



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DA EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL BAIANO *CAMPUS* GUANAMBI

CARLA CAROLINE DAMASCENO BRAS

**ACESSANDO A QUALIDADE FÍSICA POR MEIO DA PERMEABILIDADE
RELATIVA DO SOLO AO AR EM MESORREGIÕES DA BAHIA**

GUANAMBI
BAHIA – BRASIL

2025



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DA EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL BAIANO *CAMPUS* GUANAMBI

CARLA CAROLINE DAMASCENO BRAS

**ACESSANDO A QUALIDADE FÍSICA POR MEIO DA PERMEABILIDADE
RELATIVA DO SOLO AO AR EM MESORREGIÕES DA BAHIA**

Dissertação apresentada ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano, *Campus* Guanambi, como parte das exigências do Curso de Mestrado Profissional em Produção Vegetal no Semiárido, para obtenção do título de Mestre Profissional.

GUANAMBI
BAHIA – BRASIL
2025

Catálogo: Leidiane Reis - CRB-5/1959
IF Baiano, Campus Guanambi

B823d Bras, Carla Caroline Damasceno

Acessando a qualidade física por meio da permeabilidade relativa do solo ao ar em mesorregiões da Bahia. / Carla Caroline Damasceno Bras. -- Guanambi, Ba., 2025.
00f.: il.

Dissertação ((Mestrado Profissional em Produção Vegetal no Semiárido) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano - Campus Guanambi.

Orientador (a): Alexsandro dos Santos Brito.

1. Solo 2. Fluxo de ar. 3. Qualidade. I.Título.

CDU: 631.41



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA BAIANO

Curso de Mestrado Profissional em Produção Vegetal no Semiárido

TERMO DE APROVAÇÃO NO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ACESSANDO A QUALIDADE FÍSICA POR MEIO DA PERMEABILIDADE RELATIVA DO SOLO
AO AR EM MESORREGIÕES DA BAHIA

Por

Carla Caroline Damasceno Brás

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado às 09:30 horas do dia 07 de março de 2025 como requisito para a conclusão do curso de Mestrado Profissional em Produção Vegetal no Semiárido do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano - *Campus* Guanambi. A candidata foi arguida pela Banca Examinadora, composta pelos professores/pesquisadores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o Trabalho APROVADO.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Alexsandro dos Santos Brito - Presidente; Prof^a. Dr^a. Joice Andrade Bonfim - Titular;
Prof. Dr. Jairo Costa Fernandes - Titular; Prof. Dr. Leandro Dias da Silva - Titular

Documento assinado eletronicamente por:

- **Joice Andrade Bonfim de Castro, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 19/03/2025 12:05:06.
- **Leandro Dias da Silva, PROF ENS BAS TEC TECNOLOGICO-SUBSTITUTO**, em 18/03/2025 17:40:14.
- **Jairo Costa Fernandes, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 18/03/2025 16:12:41.
- **Alexsandro dos Santos Brito, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 18/03/2025 15:14:34.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 18/03/2025. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifbaiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código 672632
Verificador: dcf7bdf94b
**Código de
Autenticação:**



DEDICATÓRIA

À minha querida madrinha Verilene Silva Damasceno (in memoriam), cujo empenho em me educar sempre veio em primeiro lugar. Aqui estão os resultados dos seus esforços. Com muita gratidão, amor e saudade.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ser essencial em minha vida, que faz permanecer nessa jornada da vida, o qual é meu socorro nas horas de angústia.

Agradeço ao D.Sc. Alexsandro dos Santos Brito, por abraçar o desafio de me orientar durante o curso de mestrado, bem como no desenvolvimento e redação desse trabalho. Sou grata pelos numerosos ensinamentos conferidos, por me ajudar com as dúvidas e na árdua tarefa de refinar meu raciocínio, perguntas e respostas, através da paciência e compreensão nos momentos em que mais precisei, grata pela dedicação e ensinamentos que levarei comigo.

Ao meu assistente Marcos André Alves de Oliveira por toda ajuda com a execução deste trabalho, apoio e permanecer nessa longa jornada que foi cheia de desafios, obrigada de coração.

As laboratoristas Flávia e Viviane pela ajuda, amizade, cafés e campainha nos dias de trabalho.

Enfim, agradeço ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano, respectivamente, pela acolhida. Levarei comigo lembranças muito boas, histórias para contar e ensinamentos valiosos a todos que direta ou indiretamente contribuíram para obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal no Semiárido.

Agradeço, finalmente ao IF BAIANO/PROPES pela concessão da bolsa para o projeto.

SUMÁRIO

RESUMO.....	5
ABSTRACT.....	6
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1 Porosidade do solo.....	3
2.2 Permeabilidade intrínseca do solo ao ar.....	4
2.3 Densidade do solo.....	6
2.4 Curva de compactação.....	6
2.5 Resistência à penetração.....	8
2.6 Qualidade física do solo.....	9
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	10
3.1 Localização dos solos avaliados.....	10
3.2 Caracterização física do solo.....	12
3.2.1 Densidade do solo.....	12
3.2.2 Análises granulométricas e Argila dispersa.....	12
3.2.3 Permeabilidade intrínseca do solo ao ar (K_a).....	13
3.2.4 Permeabilidade do solo ao ar relativa (K_{ar}).....	16
3.2.5 Resistência à penetração (RP).....	18
3.2.6 Gradiente de umidade do solo para ensaio de Proctor.....	19
3.3 Análises de dados.....	20
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	20
4.2 Textura do solo e Composição granulométrica.....	20
4.3 Densidade e Compactação do solo.....	23
4.4 Permeabilidade do solo ao ar.....	28
4.5 Resistência à penetração.....	32
4. CONCLUSÕES.....	34
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	35

RESUMO

BRAS, CARLA CAROLOINE DAMASCENO, M.Sc. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano *Campus* Guanambi, março de 2025. **Acessando a qualidade física por meio da permeabilidade relativa do solo ao ar em mesorregiões da Bahia.**

Orientador: Alexsandro dos Santos Brito.

A porosidade de aeração é essencial para o rendimento das culturas agrícolas, e a permeabilidade intrínseca do solo ao ar (K_a) é um atributo físico crucial para avaliar a qualidade física do solo. Este trabalho teve como objetivo avaliar a permeabilidade relativa do solo ao ar (K_{ar}), identificar os atributos físicos mais relacionados às alterações na K_a e validar a K_{ar} como um indicador sensível e eficiente da qualidade física em diferentes classes texturais de solo. O estudo foi realizado com solos das mesorregiões do Vale do Jiquiriçá (SNT), Vale do Iuiu (IUIU) e Recôncavo da Bahia (CRUZ), coletados nas profundidades de 0-0,1 m e 0,1-0,2 m. Foram determinadas a K_a , K_{ar} , densidade do solo, porosidade, resistência à penetração, textura e curva de compactação. A K_{ar} é como indicador sensível à degradação estrutural, com valores baixos indicando boa qualidade física e valores próximos de 1 associados a solos compactados. Solos do Vale do Iuiu apresentaram maior resiliência estrutural na camada superficial, enquanto Recôncavo da Bahia exibiu maior compactação e resistência à penetração. A análise revelou que a densidade do solo e a textura são os atributos mais relacionados às alterações na K_a . Esses resultados destacam a necessidade de estratégias específicas de manejo para minimizar a compactação, preservar a estrutura do solo e garantir a sustentabilidade agrícola.

Palavras-chaves: Compactação; Estrutura do solo; fluxo de ar; Porosidade do solo

ABSTRACT

BRAS, CARLA CAROLINE DAMASCENO, M.Sc. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano Campus Guanambi, February 2025. **Assessing Soil Physical Quality through Relative Air Permeability in Bahia mesoregions.**

Advisor: Alexsandro dos Santos Brito

Air porosity is essential for agricultural crop yields, and the intrinsic permeability of the soil to air (K_a) is a crucial physical attribute for assessing soil physical quality. This study aimed to evaluate the relative air permeability of the soil (K_{ar}), identify the physical attributes most related to changes in K_a , and validate K_{ar} as a sensitive and efficient indicator of physical quality in different soil textural classes. The study was conducted using soils from the mesoregions of Vale do Jiquiriçá (SNT), Vale do Iuiu (IUIU), and Recôncavo da Bahia (CRUZ), collected at depths of 0-0.1 m and 0.1-0.2 m. K_a , K_{ar} , soil density, porosity, penetration resistance, texture, and compaction curve were determined. The K_{ar} value serves as a sensitive indicator of structural degradation, with low values indicating good physical quality and values close to 1 associated with compacted soils. Soils from the Iuiu Valley showed greater structural resilience in the surface layer, while those from the Recôncavo Baiano exhibited greater compaction and penetration resistance. The analysis revealed that soil density and texture are the attributes most related to changes in K_a . These results highlight the need for specific management strategies to minimize compaction, preserve soil structure, and ensure agricultural sustainability.

Keywords: Compaction; Soil structure; air flow; soil porosity

1. INTRODUÇÃO

A atividade agropecuária causa alterações no sistema agrícola, as quais podem variar em intensidade e que podem ter efeitos benéficos ou maléficos, a depender do ecossistema no qual o agrossistema está inserido (Gouvello *et al.*, 2010).

A degradação do solo vem representando um problema ambiental grave no Brasil, devido as atividades antrópicas realizadas sem a mínima preocupação com as questões ambientais (Saraiva *et al.*, 2020). O uso e manejo do solo na agricultura é objeto de preocupação mundial, devido a degradação do solo influenciar tanto na produção de alimentos quanto nas características ambientais desse recurso, onde o emprego de um manejo impróprio pode levar a perda da qualidade do solo e, conseqüentemente, perda de sua produtividade (Costa *et al.*, 2015).

A porosidade é um atributo físico do solo relacionado à sua função de condutor de ar, que depende da estrutura dos poros e de aspectos geométricos como tamanho, área, forma, continuidade e conectividade (Mentges *et al.*, 2016). No processo de degradação do solo, os poros são os primeiros a sofrerem modificações, principalmente os macros e mesoporos, afetando a distribuição do tamanho de poros e, conseqüentemente, o processo de troca gasosa. A troca contínua entre os gases presentes no solo com os gases da atmosfera é definida como aeração.

A distribuição do tamanho de poros condiciona o comportamento físico-hídrico do solo, logo sua definição é necessária à quantificação desses processos do solo, inclusive a permeabilidade intrínseca do solo ao ar (K_a). Isso tem um efeito direto no crescimento das culturas, pois quando o teor de água do solo é alto, pode ocorrer hipoxia ou anoxia e, como resultado, o processo fotossintético pode ser afetado, devido às limitações estomáticas e não estomáticas (Tian *et al.*, 2019).

A permeabilidade intrínseca foi introduzida por Kirkham (1946) como uma quantificação para descrever a permeabilidade em termos da estrutura do solo e é independente do fluido utilizado para suas medidas. A K_a é fortemente influenciada pelo conteúdo de água no solo, mas fatores como distribuição, continuidade, tortuosidade e forma dos poros também exercem influência direta no fluxo de ar no solo. A investigação da

geometria de poros por meio da Ka , permite fornecer uma melhor compreensão da aeração, fluxo de água, crescimentos de raízes através dos poros do solo (Roseberg; McCoy, 1990).

A Ka é um atributo que pode indicar problemas estruturais, uma vez que é interpretada como a área livre para a circulação de ar no espaço poroso, além da possibilidade de estabelecer correlações com outros atributos do solo que são de difícil determinação, como é o caso da condutividade hidráulica (Loll *et al.*, 1999, Rahmati; Neyshaboury, 2016).

Alguns índices foram criados com esse objetivo, como é o caso do índice baseado na razão entre a condutividade do solo ao ar e a porosidade de aeração, determinadas com amostras equilibradas na tensão de 5,0 kPa (Groenevelt *et al.*, 1984) e do índice de organização da estrutura, que é semelhante ao mencionado acima, com a diferença de que usa a permeabilidade do solo ao ar em vez da condutividade ao ar (Blackwell *et al.*, 1990).

A Ka e a porosidade de aeração (α_a) têm sido relacionadas na tentativa de avaliar possíveis diferenças na geometria dos poros, resultantes das práticas de manejo adotadas (Blackwell *et al.*, 1990). A razão entre Ka e volume de macroporos (Blackwell *et al.*, 1990) ou Ka e α_a (Ball *et al.*, 1994) é considerada uma medida da continuidade dos poros e organização destes.

O desenvolvimento de índices de qualidade física do solo permite estabelecer parâmetros de avaliação do estado estrutural do solo, a fim de estabelecer estratégias de manejo que permitam a maximização do potencial agrícola do solo. Na avaliação da estrutura, procuram-se atributos que dimensionem a porosidade e a distribuição de tamanho de poros, assim como a implicação relativa à permeabilidade e à rigidez dos poros, em função da estabilidade das unidades sólidas que compõem a estrutura do solo (Ferreira, 2010).

Este trabalho tem como objetivo avaliar a qualidade física por meio da Ka , determinar quais os atributos físicos do solo estão mais relacionados com as alterações nos valores de Ka , de modo a validar a permeabilidade intrínseca relativa do solo ao ar (Kar), quanto a eficiência e sensibilidade como indicador da qualidade física em diferentes classes texturais.

O entendimento dos indicadores de qualidade do solo é útil na avaliação e/ou monitoramento das condições do solo, bem como na investigação das alterações dinâmicas do solo. Em função disso, a avaliação do índice Kar é uma grande opção para o adequado manejo dos solos.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Porosidade do solo

A estrutura do solo define uma geometria de poros, que influencia decisivamente a movimentação da água e do ar no perfil. Nesse aspecto, a distribuição de poros é muito importante, haja vista que a macroporosidade é responsável pela livre circulação da água e aeração do solo e a microporosidade pela retenção da água (Brito, 2010; Hirmas *et al.*, 2018; Wilson; Dorrance, 2018).

Dependendo da distribuição dos vários tipos de poros do solo, a água e o ar podem se movimentar com maior ou menor facilidade. Como a macroporosidade é a primeira fração de poro afetada pelas atividades antrópicas, torna-se necessária uma atenção especial quanto ao manejo a ser adotado (Brito, 2010). Sistemas pouco conservacionistas podem ter uma maior compactação do solo e, conseqüentemente, pode ser verificada com a diminuição da porosidade total, juntamente com o aumento da densidade do solo (Leão *et al.*, 2020).

A distribuição de tamanho, a tortuosidade e a conectividade dos poros são as características da geometria do espaço poroso que mais influenciam no transporte de fluidos no solo (Iversen *et al.*, 2001; Tuli *et al.*, 2005; Chief; Ferré; Nijssen, 2006). Já a propriedade relevante ao transporte, referente ao fluido, é a viscosidade (Libardi, 2018). A porosidade do solo está correlacionada com atributos como densidade e resistência à penetração do solo, as quais influenciam o desenvolvimento das culturas.

Um sistema poroso, com boa distribuição de tamanho de poros, é responsável pela armazenagem da água no solo para as raízes das plantas, e condução da água no solo, além de oferecer condições para a respiração dos microrganismos e das raízes das plantas. As características do espaço poroso, como volume, tamanho, forma e sua distribuição, podem ser usadas para estimar alguns atributos do solo, uma vez que a qualidade do espaço poroso afeta o movimento do ar e da água no meio (Rodrigues *et al.*, 2011).

A porosidade do solo pode ser classificada em duas partes: porosidade textural e estrutural. A porosidade estrutural é resultado da agregação das partículas secundárias do solo, microfissuras, bioporos e macro agregados. A porosidade textural é compreendida entre as

partículas primárias do solo. A primeira é fortemente afetada por atividade antrópicas, como preparo de solo e compactação. A segunda, por sua vez, sofre pouco efeito do manejo de solo sobre suas características (Dexter, 2004).

Solos arenosos que apresentam maior quantidade de macroporos e menor força de adsorção de água favorece uma capacidade de condução hidráulica, quando comparado a solos argilosos (Brady; Weil, 2013). Solos argilosos são formados por partículas de menor tamanho, possuem mais microporos, baixa capacidade de infiltração e maior capacidade de armazenamento da água (Brady; Weil, 2013; He *et al.*, 2014).

2.2 Permeabilidade intrínseca do solo ao ar e relativa

A permeabilidade ao ar do solo é um parâmetro essencial para avaliar a qualidade física do solo, pois influencia diretamente a aeração, a respiração radicular e a atividade microbiana. Este estudo investigou a permeabilidade intrínseca ao ar (K_a) em solos submetidos a condições de campo e após compactação, avaliando duas profundidades em diferentes regiões.

A compactação do solo reduz significativamente a permeabilidade ao ar (K_a), especialmente em camadas mais profundas (0,10-0,20 m). Solos não compactados, principalmente nas profundidades de 0-0,10 m, apresentaram valores de K_a elevados ($>70 \mu\text{m}^2$), indicando boa qualidade física inicial. Este padrão foi observado claramente nos tratamentos IUIU10, SNT10 e SNT20, que mantiveram uma maior capacidade de troca gasosa em comparação às camadas mais profundas e aos solos compactados.

A permeabilidade intrínseca do solo ao ar (K_a) é um atributo físico sensível aos efeitos dos sistemas de uso e manejo na estrutura do solo e pode fornecer uma descrição significativa do estado de compactação do solo (Phillips; Kirkham, 1962). Jesus *et al.* (2017) observaram que a permeabilidade do solo ao ar medida com amostras drenadas sob uma tensão de 6 kPa proporciona melhor avaliação da qualidade física.

Alguns índices foram criados para estabelecer correlações com outros atributos do solo, como o índice baseado na razão entre a condutividade do ar do solo e a porosidade de aeração, determinada com amostras equilibradas a 5,0 kPa de tensão (Groenevelt *et al.*, 1984).

Os indicadores de qualidade física do solo existentes são gerados para situações específicas, exigindo maior número de estudos para validação e aplicação confiável, o que

constitui uma oportunidade para desenvolver novos indicadores de qualidade (Stefanoski et al., 2013). Assim, a criação de um índice que permita uma distinção mais eficiente da qualidade física do solo é fundamental para a tomada de decisão quanto ao manejo do solo, a exemplo da permeabilidade relativa do solo ao ar, proposto por Carvalho et al. (2019).

O primeiro aparato para medição da Ka em amostra foi proposto por Kirkham (1946), medindo o fluxo de ar através de uma amostra de solo submetida a um baixo gradiente de pressão de ar, decrescente com o tempo. A Ka é uma medida que descreve a habilidade do meio em prover a troca de gases entre o solo e a atmosfera, em resposta a um gradiente de pressão (Rodrigues, 2009; Silveira et al., 2011; Guedes Filho et al., 2015; Alam, 2015; Jesus et al., 2017).

A permeabilidade intrínseca, como a própria denominação já denota, é uma propriedade inerente ao solo e reflete a influência conjunta das propriedades relacionadas ao espaço poroso (Libardi, 2018). A permeabilidade intrínseca do solo ao ar pode ser definida como a habilidade do solo em transmitir ar através de poros contendo ar e interconectados (Chief; Ferré; Nijssen, 2006).

Solos com alto Ka têm maior capacidade de trocar gases com a atmosfera, ou seja, possuem melhor aeração (Menezes et al., 2018). Isso é importante porque a maior concentração de CO₂ no solo, em detrimento do O₂, devido às atividades metabólicas das raízes e da biota do solo, pode comprometer os rendimentos das culturas agrícolas quando a renovação do ar no solo é limitada.

A importância da quantificação da Ka deve-se, por exemplo, à necessidade de se caracterizar o espaço poroso e de se identificar mudanças na estrutura do solo ocasionadas pelas práticas de manejo (Blackwell et al., 1990; Cavalieri et al., 2009). Jesus et al. (2017) identificaram alterações na densidade do solo e na Ka entre as camadas 0-0,1 e 0,1-0,2 m do Latossolo Vermelho Amarelo, ocasionadas pelo manejo inadequado do solo.

A determinação da Ka em amostras indeformadas pelo método da pressão decrescente é um método eficiente (Silva et al., 2009). No entanto, ainda há carência de informações acerca da Ka, por razões ligadas aos métodos de medida e à baixa disponibilidade de equipamentos (Silva et al., 2009).

O incremento tecnológico, sobretudo na construção de sensores (especificamente microcontroladores e sensores de pressão), foi um aliado na evolução para a estimativa da Ka,

a exemplo do equipamento proposto por Neves; Silva; Leão (2004) e Silveira et al. (2011), os quais utilizaram a tecnologia para desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados com um transdutor de pressão diferencial.

Com a contínua necessidade de facilitar cada vez mais as análises, a fim de serem mais precisas e confiáveis, Silveira et al. (2011) desenvolveram um sistema de aquisição de dados para permeâmetro de carga decrescente, que possibilitou a determinação da K_a utilizando uma câmara de desumidificação para padronização do ar na análise e um conjunto de sensores de temperatura e umidade relativa para estimativa da massa de água removida durante o processo. Além disso, utilizaram sensor de pressão diferencial e microcontrolador, que permitiram maior precisão na determinação de K_a .

2.3 Densidade do solo

A densidade do solo (D_s) é um parâmetro físico fundamental que reflete a estrutura do solo, uma vez que esta depende do arranjo das partículas, da orientação destas e da quantidade de espaços porosos presentes. Além disso, a densidade está diretamente associada à porosidade, à capacidade de armazenamento de água e às trocas gasosas, sendo um indicador importante da qualidade do solo (Tian *et al.*, 2022; Leuther, 2023).

A textura do solo também desempenha um papel crucial nesse contexto. Solos arenosos, por exemplo, frequentemente apresentam densidades mais altas, variando entre 1,35 e 1,85 Mg m⁻³ (Araújo *et al.*, 2004), enquanto solos argilosos possuem densidade mais baixa, geralmente entre 0,95 e 1,25 Mg m⁻³ (Tormena; Silva; Libardi, 1998; Araújo *et al.*, 2004). Isso ocorre porque a microagregação das partículas de argila aumenta a porosidade intra-agregado, o que reduz a densidade (Klein, 2005). Por outro lado, solos arenosos possuem maior densidade devido à maior densidade das partículas de quartzo e ao menor teor de matéria orgânica, característica comum nesses solos (Quang; Giao, 2023).

2.4 Curva de compactação

Com os dados obtidos a partir do ensaio de compactação, é gerada a curva de compactação, que consiste numa regressão polinomial de segunda ordem, entre a densidade do solo compactado e o respectivo conteúdo de água da amostra. Na curva de compactação são

encontrados, geralmente, os pontos ascendentes e descendentes. O primeiro é denominado ramo seco e o segundo ramo úmido.

Ramos são unidos por uma função parabólica, a qual define uma densidade máxima de compactação, que possui uma umidade ótima para compactação correspondente. No ramo seco, a umidade do solo é baixa e há a ação da capilaridade. No ramo úmido, a água mais abundante se encontra livre no solo, atenuando boa parte da fração de energia de compactação e, independente da classe de solo, as curvas de compactação se assemelham quanto à forma.

A umidade ideal do solo influencia significativamente a compactação do solo, particularmente quando os níveis de umidade se aproximam da capacidade de campo (Mantovani, 1986).

Pesquisas indicam que o teor ótimo de umidade (TOU) para compactação está intimamente relacionado à densidade seca máxima (DSM) do solo, com variações dependendo do tipo de solo e das práticas de uso da terra. Essa relação ressalta a importância de manter os níveis de umidade próximos à capacidade de campo para alcançar a compactação ideal. Diferentes classes de solo exibem diferentes TOU e densidades máximas de compactação. Nos trópicos úmidos, descobriu-se que o TOU é afetado pela matéria orgânica do solo e pela distribuição do tamanho das partículas, com relações significativas entre DMS e TOU (Udom; Ehilegbu, 2018). A capacidade de campo (CC) é fundamental para entender a retenção de umidade nos solos.

Manter a umidade perto da CC é essencial para estratégias de irrigação eficazes, pois minimiza o uso de água e garante a saúde da cultura (Lemos-Paião *et al.*, 2022). À medida que se aumenta a energia aplicada, a quantidade de água necessária para obter a máxima compactação diminui, o que é um critério de alerta importante na utilização de maquinários pesados, pois, na agricultura, a energia de compactação equivale a uma pressão de 140 kPa em solo franco-arenoso (Roessler *et al.*, 2022).

Estudos demonstram que, à medida que a energia aplicada ao solo aumenta, o teor de umidade necessário para atingir a densidade máxima de compactação também diminui, evidenciando a necessidade de cuidado no uso de equipamentos pesados para evitar a compactação excessiva (Ramos *et al.*, 2013).

A interação entre a pressão do maquinário e o solo influencia diretamente a estrutura do solo, o que pode levar à redução da porosidade e ao comprometimento da infiltração da

água, além de afetar o crescimento das raízes (Feitosa *et al.*, 2015). Assim, a monitorização da pressão de compactação e da energia aplicada é crucial para garantir o manejo sustentável do solo e evitar efeitos adversos, como a degradação e a compactação excessiva (Luciano *et al.*, 2012).

A compactação do solo é um fenômeno que resulta da aplicação de pressão, que, quando excessiva, pode comprometer a estrutura do solo e a sua funcionalidade (Sampietro *et al.*, 2015). A densidade do solo e a resistência à penetração são indicadores críticos que refletem a compactação e a saúde do solo (Silva; Castro, 2014).

Umidade do solo desempenha um papel fundamental na compactação, pois a presença de água facilita o rearranjo das partículas sólidas, permitindo uma compactação mais eficiente até certo ponto (Silva *et al.*, 2000). Contudo, a compactação excessiva pode levar a uma diminuição da porosidade, o que, por sua vez, reduz a capacidade do solo de reter água e nutrientes, prejudicando o crescimento das plantas (Severiano *et al.*, 2010). Portanto, práticas de manejo que considerem a umidade e a pressão aplicada são essenciais para a preservação da qualidade do solo e a sustentabilidade agrícola (Braida *et al.*, 2006).

2.5 Resistência à penetração

Diferentes classes texturais de solos podem indicar variações nos atributos físicos dos solos avaliados e na resistência à penetração, como indica Leão *et al.* (2020). A resistência mecânica do solo à penetração (RP) é um importante indicador da qualidade física dos solos cultivados e um atributo físico que tem efeito direto na fisiologia vegetal, podendo chegar a limites prejudiciais às plantas, onde há impedimento mecânico ao crescimento das raízes (Kuhwald *et al.*, 2020).

Valores maiores que 2,0 MPa, passa a limitar o desenvolvimento radicular e está relacionada com a redução da porosidade de aeração, configurando um estado físico denominado de compactação (Suzuki *et al.*, 2022). A constatação desse estado físico com maior frequência no setor produtivo é devido à difusão do uso do penetrógrafo no meio agrícola, já que este é de fácil utilização e obtenção de dados, diagnosticando a resistência do solo à penetração das raízes e na detecção de camadas compactadas (Moreira *et al.*, 2014).

Igualmente à resistência à penetração, a densidade é amplamente utilizada para avaliação da compactação, que representa um dos principais problemas para a agricultura, por

limitar o crescimento das plantas. Para um bom desenvolvimento da planta, a porosidade de aeração necessita ser de, no mínimo, 10% da porosidade total (Guedes Filho *et al.*, 2015). Valores da densidade associada à compactação de restrição para o crescimento radicular são iguais a 1.650 kg m^{-3} para solos arenosos e a 1.450 kg m^{-3} para solos argilosos (Reinert; Reichert, 2006).

Desta forma, na quantificação e descrição da curva de resistência à penetração (CRS) são incorporados diferentes fatores associados com a degradação física do solo, permitindo estabelecer os valores críticos de Ds ou de θ associados com valores limitantes de RP (Blainski *et al.*, 2008). É importante a determinação da curva de resistência do solo nos estudos dos efeitos da compactação sobre as condições físicas, podendo ser utilizada como ferramenta de manejo (Imhoff; Silva; Tormena, 2000).

A determinação da RP deve incorporar variáveis como a densidade e a umidade do solo, as quais influenciam diretamente a resistência à penetração. Para solos mais compactados, a densidade e a umidade tornam-se fatores limitantes na penetração da sonda, o que resulta em valores mais elevados de RP, comprometendo o desenvolvimento das raízes e a absorção de água e nutrientes pelas plantas (Lardy *et al.*, 2022).

2.6 Qualidade física do solo

A qualidade do solo está relacionada com sua funcionalidade dentro dos ecossistemas naturais ou manejados, significando a capacidade deste em sustentar a atividade biológica, promover o crescimento e a saúde das plantas e animais, e manter a qualidade ambiental (Doran; Parkin, 1994). De acordo com Oliveira *et al.* (2015).

Os atributos físicos do solo são alterados em função do manejo a que estão submetidos, sendo esses efeitos muitas vezes agravados pelo constante uso de implementos e pelo tráfego de máquinas durante o preparo convencional do solo. A estrutura do solo é um dos fatores mais importantes para o crescimento das plantas, pois influencia diretamente nas condições de adensamento, compactação, encrostamento, infiltração de água, suscetibilidade à erosão (Campos *et al.*, 1995), e aeração do solo (Leuther, 2023).

A estrutura pode ser avaliada por meio de indicadores como a densidade do solo, macro e microporosidade, estabilidade de agregados, resistência à penetração e infiltração da água no solo, entre outros atributos. Esses indicadores revelam o efeito do manejo sobre o

solo, sendo de fácil mensuração, com respostas rápidas e razoável precisão (Campos *et al.*, 1995; Doran, 1997).

Através dos indicadores de qualidade do solo, é possível avaliar as alterações ocorridas em um dado ecossistema de forma quantitativa ou qualitativa (Silva, 2019). O estudo desses atributos ao longo do tempo permite quantificar a magnitude e a duração das alterações provocadas por diferentes sistemas de manejo no solo (Freitas *et al.*, 2017).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização dos solos avaliados

A pesquisa foi conduzida inicialmente em campo, com solos das seguintes mesorregiões: Jequié (especificamente no município de Santa Inês) onde acontecia o cultivo de consórcio de palma; Guanambi (especificamente o município de Iuiú) área de pastagem e Santo Antônio de Jesus (especificamente no município de Cruz das Almas) onde acontecia o cultivo de fruta pão.

As amostras de solo com estruturas deformada e indeformadas foram coletadas nas camadas de 0-0,1 e 0,1-0,2 m (Figura 1), as quais foram utilizadas para determinar: a) com amostras indeformadas: permeabilidade ao ar (K_a), permeabilidade relativa do solo ao ar (K_{ar}), densidade do solo (DS), porosidades e resistência a penetração (RP); b) com amostras deformadas: frações granulométricas e textura do solo, argila dispersa e a curva de compactação do solo.

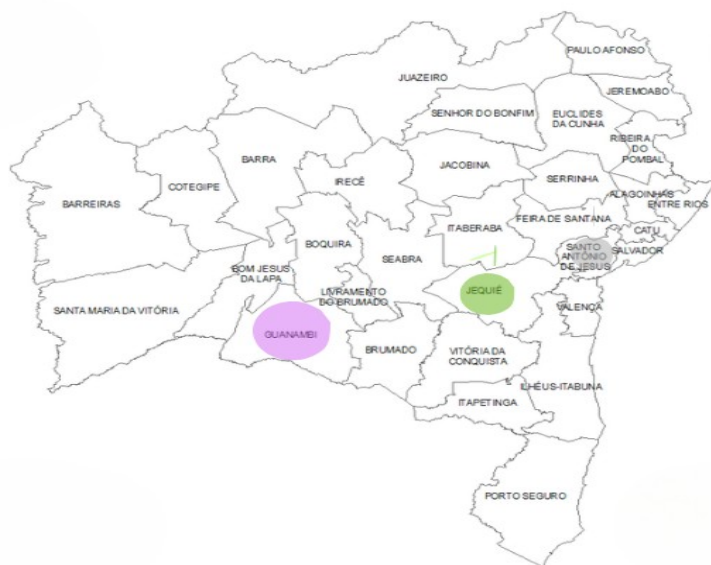
Caracterização da Região: Mesorregião de Jequié – Bioma Caatinga

As amostras analisadas foram coletadas no Vale do Jiquiriçá, especificamente no campo experimental do Instituto Federal Baiano (IF Baiano), campus Santa Inês. Este está localizado na latitude 13°14'28" Sul e longitude 39°34'21" Oeste, a uma altitude de 301 metros acima do nível do mar. O clima predominante é do tipo Aw a Am — tropical quente e úmido — segundo a classificação climática de Köppen (Alvares *et al.*, 2020). Apresenta pluviosidade média anual de aproximadamente 1.044,48 mm, umidade relativa do ar em torno de 63% e temperatura média anual de 27,7 °C (INMET, 2020).

Mesorregião de Guanambi – Bioma Caatinga

As amostras foram coletadas no Vale do Iuiú, em uma área de pastagem localizada em propriedade rural na latitude 14°24'50" Sul e longitude 43°32'46" Oeste, a uma altitude de 490 metros acima do nível do mar. O clima predominante é do tipo Aw a Am — tropical quente e úmido — segundo a classificação de Köppen (Alvares et al., 2020). A região apresenta pluviosidade média anual de 1.044,48 mm, umidade relativa do ar em torno de 26% e temperatura média anual de 29,3 °C (INMET, 2020).

Figura 1 – Demarcação das mesorregiões no mapa da Bahia.



Mesorregião de Santo Antônio de Jesus – Bioma Mata Atlântica

As amostras foram coletadas no município de Cruz das Almas, na região do Recôncavo Baiano, especificamente na fazenda experimental do campus da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB). A área está situada na latitude 12°05'58" Sul e longitude 45°47'54" Oeste, a uma altitude de 769 metros acima do nível do mar. O clima predominante é do tipo Aw a Am — tropical com estação seca — conforme a classificação de Köppen (Alvares et al., 2020). A pluviosidade média anual é de aproximadamente 1.224 mm, a

umidade relativa do ar gira em torno de 80% e a temperatura média anual é de 24,5 °C (INMET, 2020).

3.2 Caracterização física do solo

3.2. 1 Densidade do solo

A densidade do solo foi determinada pelo método do cilindro volumétrico para os pontos amostrais, utilizando um extrator tipo Uhland, com cilindros volumétricos apresentando, aproximadamente, 0,05 m de altura de diâmetro, em três repetições, utilizando um paquímetro digital. Com a medida deste volume médio do cilindro volumétrico, a altura, diâmetro médios, e massa de solo seco foi calculada a densidade do solo (DS).

Para evitar danos às amostras durante o transporte do campo para o laboratório, utilizou-se filme de PVC e caixa com revestimento interno de espuma. No laboratório, as amostras foram convenientemente preparadas, retirando o excesso de solo do cilindro, com auxílio de faca de serra fina, e a colocação, na extremidade inferior de cada uma, de recorte de papel mata-borrão, preso com adesivo instantânea, para evitar perdas de material.

Feito isso, as amostras foram levadas à estufa para secar (105 °C, durante 24 horas) e, então, pesadas numa balança de precisão, com dois dígitos, para a determinação da massa de solo seco.

Devido à textura e a outros atributos físicos do solo, têm-se buscado a normalização dos limites de Ds, utilizando a densidade relativa do solo (Klein., 2008). A densidade relativa (DR) é a razão entre a densidade máxima de compactação, obtida pelo ensaio de Proctor, e a densidade do solo (Marcolin; Klein, 2011).

3.2.2 Análises granulométricas e Argila dispersa

Foram realizadas no Laboratório de Física do Solo do IF Baiano/Campus Guanambi e o método utilizado foi o da Pipeta (Gee; Or, 2002). Entretanto, esse laboratório adota algumas variações do método citado as quais foram seguidas para as análises feitas nesse trabalho. O dispersante utilizado foi uma mistura das soluções de hidróxido de sódio (4 g L⁻¹) e de hexametáfosfato de sódio (10 g L⁻¹), conforme metodologia do IAC (Camargo *et al.*, 1986), foram utilizados 40 g de solo, 250 mL de água destilada e 100 mL da solução dispersante.

Para promover a dispersão das partículas do solo, as amostras foram agitadas por 16 horas em agitador orbital tipo Wagner, a 60 rpm.

Após o processo de dispersão, a suspensão passou por uma peneira com malha de 0,053 mm (Figura 2A) para a separação da areia e a quantificação do conteúdo de argila foi feita por alíquota de 25 mL (Figura 2B) e, por fim, o silte sendo calculado por diferença, após a determinação da massa seca das frações areia e argila (estufa a 105 °C, por 24 horas).

O procedimento para a determinação da argila dispersa é semelhante. Entretanto, não se utilizou a solução dispersante, a qual foi substituída por 100 mL de água deionizada.

Figura 2 - Procedimento de dispersão para a determinação da argila e de pipetagem para análise granulométrica do solo.



3.2.3 Permeabilidade intrínseca do solo ao ar (K_a)

O modelo de determinação da permeabilidade intrínseca do solo ao ar (K_a), pelo método da pressão decrescente desenvolvido por Kirkham (1946), se baseou no modelo de Darcy. Dessa forma, exige-se que o regime de fluxo seja laminar e para o caso do fluxo de gás, exige-se que o processo de fluxo seja isotérmico.

Para determinar a K_a , foram utilizadas as amostras de solo indeformada e com pressão manométrica de 10 kPa (10 kPa acima da pressão atmosférica local), fazendo com que o fluxo

de ar seja laminar e não provocasse modificações significativas nos filmes de água dispostos nas superfícies dos agregados do solo.

A permeabilidade do solo ao ar foi medida em amostras com estrutura indeformada, coletadas nas camadas de 0-0,1 e 0,1-0,2 m, para os três solos avaliados, e com cinco repetições. Essas amostras foram coletadas (em trincheiras) com um extrator tipo Uhland e cilindros volumétricos com as seguintes dimensões médias: 0,047 m de diâmetro e 0,05 m de altura. Para o transporte ao laboratório, as amostras com estrutura indeformada foram envolvidas por filme plástico não poroso e colocadas em caixa plástica com o interior revestido por plástico bolha, para evitar alterações durante o transporte.

No laboratório, as amostras foram convenientemente preparadas, retirando-se o excesso de solo, de forma ao volume de solo ser igual ao volume do anel volumétrico, e colando-se na sua base um recorte, com diâmetro igual ao do anel volumétrico, de papel mata-borrão, para evitar perda de solo e melhorar o contato da amostra com a superfície porosa (mata-borrão), durante o processo de estabilização das tensões no funil de Haines (Figura 3).

Figura 3 - Sistema do funil de Haines, utilizado para equilíbrio de água no solo das amostras nas tensões 3, 6 e 10 kPa.



A permeabilidade ao ar foi medida com as amostras equilibradas nas tensões de 3 kPa, 6, e 10 kPa de tensão utilizando o funil de Haines. Como a permeabilidade do solo ao ar é prejudicada por excesso de água ou por uma estrutura do solo degradada ou mesmo maciça, que pode ser originada de um processo de compactação, a escolha dessa tensão torna-se mais importante para a avaliação desse atributo do solo.

Após o equilíbrio, a amostra foi pesada em balança de duas casas decimais, o mata-borrão foi removido, com auxílio de um estilete, e foi realizada uma leve escarificação da extremidade da amostra de solo que ficou em contato com a superfície porosa.

Então, a amostra foi acoplada ao permeâmetro para determinação da K_a . O permeâmetro (Figura 4 e Figura 5) é constituído por três núcleos: 1) compartimento de injeção; 2) cilindro de ar pressurizado (volume de $0,031 \text{ m}^3$) e 3) sistema de aquisição e processamento de dados (Silveira *et al.*, 2009). O sistema de aquisição é constituído pelo módulo eletrônico e pelo programa computacional PermeAR (Silveira *et al.*, 2009).

Figura 4 - Permeâmetro de carga decrescente.



O módulo eletrônico do sistema de aquisição é constituído por um transdutor de pressão diferencial (modelo MPXV5004DP, Freescale) com faixa de operação de 0 a 3,92 kPa, sensibilidade de $1,0 \text{ mV Pa}^{-1}$ e acurácia de $\pm 1,5\%$ da voltagem de fundo de escala. Todos os sensores foram interligados a um microcomputador, por intermédio de um microcontrolador (modelo Basic Step M8, Tato ind.) que possui conversor A/D interno de 10 bits (oito canais) e referência de voltagem interna.

As leituras da pressão do ar no interior do cilindro do permeâmetro foram registradas em função do tempo. Os dados foram exportados para a planilha Excel, usando a interface do próprio sistema de aquisição permear v.1.0 (Silveira *et al.*, 2011).

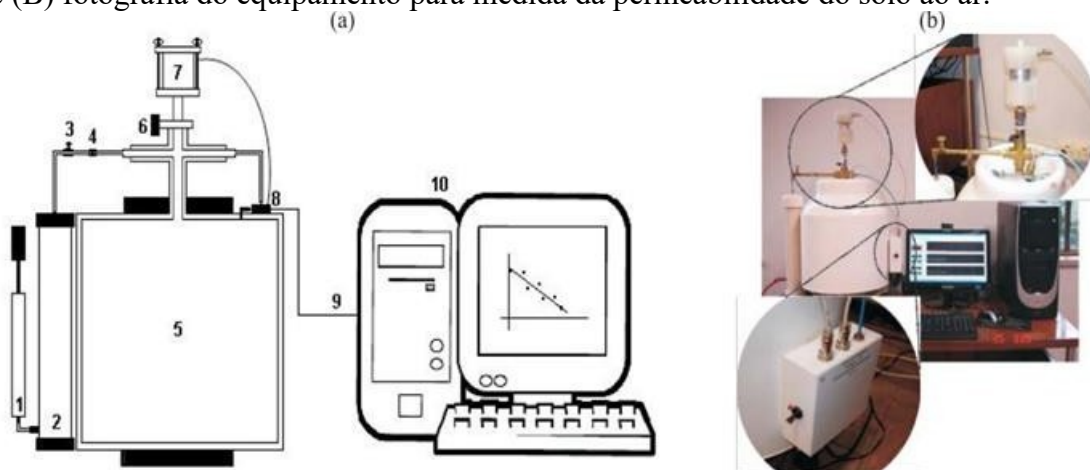
As amostras de solo foram fixadas no permeâmetro, utilizando a fita Silver Tape®. O ar foi bombeado para o interior de um cilindro de ar, com volume de $0,03135 \text{ m}^3$, até atingir

pressão de 1,0 kPa. Iniciou-se o processo de determinação da permeabilidade do solo ao ar, abrindo-se a válvula do equipamento e ligando-se o registro das leituras simultaneamente. A K_a (μm^2) foi calculada por meio da Equação 1:

$$K_a = \frac{(2,3 L \mu V)}{A P_{atm}} \times \nabla S \nabla t, \quad (1)$$

em que μ é o coeficiente de viscosidade dinâmica do ar ($1,8368 \times 10^{-5} \text{ Pa s}$ a 20°C); V , o volume do reservatório utilizado ($0,03135 \text{ m}^3$); P_a , a pressão do ar atmosférico (Pa); L é a altura da amostra (m); A é a área da base da amostra (m^2); e S , o módulo da declividade da equação da reta definida entre as variáveis pressão (P) e Log do tempo (t) (Silva *et al.*, 2009; Silveira *et al.*, 2011).

Figura 5 - Diagrama esquemático (A) constituído por: 1 – bomba de ar; 2 – cilindro de desumidificação do ar, preenchido com sílica gel; 3 – válvula de controle de fluxo; 4 – válvula de escape para ajuste fino da pressão interna; 5 – cilindro de ar; 6 – válvula de controle de fluxo; 7 – compartimento de alocação da amostra indeformada de solo; 8 – sistema de aquisição de dados constituído por transdutor de pressão e sensores de temperatura e umidade; 9 – cabo de transmissão de dados (DB 9); 10 – microcomputador para processamento dos dados; e (B) fotografia do equipamento para medida da permeabilidade do solo ao ar.



Fonte: Silveira *et al.*, (2011).

3.2.4 Permeabilidade do solo ao ar relativa (K_{ar})

A permeabilidade do solo ao ar relativa (K_{ar}) foi medida em amostras de solo numa condição física restritiva, ou seja, quando a resistência do solo à penetração estiver entre 2 e

2,5 MPa. Para tanto, foram coletadas amostras de solo, nas mesmas camadas da determinação da permeabilidade ao ar, com estrutura deformada para a realização do ensaio de Proctor normal (Klein; Madalosso; Baseggio, 2013), o qual conduz o solo à máxima compactação, nas mesmas áreas de coleta das amostras de solo com estrutura indeformadas, utilizadas para a determinação da K_a , porosidade, densidade e resistência à penetração. Simultaneamente à elaboração da curva de compactação, se coletou amostras em cilindros para determinar em qual condição o solo, a resistência à penetração era impeditiva ao crescimento radicular. Em seguida, amostras de solo foram acondicionadas no Proctor Normal nessas condições, de modo a se conseguir sete repetições para realizar as análises estatísticas.

Essas amostras foram saturadas e equilibradas na mesma tensão (10 kPa em funil de Haines) usada na determinação da K_a . Após o equilíbrio, foram pesadas e acopladas ao permeâmetro, onde foi determinada a K_a para a condição de solo compactado (K_{ac}).

Com as permeabilidades intrínsecas do solo ao ar determinadas para duas condições físicas (condição de campo e de solo compactado), foi calculada a permeabilidade ao ar relativa, por meio de uma relação entre a K_a em condição de campo e a K_a numa condição de resistência à penetração restritiva, conforme Carvalho *et al.* (2019).

Quanto à interpretação dos resultados, quando a K_{ar} for próxima ou igual à unidade, o solo está degradado e K_{ar} é mais próximo a zero, representará solo em boa qualidade física.

A K_{ar} foi calculada por meio de determinação da K_a em amostras de solo na pior condição física. Para tanto, foram coletadas amostras de solo, com estrutura deformada, nas mesmas áreas de coleta das amostras de solo com estrutura indeformadas, utilizadas para a determinação da permeabilidade do solo ao ar, porosidade, densidade e resistência à penetração do solo, para a realização do ensaio de Proctor normal (Klein.; Madalosso; Baseggio, 2013), o qual conduz o solo à máxima compactação. Nas amostras com densidades do solo máximas, foram coletadas sub amostras de solo com auxílio de uma prensa hidráulica, utilizando dois cilindros volumétricos de aproximadamente 0,05 m de diâmetro, acoplados por meio de fita tipo Silver Tape®.

Essas amostras foram saturadas e equilibradas nas tensões de 3, 6 e 10 kPa. Após o equilíbrio, foram pesadas e acopladas ao permeâmetro, onde determinou-se a permeabilidade ao ar do solo compactado (K_{ac}). Após a determinação da permeabilidade na pior condição física, as amostras foram analisadas no penetrógrafo e levadas a estufa para secagem (105 °C

por 24 h) para obtenção da densidade do solo nesse estado. Com as permeabilidades ao ar determinadas para duas condições físicas (atual e de solo compactado), foram calculadas a permeabilidade ao ar relativa pela Equação 2 abaixo:

$$K_{ar} = \frac{K_{ac}}{K_a} \quad (2)$$

Os dados de K_{ar} apresentaram alta variabilidade ($CV = 425,25\%$), inviabilizando análises paramétricas. Os testes de Shapiro-Wilk ($p = 9,22 \times 10^{-10}$) e Bartlett ($p = 0$) confirmaram a ausência de normalidade e homogeneidade de variâncias. Para corrigir, aplicou-se a transformação Box-Cox ($\lambda \approx 0,00005$), ajustando os dados transformados (K_{ar}) para distribuição normal e variâncias homogêneas. Esses valores não têm interpretação física, sendo usados apenas para validação estatística

3.2.5 Resistência à penetração (RP)

A resistência do solo à penetração radicular (RP) foi determinada logo após a realização das leituras de K_a das amostras, ainda úmidas e estabilizadas na tensão de 10 kPa. O penetrógrafo de bancada utilizado consistia em um dinamômetro (IMPAC) instalado em um suporte de bancada, com dispositivo de movimentação manual. A medida da resistência foi realizada em um ponto central das amostras, utilizando a fórmula $A = \pi r^2$ para calcular a área da ponta do penetrógrafo. Os dados obtidos foram gravados em um cartão de memória e, em seguida, exportados para uma planilha eletrônica para análise posterior.

Para a seleção das medições mais representativas para a promoção de uma média com maior exatidão da resistência do solo à penetração radicular, fez-se, primeiro, uma análise estatística descritiva das leituras efetuadas pelo penetrógrafo, por amostra. Em seguida foi selecionado o maior valor de resistência da amostra e, deste subtraído 75% do desvio padrão. O valor encontrado foi o extremo inferior ($LI = RP - 0,75 \cdot DP$). Com os limites superior e inferior definidos, o conjunto de dados contido neste intervalo foi selecionado para formar uma média fiel do atributo e transformado em resistência à penetração, através da Equação 9 baseada na Equação de Stolf (Stolf, 1991).

$$RP = \frac{R \times 9,80665}{12,5664}, \quad (3)$$

em que, RP é a Resistência a penetração do solo em (MPa), R são os valores de Resistência da amostra em (kgf).

3.2.6 Gradiente de umidade do solo para ensaio de Proctor

Primeiramente, a amostra de solo deformada foi seca ao ar por um período que variava de um a sete dias, sendo destorroada e peneirada em peneira de malha de 4 mm. Para a determinação da umidade gravimétrica inicial, obteve-se a massa de três cadinhos, nos quais foram colocados cerca de 15 gramas de solo, que foram pesados novamente para obtenção da massa de solo úmido. Em seguida, as amostras foram levadas à estufa para secagem por 24 horas (105 °C) e, então retiradas e pesadas para determinação da massa de solo seco e cálculo da umidade do solo.

Com base em conhecimentos prévios acerca do solo amostrado (textura, tipo de solo, manejo adotado) foi arbitrado um valor e este multiplicado pela umidade inicial e, então, com esse valor calculado pela Equação 8, foram determinados os volumes de água para cada amostra, totalizando cinco gradientes de umidade. Por fim, foi calculada a média dos três valores obtidos, resultando na umidade média desejada para cada gradiente.

O solo seco foi disposto em uma bandeja e, com o auxílio de um borrifador, a quantidade de água desejada foi aplicada. O solo úmido foi revolvido com um garfo e, ao término, disposto em saco plástico transparente por um período de 24 horas, para a uniformização da umidade. Para o ensaio de compactação, a amostra de solo foi dividida em três partes e um terço do solo foi colocado no cilindro. Com o soquete, foram deferidos 26 golpes.

O mesmo procedimento foi feito para os outros 2/3 de solo restantes. Então, foram coletadas subamostras de solo com auxílio de uma prensa hidráulica, utilizando-se cilindros volumétricos com mesmas dimensões daqueles utilizados para determinação da permeabilidade.

$$UD = \frac{(2500 * ugd - 1 - ugi)}{1 + ugi}, \quad (4)$$

em que UD é a umidade desejada em (ml), 2500 é a quantidade de solo padronizada para o ensaio de Proctor Normal (g); ugd é a umidade gravimétrica desejada (kg kg^{-1}); ugi é a umidade gravimétrica inicial (kg kg^{-1}). Desse modo, foram constituídas 5 a 6 amostras com diferentes umidades, com o objetivo de se ter um gradiente de umidade.

3.3 Análises de dados

O delineamento foi inteiramente casualizado, em esquema fatorial 3×2 (3 solos e 2 camadas), sendo T1 Vale do Jiquiriçá nas camadas de 0-0,1 (SNT10) e 0,1-0,2 m (SNT20); T2 – Vale do Iuiu nas camadas IUIU10 e IUIU20; T3 –, e Recôncavo da Bahia nas camadas CRUZ10 e CRUZ20) com cinco repetições em cada camada, totalizando 40 amostras de solo com estrutura indeformada e mais 40 amostras de solo com estrutura deformada, ambas coletadas nas mesmas localidades.

Os dados foram inicialmente, submetidos à análise exploratória em ambiente R (R Core Team, 2024), através do pacote Mass (Brian *et al.*, 2018). Em seguida, foi feita a análise de variância e as médias foram comparadas pelos testes de Tukey, a nível de 5% de significância, através do pacote ExpDes.pt (Ferreira; Cavalcanti; Nogueira, 2018).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A qualidade física do solo é um dos principais fatores que influenciam a produtividade agrícola, afetando diretamente a disponibilidade de água, a aeração do solo, o crescimento radicular e, consequentemente, o desempenho das culturas. Neste estudo, foram avaliados diversos atributos físicos do solo, como textura, densidade, resistência à penetração, permeabilidade ao ar e porosidade, SNT, IUIU E CRUZ, localizadas no estado da Bahia. Esses atributos foram analisados com o intuito de entender como as condições de solo variam de acordo com o tipo de manejo, as condições climáticas e os diferentes tipos de solo presentes em cada região.

4.2. Textura do solo e Composição granulométrica

A textura do solo é um dos indicadores mais importantes da qualidade física do solo, pois influencia diretamente a sua capacidade de retenção de água, permeabilidade, drenagem, e a dinâmica dos nutrientes. Além disso, a textura afeta a facilidade com que as raízes das plantas penetram no solo, o que pode impactar diretamente o crescimento radicular e a disponibilidade de nutrientes. A distribuição das partículas de areia, silte e argila determina como o solo interage com a água e com os elementos químicos, influenciando a capacidade de infiltração de água e a retenção de nutrientes (Reichardt; Timm, 2012).

Observa-se que os solos SNT e CRUZ são predominantemente compostos por areia, com concentrações variando de 67,2% a 77,1% de areia (Tabela 1). Esses solos são classificados como franco arenoso e franco argiloarenoso, e são caracterizados por uma boa drenagem, o que permite que a água infiltre rapidamente no solo. No entanto, essa alta fração de areia também resulta em uma menor capacidade de retenção de água e de nutrientes, o que pode ser desvantajoso em regiões mais secas ou em condições em que a retenção de água é fundamental para a manutenção da produtividade agrícola. Solos com alta fração de areia tendem a ser mais permeáveis, facilitando a infiltração e a evaporação da água, mas, ao mesmo tempo, são mais susceptíveis à erosão e apresentam menor capacidade de retenção de nutrientes.

Tabela 1 - Composição granulométrica e classe textural do solo para três mesorregiões da Bahia.

Identificação	Composição granulométrica (%)			Classe Textural
	Areia	Silte	Argila	
SNT10	72,9	60	21,1	Franco Argilo Arenosa
SNT20	67,2	70	25,8	Franco Argilo Arenosa
IUIU10	26,0	540	20,0	Franco Siltosa
IUIU20	29,0	490	22,0	Franca
CRUZ10	76,7	92	14,1	Franco Arenoso
CRUZ20	77,1	88	14,1	Franco Arenoso

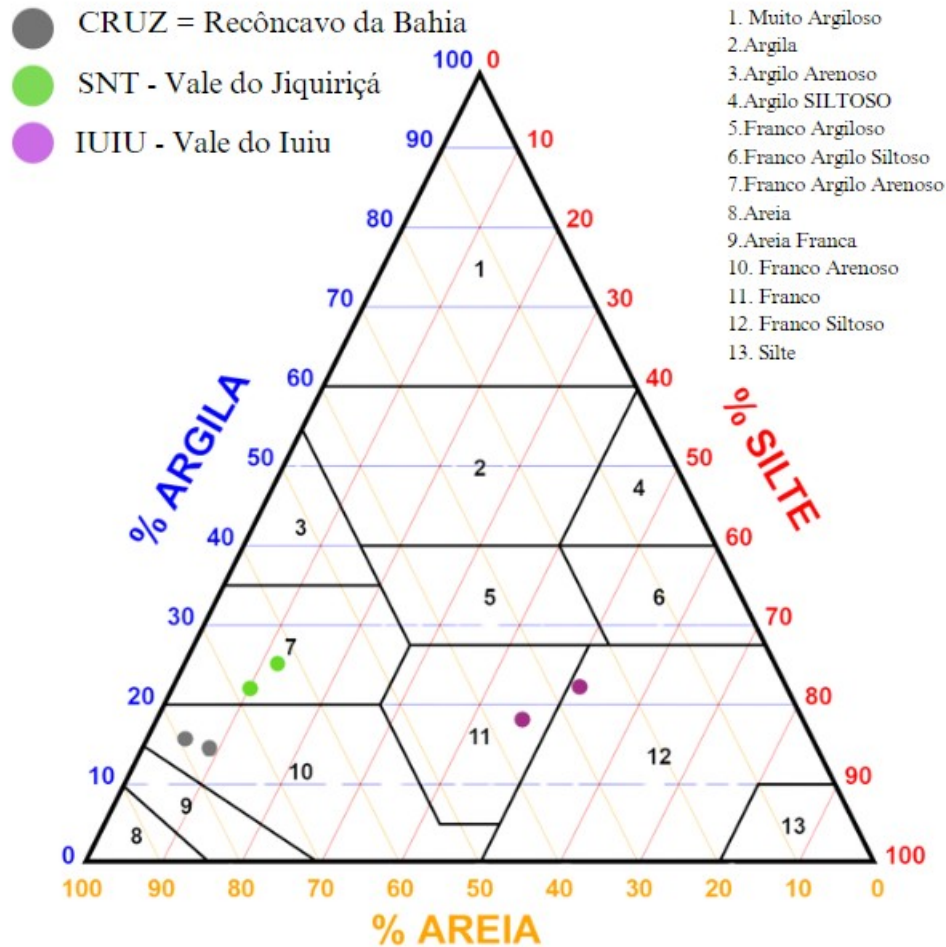
SNT -Vale do Jiquiriçá; IUIU -Vale do Iuiú e do CRUZ-Recôncavo da Bahia e a numeração 10 referem-se à camada 0-0,1 e 20 referem-se à 0,1-0,2 m, respectivamente.

Por outro lado, os solos do município de Iuiú, com maior concentração de silte (entre 49% e 54%), são classificados como franco-siltosos e francos. Esses solos apresentam maior capacidade de retenção de água devido à menor permeabilidade do silte; no entanto, essa característica também reduz a drenagem, o que pode ser problemático em períodos de chuvas

intensas ou prolongadas. O silte retém mais água, mas não a disponibiliza facilmente às raízes, resultando em possíveis condições de encharcamento, redução da aeração e risco de deficiência de oxigênio, afetando diretamente o desenvolvimento radicular. De acordo com Nava e Fillipini (2023, p. 4), “a produção vegetal é afetada pela drenagem deficiente do solo, pois provoca excesso de água e, principalmente, aeração inadequada às raízes da planta, devido ao aumento da resistência à difusão dos gases do solo para a atmosfera e vice-versa”. Além disso, a redução da drenagem pode levar ao acúmulo de água nos poros do solo, o que pode prejudicar a respiração das raízes e a mobilidade dos nutrientes.

O triângulo textural é uma ferramenta gráfica utilizada para representar a distribuição percentual de areia, argila e silte (Figura 6). No gráfico, as amostras de SNT e CRUZ se encontram principalmente nas regiões de franco argiloarenoso e franco arenoso, enquanto as amostras de IUIU se localizam em áreas que representam solos franco siltosos, com maior concentração de silte.

Figura 6 - Distribuição textural dos solos das regiões do Vale do Jiquiriçá (verde), Vale do Iuiu (roxo) e Recôncavo da Bahia (cinza)



Solos mais arenosos, como os encontrados no SNT e no CRUZ, possuem boa drenagem, o que é vantajoso em regiões secas, pois facilita a infiltração de água e a evaporação. No entanto, esses solos apresentam uma menor capacidade de retenção de nutrientes devido à menor área de superfície disponível para a adsorção de nutrientes, como micronutrientes, os quais são essenciais para o crescimento das plantas.

Em contraste, solos com maior concentração de silte, como os encontrados no município de Iuiú, apresentam elevada capacidade de retenção de água e nutrientes. No entanto, sua drenagem reduzida pode levar ao encharcamento, o que compromete a aeração do solo e o desenvolvimento radicular das plantas. Solos siltosos podem ainda apresentar respostas biogeoquímicas distintas sob condições de estresse hídrico, o que ressalta a importância de estratégias de manejo agrícola adaptadas às suas características texturais (Patel et al., 2021).

O manejo adequado desses solos deve priorizar ações que evitem o encharcamento, promovam uma boa aeração e garantam a disponibilidade de nutrientes para as plantas, sem prejudicar a dinâmica da água no perfil do solo. Além disso, é relevante destacar que solos arenosos são mais suscetíveis à erosão, devido à baixa retenção de nutrientes e estrutura menos agregada, enquanto os siltosos tendem a apresentar baixa aeração e acúmulo de água. Diante disso, o manejo da irrigação, a implementação de sistemas de drenagem e o controle da compactação do solo tornam-se fatores fundamentais para garantir a sustentabilidade da produção agrícola em regiões com diferentes classes texturais de solo.

4.3 Densidade e Compactação do solo

A densidade do solo é um dos principais parâmetros para avaliar a qualidade física do solo, pois está diretamente relacionada à sua compactação, aeração, retenção de água e à mobilidade de nutrientes e ar. Solos com alta densidade têm menor porosidade, o que pode restringir a movimentação de água e oxigênio, dificultando o crescimento das raízes e a disponibilidade de nutrientes (Pezarico *et al.*, 2013). A densidade relativa do solo (DR), que compara a densidade do solo com sua densidade máxima de compactação, também é uma medida importante da compactação relativa e pode fornecer informações cruciais sobre a qualidade física do solo.

As curvas de compactação para as diferentes regiões da Bahia (Figura 7), ilustram a relação entre a umidade do solo e a densidade do solo em diferentes camadas (0-0,1 m e 0,1-0,2 m). Essas curvas mostram um padrão comum, onde a densidade do solo aumenta até atingir um pico na umidade ótima de compactação, antes de começar a cair novamente à medida que a umidade aumenta ainda mais. Esse comportamento reflete a necessidade de uma umidade ótima para que o solo alcance a densidade máxima de compactação sem que o excesso de água interfira na compactação do solo.

No caso dos solos do SNT (Figuras 7A e 7B), as curvas indicam que a densidade máxima de compactação na camada de 0-0,1 m alcança valores de 1.750 kg/m³ e na camada de 0,1-0,2 m, 1.850 kg/m³.

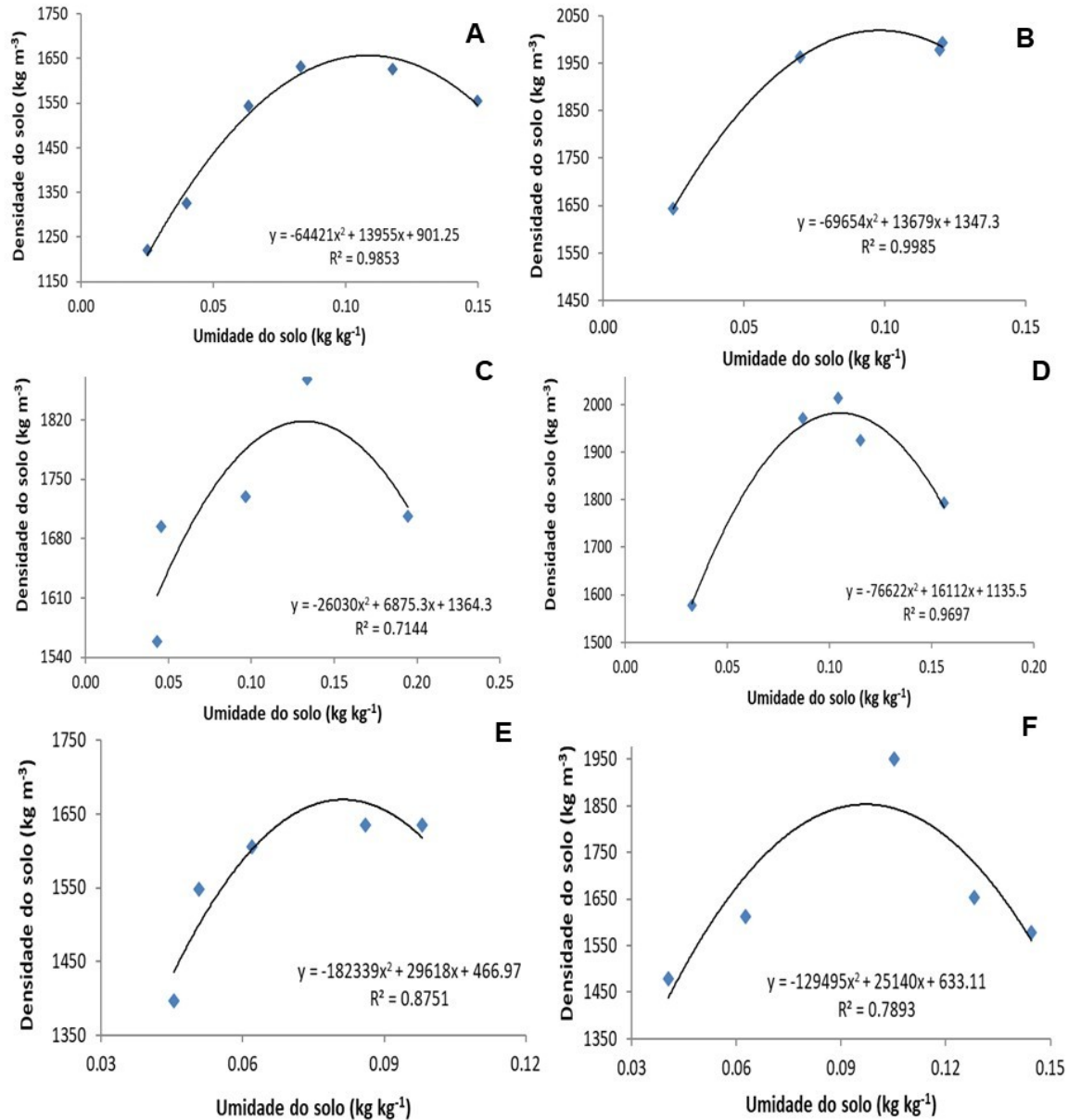
As Figuras A e B mostram curvas de compactação típicas, com alto ajuste aos dados ($R^2 = 0,9853$ e $0,9985$). Em ambos os casos, a densidade aumenta com a umidade até um

ponto ótimo, reduzindo-se posteriormente devido ao preenchimento dos poros por água e à pressão hidrostática. A densidade máxima na Figura B é superior à da Figura A e ocorre em umidade ligeiramente maior, sugerindo diferenças texturais ou estruturais que influenciam o potencial de compactação

Segundo Horn Håkansson & Lipiec (2000), variações na umidade ótima e na densidade máxima refletem tanto a mineralogia da fração argila quanto a matéria orgânica e o histórico de manejo, podendo indicar diferenças na susceptibilidade à compactação. No presente caso, a maior densidade máxima da Figura B sugere estrutura mais suscetível ao rearranjo sob pressão, enquanto a menor densidade máxima da Figura A pode refletir maior estabilidade estrutural, possivelmente associada a maior teor de matéria orgânica ou maior macroporosidade inicial. Portanto, nas condições em que a densidade do solo é superior ao valor crítico, as restrições provocadas ao crescimento do sistema radicular, reduzem o rendimento das culturas (Rodrigues et al., 2017).

Esses solos apresentam uma boa drenagem, característica comum aos solos com maior concentração de areia, mas também possuem uma menor capacidade de retenção de água e nutrientes, o que pode ser desvantajoso em períodos de seca, já que a água infiltra rapidamente e pode não ser suficiente para manter a umidade ideal para as plantas.

Figura 7 - Curvas de compactação do solo do Vale do Jiquiriçá - SNT(A e B), Vale do Iuiu – IUIU (C e D) e do Recôncavo da Bahia - CRUZ (E e F) nas camadas de 0-0,1 m e 0,1-0,2 m.



Em contraste, os solos da região de Iuiú (Figuras 7C e 7D) apresentam um comportamento físico diferenciado. A densidade máxima de compactação atinge cerca de 1.800 kg/m^3 na camada de 0–0,1 m, sendo superior aos valores observados nos solos de sistemas não tradicionais (SNT) e da região de Cruz das Almas (CRUZ). A maior fração de silte contribui para o aumento da capacidade de retenção de água e nutrientes, mas também compromete a drenagem, resultando em possível encharcamento durante períodos de chuvas intensas. Essa condição reduz a aeração e a mobilidade dos nutrientes no solo, o que pode afetar negativamente o desenvolvimento radicular das plantas. Dessa forma, é fundamental

adotar estratégias de manejo que favoreçam a drenagem e evitem o acúmulo excessivo de água nos poros do solo (SOUZA; ANDRADE; COSTA, 2022).

Por outro lado, os solos da região de Cruz das Almas (Figuras 7E e 7F) apresentaram densidade de compactação mais baixa, com valores de 1.650 kg/m^3 na camada de 0–0,1 m e 1.750 kg/m^3 entre 0,1–0,2 m, refletindo a maior porosidade e a boa capacidade de drenagem dos solos arenosos. Esses solos são mais permeáveis, permitindo rápida infiltração da água. No entanto, essa característica está associada a uma menor retenção de água e nutrientes, quando comparada a solos siltosos ou argilosos, como os do Vale do Iuiú.

Ainda em Cruz das Almas, os dados indicam que a densidade relativa do solo se aproxima de 1, sugerindo alto grau de compactação. Essa condição pode dificultar o crescimento das raízes, a circulação de oxigênio e a infiltração de água, reduzindo a qualidade física do solo e comprometendo a produtividade agrícola. Solos compactados têm menor porosidade, o que acarreta baixa aeração e aumento do risco de acúmulo de água na superfície (Pereira et al., 2021).

Já nos solos de Iuiú, observou-se menor densidade relativa na camada superficial, indicando maior porosidade e menor compactação. Essa condição favorece a aeração, a mobilidade de água e nutrientes e, conseqüentemente, o crescimento radicular. Solos com essas características são mais eficientes na retenção hídrica e nutricional, o que é especialmente vantajoso em regiões com elevada demanda hídrica pelas culturas.

Diante das limitações físicas observadas nos solos da região de Iuiú, sobretudo no que diz respeito à compactação superficial e à baixa capacidade de drenagem, é necessário adotar práticas de manejo que estejam alinhadas aos princípios da agroecologia e promovam a conservação da estrutura do solo. Entre essas práticas, destaca-se o uso de plantas de cobertura, como leguminosas e gramíneas, que contribuem para a melhoria da porosidade, o aumento da matéria orgânica e a atividade biológica do solo, reduzindo os efeitos negativos do adensamento (Altieri; Nicholls, 2020).

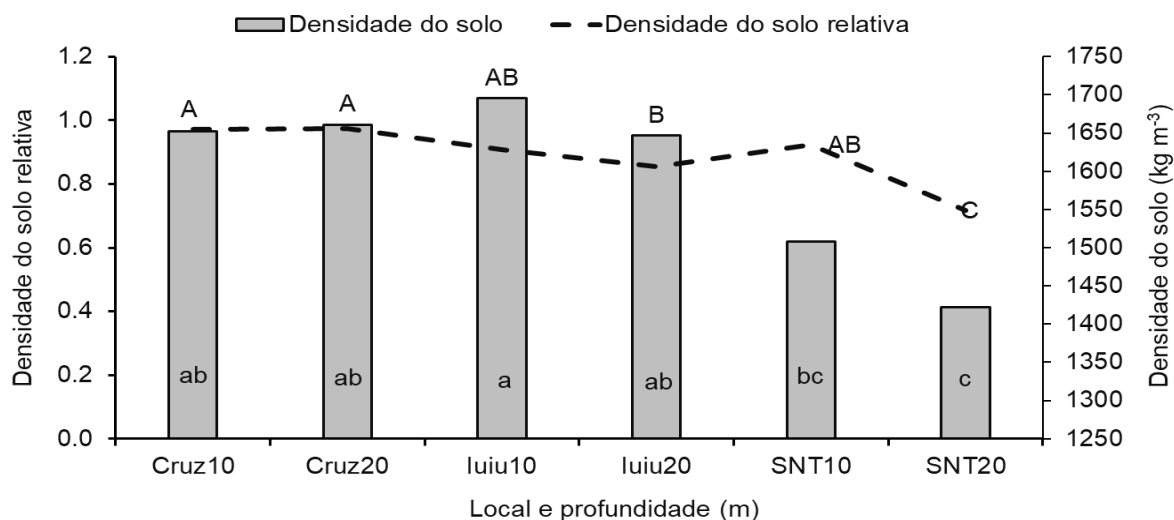
Além disso, a rotação de culturas com espécies de diferentes sistemas radiculares pode favorecer a descompactação natural, explorando diferentes profundidades do solo e promovendo maior equilíbrio físico e químico no perfil. A adoção de sistemas agroflorestais (SAFs) também se mostra eficaz, uma vez que promove maior cobertura do solo, reduz a erosão e melhora a infiltração da água (EMBRAPA, 2023).

Nos solos mais arenosos de Cruz das Almas, embora a drenagem seja mais eficiente, a menor capacidade de retenção de água e nutrientes exige manejos voltados ao aumento da matéria orgânica e à redução da perda de insumos por lixiviação. Para isso, recomenda-se o uso de compostos orgânicos, biofertilizantes e a implantação de barreiras vegetadas ou faixas de retenção para evitar o escoamento superficial (Carvalho et al., 2022).

A não revolvimento do solo (plantio direto agroecológico) também é uma alternativa viável em ambos os contextos, pois favorece a estrutura natural do solo, protege contra os impactos da chuva e da radiação solar, e promove um ambiente mais estável para o desenvolvimento radicular (Gomes et al., 2021).

Essas estratégias, ao integrarem os conhecimentos da produção vegetal com os princípios ecológicos, oferecem soluções sustentáveis e adaptadas às condições específicas de cada solo, contribuindo para a resiliência dos sistemas produtivos e a melhoria contínua da qualidade do solo e da produtividade agrícola.

Figura 8 - Densidade dos solos das mesorregiões SNT -Vale do Jiquiriçá; IUIU -Vale do Iuiu e do CRUZ-Recôncavo da Bahia e a numeração 10 referem-se à camada 0-0,1 e 20 referem-se à 0,1-0,2 m, respectivamente. As médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de significância



SNT, as amostras destacaram que, enquanto a densidade do solo aumenta ligeiramente com a profundidade, a densidade relativa na camada superficial (0-0,10 m) é mais baixa, indicando um solo menos compactado em comparação com o solo da camada de 0,10-0,20 m. Esses solos, com boa drenagem, possuem menor densidade relativa, o que favorece a

circulação de ar e água, mas também exige manejo adequado de nutrientes, já que a retenção de nutrientes é limitada pela alta permeabilidade.

No geral, foi observado que ambas as densidades foram maiores nos horizontes de modo geral, observou-se que as densidades do solo apresentaram valores maiores nos horizontes superficiais, evidenciando maior suscetibilidade desses níveis a fatores externos, como compactação por impacto de chuva, tráfego de máquinas e pisoteio animal, o que está em consonância com Silva et al. (2018). Esse padrão é recorrente em solos submetidos a manejos agrícolas convencionais ou sistemas com pouca cobertura vegetal, resultando em degradação da estrutura do solo. Segundo Reichert et al. (2016), os horizontes superficiais são os mais diretamente afetados por práticas agrícolas intensivas, pois sofrem compressão mecânica causada pela movimentação de implementos agrícolas e pela passagem de animais. Além disso, a ausência de cobertura vegetal contínua favorece o impacto direto das gotas de chuva sobre o solo desnudo, promovendo a compactação superficial e a destruição de agregados (Tormena et al., 2020). Esses efeitos são cumulativos e, quando não corrigidos, podem levar ao selamento da superfície, dificultando a infiltração de água e a emergência de plântulas, além de aumentar a susceptibilidade à erosão (Braida et al., 2022).

A densidade relativa do solo mostrou-se restritiva na maioria dos horizontes avaliados, com médias superiores a 0,75, valor limite considerado como o máximo permitido para o desenvolvimento adequado das raízes (Beutler et al., 2005; Marcolin; Klein, 2011). Essa condição indica que os solos apresentam compactação capaz de limitar o crescimento radicular, comprometendo a exploração do perfil do solo, a absorção de água e nutrientes, e, consequentemente, a produtividade das culturas.

Além disso, a densidade do solo é um importante indicador físico que se correlaciona com atributos como a porosidade total e a resistência mecânica à penetração das raízes, aspectos determinantes para a aeração, retenção hídrica e sustentação das plantas (Al-Shammary et al., 2018). Assim, o aumento da densidade pode acarretar redução da porosidade, limitando a circulação de ar e água no solo, prejudicando processos fisiológicos essenciais para o desenvolvimento vegetal.

Estes resultados reforçam a necessidade de implementação de práticas de manejo que minimizem a compactação do solo, promovam a recuperação da estrutura física e garantam condições adequadas para o crescimento radicular, tais como a adoção de sistemas

agroecológicos, plantio direto e uso de plantas de cobertura (Altieri; Nicholls, 2020; EMBRAPA, 2023).

Permeabilidade do solo ao ar

A permeabilidade ao ar do solo é um parâmetro essencial para avaliar a qualidade física do solo, pois influencia diretamente a aeração, a respiração radicular e a atividade microbiana. Este estudo investigou a permeabilidade intrínseca ao ar (K_a) em solos submetidos a condições de campo e após compactação, avaliando duas profundidades em diferentes regiões.

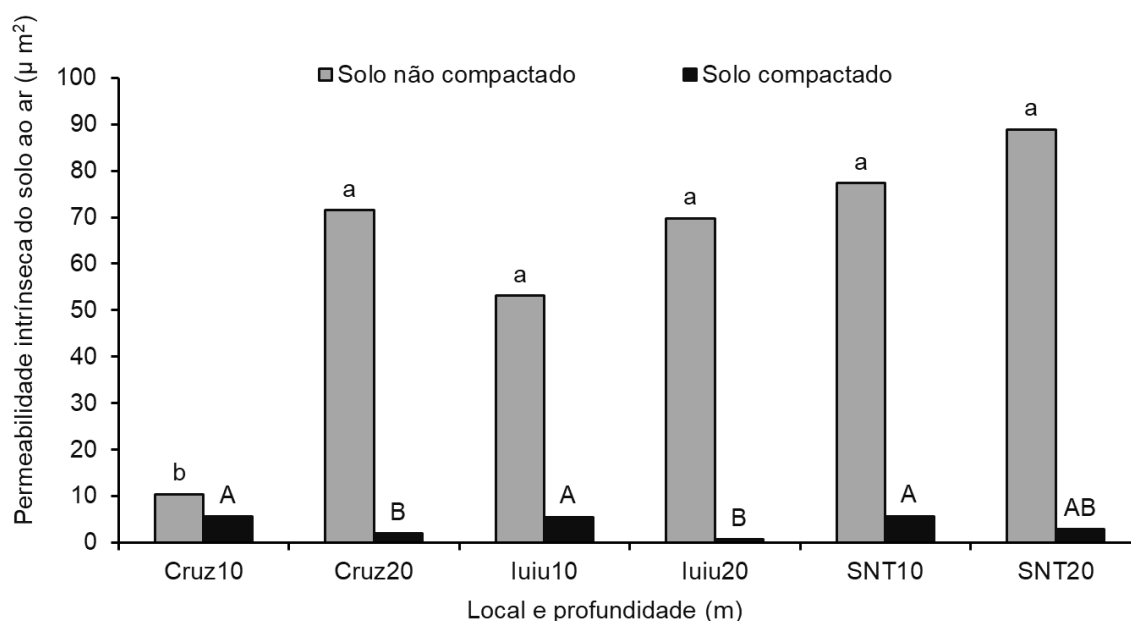
A compactação do solo é um dos principais fatores responsáveis pela redução da permeabilidade ao ar (K_a), especialmente em camadas subsuperficiais, como observado na profundidade de 0,10-0,20 m. Essa condição compromete diretamente a difusão gasosa, prejudicando a oxigenação do sistema radicular e limitando a atividade biológica do solo (Reichert et al., 2009; Cavalieri et al., 2011). Conforme descrito por Tormena et al. (2011), a compactação reduz o volume total de macroporos, afetando negativamente a renovação gasosa, o que pode acarretar estresse oxidativo nas raízes e queda no rendimento das culturas.

Nos tratamentos avaliados (IUIU10, SNT10 e SNT20), observou-se que os solos nas camadas superficiais (0-0,10 m) apresentaram maiores valores de K_a ($>70 \mu\text{m}^2$), indicando boa qualidade física. Isso corrobora com os achados de Silva et al. (2014), que destacam a influência do preparo do solo e da presença de matéria orgânica na manutenção da estrutura porosa, principalmente nas camadas superiores, facilitando a troca gasosa. Em sistemas não compactados, a maior atividade biológica e o enraizamento promovem maior estabilidade dos agregados, contribuindo para a conectividade dos poros e, conseqüentemente, maior K_a (Rodrigues et al., 2015).

A presença de altas taxas de K_a na camada de 0-0,10 m nos tratamentos citados demonstra a eficácia do manejo adotado na preservação da estrutura do solo. De acordo com Dexter (2004), valores elevados de K_a estão associados à maior capacidade do solo em manter um ambiente aerado, essencial ao crescimento vegetal. Além disso, Beutler et al. (2005) sugerem que valores de K_a superiores a $60 \mu\text{m}^2$ indicam boas condições estruturais, com menor risco de compactação prejudicial à dinâmica do solo.

Portanto, os resultados obtidos reforçam a importância de práticas de manejo que reduzam a compactação e favoreçam a porosidade do solo, sobretudo nas camadas superficiais. A manutenção de um solo com alta Ka contribui para a sustentabilidade dos sistemas produtivos, promovendo maior eficiência do uso da água e dos nutrientes, além de favorecer o desenvolvimento das culturas (Tormena et al., 2011; Moraes et al., 2014).

Figura 9 - Permeabilidade intrínseca do solo ao ar (μm^2) das mesorregiões SNT -Vale do Jiquiriçá; IUIU -Vale do Iuiu e do CRUZ-Recôncavo da Bahia e a numeração 10 referem-se à camada 0-0,1 e 20 referem-se á 0,1-0,2 m, respectivamente. As médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de significância



Após a compactação, observou-se uma redução drástica da permeabilidade ao ar em todos os tratamentos, com os maiores impactos registrados dos tratamentos CRUZ20 E IUIU20. A compactação aumentou a densidade do solo, reduzindo os macroporos, que são essenciais para o movimento do ar e a respiração radicular. Esses resultados confirmam estudos como os de Braga *et al.* (2015) e Carvalho *et al.* (2019), que destacam os efeitos negativos da compactação na porosidade do solo, principalmente em solos argilosos sob condições de alta umidade.

A permeabilidade relativa ao ar (Kar) oferece uma métrica de comparação entre as condições de campo e compactada, destacando a degradação física resultante da compactação. Os valores de Kar variaram amplamente entre os tratamentos, com o IUIU10 apresentando o

maior valor (53.734), indicando uma menor diferença entre as condições compactada e não compactada. Isso sugere que o solo IUIU10, particularmente na camada superficial possui uma estrutura mais resiliente, capaz de suportar melhor o impacto físico da compactação. Em contrapartida, os tratamentos CRUZ20 E IUIU20 apresentaram valores extremamente baixos de Kar (0.030 e 0.012, respectivamente), indicando uma degradação severa da estrutura do solo nessas condições (Tabela 2). Esse comportamento também foi observado por Suzuki *et al.* (2007), que destacaram que a compactação aumenta a resistência à penetração e reduz a condutividade hidráulica, principalmente em solos compactados onde a perda de aeração limita a saúde do solo e o desenvolvimento radicular.

Tabela 2 – Permeabilidade do solo ao ar relativa das mesorregiões SNT -Vale do Jiquiriçá; IUIU -Vale do Iuiu e do CRUZ-Recôncavo da Bahia e a numeração 10 referem-se à camada 0-0,1 e 20 referem-se à 0,1-0,2 m, respectivamente.

Tratamento	Kar	Kart
Cruz10	0.956 ^{ns}	1.000058ab
Cruz20	0.03 ^{ns}	1.00001b
Iuiu10	53.734 ^{ns}	1.00014a
Iuiu20	0.012 ^{ns}	0.99998b
SNT10	0.082 ^{ns}	1.000059ab
SNT20	0.038 ^{ns}	1.000018b

^{ns} não significativo a 5% de significância; letras iguais indicam que as médias são estatisticamente iguais, pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Após a transformação, os dados de Kart atenderam aos critérios de normalidade e homogeneidade, permitindo a aplicação de ANOVA e o teste de Tukey. A análise estatística dos dados transformados confirmou as tendências observadas nos dados brutos, destacando que o tratamento IUIU10 é o mais resiliente à compactação, enquanto CRUZ20 E IUIU20 mantêm-se entre os mais degradados, mesmo após o ajuste estatístico. Esse resultado está em linha com o estudo de Imhoff *et al.* (2001), que demonstraram que a compactação reduz a porosidade e a permeabilidade ao ar, limitando o movimento de água e ar, especialmente em solos com maior teor de argila.

Esses resultados indicam a necessidade de práticas de manejo específicas para minimizar os efeitos da compactação, especialmente em solos onde a camada mais profunda (0,10-0,20 m) se mostrou mais vulnerável, como nos tratamentos CRUZ20 E IUIU20. Em solos que apresentaram alta degradação estrutural após compactação, a subsolagem pode ser uma prática recomendada para restaurar a porosidade e melhorar a permeabilidade ao ar.

A adição de matéria orgânica também pode auxiliar na agregação do solo, aumentando a estabilidade estrutural e a capacidade de suportar compactação. Por outro lado, solos com alta resiliência, como observado em IUIU10, podem suportar maior intensidade de uso e tráfego de máquinas sem comprometer significativamente a permeabilidade ao ar, o que é vantajoso em sistemas de manejo intensivo.

4.4 Resistência à penetração

A resistência à penetração (RP) é um indicador crucial da compactação do solo e do desenvolvimento radicular, pois altos valores de RP indicam um solo compactado, o que dificulta a penetração das raízes e limita a mobilidade de água e nutrientes. A RP é fortemente influenciada pela densidade do solo e pela umidade do solo, com a compactação resultando em valores elevados de RP, dificultando a aeração e a infiltração de água.

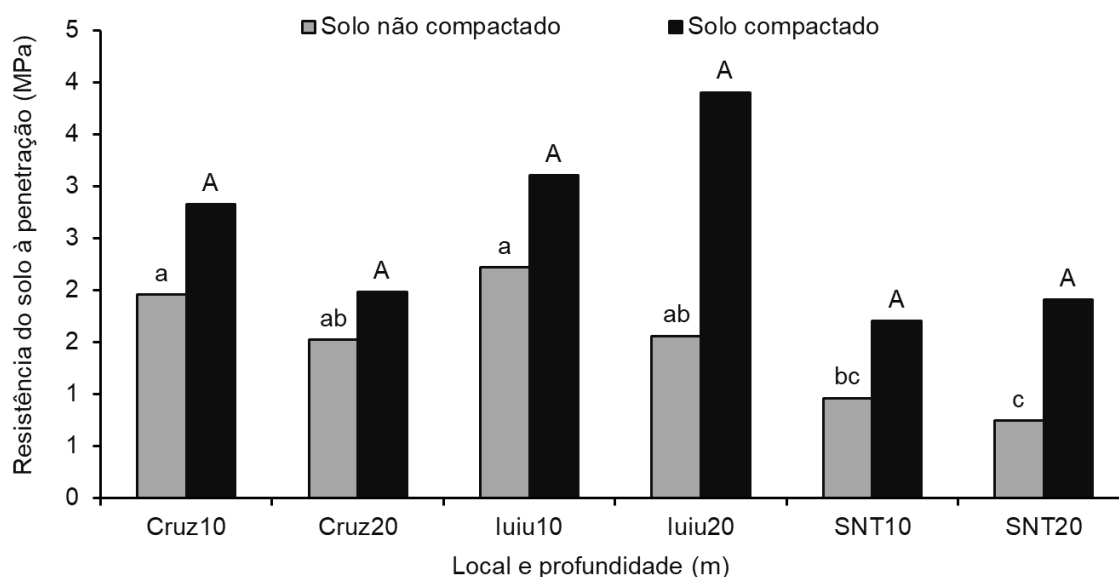
Observa-se uma estreita relação entre a resistência à penetração (RP) e a densidade do solo, especialmente em solos submetidos à compactação. De acordo com Tormena et al. (2018), o aumento da densidade do solo provoca a diminuição dos macroporos e, consequentemente, eleva a resistência mecânica ao crescimento radicular. No presente estudo, os valores de RP para a região do CRUZ foram significativamente elevados, principalmente na profundidade de 0,10–0,20 m, onde os valores atingiram 3,5 MPa em CRUZ20, indicando alta compactação do solo.

Segundo Collares et al. (2019), valores de resistência à penetração acima de 2,0 MPa já podem limitar o crescimento de raízes de muitas culturas, com redução expressiva no desenvolvimento da parte aérea e produtividade. Essa limitação está associada ao aumento da densidade do solo e à consequente redução da porosidade, que dificulta tanto a infiltração de água quanto a difusão de oxigênio na rizosfera (Vieira et al., 2020). Além disso, conforme Reinert et al. (2020), em solos mais arenosos, como o da região de CRUZ, a compactação tende a ocorrer com maior facilidade, uma vez que esses solos possuem menor coesão estrutural, favorecendo o rearranjo das partículas e a formação de camadas adensadas.

Portanto, a elevada resistência à penetração observada nos tratamentos CRUZ10 e CRUZ20 é reflexo direto da compactação e da alta densidade, impactando negativamente o crescimento radicular e a absorção de nutrientes pelas plantas. Como destacam Silva e Lima (2017), em situações como essa, o manejo adequado do solo, com uso de cobertura vegetal,

práticas de subsolagem e rotação de culturas, é fundamental para restaurar as condições físicas e promover um ambiente mais favorável ao desenvolvimento das plantas.

Figura 10 - Resistência penetração das mesorregiões SNT -Vale do Jiquiriçá; IUIU - Vale do Iuiu e do CRUZ-Recôncavo da Bahia e a numeração 10 referem-se à camada 0-0,1 e 20 referem-se à 0,1-0,2 m, respectivamente.



Por outro lado, para o IUIU, observa-se que a resistência à penetração é mais elevada do que nos solos do SNT, mas ainda assim mais baixa do que no CRUZ. Para as amostras de IUIU10, a RP é de cerca de 3,2 MPa, enquanto para IUIU20, ela atinge aproximadamente 3,6 MPa. Esses valores estão entre os mais altos observados, o que indica que os solos do IUIU são mais compactados em comparação com os do SNT, mas ainda assim menos compactados que os de CRUZ.

A alta retenção de água característica dos solos siltosos do IUIU pode estar contribuindo para a maior compactação e resistência à penetração. O aumento de RP em solos mais úmidos e menos permeáveis é consistente com a teoria de Blainski *et al.* (2008), que observam que a densidade do solo e o conteúdo de água são determinantes na resistência à penetração.

No SNT, os valores de RP mais baixos em comparação com as outras regiões, com 2,0 MPa e 2,5 MPa, respectivamente. Esses solos, predominantemente arenosos, apresentam

menor densidade e compactação, o que resulta em menor resistência à penetração e maior facilidade para o crescimento das raízes.

A baixa resistência à penetração observada nos solos de SNT reflete a boa aeração e menor compactação, o que facilita o desenvolvimento radicular. Porém, é importante notar que, apesar da menor resistência à penetração, os solos arenosos de SNT apresentam menor capacidade de retenção de água e nutrientes, o que exige um manejo adequado da irrigação e fertilização.

Estudos anteriores corroboram essa relação entre RP, umidade e densidade do solo. Silva *et al.* (2000) observaram que o tráfego de maquinário intensifica a compactação, especialmente em solos secos, resultando em valores de RP superiores a 2 MPa, o que restringe o crescimento radicular. Da mesma forma, Assis *et al.* (2009) demonstraram que solos com menor teor de água apresentam maior resistência à penetração, evidenciando a importância da umidade para reduzir a compactação do solo. Esses achados são consistentes com os valores observados nas amostras deste estudo, em que os solos de CRUZ e IUIU, sob maior compactação, apresentaram RP entre 2,5 MPa e 3,6 MPa, dificultando o desenvolvimento das raízes.

Adicionalmente, Silva *et al.* (2021) identificaram que solos com alta densidade e baixa umidade apresentam valores críticos de RP, acima de 2 MPa, que limitam o desenvolvimento radicular, o que foi observado nos solos das regiões estudadas. Esses valores elevados de RP refletem a compactação dos solos, especialmente em CRUZ, onde a alta densidade do solo e a baixa porosidade dificultam a mobilidade de água e nutrientes, comprometendo a saúde das plantas.

4. CONCLUSÕES

A avaliação da qualidade física do solo, com base na permeabilidade intrínseca do solo ao ar, revelou-se uma ferramenta sensível e eficiente para identificar alterações estruturais, causadas pela compactação e pelas características texturais.

A compactação do solo reduz significativamente a Ka, especialmente nas camadas mais profundas (0,1-0,2 m) e em solos com maior proporção de silte, como os do Vale do Iuiu. Em contrapartida, solos mais arenosos, como os do Vale do Jiquiriçá e do Recôncavo da Bahia, apresentaram maior permeabilidade ao ar em condições de campo.

A permeabilidade relativa do solo ao ar, como indicador da qualidade física, mostrou-se sensível à degradação estrutural do solo e as diferenças entre as classes texturais, evidenciando sua utilidade para o manejo sustentável do solo.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALAM, J. et al. Permeability of stratified soils for flow normal to bedding plane. **Aquatic Procedia**, Amsterdam, v. 4, p. 660-667, 2015.

AL-SHAMMARY, A. A. A.; AL-SHARI, A. M.; AL-JUTHAMI, S. A. Effects of soil compaction on physical properties and root growth of different crops. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 18, n. 4, p. 1020–1030, 2018.

AL-SHAMMARY, A. A. A. et al. Soil bulk density impact on soil physical properties and wheat yield. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, v. 17, n. 4, p. 347–354, 2018.

AL-SHAMMARY, A. A. G. et al. Soil bulk density estimation methods: a review. **Pedosphere**, Amsterdam, v. 28, n. 4, p. 581-596, 2018.

ALTIERI, M. A.; NICHOLLS, C. I. Agroecologia: apenas uma alternativa ou uma necessidade? **Revista Agroecossistemas**, v. 12, n. 1, p. 1–7, 2020.

ALTIERI, M. A.; NICHOLLS, C. I. **Agroecologia**: ciência e política para uma agricultura sustentável. São Paulo: Expressão Popular, 2020.

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2020.

ARAÚJO, G. T.; SOARES NETO, J. P.; NUNES, H. B. Soil density and optimum moisture for soil compaction in five soil classes in western Bahia state. **Revista Engenharia na Agricultura-REVENG**, Viçosa, v. 28, n. Contínua, p. 211-222, 2020.

ARAÚJO, M. A. et al. Efeitos da escarificação na qualidade física de um Latossolo Vermelho distroférico após treze anos de semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 495-504, 2004.

ASSIS, R. L. D. et al. Avaliação da resistência do solo à penetração em diferentes solos com a variação do teor de água. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 29, p. 558-568, 2009.

BALL, B. C. et al. Crop performance and soil conditions on imperfectly drained loams after 20 and 25 years of conventional tillage or direct drilling. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 31, n. 2-3, p. 97-118, 1994.

BEUTLER, A. N. et al. Capacidade de aeração do solo como indicador da qualidade física em Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 4, p. 515-524, 2005.

BEUTLER, A. N. et al. Densidade crítica do solo para o crescimento das raízes de plantas cultivadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 6, p. 843-851, 2005.

BEUTLER, A. N. et al. Densidade relativa ótima de Latossolos Vermelhos para a produtividade de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 843-849, 2005.

BEUTLER, S. J. et al. Compactação do solo: causas, consequências e controle. **Ciência Rural**, v. 35, n. 3, p. 735-742, 2005.

BIRD, N. R. A.; PERRIER, E. M. A. The pore-solid fractal model of soil density scaling. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 54, n. 3, p. 467-476, 2003.

BLACKWELL, P. S. et al. The use of air-filled porosity and intrinsic permeability to characterize structure of macropore space and saturated hydraulic conductivity of clay soils. **Journal of Soil Science**, Lancaster, v. 41, p. 215-228, 1990.

BLAINSKI, É. et al. Quantificação da degradação física do solo por meio da curva de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 975-983, 2008.

BRADY, N.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 716 p.

BRAIDA, J. A. et al. Compactação e erosão do solo: interações e implicações para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 46, e0220004, 2022.

BRAIDA, J. A. et al. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio Proctor. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 605-614, 2006.

BRAGA, F. D. V. A. et al. Propriedades mecânicas e permeabilidade ao ar em topossequência Argissolo-Gleissolo: variação no perfil e efeito de compressão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 4, p. 1025-1035, 2015.

BRIAN, R. et al. **Mass**: Support Functions and Datasets for Venables and Ripley's MASS (Version 7.3-50). 2018.

BRITO, A. D. S. et al. O Desempenho do tensiômetro com diferentes sistemas de leitura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 1, p. 17-24, 2009.

CAMARGO, M. B. P. de et al. A seca de 1985 no Estado de São Paulo. **O Agrônomo**, Campinas, v. 38, n. 1, p. 31-44, 1986.

CAMPOS, B. C. de et al. Estabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico após sete anos de rotação de culturas e sistemas de manejo de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 19, n. 1, p. 121-126, 1995.

CARVALHO, A. M.; MENDES, K. R.; SANTOS, M. A. G. Práticas agroecológicas de manejo da fertilidade do solo em pequenas propriedades. **Revista Agroecossistemas**, v. 14, n. 2, p. 78–89, 2022.

CARVALHO, I. C. B. D. et al. Actual and Relative Soil Air Permeability as Soil Physical Quality Index. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 11, n. 14, p. 1-11, 2019.

CAVALIERI, K. M. V. et al. Indicadores da qualidade física de um Latossolo sob plantio direto em diferentes rotações de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 6, p. 2117-2126, 2011.

CAVALIERI, K. M. V. et al. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a Rhodic Ferrasol in Paraná, Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 103, p. 158-164, 2009.

CHIEF, K.; FERRÉ, T. P. A.; NIJSSEN, B. Field testing of a soil corer air permeameter (SCAP) in desert soils. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 5, n. 4, p. 1257-1263, nov. 2006.

COLLARES, G. L.; OLIVEIRA, M. S.; COSTA, M. V. Resistência do solo à penetração e crescimento radicular de soja em sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 43, e0180262, 2019.

COSTA, T. G. A. et al. Manejo agroecológico do solo em áreas sob o cultivo de hortículas no Município de Corrente, Piauí. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, João Pessoa, v. 2, n. 3, p. 167-174, 2015.

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

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: **Defining soil quality for a sustainable environment**, Madison, v. 35, p. 1-21, 1994.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistemas agroflorestais: práticas sustentáveis para agricultura familiar**. Brasília, 2023.

EMBRAPA. **Manejo sustentável do solo: práticas para melhorar a qualidade física e conservar os recursos naturais**. Brasília, DF: Embrapa Solos, 2023.

ETIM UDOM, B.; EHILEGBU, J. Critical moisture content, bulk density relationships and compaction of cultivated and uncultivated soils in the humid tropics. **Asian Soil Research Journal**, Karachi, v. 1, n. 2, p. 1-9, 2018.

FEITOSA, J. R. et al. Influência da pressão interna dos pneus e da velocidade de deslocamento nos parâmetros operacionais de um trator agrícola e nas propriedades físicas do solo. **Engenharia Agrícola**, Botucatu, v. 35, p. 117-127, 2015.

FERREIRA, E. B.; CAVALCANTI, P. P.; NOGUEIRA, D. A. **ExpDes. pt. Pacote Experimental Designs**, 2018.

FERREIRA, M. M. Caracterização física do solo. In: VAN LIER, Q. J. (ed.). **Física do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. p. 1-24.

FREITAS, L. et al. Indicadores da qualidade química e física do solo sob diferentes sistemas de manejo. **Unimar Ciências**, Marília, v. 26, p. 08-25, 2017.

GEE, G. W.; OR D. Particle-size analysis. In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. (ed.). **Methods of soil analysis: Physical methods**. Madison: American Society of Agronomy, 2002. p. 255-289.

GOMES, J. C.; BATISTA, R. O.; LIMA, T. A. Plantio direto agroecológico: estratégias para conservação do solo e aumento da produtividade. **Cadernos de Agroecologia**, v. 16, n. 1, p. 1-11, 2021.

GOUVELLO, C. de; SOARES FILHO, B. S.; NASSAR, A. **Estudo de baixo carbono para o Brasil**. Washington: Word Bank, 2010.

GROENEVELT, P. H.; KAY, B. D.; GRANT, C. D. Physical Assessment of a Soil with Respect to Rooting Potential. **Geoderma**. Amsterdam, v. 34, p. 101-114, 1984.

GUEDES FILHO, O. et al. Permeabilidade ao ar da cama de semeadura do solo em sistema de semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, p. 841-851, 2015.

HE, Y. et al. A modelling approach to evaluate the long-term effect of soil texture on spring wheat productivity under a rain-fed condition. **Scientific reports**, London, v. 4, n. 1, p. 5736, 2014.

HIRMAS, D. R. et al. Climate-induced changes in continental-scale soil macroporosity may intensify water cycle. **Nature**, London, v. 561, n. 7721, p. 100-103, 2018.

IMHOFF, S.; SILVA, A. P.; TORMENA, C. A. Aplicação da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 7, p. 1493-1500, 2000.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa**. Brasília, 2020. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/>.

IVERSEN, B. V. et al. Air and water permeability in differently textured soils at two measurement scales. **Soil Science**, Baltimore, v. 166, n. 10, p. 643-659, out. 2001.

JESUS, M. C. D. et al. Permeabilidade ao ar e porosidade de solos na região semiárida, **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 25, n. 3, p. 230-239.

KIRKHAM, M. B. Field method for determination of air permeability of soil in its undisturbed state. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 11, p. 93-99, 1946.

KLEIN, V. A. **Propriedades do solo e manejo da água em ambientes protegidos com cultivo de morangueiro e figueira**. 2005. 61 f. Tese (Doutorado) – Universidade do Passo Fundo, Passo Fundo, 2005.

KLEIN, V. A. Densidade relativa: um indicador da qualidade física de um Latossolo Vermelho. **Revista de Ciência Agroveterinária**, Lages, v. 5, n. 1, p. 26-32, 2006.

KLEIN, V. A. et al. Ensaio de Proctor normal-análise metodológica e planilha para cálculo da densidade do solo máxima e o teor de água ótimo. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 12, p. 199-203, 2013.

KOOREVAAR, P.; MENELIK, G.; DIRKSEN, C. **Elements of soil physics**. Basel: Elsevier, 1983.

KUHWALD, M. et al. Soil penetration resistance after one-time inversion tillage: a spatio-temporal analysis at the field scale. **Land**, Basel, v. 9, n. 12, p. 482, 2020.

LARDY, J. M. et al. Effects of soil bulk density and water content on penetration resistance. **Agricultural & Environmental Letters**, Madison, v. 7, n. 2, p. e20096, 2022.

LEÃO, B. D. A. et al. Atributos físicos do solo em diferentes sistemas de manejo de agroecossistemas no Território do Caparaó. **Revista de Ciências Agrárias Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, [online], v. 63, 2020.

LEMOS-PAIÃO, A. P.; LOPES, S. O.; PINHO, M. de R. de. Analytical study for different extremal state solutions of an irrigation optimal control problem with field capacity modes. **International Journal of applied and computational mathematics**, Bangalore, v. 8, n. 2, p. 67, 2022.

LEUTHER, F. Soil structure-a dynamic soil property which effects multiple soil functions. In: **EGU General Assembly Conference Abstracts**. Vienna, 2023.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. 2. ed. São Paulo: EDUSP, 2012.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da Água no Solo**. 3. ed. São Paulo: ESUSP, 2018.

LOLL, P. et al. Predicting saturated hydraulic conductivity from air permeability: application in stochastic water infiltration modeling. **Water Resources Research**, Washington, v. 35, n. 8, p. 2387–2400, 1999.

LUCIANO, R. V. et al. Atributos físicos relacionados à compactação de solos sob vegetação nativa em região de altitude no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, p. 1733-1744, 2012.

MANTOVANI, E. C. Compactação do solo. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, 1986.

MARCOLIN, C. D.; KLEIN, V. A. Determinação da densidade relativa do solo por uma função de pedotransferência para a densidade do solo máxima. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 33, n. 2, p. 349-354, 2011.

MARCOLIN, E.; KLEIN, V. A. Condutividade hidráulica e resistência à penetração em Latossolo sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 6, p. 591–597, 2011.

MARCOLIN, R.; KLEIN, V. A densidade do solo e seu impacto no crescimento radicular. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 5, p. 1503–1512, 2011.

MENEZES, A. S. et al. Functionality of the porous network of Bt horizons of soils with and without cohesive character. **Geoderma**, Amsterdam, v. 313, p. 290-297, 2018.

MENTGES, M. I. et al. Capacity and intensity soil aeration properties affected by granulometry, moisture, and structure in notillage soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 263, p. 47-59, 2016.

MORAES, M. T. et al. Qualidade física do solo em áreas de integração lavoura-pecuária sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 2, p. 608-618, 2014.

MOREIRA, F. R. et al. Intervalo hídrico ótimo em um Latossolo Vermelho cultivado em sistema de semeadura direta por 25 anos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, p. 118-127, 2014.

NAVA, G.; FILLIPINI, G. C. **Atributos e aptidões dos solos**. 2023. Disponível em: alice.cnptia.embrapa.br. Acesso em: 10 mar. 2025.

NAVA, G.; FILLIPINI, M. F. Drenagem do solo e produção vegetal: aspectos físicos e fisiológicos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 27, n. 1, p. 1–10, 2023.

NEVES, C. M. N.; SILVA, A. P.; LEÃO, T. P. Permeabilidade ao ar em amostras de solo pelo método de pressão decrescente. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E ÁGUA, 15., 2004, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria, 2004. CD ROM.

OLIVEIRA, I. A. D. et al. Caracterização de solos sob diferentes usos na região sul do Amazonas. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 45, n. 1, p. 1-12, 2015.

OTTONI FILHO, T. B. et al. An algebraic pedotransfer function to calculate standardized in situ determined field capacity. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 8, n. 8, p. 158-170, 2016.

PATEL, A. et al. Soil texture effects on water retention, nutrient availability and biogeochemical response under stress: a global synthesis. **Soil and Tillage Research**, v. 205, p. 104761, 2021.

PATEL, D. P. et al. Soil texture and its impact on water dynamics and crop productivity: a review. **International Journal of Agricultural Sciences**, v. 13, n. 2, p. 45–52, 2021.

PATEL, K. F. et al. Soil texture and environmental conditions influence the biogeochemical responses of soils to drought and flooding. **Communications Earth & Environment**, London, v. 2, n. 1, p. 127, 2021.

PEREIRA, G. T.; OLIVEIRA, R. B.; SILVA, B. M. da. Qualidade física do solo em sistemas de manejo agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 45, e0200123, 2021.

PEZARICO, C. R. et al. Indicadores de qualidade do solo em sistemas agroflorestais. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 56, p. 40-47, 2013.

PHILLIPS, R. E.; KIRKHAM, D. Soil compaction in the field and corn growth. **Agronomy Journal**, Madison, v. 54, p. 29-34, 1962.

QUANG, T. C.; GIAO, N. T. Characterizing Physical and Chemical Properties of Sandy Soil in Vietnamese Mekong Delta Province. **Ecological Engineering & Environmental Technology (EEET)**, Warsaw, v. 24, n. 3, 2023.

R CORE TEAM. **R**: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. 2024.

RAHMATI, M.; NEYSHABOURY, M. R. Soil air permeability modeling and its use for predicting unsaturated soil hydraulic conductivity. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 80, p. 1507–1513, 2016.

RAMOS, F. T. et al. Curvas de compactação de um Latossolo Vermelho-Amarelo: com e sem reuso de amostras. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, p. 129-137, 2013.

REICHARDT; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. 2. ed. Barueri: Manole, 2012.

REICHERT, J. M. et al. Compactação do solo em sistemas agrícolas: causas, consequências e formas de mitigação. **Ciência Rural**, v. 46, n. 4, p. 741–753, 2016.

REICHERT, J. M. et al. Indicadores de compactação do solo e estratégias de manejo em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 2, p. 219-232, 2009.

REINERT, D. J.; CASSOL, L. C.; REINERT, R. M. Qualidade física de um Argissolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Agro@mbiente On-line**, v. 14, n. 1, p. e5919, 2020.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. **Propriedades físicas do solo**. Departamento de Solos, Santa Maria: UFSM, 2006. p. 1–18.

RODRIGUES, M. R. L. et al. Permeabilidade do solo ao ar em sistema plantio direto com diferentes rotações de culturas. **Revista de Agricultura**, v. 90, n. 1, p. 62-77, 2015.

RODRIGUES, S. **Permeabilidade ao ar em Latossolo Vermelho sob plantio direto e preparo convencional**. 2009. 67 f. Dissertação (Mestrado em Doutorado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo Piracicaba, 2009.

RODRIGUES, S. et al. Permeabilidade ao ar em Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 105-114, 2011.

ROESSLER, G. A. et al. Umidade ótima do solo para fins de disposição de resíduos sólidos urbanos. **Revista de Geociências do Nordeste**, Fortaleza, v. 8, n. 1, p. 118-127, 2022.

ROSEBERG, R. J.; MCCOY, E. L. Measurement of soil macropore air permeability. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 54, p. 969-974, 1990.

SAMPIETRO, J. A. et al. Compactação causada pelo tráfego de feller buncher e skidder em um Neossolo Regolítico sob distintas umidades. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 25, n. 1, p. 239-248, 2015.

SARAIVA, V. da C. et al. Avaliação da fertilidade do solo e a supressão da mata ciliar de uma área do rio Parnaíba: impactos ambientais em uma perspectiva educacional. **Brazilian Journal of Development**, São José dos Pinhais, v. 6, n. 6, p. 41061-41077, 2020.

SILVA, A. A.; CASTRO, S. S. de. Indicadores macro e micromorfológicos da qualidade física de um Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar. **Mercator**, Fortaleza, v. 14, n. 3, p. 169-185, 2015.

SILVA, A. P. et al. Determinação da permeabilidade ao ar em amostras indeformadas de solo pelo método da pressão decrescente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 6, p. 1535-1545, 2009.

SILVA, M. C. et al. Impactos da compactação do solo nos sistemas agrícolas: uma revisão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 7, p. 460–466, 2018.

SILVA, M. R. et al. Propriedades físicas do solo e produtividade da soja influenciadas por sistemas de manejo. **Revista de Agricultura Neotropical**, Cassilândia, v. 5, n. 2, p. 27–34, 2018.

SILVA, P. L. F. et al. Solos arenosos para sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta em Arez, Rio Grande do Norte. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Petrópolis, v. 13, n. 5, p. 581-589, 2018.

SILVA, R. A.; LIMA, C. L. Manejo de solo visando a descompactação e melhoria das propriedades físicas. **Cadernos de Agroecologia**, v. 12, n. 3, p. 1-9, 2017.

SILVA, S. M. de A. et al. Resistência mecânica do solo à penetração associado à umidade, densidade, granulometria e macronutrientes em Ji-Paraná (RO). **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 7, n. 1, p. 5629-5647, 2021.

SILVA, T. A. C. da. **Indicadores da qualidade de solo na avaliação da condição ambiental de área de lixão desativado em Ouro Fino – MG**. 2019. 84 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2019.

SILVA, V. R. da; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Suscetibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 239-249, 2000.

SILVA, V. R. et al. Porosidade do solo e desenvolvimento radicular do milho sob diferentes sistemas de manejo. **Ciência Rural**, v. 44, n. 5, p. 784-790, 2014.

SILVEIRA, L. R. et al. Sistema de aquisição de dados para equipamento de medida da permeabilidade intrínseca do solo ao ar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 429-436, 2011.

SOUZA, L. C.; ANDRADE, J. S.; COSTA, E. R. Compactação e propriedades físico-hídricas de solos com diferentes texturas. **Ciência Agronômica**, v. 53, n. 1, p. 14–25, 2022.

STEFANOSKI, D. C. et al. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 12, p. 1301-1309, 2013.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 15, p. 229-235, 1991.

SUZUKI, L. E. A. S. et al. Critical limits for soybean and black bean root growth, based on macroporosity and penetrability, for soils with distinct texture and management systems. **Sustainability**, Basel, v. 14, n. 5, p. 2958, 2022.

SUZUKI, L. E. A. S. et al. Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, p. 1159-1167, 2007.

TIAN, L. et al. Effects of waterlogging stress at different growth stages on the photosynthetic characteristics and grain yield of spring maize (*Zea mays* L.) Under field conditions. **Agricultural Water Management**, Netherlands, v. 218, p. 250-258, 2019.

TIAN, M. et al. Changes of soil structure under different tillage management assessed by bulk density, penetrometer resistance, water retention curve, least limiting water range and X-ray computed tomography. **Soil and Tillage Research**, v. 221, p. 1-13, 2022.

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

TORMENA, C. A. et al. Propriedades físicas do solo relacionadas ao crescimento radicular do milho em Latossolo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 1, p. 1-9, 2011.

TORMENA, C. A. et al. Qualidade física do solo: compactação, estrutura e manejo sustentável. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 24, n. 9, p. 583–590, 2020.

TORMENA, C. A.; SILVA, Á. P.; IMHOFF, S. Resistência do solo à penetração e compressibilidade em Latossolo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 42, p. e0170116, 2018.

TULI, A. et al. Comparison of air and water permeability between disturbed and undisturbed soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 69, n. 5, p. 1361-1371, 2005.

VIEIRA, R. C.; NUNES, M. R.; ANDRADE, R. S. Densidade do solo e resistência à penetração em função da cobertura vegetal. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 7, n. 3, p. 50–57, 2020.

WILSON, L. G.; DORRANCE, D. W. Sampling from macropores with free-drainage samplers. In:

WILSON, L. Gray; EVERETT, L. G.; CULLEN, S. J. **Handbook of Vadose Zone Characterization & Monitoring**. Oxfordshire: Routledge, 2018. p. 605-616.