

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

**ANA LUA TELLES LIMA**

**PRÁTICAS DE MANEJO AGRÍCOLA E SUAS RELAÇÕES COM OS  
ATRIBUTOS DO SOLO SOB CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR**

**RECIFE – PERNAMBUCO  
2024**

**ANA LUA TELLES LIMA**

**PRÁTICAS DE MANEJO AGRÍCOLA E SUAS RELAÇÕES COM OS  
ATRIBUTOS DO SOLO SOB CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Prof. Dr. Brivaldo Gomes de Almeida

Coorientador: Prof. Dr. Alexsandro Claudio dos Santos Almeida

**RECIFE - PERNAMBUCO  
2024**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE  
Bibliotecário(a): Suely Manzi – CRB-4 809

L732p Lima, Ana Lua Telles.  
Práticas de manejo agrícola e suas relações com os atributos do solo sob cultivo de cana-de-açúcar. / Ana Lua Telles Lima. – Recife, 2024.  
78 f.; il.

Orientador(a): Brivaldo Gomes de Almeida.  
Co-orientador(a): Alexsandro Claudio dos Santos Almeida.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Recife, BR-PE, 2023.

Inclui referências e anexo(s).

1. Cana-de-açúcar - Cultivo. 2. Vinhaça. 3. Solos - Manejo. 4. Mecanização agrícola 5. Solos - Compactação. I. Almeida, Brivaldo Gomes de, orient. II. Almeida, Alexsandro Claudio dos Santos, coorient. III. Título

CDD 620.8

**ANA LUA TELLES LIMA**

**PRÁTICAS DE MANEJO AGRÍCOLA E SUAS RELAÇÕES COM OS  
ATRIBUTOS DO SOLO SOB CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 30 de agosto de 2024.

---

Brivaldo Gomes de Almeida  
Presidente da Banca e Orientador

BANCA EXAMINADORA:

---

Wagner Luís da Silva Souza  
Membro Externo - IFPE/Campus Barreiros

---

Marcus Metri Corrêa  
Membro Interno – UFRPE

## AGRADECIMENTOS

Nada nessa vida é conquistado sozinho, e aqui deposito todo o agradecimento aos que me auxiliaram durante essa trajetória.

Agradeço primeiramente a Deus, por sempre se manter presente em minha vida, mesmo nos momentos em que me senti tão sozinha, mas na verdade nunca estive.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Brivaldo Gomes de Almeida, por ter me recebido de braços abertos e me acolhido como filha. Um exemplo ímpar de docente, com sua paciência e dedicação, que ilumina o caminho de todos os alunos que por ele passam.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Alexsandro Claudio dos Santos Almeida, por viabilizar toda a minha pesquisa, seu auxílio foi crucial para a concretização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. André Maciel Netto, que, mesmo além de suas obrigações, se mostrou sempre presente e disponível durante todo o desenvolvimento deste trabalho. A sua dedicação, paciência e apoio constante foram fundamentais.

Ao Dr. José Coelho Araújo Filho, da EMBRAPA Solos, pelo auxílio na descrição dos perfis de solos deste trabalho e por compartilhar um pouco de seu vasto conhecimento.

À Usina Santa Clotilde e seus colaboradores, pela disponibilidade das áreas de estudo, pelo suporte técnico oferecido e pela prontidão em atender nossas necessidades durante o período de coleta e análise de dados.

Ao Técnico do Laboratório de Física do Solo, Eudes Oliveira, pela sua expertise, dedicação e prontidão, cruciais para o sucesso das atividades realizadas, além das valiosas conversas e conselhos que tanto contribuíram para meu crescimento pessoal e profissional.

Aos meus pais, Karine e Franklin, por toda a abdicação, apoio e confiança que me permitiram chegar até aqui. Sem o compromisso e dedicação de vocês, nada disso seria possível.

Ao meu irmão, Benjamin, que desde seu nascimento deu um novo propósito para a minha vida, sem ao menos saber e entender.

Aos meus avós, Neli e Nonato, cuja sabedoria, amor incondicional e apoio constante foram pilares fundamentais na minha vida.

Aos amigos que ganhei durante essa jornada e levarei para sempre comigo. Aos meus colegas do Laboratório de Física do Solo, que se tornaram minha família em outro estado e obtive apoio imenso a cada passo. Cito aqui, em ordem alfabética, para evitar confusões: Alison José, Arnaldo Joaquim, Edilson Amaral, Paulo Marques, Rhyan Marques, Steffany Daiana, Talmo Henrique e Victor Miranda. Todos foram essenciais para este trabalho e aprendi com esse grupo o verdadeiro significado de companheirismo. Aos meus colegas de turma, Mayara Carolino e Lucas Alves, que viraram amigos e confidentes, cada qual com suas inseguranças e dificuldades.

Aos amigos que já tinha e continuaram ao meu lado. Em especial a Mariana Dlumou e Flávia Fernanda, que me acompanham desde a graduação e que entraram comigo numa aventura de fazer mestrado em outro estado, foram muitos momentos compartilhados dos quais jamais esquecerei. Aos meus grandes amigos Laura Cavalcante e Leonardo Jatobá, que tanto ouviram meus desabafos e dramas. A Pedro Sampaio, pela paciência e companheirismo em tantos momentos. A todos, citados ou não, peço desculpas pelo sumiço e pelos vácuos ao longo dessa jornada, mas saibam que, mesmo nos momentos em que estive ausente, o carinho e amizade de cada um nunca deixaram de ser importantes.

À minha psicóloga, Larissa Teixeira, que me ajudou a colocar os pés no chão e a manter a clareza necessária para que eu pudesse caminhar em direção aos meus objetivos, mesmo que mancando em alguns trechos.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco, pela oportunidade de realizar a pós-graduação. Esta que se tornou minha casa nesses dois últimos anos.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental e seu corpo docente, por todos os conhecimentos aqui transmitidos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

Por fim, gostaria de estender minha gratidão a todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho.

*“Linha por linha, de café e aguinha,  
sempre hidratado pro próximo pranto”*

(Black Alien)

## RESUMO

LIMA, Ana Lua Telles, M.Sc., Universidade Federal Rural de Pernambuco, agosto de 2024. **Práticas de manejo agrícola e suas relações com os atributos do solo sob cultivo de cana-de-açúcar.** Orientador: Brivaldo Gomes de Almeida. Coorientador: Alexsandro Claudio dos Santos Almeida.

O cultivo da cana-de-açúcar, um dos principais produtos agrícolas do Brasil, possui grande importância socioeconômica, especialmente no estado de Alagoas. O manejo do solo é crucial para a sustentabilidade e produtividade agrícola, impactando diretamente os atributos do solo. Neste contexto, o objetivo da pesquisa foi analisar os efeitos das práticas de manejo agrícola nos atributos de solos sob cultivo de cana-de-açúcar. A pesquisa foi realizada em áreas na região de Tabuleiros Costeiros de Alagoas, com diferentes históricos de aplicação de vinhaça e práticas de colheita (manual e mecanizada). Para tanto, foram abertos quatro perfis: P1, sob cultivo de cana, com aplicação de vinhaça desde a década de 80, e colheita mecanizada; P2, cultivo de cana, com aplicação de vinhaça por um ano, e colheita mecanizada; P3, cultivo de cana, sem aplicação de vinhaça, e colheita manual; P4, mata nativa. Em cada perfil, nos quatro primeiros horizontes, foram coletadas seis amostras não deformadas via cilindro volumétrico ( $\cong 100 \text{ cm}^3$ ), além de amostras deformadas. Nas amostras em cilindro foram determinados os seguintes atributos: Ksat; porosidade total e classes de poros; curva de retenção; água disponível; densidade do solo. As amostras deformadas (TFSA) foram utilizadas para a caracterização física (análise granulométrica, densidade de partículas) e química (pH, complexo sortivo, capacidade de troca catiônica - CTC, MO) dos solos. Durante as coletas foram realizados também os ensaios de infiltração via Beerkan. As análises químicas revelam que os solos das áreas cultivadas com aplicação de vinhaça (P1 e P2) apresentam maiores níveis de fertilidade, com altos teores de potássio e fósforo, além de elevada CTC. A calagem contribuiu para a neutralização da acidez do solo e redução da saturação de alumínio, melhorando a disponibilidade de nutrientes essenciais. As análises físicas indicaram que os solos cultivados possuem estrutura mais compactada, o que pode afetar a porosidade e a infiltração de água. Nestes perfis, a compactação do solo, resultante do tráfego de máquinas pesadas, mostra-se mais evidente nos primeiros horizontes, impactando negativamente a Ksat e a capacidade de armazenamento de água. A Ksat, determinada pelos ensaios em laboratório e em campo, foi significativamente menor nas áreas sob cultivo (P1, P2 e P3) em relação a mata (P4). Práticas de manejo sustentável são essenciais para garantir a viabilidade a longo prazo das áreas de cultivo com cana-de-açúcar, promovendo a conservação do solo e a manutenção da

produtividade. Esses achados fornecem base sólida para recomendações de manejo agrícola que equilibrem a produtividade com a sustentabilidade ambiental, destacando a importância de estratégias integradas que considerem a conservação do solo e a eficiência no uso de insumos.

Palavras-chave: Tabuleiros Costeiros; Vinhaça; Beerkan; Mecanização; Compactação.

## ABSTRACT

LIMA, Ana Lua Telles, M.Sc., Federal Rural of Pernambuco University, august 2024. **Agricultural management practices and their relationships with soil attributes under sugarcane cultivation.** Adviser: Brivaldo Gomes de Almeida. Co-adviser: Alexsandro Claudio dos Santos Almeida.

The sugarcane cultivation, one of the main agricultural products in Brazil, has great socioeconomic importance, especially in the state of Alagoas. Soil management is crucial for agricultural sustainability and productivity, directly impacting soil attributes. In this context, the objective of the research was to analyze the effects of agricultural management practices on the soil attributes under sugarcane cultivation. The research was carried out in areas in the Coastal Tablelands region of Alagoas, with different times of vinasse application and harvesting practices (manual and mechanized). To this end, four profiles were opened: P1, under sugarcane cultivation, with vinasse application for 80 years, and mechanized harvesting; P2, sugarcane cultivation, with application of vinasse for one year, and mechanized harvesting; P3, sugarcane cultivation, without application of vinasse, and manual harvesting; P4, native forest. In each profile, in the first four horizons, six undeformed samples were collected via volumetric core ( $\cong 100 \text{ cm}^3$ ), in addition to deformed samples. In cores samples, the following attributes were determined: Ksat; total porosity and pore classes; retention curve; available water; soil bulk density. The deformed samples (TFSA) were used for the physical (particle size analysis, particle density) and chemical (pH, assortative complex, cation exchange capacity - CEC, OM) characterization of the soils. During sampling, infiltration tests were also carried out via Beerkan. Chemical analyzes reveal that the soils in areas cultivated with vinasse application (P1 and P2) have higher levels of fertility, with high levels of potassium and phosphorus, in addition to high CEC. Liming contributed to neutralizing soil acidity and reducing aluminum saturation, improving the availability of essential nutrients. Physical analyzes indicated that cultivated soils have a more compacted structure, which can affect porosity and water infiltration. In these profiles, soil compaction, resulting from heavy machinery traffic, is more evident in the first horizons, negatively impacting Ksat and water storage capacity. The Ksat, determined by laboratory and field tests (Beerkan), was significantly lower in the areas under cultivation compared (P1, P2 and P3) to the forest (P4). Sustainable management practices are essential to maintain the long-term viability of sugarcane cultivation areas, promoting soil conservation and maintaining productivity. These findings provide a solid basis for agricultural management recommendations that balance productivity with environmental sustainability,

highlighting the importance of integrated strategies that consider soil conservation and efficiency in the use of inputs.

Keywords: Coastal Tablelands; Vinasse; Beerkan; Mechanization; Compaction.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Área ocupada por cana-de-açúcar (%) no ano de 2018 .....	17
Figura 2 - Mapas hipsométrico e de localização das áreas coletadas .....	22
Figura 3 - Precipitação total por mês, de agosto de 2022 a julho de 2023, da Estação Pluviométrica 935056.....	24
Figura 4 - Descrição morfológica dos perfis de solo estudados .....	25
Figura 5 – Mapa Pedológico do município de Rio Largo e distribuição dos perfis estudados.....	26
Figura 6 - Subamostras de TFSA de cada horizonte corresponde aos perfis estudados .....	28
Figura 7 - Curva característica de retenção de água no solo correspondente ao Horizonte 1 dos perfis, considerando as tensões de 0, 10, 60, 100, 333, 800 e 3000 cca.....	41
Figura 8 - Curva característica de retenção de água no solo correspondente ao Horizonte 2 dos perfis, considerando as tensões de 0, 10, 60, 100, 333, 800 e 3000 cca.....	42
Figura 9 - Curva característica de retenção de água no solo correspondente ao Horizonte 3 dos perfis, considerando as tensões de 0, 10, 60, 100, 333, 800 e 3000 cca.....	43
Figura 10 - Curva característica de retenção de água no solo correspondente ao Horizonte 4 dos perfis, considerando as tensões de 0, 10, 60, 100, 333, 800 e 3000 cca.....	43
Figura 11 - Comparação gráfica entre os métodos de determinação da Ksat.....	51
Figura 12 - Características da área selecionada para o perfil 01-SC, destacando-se os horizontes. ....	67
Figura 13 - Características da área selecionada para o perfil 02-SC, destacando-se os horizontes. ....	70
Figura 14 - Características da área selecionada para o perfil 03-SC, destacando-se os horizontes. ....	73
Figura 15 - Características da área selecionada para o perfil 04-SC, destacando-se os horizontes. ....	77

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Práticas de manejo realizadas nas áreas do estudo.....	23
Tabela 2 - Característica químicas dos perfis dos solos do estudo.....	34
Tabela 3 – Caracterização granulométrica dos solos estudados.....	36
Tabela 4 - Resumo da análise de variância dos parâmetros físico-hídricos dos perfis estudados .....	38
Tabela 5 – Análises físico-hídricas dos solos estudados. ....	39
Tabela 6 - Correlação de Pearson para os parâmetros físico-hídricos dos perfis estudados ....	46
Tabela 7 - Propriedades hidráulicas dos perfis estudados .....	48
Tabela 8 - Valores de condutividade hidráulica saturada via dois métodos de determinação .	50

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	14
2.	OBJETIVOS.....	15
2.1	Objetivos gerais .....	15
2.2	Objetivos específicos.....	15
3.	REVISÃO DE LITERATURA .....	16
3.1	Cultivo da cana-de-açúcar em Alagoas .....	16
3.2	Utilização da vinhaça na fertirrigação de solos sob o cultivo de cana-de-açúcar ....	18
3.3	Qualidade dos atributos do solo de acordo com tipo de manejo aplicado.....	19
4.	MATERIAL E MÉTODOS.....	22
4.1	Descrição da área de estudo.....	22
4.2	Coleta e descrição dos solos .....	24
4.3	Ensaio de infiltração pelo método do Beerkan.....	26
4.4	Ensaio em laboratório .....	27
4.4.1	Análises químicas.....	27
4.4.2	Análises granulométricas.....	28
4.4.3	Condutividade hidráulica saturada dos solos.....	29
4.4.4	Porosidade total e sua distribuição por classes de tamanho de poros.....	30
4.4.5	Densidade do solo.....	32
4.4.6	Densidade de partícula .....	32
4.5	Análise estatística .....	32
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	32
5.1	Atributos químicos dos solos.....	32
5.2	Parâmetros físico-hídricos dos solos .....	35
5.2.1	Caracterização granulométrica dos solos estudados.....	35
5.2.2	Densidade de partículas .....	38
5.2.3	Densidade do solo.....	40

5.2.4	Porosidade total .....	40
5.2.5	Curva característica de retenção de água no solo .....	41
5.2.6	Condutividade hidráulica saturada em laboratório .....	45
5.2.7	Correlação de Pearson .....	46
5.3	Ensaio de Beerkan .....	48
5.4	Comparação dos métodos de determinação da condutividade hidráulica saturada..	50
6.	CONCLUSÕES .....	52
	REFERÊNCIAS .....	54
	APÊNDICE A – PERFIL 1 .....	64
	APÊNDICE B – PERFIL 2 .....	68
	APÊNDICE C – PERFIL 3 .....	71
	APÊNDICE D – PERFIL 4 .....	74

## 1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é um dos principais produtos agrícolas do Brasil e seu cultivo vem desde a época da colonização, possuindo um grande destaque socioeconômico no país. A importância da cana-de-açúcar é evidenciada por sua versatilidade, já que vários produtos têm a cana como matéria-prima; porém, em média, 55% da cana brasileira se transforma em álcool e os outros 45% são convertidos em açúcar (Baffa; Freitas; Brasil, 2009; CONAB, 2023). Estes dois produtos são essenciais para o mercado interno e exportação, levando o Brasil a ser o líder mundial na produção de cana-de-açúcar (RFA, 2024). A indústria sucroalcooleira gera milhões de empregos diretos e indiretos, além de ser um componente crucial na matriz energética do país, com a produção de bioeletricidade a partir do bagaço da cana (UNICA, 2023). A flexibilidade e sustentabilidade da produção de etanol a partir da cana-de-açúcar também posicionam o Brasil como um pioneiro na busca por alternativas energéticas renováveis e na redução das emissões de gases de efeito estufa (Goldemberg, 2007).

Para o estado de Alagoas, a cana-de-açúcar tem um papel ainda mais destacado, sendo um dos principais motores econômicos regionais. Alagoas é um dos maiores produtores de cana-de-açúcar do nordeste, com uma significativa parcela da sua economia dependente do setor sucroenergético (SEFAZ, 2019). A cultura da cana-de-açúcar em Alagoas não só gera empregos e renda para milhares de famílias, mas também impulsiona o desenvolvimento de infraestrutura que beneficiam outras atividades econômicas na região (Alves; Cruz; Machado, 2018). A importância do setor é evidenciada pela vasta área dedicada ao cultivo e pela contribuição significativa para as exportações de açúcar e etanol do estado, solidificando a relevância da cana-de-açúcar como um pilar econômico e social em Alagoas (CONAB, 2023).

O manejo do solo em áreas de cultivo de cana-de-açúcar é um fator determinante para a sustentabilidade e produtividade agrícola. As práticas de manejo agrícola têm um impacto direto nos atributos de solos sob cultivo de cana-de-açúcar (Dexter, 2004; Silva *et al.*, 1998). Essas práticas influenciam diversos aspectos químicos, físicos e hidráulicos do solo, que são cruciais para o desenvolvimento saudável das plantas e para a manutenção da produtividade a longo prazo (Talukder *et al.*, 2023). A estrutura do solo é um dos atributos mais afetados pelas práticas de manejo. A compactação do solo, frequentemente causada pelo tráfego de máquinas pesadas, pode reduzir a porosidade e dificultar a infiltração de água e a troca de gases entre o solo e a atmosfera (Hamza; Anderson, 2005). Isso pode levar a problemas como a asfixia radicular, menor disponibilidade de água para as plantas e aumento do escoamento superficial, que pode causar erosão (Horn *et al.*, 1995). A compactação também dificulta o crescimento das

raízes, limitando o acesso das plantas a nutrientes e água nas camadas mais profundas do solo (Hamza; Anderson, 2005).

A capacidade de retenção de água do solo é outro atributo crítico que pode ser influenciado pelo manejo agrícola. Solos bem manejados, com boa estrutura e altos teores de matéria orgânica, geralmente apresentam maior capacidade de retenção de água, o que é vital para a sobrevivência das plantas em períodos de estiagem (Bot; Benites, 2005). Práticas que aumentam a matéria orgânica, como a adição de resíduos vegetais e compostos orgânicos, podem melhorar significativamente essa capacidade, além de favorecer a atividade biológica do solo (Oliveira *et al.*, 2019).

A disponibilidade de nutrientes no solo também está intimamente ligada às práticas de manejo. A aplicação de fertilizantes químicos e orgânicos, a correção da acidez do solo por meio da calagem e a utilização de adubos verdes são práticas que podem melhorar a disponibilidade de nutrientes essenciais para as plantas (Steiner *et al.*, 2007; Tsiadouli *et al.*, 2015). No entanto, o manejo inadequado desses insumos pode levar à lixiviação de nutrientes, poluição dos corpos hídricos e desequilíbrios nutricionais no solo (Withers *et al.*, 2014).

Nesse contexto, o tipo de manejo agrícola adotado pode determinar a viabilidade a longo prazo das áreas sob o cultivo de cana-de-açúcar, impactando tanto a produtividade das colheitas quanto a sustentabilidade ambiental do sistema agrícola. Práticas de manejo sustentável, que consideram a conservação do solo e da água, a manutenção da fertilidade e a promoção da biodiversidade, são essenciais para garantir a continuidade da produção de cana-de-açúcar em níveis elevados e sustentáveis (Tilman *et al.*, 2002). Diante do exposto, foram traçados os objetivos da pesquisa, citados a seguir.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivos gerais**

Avaliar os atributos químicos, físicos e hidráulicos de solo sob cultivo de cana-de-açúcar em diferentes sistemas de manejo agrícola por meio de ensaios em campo e em laboratório, realizando análise comparativa referente à qualidade do solo em cada área.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Determinar os atributos químicos dos solos das áreas do estudo para caracterização da fertilidade dos solos;

- Determinar atributos físicos dos solos das áreas do estudo para avaliar os impactos das práticas de manejos;
- Determinar a condutividade hidráulica saturada por diferentes métodos, sendo em campo, via Beerkan, e em laboratório, por meio de permeâmetros de cargas constante e decrescente; para avaliar a dinâmica da água sob os manejos aplicados.

### **3. REVISÃO DE LITERATURA**

#### **3.1 Cultivo da cana-de-açúcar em Alagoas**

O Brasil é o segundo maior produtor de etanol no mundo, sendo responsável por produzir aproximadamente 28% do etanol mundial no ano de 2023 (RFA, 2024). Diferentemente dos Estados Unidos, onde grande maioria do etanol é produzido a partir do milho, o Brasil utiliza principalmente a cana-de-açúcar como matéria-prima. Isso faz com que o país seja o maior produtor de cana-de-açúcar, tendo produzido na safra de 2022/23 cerca de 610,8 milhões de toneladas em 8,3 milhões de hectares de área colhida (CONAB, 2024). Além disso, o Brasil tem investido continuamente em tecnologia e inovação para aumentar a eficiência e a sustentabilidade da produção de etanol, destacando-se no cenário global não apenas pela quantidade, mas também pela qualidade do biocombustível produzido (ANP, 2024). As usinas brasileiras são conhecidas por sua capacidade de maximizar a utilização da cana-de-açúcar, produzindo não só etanol e açúcar, mas também bioeletricidade a partir do bagaço da cana, o que contribui para a matriz energética do país (EMBRAPA, 2023).

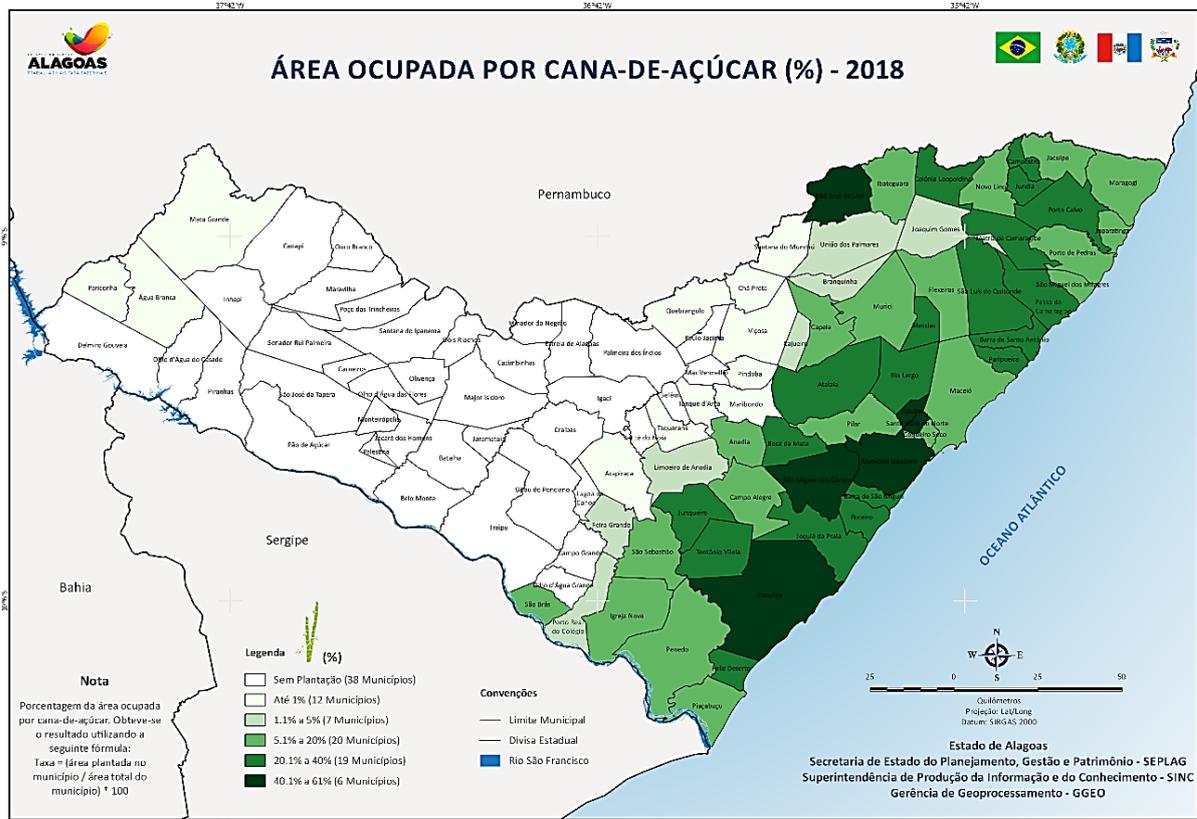
O investimento em tecnologias avançadas tem permitido ao Brasil aprimorar os processos de fermentação e destilação, resultando em um etanol de alta qualidade que atende aos rigorosos padrões internacionais (Macedo; Carvalho, 2007). A produção de bioeletricidade a partir do bagaço de cana-de-açúcar é outro destaque da indústria brasileira. Este subproduto é utilizado nas próprias usinas para gerar energia elétrica, e o excedente é exportado para a rede elétrica nacional, contribuindo significativamente para a matriz energética do país (UNICA, 2023). Este processo não só aproveita totalmente a biomassa da cana-de-açúcar, mas também reduz as emissões de gases de efeito estufa, alinhando-se aos objetivos de redução de carbono (Guarenghi *et al.*, 2023).

Segundo a CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento (2024), o estado de Alagoas teve 301,5 mil hectares de área colhida na Safra 2022/23, o que corresponde a 34% da área colhida em todo o Nordeste. Sendo assim, o setor sucroenergético desempenha um papel

significativo na economia do estado, contribuindo para seu crescimento econômico (Alves; Cruz; Machado, 2018). O setor é responsável por uma significativa geração de empregos, tanto diretos quanto indiretos, e por um impacto positivo na balança comercial de Alagoas, uma vez que o açúcar e o etanol produzidos são importantes produtos de exportação (Macedo; Carvalho, 2007). Além disso, a produção de cana-de-açúcar em Alagoas tem promovido o desenvolvimento de infraestruturas, como estradas, que beneficiam outras atividades econômicas na região (Coutinho; Assad, 2017). O avanço das tecnologias agrícolas também tem sido um fator chave para o aumento da produtividade e sustentabilidade do setor, contribuindo para a eficiência da produção e a redução de impactos ambientais (Nyko *et al.*, 2013).

O cultivo da cana-de-açúcar no estado está concentrado na região de Tabuleiros Costeiros (Figura 1), devido às suas condições edafoclimáticas (Cuenca *et al.*, 2015). Essa unidade de paisagem é caracterizada por solos profundos com baixa fertilidade e uma camada compactada em subsuperfície no qual impossibilita o aprofundamento de raízes, ampliando assim os efeitos de períodos secos sobre a produtividade da cultura (Barros *et al.*, 2018).

Figura 1 - Área ocupada por cana-de-açúcar (%) no ano de 2018



Fonte: SEPLAG (2020).

Mesmo a região tendo um período seco pronunciado, entre os meses de outubro e fevereiro, atenuado à reduzida profundidade do sistema radicular pela camada adensada do solo, essas condições não são limitantes para o desenvolvimento da cultura. Uma das formas de contornar o problema de deficiência hídrica é a escolha de variedades que sejam resistentes ou tolerantes à seca.

A cultura da cana-de-açúcar possui quatro fases de desenvolvimento, onde sua necessidade hídrica se altera de acordo com a fase vegetativa e a variedade utilizada; desta forma, é possível maximizar a eficiência da irrigação (Abreu *et al.*, 2013; Barros *et al.*, 2018). Assim, as fases de crescimento da cultura são: i) brotação, com menor área foliar e conseqüentemente menor demanda hídrica; ii) perfilhamento; iii) crescimento vegetativo, quando a cultura é bastante sensível à deficiência hídrica e às temperaturas fora da sua amplitude térmica ideal; iv) maturação, período que ocorre um maior acúmulo de sacarose nos colmos e é ideal que aconteça em períodos de pouca disponibilidade hídrica. Isso posto, o sistema de plantio na região é o de cana de ano, onde os cortes são realizados em intervalos regulares de 12 meses com a fase de brotação e estabelecimento nos períodos de novembro a dezembro, reduzindo a necessidade da complementação via irrigação, já que o período de maior demanda de água coincidirá com o período de maior disponibilidade hídrica pela precipitação (Abreu *et al.*, 2013; Barros *et al.*, 2018; Manhães *et al.*, 2015; Meneses; Resende, 2016).

### **3.2 Utilização da vinhaça na fertirrigação de solos sob o cultivo de cana-de-açúcar**

Diversos resíduos podem ser gerados na produção do etanol a partir da cana-de-açúcar; no entanto, a vinhaça destaca-se como o mais importante entre eles, não só pelo volume gerado, como pela potencialidade de seu uso (Freire; Cortez, 2000). De fato, atualmente, ela é vista como um subproduto da produção de álcool, sendo o produto de fundo da coluna de destilação (Cristofolletti *et al.*, 2013; Elia Neto, 2016; Palacios-Bereche *et al.*, 2022). A vinhaça apresenta características como uma cor marrom escura, natureza ácida e odor que varia do adstringente ao nauseabundo, sendo esse último relacionado ao alto teor residual de açúcar, o que provoca um processo de putrefação assim que é descarregada (Freire; Cortez, 2000).

Quanto à composição química da vinhaça esta é extremamente variável, já que depende de diversos fatores; porém, em termos gerais, caracteriza-se por ter altos teores de matéria orgânica e potássio, além de quantidades consideráveis de nitrogênio, fósforo, cálcio, magnésio e sulfato, e de quantidades menores de zinco, ferro e manganês (Cruz *et al.*, 2008). Em média, 10 a 18 litros de vinhaça são gerados para cada litro de etanol produzido, dependendo da

tecnologia utilizada na destilaria, sendo um grande problema ao setor devido às grandes quantidades produzidas (Silva; Griebeler; Borges, 2007; Elia Neto, 2016; Prado; Caione; Campos, 2013). Além disso, a vinhaça possui um grande potencial poluidor, sendo classificada de acordo com a NBR 10.004 da ABNT (2004) como um resíduo de classe II A – não perigoso e não inerte, por não possuir tratamento convencional que possibilite o seu lançamento em corpos d’água (Pereira; Pereira Neto; Tiburcio, 2022).

Dessa forma, diversas pesquisas começaram a ser desenvolvidas, visando encontrar alternativas para uso adequado para a vinhaça, e, como resultado, uma delas é a aplicação da vinhaça como fertirrigante em áreas cultivadas com cana-de-açúcar (Christofolletti *et al.*, 2013; Freire; Cortez, 2000). A fertirrigação é um processo conjunto de adubação e irrigação que consiste na utilização da própria água de irrigação para conduzir e distribuir o fertilizante no solo. No entanto, a fertirrigação com vinhaça é referida dessa forma por ser realizada por meio de um método de irrigação, mas se constitui apenas em uma aplicação de adubo e molhamento, sem controle prático da lâmina hídrica aplicada e muito menos da frequência de aplicações, com interesse exclusivo na quantidade de potássio carregada pela própria vinhaça (Coelho; Or; Souza, 2011; Freire; Cortez, 2000).

A vinhaça é considerada como uma ótima fonte nutricional para o plantio da cana-de-açúcar devido às altas concentrações de potássio em sua composição, que é um elemento vital para o crescimento, desenvolvimento e produção da cana-de-açúcar (Christofolletti *et al.*, 2013). A utilização estratégica da técnica de fertirrigação com vinhaça contribui significativamente para a diminuição do emprego de fertilizantes químicos sintéticos, tornando-se uma prática essencial do ponto de vista econômico (Serafim *et al.*, 2021). Todavia, como a aplicação da vinhaça é feita de acordo com a necessidade de potássio na cultura, a sua aplicação excessiva pode causar a contaminação do solo e de corpos hídricos (subterrâneos e superficiais) pela presença da amônia e de metais potencialmente tóxicos (Soto; Basso; Kiang, 2017).

### **3.3 Qualidade dos atributos do solo de acordo com tipo de manejo aplicado**

Doran e Parkin (1994) definiram qualidade do solo como “a capacidade do solo em funcionar dentro dos limites de um ecossistema para sustentar a produtividade biológica, manter a qualidade ambiental e promover a saúde vegetal e animal”. Certas propriedades do solo servem como indicadores de qualidade, sendo cruciais para a sustentabilidade ambiental e a produtividade agrícola, especialmente em sistemas de cultivo intensivo como o da cana-de-açúcar (Carneiro *et al.*, 2024; Larson; Pierce, 1994; Lopes *et al.*, 2021).

A alteração dos atributos do solo é multifatorial e é influenciada principalmente pelo tipo de uso e manejo ao longo do tempo (Jin *et al.*, 2022; Khaledian *et al.*, 2017). Esses atributos incluem características físicas como textura, estrutura, densidade, porosidade e capacidade de retenção de água; propriedades químicas como pH, capacidade de troca catiônica, teores de nutrientes e matéria orgânica; e atributos biológicos como biomassa microbiana, atividade enzimática e respiração do solo (Doran; Parkin, 1994). As práticas de manejo do solo, como cultivo, irrigação, uso de fertilizantes e agrotóxicos, e técnicas de preparo do solo podem alterar esses atributos de forma inter-relacionada, influenciando mutuamente a qualidade e produtividade do solo (Alvarez; Steinbach, 2009; Carneiro *et al.*, 2009). Portanto, avaliar a qualidade dos atributos de um solo é uma tarefa complexa, exigindo uma abordagem sistêmica para compreender como alterações em um único atributo podem afetar todo o ecossistema do solo (Cardoso *et al.*, 2011).

O aumento das áreas cultivadas com cana-de-açúcar no Brasil tem levado à intensificação no uso do solo que modifica suas funções (Cavalcanti *et al.*, 2019). Durante o cultivo da cana-de-açúcar, ocorre um processo de replantio em média a cada cinco anos, período durante o qual as áreas cultivadas são submetidas à múltiplas colheitas mecanizadas (Carneiro *et al.*, 2024). O tráfego intenso de máquinas pesadas nas plantações pode resultar na degradação física do solo, impactando sua estrutura e prejudicando os indicadores de qualidade física, sendo essencial para a preservação do solo o controle de tráfego agrícola (Cavalcanti *et al.*, 2019; Nunes *et al.*, 2023). Essa prática pode resultar numa significativa compactação do solo, reduzindo assim a sua porosidade, especialmente os macroporos, essenciais para infiltração de água e aeração do solo, tão cruciais para a saúde da planta (Hamza; Anderson, 2005; Horn *et al.*, 1995; Zhou *et al.*, 2021). Estudos indicam que a compactação do solo se dá principalmente nas camadas mais superficiais, afetando negativamente a condutividade hidráulica e a capacidade de armazenamento de água no solo, aumentando a resistência do solo à penetração de raízes, além de causar distribuição de água menos uniforme, criando zonas de saturação e zonas secas, afetando o desenvolvimento da planta (Esteban *et al.*, 2019; Keller *et al.*, 2019; Nunes *et al.*, 2023; Oliveira Filho *et al.*, 2015).

Outras intervenções mecânicas que podem modificar a estrutura do solo incluem a gradagem e a subsolagem (Carneiro *et al.*, 2024). Essas práticas, realizadas antes do plantio ou replantio da cultura, podem melhorar significativamente o solo nas camadas superficiais e subsuperficiais, aumentando a porosidade, aeração, capacidade de retenção de água, além de facilitar a infiltração de água e a penetração das raízes ao solo (Oliveira Filho *et al.*, 2015;

Shukla *et al.*, 2021). Contudo, os efeitos dessas práticas são temporários devido ao uso intensivo de maquinário na colheita, e o excesso delas pode acelerar a decomposição da matéria orgânica no solo, resultando na redução do carbono orgânico, alterações nas comunidades microbianas do solo e impactos negativos na ciclagem de nutrientes, aumentando também o risco de erosão (Alvarez; Steinbach, 2009; Chamen *et al.*, 2015; Shukla *et al.*, 2021; Kuzyakov, 2010).

A aplicação de vinhaça no solo com cultivo de cana-de-açúcar é uma prática comum e que pode trazer diversos benefícios tanto para o solo, quanto para a planta (Oliveira Filho *et al.*, 2021). Oliveira *et al.* (2014) investigaram os efeitos da aplicação da vinhaça no cultivo da cana-de-açúcar, sendo observado melhoria na produção agrícola ao utilizar apenas a fertirrigação com vinhaça, reduzindo assim a necessidade de adubação mineral. Por ser rica em potássio, cálcio, magnésio e outros nutrientes essenciais, há uma enorme contribuição com sua aplicação para melhorias da fertilidade do solo, também pode promover uma melhora na estrutura do solo, aumento da capacidade de retenção de água e a promoção de atividade microbiana no solo (Christofolletti *et al.*, 2013; Fuess; Rodrigues; Garcia, 2017).

Por outro lado, enquanto alguns estudos destacam os benefícios da vinhaça na melhoria da fertilidade do solo e aumento da produtividade da cana-de-açúcar, outros alertam para os riscos ambientais associados à sua aplicação inadequada (Uyeda *et al.*, 2013). Estes estudos se baseiam no fato da vinhaça conter elevados níveis de sólidos totais dissolvidos e matéria orgânica biodegradável, além de um baixo pH, onde sua aplicação pode favorecer a salinização e aumento da acidez do solo (Fuess; Rodrigues; Garcia, 2017). A vinhaça também pode conter metais tóxicos, no qual sua aplicação excessiva pode levar à acumulação desses metais no solo, apresentando riscos de toxicidade para a planta e para os organismos do solo, além de potencial contaminação de águas subterrâneas (Soto; Basso; Kiang, 2017).

A fertirrigação com vinhaça também tem influência nos atributos físico-hídricos do solo e a interação solo-vinhaça depende tanto das características da própria vinhaça, quanto das características do solo em que ela é aplicada. Alguns estudos revelam redução da condutividade hidráulica do solo, já que é uma propriedade bastante sensível às modificações no uso do solo, quando aplicada vinhaça em prolongados períodos por promover a obstrução de poros do solo, que podem ocorrer devido a grande quantidade de sólidos suspensos presente, obstrução biológica (*bioclogging*) e aumento da dispersão da argila presente no solo (Miyamoto; Kameyama; Nakajima, 2012; Uyeda *et al.*, 2013).

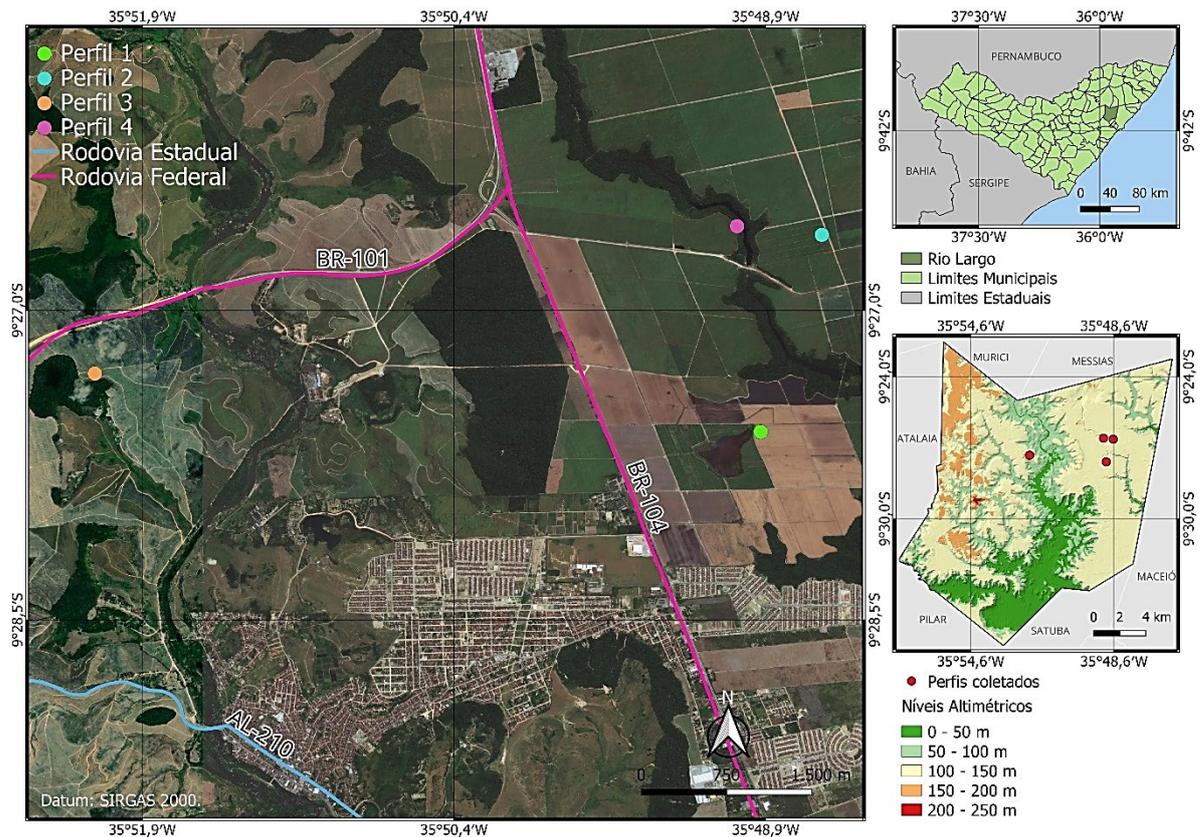
Portanto, torna-se essencial ter um conhecimento prévio das propriedades mineralógicas do solo em análise, pois os tipos de argilominerais presentes são fatores determinantes que podem afetar seus atributos, modificar o processo de lixiviação de macro e micronutrientes, além de facilitar a percolação da vinhaça ao longo dos diferentes perfis de profundidade do solo (Bueno *et al.*, 2009).

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Descrição da área de estudo

O experimento foi conduzido em áreas pertencentes à Usina Santa Clotilde S.A., como pode ser observado na Figura 2, localizadas no município de Rio Largo, em Alagoas, e situados à aproximadamente 35 km do centro de Maceió, capital do estado.

Figura 2 - Mapas hipsométrico e de localização das áreas coletadas



Fonte: Autora (2024).

Neste estudo, foram utilizadas quatro áreas dispostas em condições diferentes de utilização e manejo, todas na mesma classe de solo (Latossolo Amarelo Distrocoeso), sendo:

- Perfil 1 – Cultivo de cana-de-açúcar com aplicação de vinhaça iniciado desde a década de 80 e colheita mecanizada;

- Perfil 2 – Cultivo de cana-de-açúcar com aplicação de vinhaça iniciado há 1 ano e colheita mecanizada;
- Perfil 3 - Cultivo de cana-de-açúcar sem aplicação de vinhaça e colheita manual;
- Perfil 4 – Mata nativa.

A descrição completa dos tratamentos realizados em cada perfil pode ser observada na Tabela 1.

Tabela 1 - Práticas de manejo realizadas nas áreas do estudo

Perfis	Descrição do manejo da área
<b>P1</b>	Irrigação realizada por aspersão com autopropelido com lâmina de 60 mm mês <sup>-1</sup> . O solo é preparado realizando gradagem e subsolagem. Colheita mecanizada. Vinhaça aplicada via TMA ou tonino (aplicação localizada) de 40 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> entre 15 e 30 dias após a colheita. A calagem é feita aplicando 5 t ha <sup>-1</sup> no plantio e 2,5 t ha <sup>-1</sup> no 3º e 5º corte. A variedade da cana-de-açúcar plantada é RB01494, no momento da coleta em 2º corte. A produtividade do talhão foi de 113,13 THC.
<b>P2</b>	Irrigação realizada por aspersão com carretel elétrico. O solo é preparado realizando gradagem e subsolagem. Colheita mecanizada. Vinhaça aplicada via TMA ou tonino (aplicação localizada) de 40 m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> entre 15 e 30 dias após a colheita. A calagem é feita aplicando 5,0 t ha <sup>-1</sup> no plantio e 2,5 t ha <sup>-1</sup> no 3º e 5º corte. A variedade da cana-de-açúcar plantada é VAT90-212, no momento da coleta em 3º corte. A produtividade do talhão foi de 74,34 THC.
<b>P3</b>	Irrigação de salvação após a colheita realizada por aspersão elétrica com lâmina de 60 mm. O preparado do solo é por cultivo mínimo. Colheita manual. A calagem é feita aplicando 3,0 t ha <sup>-1</sup> no plantio e 2,0 t ha <sup>-1</sup> no 3º e 5º corte. A variedade da cana-de-açúcar plantada é RB961552, no momento da coleta em 4º corte. A produtividade do talhão foi de 71,7 THC.
<b>P4</b>	Fragmento de Floresta Subperenifólia

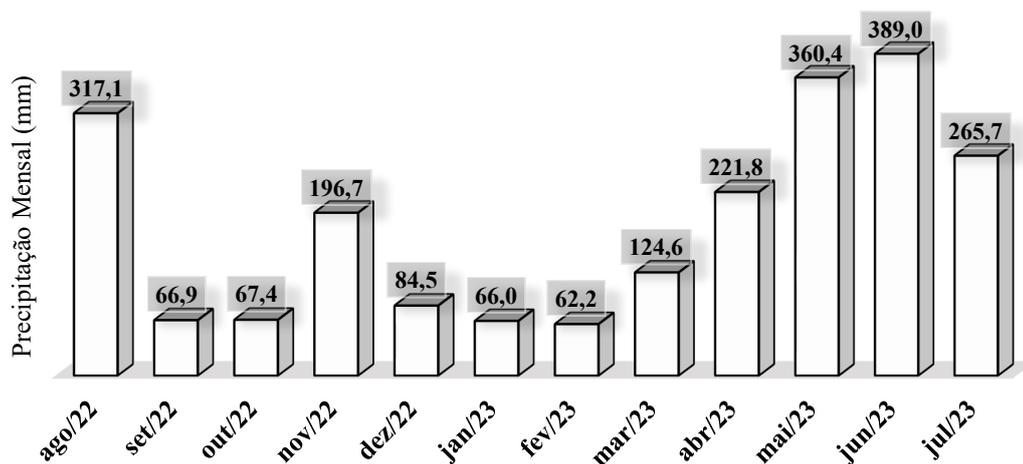
Fonte: Usina Santa Clotilde S.A. (2024).

Sobre as características das três variedades de planta presentes em cada área, têm-se duas variedades desenvolvidas pela Universidade Federal de Alagoas, membro da Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento Sucroenergético – RIDESA: a RB01494 e a RB961552. A variedade RB01494 possui um alto teor de açúcar, rápido crescimento, um bom desempenho na colheita mecanizada e o manejo precisar ser em área irrigada ou sem déficit hídrico, possui resistência à ferrugens marrom e alaranjado e ao carvão (RIDESA, 2022; UFAL,

2021). A RB961552 tem alta produtividade, é responsiva à fertirrigação e possui alta biomassa foliar e excelente fechamento entre as fileiras, possui ainda uma resistência ao marrom e à ferrugem alaranjada e é moderadamente resistente à doenças de escaldadura e ferrugem (Silva *et al.*, 2021). Já a terceira variedade VAT90-212, é oriunda da Usina Triunfo, em Alagoas, possui alta brotação de soqueira, bom florescimento e com um alto teor de açúcar, se destacando pela boa produtividade e sendo ideal para plantio na época de junho a agosto e para colheita entre outubro a janeiro (Nascimento *et al.*, 2019; Oliveira; Braga; Walter, 2015).

O período de descrição e coleta dos perfis de solo ocorreram entre os meses de março e abril de 2023, onde o período de chuvas da região começa a se intensificar, como observado na Figura 3.

Figura 3 - Precipitação total por mês, de agosto de 2022 a julho de 2023, da Estação Pluviométrica 935056



Fonte: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - ANA (2024).

O clima dessa região, segundo a classificação climática de Köppen, é tropical litorâneo úmido (As). O período chuvoso começa no outono tendo início em fevereiro e término em outubro. A precipitação média anual é de 1.634.2 mm. A vegetação é predominantemente do tipo Floresta Subperenifólia (Alvares *et al.*, 2013; CPRM, 2005).

#### 4.2 Coleta e descrição dos solos

Em cada perfil do estudo foi aberto uma trincheira para realização da descrição morfológica dos solos conforme o Manual de Descrição e Coleta de Solo no Campo (Santos *et al.*, 2015), sendo esses classificados de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS (EMBRAPA, 2018). Na Figura 4 é possível observar o processo de descrição morfológicas dos perfis estudados.

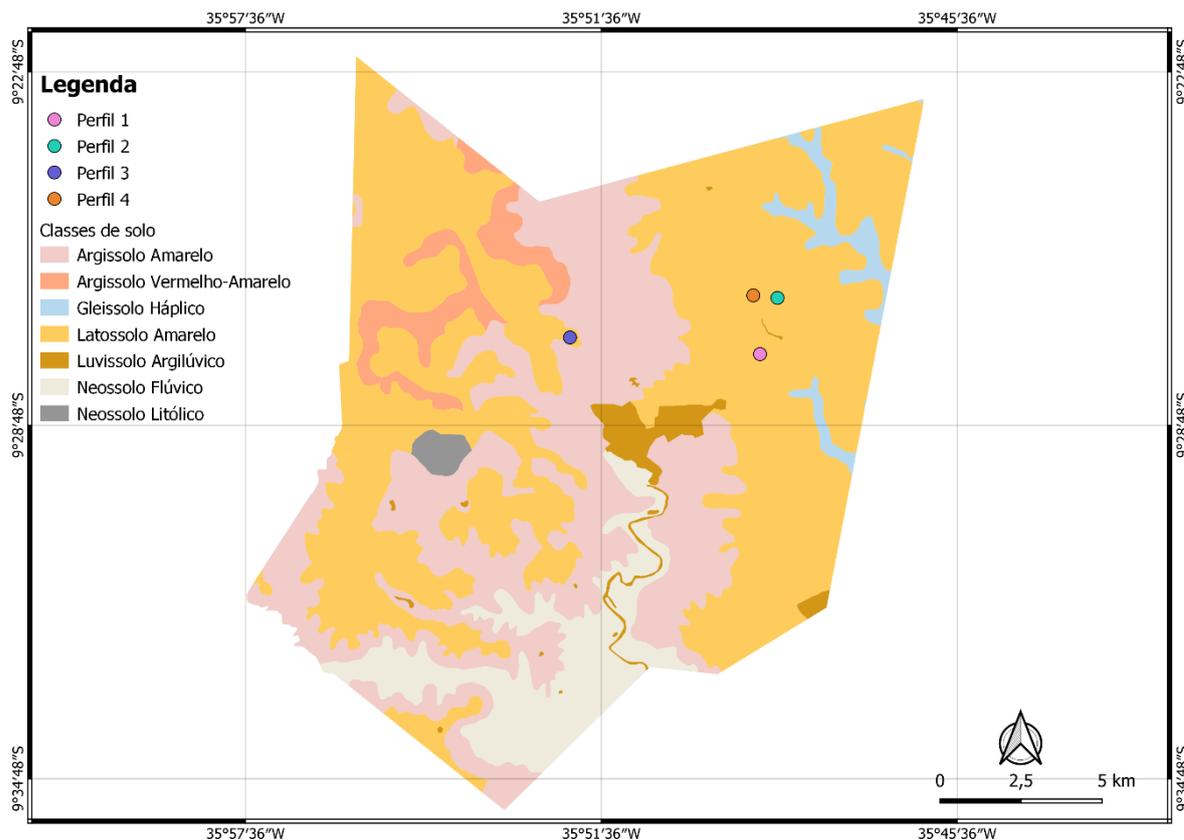
Figura 4 - Descrição morfológica dos perfis de solo estudados



Fonte: Acervo pessoal da autora (2023).

Com a definição dos horizontes em cada perfil, foram coletadas amostras de solo deformadas e não deformadas para realização dos ensaios em laboratório. Em cada um dos perfis, nos quatro primeiros horizontes, foram coletadas seis amostras não deformadas em cilindros volumétricos ( $\cong 100 \text{ cm}^3$ ), inseridos ao solo com auxílio de amostrador tipo Uhland, totalizando 24 amostras por perfil e 96 amostras no total. Já para as amostras deformadas, foram coletadas aproximadamente 4kg de solo em cada um dos horizontes de cada perfil.

Figura 5 – Mapa Pedológico do município de Rio Largo e distribuição dos perfis estudados.



Os quatro perfis do estudo foram classificados como Latossolo Amarelo Distrocoeso (LAdx), como é possível observar na Figura 5, sendo três típicos e um argissólico (Apêndices A-D), de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS (EMBRAPA, 2018). Latossolos são solos minerais, com presença de horizonte B latossólito (Bw) abaixo de qualquer tipo de horizonte A e possuindo pequena variação do conteúdo de argila do horizonte superficial para o horizonte Bw. Já a designação “Amarelo” refere-se a cor predominante do horizonte B, que possui matriz 7,5YR ou mais amarelo na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B (inclusive BA), sugerindo que solo possui uma boa drenagem e apresente condições oxidantes. Entrando, no terceiro nível categórico de classificação de solos do SiBCS, são solos Distrocoesos, isto é, com saturação por bases menor que 50% na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B (incluindo BA) e com carácter coeso em um ou mais horizontes dentro de 150 cm a partir da superfície do solo.

#### 4.3 Ensaio de infiltração pelo método do Beerkan

Os ensaios de infiltração foram realizados nos mesmos locais de abertura das trincheiras para descrição do perfil do solo e no limite superior de cada horizonte, com o auxílio de um infiltrômetro de anel simples com diâmetro de 15cm. O ensaio consistiu em registrar o tempo

em que um determinado volume de água, que variou entre 125 e 250mL, demorou para infiltrar no solo. Este ensaio fornece a infiltração tridimensional axissimétrica como uma função do tempo:  $I_3(t)$  (Souza *et al.*, 2008). A metodologia de Beerkan consiste na utilização dos modelos propostos por Van Genuchten (1980) e Brooks e Corey (1964), conforme equações (1) e (2), respectivamente.

$$\left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right) = \left[1 + \left(\frac{h}{h_g}\right)^n\right]^{-m} \quad (1)$$

onde:  $\theta$  é a umidade volumétrica expressa em  $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ;  $\theta_r$  e  $\theta_s$  as umidades volumétricas residual e saturada, nessa ordem, ambas em  $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ;  $h$  o potencial matricial (cm);  $h_g$  um valor de escala de  $h$  (cm);  $m$  e  $n$  são parâmetros de forma (adimensionais), no qual  $m = 1 - \left(\frac{2}{n}\right)$ , como sugerido em Burdine (1953).

$$K_{(\theta)} = K_{\text{sat}} \cdot \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right)^\eta \quad (2)$$

sendo:  $K_{(\theta)}$  a condutividade hidráulica do solo, expressa em  $\text{mm h}^{-1}$ , determinada na umidade  $\theta$  (não saturada);  $K_{\text{sat}}$  a condutividade hidráulica saturada do solo ( $\text{mm h}^{-1}$ ); e  $\eta$  o parâmetro de forma para a curva de condutividade hidráulica (adimensional).

As funções expressas pelas equações (1) e (2) possuem cinco parâmetros desconhecidos: dois parâmetros de forma ( $m$  ou  $n$  e  $\eta$ ) e três parâmetros de normalização ( $\theta_s$ ,  $K_{\text{sat}}$  e  $h_g$ ). Os parâmetros de forma dependem principalmente da textura, enquanto os parâmetros de normalização resultam da estrutura dos solos (Souza *et al.*, 2008). Estes parâmetros foram obtidos utilizando o programa BEST (Beerkan Estimation of Soil Transfer Parameters through Infiltration Experiments), proposto por Lassabatère *et al.* (2006).

#### 4.4 Ensaios em laboratório

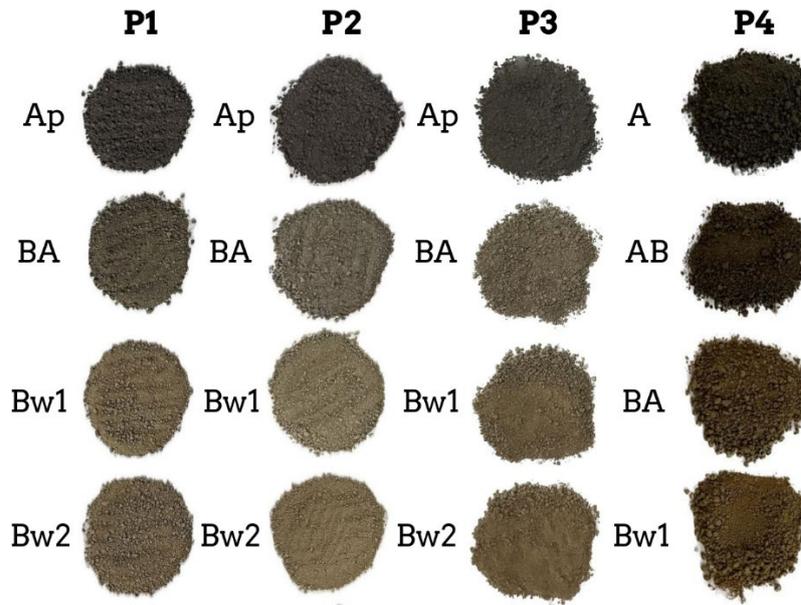
##### 4.4.1 Análises químicas

As análises químicas foram realizadas no Laboratório de Solo, Água e Planta, do Centro de Ciências Agrárias (CECA) da Universidade Federal de Alagoas (UFAL). Para tanto, foram enviadas amostras de TFSA para diagnóstico da fertilidade do solo, determinando-se: pH em água; sódio; fósforo, potássio; cálcio; magnésio; alumínio; acidez potencial; capacidade de troca catiônica efetiva e total; matéria orgânica; saturação por bases; saturação por alumínio; saturação de cálcio; saturação de magnésio; saturação de potássio; saturação de sódio.

#### 4.4.2 Análises granulométricas

As análises de granulometria, incluindo a argila dispersa em água, foram realizadas utilizando TFSA (Figura 6) e determinadas por meio do método do densímetro, baseado em Gee e Or (2002) e adaptado por Almeida (2008).

Figura 6 - Subamostras de TFSA de cada horizonte corresponde aos perfis estudados



Fonte: Autora (2024).

Desta forma, foram utilizados 50g de TSFA de cada amostra, transferidas para garrafa plástica e adicionados 125mL de água para determinação da argila dispersa em água (ADA) e 100mL de água + 25mL de Calgon (hexametáfosfato de sódio + carbonato de cálcio) para determinação da argila total (AT). Na sequência, os conjuntos de garrafas foram colocados no agitador tipo Wagner (MA 160/24) e agitados a 50rpm por 16h. Posteriormente, o material das garrafas foi transferido para provetas de 1000mL, onde completou-se com água até o volume de 940mL.

As frações AT e ADA, classificadas como frações sólidas com diâmetro equivalente ( $\varnothing_{eq.}$ ) < 0,002 mm, foram determinadas por sedimentação, com base na Lei de Stokes, com leituras no densímetro após 24 h de repouso. As frações de areia total, compreendidas entre o intervalo  $0,05 \leq \varnothing_{eq.(mm)} < 2,00$ , foram obtidas por peneiramento via úmida. Esta foi subdividida em cinco classes, determinadas por peneiramento via seco, obtendo-se: areia muito grossa [ $1,00 \leq \varnothing_{eq.(mm)} < 2,00$ ]; areia grossa [ $0,50 \leq \varnothing_{eq.(mm)} < 1,00$ ]; areia média [ $0,25 \leq \varnothing_{eq.(mm)} < 0,50$ ]; areia fina [ $0,10 \leq \varnothing_{eq.(mm)} < 0,25$ ]; e areia muito fina [ $0,05 \leq \varnothing_{eq.(mm)} < 0,10$ ]. A fração

silte [ $0,002 \leq \varnothing_{eq.(mm)} < 0,05$ ]; foi obtida por diferença, calculada pela expressão: Silte (%) =  $100 - (\% \text{ Areia total} + \% \text{ Argila total})$ . De posse dos dados de AT e ADA, foi calculado o grau de flocculação (GF), utilizando a expressão:  $GF = (AT - ADA) / AT$ , podendo-se obter o grau de dispersão ( $GD = 100 - GF$ ).

#### 4.4.3 Condutividade hidráulica saturada dos solos

Os ensaios para determinação da condutividade hidráulica saturada dos solos ( $K_{sat}$ ) foram realizadas nas amostras coletadas em cilindros volumétricos ( $\cong 100 \text{ cm}^3$ ), que foram devidamente preparadas em laboratório, realizando a toailete das amostras, doravante referenciadas como conjunto amostra-cilindro. Para esta análise foi utilizado um permeâmetro contínuo de carga constante e decrescente, conforme descrito em Almeida *et al.* (2020), de forma a permitir a troca dos métodos de aplicação de carga (constante ou decrescente) mantendo o conjunto amostra-cilindro fixo no equipamento e evitando possíveis perturbações na amostra. Inicialmente, cada conjunto foi saturado, via capilaridade por um período de 24 h e, posteriormente, submetidas ao método do permeâmetro de carga constante (PCC), aplicando-se carga hidráulica de aproximadamente 2,0 cm de coluna de água (cca).

O método do PCC consiste na manutenção de uma carga hidráulica constante, com o auxílio de um tubo de Mariotte, medindo o volume de água que atravessa a área da seção transversal da amostra em função do tempo (Marques *et al.*, 2008; Libardi, 2018). Neste método, a  $K_{sat}$  é determinada pela equação (3), que é obtida a partir da equação de Darcy.

$$K_{sat} = \left[ \frac{V_a \cdot L}{A \cdot t \cdot (h + L)} \right] \times 600 \quad (3)$$

onde:  $K_{sat}$  é expressa em  $\text{mm h}^{-1}$ ;  $V_a$  é o volume de água coletado no intervalo de tempo ( $\text{cm}^3$ );  $L$  é o comprimento da amostra (cm);  $A$  é a área da seção transversal da amostra ( $\text{cm}^2$ );  $t$  é o intervalo de tempo para coleta do  $V_a$  (min); e  $h$  é a carga hidráulica utilizada (cca).

As amostras em que foram observadas pouca ou nenhuma transferência de água por meio do método via PCC foram adaptadas para aplicação do método de carga decrescente (PCD). Este método possui uma configuração semelhante ao de carga constante, porém a carga hidráulica, aplicada no topo da amostra, decresce com o tempo. Esta carga é aplicada com auxílio de um tubo de vidro (bureta de 50 mL), que tem diâmetro interno menor que a amostra ( $\cong 1 \text{ cm}$ ). Isto torna possível a mensuração de menores volumes infiltrados na amostra, como o que ocorre em solos argilosos, por meio da medida do deslocamento do menisco entre dois pontos ( $H_1$  e  $H_2$ ), que é muito lento em solos argilosos.

Desse modo, o PCD é o método mais adequado para solos com  $K_{sat}$  mais baixa, ou seja, aqueles com textura mais fina, dentro das classes argilosas (Libardi, 2018). A equação para calcular a  $K_{sat}$  pelo método do PCD também foi deduzida a partir da equação de Darcy, sendo expressa pela equação (4):

$$K_{sat} = \left[ \frac{a \cdot L}{A \cdot \Delta t} \ln \left( \frac{H_1}{H_2} \right) \right] \times 600 \quad (4)$$

sendo:  $K_{sat}$  expressa em  $\text{mm h}^{-1}$ ;  $a$  é a área da seção transversal do tubo de vidro onde se mede  $H$  ( $\text{cm}^2$ );  $L$  é o comprimento da amostra (cm);  $A$  é a área da seção transversal da amostra ( $\text{cm}^2$ );  $\Delta t = t_2 - t_1$ , representa o intervalo de tempo (min), para a diferença de potencial total diminuir de  $H_1$  para  $H_2$ ;  $H_1$  é a altura inicial do menisco da água na bureta ao nível de referência (NR, localizado na base da amostra), expresso em cm;  $H_2$  é a altura final do menisco da água na bureta ao NR (cm).

#### 4.4.4 Porosidade total e sua distribuição por classes de tamanho de poros

Após a determinação da  $K_{sat}$ , os conjuntos amostra-cilindro foram novamente saturados e pesados, sendo esse o primeiro dado para cálculo da porosidade total dos solos (P), que foi determinada pelo método da saturação e calculada pela equação (5), conforme preconizado em Almeida *et al.* (2017a).

$$P = \frac{V_{\text{poros}}}{V_{\text{solo}}} \quad (5)$$

onde:  $P$  é expressa em  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ;  $V_{\text{poros}}$  é o volume de poros ( $\text{cm}^3$ ), obtido pela diferença entre o peso do conjunto amostra-cilindro saturado e o peso do conjunto amostra-cilindro seco a  $105^\circ\text{C}$ , convertendo-se o peso em volume, assumindo-se que a densidade da água ( $D_{\text{água}}$ ) é  $1,0 \text{ g cm}^{-3}$ ; e  $V_{\text{solo}}$  é o volume do solo ( $\text{cm}^3$ ), assumido como o volume do cilindro ( $\pi r^2 h$ ).

Vale ressaltar que o peso seco à  $105^\circ\text{C}$  só foi obtido após a determinação da distribuição das classes de poros por tamanho (DPT). Desse modo, após a saturação dos conjuntos amostra-cilindro, foi determinada a DPT, realizada utilizando-se o método de dessorção de água, seguindo os procedimentos sugeridos em Teixeira e Behring (2017). Para tanto, os conjuntos amostra-cilindro foram equilibrados nas tensões 10, 60 e 100 cca, com o auxílio de uma mesa de tensão, sendo pesados a cada equilíbrio. As classes dos macroporos (poros classificados com  $\varnothing_{\text{eq.}} > 300 \mu\text{m}$ ) e mesoporos [ $50 < \varnothing_{\text{eq.}}(\mu\text{m}) \leq 300$ ] foram calculadas de acordo com as equações (6) e (7).

$$\text{Macroporos} = \frac{V_{\text{macro}}}{V_{\text{solo}}} \quad (6)$$

$$\text{Mesoporos} = \frac{V_{\text{meso}}}{V_{\text{solo}}} \quad (7)$$

onde: Macroporos e Mesoporos foram expressos em  $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ;  $V_{\text{macro}}$  é o volume de macroporos ( $\text{cm}^3$ ), obtido pela diferença entre o peso do conjunto amostra-cilindro saturado e o peso do conjunto amostra-cilindro equilibrado a 10 cca;  $V_{\text{meso}}$  é o volume de mesoporos ( $\text{cm}^3$ ), obtido pela diferença entre o peso do conjunto amostra-cilindro equilibrado a 10 cca e o peso do conjunto amostra-cilindro equilibrado a 60 cca. Em ambos os casos, os pesos foram convertidos em volume, assumindo-se que a  $D_{\text{água}} = 1,0 \text{ g cm}^{-3}$ .

Na sequência, os conjuntos amostra-cilindro foram transferidos para as câmaras de Richards, onde foram aplicados e equilibrados os potenciais 333, 800 e 3000 cca. As classes dos microporos estruturais e biológicos ( $\text{Micro}_{\text{E+B}}$ ), microporos texturais ( $\text{Micro}_{\text{T}}$ ), expressas em  $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , foram calculadas pelo uso das equações (8) e (9), respectivamente:

$$\text{Micro}_{\text{E+B}} = \frac{V_{\text{Micro}_{\text{E+B}}}}{V_{\text{solo}}} \quad (8)$$

$$\text{Micro}_{\text{T}} = \frac{V_{\text{Micro}_{\text{T}}}}{V_{\text{solo}}} \quad (9)$$

onde:  $V_{\text{Micro}_{\text{E+B}}}$  é o volume de  $\text{Micro}_{\text{E+B}}$  ( $\text{cm}^3$ ), obtido pela diferença entre os pesos dos conjuntos amostra-cilindro equilibrados a 60 kPa e a 3000 cca;  $V_{\text{Micro}_{\text{T}}}$  é o volume de  $\text{Micro}_{\text{T}}$  ( $\text{cm}^3$ ), obtido pela diferença entre os pesos dos conjuntos amostra-cilindro equilibrados a 300 kPa e a 105°C, ou seja, está incluindo os microporos texturais e os criptoporos (equilibrados a 1.500 kPa). Em todos os casos, os pesos foram convertidos em volume, assumindo-se que a  $D_{\text{água}} = 1,0 \text{ g cm}^{-3}$ .

As amostras também foram equilibradas nas tensões 100 cca e 333 cca, que representam a capacidade de campo (CC) dos solos. Apesar de diversas fontes de literatura apontarem a CC de solos arenosos como 100 cca e de solos arenosos como 333 cca para solos argilosos, um estudo mais recente de Ottoni Filho, Caetano e Ottoni (2022) determinou que para solos tropicais brasileiros a CC é mais precisamente estimada em condições de laboratório na tensão de 100 cca, mesmo para os de textura média ou fina (argilosa ou muito argilosa).

Além da capacidade de campo, as amostras foram equilibradas na tensão de 800 cca, esse é conhecido na literatura como o limite crítico para a reposição de água ao solo, sinalizando o baixo teor de água nos poros do solo (Albuquerque, 2017; Frizzone, 2017).

A capacidade de campo dos solos (equilibrados a 100 e 333 cca), a reserva de água disponível (equilibrados a 800 cca), e os demais pontos citados, foram utilizados para

construção da curva característica de retenção de água nos solos (CCRAS), cujos detalhes podem ser vistos em Teixeira e Behring (2017).

#### 4.4.5 Densidade do solo

Após a determinação da DTP, a densidade do solo ( $D_s$ ) foi calculada, seguindo o método do cilindro volumétrico, descrito em Almeida *et al.* (2017b). Este método é considerado padrão para  $D_s$ , que consiste na coleta do solo com estrutura não deformada em um cilindro volumétrico (aço inox), calculando-se a  $D_s$  pela relação entre a massa de sólidos contida no cilindro e o volume do solo (Gonçalves *et al.*, 2013; Teixeira; Behring, 2017).

#### 4.4.6 Densidade de partícula

A densidade de partícula sólidas dos solos ( $D_p$ ) foi determinada por meio do método do balão volumétrico, conforme metodologia descrita em Viana, Teixeira e Donagemma (2017). Essa densidade está relacionada ao volume efetivamente ocupado pelo material sólido do solo, desconsiderando a porosidade entre este.

### 4.5 Análise estatística

Para os dados físico-hídricos foram realizadas análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey com nível de significância de 5% para comparação entre as médias por meio do software SISVAR 5.6. Para estes mesmos parâmetros, também foi realizada a análise de correlação Pearson fazendo o uso do software JAMOVI 2.3.28, com o intuito de avaliar a influência que um parâmetro pode ter sobre outro.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Atributos químicos dos solos

As propriedades químicas dos quatro perfis estudados, apresentadas na Tabela 2, mostram que nos perfis onde há cultivo de cana-de-açúcar (P1, P2 e P3), os primeiros horizontes ( $A_p$ ) estão em uma faixa de pH levemente ácido a neutro (6,2; 6,3 e 5,6 respectivamente), com diminuição do pH ao longo do perfil dessas áreas. Nos horizontes mais inferiores desses perfis, principalmente os horizontes do P3 a partir do BA, no qual não possuem influência da aplicação de calcário para correção da acidez do solo devido à sua profundidade, exibem condições ácidas similares aos horizontes do P4 (sob mata nativa).

Nas áreas em que há preparação do solo com calagem (P1, P2 e P3) os primeiros horizontes apresentam menor saturação por alumínio ( $A_p$  e BA de todos os perfis, com exceção

do P3, com menores valores apenas no Ap). Nesses casos, a calagem promove o aumento do pH, onde o alumínio forma compostos insolúveis que precipitam e são removidos da solução do solo (Echart; Cavalli-Molina, 2001).

No entanto, o perfil P4 (mata) possui valores de saturação de alumínio que variam de 81% (A) a 89% (Bw1), justificados pela acidez que contribui para a presença de altos níveis de alumínio trocável (Echart; Cavalli-Molina, 2001). De fato, estudos realizados por George, Horst e Neumann (2012) indicam que a correção da acidez do solo com calcário não só aumenta o pH do solo, mas também reduz a toxicidade do alumínio, melhorando a disponibilidade de nutrientes essenciais como o fósforo. Da mesma forma, Fageria (2008) destacou a importância da calagem na melhoria da fertilidade do solo agrícola e na promoção de um ambiente mais favorável para o crescimento das plantas.

Em relação a saturação por bases (V%), os perfis sob o cultivo de cana-de-açúcar, nos primeiros horizontes, apresentaram valores altos, sendo classificados como eutrófico ( $V > 50\%$ ). O horizonte P2-Ap possui a maior saturação por bases (73%), seguido pelo P1-Ap (65%) e pelo P3-Ap (62%). Já em relação ao segundo horizonte desses três perfis (BA), o P2 continua tendo o maior ( $V = 55\%$ ), seguido pelo P1 ( $V = 48\%$ ). Porém, para o P3, há um decaimento muito grande (de 62 para 9%), podendo ser comparado com os valores de V% dos horizontes do P4, que apresentaram os menores valores.

A saturação por bases é um excelente indicativo das condições gerais de fertilidade do solo, sendo utilizada até como complemento na nomenclatura dos solos, onde solos com  $V\% \geq 50$  são classificados como eutróficos (férteis), enquanto aqueles com  $V\% < 50$ , são solos distróficos, pouco férteis (Ronquim, 2020). Desse modo, os resultados de V% acima citados podem estar associados ao uso longo da vinhaça uma vez que os solos da área do P1 estão sob aplicação de vinhaça há muito tempo, mostrando o efeito prolongado e positivo na fertilidade desses solos, tanto em superfície quanto em profundidade.

Em relação aos solos representados pelo P2, mesmo sendo a área com o início da aplicação de vinhaça mais recente, estes solos já apresentam melhorias significativas, especialmente na superfície. Por outro lado, para os solos do P3, embora os horizontes superficiais (Ap) apresentem valores semelhantes aos do P1-Ap, nas profundidades em que há uma maior incidência das raízes da planta, os valores de V passam a ser muito baixos, como no P4 (solos sob mata), que têm os menores valores de V, variando entre 3 e 6%, refletindo numa baixa fertilidade natural desses solos.

Tabela 2 - Característica químicas dos perfis dos solos do estudo

Horizonte	Prof.	pH H <sub>2</sub> O  (1:2,5)	Na	P	K	Ca	Mg	Al	H + Al	CTC <sub>efetiva</sub>	CTC <sub>total</sub>	MO	V	m	Saturação por			
															Ca	Mg	K	Na
			__ mg dm <sup>-3</sup> __			_____ cmole dm <sup>-3</sup> _____					g kg <sup>-1</sup> _____	_____ % _____						
Horizonte 1																		
Perfil 1 - Ap	0 - 20 cm	6,2	10	21	180	4,03	1,85	0,02	3,48	6,40	9,86	25,1	65	0	40,9	18,8	4,7	0,4
Perfil 2 - Ap	0 - 22 cm	6,3	8	40	115	5,57	2,14	0,00	2,92	8,03	10,95	27,5	73	0	50,9	19,5	2,6	0,3
Perfil 3 - Ap	0 - 15 cm	5,6	10	10	35	4,18	2,41	0,01	4,13	6,73	10,85	26,3	62	0	38,5	22,2	0,8	0,4
Perfil 4 - A	0 - 20 cm	4,8	6	2	40	0,15	0,14	1,85	7,05	2,27	7,47	30,6	6	81	2,0	1,9	1,3	0,4
Horizonte 2																		
Perfil 1 - BA	20 - 34 cm	5,8	5	4	135	1,88	1,06	0,03	3,64	3,34	6,95	13,0	48	1	27,1	15,3	5,0	0,3
Perfil 2 - BA	22 - 39 cm	6,0	3	2	55	2,40	1,30	0,03	3,12	3,88	6,97	13,4	55	1	34,4	18,7	2,0	0,1
Perfil 3 - BA	15 - 31 cm	4,4	4	4	28	0,44	0,28	1,84	7,76	2,65	8,57	21,2	9	69	5,1	3,3	0,8	0,2
Perfil 4 - AB	20 - 36 cm	4,8	5	1	33	0,10	0,04	1,66	6,72	1,90	6,96	21,6	3	87	1,4	0,6	1,1	0,3
Horizonte 3																		
Perfil 1 - Bw1	34 - 62 cm	4,7	5	1	55	0,69	0,59	0,70	4,30	2,14	5,74	3,2	25	33	12,0	10,3	2,4	0,3
Perfil 2 - Bw1	39 - 80 cm	5,1	3	2	45	0,83	0,86	0,63	4,13	2,45	5,95	9,8	31	26	13,9	14,5	2,0	0,2
Perfil 3 - Bw1	31 - 70 cm	4,3	3	<1	13	0,39	0,17	1,65	5,96	2,25	6,56	9,4	9	73	5,9	2,6	0,5	0,2
Perfil 4 - BA	36 - 60 cm	4,7	4	<1	13	0,10	0,05	1,60	5,92	1,80	6,12	11,4	3	89	1,6	0,8	0,5	0,3
Horizonte 4																		
Perfil 1 - Bw2	62 - 100 cm	4,8	5	1	38	0,86	0,69	0,47	4,03	2,14	5,70	2,4	29	22	15,1	12,1	1,8	0,4
Perfil 2 - Bw2	80 - 140 cm	4,8	10	1	48	0,61	0,43	0,79	4,48	1,99	5,68	7,1	21	40	10,7	7,6	2,1	0,7
Perfil 3 - Bw2	70 - 115 cm	4,3	3	<1	15	0,27	0,18	1,47	5,54	1,97	6,04	6,7	8	75	4,5	3,0	0,7	0,2
Perfil 4 - Bw1	60 - 125 cm	4,7	3	<1	10	0,11	0,10	1,30	5,07	1,55	5,32	5,9	5	84	2,1	1,9	0,6	0,2

pH em H<sub>2</sub>O – potencial hidrogeniônico em água; Na – Sódio; P – Fósforo; K – Potássio; Ca – Cálcio; Mg – Magnésio; Al – Alumínio; H + Al – acidez potencial; CTC – Capacidade de troca catiônica; MO – Matéria orgânica; V – Saturação por bases; m – Saturação por alumínio.

Os valores da capacidade de troca catiônica efetiva ( $CTC_{efetiva}$ ) e a capacidade de troca catiônica total ( $CTC_{total}$ ) são significativamente maiores em P1, P2 e P3, particularmente nos horizontes superficiais (Ap), indicando uma maior capacidade do solo de reter e disponibilizar nutrientes essenciais para as plantas. Este aumento é devido, em parte, à adição contínua de matéria orgânica e nutrientes pela adição de vinhaça, no caso do P3 pela adição de serrapilheira, e à correção da acidez pelo calcário, que melhora a estrutura do solo e sua capacidade de troca catiônica. Em contrapartida, o P4 exibe valores inferiores de  $CTC_{efetiva}$  e  $CTC_{total}$ , características desse tipo de solo em condições naturais.

A aplicação de vinhaça também teve um impacto significativo na melhoria das concentrações de potássio (K) no solo. No horizonte 1 os perfis P1 e P2 apresentam os maiores valores de K, sendo  $0,460 \text{ cmolc dm}^{-3}$  e  $0,345 \text{ cmolc dm}^{-3}$ , respectivamente. Já no horizonte 2 o P1 continua com uma concentração considerável, sendo de  $0,294 \text{ cmolc dm}^{-3}$ . Em contraste, os demais horizontes apresentam valores mais baixos, destacando a importância da aplicação da vinhaça como uma prática de manejo eficaz para melhorar a disponibilidade de nutrientes no solo em áreas de cultivo de cana-de-açúcar (Soltangheisi *et al.*, 2019).

A análise da área do Perfil 4, que se mantém sob condições naturais, oferece uma visão comparativa valiosa sobre a baixa fertilidade natural de Latossolos, porém, trata-se de uma área preservada com um circuito fechado e harmônico em termos de ciclagem de nutrientes e estabilidade ecológica. O que não ocorre em solos agrícolas, já que o cultivo torna necessário realizar intervenções agrícolas, como aplicação de fertilizantes e a correção do solo, para manutenção da produtividade da cultura.

## **5.2 Parâmetros físico-hídricos dos solos**

### **5.2.1 Caracterização granulométrica dos solos estudados**

Os resultados da análise granulométrica dos solos destacam a complexa interação entre o manejo do solo, suas propriedades químicas e físicas, e como esses fatores influenciam o solo em diferentes contextos agrícolas e naturais. Assim, a granulometria dos quatro perfis de solo, exibidas na Tabela 3, fornecem uma visão detalhada sobre a textura do solo, os graus de floculação (GF) e dispersão (GD), e como esses parâmetros estão relacionados entre os horizontes de cada perfil estudado.

Tabela 3 – Caracterização granulométrica dos solos estudados

Perfil	Prof.	Subdivisão da Fração Areia					Areia Total	Silte	Argila Total	GF	GD	Silte /Argila	Classe Textural
		AMG	AG	AM	AF	AMF							
Horizonte 1													
Perfil 1 - Ap	0 - 20 cm	40	165	197	119	32	553	41	406	10	90	0,101	Argilo-arenosa
Perfil 2 - Ap	0 - 22 cm	37	189	202	99	29	556	37	407	10	90	0,091	Argilo-arenosa
Perfil 3 - Ap	0 - 15 cm	34	168	197	141	59	599	75	325	6	94	0,231	Franco-argiloarenosa
Perfil 4 - A	0 - 20 cm	60	184	180	114	39	577	56	367	33	67	0,154	Argilo-arenosa
Horizonte 2													
Perfil 1 - BA	20 - 34 cm	38	146	171	109	17	482	11	506	12	88	0,023	Argilo-arenosa
Perfil 2 - BA	22 - 39 cm	26	139	160	89	24	437	34	529	15	85	0,064	Argila
Perfil 3 - BA	15 - 31 cm	29	150	181	129	52	540	53	406	20	80	0,131	Argilo-arenosa
Perfil 4 - AB	20 - 36 cm	47	162	191	114	41	554	58	388	89	11	0,149	Argilo-arenosa
Horizonte 3													
Perfil 1 - Bw1	34 - 62 cm	34	100	136	93	33	396	14	590	100	0	0,024	Argila
Perfil 2 - Bw1	39 - 80 cm	36	138	139	68	20	401	30	569	93	7	0,053	Argila
Perfil 3 - Bw1	31 - 70 cm	28	113	143	102	46	432	40	527	92	8	0,077	Argila
Perfil 4 - BA	36 - 60 cm	36	133	144	98	41	452	58	490	100	0	0,118	Argilo-arenosa
Horizonte 4													
Perfil 1 - Bw2	62 - 100 cm	20	86	103	68	20	297	9	695	100	0	0,012	Muito argilosa
Perfil 2 - Bw2	80 - 140 cm	30	118	121	68	22	359	31	609	100	0	0,051	Muito argilosa
Perfil 3 - Bw2	70 - 115 cm	27	108	132	98	39	405	28	567	100	0	0,050	Argila
Perfil 4 - Bw1	60 - 125 cm	53	134	132	85	42	445	26	529	100	0	0,049	Argila

AMG – Areia Muito Grossa; AG – Areia Grossa; AM – Areia Média; AF – Areia Fina; AMF – Areia Muito Fina; GF – Grau de Flocluação; GD - Grau de Dispersão; Silte/Argila – Relação silte:argila; adm - adimensional

A classificação textural possui variações pequenas entre os perfis e horizontes do solo. O Perfil 1 apresenta uma transição de uma textura argiloarenosa nos horizontes superficiais (Ap e BA) para uma textura argilosa no horizonte Bw1 e muito argilosa no horizonte Bw2.

Similar ao perfil anterior, o Perfil 2 apresenta uma textura argiloarenosa nos horizontes superficiais, passando para argila nos horizontes Bw, com o horizonte Bw2 sendo muito argiloso (609 g kg<sup>-1</sup> de argila). Já o Perfil 3 exibe uma textura franco-argiloarenosa no horizonte Ap e argiloarenosa no horizonte BA, com os horizontes Bw sendo predominantemente argilosos (527-567 g kg<sup>-1</sup> de argila). Por fim, o Perfil 4 mostra uma textura argiloarenosa nos horizontes superficiais e subsuperficiais (A, AB e BA), com uma transição para textura argilosa no horizonte Bw1.

O GD pode ser um indicador de estabilidade estrutural do solo, representando a proporção de partículas de argila que estão dispersas em vez de floculadas. Comparando o GD com os valores de pH, presentes na Tabela 2, vemos que os horizontes superficiais (Ap e BA) dos perfis 1, 2 e 3 apresentam altos graus de dispersão (80 a 90%) estão associados a valores de pH mais elevados (6,2 a 5,6).

Esta correlação sugere que um pH mais elevado, resultante de práticas de manejo agrícola como calagem, leva a uma maior dispersão das partículas de argila. Nos horizontes Bw destes mesmos perfis, com pHs mais baixos (variando de 4,3 a 5,1), o GD é reduzido a zero, indicando uma melhor floculação das partículas de argila. No perfil 4, sem manejo agrícola e pH em condições naturais (variando de 4,8 a 4,3), o GD é geralmente menor, com exceção do horizonte superficial (A) que apresenta um GD de 67%.

A correlação entre um pH mais alto e maior dispersão das partículas de argila nos horizontes superficiais sugere que práticas como a calagem podem alterar significativamente a estabilidade estrutural do solo ao influenciar a dispersão de argila. O estudo de Spera *et al.* (2008) também indicou que o aumento do pH do solo por meio da calagem pode diminuir a atração eletrostática entre as partículas de argila, resultando em maior dispersão.

Por fim, a análise granulométrica detalhada dos quatro perfis dos solos revela uma importante relação entre a textura do solo, os graus de dispersão (GD) e floculação (GF), e a influência do pH do solo nesses parâmetros, como evidenciado pela comparação com dados de pH na Tabela 2. A transição nas características texturais dos perfis, especialmente de texturas

argilo-arenosas para muito argilosas com o aumento da profundidade (Tabela 3), também reflete na dinâmica da água e dos nutrientes do solo (Centeno *et al.*, 2017).

### 5.2.2 Densidade de partículas

A partir dos resultados indicados nas Tabelas 4 e 5 é possível observar que os valores da densidade de partículas dos solos (Dp) não apresentam variação marcante nos horizontes dos diferentes perfis, sendo o atributo com o menor coeficiente de variação (CV) entre todos (Tabela 4), estando em conformidade com os padrões para solos brasileiros, inclusive para Latossolos Amarelos Distrocoeso. A semelhança nos valores de Dp indica que a composição mineralógica dos solos é bastante homogênea entre os perfis, independentemente do manejo aplicado (Dexter, 2004).

Tabela 4 - Resumo da análise de variância dos parâmetros físico-hídricos dos perfis estudados

		Dp	Ds	Pt	Macro	Meso	Micro <sub>E+B</sub>	Micro <sub>T</sub>	Ksat
Horizonte 1	CV (%)	0,8	5,29	5,91	36,57	25,77	12,05	3,23	56,36
	F	18,846	18,82	8,529	9,51	8,495	1,283	47,646	38,916
	Pr>F	0,0005	0,0005	0,0071	0,0051	0,0072	0,3444	<0,0001	<0,0001
Horizonte 2	CV (%)	1,95	3,92	5,69	31,87	23,91	7,35	5,6	65,9
	F	1,788	4,451	4,569	4,558	3,046	8,682	13,183	10,716
	Pr>F	0,2271	0,0405	0,0381	0,0383	0,0923	0,0067	0,0018	0,0002
Horizonte 3	CV (%)	0,83	3,5	2,17	11,52	15,56	13,2	5,15	86,05
	F	7,958	7,923	20,534	26,422	0,752	0,227	8,08	8,993
	Pr>F	0,0087	0,0088	0,0004	0,0002	0,5514	0,8752	0,0083	0,0006
Horizonte 4	CV (%)	0,77	6,24	3,17	14,16	14,34	5,45	4,7	80,68
	F	4,672	10,728	14,302	22,092	11,902	34,598	43,545	12,964
	Pr>F	0,0361	0,0035	0,0014	0,0003	0,0025	0,0001	<0,0001	0,0001

Tabela 5 – Análises físico-hídricas dos solos estudados.

Horizonte	Profundidade	Dp g cm <sup>-3</sup>	Ds	Pt cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>	Macro	Meso	MicroE+B %	MicroT	Ksat mm h <sup>-1</sup>
Horizonte 1									
Perfil 1 - Ap	0 - 20 cm	2,50 a	1,46 a	0,43 b	2,71 b	6,51 b	10,12 a	23,81 a	82,55 b
Perfil 2 - Ap	0 - 22 cm	2,46 ab	1,61 a	0,44 b	5,21 b	3,63 ab	9,86 a	23,15 a	15,65 b
Perfil 3 - Ap	0 - 15 cm	2,43 b	1,54 a	0,41 b	3,33 b	5,27 b	11,23 a	20,88 b	32,48 b
Perfil 4 - A	0 - 20 cm	2,38 c	1,17 b	0,51 a	10,51 a	10,15 a	11,60 a	18,82 c	459,86 a
Horizonte 2									
Perfil 1 - BA	20 - 34 cm	2,54 a	1,53 ab	0,42 b	4,25 b	4,63 a	8,37 b	24,45 bc	105,98 ab
Perfil 2 - BA	22 - 39 cm	2,50 a	1,58 a	0,44 ab	4,77 ab	3,92 a	8,76 b	28,11 a	3,48 c
Perfil 3 - BA	15 - 31 cm	2,49 a	1,52 ab	0,43 ab	4,77 ab	6,55 a	10,88 a	21,05 c	40,07 bc
Perfil 4 - AB	20 - 36 cm	2,45 a	1,41 b	0,49 a	9,05 a	6,34 a	8,71 b	24,86 ab	147,21 a
Horizonte 3									
Perfil 1 - Bw1	34 - 62 cm	2,51 a	1,48 ab	0,47 b	4,87 c	4,90 a	8,12 a	29,34 a	50,26 b
Perfil 2 - Bw1	39 - 80 cm	2,45 b	1,38 b	0,48 b	7,14 bc	5,42 a	8,56 a	26,51 ab	6,33 b
Perfil 3 - Bw1	31 - 70 cm	2,52 a	1,55 a	0,44 c	6,12 b	5,12 a	8,85 a	24,03 b	61,55 b
Perfil 4 - BA	36 - 60 cm	2,47 ab	1,39 b	0,51 a	10,58 a	5,86 a	8,68 a	25,58 b	208,22 a
Horizonte 4									
Perfil 1 - Bw2	62 - 100 cm	2,49 a	1,54 a	0,47 b	4,05 c	3,91 c	7,13 c	31,97 a	47,59 b
Perfil 2 - Bw2	80 - 140 cm	2,44 a	1,22 b	0,48 b	8,88 ab	6,06 ab	9,78 b	22,96 b	11,52 b
Perfil 3 - Bw2	70 - 115 cm	2,44 a	1,46 a	0,45 b	7,60 b	5,05 bc	9,37 b	23,35 b	47,48 b
Perfil 4 - Bw1	60 - 125 cm	2,44 a	1,23 b	0,53 a	11,41 a	7,74 a	11,35 a	22,60 b	244,72 a

As médias acompanhadas das mesmas letras referentes aos mesmos horizontes não diferem entre si pelo Teste de Tukey com nível de significância de 5%. Dp – densidade de partícula; Ds – densidade do solo; Pt – porosidade total; Macro – macroporosidade; Meso – mesoporosidade; Micro<sub>E+B</sub> – microporosidade estrutural e biológica; Micro<sub>T</sub> – microporos texturais; Ksat – condutividade hidráulica saturada determinada em laboratório.

### 5.2.3 Densidade do solo

Os valores de densidade do solo (Ds) no horizonte 1 mostram variações consideráveis entre os diferentes perfis. Em particular, os três primeiros perfis (P1, P2 e P3), que correspondem às áreas sob cultivo de cana-de-açúcar, exibem Ds significativamente mais altas em comparação com o Perfil 4. Estes valores mais altos dos perfis com cultivo refletem o efeito causado principalmente pela compactação dos solos, em consequência das práticas agrícolas realizadas nestas áreas, diferentemente do Perfil 4, onde o solo apresenta uma estrutura mais preservada. Neste sentido, Lopes *et al.* (2007) comentam que práticas agrícolas intensivas frequentemente levam à compactação do solo, resultando em altos valores de Ds. Estes autores observaram que a Ds aumentou significativamente nos sistemas de manejo intensivo em Latossolos Vermelhos.

Nos horizontes mais profundos, as diferenças entre os perfis tornam-se menos pronunciadas. Isso sugere que o efeito da compactação do solo é mais evidente nas camadas superficiais, onde as atividades agrícolas têm maior influência. Algumas pesquisas realizadas em sistemas de plantio direto e convencional demonstrou que, mesmo após operações como aração e escarificação, a compactação ainda persiste na camada de 5 a 20 cm devido ao peso das máquinas utilizadas na colheita (Drescher *et al.*, 2011).

### 5.2.4 Porosidade total

No horizonte 1, o P4 apresentou uma maior porosidade total (Pt) do que os outros perfis ( $0,51 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ). Por outro lado, os solos sob manejo intensivo de cana-de-açúcar (P1, P2 e P3) mostram valores similares e menor Pt. Para o horizonte 2, há uma diferença significativa entre os perfis P1 e P4, sendo o P4 com maior Pt, porém, os valores de Pt para os perfis P2 e P3 não diferem entre ambos. Já os horizontes 3 e 4 apresentaram o P4 também com a maior Pt.

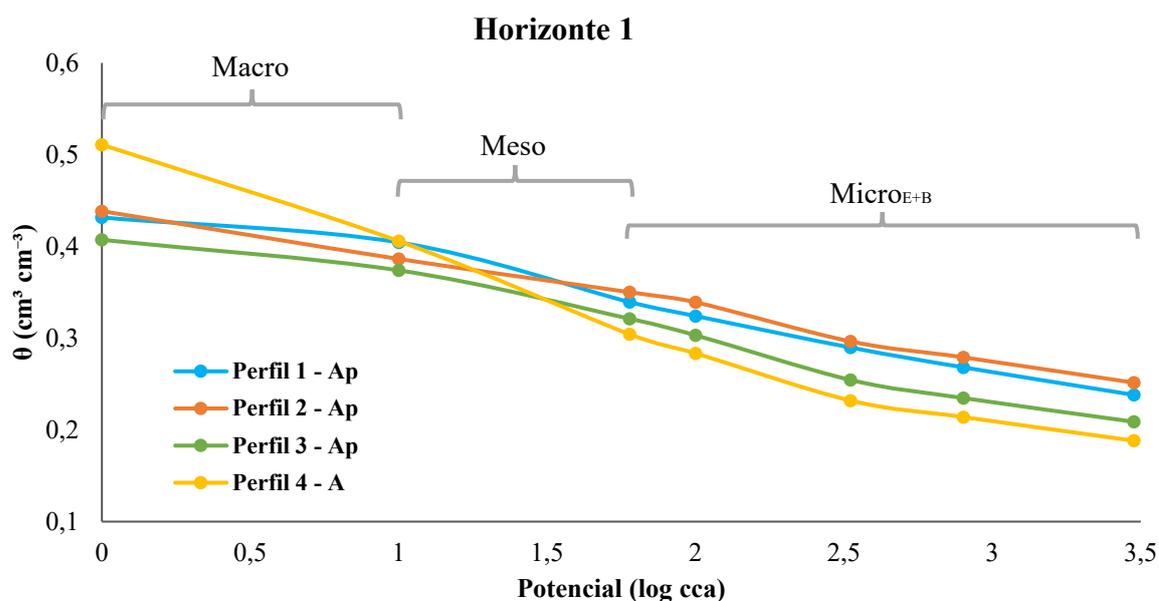
Desta forma, é possível observar que o Perfil 4 apresenta uma melhor estrutura, diferente dos outros perfis. Conforme ressaltado por Spera *et al.* (2009), solos em condições naturais, como os de mata nativa, tendem a apresentar maior P devido à ausência de compactação mecânica e à alta atividade biológica. Em contrapartida, Cardoso *et al.* (2015) observaram que a intensificação do cultivo, especialmente em monoculturas como a cana-de-açúcar, reduz significativamente a porosidade do solo devido à compactação e à degradação da estrutura do solo. Estudos de Amami *et al.* (2021) confirmam que a compactação decorrente de práticas agrícolas intensivas é um dos principais fatores para a diminuição da P, afetando negativamente a capacidade de infiltração e a retenção de água nos solos.

### 5.2.5 Curva característica de retenção de água no solo

Além da porosidade total dos solos também se faz necessário avaliar a distribuição das classes de poros em cada horizonte dos perfis do estudo, obtida a partir da curva característica de retenção de água no solo (CCRAS).

Nesse sentido, a CCRAS do Horizonte 1 de cada perfil (Figura 7) mostra que o P4 apresenta a maior porosidade total (maior umidade de saturação), e por também possuir maior macroporosidade e mesoporosidade (10,51% e 10,15%, respectivamente), sua curva apresenta uma maior inclinação do que a dos outros perfis. Essa é uma característica de solos com melhor distribuição de classe de poros, boa capacidade de aeração e de retenção de água disponível para as plantas.

Figura 7 - Curva característica de retenção de água no solo correspondente ao Horizonte 1 dos perfis, considerando as tensões de 0, 10, 60, 100, 333, 800 e 3000 cca



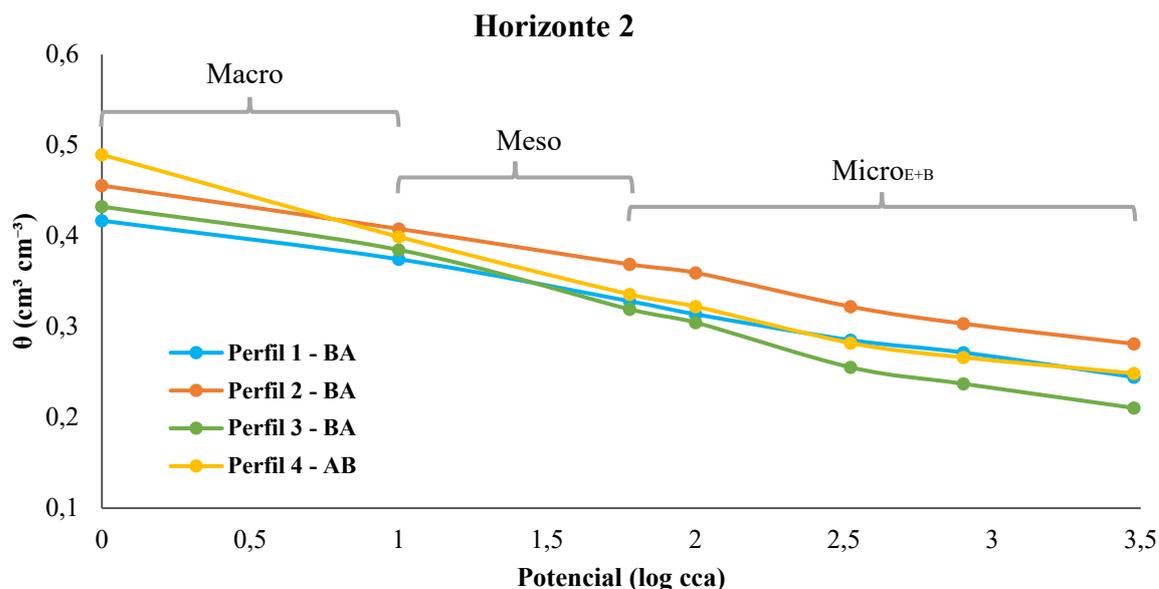
Neste horizonte, a macroporosidade do P4 é a maior entre todos os perfis estudados, o que é típico de solos sob cobertura vegetal natural, onde a atividade biológica e a matéria orgânica promovem a formação de macroporos. A mesoporosidade dos perfis P1, P2 e P3 não diferem entre si, bem como os dos perfis P1 e P4. Para a microporosidade estrutural e biológica, nenhum dos perfis é possível diferenciar. Porém, em relação aos microporos texturais, o P4 apresenta o menor valor, em seguida do P3, e dos perfis P1 e P2, que não diferem entre si.

O fato de o horizonte superficial dos perfis com cultivo apresentarem menor presença de macroporos e uma maior presença de microporos texturais está bastante relacionado ao tipo

de manejo aplicado nessas áreas, o qual promovem a redistribuição das classes de poros, convertendo-se os macroporos em poros de menor tamanho.

Na Figura 8 é possível observar a CCRAS referente ao horizonte 2, no qual, diferente da curva do horizonte anterior, as curvas dos diferentes perfis apresentam maior similaridade.

Figura 8 - Curva característica de retenção de água no solo correspondente ao Horizonte 2 dos perfis, considerando as tensões de 0, 10, 60, 100, 333, 800 e 3000 cca

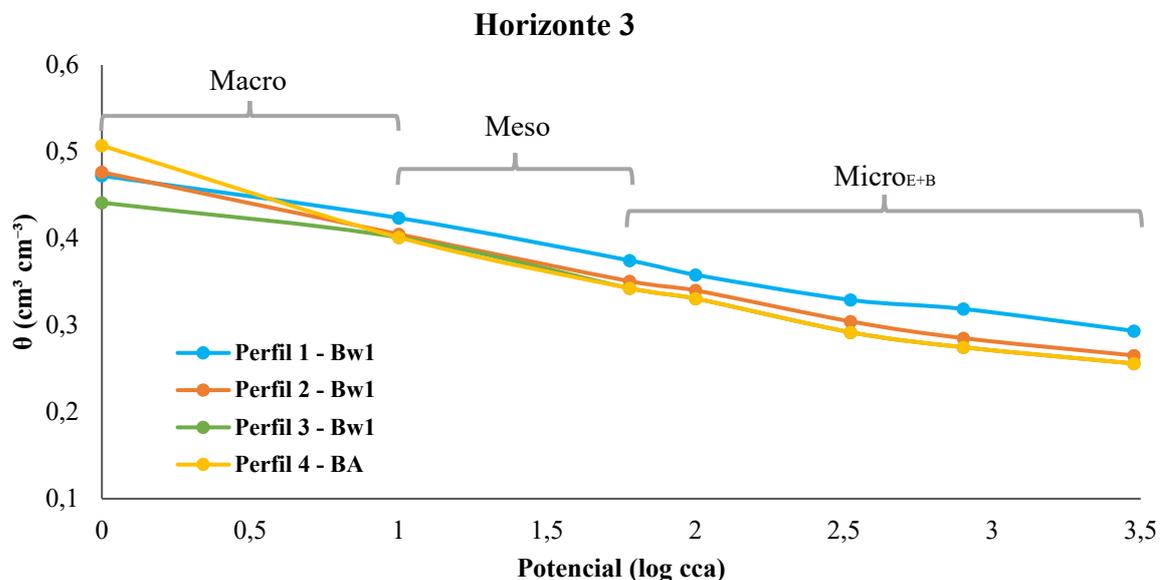


Mesmo que o P4 contenha uma maior  $P_t$  neste horizonte, seu valor só é diferenciável do P1. Já a mesoporosidade de todos os perfis é igual, não diferenciando entre si neste horizonte. A macroporosidade dos perfis nesse horizonte segue a mesma tendência do  $P_t$ , já que os únicos perfis que diferem entre si são o P1 e P4.

Em relação aos microporos estruturais e biológicos ( $Micro_{E+B}$ ), estes são poros onde ocorre a maior parte dos processos de retenção e disponibilidade de água às plantas. O máximo e mínimo de água retida nesses poros ocorre nas tensões de 60 e 3000 cca (Figura 6, chave em vermelho). Quando o solo diminui o conteúdo de água e atinge a umidade equilibrada próximo ao potencial de 800 cca, assume-se que este é o limite crítico para a reposição de água ao solo, suprindo assim a necessidade hídrica da maioria das culturas (Albuquerque, 2017). No horizonte 2 o P3 apresentou uma maior  $Micro_{E+B}$ , diferenciando dos outros perfis.

A CCRAS do horizonte 3 (Figura 9) dos perfis também são similares, onde a partir do potencial de 10 cca, as curvas dos perfis P2, P3 e P4 acabam se sobrepondo.

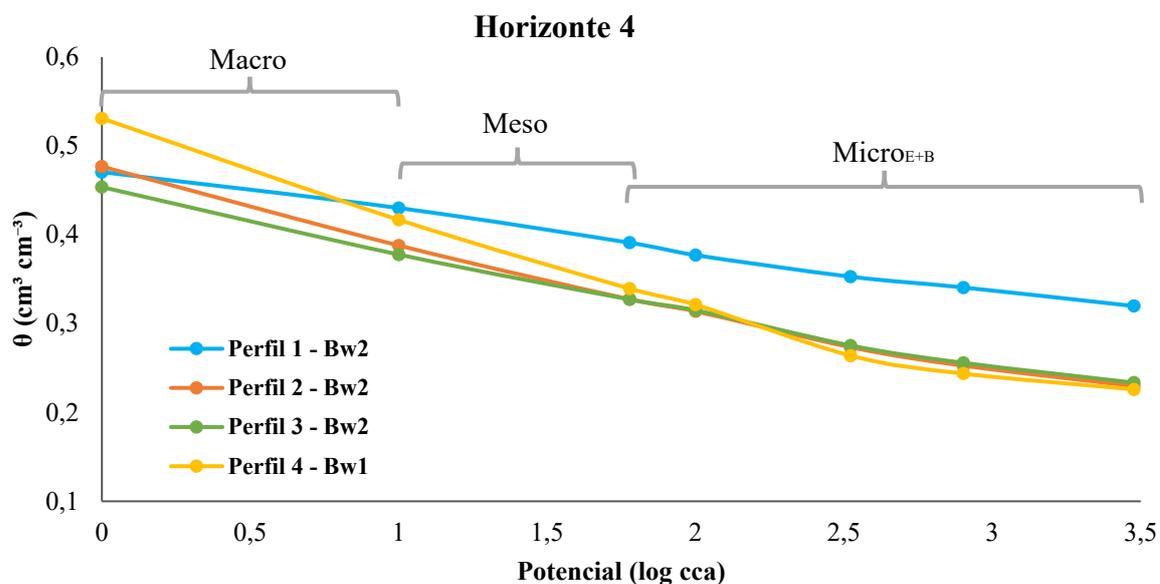
Figura 9 - Curva característica de retenção de água no solo correspondente ao Horizonte 3 dos perfis, considerando as tensões de 0, 10, 60, 100, 333, 800 e 3000 cca



A Macro do perfil P4 no horizonte 3 é a maior entre todos os perfis analisados, já a Meso e a MicroE+B não possuem diferença entre os perfis. Para a MicroT é possível distinguir os valores de P1 dos perfis P3 e P4, estes dois últimos não se pode distinguir entre si.

Já a CCRAS do horizonte 4, apresentada na Figura 10, possui diferenças bem visíveis entre os perfis P2, P3 e P4 até o potencial de 100 cca. A partir daí, suas curvas também ficam sobrepostas. A curva do P1 possui menor inclinação por apresentar menores Macro e Meso.

Figura 10 - Curva característica de retenção de água no solo correspondente ao Horizonte 4 dos perfis, considerando as tensões de 0, 10, 60, 100, 333, 800 e 3000 cca



Em uma análise mais geral dos perfis de solo estudados revela-se que as práticas de manejo possuem um impacto significativo nas classes de poros. O P1, com um longo histórico de aplicação de vinhaça e manejo intensivo, apresenta valores baixos de porosidade total, bem como baixa macroporosidade e mesoporosidade, as quais são responsáveis pela capacidade de infiltração de água e aeração do solo. A baixa macroporosidade identificada neste perfil está diretamente relacionada ao tipo de manejo aplicado, que promove, provavelmente, a conversão de macroporos em microporos. Essa redistribuição de classes de poros, resultante de práticas de manejo intensivo, é consistente com os achados de Carvalho *et al.* (2015), que identificaram alteração negativa na estrutura do solo, afetando a capacidade de infiltração e aeração. Bronik e Lal (2005) discutindo a influência das práticas agrícolas na estrutura do solo, também destacaram a compactação e a redução da macroporosidade como efeitos adversos promovidos pelos manejos intensivos.

Já as curvas do P2 sugerem que o efeito da vinhaça ainda está se estabelecendo, e sua introdução recente não foi capaz de modificar significativamente a estrutura do solo. Neste perfil, a menor mesoporosidade nos horizontes superficiais, em comparação com o P1, sugere que o manejo recente com vinhaça ainda não impactou significativamente a estrutura do solo. Oliveira *et al.* (2019) argumentam que mudanças estruturais em resposta às práticas de manejo são processos complexos que envolvem a interação entre fatores físicos, químicos e biológicos do solo. Estudos de Kay e Angers (1999) indicam que alterações estruturais no solo devido a práticas de manejo podem requerer vários anos para se manifestarem plenamente, especialmente em relação à porosidade do solo e à formação de seus agregados.

O P3 possui valores baixos de macroporosidade nos horizontes mais superficiais, mas ainda apresenta uma boa proporção de mesoporosidade, o que contribui para uma melhor infiltração de água no solo.

O P4 apresenta boa distribuição das classes de poros, onde a sua CCRAS (Figura 9) indica uma disponibilidade contínua de água para as plantas, proporcionando uma excelente estrutura do solo, essencial para manutenção do ecossistema florestal. Além disso, Pagliai, Vignozzi e Pellegrini (2004) destacam que solos sob vegetação natural, devido à alta atividade biológica e ao alto teor de matéria orgânica, apresentam melhor estrutura física e funcionalidade do que aqueles submetidos às práticas agrícolas intensivas, e tendem a ter estruturas de solo mais estáveis e porosas, promovendo a infiltração e retenção de água, essenciais para a sustentabilidade dos ecossistemas.

### 5.2.6 Condutividade hidráulica saturada em laboratório

Os resultados de condutividade hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ), determinada em laboratório (Tabela 5), permitem a comparação entre os perfis e horizontes. No horizonte 1 não há diferença estatística entre os perfis P1, P2 e P3, sendo a condutividade hidráulica muito maior no P4. Esse mesmo efeito acontece nos horizontes 3 e 4. Porém, no horizonte 2, apesar das médias absolutas serem bem distintas, a diferença entre alguns perfis não é perceptível estatisticamente. Sendo assim, o P4 destaca-se por apresentar os valores mais altos de  $K_{sat}$  entre todos os perfis analisados.

Dionizio e Costa (2019) destacam que diferentes usos e coberturas do solo afetam as propriedades físicas e hidráulicas do solo na fronteira agrícola do Cerrado, na Bahia, com áreas de vegetação natural apresentando taxas de infiltração superiores às de áreas agrícolas, evidenciando a necessidade de estratégias de conservação do solo e da água. De maneira similar, Ferreira *et al.* (2022) revelaram que a condutividade hidráulica de um Latossolo Vermelho-Amarelo é significativamente influenciada pelos sistemas de manejo, com práticas como plantio direto e uso de plantas de cobertura promovendo melhorias. Em contraste, o cultivo convencional tendeu a causar compactação e redução da infiltração, ressaltando a importância da manutenção da matéria orgânica para a qualidade do solo.

No presente estudo, a  $K_{sat}$  apresentou os maiores coeficientes de variação (CV) entre os parâmetros físico-hídricos, indicados na Tabela 4, variando entre 56,36 (Horizonte 1) e 86,05% (Horizonte 3). Este alto CV indica que os valores de  $K_{sat}$  são altamente variáveis, refletindo as diferenças nas características dos solos entre amostras do mesmo horizonte e perfil.

Segundo Zhang *et al.* (2019), a alta variabilidade dos dados de  $K_{sat}$  torna difícil a determinação deste parâmetro, exigindo um grande número de amostras para obter uma representação confiável. Em laboratório, embora as condições sejam controladas, a preparação das amostras pode introduzir variabilidade. Por exemplo, a compactação do solo e a remoção de macroporos durante o processo de amostragem podem afetar os resultados. Além disso, diferentes métodos de medição, como permeâmetros, podem gerar resultados variados devido a diferenças nas técnicas e nas condições dos ensaios.

Os resultados indicam uma variação significativa nos valores de  $K_{sat}$  entre os diferentes perfis e horizontes do solo. O P4, em particular, destacou-se por apresentar os valores mais altos de  $K_{sat}$ , sugerindo solos com estrutura altamente favorável à transmissão de água. Em contraste, os outros perfis apresentaram valores mais baixos, indicando uma menor permeabilidade, possivelmente devido a maior compactação do solo. A variação nos valores de

Ksat pode ser influenciada por diversos fatores, incluindo a composição do solo, a densidade de partículas e do solo, a porosidade total, e a presença de macroporos e microporos.

### 5.2.7 Correlação de Pearson

A Tabela 6 apresenta a correlação dos parâmetros físico-hídricos dos perfis de solo, com significância estatística indicada por diferentes níveis de confiança. Essa análise é fundamental para compreender as interações entre as propriedades físicas e hídricas do solo.

A densidade do solo (Ds) apresentou correlações negativas significativas com a porosidade total (P), macroporosidade (Macro), mesoporosidade (Meso) e condutividade hidráulica saturada (Ksat). Esses resultados indicam que, como já esperado, solos mais densos tendem a ter menos espaço poroso disponível, o que pode prejudicar a drenagem e circulação de água e ar. Esses resultados são consistentes com estudos anteriores, como os de Tormena, Silva e Libardi (1998), que encontraram uma relação inversa entre Ds e P.

Tabela 6 - Correlação de Pearson para os parâmetros físico-hídricos dos perfis estudados

Variáveis	Ds	P	Macro	Meso	Micro <sub>E+B</sub>	Micro <sub>T</sub>	Ksat
Ds	1						
P	<b>-0,780***</b>	1					
Macro	<b>-0,810***</b>	<b>0,879***</b>	1				
Meso	<b>-0,815***</b>	<b>0,561*</b>	<b>0,601*</b>	1			
Micro <sub>E+B</sub>	-0,422	0,064	0,238	<b>0,677**</b>	1		
Micro <sub>T</sub>	0,436	0,018	-0,305	<b>-0,695**</b>	<b>-0,882***</b>	1	
Ksat	<b>-0,670**</b>	<b>0,643**</b>	<b>0,637**</b>	<b>0,836***</b>	0,432	-0,460	1

sendo: \* - correlação significativa a 1%; \*\* - correlação significativa a 5%; \*\*\* - correlação significativa a 10%.

A porosidade total (Pt) do solo mostrou correlações positivas significativas com a Macro, Meso e Ksat, sugerindo que solos com maior porosidade tendem a ter poros maiores, facilitando a circulação de água e resultando numa maior Ksat. Bronick e Lal (2005) revisaram a importância da estrutura do solo e seu manejo, destacando que a Pt é crucial para o movimento de água e ar no solo, bem como para o crescimento radicular e a atividade microbiana. Pierret *et al.* (2002) também enfatizaram a relevância da P do solo para a atividade radicular, mostrando que solos com maior porosidade facilitam para um melhor desenvolvimento radicular e uma maior eficiência na absorção de água e nutrientes.

Outras correlações positivas puderam ser observadas entre a Macro com a Pt, Meso e Ksat, reforçando a importância de poros com maiores diâmetros na facilitação do movimento

da água no solo. Beven e Germann (1982) também observaram que a presença de macroporos é crucial para o fluxo preferencial de água, afetando positivamente a condutividade hidráulica.

A Meso apresentou correlações positivas significativas com Pt, Macro, microporosidade estrutural e biológica ( $\text{Micro}_{E+B}$ ) e Ksat, o qual comprova que a presença de mesoporos contribui para a retenção de água e melhora na infiltração. No entanto, a Meso teve uma correlação negativa significativa com a microporosidade textural ( $\text{Micro}_T$ ), indicando uma possível “competição” por espaço entre mesoporos e microporos texturais. Os mesoporos são importantes para a retenção de água que está disponível para as plantas. Eles ajudam a manter um equilíbrio hídrico adequado, permitindo a infiltração e o armazenamento de água que pode ser prontamente absorvida pelas raízes das plantas (Nimmo, 2013). Sua presença é essencial para a manutenção da umidade do solo durante períodos secos e para a facilitação da troca gasosa, o que melhora a aeração do solo e promove um crescimento radicular saudável (Hodge *et al.*, 2009). Os microporos texturais, por outro lado, retêm água de forma mais intensa devido às forças capilares, tornando essa água menos acessível para as plantas. Estes poros são críticos para a retenção de água a longo prazo, mas a água que eles armazenam não é prontamente disponível para as plantas (Rabot *et al.*, 2018). Em solos com alta proporção de microporos texturais, a capacidade do solo de fornecer água imediata para as plantas pode ser limitada, afetando negativamente o crescimento das plantas durante períodos de seca.

A  $\text{Micro}_{E+B}$  mostrou correlações positivas significativas com Meso. Isso sugere que solos com alta  $\text{Micro}_{E+B}$  apresentam maior capacidade de retenção de água disponível para as plantas. Por outro lado, a  $\text{Micro}_T$  apresentou correlações negativas significativas com Meso e  $\text{Micro}_{E+B}$ , indicando que um aumento da  $\text{Micro}_T$  pode ocorrer às custas da microporosidade, afetando a capacidade de retenção de água disponível no solo.

As correlações observadas revelam interdependências importantes entre as variáveis físico-hídricas dos perfis de solo. A Ds está fortemente associada à redução da Pt e da Ksat, enquanto a porosidade, especialmente na forma de Macro e Meso, está ligada ao aumento da capacidade de movimentação e retenção de água no solo. Jarvis (2020) destacou a importância dos poros de maior tamanho, principalmente macroporos, no aumento da Ksat, já que eles estão predominantemente sobre influência da gravidade e o efeito da capilaridade nesses poros acaba sendo insignificante. Já Luo, Lin e Li (2010) quantificaram redes tridimensionais de macroporos do solo, mostrando que diferentes tipos de solo e usos da terra influenciam a distribuição e a eficiência dos macroporos na condução de água.

### 5.3 Ensaio de Beerkan

A análise dos dados hidrodinâmicos do solo presentes na Tabela 7 revela variações significativas na  $K_{sat}$ , na curva de retenção e na sorvidade do solo, em função do histórico de manejo do solo. Os valores de  $K_{sat}$  nos diferentes perfis e horizontes mostram uma clara distinção entre solos com cultivo de cana de açúcar e solos de floresta nativa.

Tabela 7 - Propriedades hidráulicas dos perfis estudados

Horizonte	Profundidade	Condutividade hidráulica		Curva de retenção		Sorvidade S (mm s <sup>-0.5</sup> )	
		$K_{sat}$ (mm s <sup>-1</sup> )	$\eta$	$h_g$ (mm)	n		m
Horizonte 1							
Perfil 1 - Ap	0 - 20 cm	0,0017	6,396	-293,5	2,589	0,227	0,267
Perfil 2 - Ap	0 - 22 cm	0,0013	6,303	-211,0	2,606	0,232	0,153
Perfil 3 - Ap	0 - 15 cm	0,0100	7,704	-37,8	2,425	0,175	0,599
Perfil 4 - A	0 - 20 cm	0,1068	7,281	-80,1	2,467	0,189	2,181
Horizonte 2							
Perfil 1 - BA	20 - 34 cm	0,0030	5,697	-338,2	2,742	0,270	0,387
Perfil 2 - BA	22 - 39 cm	0,0028	6,660	-108,6	2,547	0,215	0,341
Perfil 3 - BA	15 - 31 cm	0,0164	7,056	-49,4	2,493	0,198	0,640
Perfil 4 - AB	20 - 36 cm	0,0150	7,184	-184,3	2,478	0,193	1,092
Horizonte 3							
Perfil 1 - Bw1	34 - 62 cm	0,0008	6,211	-582,2	2,623	0,237	0,237
Perfil 2 - Bw1	39 - 80 cm	0,0056	6,394	-100,0	2,589	0,228	0,401
Perfil 3 - Bw1	31 - 70 cm	0,0062	6,957	-108,3	2,505	0,202	0,438
Perfil 4 - BA	36 - 60 cm	0,0073	7,605	-114,6	2,434	0,178	0,538
Horizonte 4							
Perfil 1 - Bw2	62 - 100 cm	0,0018	6,269	-152,3	2,612	0,234	0,212
Perfil 2 - Bw2	80 - 140 cm	0,0039	6,880	-193,3	2,516	0,205	0,558
Perfil 3 - Bw2	70 - 115 cm	0,0014	6,873	-497,8	2,516	0,205	0,472
Perfil 4 - Bw1	60 - 125 cm	0,0096	7,069	-327,8	2,491	0,197	1,188

Os perfis P1 e P2 apresentam valores muito similares de condutividade hidráulica saturada ( $K_s$ ) no horizonte 1 (0,0017 e 0,0013 mm s<sup>-1</sup>, respectivamente), com o P3 apresentando uma melhora quando comparado aos dois anteriores (0,0100 mm s<sup>-1</sup>) e o P4 com um valor significativamente maior entre todos (0,1068 mm s<sup>-1</sup>). Essa  $K_{sat}$  mais baixa no horizonte superficial dos perfis P1 e P2 possui influência do tipo de manejo no solo, já que utilizam colheita mecanizada e o uso desse tipo de maquinário agrícola ao longo do tempo causa a compactação do solo, resultando em baixa permeabilidade. Já para o P3, como o tipo de manejo adotado é por colheita manual e a preparação do solo é por cultivo mínimo, sua estrutura acaba sendo mais preservada por seu menor impacto físico, refletindo numa  $K_{sat}$  superior. A

sorvidade, que se refere à capacidade do solo em reter e absorver água, também é mais baixa nesse horizonte nos perfis em que possuem cultivo de cana-de-açúcar, porém, no P3 esse valor já é superior do que os outros dois perfis anteriores, sendo na mata significativamente maior, mostrando a excelente condição desse solo no horizonte superficial.

No horizonte 2, os perfis P1 e P2 continuam tendo valores similares para  $K_{sat}$  (0,030 e 0,028  $\text{mm s}^{-1}$ ), além dos valores serem mais baixos, porém, o P4 possui valor levemente menor que o do P3. Vemos assim uma mudança do comportamento do horizonte subsuperficial para o horizonte superficial.

Já no horizonte 3, o P1 possui um valor muito inferior de  $K_{sat}$ , comportamento este causado pelo seu carácter coeso. Como os perfis P2, P3 e P4 apresentam uma similaridade nos valores e na sorvidade, vemos que o tipo de manejo não afeta as camadas mais profundas do solo no que diz respeito as propriedades hidrodinâmicas.

Por fim, no horizonte 4 há uma similaridade nos valores dos perfis P1 e P3 (0,0018 e 0,0014  $\text{mm s}^{-1}$ , respectivamente), sendo o perfil P4, de mata nativa, com a maior  $K_{sat}$  e sorvidade.

A análise dos resultados confirma que os diferentes métodos de manejo do solo influenciam significativamente os valores de condutividade hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ) nos horizontes superficiais. Reichert, Susuki e Reinert (2007) citam que o tráfego de máquinas pesadas em áreas de colheita mecanizada aumenta a compactação do solo, reduzindo a permeabilidade e, conseqüentemente, a  $K_{sat}$ . Isso é evidente nos perfis P1 e P2, onde os valores de  $K_{sat}$  são os mais baixos devido à compactação causada pelo uso intensivo de equipamentos agrícolas.

Por outro lado, o P3, que adota a colheita manual e práticas de cultivo mínimo, apresentou valores de  $K_{sat}$  maiores. Esta observação é corroborada por Hamza e Anderson (2005), que apontam que técnicas menos invasivas e com menor impacto físico mantêm a estrutura do solo mais preservada, permitindo uma maior condutividade hidráulica. Estudos de Cavalcanti *et al.* (2019) também mostram que a colheita manual pode reduzir a compactação, aumentando a macroporosidade e, assim, melhorando a permeabilidade do solo. Esse resultado é consistente com o valor observado para o Perfil 3, onde a prática de manejo menos agressiva contribuiu para um melhor desempenho em termos de  $K_{sat}$ .

Finalmente, o Perfil 4, situado em área de mata nativa, apresentou os maiores valores de  $K_{sat}$ , destacando a influência da vegetação natural na preservação da estrutura do solo já que

solos sob cobertura vegetal nativa tendem a manter uma porosidade maior e uma melhor infiltração de água devido à ausência de práticas agrícolas disruptivas (Cavalcanti *et al.*, 2020).

Os parâmetros de forma, apresentados na Tabela 7, como  $n$ ,  $m$  e  $\eta$ , são majoritariamente influenciados pela textura do solo. Como os horizontes de cada perfil apresentam texturas próximas, com alto teor de argila, os parâmetros de forma apresentam valores similares. Os resultados encontrados pelo método Beerkan, como condutividade hidráulica saturada e sorvidade, destacam a importância das práticas de manejo do solo na modificação de suas propriedades hidrodinâmicas. Solos com longos períodos de cultivo sob cana de açúcar podem apresentar compactação e baixa permeabilidade. Os solos de floresta nativa, por sua vez, demonstram as melhores condições hidrodinâmicas, evidenciando a importância da conservação dessas áreas.

#### 5.4 Comparação dos métodos de determinação da condutividade hidráulica saturada

A Tabela 8 contém os valores de condutividade hidráulica saturada gerados pelos ensaios realizados utilizando dois métodos de determinação, o método de Beerkan, via campo junto com as coletas de solo, e em laboratório, com um auxílio de um permeâmetro de bancada.

Tabela 8 - Valores de condutividade hidráulica saturada via dois métodos de determinação

Perfil	Horizonte	Ksat		Razão entre os valores de laboratório e campo
		Beerkan	Laboratório	
		mm h <sup>-1</sup>		
Perfil 1	Ap	6,04	82,55	13,7*
	BA	10,82	105,98	9,8*
	Bw1	2,75	50,26	18,3*
	Bw2	6,61	47,59	7,2*
Perfil 2	Ap	4,66	15,65	3,4*
	BA	9,94	3,48	2,9**
	Bw1	20,32	6,33	3,2**
	Bw2	13,87	11,52	1,2**
Perfil 3	Ap	36,06	32,48	1,1**
	BA	59,18	40,07	1,5**
	Bw1	22,23	61,55	2,8*
	Bw2	5,21	47,48	9,1*
Perfil 4	A	384,59	459,86	1,2*
	AB	53,95	147,21	2,7*
	BA	26,39	208,22	7,9*
	Bw1	34,44	244,72	7,1*

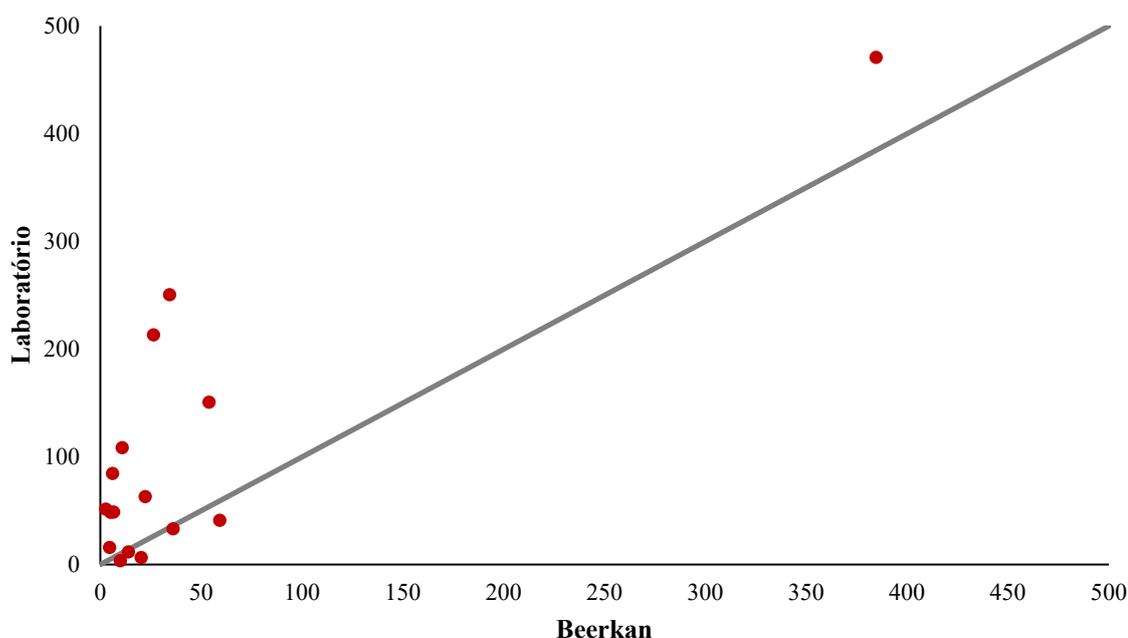
\*Razão laboratório/campo,  $K_{sat_{Lab}} > K_{sat_{campo}}$ ; \*\*Razão campo/laboratório,  $K_{sat_{campo}} > K_{sat_{Lab}}$

Observa-se que nos perfis 1 e 4 os valores Ksat gerados em laboratório foram maiores em relação aos de campo, mantendo o P4 com os maiores valores entre os perfis estudados, seguido pelos resultados do P1, como já discutido no item 5.2.6 (Condutividade hidráulica saturada). No P1 os resultados de laboratório foram em média 12 vezes maiores do que os de campo, enquanto no P4 essa diferença foi menor, ficando em torno de 5 vezes, mostrando ser uma área mais homogênea em relação ao P1.

Por outro lado, os resultados de Ksat para os perfis P2 e P3 foram, de um modo geral, maiores em campo, apresentando uma inversão em relação ao comportamento dos P1 e P4. Porém, os valores de Ksat no P2 continuam, no geral, sendo os mais baixos, independentemente do método usado. Analisando as diferenças entre os valores de Ksat do P2 e P3, nota-se que, em média, os resultados foram praticamente iguais (P2-Bw2 e P3-Ap), ou variaram entre 1,5 vezes (P3-BA), ou 3 vezes (P2, horizonte BA e Bw1).

Além da Tabela 8, foi utilizada a Figura 11 para comparação entre os métodos de determinação da Ksat, onde se observa o gráfico de dispersão dos dados Beerkan  $\times$  Laboratório, com a reta bissetriz, para comparar a diferença entre os valores dos dois métodos. Pode-se notar que há uma grande diferença entre os dados, na qual pode ser atribuída a diversos fatores que afetam a medição em cada contexto.

Figura 11 - Comparação gráfica entre os métodos de determinação da Ksat



Em campo, a heterogeneidade natural do solo, como variações de textura, estrutura e presença de raízes ou matéria orgânica, pode influenciar significativamente os resultados, sendo

o método Beerkan, ao ser aplicado *in situ*, capaz de capturar essa variabilidade. O Beerkan Estimation of Soil Transfer parameters - BEST, que permite uma caracterização hidráulica completa de solo não saturado, tem sido vastamente utilizado para determinar as propriedades hidráulicas, que são extremamente difíceis de caracterizar com outros procedimentos de laboratório e campo (Bagarello *et al.*, 2014).

No método Beerkan, a medição é realizada diretamente no solo não perturbado, o que pode representar de forma mais realista a infiltração natural de água no solo (Lassabatere *et al.*, 2006). Em laboratório, as amostras são condicionadas para saturação antes dos ensaios, além da carga hidráulica, que na maioria das amostras é aplicada e mantida sob carga constante, fornecendo uma medida de Ksat mais controlada, o que pode não representar as condições reais de umidade e saturação do solo no campo (Marques *et al.*, 2008; Hwang *et al.*, 2017). A condutividade hidráulica é altamente sensível ao conteúdo de água no solo, então o método aplicado pode influenciar no seu valor e variabilidade (Jačka *et al.*, 2014).

É importante ressaltar que pelo método de permeâmetro de bancada em laboratório, foram usadas de 4 a 6 amostras, sendo utilizada para a comparação a média desses valores. Já no método Beerkan foi realizado apenas um ensaio em campo. Essa diferença na quantidade de repetições pode influenciar significativamente os resultados comparativos.

O estudo de Mohanty, Kanwar e Everts (1994) avaliou a eficácia de quatro métodos para medir a Ksat, tendo os métodos de laboratório uma maior variabilidade, principalmente em profundidade mais rasas, possivelmente devido ao menor tamanho da amostra, à presença ou ausência de macroporos abertos e à compactação variável do solo durante a extração da amostra, sugerindo que diferentes métodos podem levar a resultados variados sob diferentes condições de campo. Assim, a discrepância entre os resultados obtidos pelos dois métodos destaca a importância de considerar as condições específicas e limitações de cada método ao interpretar os dados de condutividade hidráulica do solo. A aplicação conjunta de ambos os métodos fornece uma visão mais abrangente da condutividade hidráulica, combinando a representatividade do campo com a precisão controlada do laboratório.

## 6. CONCLUSÕES

O tipo de manejo agrícola aplicado possui grande influência nos atributos do solo. Em relação aos atributos químicos, notou-se uma melhoria na fertilidade do solo, naturalmente baixo, com a aplicação vinhaça, principalmente nos horizontes superficiais e subsuperficiais.

A calagem também melhora alguns aspectos do solo, o qual é realizada em todas as áreas com cultivo.

A textura do solo varia de argilo-arenosa ou franco argilo-arenosa nos horizontes superficiais a muito argilosa nos horizontes profundos. Os perfis cultivados mostram altos graus de dispersão de argila nos horizontes superficiais, associados a valores de pH mais elevados. Em contraste, os solos sob mata nativa apresentam maior floculação, refletindo uma estrutura mais estável.

A densidade do solo ( $D_s$ ) é maior nos perfis sob cultivo, devido à compactação resultante das práticas agrícolas intensivas. Em contrapartida, os solos de mata nativa apresentam menor densidade, indicando uma estrutura natural menos compactada e mais favorável à infiltração de água. Atrelado à  $D_s$ , a porosidade total ( $P_t$ ) se mostra maior nos solos de mata nativa, enquanto os solos com cultivo de cana-de-açúcar apresentam menor porosidade.

A macroporosidade é reduzida nos solos cultivados, impactando negativamente a capacidade de infiltração e aeração do solo. A microporosidade varia conforme o manejo, com solos sob mata nativa apresentando melhor distribuição das classes de poros, favorecendo a retenção de água e a manutenção do ecossistema florestal. A condutividade hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ) é significativamente maior no perfil 4, indicando alta permeabilidade.

As análises de correlação revelam que solos mais densos tendem a ter menor espaço poroso disponível, prejudicando a drenagem e a circulação de água e ar. Por outro lado, a porosidade total, especialmente a classe de macroporos, está positivamente correlacionada com  $K_{sat}$ , destacando a importância de poros maiores na facilitação do movimento de água no solo.

Os resultados do método Beerkan destacam que os solos sob cultivo apresentam valores baixos de  $K_{sat}$ , indicando compactação e baixa permeabilidade. O perfil 4, representando a floresta nativa, possui os maiores valores de  $K_{sat}$  e sorvidade, refletindo excelente condição estrutural e alta capacidade de infiltração.

A comparação entre os métodos de determinação de  $K_{sat}$  (Beerkan e laboratório) mostra grandes diferenças nos valores obtidos, destacando a importância de considerar as condições específicas de cada método ao interpretar os dados de condutividade hidráulica do solo. O método Beerkan, aplicado in situ, captura melhor a variabilidade natural do solo, enquanto o método de laboratório fornece medidas mais controladas.

## REFERÊNCIAS

- ABREU, M.L.; SILVA, M.A.; TEODORO, I.; HOLANDA, L.A.; SAMPAIO NETO, G.D. Crescimento e produtividade de cana-de-açúcar em função da disponibilidade hídrica dos Tabuleiros Costeiros de Alagoas. **Bragantia**, v. 72, n. 3, p. 262 - 270, 2013.
- ALBUQUERQUE, P.E.P. **Estratégias de manejo de irrigação: Exemplos de cálculo**. 1 ed. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo. 2010. 25p (Circular Técnica 136). ISSN 1518-4269
- ALMEIDA, B. G. **Métodos alternativos de determinação de parâmetros físicos do solo e uso de condicionadores químicos no estudo da qualidade do solo**. 2008. 103 f. Tese de Doutorado – ESALQ/USP, Piracicaba-SP, 2008.
- ALMEIDA, B. G.; ALMEIDA, C.D.G.C. SANTOS, E.; MAIA, A.; SILVA, T. **Permeâmetro contínuo de carga constante e decrescente para determinação de condutividade hidráulica em meios porosos**. Depositante: Universidade Federal Rural de Pernambuco. BR1020200132024. Depósito: 26 jun. 2020.
- ALMEIDA, B.G.; FREITAS, P.L.; TEIXEIRA, W.G.; VIANA, J.H.M.; DONAGEMMA, G.K. Porosidade. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G.K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W.G. (eds.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3.ed. rev. ampl. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, p.82-94, 2017a. ISBN: 978-85-7035-771-7.
- ALMEIDA, B. G.; VIANA, J. H. M.; TEIXEIRA, W. G.; DONAGEMMA, G. K. Densidade do solo. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (eds.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3.ed. rev. ampl. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, p.65-75, 2017b. ISBN: 978-85-7035-771-7.
- ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.D.M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ALVAREZ, R.; STEINBACH, H.S. A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crops yield in the Argentine Pampas. **Soil and tillage research**, v. 104, n. 1, p. 1-15, 2009.
- ALVES, S.; CRUZ, R.; MACHADO, F. Formação econômica de alagoas: da agroindústria canavieira à indústria “sem chaminés” (turismo): dependências e contradições. **Revista Rural & Urbano**. Recife. v. 03, n. 02, p. 61-81, 2018. ISSN: 2525-6092
- AMAMI, R.; IBRAHIMI, K.; SHER, F.; MILHAM, P.; GHAZOUANI, H.; CHEHAIBI, S.; HUSSAIN, Z.; IQBAL, H.M.N. Impacts of different tillage practices on soil water infiltration for sustainable agriculture. **Sustainability**, v. 13, n. 6, p. 3155, 2021.
- ANP – AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Relatório Anual de Tecnologia e meio ambiente 2023**. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/tecnologia-meio-ambiente/pesquisa-desenvolvimento-inovacao/arquivos-relatorio-anual-de-tecnologia-e-meio-ambiente/relatorio-anual-2023.pdf>>.
- BAFFA, D. C. F.; FREITAS, R. G.; DO BRASIL, R. P. C. O uso da vinhaça na cultura da cana de açúcar. **Nucleus**, n. 1, p. 1-16, 2009.

BAGARELLO, V.; BAIAMONTE, G.; CASTELLINI, M.; DI PRIMA, S.; IOVINO, M.A. comparison between the single ring pressure infiltrometer and simplified falling head techniques. **Hydrological Processes**, v. 28, n. 18, p. 4843-4853, 2014.

BARROS, I.; THORBURN, P. J.; BIGGS, J. S.; RESENDE, R. S.; MARAFON, A. C. **Uso eficiente de recursos naturais e insumos no cultivo da cana-de-açúcar nos Tabuleiros Costeiros de Alagoas**. Comunicado Técnico 216 – Embrapa. Aracaju SE, dezembro, 2018.

BEVEN, K.; GERMANN, P. Macropores and water flow in soils. **Water resources research**, v. 18, n. 5, p. 1311-1325, 1982.

BOT, A.; BENITES, J. **The importance of soil organic matter: Key to drought-resistant soil and sustained food production**. Food and Agriculture of the United Nations: Rome, 2005.

BRONICK, C.J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, v. 124, n. 1-2, p. 3-22, 2005.

BROOKS, R. H.; COREY, A. T. Hydraulic properties of porous media. **Hydrology Paper**, n.3, Fort Collins: Colorado State University, 1964, 27p.

BUENO, P. C.; RUBÍ, J. A. M.; GIMÉNEZ, R. G.; BALLESTA, R. J. Impacts caused by the addition of wine vinasse on some chemical and mineralogical properties of a Luvisol and a Vertisol in La Mancha (Central Spain). **Journal of Soil and Sediments**, Heidelberg, v. 9, n. 2, p. 121-128, 2009.

BURDINE, N. T. Relative permeability calculations from pore-size distribution data. **J Pet Technol**, v. 5, n. 3, p. 71–78, 1953. DOI: <https://doi.org/10.2118/225-G>

CARDOSO, E. L.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; FERREIRA, M. M.; FREITAS, D. A. F. D. Qualidade química e física do solo sob vegetação arbórea nativa e pastagens no Pantanal Sul-Mato-Grossense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 613-622, 2011.

CARDOSO, M.O.; PEDROSA, E.M.R.; FERRIS, H.; ROLIM, M.M.; VICENTE, T.D.S.; DAVID, M.D.L. Comparing sugarcane fields and forest fragments: the effect of disturbance on soil physical properties and nematode assemblages. **Soil use and management**, v. 31, n. 3, p. 397-407, 2015.

CARNEIRO, M. P.; SOUZA, Z. M.; FARHATE, C. V. V.; CHERUBIN, M. R.; PANOSSO, A. R. Effect of cover crops and tillage systems on soil quality and sugarcane yield. **Soil Use and Management**, v. 40, n. 2, p. e13048, 2024.

CARNEIRO, M.A.C.; SOUZA, E.D.; REIS, E.F.; PEREIRA, H.S. & AZEVEDO, W.R. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. **R. Brasileira de Ciência do Solo**, 33:147-157, 2009.

CARVALHO, J.C.; GITIRANA JUNIOR, G.F.N.; MACHADO, S.L.; MASCARENHA, M.M.A.; SILVA FILHO, F.C. **Solos não saturados no contexto geotécnico**. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015.

CAVALCANTI, R. Q.; ROLIM, M. M.; LIMA, R. P.; TAVARES, U. E.; PEDROSA, E. M.; GOMES, I. F. Soil physical and mechanical attributes in response to successive harvests under

sugarcane cultivation in Northeastern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 189, p. 140-147, 2019.

CAVALCANTI, R.Q.; ROLIM, M.M.; LIMA, R.P.; TAVARES, U.E.; PEDROSA, E.M.; CHERUBIN, M.R. Soil physical changes induced by sugarcane cultivation in the Atlantic Forest biome, northeastern Brazil. **Geoderma**, v. 370, p. 114353, 2020.

CENTENO, L.N.; GUEVARA, M.D.F.; CECCONELLO, S.T.; SOUSA, R.O.; TIMM, L.C. Textura do solo: conceitos e aplicações em solos arenosos. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade**, v. 4, n. 1, p. 31-37, 2017.

CHAMEN, W. T.; MOXEY, A. P.; TOWERS, W.; BALANA, B.; HALLETT, P. D. Mitigating arable soil compaction: A review and analysis of available cost and benefit data. **Soil and Tillage Research**, v. 146, p. 10-25, 2015.

CHRISTOFOLETTI, C.A.; ESCHER, J.P.; CORREIA, J.E.; MARINHO, J.F.U.; FONTANETTI, C.S. Sugarcane vinasse: environmental implications of its use. **Waste management**, v. 33, n. 12, p. 2752-2761, 2013.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Série histórica das safras**. Cana-de-açúcar - Agrícola. 29/11/2023. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras/itemlist/category/891-cana-de-acucar-agricola>>. Acesso em: 15 de janeiro de 2024.

COUTINHO, M.K.; ASSAD, L.T. **Plano de Desenvolvimento Estadual de Alagoas**. Editora IABS, Brasília-DF, Brasil, 2017. ISBN 978-85-64478-59-6.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea**: Diagnóstico do município de Rio Largo, estado de Alagoas. Org. por: MASCARENHAS, J. DE C.; BELTRÃO, B. A; SOUZA JUNIOR, L. C. DE. Recife: CPRM/PRODEEM, 2005.

CUENCA, M.A.G.; DOMPIERI, M.H.G.; CRUZ, M.A.S.; SÁ, H.A. Análise da evolução da canavicultura nos Tabuleiros Costeiros de Alagoas e decomposição do valor bruto da produção (VBP) nos efeitos área produtividade e preços, por meio do modelo shift-share. **Embrapa Tabuleiros Costeiros**, Aracaju – SE, 2015. (Embrapa Tabuleiros Costeiros. Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 103).

DEXTER, A. R. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, v. 120, n. 3-4, p. 201-214, 2004.

DIONIZIO, E.A.; COSTA, M.H. Influence of land use and land cover on hydraulic and physical soil properties at the cerrado agricultural frontier. **Agriculture**, v. 9, n. 1, p. 24, 2019.

DORAN, J.W.; PARKIN, T.B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C; BEZDICEK, D.F; STEWART, B.A. **Defining soil quality for a sustainable environment**, v. 35, p. 1-21, 1994.

DRESCHER, M.S.; ELTZ, F.L.F.; DENARDIN, J.E.; FAGANELLO, A. Persistência do efeito de intervenções mecânicas para a descompactação de solos sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 1713-1722, 2011.

ECHART, C.L.; CAVALLI-MOLINA, S. Fitotoxicidade do alumínio: efeitos, mecanismo de tolerância e seu controle genético. **Ciência Rural**, v. 31, p. 531-541, 2001.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed., rev. e ampl. – Brasília, DF: Embrapa, 2018. ISBN 978-85-7035-800-4.

EMBRAPA. **Soluções inovadoras impulsionam a transição energética da indústria brasileira**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/84767849/solucoes-inovadoras-impulsionam-a-transicao-energetica-da-industria-brasileira?link=agencia>>. Acesso em: 15 de janeiro de 2024.

ESTEBAN, D.A.A.; SOUZA, Z. M.; TORMENA, C.A.; LOVERA, L.H.; LIMA, E.S.; OLIVEIRA, I.N.; RIBEIRO, N.P. Soil compaction, root system and productivity of sugarcane under different row spacing and controlled traffic at harvest. **Soil and Tillage Research**, v. 187, p. 60-71, 2019.

FAGERIA, N. K. Optimum soil acidity indices for dry bean production on an Oxisol in no-tillage system. **Communications in soil science and plant analysis**, v. 39, n. 5-6, p. 845-857, 2008.

FERREIRA, E.A.; MAIA, J.C.S., BIANCHINI, A.; VAZ, B.K. M.; KERKHOFF, P.H.A. Condutividade hidráulica de um Latossolo em diferentes sistemas de uso e manejo do solo. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 16, p. e384111638010-e384111638010, 2022.

FRANK, T.; ZIMMERMANN, I.; HORN, R. The need for lime in dependence on clay content in arable crop production in Germany. **Soil and Tillage Research**, v. 191, p. 11-17, 2019.

FRIZZONE, J. A. **Necessidade de água para irrigação**, ESALQ/USP, Departamento de Engenharia de Biosistemas, Piracicaba, SP, 2017, 56p.

FUESS, L. T.; RODRIGUES, I. J.; GARCIA, M. L. Fertirrigation with sugarcane vinasse: Foreseeing potential impacts on soil and water resources through vinasse characterization. **Journal of Environmental Science and Health**, New York, v. 52, n. 11, p. 1063-1072, 2017.

GEE, G. W.; OR, D. **Particle Size Analysis**. In: DANE, J.H. AND TOPP, G.C., Eds., *Methods of Soil Analysis, Part 4, Physical Methods*, Soils Science Society of America, Book Series No. 5, Madison, 255-293. 2002.

GEORGE, E.; HORST, W.J; NEUMANN, E. Adaptation of Plants to Adverde Cheminal Soil Conditions. In: MARSCHNER, P. **Mineral Nutrition of Higher Plants**. Academic Press, Elsevier. 3ed, p. 409-472, 2012. ISBN: 978-0-12-384905-2.

GOLDEMBERG, J. Ethanol for a sustainable energy future. **Science**, v. 315, n. 5813, p. 808-810, 2007.

GONÇALVES, F.C.; MARASCA, I.; SOUZA, S.F.G.; TAVARES, L.A.F.; SILVA, P.R.A. Métodos de determinação da densidade do solo em diferentes sistemas de manejo. **Energia na Agricultura**, v. 28, n. 3, p. 165-169, 2013.

GUARENGLI, M.M.; GAROFALO, D.F.T.; SEABRA, J.E.A.; MOREIRA, M.M.R.; NOVAES, R.M.L.; RAMOS, N.P.; NOGUEIRA, S.F.; DE ANDRADE, C.A. Land use change net removals associated with sugarcane in Brazil. **Land**, v. 12, n. 3, p. 584, 2023.

HAMZA, M. A.; ANDERSON, Walter K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil and tillage research**, v. 82, n. 2, p. 121-145, 2005.

HODGE, A.; BERTA, G.; DOUSSAN, C.; MERCHAN, F.; CRESPI, M. Plant root growth, architecture and function. **Plant Soil**, v. 321, p. 153–187, 2009.

HORN, R.; DOMŹŻAŁ, H.; SŁOWIŃSKA-JURKIEWICZ, A.; VAN OUWERKERK, C. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. **Soil and Tillage Research**, v. 35, n. 1-2, p. 23-36, 1995.

HWANG, H. T.; JEEN, S.W.; SULEIMAN, A.A.; LEE, K.K. Comparison of saturated hydraulic conductivity estimated by three different methods. **Water**, v. 9, n. 12, p. 942, 2017.

JACĀKA, L.; PAVLÁSEK, J.; KURÁŽ, V.; PECH, P. A comparison of three measuring methods for estimating the saturated hydraulic conductivity in the shallow subsurface layer of mountain podzols. **Geoderma**, v. 219, p. 82-88, 2014.

JARVIS, N. J. A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: Principles, controlling factors and consequences for water quality. **European Journal of Soil Science**, v. 71, n. 3, p. 279-302, 2020.

JIN, Q.; WANG, C.; SARDANS, J.; VANCOV, T.; FANG, Y.; WU, L.; HUANG, X.; GARGALLO-GARRIGA, A.; PEÑUELAS, J.; WANG, W. Effect of soil degradation on the carbon concentration and retention of nitrogen and phosphorus across Chinese rice paddy fields. **Catena**, v. 209, 105810, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105810>.

KAY, B.D.; ANGERS, D.A. Soil structure. In: SUMNER, M.E. **Handbook of soil science**. Boca Raton: CRC. Press, p. 229-276, 1999.

KELLER, T.; SANDIN, M.; COLOMBI, T.; HORN, R.; OR, D. Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. **Soil and Tillage Research**, v. 194, p. 104293, 2019.

KHALEDIAN, Y.; KIANI, F.; EBRAHIMI, S.; BREVIK, E.C.; AITKENHEAD-PETERSON, J. Assessment and monitoring of soil degradation during land use change using multivariate analysis. **Land Degradation & Development**, v. 28, n. 1, p. 128-141, 2017.

KUZYAKOV, Y. Priming effects: interactions between living and dead organic matter. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 42, n. 9, p. 1363-1371, 2010.

LARSON, W.E.; PIERCE, F.J. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F.; STEWART, B.A. **Defining soil quality for a sustainable environment**, v. 35, p. 37-51, 1994.

LASSABATÈRE, L.; ANGULO-JARAMILLO, R.; SORIA, J. M.; CUENCA, R.; BRAUD, I.; HAVERKAMP, R. Beerkan estimation of soil transfer parameters through infiltration experiments – BEST. **Soil Science Society of American Journal**, v.70, p.521-532, 2006.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. 3 ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2018. (Acadêmica, 61)

LOPES, L.D.; FONTES JUNIOR, R.C.; PACHECO, E.P.; FERNANDES, M.F. Shifts in microbial and physicochemical parameters associated with increasing soil quality in a tropical Ultisol under high seasonal variation. **Soil and Tillage Research**, v. 206, p. 104819, 2021.

LOPES, R.A.P; NÓBREGA, L.H.P; URIBE-OPAZ, M.A.; PRIOR, M.; PEREIRA, J.O. Propriedades físicas de Latossolo Vermelho distroférico típico sob sistemas de manejo na sucessão soja-milho no período de três anos. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 29, p. 721-727, 2007.

LUO, L.; LIN, H.; LI, S. Quantification of 3-D soil macropore networks in different soil types and land uses using computed tomography. **Journal of Hydrology**, v. 393, n. 1-2, p. 53-64, 2010.

MACEDO, I.C.; CARVALHO, E.P. **A energia da cana de açúcar**: Doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar e sua sustentabilidade. São Paulo: Berlendis & Vertecchia: UNICA – União da Agroindústria Canavieira do Estado de São Paulo, 2005.

MANHÃES, C.M.C.; GARCIA, R.F.; FRANCELINO, F.M.A.; DE OLIVEIRA FRANCELINO, H.; COELHO, F.C. Fatores que afetam a brotação e o perfilhamento da cana-de-açúcar. **Revista Vértices**, v. 17, n. 1, p. 163-181, 2015.

MARQUES, J.D.D.O.; TEIXEIRA, W.G.; REIS, A.M., CRUZ JUNIOR, O. F.; MARTINS, G.C. Avaliação da condutividade hidráulica do solo saturada utilizando dois métodos de laboratório numa topossequência com diferentes coberturas vegetais no Baixo Amazonas. **Acta Amazonica**, v. 38, p. 193-206, 2008.

MENESES, T.N.; RESENDE, R.S. Influência de épocas de plantio na eficiência do uso da água da chuva em cultivo irrigado de cana-de-açúcar. **Irriga**, v. 1, n. 1, p. 291-291, 2016.

MIYAMOTO, T.; KAMEYAMA, K.; NAKAJIMA, T. Reduction in saturated and unsaturated hydraulic conductivities of an andisol by vinasse application. **Soil Science Society of America Journal**, v. 77, n. 1, p. 1-7, 2013.

MOHANTY, B.P.; KANWAR, R.S.; EVERTS, C.J. Comparison of saturated hydraulic conductivity measurement methods for a glacial-till soil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, n. 3, p. 672-677, 1994.

NASCIMENTO, M.A.; SILVA, T.L.; ROSENDO, B.H.B.; SILVA, E.S.; ALMEIDA, L. J. M.; FREITAS, A.B.T.M.; MIELEZRSKI, F. Teor de sólidos solúveis de duas variedades de cana-de-açúcar submetidas a calagem em dois ciclos produtivos da cultura. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v. 7, n. 3, 2019.

NEUMMAN, G.; RÖMHELD, V. Rhizosphere Chemistry in Relation to Plant Nutrition. In: MARSCHNER, P. **Mineral Nutrition of Higher Plants**. Academic Press, Elsevier. 3ed, p. 347-368, 2012. ISBN: 978-0-12-384905-2.

NIMMO J.R. Porosity and Pore Size Distribution. **Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences**, Elsevier, 2013.

NUNES, J. A.; SOUZA, E.R.; GUIMARÃES, R.M.L.; NUNES, C.C.C.G.; SANTOS, M. A.; SCHAFFER, B. Effect of controlled traffic on maintaining physical soil quality in sugarcane fields under different crop management systems. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 69, n. 14, p. 3266-3283, 2023.

NYKO, D.; VALENTE, M. S.; MILANEZ, A. Y.; TANAKA, A.K.R.; RODRIGUES, A. V. P. A evolução das tecnologias agrícolas do setor sucroenergético: estagnação passageira ou crise estrutural? **BNDES Setorial**, n. 37, mar. 2013, p 399-442, 2013.

OLIVEIRA FILHO, F.X.D.; MIRANDA, N.D.O.; MEDEIROS, J.F.D.; SILVA, P.C.D.; MESQUITA, F.O.; COSTA, T.K. Zona de manejo para preparo do solo na cultura da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 2, p. 186-193, 2015.

OLIVEIRA FILHO, J.S.; SANTOS, O.A.Q., ROSSI, C.Q., DINIZ, Y.V.D.F.G., FAGUNDES, H.S.; PINTO, L.A.D.S.R.; PEREIRA, W.; PEREIRA, M.G. Assessing the effects of harvesting with and without burning and vinasse application in sugarcane crops: evaluation of soil fertility and phosphorus pools in different ethanol production systems. **Agriculture, ecosystems & environment**, v. 307, p. 107233, 2021.

OLIVEIRA, A.R.; BRAGA, M.B.; WALKER, A.M. Comportamento vegetativo e qualidade tecnológica de cultivares de cana-de-açúcar submetidas ao estresse hídrico em condições Semiáridas do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.08, n. esp. (IV SMUD), p. 525-541, 2015.

OLIVEIRA, F.C.C.; FERREIRA, G.W.D.; SOUZA, J.L. S.; VIEIRA, M.E. O.; PEDROTTI, A. Soil physical properties and soil organic carbon content in northeast Brazil: long-term tillage systems effects. **Scientia Agricola**, v. 77, n. 4, p. e20180166, 2019.

OLIVEIRA, W. S.; BRITO, M. E. B.; ALVES, R. A. B.; SOUZA, A. S.; SILVA, E. G. Cultivo da cana-de-açúcar sob fertirrigação com vinhaça e adubação mineral Sugarcane crop under vinasse fertirrigation and mineral fertilization. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Mossoró, v. 9, n. 1, p. 1-5, jan./mar. 2014.

OTTONI FILHO, T. B.; CAETANO, A. R.; OTTONI, M. V. In situ Field Capacity in Brazilian Soils and a Derived Irrigation Management Practice Based on Water Suction. **Journal of Agricultural Science**, v. 14, n. 3, p. 23, 2022.

PAGLIAI, M.; VIGNOZZI, N.; PELLEGRINI, S. Soil structure and the effect of management practices. **Soil and tillage research**, v. 79, n. 2, p. 131-143, 2004.

PEREIRA, R.; PEREIRA NETO, A.M.; TIBURCIO, R.S. Vinhaça de Cana-de-açúcar: Análise do seu Uso como Combustível Alternativo. **Revista Virtual de Química**, v. 14, n. 1, 2022.

PIERRET, A.; DOUSSAN, C.; CAPOWIEZ, Y.; BASTARDIE, F.; PAGÈS, L. Root functional architecture: a framework for modeling the interplay between roots and soil. **Vadose Zone Journal**, v. 6, n. 2, p. 269-281, 2007.

RABOT, E.; WIESMEIER, M.; SCHLÜTER, S.; VOGEL, H.J. Soil structure as an indicator of soil functions: A review. **Geoderma**, v. 314, p. 122-137, 2018.

REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. *In*: CERETTRA, C.A.; SILVA, L.S.; REICHERT, J.M. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 5, p. 49-134, 2007.

RFA - RENEWABLE FUELS ASSOCIATION. **Annual ethanol production**. U.S. and world ethanol production. Disponível em: <<https://ethanolrfa.org/markets-and-statistics/annual-ethanol-production>>. Acesso em: 15 de janeiro de 2024.

RIDESA – REDE INTERUNIVERSITÁRIA PARA O DESENVOLVIMENTO DO SETOR SUCROENERGÉTICO. **Manejo de Variedades RB**. XXXVII Simpósio da Agroindústria da cana-de-açúcar de Alagoas, jun. 2022 (Apresentação). Disponível em: <<https://www.stableste.org.br/wp-content/uploads/2022/08/6AntonioRosrio.pdf>>. Acesso em: 08 de maio de 2024.

RONQUIM, C.C. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais**. 2. ed., 34p. Campinas: Embrapa Territorial, 2020. ISSN: 1806-3322.

SÁ, M.A.C.; SANTOS JUNIOR, J.D.G. **Compactação do solo: consequências para o crescimento vegetal**. 1. ed., 26p. Planaltina, DF: EMBRAPA Cerrados, 2005. ISSN 1517-5111.

SANTOS, R.D.; SANTOS, H.G.; KER, J.C.; ANJOS, L.H.C; SHIMIZU, S.H. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 7. ed. rev. ampl., 102 p. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2015. ISBN: 9788586504037.

SEFAZ – SECRETARIA DE ESTADO DA FAZENDA DE ALAGOAS. **Dados mostram que açúcar da cana continua como produto mais exportado de Alagoas**. Disponível em: <<https://www.sefaz.al.gov.br/artigo/item/1801-dados-mostram-que-acucar-da-cana-continua-como-produto-mais-exportado-de-alagoas>>. Acesso em: 15 de janeiro de 2024.

SHUKLA, S.K.; JAISWAL, V.P.; SHARMA, L.; PATHAK, A.D.; SINGH, A.K.; GUPTA, R.; AWASTHI, S.K.; GAUR, A.; ZUBAIR, A.; TIWARI, R. Subsoiling affecting soil quality parameters and sugarcane Yield in multiratooning system in subtropical India. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 52, n. 18, p. 2125-2144, 2021.

SILVA, A.J.N., RIBEIRO, M.R., MERMUT, A.R.; BENKE, M.B. Influência do cultivo contínuo da cana-de-açúcar em Latossolos Amarelos coesos do estado de Alagoas: propriedades micromorfológicas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p. 515-525, 1998.

SILVA, P.P.; BARBOSA, G.V.S.; CRUZ, M.M.; SANTOS, J.M.; DINIZ, C.A.; TEODORO, I.; TÔRRES, V.L.D.; SOARES, L.; SILVA, A.M.O.; NASCIMENTO, B.F.C.; SOUSA, A.J.R.; RIBEIRO, C.A.G.; VIEIROS, A.J.A.; SAMPAIO FILHO, F.; FREITAS, E.G. RB961552-

Highly productive sugarcane cultivar with fast inter-row closure. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 21, p. e32992126, 2021.

SOLTANGHEISI, A.; WITHERS, P.J.A.; PAVINATO, P.S.; CHERUBIN, M.R.; ROSSETTO, R.; CARMO, J.B.; ROCHA, G. C.; MARTINELLI, L.A. Improving phosphorus sustainability of sugarcane production in Brazil. **Gcb Bioenergy**, v. 11, n. 12, p. 1444-1455, 2019.

SOTO, M.A.; BASSO, J.B.; KIANG, C.H. Impacto da fertirrigação da cana-de-açúcar por vinhaça nas propriedades físicas, químicas e hidráulicas do solo. *In*: FONTANETTI, C.S.; BUENO, O.C. **Cana-de-açúcar e seus impactos: uma visão acadêmica**. Bauru: Canal 6, p. 103-124, 2017.

SOUZA, E. S.; ANTONINO, A. C. D.; ANGULO-JARAMILLO, R.; NETTO, A. M. Caracterização hidrodinâmica de solos: Aplicação do método Beerkan. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, p. 128-135, 2008.

SPERA, S.T.; DENARDIN, J.E.; ESCOSTEGUY, P.A.V.; SANTOS, H. P. D.; FIGUEROA, E.A Dispersão de argila em microagregados de solo incubado com calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 2613-2620, 2008.

SPERA, S.T.; SANTOS, H.P.D.; TOMM, G.O.; KOCHHANN, R.A.; ÁVILA, A. Atributos físicos do solo em sistemas de manejo de solo e de rotação de culturas. **Bragantia**, v. 68, p. 1079-1093, 2009.

STEINER, C.; TEIXEIRA, W. G.; LEHMANN, J.; NEHLS, T.; MACÊDO, J.L.V.; BLUM, W.E.; ZECH, W. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. **Plant and soil**, v. 291, p. 275-290, 2007.

TALUKDER, R.; PLAZA-BONILLA, D.; CANTERO-MARTÍNEZ, C.; WENDROTH, O.; LAMPURLANÉS, J. Soil hydraulic properties and pore dynamics under different tillage and irrigated crop sequences. **Geoderma**, v. 430, p. 116293, 2023.

TEIXEIRA, W.G.; BEHRING, S.B. Retenção de água no solo pelos métodos da mesa de tensão e da câmara de Richards. *In*: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (eds.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3.ed. rev. ampl. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2017. p.34-46. ISBN: 978-85-7035-771-7.

TILMAN, D.; CASSMAN, K.G.; MATSON, P.A.; NAYLOR, R.; POLASKY, S. Agricultural sustainability and intensive production practices. **Nature**, v. 418, n. 6898, p. 671-677, 2002.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P; LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p. 573-581, 1998.

TRIVELIN, P.C.O.; FRANCO, H.C.J.; OTTO, R.; FERREIRA, D.A.; VITTI, A.C.; FORTES, C.; FARONI, C.E.; OLIVEIRA, C.A.O; CANTARELLA, H. Impact of sugarcane trash on fertilizer requirements for São Paulo, Brazil. **Scientia Agrícola**, v. 70, p. 345-352, 2013.

TSIAFOULI, M.A.; THÉBAULT, E.; SGARDELIS, S.P.; RUITER, P.C.; PUTTEN, W.H., BIRKHOFFER, K.; HEMERIK, L.; VRIES, F.T.; BARDGETT, R.D.; BRADY, M.V.; BJORNLUND, L.; JØRGENSEN, H.B.; CHRISTENSEN, S.; HERTEFELDT, T.D.; HOTES, S.; GERA HOL, W. H.; FROUZ, J.; LIIRI, M.; MORTIMER, S.R.; SETÄLÄ, H.; TZANOPOULOS, J.; UTESENY, K.; PIŽL, V.; STARY, J.; WOLTERS, V.; HEDLUND, K. Affiliations Expand Intensive agriculture reduces soil biodiversity across Europe. **Global change biology**, v. 21, n. 2, p. 973-985, 2015.

UFAL – UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS. **Variedades de cana-de-açúcar da UFAL têm alta produtividade Agrícola**. Disponível em: <<https://noticias.ufal.br/ufal/noticias/2021/7/variedades-de-cana-de-acucar-da-ufal-tem-alta-produtividade-agricola>>. Acesso em: 08 de maio de 2024.

UNICA – UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR E BIOENERGIA. **Geração de bioeletricidade à rede cresce 30% em 2023**. Disponível em: <<https://unica.com.br/noticias/geracao-de-bioeletricidade-a-rede-cresce-30-em-2023/>>. Acesso em: 15 de janeiro de 2024.

VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of American Journal**, v.44, p.892-898, 1980.

VIANA, J.H.M; TEIXEIRA, W.G.; DONAGEMMA, G.K. Densidade de partículas. *In*: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (eds.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3.ed. rev. ampl. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2017. p.34-46. ISBN: 978-85-7035-771-7.

WITHERS, P.J.; NEAL, C.; JARVIE, H. P.; DOODY, D. G. Agriculture and eutrophication: where do we go from here? **Sustainability**, v. 6, n. 9, p. 5853-5875, 2014.

ZHANG, X.; WENDROTH, O.; MATOCHA, C.; ZHU, J.; REYES, J. Assessing field-scale variability of soil hydraulic conductivity at and near saturation. **Catena**, v. 187, p. 104335, 2020.

ZHOU, H.; WHALLEY, W.R.; HAWKESFORD, M.J.; ASHTON, R.W.; ATKINSON, B.; ATKINSON, J.A.; STURROCK, C.J.; BENNET, M.J.; MOONEY, S. J. The interaction between wheat roots and soil pores in structured field soil. **Journal of experimental botany**, v. 72, n. 2, p. 747-756, 2021.

## **APÊNDICE A – PERFIL 1**

### **A – DESCRIÇÃO GERAL**

PERFIL: 01-SC

DATA: 30/03/2023

CLASSIFICAÇÃO: LATOSSOLO AMARELO Distrocoeso típico.

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO E ESTADO: Usina Santa Clotilde S/A – Fazenda Jequiá (Talhão 8136) – Rio Largo/AL

COORDENADAS: 9.4598 S, 35.8154 O.

ALTITUDE: 129,2m (GPS).

SITUAÇÃO E DECLIVIDADE: Topo plano de tabuleiro com 0-2% de declividade.

LITOLOGIA E CRONOLOGIA: Sedimentos do Grupo Barreiras do período Terciário.

MATERIAL ORIGINÁRIO: Sedimentos argiloarenosos.

PEDREGOSIDADE: Não pedregoso.

ROCHOSIDADE: Não rochoso.

RELEVO LOCAL: Plano.

RELEVO REGIONAL: Plano a suave ondulado.

EROSÃO: Não aparente.

DRENAGEM: Bem a moderadamente drenado.

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA: Floresta subperenifólia.

USO ATUAL: Cultivo de cana-de-açúcar com aplicação de vinhaça desde a década de 80

CLIMA: As (Köppen)

DESCRITO POR: José Coelho de Araújo Filho, Brivaldo Gomes de Almeida, Ana Lua Telles Lima.

## B - DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

- Ap 0-20cm, bruno-escuro (10YR 3/3, úmida); argiloarenosa; fraca a moderada, pequena a média, blocos subangulares e granular; friável, muito pegajoso e plástico; transição plana e clara.
- BA 20-34cm, bruno-amarelado (10YR 5/4, úmida); argiloarenosa; fraca a moderada; pequena a média, blocos angulares e subangulares; friável a firme, plástico e pegajoso; transição plana e clara.
- Bw1 34-62cm, amarelo-brunado (10YR 6/6, úmido) e mosqueado comum, pequeno a médio, difuso a distinto, vermelho-amarelado (5YR 5/6); argila; maciça com partes fracas, pequena a média, blocos angulares e subangulares; firme, plástico e muito pegajoso; transição plana e gradual.
- Bw2 62-100cm, amarelo-avermelhado (7,5YR 6/6, úmido); muito argilosa; fraca com partes maciças, pequena a média, blocos angulares e subangulares; firme a friável, plástico e muito pegajoso; transição plana e difusa.
- Bw3 100-140cm, amarelo-avermelhado (7,5YR 6/6, úmido); muito argilosa; fraca, pequena a média, blocos subangulares e angulares; fraca, pequena a média, blocos subangulares e angulares; friável, plástico e muito pegajoso; transição plana e gradual.
- Bw4 140-180cm, bruno-forte (7,5YR 5/8, úmido); muito argilosa; fraca, pequena a média, blocos subangulares e angulares; friável, plástico e pegajoso; transição plana e gradual.
- Bw5 180-240cm+, amarelo-avermelhado (5YR 6/6, úmido); muito argilosa; maciça porosa com partes fracas a moderadas, pequena a média, blocos angulares e subangulares; friável a muito friável, plástico e pegajoso.

RAÍZES: muitas finas e poucas muito finas no horizonte Ap; comuns finas e raras muito finas no horizonte BA; raras finas e muito finas nos horizontes Bw1 e Bw2; ausentes nos demais horizontes.

POROS: poros comuns pequenos e muito pequenos no horizonte Ap; e poucos poros pequenos e comuns muito pequenos nos horizontes BA, Bw1, Bw2 e Bw3.

OBSERVAÇÕES: Solo descrito no estado úmido próximo à capacidade de campo. Com base na consistência úmida, infere-se que a máxima coesão se encontra no horizonte Bw1. Horizontes Bw4 e Bw5 foram descritos, porém, não coletados.

Figura 12 - Características da área selecionada para o perfil 01-SC, destacando-se os horizontes.



Fonte: Arquivo pessoal da Autora (2023).

## **APÊNDICE B – PERFIL 2**

### **A – DESCRIÇÃO GERAL**

PERFIL: 02-SC

DATA: 31/03/2023

CLASSIFICAÇÃO: LATOSSOLO AMARELO Distrocoeso típico.

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO E ESTADO: Usina Santa Clotilde S/A – Fazenda Canoas (Talhão 3004) – Rio Largo/AL

COORDENADAS: 9.4439 S, 35.8105 O.

ALTITUDE: 133,3 m (GPS).

SITUAÇÃO E DECLIVIDADE: Topo plano de tabuleiro com 0-2% de declividade.

LITOLOGIA E CRONOLOGIA: Sedimentos do Grupo Barreiras do período Terciário.

MATERIAL ORIGINÁRIO: Sedimentos argiloarenosos.

PEDREGOSIDADE: Não pedregoso.

ROCHOSIDADE: Não rochoso.

RELEVO LOCAL: Plano.

RELEVO REGIONAL: Plano e suave ondulado.

EROSÃO: Não aparente.

DRENAGEM: Bem a moderadamente drenado.

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA: Floresta subperenifólia.

USO ATUAL: Cultivo de cana-de-açúcar com aplicação de vinhaça iniciado há 1 ano.

CLIMA: As (Köppen)

DESCRITO POR: José Coelho de Araújo Filho, Brivaldo Gomes de Almeida, Ana Lua Telles Lima.

## B – DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

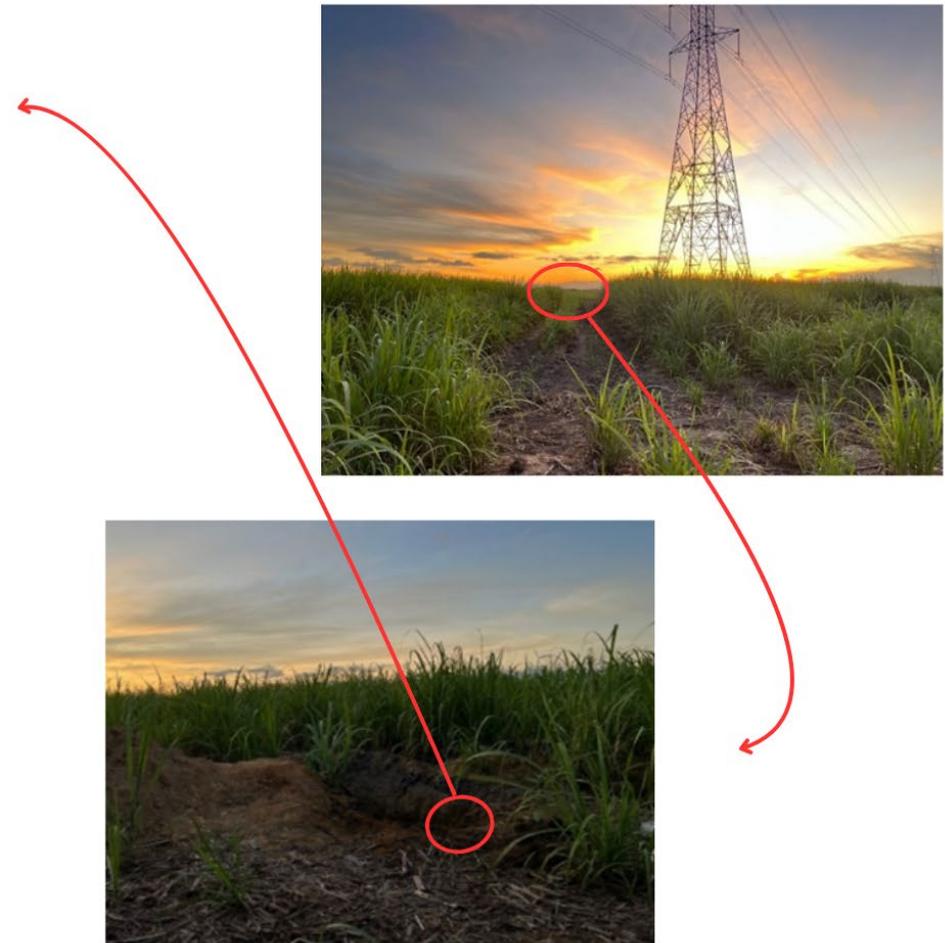
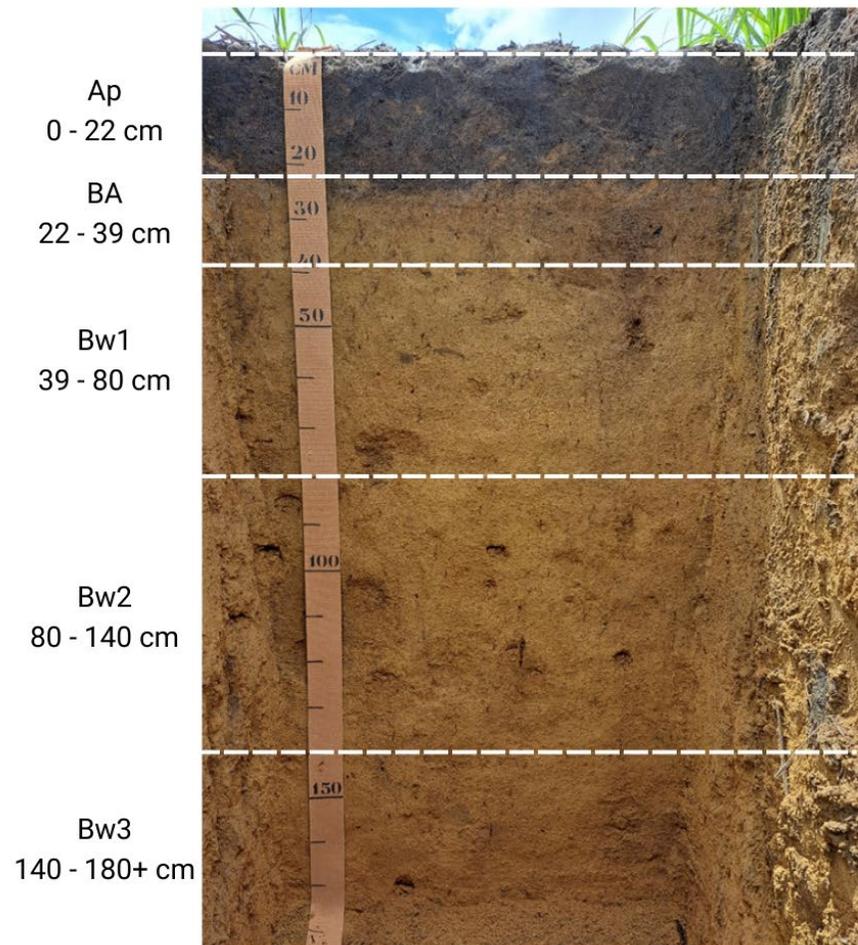
- Ap 0-22cm, bruno-escuro (10YR 3/3, úmido); argiloarenosa; fraca, pequena a média, blocos subangulares e granular; friável; plástico e pegajoso; transição plana e clara.
- BA 22-39cm, bruno-amarelado (10YR 5/4, úmido) e mosqueado pouco, pequeno a médio, distinto, vermelho-amarelado (5YR 5/6, úmido); argila; fraca, pequena a média, blocos subangulares e angulares com partes maciças; friável a firme; plástico e pegajoso; transição plana e gradual.
- Bw1 39-80cm, amarelo-avermelhado (10YR 6/6, úmido) e mosqueado pouco, médio, proeminente, vermelho (2,5YR 4/6, úmido); argila; fraca, pequena a média, blocos subangulares e angulares com partes maciças; friável a firme; plástico e pegajoso; transição plana e difusa.
- Bw2 80-140cm, amarelo-brunado (10YR 6/6, úmido); muito argilosa; fraca, pequena a média, blocos subangulares e angulares com partes maciças; friável; plástico e pegajoso; transição plana e difusa.
- Bw3 140-180cm+, amarelo-avermelhado (7,5YR 6/6, úmido) e mosqueado pouco, médio, proeminente, vermelho (2,5YR 4/6, úmido); muito argilosa; fraca, pequena a média, blocos subangulares e angulares com partes maciças porosas; friável com partes firmes; plástico e pegajoso.

RAÍZES: comuns finas e poucas médias no horizonte Ap; poucas finas e raras muito finas no horizonte BA; raras finas e muito finas nos horizontes Bw1, Bw2 e Bw3.

POROS: poros comuns pequenos e muito pequenos no horizonte Ap; poucos poros pequenos e comuns muito pequenos nos horizontes BA, Bw1, Bw2 e Bw3.

OBSERVAÇÕES: Solo descrito no estado úmido, próximo à capacidade de campo, levando a dúvida quanto a presença do estado coeso. Horizonte Bw3 foi descrito, porém, não coletado.

Figura 13 - Características da área selecionada para o perfil 02-SC, destacando-se os horizontes.



Fonte: Arquivo pessoal da Autora (2023).

## APÊNDICE C – PERFIL 3

### A – DESCRIÇÃO GERAL

PERFIL: 03-SC

DATA: 31/03/2023

CLASSIFICAÇÃO: LATOSSOLO AMARELO Distrocoeso argissólico.

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO E ESTADO: Usina Santa Clotilde S/A – Fazenda Riachão (Talhão 6146) - Rio Largo/AL

COORDENADAS: 9.4551 S, 35.8688 O.

ALTITUDE: 138,6 m (GPS).

SITUAÇÃO E DECLIVIDADE: Topo plano de tabuleiro com 0-3% de declividade.

LITOLOGIA E CRONOLOGIA: Sedimentos do Grupo Barreiras do período Terciário.

MATERIAL ORIGINÁRIO: Sedimentos argiloarenosos.

PEDREGOSIDADE: Não pedregoso.

ROCHOSIDADE: Não rochoso.

RELEVO LOCAL: Plano.

RELEVO REGIONAL: Plano, suave ondulado e ondulado.

EROSÃO: Laminar ligeira.

DRENAGEM: Bem drenado.

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA: Floresta subperenifólia.

USO ATUAL: Cultivo de cana-de-açúcar sem aplicação de vinhaça.

CLIMA: As (Köppen)

DESCRITO POR: José Coelho de Araújo Filho, Brivaldo Gomes de Almeida, Ana Lua Telles Lima.

## B – DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

- Ap 0-15cm, bruno-acinzentado muito escuro (10YR 3/2, úmido); franco-argiloarenosa; moderada a fraca, pequena a média, blocos subangulares e granular; friável; plástico e pegajoso; transição plana e clara.
- BA 15-31cm, bruno-escuro (10YR 3/3, úmido); argiloarenosa; fraca, pequena a média, blocos angulares e subangulares; friável; plástico e pegajoso; transição plana e gradual.
- Bw1 31-70cm, bruno-amarelado (10YR 5/6, úmido); argila; fraca, pequena a média, blocos angulares e subangulares; friável a firme; plástico e pegajoso; transição plana e difusa.
- Bw2 70-115cm, amarelo-brunado (10YR 6/6, úmido); argila; fraca, pequena a média, blocos angulares e subangulares; friável a firme; plástico e pegajoso; transição plana e difusa.
- Bw3 115-180cm, amarelo-avermelhado (7,5YR 6/6, úmido); argila; fraca, pequena a média, blocos angulares e subangulares; friável; plástico e pegajoso; transição plana e difusa.
- Bw4 180-210cm+, amarelo-avermelhado (7,5YR 6/8, úmido); argila; fraca, pequena a média, blocos angulares e subangulares com partes maciças porosas; friável; plástico e pegajoso.

RAÍZES: muitas finas e muito finas no horizonte Ap; comuns finas e muito finas no horizonte BA; poucas finas e muito finas no horizonte Bw1; raras finas e muito finas nos horizontes Bw2, Bw3 e Bw4.

POROS: comuns pequenos e muito pequenos no horizonte Ap; poucos pequenos e comuns muito pequenos a partir do horizonte BA.

OBSERVAÇÕES: Solo descrito no estado úmido próximo à capacidade de campo, levando dúvida quanto a presença do estado coeso. Horizonte Bw4 foi descrito, porém, não coletado.

Figura 14 - Características da área selecionada para o perfil 03-SC, destacando-se os horizontes.



Fonte: Arquivo pessoal da Autora (2023).

## APÊNDICE D – PERFIL 4

### A – DESCRIÇÃO GERAL

PERFIL: 04-SC

DATA: 30/03/2023

CLASSIFICAÇÃO: LATOSSOLO AMARELO Distrocoeso típico.

LOCALIZAÇÃO, MUNICÍPIO E ESTADO: Usina Santa Clotilde S/A – Rio Largo/AL

COORDENADAS: 9.4432 S, 35.8173 O.

ALTITUDE: 119,7 m (GPS).

SITUAÇÃO E DECLIVIDADE: Terço superior de encosta com 3-8% de declividade.

LITOLOGIA E CRONOLOGIA: Sedimentos do Grupo Barreiras do período Terciário.

MATERIAL ORIGINÁRIO: Sedimentos argiloarenosos.

PEDREGOSIDADE: Não pedregoso.

ROCHOSIDADE: Não rochoso.

RELEVO LOCAL: Suave ondulado.

RELEVO REGIONAL: Ondulado e suave ondulado.

EROSÃO: Laminar ligeiro.

DRENAGEM: Bem drenado.

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA: Floresta subperenifólia.

USO ATUAL: Mata nativa.

CLIMA: As (Köppen)

DESCRITO POR: José Coelho de Araújo Filho, Brivaldo Gomes de Almeida, Ana Lua Telles Lima.

## B – DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

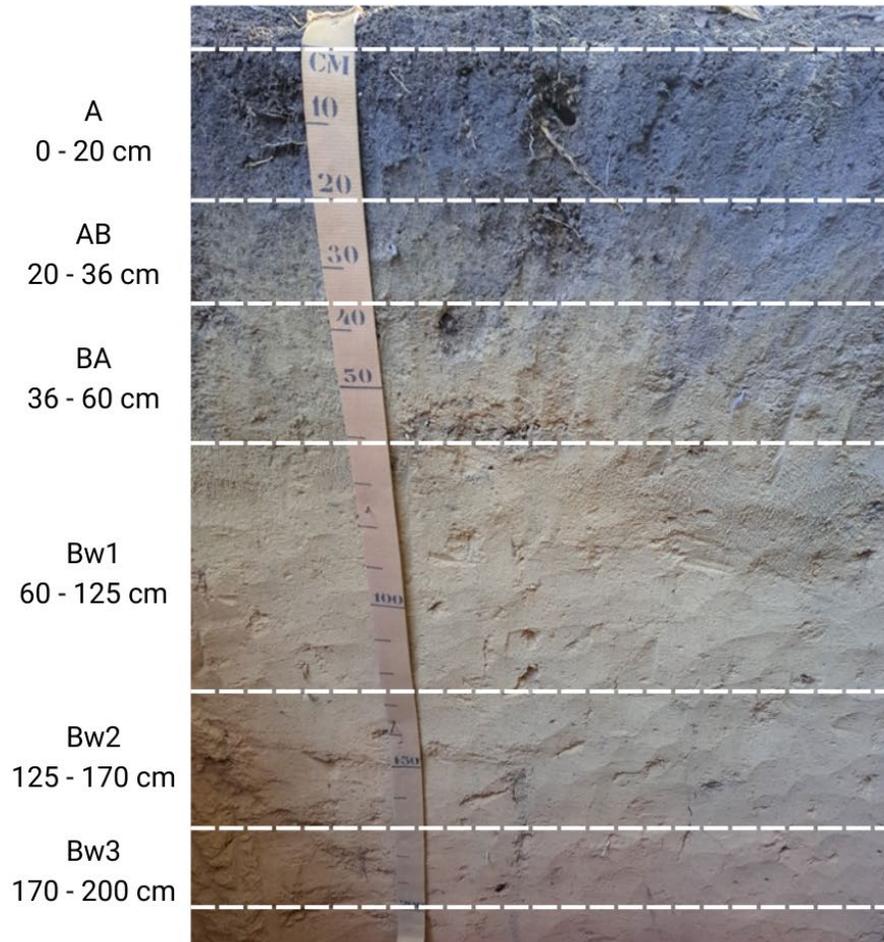
- A 0-20cm, bruno-acinzentado muito escuro (10YR 3/2, úmido); argiloarenosa; moderada a fraca, pequena a média, blocos subangulares e granular; friável; ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição plana e clara.
- AB 20-36cm, bruno (10YR 5/3, úmido); argiloarenosa; fraca a moderada, pequena a média, blocos subangulares e angulares; friável; plástico e pegajoso; transição plana e gradual.
- BA 36-60cm, bruno-amarelado (10YR 5/4, úmido); argiloarenosa; fraca, pequena a média, blocos angulares e subangulares com partes maciças; friável a firme; plástico e pegajoso; transição plana e gradual.
- Bw1 60-125cm, amarelo-avermelhado (10YR 6/6, úmido); argila; fraca, pequena a média, blocos subangulares e angulares com partes maciças; friável; plástico e pegajoso; transição plana e difusa.
- Bw2 125-170cm, amarelo-avermelhado (7,5YR 6/6, úmido); argila; fraca, pequena a média, blocos subangulares e angulares; friável; plástico e pegajoso; transição plana e difusa.
- Bw3 170-200cm, amarelo-avermelhado (5YR 6/6, úmido); argila; fraca, pequena a média, blocos subangulares e angulares; friável; plástico e pegajoso; transição plana e difusa.
- Bw4 200-220cm+, amarelo-avermelhado (5YR 6/8, úmido); argila; maciça porosa que se desfaz em blocos fracos subangulares; muito friável; plástico e pegajoso.

RAÍZES: comuns finas e médias e raras muito finas no horizonte A; comuns finas, pouco médias e raras muito finas no horizonte AB; poucas finas e médias e raras muito finas no horizonte BA; raras médias, finas e muito finas no horizonte Bw1, Bw2 e Bw3; raras finas e muito finas no horizonte Bw4.

POROS: comuns médios e pequenos e raros grandes no horizonte A; poucos médios e comuns pequenos no horizonte AB; poucos pequenos e raros médios nos horizontes BA, Bw1, Bw2; comuns pequenos e raros médios e grandes no horizonte Bw3; comuns pequenos e raros médios no horizonte Bw4.

OBSERVAÇÕES: Solo descrito no estado úmido em torno da capacidade de campo até Bw1, levando dúvida quanto a presença do estado coeso, e baixo teor de umidade a partir do Bw2. Horizonte Bw4 foi descrito, porém, não coletado.

Figura 15 - Características da área selecionada para o perfil 04-SC, destacando-se os horizontes.



Fonte: Arquivo pessoal da Autora (2023).