affairs Sustainable Development. The 17 Goals, 2023. Disponível em: <https://sdgs.un.org/goals>. Acesso em: 01/08/2023.

VALENTE, F. D., DE CASTRO, M. F., LUSTOSA FILHO, J. F., DE CARVALHO GOMES, L., NEVES, J. C. L., DA SILVA, I. R., DE OLIVEIRA, T. S. Native multispecies and fast-growing forest root biomass increase C and N stocks in a reclaimed bauxite mining area. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(1), 2023. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10720-6>.

VASCONCELOS, R. N. et al. The role of Eucalyptus planted forests for fruit-feeding butterflies' conservation in fragmented areas of the Brazilian Atlantic forest. **Forest Ecology and Management**, v. 432, 2018, p. 115–120, 2019.

VELDKAMP, E. Organic Carbon Turnover in Three Tropical Soils under Pasture after Deforestation. **Soil Science Society of America Journal**, 58(1), p.175-180, 1994. Doi:10.2136/sssaj1994.03615995005800010025x.

WANG, J., LI, W., MU, M., CHEN, J., LI, Y., LIU, H., SU, Q. Particle size composition characteristics of weathered debris from grey–green slate under the action of freeze–thaw and dry–wet cycles. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, p. 1421, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-27888-7>.

WEI, X., SHAO, M., GALE, W., LI, L. Global pattern of soil carbon losses due to the conversion of forests to agricultural land. *Scientific Reports*, 4, 6–11, 2014. <https://doi.org/10.1038/srep04062>.

WU, T., ZHANG, Y., WANG, Y., WANG, S., LEI, L. Factors affecting the stability of soil aggregates of plinthosols in the middle reaches of the Yangtze River. **Catena**, v. 228, p. 107159, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107159>.

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, 19(13), 1467–1476, 1988. doi:10.1080/00103628809368027.

ZHANG H, DENG Q, HUI D, WU J, XIONG X, ZHAO J, et al. Recovery in soil carbon stock but reduction in carbon stabilization after 56-year forest restoration in degraded tropical lands. **Forest Ecology and Management**. 2019; 441:1-8. doi:10.1016/j. foreco.2019.03.037.

ZAPE. 2001. Mapa de reconhecimento de baixa e média intensidade de solos do estado de Pernambuco. Disponível em: http://geoinfo.cnps.embrapa.br/layers/geonode%3Aasolo_ernambuco_wgs84. Acesso em:15/01/2021.

ZEGEYE, H. Environmental and socioeconomic implications of Eucalyptus in Ethiopia. *Eucalyptus Species Management, History, Status and Trends in Ethiopia*. **Addis Ababa: ETH-CANA publishing company**, p. 184-205, 2010.

APÊNDICE A- Tabela 9: Estatísticas descritivas do percentual de poros, lacunaridade e sucularidade de um latossolo sob diferentes usos.

Estatística	Latossolo								
	Percentual de poros			Lacunaridade			Sucularidade		
	C_2	E_1	M	C_2	E_1	M	C_2	E_1	M
Mediana	10.300	21.200	19.600	-0.4	-0.312	-0.331	0.08	0.205	0.212
Média	10.810	20.580	20.100	-0.415	-0.316	-0.315	0.087	0.194	0.218
Desvio padrão	4.122	2.475	6.604	0.058	0.026	0.073	0.051	0.04	0.076
Coeficiente de variação	0.381	0.12	0.329	-0.14	-0.082	-0.233	0.582	0.205	0.35
P-valor de Shapiro-Wilk	0.481	0.675	0.542	0.19	0.612	0.764	0.789	0.709	0.892
Mínimo	6.940	16.700	13.600	-0.51	-0.35	-0.392	0.032	0.133	0.133
Máximo	17.300	23.200	30.500	-0.37	-0.289	-0.206	0.156	0.236	0.328
1º quartil	7.710	19.900	15.400	-0.427	-0.335	-0.364	0.049	0.18	0.165
3º quartil	11.800	21.900	21.400	-0.37	-0.295	-0.283	0.119	0.217	0.253

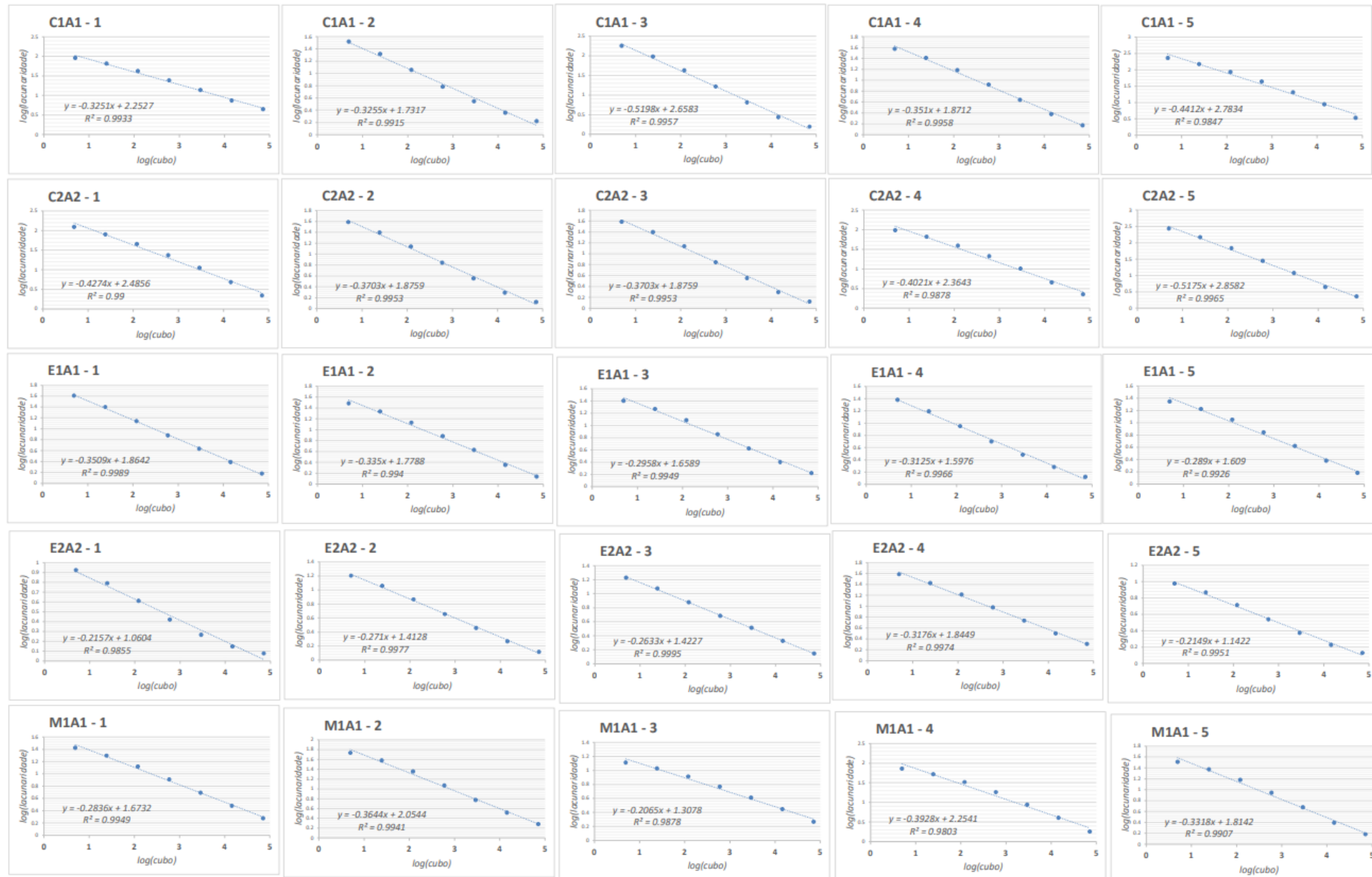
Fonte: da autora.

Tabela 10: Estatísticas descritivas do percentual de poros, lacunaridade e sucularidade de um argissolo sob diferentes usos.

Estatística	Argissolo					
	Percentual de poros		Lacunaridade		Sucularidade	
	C_1	E_2	C_1	E_2	C_1	E_2
Mediana	12.300	26.400	-0.351	-0.263	0.137	0.269
Média	12.914	27.800	-0.392	-0.256	0.121	0.288
Desvio padrão	4.997	7.193	0.085	0.043	0.051	0.086
Coeficiente de variação	0.387	0.259	-0.218	-0.168	0.425	0.3
P-valor de Shapiro-Wilk	0.166	0.55	0.176	0.428	0.657	0.57
Mínimo	7.920	17.700	-0.519	-0.317	0.057	0.171
Máximo	18.200	35.300	-0.325	-0.214	0.181	0.38
1º quartil	8.250	25.400	-0.441	-0.271	0.079	0.253
3º quartil	12.300	26.400	-0.351	-0.263	0.137	0.269

Fonte: da autora.

APÊNDICE B - Análise de lacunaridade com cubos de lado 2,4,8,16,32,6.



APÊNDICE C - Artigo da tese publicado na Revista Contribuciones a las Ciencias Sociales.

Soil carbon stocks after eucalyptus planting to replace sugarcane cultivation

DOI: 10.55905/revconv.16n.5-017

Recebimento dos originais: 18/04/2023

Aceitação para publicação: 18/05/2023

Alane Silva de Aquino dos Santos

PhD student in the Graduate Program in Development and Environment

Institution: Federal University of Pernambuco (CFCH)

Av. Prof. Moraes Rego, 1235 - University City, Recife - PE, 50. 670-901

aquino.alane@hotmail.com

81 98903 4072

Maria do Socorro Bezerra de Araújo

PhD in Soils and Plant Nutrition

Institution: Federal University of Pernambuco (DCG)

Av. Prof. Moraes Rego, 1235 - University City, Recife - PE, 50. 670-901

maria.baraujo@ufpe.br

81 99705 9165

Antonio Celso Dantas Antonino

PhD in Soil Physics

Institution: Federal University of Pernambuco (DEN)

Av. Prof. Moraes Rego, 1235 - University City, Recife - PE, 50. 670-901

antonio.antonino@ufpe.br

81 98565 1962

Carlos Renato dos Santos

PhD in Biometrics and Applied Statistics

Institution: Federal University of Pernambuco (CAV)

Rua Alto do Reservatório, s/n, Bela Vista, Vitória de Santo Antão-PE, 55.608-680

carlos.santos@ufpe.br

81 99213 7546

Dário Costa Primo

PhD in Energy and Nuclear Technologies: agriculture and environment

Institution: Federal University of Pernambuco (DEN)

Av. Prof. Moraes Rego, 1235 - University City, Recife - PE, 50.670-901

darioprime@gmail.com

Jose Nildo Tabosa

D.Sc. Energy and Nuclear Technologies: Plant Breeding

Institution: Instituto Agrônômico de Pernambuco (IPA)

Avenida General San Martin, 1371, Bonji, Recife, PE, 50.761-000

tabosa@ipa.br

81 99913 1608

RESUMO

A conversão de áreas de cultivos agrícolas para o plantio de eucalipto é considerada eficaz para o abastecimento mundial de madeira, protegendo as florestas naturais e para

aumentar a fixação e o armazenamento global de carbono (C) no solo, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas. Nesse sentido, foi avaliado o impacto da conversão da cana-de-açúcar para eucalipto no estoque de carbono em um argissolo (acrisols) e um latossolo (ferralsols) da Zona da Mata pernambucana, Brasil. Foi selecionada uma área de mata, duas áreas de eucalipto, com sete anos de plantio e duas áreas de cana-de-açúcar, com 15 e 17 anos de plantio. Foi realizada a análise granulométrica do solo e determinação do estoque de carbono foi efetuada através dos valores de densidade (Ds) e carbono orgânico total do solo (COT). O teor de areia foi maior do que argila, nos três usos e nas duas classes de solo. Observou-se menor Ds no solo de eucalipto nas duas classes de solo. No acrisols, as maiores concentrações de COT e estoques de carbono foram no solo de eucalipto quando comparado com cana-de-açúcar. Entretanto, no ferralsols, as concentrações de COT e estoque de carbono foram maiores na cana-de-açúcar. Conclui-se que, o plantio de eucalipto tem potencial de estocar carbono, mas isso vai depender das condições do solo da área em que o eucalipto está inserido.

Palavras-chave: Uso da terra, florestas nativas, mudanças climáticas.

SUMMARY

The conversion of areas of agricultural crops to eucalyptus plantations is considered effective for the global supply of wood, protecting natural forests and for increasing the fixation and global storage of carbon (C) in the soil, contributing to the mitigation of climate change. In this sense, the impact of the conversion of sugarcane to eucalyptus in the carbon stock in an argisol (acrisols) and a oxisol (ferralsols) from the Zona da Mata of Pernambuco, Brazil, was evaluated. One area of forest, two areas of eucalyptus, with seven years of planting and two areas of sugarcane, with 15 and 17 years of planting, were selected. The granulometric analysis of the soil was performed and determination of the carbon stock was performed through the values of density (Ds) and soil total organic carbon (TOC). The sand content was higher than clay, in the three uses and in the two soil classes. Lower Ds was observed in eucalyptus soil in both soil classes. In the acrisols, the highest concentrations of TOC and carbon stocks were in the eucalyptus soil when compared to sugarcane. However, in the ferralsols, the concentrations of TOC and carbon stock were higher in sugarcane. It is concluded that the planting of eucalyptus has the potential to store carbon, but this will depend on the soil conditions of the area in which the eucalyptus is inserted.

Keywords: Land use, native forests, climate change.

1 INTRODUCTION

Climate change has been the subject of discussion around the world and the mitigation of greenhouse gas emissions in the atmosphere, especially carbon dioxide (CO₂) has become one of the biggest challenges, as this gas is responsible for about 80% of the global temperature rise (Noaa, 2022). Soils are critical to managing climate change, as they store two to three times more carbon than the atmosphere (Rumpel et al., 2018). It is estimated that the highest CO₂ emissions to the atmosphere derive from the change in land use and cover, mainly from the conversion of native vegetation to agriculture (Noaa, 2022).

Worldwide, areas with conventionally managed agricultural crops and degraded pastures lead to a large loss of C in soils (Ahmed et al., 2022; Rezende et al., 2022). However, it was found that the greatest potential for C sequestration is found in agricultural soils,

especially those with low yield and historical reduction of C (Amelung et al., 2020). For this, it is necessary to adopt systems that increase the entry of organic waste into the soil, along with the stock of C (Paustian et al., 2019).

Among these systems, eucalyptus planting has great potential to increase soil organic matter (SOM) content and recover the C stock of soils degraded by other activities, such as pasture, agriculture, clay extraction (Valente et al., 2023; Paulucio et al., 2017; Ramos et al., 2022; Sena et al., 2017; Zhong et al., 2022). In addition, the implementation of eucalyptus expands the supply of wood, reducing deforestation of native forests, contributing to the sequestration and carbon stock, as well as to the mitigation of climate change (Abate et al., 2022; Usman et al., 2024). In addition, the high added value of its wood has driven the conversion of agricultural crops to forest models, especially for eucalyptus in sloped areas that are unsuitable for planting many agricultural crops (Araújo et al., 2015).

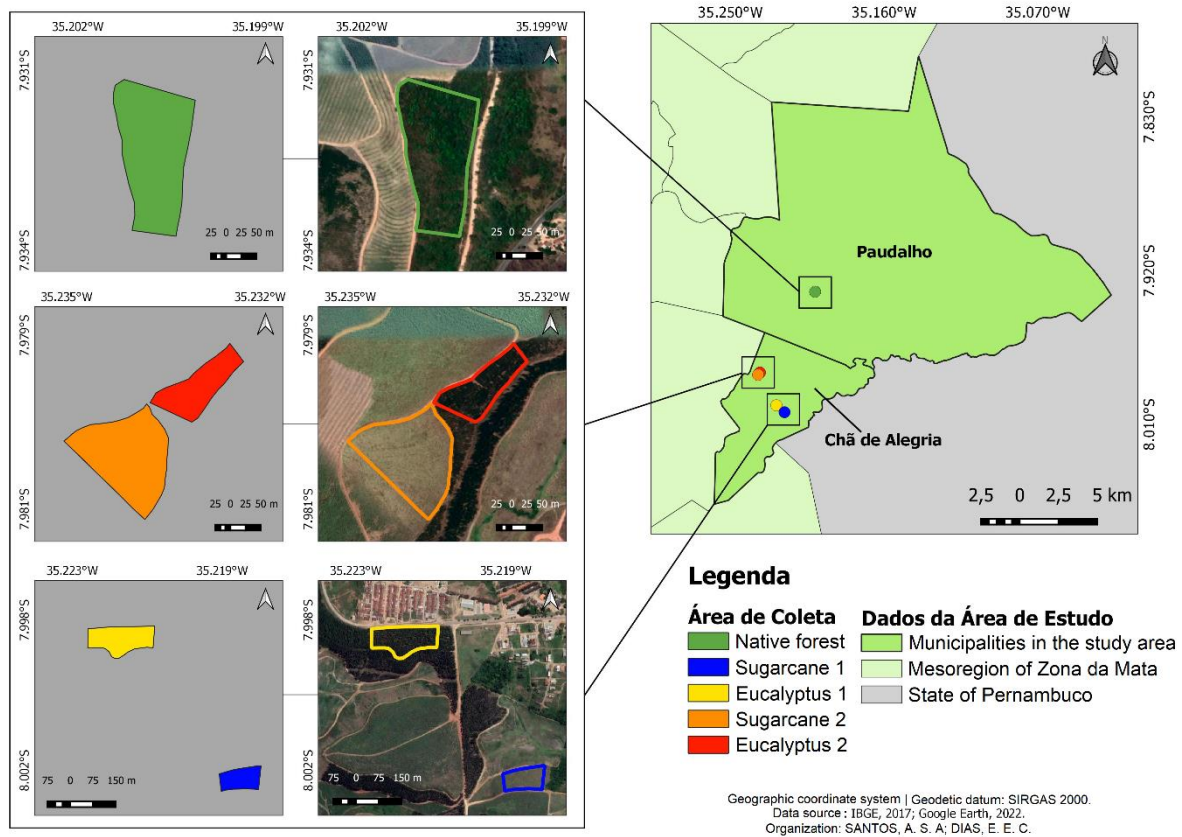
Thus, in the Zona da Mata of Pernambuco there has been the conversion of sugarcane areas into eucalyptus plantations, mainly in sloped areas due to the economic crisis on the sugar-energy sector and due to the high operating costs of sugarcane harvesting in sloped areas. With this, the conversion of sugarcane areas for eucalyptus plantation is seen as a good strategy for economy and diversification of local energy matrix (Jornal Cana, 2015). The conversion of eucalyptus plantations in areas that were previously cultivated sugarcane is recent and there are many gaps in relation to the impacts caused on the soil after the change of use. Thus, in view of the fragility in relation to the carbon stock and climate change, this study aims to evaluate the carbon stock in the soil after eucalyptus planting to replace the sugarcane crop.

2 MATERIALS AND METHODS

2.1. AREA OF STUDY

This study was developed in Chã de Alegria and Paudalho, municipalities of Pernambuco located in the mesoregion of Zona da Mata (Figure 1). Both have an altitude of 50 to 100 m and the climate is of the tropical rainy type with dry summer, the average annual rainfall is 1,634.2 mm, but the average precipitation in the evaluation period in Chã de Alegria was 113.5 mm in April, and from May to July was 541.6, 301.6 and 168.7 mm, respectively. The average maximum temperature in Chã de Alegria-PE in March was 30 °C and in April 29.7 °C. From May to July it was 28.8, 27.3 and 27.1 °C, respectively (Apac, 2022).

Figure 1: Geographical location of the municipalities of Chã de Alegria-PE and Paudalho-PE with indication of the collection areas.



According to Ab'sáber (2003), the relief of the municipalities of Chã de Alegria and Paudalho is part of the morphoclimatic domain of seas of hills comprising plateaus of sedimentary origin, with narrow valleys and steep or smooth slopes and deep floodplains. Geologically, its tracts are inserted in the Borborema province, formed by lithotypes of the Salgadinho complex and slopes, composed of sediments from the formation of the Barreiras group. The soil classes found in the collection areas were Acrisols and Ferralsols located in wavy relief (Zape, 2001).

Five areas of approximately 1.5 ha were studied: I) two areas cultivated with sugarcane (C_1 and C_2) for approximately 20 years with conventional soil preparation (subsoiling and grading, burning of straw before manual harvesting and use of loaders to collect the cut canes); II) two areas cultivated with eucalyptus (E_1 and E_2) for 7 years from the conversion of sugarcane, where the eucalyptus seedlings were no-tillage in manual pits with absence of subsoiling and grading; III) dense forest area (M), without exploration.

The sampling period occurred between March and August 2022. The samples were collected in three lines perpendicular to the slope. Randomly, 7 composite samples from 5 simple samples were randomly collected in each row, at two depths (0-10 and 10-20 cm), totaling 42 unstructured samples by land use. The samples were transferred to identified plastic

bags. In parallel, soil samples were collected with the aid of a metal cylinder with 7.8 cm in height and 3 cm in internal diameter to determine the density.

2.2. SOIL ANALYSIS

The particle size analysis was performed by the densimeter method, according to Geer & Or (2002) and modified by Almeida (2008). The density (D_s) expressed in g cm^{-3} , was determined by means of the volumetric cylinder method (Embrapa, 2017), which is based on the relationship between the mass of solids (represented by the mass of the soil dried in an oven at 105 °C, expressed in g) and the volume of the soil, assumed as the internal volume of the cylinder.

The total organic carbon (TOC) expressed in g kg^{-1} was determined by wet oxidation with potassium dichromate and sulfuric acid and titration with ammoniacal ferrous sulfate according to the methodology adapted from (Yeomans & Bremner, 1988). To determine the carbon stock, the TOC contents were converted into carbon stock, based on the layer thickness and soil density, through the equation (Veldkamp, 1994):

$$\text{Carbon stock} = \frac{\text{TOC} \cdot D_s \cdot e}{10}$$

Where:

carbon stock in Mg ha^{-1} ;

TOC is the total organic carbon in g kg^{-1} ;

D_s is the density of the soil in g cm^{-3} ;

e is the thickness of the layer in cm.

2.3. STATISTICAL ANALYSES

For comparisons between land use and depth, the normality of the variables was tested by the Shapiro-Wilk test. Once normality was observed, for the case of two samples, the T test was used for dependent samples to evaluate different depths and for independent samples to compare different uses. In case of non-normality, the Wilcoxon test was used to evaluate different depths and the Mann-Whitney test to compare different uses.

For comparisons between three samples, in case of observed normality ANOVA was used followed by the Scott-Knott test and in case of non-normality the Kruskal-Wallis test was used followed by Dunn's test. In all tests, 5% significance was adopted in the final decision. To

evaluate the linear correlation between the stock values of C and TOC, Pearson's correlation coefficient was used. All tests were performed in R language.

3.RESULTS

The analysis showed that the sand content was higher in all uses and soil classes in the 0-10 cm layer. In the Acrisols, E_2 and C_1 presented sandy clay loam texture at a depth of 0-10 cm, while in the 10-20 cm layer clayey and sandy clayey predominated, respectively. Regarding the Ferralsols, soil E_1 presented a higher percentage of sand and lower concentration of clay, when compared to the soil of M and C_2 , at both depths (Table 1).

In the Acrisols, D_s was lower in E_2 when compared to C_1 , with 1.34 g cm^{-3} in the topsoil layer and 1.54 g cm^{-3} in 10-20 cm, showing a significant difference between land uses ($p < 0.001$). In the Ferralsols, M showed lower density, with 1.28 g cm^{-3} in relation to the soils under C_2 and E_1 in the 0-10 cm layer. Comparing eucalyptus and sugarcane, E_1 presented lower D_s in relation to C_2 , with 1.37 and 1.43 g cm^{-3} , respectively. At the depth of 10-20 cm, the D_s values did not present significant difference between the land uses (Table 1).

Regarding the TOC, in the Acrisols, E_2 presented significantly higher TOC contents when compared to C_1 , at both depths, with 12.84 and 7.92 g kg^{-1} ($p < 0.001$). In the Ferralsols, M presented higher TOC content, with 18.18 and 11.18 g kg^{-1} , than C_2 and E_1 at depths of 0-10 and 10-20 cm, respectively. Between eucalyptus and sugarcane, we verified that, E_1 presented lower TOC content than C_2 at the depth of 0-10 cm, with 8.35 g kg^{-1} and 10-20 cm, with 6.85 g kg^{-1} (Table 1).

Table 1: Granulometry, density (D_s), total organic carbon (TOC) of the different land uses.

Ferralsols						
Management	M		C_2		E_1	
Depths (cm)	0-10	10-20	0-10	10-20	0-10	10-20
Clay (%)	28,14	40,52	42,68	50,12	14,07	28,26
Sand (%)	62,05	51,24	49,05	41,98	74,53	68,19
Silt (%)	9,81	8,24	8,27	7,90	11,40	3,55
Texture	SCL	SC	SC	C	SL	SCL
D_s (g cm^{-3})	1.28Cb	1.50Aa	1.43Ab	1.52Aa	1.37Bb	1.52Aa
TOC (g kg^{-1})	18.18Aa	11.18Ab	11.55Ba	8.69Bb	8.35Ca	6.85Cb
Acrisols						
Management	E_2		C_1			
Depths (cm)	0-10	10-20	0-10	10-20		
Clay (%)	34,73	48,82	29,32	39,61		
Sand (%)	49,77	40,22	59,04	50,06		

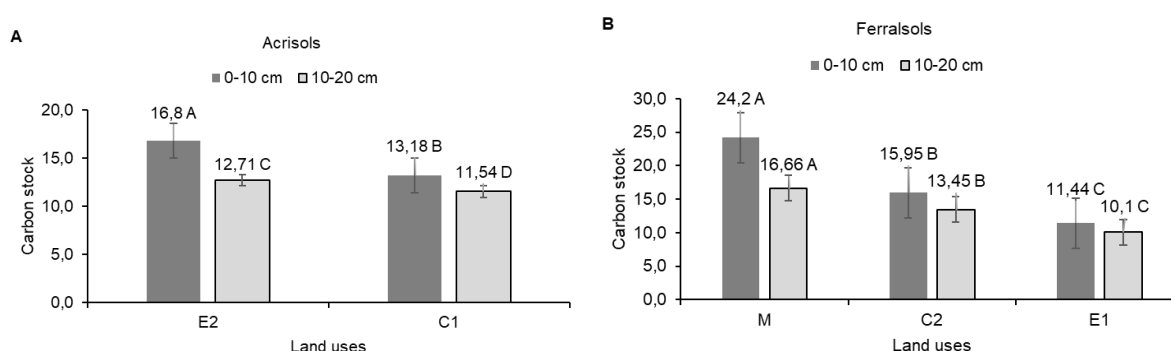
Silt (%)	15,50	10,96	11,64	10,33
Texture	SCL	C	SCL	SC
Ds (g cm ⁻³)	1.34Bb	1.54Ba	1.45Ab	1.64Aa
TOC (g kg ⁻¹)	12.84Aa	7.92Ab	9.07Ba	7,05Bb

SCL= sandy clay loam; SC= sandy clay; C= clay; SL= sandy loam.

Source: from the author

Regarding the carbon stock, it was observed in the Acrisols that the eucalyptus soil presented higher carbon stock in the two depths (0-10 and 10-20 cm), with 16.81 and 12.71 Mg ha⁻¹, respectively. While sugarcane presented 13.18 Mg ha⁻¹ in the 0-10 cm layer and 11.54 Mg ha⁻¹ of 10-20 cm (Figure 2A). In the Ferralsols, the *soil of M* presented higher carbon stock in relation to *C₂* and *E₁*, with 24.20 and 16.66 Mg ha⁻¹, in the layer of 0-10 and 10-20 cm, respectively (Figure 2B), with a significant difference between the land uses ($p < 0.001$). In the comparison between eucalyptus and sugarcane, the carbon stock was higher in *C₂* at both depths, with 15.95 Mg ha⁻¹ and 13.45 Mg ha⁻¹ than in *E₁* with 11.44 Mg ha⁻¹ and 10.1 Mg ha⁻¹ at depths of 0-10 cm and 10-20 cm, respectively. There was a significant difference between land uses ($p < 0.05$) (Figure 2B).

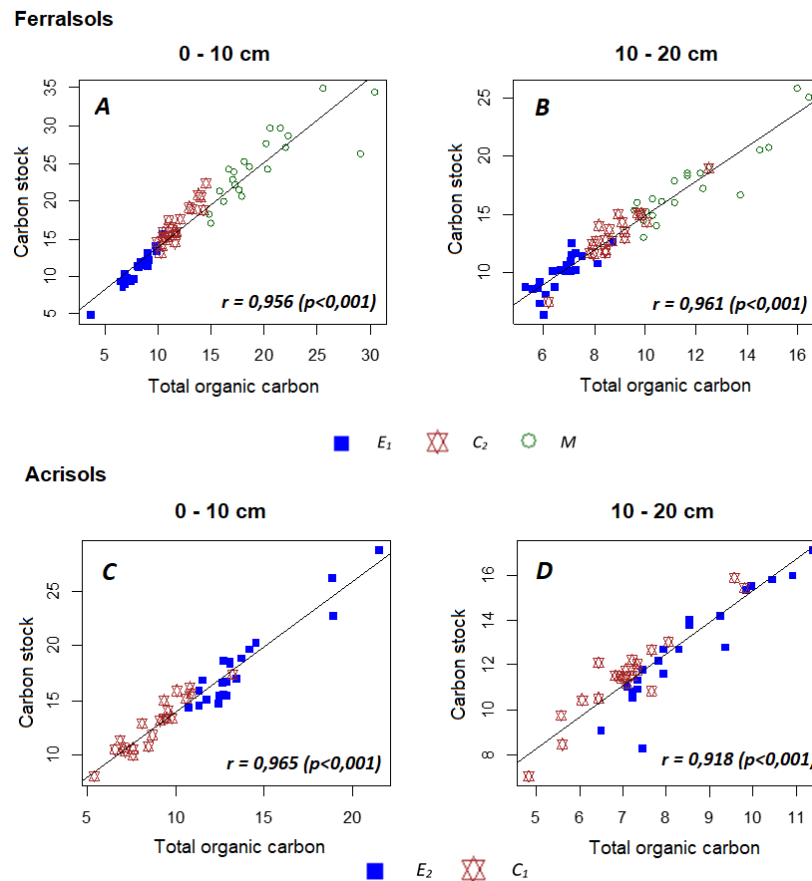
Figure 2: Soil carbon stock (Mg ha⁻¹) at depths of 0-10 and 10-20 cm, in different uses and soil classes.



Source: from the author

In figure 3, a positive and strong correlation was observed between TOC and carbon stock, in the two soil classes and in the depths 0-10 cm and 10-20 cm.

Figure 3: Correlation between total organic carbon (g kg⁻¹) and carbon stock (Mg ha⁻¹) in different uses and soil classes, at depths of 0-10 cm and 10-20 cm.



Source: from the author

4 DISCUSSION

The lower D_s of eucalyptus soil at the depth of 0-10 cm, in both soil classes can be explained by the higher accumulation of organic matter, due to the growth of trees and the absence of the use of machines during cultivation (Medeiros et al., 2021). Similarly, it was observed by Medeiros et al. (2021), where the D_s of the eucalyptus soil was lower in the 0-10 cm and 10-20 cm layers when compared to the sugarcane soil showing that from 3 years of cultivation the density and other physical attributes of the soil can be recovered, avoiding its compaction. Similarly, Sena et al. (2017) observed signs of recovery of soil density, after 15 years of eucalyptus cultivation in areas that were previously occupied by pasture.

The lower D_s of the soil of M is justified by the absence of management practices that harm the soil, which preserves its structure intact. In addition, the lowest D_s in M soil comes from high concentrations of organic matter (Soares et al., 2022). Conventional soil preparation for renewal of C_1 planting may be the cause of the lower TOC concentration of the soil in relation to the area of E_2 , in the acrisols (Soares et al., 2022). With this, the planting of

eucalyptus, considered a conservationist system, contributes to the recovery of the TOC, collaborating positively in the physical-chemical and biological factors of the soil (Zhang et al., 2019). Our results are in agreement with Medeiros et al. (2021), as they indicate that the conversion of sugarcane to eucalyptus represents a management alternative with the potential to accumulate TOC in the soil. Similarly, Assefa et al. (2022) observed that the concentration of TOC in the eucalyptus soil was 25% higher when compared to the pasture area.

The lower concentrations of TOC in E_1 in the ferralsols may be associated with the area in which it is being cultivated, as it shows signs of water erosion, favoring the loss of the superficial and fertile layer of the soil, reducing the concentration of TOC of the soil (Fentie et al., 2020).

The history of soil use or management contributes to the high carbon stock in eucalyptus soil, as its rotation period is longer, allowing for increased litter deposition as trees grow (Shibabaw et al., 2023). Thus, the higher carbon stock in E_2 , in the Acrisols, may be associated with soil management, where no-tillage was performed, with reduced soil turnover, resulting in the continuous deposition of organic residues over the 7 years of cultivation.

These results are in agreement with Shibabaw et al. (2023), as they observed that the conversion of cropland to eucalyptus plantation, increases the carbon stock by 3% or 1.6 Mg ha⁻¹, over 100 years. In addition, these data corroborate the results of Medeiros et al. (2021), who found higher carbon stock in eucalyptus soil with 3 years (123.2 Mg ha⁻¹) and 6 years (131 Mg ha⁻¹) of planting, than in the sugarcane field (107.9 Mg ha⁻¹) at a depth of up to 60 cm, showing that the carbon stock in the eucalyptus soil increases according to the time of cultivation, in Alagoas. Unlike the annual cultivation of sugarcane with conventional preparation (burning of straw, grading and use of machines) of the soil, which is able to reduce the carbon stock, affecting both the surface and deeper layer of the soil according to (Medeiros et al., 2022).

Moreover, Valente et al. (2023) highlighted the potential of eucalyptus for recovery of carbon stock in soil degraded by bauxite extraction in the Brazilian Atlantic Forest. The same, was observed by Sena et al. (2017) where the carbon stock increased after eucalyptus planting in areas that were previously degraded by pastures, in Mato Grosso do Sul. Similarly, Du Preez et al. (2022) reported lower carbon stock in pasture soil with 43.6 Mg ha⁻¹ and higher in eucalyptus soil 91.6 Mg ha⁻¹, in Southern Africa.

Given the above, the results in the Acrisols showed the great potential of eucalyptus to increase the storage and global fixation of carbon in the soil, contributing to the mitigation of global warming. However, it showed the unsustainability of sugarcane production systems with

conventional management, which has been worrisome for environmentalists. According to Medeiros et al. (2022), more than 40% of the soils of annual crops in Brazil are under conventional preparation, requiring the application of conservationist agricultural practices in order to recover the carbon stock in the soil and contribute to increase productivity and mitigate global warming.

Practices are available for the sustainable improvement of the sugar-energy industry, such as the use of biological control to reduce insecticide applications (Lenancker & Powell, 2023; Pabón-Valverde et al., 2022), the use of agro-industrial residues (Kee et al., 2022), biological nitrogen fixation to decrease the use of nitrogen fertilizers (Saranraj et al., 2021) and the extinction of straw burning that precedes harvest. The management of the sugarcane field with maintenance of the straw in the soil and without burning, contributes to the non-rotation of the soil over the time of cultivation until the next renewal of the sugarcane field and stimulates the adoption of no-tillage, resulting in the preservation of the structure and carbon of the soil, over time (Soares et al., 2022).

In the ferralsols, the higher carbon stock in M can be explained by the constant entry of organic residues and absence of anthropogenic interventions in this system, which increase the C content in the soil (Almeida et al., 2021). It was also observed in the study by Shibabaw et al. (2023) where the carbon stock in natural forest soil (66.9 Mg ha^{-1}) was higher than in eucalyptus soil (50.8 Mg ha^{-1}) and in cropland (48.1 Mg ha^{-1}).

The lower carbon stock in E_1 was unexpected, as this result is the opposite of the findings by Medeiros et al. (2021), who when studying the impacts of the conversion of sugarcane fields into eucalyptus plantations in ferralsols, showed that eucalyptus soil stored more carbon than sugarcane soil in Alagoas.

The lower carbon stock in E_1 may be associated with the absence of terrace, signs of water erosion with the presence of ravines, where soil OM is exposed to microbial actions accelerating its decomposition and releasing CO into the atmosphere during cultivation, contributing to climate change (Gmach et al., 2018).

Allied to this, the temperature may have interfered in the carbon stock of E_1 , since the sampling of E_1 was carried out in a warm period, with temperatures between 29.7 and 30°C . This result is in agreement with Shibabaw et al. (2023), in which they showed a reduction of 8% to 9% in the carbon stock only with climate change and when associated with low litter production, this reduction was to 14% to 15% in the soils of natural forest, eucalyptus and croplands, suggesting that high temperatures accelerate the decomposition of soil OM and microbial respiration, resulting in a greater loss of carbon stock. Similarly, Wei et al. (2014)

indicated that the reduction of the soil carbon stock of agricultural land was determined by climatic conditions, as humidity and high annual temperatures increased the decomposition of OM and such reduction is greater, when the conversion of land use occurs in tropical regions, due to high temperatures.

Moreover, the sandy loam texture of the soil of E_1 , with high sand content and low clay content may have influenced the reduction of the carbon stock, because sandy loam soils generally present a scarcity of both OM and nutrients, due to soils with more than 70% of sand in their composition being very permeable, with low water retention capacity and being more susceptible to erosion (Centeno et al., 2017). This result is in line with other studies. For example, in the Brazilian Cerrado the low stock of C in the soil with 15 years of eucalyptus planting was attributed to its sandy loam texture. Similarly, Wang et al. (2023) concluded that low precipitation, sandy texture, waste removal, monoculture promoted greater loss of carbon stock compared to high precipitation, fine soil texture, retained residues, double cultivation.

Likewise, in systems integrated with eucalyptus and grass in areas where pasture was previously developed, they found lower carbon stock in the sand fraction of soil OM and confirmed that C is contained in the most stable granulometric fractions (clay + silt) and shows the importance of these fractions for soil aggregation, OM stability and soil C protection (Almeida et al., 2021). According to Cook et al. (2016), carbon stocks are associated with clay percentage and soils with higher clay content tend to have more C, where the 1% increase in clay can raise the carbon stock between 0.6 to 0.7 Mg ha⁻¹ in the soil.

These results in the ferralsols show that, although eucalyptus planting is considered a conservation system, it was not able to store carbon in the soil, considering that the climatic conditions, texture and presence of erosion influenced the carbon performance in the soil.

The carbon stock values in both classes obtained a performance similar to the TOC concentrations, since the carbon stock increases are positively correlated with the TOC increase in the soil. These results are in agreement with Wei et al. (2014), where carbon stocks after land use change were significantly and positively correlated with TOC concentration, showing that in general soils with higher carbon stock are associated with higher TOC concentrations.

5 CONCLUSION

The conversion of areas cultivated with sugarcane to eucalyptus represents an alternative with significant potential to store of carbon, contributing to the mitigation of greenhouse gas emissions, especially CO₂. However, through the results of E_1 in the ferralsols, it was possible to perceive that the performance of the carbon stock in eucalyptus soils depends

on the climatic conditions, the texture of the soil and its management throughout the cultivation period.

The presence of ravines and absence of terraces in the *area of E₁* calls attention to a maintenance throughout the eucalyptus cultivation, in order to avoid the loss of soil organic matter by erosion, along with the carbon stock in the soil.

Given this scenario, it is suggested that to achieve the success of eucalyptus production, more in-depth studies on the soil and climatic conditions of the Zona da Mata region of Pernambuco are necessary, for the creation and application of a sustainable forest plan more appropriate to the specificities of the area, to increase the concentration of nutrients, including the organic C of the soil, ensuring the success of its production and collaborating to reduce CO₂ emissions to the atmosphere, contributing to climate change mitigation.

REFERENCES

Ab''Sáber, Aziz Nacib. Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas. 4 ed. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003.

Abate, D., Borges, J. G., Marques, S., & Bushenkov, V. (2022). An Ecological-Economic Approach to Assess Impacts of the Expansion of Eucalyptus Plantations in Agroforest Landscapes of Northern Ethiopia. *Forests*, 13(5), 1–20. <https://doi.org/10.3390/f13050686>

Ahmed, I. U., Assefa, D., & Godbold, D. L. (2022). Land-Use Change Depletes Quantity and Quality of Soil Organic Matter Fractions in Ethiopian Highlands. *Forests*, 13(1), 1–20. <https://doi.org/10.3390/f13010069>

Almeida, B. G. 2008. Métodos alternativos de determinação de parâmetros Físicos do solo e uso de condicionadores químicos no estudo da qualidade do solo. Tese Doutorado. ESALQ/USP. São Paulo, p. 105. Disponível em: https://teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11140/tde-18112008-100808/publico/Brivaldo_Almeida.pdf. Acesso em: 15/01/2021.

Almeida, L. L. de S., Frazão, L. A., Lessa, T. A. M., Fernandes, L. A., Veloso, Á. L. de C., Lana, A. M. Q., de Souza, I. A., Pegoraro, R. F., & Ferreira, E. A. (2021). Soil carbon and nitrogen stocks and the quality of soil organic matter under silvopastoral systems in the Brazilian Cerrado. *Soil and Tillage Research*, 205(November 2019), 104785. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104785>

Amelung, W., Bossio, D., de Vries, W., Kögel-Knabner, I., Lehmann, J., Amundson, R., Bol, R., Collins, C., Lal, R., Leifeld, J., Minasny, B., Pan, G., Paustian, K., Rumpel, C., Sanderman, J., van Groenigen, J. W., Mooney, S., van Wesemael, B., Wander, M., & Chabbi, A. (2020). Towards a global-scale soil climate mitigation strategy. *Nature Communications*, 11(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18887-7>

Apac. Boletim pluviométrico diário. Disponível em: <https://www.apac.pe.gov.br/uploads/Boletim-Pluviometrico-11-11-2022.pdf>. Acesso em: 11/11/2022.

Araujo, I. S; Oliveira, I. M; Alves, K.S. 2015. Silvicultura: Conceitos, regeneração da mata ciliar, produção de mudas florestais e unidades de conservação ambiental. 1. ed. São Paulo: Érica, ISBN 978-85-365-3126-7.

Assefa, D., Mentler, A., Sandén, H., Rewald, B., & Godbold, D. L. (2022). The Biological Origins of Soil Organic Matter in Different Land-Uses in the Highlands of Ethiopia. *Forests*, 13(4). <https://doi.org/10.3390/f13040560>

Centeno, L. N., Guevara, M. D. F., Cecconello, S. T., Sousa, R. O. de, & Timm, L. C. (2017). Textura Do Solo: Conceitos E Aplicações Em Solos Arenosos. *Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade*, 4(1), 31. <https://doi.org/10.15210/rbes.v4i1.11576>

Cook, R. L., Binkley, D., & Stape, J. L. (2016). Eucalyptus plantation effects on soil carbon after 20years and three rotations in Brazil. *Forest Ecology and Management*, 359, 92–98. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.09.035>

Du Preez, C. C., Lebenya, R. M., & van Huyssteen, C. W. (2022). Change in total carbon stocks eight years after afforestation of a sub-humid grassland catchment with Pinus and Eucalyptus species. *New Forests*, 53(2), 267–284. <https://doi.org/10.1007/s11056-021-09854-1>

Embrapa. 2017. Manual de métodos de análise de solo. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574 p. ISBN 978-85-7035-771-7. Disponível em: [file:///C:/Users/estat/Downloads/Manual-de-Metodos-de-Analise-de-Solo-2017%20\(7\).pdf](file:///C:/Users/estat/Downloads/Manual-de-Metodos-de-Analise-de-Solo-2017%20(7).pdf). Acesso em: 15/01/2021.

Fentie, S. F., Jembere, K., Fekadu, E., & Wasie, D. (2020). Land Use and Land Cover Dynamics and Properties of Soils under Different Land Uses in the Tejibara Watershed, Ethiopia. *Scientific World Journal*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/1479460>

Geer, G. W.; Or, D. 2002. Particle-size analysis. In: Dane, J. H.; Topp, G. C. (Ed.). Methods of soil analysis. Part 4. Physical methods. Madison: SSSA Book Series No. 5, p. 255- 293.

Gmach, M. R., Dias, B. O., Silva, C. A., Nóbrega, J. C. A., Lustosa-Filho, J. F., & Siqueira-Neto, M. (2018). Soil organic matter dynamics and land-use change on Oxisols in the Cerrado, Brazil. *Geoderma Regional*, 14, e00178. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2018.e00178>

Jornal Cana, 2015. “Eucalipto começa a substituir cana-de-açúcar em áreas de declive da Zona da Mata.” Editada pelo Jornal do Commercio, julho 13, 2015. Disponível em: <https://jornalcana.com.br/eucalipto-comeca-a-substituir-cana-de-acucar-em-areas-de-declive-da-zona-da-mata/>. Acesso: 14/01/2021.

Kee, S. H., Ganeson, K., Rashid, N. F. M., Yatim, A. F. M., Vigneswari, S., Amirul, A. A. A., Ramakrishna, S., & Bhubalan, K. (2022). A review on biorefining of palm oil and sugar cane agro-industrial residues by bacteria into commercially viable bioplastics and biosurfactants. *Fuel*, 321(April), 124039. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124039>

- Lenancker, P., & Powell, K. S. (2023). A method for rearing and assessing the health of the sugarcane pest *Dermolepida albohirtum* (Coleoptera: Scarabaeidae). *Journal of Applied Entomology*, 147(1), 94–103. <https://doi.org/10.1111/jen.13077>
- Medeiros, A. de S., Ferraz, R. L. de S., da Silva, T. S., da Silva, A. V. L., & Maia, S. M. F. (2021). Impact of converting areas cultivated with sugarcane to eucalypt plantations on soil quality in northeastern Brazil. *Revista Arvore*, 45, 1–12. <https://doi.org/10.1590/1806-908820210000017>
- Medeiros, A., dos Santos, T. C., & Maia, S. M. F. (2022). Effect of long-term and soil depth on soil organic carbon stocks after conversion from native vegetation to conventional tillage systems in Brazil. *Soil and Tillage Research*, 219(November 2021). <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105336>
- Noaa. 2022. Carbon dioxide now more than 50% higher than pre-industrial levels. Disponível em: <https://www.noaa.gov/news-release/carbon-dioxide-now-more-than-50-higher-than-pre-industrial-levels>. Acesso em: 11/11/2022.
- Pabón-Valverde, A. H., Michaud, J. P., & Vargas, G. (2022). Cultural Control of Giant Sugarcane Borer, *Telchin licus* (Lepidoptera: Castniidae), by Soil Mounding to Impede Adult Emergence. *Florida Entomologist*, 105(1), 22–26. <https://doi.org/10.1653/024.105.0104>
- Paulucio, V., da Silva, C. F., Martins, M. A., Pereira, M. G., Schiavo, J. A., & Rodrigues, L. A. (2017). Reforestation of a degraded area with Eucalyptus and Sesbania: Microbial activity and chemical soil properties. *Revista Brasileira de Ciencia Do Solo*, 41, 1–14. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcS20160239>
- Paustian, K., Larson, E., Kent, J., Marx, E., & Swan, A. (2019). Soil C Sequestration as a Biological Negative Emission Strategy. *Frontiers in Climate*, 1(October), 1–11. <https://doi.org/10.3389/fclim.2019.00008>
- Ramos, E. de A., Nuvoloni, F. M., & Lopes, E. R. do N. (2022). Landscape Transformations and loss of Atlantic Forests: challenges for conservation. *Journal for Nature Conservation*, 66(December 2021), 126152. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2022.126152>
- Rezende, J., Freire, F. J., de Araújo Filho, J. C., Dos Santos Freire, M. B. G., Gomes de Almeida, B., & Costa Santos, L. R. (2022). Impact of deforestation on the soil physical and chemical attributes, and humic fraction of organic matter in dry environments in Brazil. *IForest*, 15(6), 465–475. <https://doi.org/10.3832/ifor4016-015>
- Rumpel, C., Amiraslani, F., Koutika, L. S., Smith, P., Whitehead, D., Wollenberg, E. 2018. Put more carbon in soils to meet Paris climate pledges. *Nature*. 564, 32-34. <https://doi.org/10.1038/d41586-018-07587-4>.
- Saranraj, P., Jayaprakash, A., Devi, V. D., Al-Tawaha, A. R. M., & Al-Tawaha, A. R. (2021). Isolation and nitrogen fixing efficiency of *Gluconacetobacter diazotrophicus* associated with sugarcane: A review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 788(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/788/1/012171>

- Sena, K. N., Maltoni, K. L., Faria, G. A., & Cassiolato, A. M. R. (2017). Organic carbon and physical properties in sandy soil after conversion from degraded pasture to eucalyptus in the Brazilian cerrado. *Revista Brasileira de Ciencia Do Solo*, 41, 1–15. <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20150505>
- Shibabaw, T., Rappe George, M. O., & Gärdenäs, A. I. (2023). The combined impacts of land use change and climate change on soil organic carbon stocks in the Ethiopian highlands. *Geoderma Regional*, 32(January). <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2023.e00613>
- Soares, V. A. S. F., Frazão, L. A., Pegoraro, R. F., Sampaio, R. A., & Fernandes, L. A. (2022). Irrigated sugarcane crops improve the quality of soil organic carbon over time. *Semina: Ciencias Agrarias*, 43(1), 283–296. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2022v43n1p283>
- Usman, N., Hussain, M., Akram, S., Majeed, M., Shah, S., Rehman, F., Yousaf, A., Shaukat, S., Shah, S. W. A., Mishr, R. S., Shrestha, S., Saddiqa, A., Room, S. A., & Ali, A. (2024). Yield, carbon stock, and price dynamics of agroforestry tree species in district Mardan, Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan; [Rendimento, estoque de carbono e dinâmica de preços das espécies de árvore agroflorestal no distrito de Mardan, Khyber Pakhtunkhwa, Paq. *Brazilian Journal of Biology*, 84, 1–14. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85134428702&doi=10.1590%2F1519-6984.262662&partnerID=40&md5=0915cd75f9e95571fd7e94f9d50c68e4>
- Veldkamp, E. (1994). Organic Carbon Turnover in Three Tropical Soils under Pasture after Deforestation. *Soil Science Society of America Journal*, 58(1), 175–180. <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800010025x>
- Wang, X., Xu, X., Qiu, S., Zhao, S., & He, P. (2023). Deep tillage enhanced soil organic carbon sequestration in China: A meta-analysis. *Journal of Cleaner Production*, 399(March). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136686>
- Valente, F. D., de Castro, M. F., Lustosa Filho, J. F., de Carvalho Gomes, L., Neves, J. C. L., da Silva, I. R., & de Oliveira, T. S. (2023). Native multispecies and fast-growing forest root biomass increase C and N stocks in a reclaimed bauxite mining area. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(1). <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10720-6>
- Wei, X., Shao, M., Gale, W., & Li, L. (2014). Global pattern of soil carbon losses due to the conversion of forests to agricultural land. *Scientific Reports*, 4, 6–11. <https://doi.org/10.1038/srep04062>
- Yeomans, J. C., & Bremner, J. M. (1988). A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil1. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 19(13), 1467–1476. <https://doi.org/10.1080/00103628809368027>
- ZAPE. 2001. Mapa de reconhecimento de baixa e média intensidade de solos do estado de Pernambuco. Disponível em: http://geoinfo.cnps.embrapa.br/layers/geonode%3Aasolo_pernambuco_wgs84. Acesso em: 15/01/2021.
- Zhang, H., Deng, Q., Hui, D., Wu, J., Xiong, X., Zhao, J., Zhao, M., Chu, G., Zhou, G., &

Zhang, D. (2019). Recovery in soil carbon stock but reduction in carbon stabilization after 56-year forest restoration in degraded tropical lands. *Forest Ecology and Management*, 441(March), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.03.037>

Zhong, J., Pan, P., Xiao, S., & Ouyang, X. (2022). Influence of Eucalyptus Plantation on Soil Organic Carbon and Its Fractions in Severely Degraded Soil in Leizhou Peninsula, China. *Forests*, 13(10), 1–15. <https://doi.org/10.3390/f13101606>