



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

SALATIEL EWEN BRAGA

RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE RAÍZES EM SOLOS DE
MICROBACIA DO RIO CAPIBARIBE

RECIFE – PE

Janeiro de 2024

SALATIEL EWEN BRAGA

RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE RAÍZES EM SOLOS DE
MICROBACIA DO RIO CAPIBARIBE

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal Rural de Pernambuco, para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Área de Concentração: Tecnologia e Gestão do Meio Ambiente

Linha de pesquisa: Solos e Engenharia de Sedimentos

Orientador: Prof. Dr. Fernando Cartaxo Rolim Neto

Coorientador: Prof. Dr. Brivaldo Gomes de Almeida

RECIFE – PE

Janeiro de 2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

B813r Braga, Salatiel Ewen
RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE RAÍZES EM SOLOS DE MICROBACIA DO RIO CAPIBARIBE / Salatiel
Ewen Braga. - 2024.
69 f. : il.

Orientador: Fernando Cartaxo Rolim Neto.
Coorientador: Brivaldo Gomes de Almeida.
Inclui referências.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Ambiental, Recife, 2024.

1. porosidade do solo. 2. densidade do solo. 3. umidade do solo. 4. compactação do solo. 5. crescimento de raízes. I.
Neto, Fernando Cartaxo Rolim, orient. II. Almeida, Brivaldo Gomes de, coorient. III. Título

CDD 620.8

SALATIEL EWEN BRAGA

RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE RAÍZES EM SOLOS DE
MICROBACIA DO RIO CAPIBARIBE

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal Rural de Pernambuco, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental, na Área de Concentração Tecnologia e Gestão do Meio Ambiente, e Linha de Pesquisa Solos e Engenharia de Sedimentos.

Aprovada em 29 de janeiro de 2024

Professor Dr. Fernando Cartaxo Rolim Neto
Presidente da Banca e Orientador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Vicente de Paulo Silva
(Universidade Federal Rural de Pernambuco)

Profa. Dra. Ceres Duarte Guedes Cabral de Almeida
(Universidade Federal Rural de Pernambuco)

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus Pai, o Criador de todas as coisas, sejam elas visíveis ou invisíveis, por guiar meus passos e iluminar o caminho da minha jornada acadêmica.

À memória do meu amado avô Salatiel, cujo nome orgulhosamente herdei, mesmo sem a oportunidade de buscar a sua bênção pessoalmente. Sua influência e legado continuam a inspirar meu percurso.

Recordo com gratidão o meu avô Agenor, também em memória, cujas palavras sábias e poucos momentos compartilhados me incumbiram de honrar e preservar o nome da nossa família para as gerações vindouras.

À minha avó Josenita, pilar inabalável da minha vida e educação. Seus ensinamentos baseados no amor e na humildade moldaram meu caráter, e sua pureza de coração a torna a pessoa mais digna que já conheci.

À minha avó Antônia por seu apoio constante e amor incondicional.

Aos meus dedicados pais, Alexandre e Josineide, cuja determinação e sacrifícios permitiram oferecer-me uma educação de qualidade, mesmo diante de desafios financeiros.

À minha amada esposa Rosíris, companheira incansável em todas as fases desta jornada acadêmica. Sua paciência, compreensão e amor constante são o alicerce que me sustenta.

À minha irmã Josenita, cujo apoio e amor incondicional são inestimáveis.

Aos meus dedicados orientadores do mestrado, Prof. Fernando Cartaxo Rolim Neto e Prof. Brivaldo Gomes de Almeida, expressei minha sincera gratidão. Suas orientações, conselhos e encorajamento foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

À Prof^a. Ceres Duarte Guedes Cabral de Almeida por sua contribuição nas coletas de campo e importantes orientações que desempenharam um papel crucial no desenvolvimento desta pesquisa.

Agradeço também aos professores e amigos da Graduação, em especial aos Professores Anildo Monteiro Caldas, Ioneide Alves de Souza e Alessandro Herbert de Oliveira, cujas orientações e amizade enriqueceram minha jornada acadêmica, moldando meu entendimento e paixão pela área de estudo.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a Ricardo e Rizzi, cujo apoio ultrapassa o meio acadêmico e foi essencial para o sucesso desta jornada, suas contribuições não

apenas aprimoraram meu trabalho, mas também fortaleceram os laços de amizade que valorizo profundamente.

Ao grupo de amigas do mestrado, Regina, Paula e Flávia, agradeço pela amizade e troca de experiências enriquecedoras. Cada um de vocês deixou uma marca indelével em minha trajetória acadêmica.

Por fim agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho. Cada uma dessas contribuições, grandes ou pequenas, foi vital para o sucesso deste trabalho.

"Meu filho, Eu te amo e nunca te abandonei. Os dias em que viste só um par de pegadas na areia são precisamente aqueles em que Eu te levei nos meus braços."

Pegadas na Areia Margaret Fishback Powers

RESUMO

O constante avanço da degradação do solo em nível mundial tem contribuído para que aproximadamente um terço das áreas agricultáveis já se encontrem num estado avançado de degradação, especialmente devido à compactação resultante de práticas agrícolas intensivas. A compactação do solo, decorrente de ações antrópicas, exerce influência negativa no crescimento das raízes e nas propriedades físicas do solo, como densidade, porosidade e resistência à penetração (RP), tendo como um dos principais efeitos o aumento do escoamento superficial. O objetivo deste trabalho foi avaliar a resistência do solo à penetração de raízes, a partir de amostras coletadas em anéis e em blocos, estabelecendo relações com seus atributos físico-hídricos, em quatro perfis de solos localizados no município de São Lourenço da Mata – PE. Foram obtidas Curvas Características de Retenção de Água nos Solos (CCRAS) com uso da mesa de tensão (1, 6 e 10 kPa) e câmara de Richards (33,3 e 300 kPa) em amostras indeformadas em cilindros. Após submetidas às citadas tensões, estas mesmas amostras foram submetidas a ensaios de resistência à penetração utilizando penetrômetro eletrônico de bancada. Foi realizada análise multivariada dos dados aplicando Análise de Componentes Principais (ACP) ao conjunto de dados obtidos, permitindo uma exploração das relações multivariadas presentes. Foi observado que em diferentes potenciais de retenção de água no solo, as amostras apresentaram variações na resistência à penetração de raízes. Nos horizontes superficiais, houve predominância de baixa a moderada resistência, já nos horizontes subsuperficiais, as amostras tenderam a apresentar moderada a alta resistência, com variação dependente do perfil e do potencial de retenção de água no solo. A análise multivariada dos dados revelou uma correlação significativa entre resistência à penetração e densidade de partículas, porosidade total e curva característica de retenção de água do solo, indicando sua influência na resistência à penetração. Por outro lado, as variáveis químicas mostraram uma menor correlação com a resistência à penetração.

Palavras chaves: porosidade do solo, densidade do solo, umidade do solo, compactação do solo, crescimento de raízes.

ABSTRACT

The constant increase in soil degradation worldwide has contributed to the fact that approximately one-third of arable areas are already in a serious state of degradation, especially due to compaction resulting from intensive agricultural practices. Soil compaction, resulting from human actions, has a negative influence on root growth and the physical properties of the soil, such as density, porosity, and resistance to penetration (RP), one of the main effects being the increase in surface runoff and contamination of the soil. ground. The objective of this work was to evaluate soil resistance to root penetration, based on samples collected in cylinders and blocks, establishing relationships with their physical-water attributes, in four soil profiles located in the municipality of São Lourenço da Mata – PE. Soil Water Retention Characteristic Curves (WRCC) were obtained using the tension table (1; 6; and 10 kPa) and Richards chamber (33.3 and 300 kPa) on undisturbed samples in cylinders. After being subjected to the aforementioned stresses, these same samples were subjected to penetration resistance tests using a bench electronic penetrometer. Multivariate analysis of the data was performed by applying Principal Component Analysis (PCA) to the set of data obtained, allowing an exploration of the multivariate relationships present. It was observed that at different soil water retention potentials, samples exhibited variations in root penetration resistance. In surface horizons, there was predominance of low to moderate resistance, whereas in subsurface horizons, samples tended to show moderate to high resistance, with variation dependent on the soil profile and water retention potential. Multivariate analysis of the data revealed a significant correlation between penetration resistance and particle density, total porosity, and soil water retention characteristic curve, indicating their influence on penetration resistance. On the other hand, chemical variables showed a lower correlation with penetration resistance.

Key words: soil porosity, bulk density, soil moisture, soil compaction, root growth.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Localização do município de São Lourenço da Mata e do CODAI	27
Figura 2 - Imagem Google Earth com a localização das trincheiras onde houve a coleta dos blocos de amostras de solo e o prédio de aulas do CODAI.....	29
Figura 3 - Etapas da extração dos blocos: A - Escavação ao redor do bloco com facas e serras; B - Envolvimento dos blocos com fita; C - Retirada do bloco do perfil com auxílio de chapa metálica	30
Figura 4 - A - Preparo do gesso com o tecido; B - Bloco revestido com gesso; C - Armazenamento dos blocos.....	30
Figura 5 - A - Processo de saturação do bloco engessado em bandeja de metal com água; B - Remoção do plástico envoltório; C -Aparo do gesso, toilette e nivelamento.....	31
Figura 6 - A - Utilização da prensa para inserção dos anéis volumétricos; B - Disposição dos anéis no bloco; C - Rompimento do bloco para extração das amostras	32
Figura 7 - A - Cilindros com amostras na mesa de tensão; B - Cilindros com amostras na câmara de Richards; C - Cilindros com amostras na estufa	33
Figura 8 - A - Penetrômetro MARCONI; B - Avanço da agulha na amostra de solo; C - Computação em tempo real da pressão aplicada sobre o solo.....	34
Figura 9 - Umidade volumétrica e Resistência do solo à Penetração de raízes em função do Potencial de retenção de água no solo nos pontos P1A (Horizonte Ap) e P1B (Horizonte Bw) de Latossolo Amarelo Distrocoeso típico.....	44
Figura 10 - Umidade volumétrica, Resistência à Penetração em função Potencial de retenção de água no solo nos pontos P2A (horizonte Ap) e P2B (horizonte Bt) de Argissolo Amarelo Distrocoeso típico.	45
Figura 11 - Umidade volumétrica e Resistência do solo à Penetração de raízes em função de retenção de água no solo nos pontos P3A (horizonte Ap) e P3B (horizonte Bt) de Argissolo Amarelo Eutrocoeso abrupto léptico solódico.....	46
Figura 12 - Umidade volumétrica e Resistência do solo à Penetração de raízes em função da retenção de água no solo nos pontos P4A (horizonte Ap) e P4B (horizonte Bt) de Argissolo Vermelho-Amarelo Distrocoeso típico.	47
Figura 13 - Gráfico de dispersão dos componentes principais dos atributos do solo após a rotação nos eixos (CP1 vs. CP2)	53
Figura 14 - Gráfico da distribuição da nuvem de variáveis no círculo de correlações	56

Figura 15 - Dendrograma gerado a partir da Análise de Agrupamentos de Observações com ligação média e distância Euclidiana das amostras de solo estudadas.	57
Figura 16 - Dendrograma evidenciando as relações entre as variáveis físico-hídricas.	58
Figura 17 - Dendrograma formado a partir das variáveis físico-hídricas e variáveis químicas das amostras.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Informações das profundidades de coleta dos blocos e descrição da área das trincheiras	29
Tabela 2 - Pressão aplicada para o esvaziamento do poro e método utilizado.....	33
Tabela 3 - Características morfológicas dos solos estudados.....	39
Tabela 4 - Granulometria, grau de dispersão, grau de floculação, coeficiente de saturação, densidade do solo e densidade de partículas dos solos estudados.....	40
Tabela 5 - Atributos físicos dos solos estudados.....	48
Tabela 6 - Estatística descritiva dos dados de atributos físicos do solo	49
Tabela 7 - Valores de padronização das variáveis dos atributos do solo com média e desvio padrão	50
Tabela 8 - Autovalores e percentual da variância explicada de cada componente principal	51
Tabela 9 - Resultados das cargas dos componentes principais antes da rotação nos eixos..	52
Tabela 10 - Resultados das cargas fatoriais dos componentes principais após a rotação <i>Varimax normalizada</i>	53

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	14
2. OBJETIVOS.....	16
2.1 Objetivo geral.....	16
2.2 Objetivos específicos.....	16
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	17
3.1 Degradação e qualidade física do solo.....	17
3.2 Atributos físicos indicadores da qualidade do solo.....	18
3.3 Compactação.....	19
3.4 Efeitos da compactação do solo.....	21
3.5 Resistência do solo à penetração de raízes.....	22
3.6 Medição e análise da RP.....	23
3.7 Análise multivariada.....	24
4. METODOLOGIA.....	27
4.1 Área de estudo.....	27
4.2 Solos usados no estudo.....	27
4.3 Amostragem do solo.....	28
4.4 Preparo dos blocos no laboratório.....	30
4.5 Coleta dos anéis volumétricos.....	31
4.6 Curva Característica de Retenção de Água no Solos (CCRAS).....	32
4.7 Resistência do solo à penetração de raízes.....	34
4.8 Informações adicionais sobre os solos estudados.....	35
4.9 Análise multivariada dos dados.....	35
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	37
5.1 Considerações sobre a morfologia e aspectos pedogenéticos dos solos estudados....	37
5.2 Atributos físicos do solo.....	40
5.3 Curva Característica de Retenção de Água no Solo (CCRAS) e Resistência do solo à Penetração de raízes (RP).....	42

5.4 Estatística descritiva dos atributos do solo	48
5.5 Análise de componentes principais (ACP).....	51
5.6 Análise de agrupamentos.....	56
6. CONCLUSÕES.....	61
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62

1. INTRODUÇÃO

Nos dias atuais muito se discute sobre o futuro do solo no nosso Planeta. Tais preocupações têm ocupado cada vez mais espaço nas pautas de discussões globais, dado seu estado de degradação a nível mundial. Num relatório das Nações Unidas está indicado que um terço de toda a terra arável mundial passa por algum tipo de degradação do solo, podendo ser erosão, salinização e compactação do solo (FAO, 2015).

Ainda segundo o mesmo estudo da FAO as áreas sob ameaça de compactação podem reduzir em até 60% os rendimentos mundiais das culturas agrícolas. Estima-se que no mundo problemas com compactação do solo tenham degradado uma área de 680.000 km² sendo esse valor equivalente a 4% da área agricultável total.

Os problemas mais comuns com a compactação de superfícies degradadas são o aumento da resistência mecânica à penetração das raízes, a redução da aeração e as alterações nos fluxos de água e calor, que também afetam a disponibilidade de água e nutrientes. Segundo Camargo e Alleoni (1997), as forças que atuam no solo podem ser classificadas como forças internas e forças externas. As forças devidas ao tráfego de animais, veículos e humanos são consideradas extrínsecas e podem contribuir para a formação de uma camada sólida compactada abaixo da superfície do solo, conhecida como pan, pé de grade, pé de arado, camada coesa, etc. As forças resultantes de ciclos como congelamento, umedecimento, descongelamento, secagem e encolhimento da massa do solo causam compactação do subsolo e estão quase sempre relacionadas às propriedades do solo do subleito. Os autores relatam que não faz sentido fazer distinção entre consolidação e compressão quando estão relacionadas a unidades de pressão.

Os problemas ambientais associados à compactação são o aumento do escoamento superficial, devido à baixa permeabilidade e à redução de vazios, levando à erosão, sedimentação de cursos de água, poluição das águas superficiais, altos picos de inundação e falta de reposição de água nos aquíferos. Tais efeitos são resultados do mau uso e da má conservação do solo, principalmente devido a práticas agrícolas descontroladas (De Oliveira et al., 2013).

Diante desse cenário de degradação do solo, torna-se imperativo compreender as complexas interações que levam à sua perda estrutural. As práticas agrícolas intensivas, muitas vezes desprovidas de uma abordagem sustentável, têm desempenhado um papel crucial nesse processo. O uso indiscriminado de maquinários pesados e a falta de gestão

adequada do solo contribuem para a compactação, comprometendo não apenas a produtividade agrícola, mas também desencadeando impactos ambientais de longo alcance. Nesse contexto, a busca por indicadores confiáveis e métodos de avaliação eficazes torna-se essencial para o desenvolvimento de estratégias que visem à recuperação e preservação dos solos (Kapalanga, 2008).

Os usos de equipamentos e metodologias para avaliar, de forma indireta, a resistência do solo à penetração de raízes são muito importantes na avaliação da degradação estrutural do solo, pois valores obtidos refletem indiretamente as condições físicas do solo. Seus potenciais como indicadores vão além da mera identificação do problema, abrindo caminho para a compreensão das relações intrincadas entre a resistência do solo, atributos físico-hídricos e a efetividade do crescimento das culturas. Ao compreender essas interconexões, será possível estabelecer abordagens mais eficazes na gestão do solo, promovendo práticas agrícolas que sejam simultaneamente produtivas e sustentáveis (Kairis et al., 2014; Kosmas et al., 2014).

Essa pesquisa objetivou determinar a resistência do solo à penetração de raízes (RP) em condições de laboratório, suas relações com atributos físico-hídricos e como os resultados se correlacionam com o grau de degradação do solo.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar o potencial da resistência do solo à penetração de raízes em diagnosticar a degradação estrutural dos solos e sua relação com atributos físico-hídricos dos solos estudados.

2.2 Objetivos específicos

- Determinar a resistência do solo à penetração de raízes (RP) em laboratório, utilizando penetrômetro de bancada.
- Determinar em laboratório os atributos físico-hídricos do solo: porosidade total; distribuição de tamanho de poros; e umidades gravimétrica e volumétrica.
- Analisar a RP relacionando-a com a CCRAS e 5 potenciais de retenção de água (1; 6; 10; 33,3; 300 kPa).
- Avaliar a dependência dos resultados de RP com os atributos físico-hídricos (textura, condutividade hidráulica saturada; densidade do solo) obtidos em um banco de dados gerado previamente e os obtidos nesse trabalho (Pt, CCRAS, umidade volumétrica, através de análise multivariada).

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Degradação e qualidade física do solo

O sucesso do estabelecimento da copa das plantas depende de um efeito sinérgico complexo de fatores ambientais, nos quais a absorção eficiente de nutrientes é um dos mais importantes. Desta forma, qualquer obstáculo que interfira no crescimento das raízes pode afetar gravemente a capacidade da planta de absorver nutrientes essenciais, principalmente no momento mais crítico do crescimento, prejudicando o crescimento das plantas. Vários fatores podem contribuir para o fraco crescimento do sistema radicular nas espécies de plantas, incluindo danos causados por insetos e doenças, deficiências nutricionais, acidez do solo, drenagem inadequada, níveis insuficientes de oxigênio, baixa temperatura do solo, compactação do solo e danos físicos às raízes. Dentre essas limitações, a compactação do solo muitas vezes ocupa um lugar importante, pois causa uma série de problemas que afetam o desempenho das plantas ao limitar o crescimento e desenvolvimento das raízes. (Camargo e Alleoni, 1997).

Áreas degradadas podem ser avaliadas pelo grau de compactação do solo, sendo caracterizada pelo acréscimo da densidade, oriunda da aplicação de cargas ou pressão ao solo, ocasionando redução da porosidade. Ela causa incremento na resistência do solo à penetração das raízes (RP) e, dependendo do grau em que ocorre, pode promover condições que restringem o desenvolvimento e produção das culturas (Silva, Albuquerque e Costa., 2014; Szymczak et al., 2014; Rossetti e Centurion, 2017).

Szatanik-Kloc et al. (2018) ao estudarem sobre as modificações ocasionadas pela degradação do solo, concluíram que a densidade de carga aplicada no solo influencia diretamente no surgimento de camadas compactadas. Essas camadas interferem diretamente no desenvolvimento das raízes e na capacidade de troca catiônica.

Em um solo compactado, a difusão do ar, infiltração e a drenagem da água são comprometidas, acarretando problemas como sufocamento radicular, escoamento superficial e baixa absorção d'água; fatos preocupantes, uma vez que estes processos se manifestam no interior no subsolo e, geralmente, de forma gradual e oculta. Quando os sintomas gerados pela compactação aparecem ou se tornam visíveis, os seus custos operacionais de reversão ficam inviáveis economicamente, desencadeando assim,

transtornos ambientais e agronômicos como erosão, lixiviação e baixa produtividade (Baesso et al., 2020).

A deterioração da qualidade física do solo está associada à intensa atividade agrícola e ao aumento da área agrícola. A pecuária e a agricultura, quando realizadas sem preparação adequada e uso de maquinários pesados, podem causar problemas relacionados com a compactação do solo, limitando a captação e absorção de nutrientes, a infiltração e redistribuição da água, bem como o desenvolvimento do sistema radicular, reduzindo a produtividade do solo (Rangel e Silva, 2007; Richart et al., 2005; Sales et al., 2016).

3.2 Atributos físicos indicadores da qualidade do solo

Vieira e Muzilli (1995) destacam que os atributos físicos do solo são afetados com diferentes intensidades, dependendo do tipo de preparo adotado em cada sistema de manejo, a intensidade do revolvimento, o tráfego de máquinas, o tipo de equipamento utilizado, o manejo dos resíduos vegetais e as condições de umidade do solo durante o preparo. O uso inadequado de máquinas e equipamentos agrícolas pode resultar na compactação de camadas subsuperficiais do solo. Essa prática foi identificada por Campos et al. (1995) como uma das principais causas de degradação da estrutura do solo e da diminuição da produtividade das culturas.

Entre as propriedades físicas do solo, a estrutura se destaca como uma característica sensível ao manejo, podendo ser avaliada através de variáveis relacionadas à sua forma e estabilidade. Em geral, observa-se que com o aumento da intensidade de cultivo ocorrem alterações no tamanho dos agregados do solo, aumento da densidade, redução da porosidade total e incremento da resistência à penetração do solo (Albuquerque et al., 1995; Campos et al., 1995; D'Andréa, 2001; Silva e Mielniczuk, 1997).

O monitoramento da qualidade baseado nas propriedades físicas do solo é fundamental para manter e avaliar a sustentabilidade dos sistemas agrícolas. Além disso, o monitoramento de propriedades físicas como porosidade, densidade, resistência à penetração e condutividade hidráulica, garante uma mecanização mais responsável, uso racionalizado dos recursos naturais e redução da degradação ambiental (Doran e Parkin,

1994). O impacto do manejo nas propriedades físicas do solo depende de sua textura e mineralogia, que influenciam a resistência e a resiliência do solo diante de práticas agrícolas específicas (Seybold, Herrick e Brejda, 1999).

Portanto, é imprescindível monitorar a qualidade do solo, o que pode ser feito por meio da avaliação de seus atributos físicos, essenciais para garantir a sustentabilidade dos sistemas agrícolas. No processo de monitoramento, os atributos utilizados como indicadores de mudanças devem ser sensíveis ao manejo, em uma escala de tempo que permita uma análise precisa (Doran e Parkin, 1994).

A avaliação do grau de compactação do solo é um procedimento fundamental para monitorar sua qualidade física. Os procedimentos mais comuns são ensaios para determinar a densidade do solo, porosidade e principalmente a resistência mecânica do solo à penetração de raízes (Girardello et al., 2014; Miotto et al., 2016).

3.3 Compactação

Diante da necessidade de produzir alimentos em larga escala, a sociedade moderna passou a utilizar máquinas cada vez mais pesadas para a produção agrícola. Este é um dos principais fatores causadores do problema de compactação do solo, que surge desde o início da mecanização agrícola, devido às alterações nas propriedades físicas do solo (Richart et al., 2005).

Em solos compactados, as barreiras mecânicas retardam o desenvolvimento das plantas, reduzindo o volume do solo explorado, diminuindo assim a absorção de água e nutrientes e subtraindo os rendimentos das culturas (Richart et al., 2005). Segundo Alvarenga et al. (1996) a distribuição radicular das plantas no perfil do solo é determinada por condições físico-químicas que podem variar dependendo do manejo utilizado.

Teles (2019) destaca que existem diferentes graus de compactação e variam de acordo com o tipo de solo. O aumento da densidade afeta negativamente as propriedades dos estratos e das camadas, reduzindo a macroporosidade e aumentando a microporosidade. Assim, a deformação física do solo leva à redução da capacidade de aeração e há um aumento da resistência à penetração das raízes.

Tullberg et al. (2018) também pontuam que a compactação pode também ser definida como um processo que reduz o tamanho dos poros do solo. Esse processo

ocasiona um impedimento mecânico ao crescimento radicular das plantas, prejudicando os sistemas de aeração do solo, a condutividade do ar, da água e do calor, e a infiltração e redistribuição da água no solo.

As propriedades físicas do solo são impactadas negativamente pelo aumento do grau de compactação do solo e podem atingir limites críticos para o desenvolvimento de culturas. A compactação, além de aumentar a resistência do solo à penetração de raízes, amplia a faixa da capacidade de campo, ponto de murcha permanente e microporosidade, reduzindo a porosidade total, macroporosidade, capacidade de aeração e condutividade hidráulica saturada do solo. Indiretamente as propriedades físicas do solo podem afetar o desenvolvimento e a produtividade das culturas (Andognini et al., 2020; Hargreaves et al., 2019).

Conforme o estudo de Oliveira Filho et al. (2016) um aspecto importante do manejo da compactação do solo é conhecer a proporção do campo afetado pelas diferentes intensidades de compactação, ou seja, estudar o solo para determinar a melhor forma de descompactá-lo. Fisicamente, a compactação é resultado da ação de forças mecânicas, causadas pela movimentação de máquinas ou animais pisoteando o solo, e da ação da água que passa pelo perfil do solo, carregando consigo partículas do próprio solo. Com o uso excessivo de maquinaria pesada, gradagem e arações superficiais, ocorre a quebra de agregados. (Embrapa, 2000).

A manutenção de condições adequadas de agregação do solo é uma condição importante para uma boa produtividade agrícola, garantindo quantidades adequadas de ar, água e nutrientes para o crescimento das plantas. De acordo com Alvarenga et al. (2009) a quebra dos agregados reduz a porosidade, principalmente os poros maiores (macro e mesoporos) aumentando assim a densidade do solo, ocasionando a diminuição de troca gasosa, limitando o movimento de nutrientes e diminuindo a taxa de infiltração no solo e a erosão.

No estudo conduzido por Richart et al. (2005) eles observam que também ocorrem alterações físicas no solo conforme o estudo de Alvarenga et al. (2009). Aumentando a resistência do solo à penetração das raízes e reduzindo a macroporosidade, o que leva ao acúmulo de água e afeta a infiltração no perfil do solo e a penetração das raízes.

De acordo com Embrapa (2000) a matéria orgânica está intimamente ligada aos fatores que determinam a qualidade do solo. Ela é essencial para uma produtividade mais elevada e sustentável sendo a base para preservar a capacidade de troca de nutrientes e

água do solo. Biologicamente, a regulação da compactação ocorre através da decomposição da matéria orgânica que estabiliza o agregado.

As práticas de preparação do solo desempenham um papel crucial na introdução e incorporação da matéria orgânica à camada superficial. Além de proporcionar oxigenação, essas atividades estimulam a atividade biológica, desencadeando os processos de decomposição e mineralização da matéria orgânica presente no solo.

3.4 Efeitos da compactação do solo

Os efeitos da compactação do solo podem ser prejudiciais ao crescimento das plantas. A alteração de alguns fatores que afetam o crescimento, como a aeração e a retenção de umidade, pode reduzir a porosidade do solo e reduzir a resistência à penetração das raízes, tornando-os solos mais suscetíveis à erosão (Sá e Santos Junior, 2005).

As camadas compactadas do solo podem ser determinadas avaliando-se as propriedades físicas e morfológicas do solo como densidade do solo, porosidade do solo, tipo e grau de estrutura do solo e resistência do solo à penetração. Essas propriedades afetam o movimento da água e do ar no solo, bem como o desenvolvimento das raízes das plantas (Kochhann, Denardin e Serton, 2000).

Os problemas ambientais provenientes da compactação são: escoamento superficial decorrente da baixa capacidade de infiltração e pela diminuição de espaços vazios, resultando na erosão do solo; assoreamento de cursos d'água e contaminação das águas superficiais; elevados picos de cheias e aquíferos subterrâneos sem recarga. Todos esses problemas são consequência do mau uso e conservação da terra, principalmente devido a práticas agrícolas descontroladas (De Oliveira et al., 2013).

Para Silva et al. (2012), em estudo realizado sobre os efeitos da compactação do solo no crescimento das raízes do pinhão-manso, ficou evidenciado que a compactação na camada central exerceu impactos diretos sobre as raízes. Os resultados da pesquisa indicaram que a compactação do solo resultou no engrossamento e na redução quantitativa das raízes na camada compactada. Foi visto que tanto na camada compactada quanto na camada inferior houve redução significativa na quantidade de raízes. O estudo ainda apontou uma alta sensibilidade das raízes à compactação do solo, manifestando uma

redução significativa de seu desenvolvimento à medida que a densidade do solo aumentava, a partir do valor de $1,2 \text{ g.cm}^{-3}$.

3.5 Resistência do solo à penetração de raízes

A resistência do solo à penetração de raízes (RP) está intrinsecamente relacionada à compactação do solo, caracterizando-se como um indicador crucial. Esse parâmetro denota a força física imposta pelo solo às raízes das plantas em sua tentativa de avançar no subsolo. Tal resistência é sensivelmente afetada pelas características de densidade e porosidade do solo (Mazurana et al., 2013; Justino et al., 2017).

Uma das práticas agrícolas que mais tem implicação no aumento da resistência do solo à penetração de raízes são os manejos não-conservacionistas do solo. Sob áreas de pastagem, esses manejos podem promover a degradação da estrutura física do solo, permitir a erosão, reduzir a macroporosidade e a infiltração de água (Byrnes et al., 2018; Brizzi et al., 2019; Battisti et al., 2020). Isso resulta no aumento da resistência do solo à penetração de raízes, redução do volume total de poros do solo e promoção da erosão laminar. Tais processos acarretam no aumento da densidade do solo (Ds) e no menor desenvolvimento de macroagregados, culminando em uma contínua diminuição da produtividade. No entanto, sistemas de manejo conservacionistas podem reverter esse processo e melhorar os atributos físicos do solo, como a agregação e a Ds (Comin et al., 2016; Martinkoski et al., 2017; Sena et al., 2017).

Um dos indicadores primários de compactação no solo é a resistência do solo à penetração, que quantifica a resistência física que o solo apresenta a qualquer coisa que tente penetrá-lo, como uma raiz em crescimento ou uma ferramenta de cultivo. A compactação influencia diretamente a qualidade do solo, e sua avaliação é comparada à condição natural ou sem restrições ao crescimento e produtividade das plantas (Silva, Reichert e Reinert, 2004).

Torna-se relevante estudar os indicadores de qualidade física dos solos, como apontado por Bertollo et al. (2013). Entre esses indicadores, a resistência do solo à penetração destaca-se, requerendo avaliação em diferentes teores de umidade. As propriedades físicas do solo, conforme observado por diversos autores, variam de acordo com a localização e apresentam continuidade ou dependência espacial, influenciadas pelo

manejo adotado e pelas características originais dos solos. Beutler et al. (2002) destacam que a resistência do solo à penetração é influenciada por fatores como tipo de solo, histórico de uso e preparo do solo. Conseqüentemente, solos submetidos a diferentes sistemas de manejo sofrem alterações em profundidade, sendo essencial compreender esse aspecto para o estudo da dependência espacial.

Segundo Silva, Reichert e Reinert, (2004) é preferível a utilização de penetrômetros para medir o estado de compactação, devido à praticidade e rapidez na obtenção dos resultados. Além disso, os penetrômetros permitem medir a resistência do solo em pequenos incrementos de profundidade, sendo úteis para avaliar camadas de maior resistência em profundidade. Vale ressaltar que os valores de resistência à penetração estão positivamente correlacionados com a densidade e textura do solo.

3.6 Medição e análise da RP

Entre os equipamentos destinados aos ensaios para quantificação da RP se destacam os penetrômetros, que consistem em instrumentos portáteis que mensuram a resistência do solo à introdução de uma haste de extremidade cônica. O mercado e a literatura oferecem uma gama diversificada de modelos de penetrômetros, que variam em termos de aplicação em bancadas ou em campo, funcionamento manual ou automatizado, abordagem estática (como o penetrógrafo) ou dinâmica (baseada em impacto), além da disponibilidade ou ausência de sistemas eletrônicos de registro de dados (Baesso et al., 2020).

Segundo Benghough e Mullins (1990) a medição da resistência à penetração é normalmente realizada utilizando-se um penetrômetro devido à sua praticidade e rapidez na obtenção dos resultados. Desta forma Betioli Junior et al. (2012), utilizando um penetrômetro eletrônico, definiram o valor limite da resistência do solo à penetração como sendo 3,5 MPa. Souza et al. (2006), utilizando um penetrômetro de impacto, determinaram que a resistência à penetração considerada limitante para o crescimento radicular das plantas, variou de 1,5 a 3,0 MPa. Tais resultados foram corroborados através do estudo de Grant e Lafond (1993) que considerou a faixa restritiva entre 1,5 e 3,0 MPa, devido às condições limitantes ao crescimento radicular das plantas devido ao aumento da RP em função da compactação do solo. Em contrapartida Torres e Saraiva (1999)

consideraram uma RP em torno de 2,5 MPa como pouco limitante para o desenvolvimento radicular, e que valores de RP entre 3,5 a 6,5 MPa apresentavam grande limitação ao desenvolvimento de raízes. Mercante, Uribe-Opazo e Souza (2003) consideraram a RP até 3,5 MPa, como indicativo de baixa compactação, e de 6,5 MPa, de alta compactação. Desta forma não há uma unanimidade sobre a faixa ou limite crítico para o desenvolvimento radicular das culturas, ainda assim, em linhas gerais, é considerado uma RP de 2,0 a 2,5 MPa como a faixa limítrofe para um crescimento radicular que não ocasione perdas de produtividades significativas às culturas (Taylor, Roberson e Parker Júnior, 1966).

Algumas plantas são mais sensíveis que outras em termos de resistência à penetração. Algumas são capazes de desenvolver seus sistemas radiculares mesmo em condições de solo muito compactado. Além do tipo de cultura, os valores críticos de RP estão relacionados ao teor de argila do solo e ao sistema de manejo aplicado no solo (Beutler e Centurion, 2004; Rosolem, Foloni e Tiritan, 2002; Silva, 2003).

Uma RP acima do ponto crítico suportado pela planta afeta a capacidade do sistema radicular de absorver água e nutrientes necessários ao seu desenvolvimento e ao metabolismo vegetal (Camargo e Alleoni, 1997; Foloni, Lima e Büll, 2006). Plantas com raízes pivotantes são mais afetadas pela RP do que plantas com raízes fasciculadas mais finas. Plantas com forte crescimento radicular alteram a estrutura do solo e reduzem a RP, através da formação de canais e facilitando a infiltração, após a ação de microrganismos na destruição das raízes (Müller, Ceccon e Rosolem, 2001; Rosolem, Almeida e Sacramento, 1994). Além disso, o aumento da matéria orgânica e o aumento da estabilidade dos agregados proporcionam uma descompressão mais suave em comparação com o uso de escarificadores e subsoladores, reduzindo a suscetibilidade do solo à compactação (Roth, Castro-Filho e Medeiros, 1992; Whiteley e Dexter, 1982).

3.7 Análise multivariada

Técnicas estatísticas multivariadas, como Análise Fatorial (AF) e Análise por Componentes Principais (ACP), são amplamente utilizadas para a avaliação de variações temporais e espaciais e a interpretação de conjuntos de dados grandes e complexos de determinados fins, inclusive qualidade da água (Mohamed et al., 2015; Gholizadeh,

Melesse e Reddi, 2016; Singh e Tripathi, 2016; Islam et al., 2017; Zeinalzadeh e Rezaei, 2017; Al-Ani, Obaidy e Hassan, 2019; Tripathi e Singal, 2019).

A análise por componentes principais (ACP) é um método de análise estatística multivariada usada com o objetivo de condensar a informação contida em várias variáveis originais em um conjunto menor de variáveis estatísticas, com uma perda mínima de informação (Hair et al., 2009; Hongyu, Sandanielo e Oliveira Jr., 2016). Ainda, segundo (Sabin, Ferrão e Furtado, 2004), este método caracteriza-se como sendo um dos métodos mais comumente empregado na análise de informações por sua capacidade de compressão de dados em função da existência de correlação entre diversas variáveis medidas.

O método das componentes principais consiste em reescrever as coordenadas das variáveis em um outro sistema de eixo mais apropriado para a análise dos dados. N-variáveis originais geram, através de combinações lineares, n- componentes principais, cuja principal característica, além da ortogonalidade, é que essas novas componentes principais são obtidas em ordem decrescente de máxima variância (Andrade et al., 2007).

O cálculo das componentes principais é elaborado de forma que a primeira componente principal explique o máximo da variabilidade total dos dados; a segunda componente principal explique o máximo da variabilidade total restante dos dados, sendo não-correlacionada com a primeira; a terceira componente principal explique o máximo da variabilidade total restante dos dados, sendo não-correlacionada com a primeira e a segunda componentes, e assim sucessivamente, até que o número de componentes principais seja no máximo igual ao número de variáveis analisadas (Andrade et al., 2007).

Segundo Hongyu, Sandanielo e Oliveira Jr. (2016), o número de componentes principais importantes para descrição da variabilidade dos dados é menor que o número de parâmetros da base de dados original pois, a partir de certa componente principal limite, a variância das componentes tende a zero, sendo, portanto, desnecessária a inclusão dessas componentes na nova base de dados reduzida.

Segundo Hair et al. (2009), nem sempre a matriz das componentes obtidas na fase de extração não apresenta um conjunto de cargas fatoriais, seja devido à existência de cargas cruzadas, acúmulo de variáveis em um mesmo fator ou a inexistência de variáveis com cargas significativas em alguns fatores (Andrade et al., 2007; Hair et al., 2009).

Normalmente, emprega-se a rotação ortogonal através do método VARIMAX (Andrade et al., 2007; Hair et al., 2009), por a mesma se concentrar na simplificação das colunas da matriz fatorial, facilitando a interpretação dos fatores (Hair et al, 2009).

No pré-tratamento dos dados foi considerada a padronização (escore Z), segundo

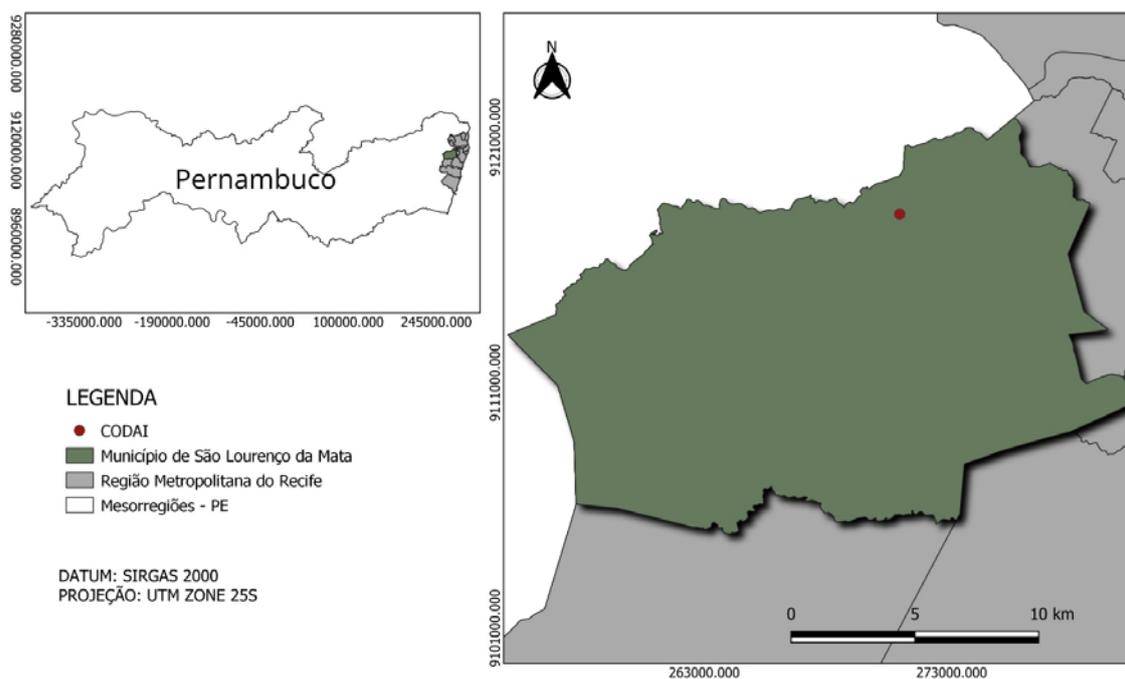
as médias e desvios padrão. A padronização faz com que as variáveis transformadas passem a ter média zero e variância unitária, o que é conseguido pela transformação “Z”. O escore Z pode ser positivo, negativo ou igual a zero. A finalidade da padronização e escalonamento dos dados originais é expressar cada observação em termos de variações inerentes ao sistema (Moita Neto e Moita, 1998).

4. METODOLOGIA

4.1 Área de estudo

A pesquisa foi realizada a partir de amostras coletadas em quatro perfis de solo numa microbacia do Rio Capibaribe, em área pertencente ao Colégio Dom Agostinho Ikas (CODAI) da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), localizado no município de São Lourenço da Mata – PE (Figura 1). O relevo local varia de plano a suave ondulado e o uso atual do solo sob cultivo de melancia e mandioca, vegetação composta por plantas nativas, capim e algumas espécies arbóreas e arbustivas. Inicialmente foi feita uma delimitação da área a ser estudada e definição dos pontos de amostragens.

Figura 1 - Localização do município de São Lourenço da Mata e do CODAI



Fonte: O autor.

4.2 Solos usados no estudo

Com base no mapa de solos da área de estudo, publicado por Marques (2014), e de trincheiras abertas já existentes na área, foram selecionados quatro perfis de solos (P1,

P2, P3, P4), onde foram realizadas as coletas de amostras não deformadas, em blocos, dentro da área do Colégio Dom Agostinho Ikas.

No perfil P1 ocorre o solo classificado como Latossolo Amarelo Distrocoeso típico, formado a partir da cobertura sedimentar da Formação Barreiras, depositada sobre rochas do Pré-Cambriano.

No perfil P2 ocorre o solo classificado como Argissolo Amarelo Eutrocoeso típico, formado a partir de gnaisses do Pré-Cambriano. No perfil P3 ocorre o solo classificado como Argissolo Amarelo Eutrocoeso abrupto léptico solódico, com origem a partir de biotita-xisto-gnaisses e gnaisses do Pré-Cambriano. No perfil P4 ocorre o solo classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo Distrocoeso típico, originado exclusivamente de rochas gnaisses do Pré-Cambriano. Os Argissolos estão associados à acumulação de argila com atividade baixa ou alta, conjugada com saturação por bases baixa ou caráter alítico no horizonte subsuperficial.

4.3 Amostragem do solo

Para amostragem do solo para esta pesquisa, foram selecionados quatro perfis distintos (P1, P2, P3, P4) em uma área representativa do estudo (Figura 2). Em cada um desses pontos haviam sido escavadas trincheiras para coleta de amostras de solos, onde foram coletados blocos em dois horizontes distintos, sendo um superficial e outro subsuperficial, conforme descrito na tabela 1, totalizando assim 16 blocos, para a realização das análises no Laboratório de Física do Solo do Departamento de Agronomia da UFRPE.

A escolha da coleta das amostras de solo em blocos, para facilitar a posterior introdução dos cilindros e realização das determinações físico-hídricas, foi em função das condições do solo, referentes ao grau de compactação, umidade, presença de pedregosidade e material orgânico.

Figura 2 - Imagem Google Earth com a localização das trincheiras onde houve a coleta dos blocos de amostras de solo e o prédio de aulas do CODAI



Fonte: O autor.

Tabela 1 - Informações das profundidades de coleta dos blocos e descrição da área das trincheiras

Perfil	Horizontes (cm)		Vegetação Primária	Uso Atual
	A	B		
P1	0-14	30-45	Floresta subperenifólia	Área em pousio
P2	0-14	28-80	Floresta subperenifólia	Área em pousio
P3	0-15	15-29	Floresta subperenifólia	Cultivo de Melancia e Mandioca
P4	0-12	26-60	Floresta subperenifólia	Área em pousio com Araçá e Gramíneas

Fonte: O autor.

Antes da execução da coleta, foi feita uma leve raspagem na parte superior do solo. Tal procedimento visou a eliminação de restos orgânicos e de qualquer tipo de material proveniente da percolação em períodos chuvosos.

Com a intenção de evitar perturbações ao solo coletado e manter as condições físicas presentes no campo, foram utilizadas ferramentas que causassem o menor impacto possível como serrotes, serras e facas. Para realizar o rompimento da parte basal do bloco da parte restante do solo foram utilizadas uma chapa de aço e uma marreta (Figura 3).

Figura 3 - Etapas da extração dos blocos: A - Escavação ao redor do bloco com facas e serras; B - Envolvimento dos blocos com fita; C - Retirada do bloco do perfil com auxílio de chapa metálica



Fonte: O autor.

Nesse sentido, no momento da extração dos blocos, eles foram reforçados com fita adesiva para evitar rachaduras, e após a extração foram revestidos com plástico filme e fixados com fita adesiva e envolvidos com plástico bolha, para que pudessem ser transportados com segurança ao Laboratório de Física do Solo da UFRPE. Os blocos foram devidamente identificados de acordo com o ponto de coleta, tipo de solo e profundidade de coleta.

4.4 Preparo dos blocos no laboratório

No laboratório, cada um dos 16 blocos passou por um preparo para reforçar a sustentação para a etapa de inserção dos anéis volumétricos. Nessa etapa os blocos foram revestidos com ataduras e em seguida reforçados com gesso (Figura 4).

Figura 4 - A - Preparo do gesso com o tecido; B - Bloco revestido com gesso; C - Armazenamento dos blocos

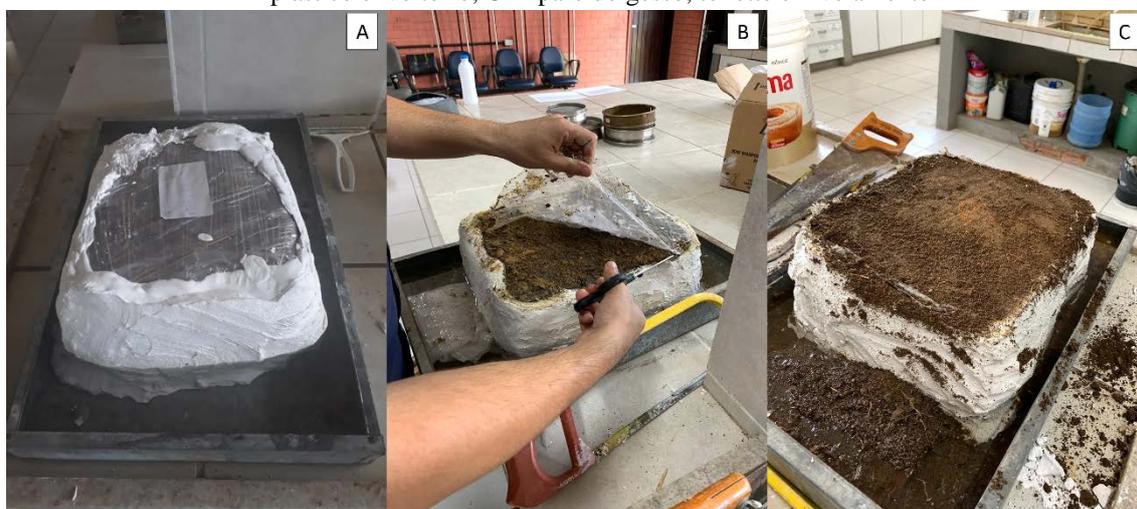


Fonte: O autor.

4.5 Coleta dos anéis volumétricos

Os anéis volumétricos passaram por uma limpeza para a retirada de resíduos provenientes de outras utilizações, após lavagem e secagem eles foram identificados, pesados e medidos seus diâmetros e alturas. Antes do processo de inserção dos anéis volumétricos, os blocos de solo foram saturados por 24 horas em bandejas de metal, sendo preparados com o aparo do excedente da camada gesso e toilette, consistindo na limpeza da camada superficial e nivelamento da mesma para que houvesse maior precisão na equidade da profundidade quando os anéis fossem inseridos (Figura 5).

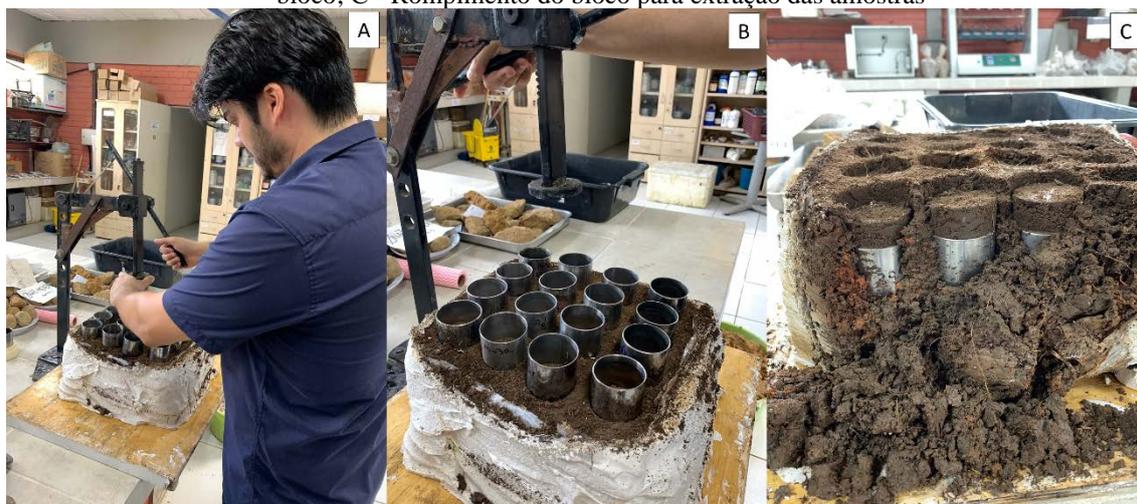
Figura 5 - A - Processo de saturação do bloco engessado em bandeja de metal com água; B - Remoção do plástico envoltório; C - Aparo do gesso, toilette e nivelamento



Fonte: O autor.

Para a inserção dos anéis foi utilizada uma prensa manual, e apoios em madeira, com a quantidade de anéis volumétricos variando entre 12 e 16 anéis por bloco de acordo com a superfície disponível para a inserção. Durante a coleta foi mantida uma distância de 2 cm entre os anéis e 4 cm de distância das bordas do bloco, para evitar o efeito bordadura (Figura 6). Após retirados, passaram pelo processo de toilette e inserção de pano e liga, previamente pesados, na base inferior do anel. Por fim, os anéis volumétricos, contendo o solo, foram acomodados em bandejas.

Figura 6 - A - Utilização da prensa para inserção dos anéis volumétricos; B - Disposição dos anéis no bloco; C - Rompimento do bloco para extração das amostras



Fonte: O autor.

4.6 Curva Característica de Retenção de Água no Solos (CCRAS)

Os anéis volumétricos foram levados à mesa de tensão e câmara de Richards para obtenção da Curva Característica de Retenção de Água no Solos (CCRAS), conforme a metodologia de Richards (1965) e Libardi (2005). Esses equipamentos medem, de forma indireta, o peso de água presente na amostra submetida a determinadas tensões.

Na mesa de tensão ocorreu a medição da retenção de água em baixo potencial, sendo as amostras de solo previamente saturadas e submetidas a determinados potenciais de tensão, até cessar a drenagem da água retida nos poros com força menor que o potencial aplicado. Desta forma, foi determinada a umidade da amostra por gravimetria, sendo convertida em seguida em umidade volumétrica.

A transição da mesa de tensão para a câmara de Richards foi devido à limitação imposta pela mesa de tensão em relação aos potenciais que podem ser aplicados. Na mesa de tensão, foi possível atingir potenciais de 1, 6 e 10 kPa. Para potenciais elevados foi necessário passar as amostras para a câmara de Richards, e por meio da pressurização permite a aplicação de potenciais mais elevados.

Na câmara de Richards, as amostras de solos saturadas foram dispostas em um meio poroso (placa de cerâmica) onde houve o esvaziamento de poros até o equilíbrio com um potencial aplicado por pressurização. Para manter a pressurização, as amostras foram mantidas em câmaras herméticas, providas de um sistema de drenagem, sendo a

pressurização fornecida por um sistema com compressores, reguladores de pressão e manômetros. O potencial (pressão) determinado foi ajustado e, conseqüentemente, a água retida com forças menores que o potencial aplicado moveu-se em direção e através da placa cerâmica, passando para o sistema de drenagem. O equilíbrio foi determinado quando a drenagem do fluxo cessou e o conteúdo de água foi estimado gravimetricamente.

Na tabela 2 são expostas algumas informações sobre a pressão necessária para o esvaziamento de uma determinada classe de poros e o respectivo método utilizado.

Tabela 2 - Pressão aplicada para o esvaziamento do poro e método utilizado

Variável	Pressão Aplicada	Método
Macroporos	1 kPa	Mesa de Tensão
Mesoporos	6 kPa	Mesa de Tensão
Capacidade Campo (Arenoso)	10 kPa	Mesa de Tensão
Capacidade Campo (Argiloso)	33,3 kPa	Câmara de Richards
Microporos (E+B)	300 kPa	Câmara de Richards
Microporos (T)	1500 kPa	Câmara de Richards
Criptoporos	105 °C	Estufa

(E+B) - Estrutural + Biológico; (T) - Textural.

Fonte: O autor.

As amostras coletadas permitiram que fossem realizadas 4 repetições para cada potencial e para cada horizonte dos perfis estudados, resultando em 160 amostras, as quais foram analisadas para as definições das CCRAS e posteriormente das resistências à penetração do solo.

A Figura 7 ilustra os procedimentos conduzidos na mesa de tensão, na câmara de Richards e na estufa.

Figura 7 - A - Cilindros com amostras na mesa de tensão; B - Cilindros com amostras na câmara de Richards; C - Cilindros com amostras na estufa



Fonte: O autor.

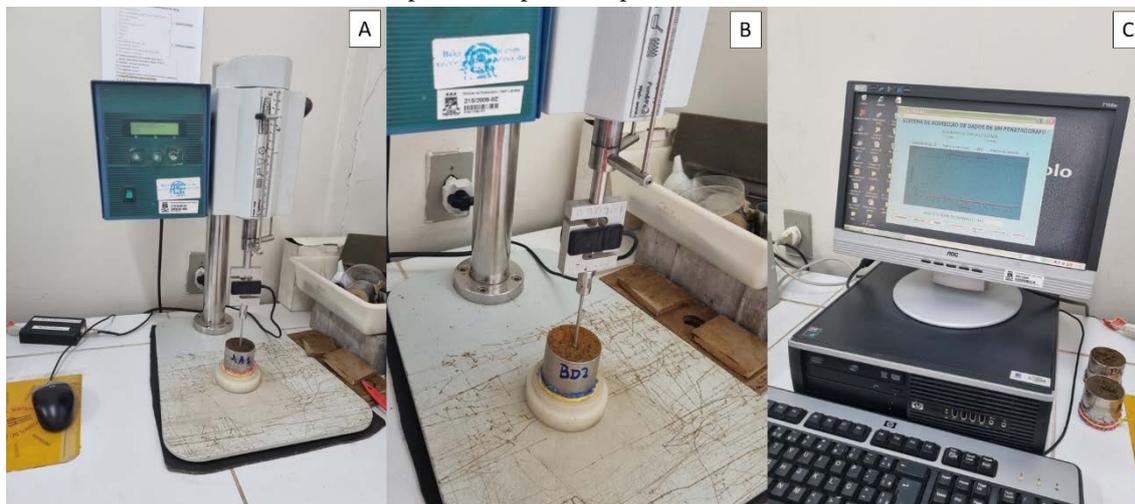
4.7 Resistência do solo à penetração de raízes

As amostras que foram retiradas da mesa de tensão ou câmara de Richards estavam equilibradas segundo as condições de cada potencial. Após serem novamente pesadas, foram realizados os ensaios de resistência à penetração (RP) (Figura 8A), com o auxílio do penetrômetro modelo MA 933, da marca MARCONI®. Esse equipamento trabalha com um motor elétrico para introduzir na amostra de solo, em direção perpendicular, uma agulha com base em formato de cone com 4 mm de diâmetro e com 30° de ângulo de inclinação, simulando assim a penetração de uma raiz no solo (Figura 8B). O penetrômetro foi conectado a um computador para a transmissão de dados (Figura 8C).

Foram analisados a resistência à penetração de raízes em 160 amostras de solo, 4 repetições para cada potencial e para cada horizonte dos perfis estudados.

Os resultados de RP foram fornecidos em kPa. Os valores de RP foram determinados pelas médias das análises e a zona de interesse da amostra foi a zona central, sendo desprezados o primeiro e último centímetros da amostra. Esse procedimento visou evitar o efeito de bordadura.

Figura 8 - A - Penetrômetro MARCONI; B - Avanço da agulha na amostra de solo; C - Computação em tempo real da pressão aplicada sobre o solo



Fonte: O autor.

4.8 Informações adicionais sobre os solos estudados

Para a realização desse estudo foi necessário utilizar dados previamente coletados e analisados por Marques (2014) e Silva et al. (2020). Esse conjunto de dados contém dados sobre a condutividade hidráulica (K_{sat}), densidade do solo e granulometria, que são importantes para a caracterização do solo.

Após a obtenção da Curva Característica de Retenção de Água no Solo (CCRAS) e da Resistência à Penetração por meio do presente estudo, foi realizada uma análise multivariada de dados com os resultados de K_{sat} , densidade e granulometria fornecidos por Marques (2014) e Silva et al. (2020), objetivando identificar relações significativas e tendências que pudessem demonstrar possíveis interações entre as variáveis físicas do solo. Essa correlação entre as variáveis físicas do solo permitiu a elaboração de um panorama mais abrangente com as características do solo da área de estudo.

4.9 Análise multivariada dos dados

Os resultados das análises de campo e de laboratório dos atributos do solo foram submetidos a uma análise estatística descritiva, visando obter informações sobre diversos parâmetros estatísticos. Entre os parâmetros avaliados estão: média, mediana, valores mínimo e máximo, variância, desvio-padrão, percentis, assimetria, curtose, média geométrica e coeficiente de variação. Além disso, a normalidade dos dados foi verificada por meio do teste de Shapiro-Wilk.

A partir dos resultados obtidos na estatística descritiva, foi possível utilizar a estatística multivariada de dados.

A metodologia da Análise de Componentes Principais (ACP) foi aplicada ao conjunto de dados obtidos, permitindo uma exploração das relações multivariadas presentes. Estes dados foram submetidos à ACP com o intuito de identificar as medidas que mais contribuem para as variações observadas nos resultados. A transformação das variáveis originais para os Componentes Principais (CP) foi realizada, buscando minimizar a perda de informação e, simultaneamente, eliminar variáveis de menor relevância (Souza, 2000).

Nessa abordagem metodológica, a ACP não apenas permitiu a redução da dimensionalidade, mas também destacou aquelas variáveis que desempenharam um papel

mais significativo em cada componente identificado. É crucial ressaltar que os dados submetidos a essa análise devem apresentar inter-relações e não serem independentes, condição necessária para que a ACP alcance seu potencial máximo. Essa metodologia, portanto, foi empregada de maneira a revelar padrões subjacentes nos dados, facilitando a interpretação e a compreensão das complexidades inerentes ao conjunto de informações analisadas (Regazzi, 2001; Jackson, 1986; Heckler, 2005).

Para a realização dessas análises foi empregado o software estatístico Minitab, sendo escolhido devido à sua capacidade de proporcionar uma ampla gama de ferramentas estatísticas e gráficos para análise de dados. A interface intuitiva do Minitab facilitou a importação de dados e a execução eficiente de análises, contribuindo para a compreensão aprofundada das complexas inter-relações entre as variáveis estudadas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Considerações sobre a morfologia e aspectos pedogenéticos dos solos estudados

Na tabela 3 estão consolidadas as informações observadas nos perfis dos solos das diferentes superfícies geomórficas. Os dados do solo, abrangendo os horizontes, profundidade, transição, cor (úmida e seca), textura, estrutura e consistência, proporcionam uma visão detalhada da composição e das características morfológicas identificadas em cada perfil de solo.

A análise morfológica do perfil P1 de Latossolo Amarelo Distrocoeso típico revela um estágio avançado de desenvolvimento, evidenciando a significativa influência do processo de latossolização (ferralitização). Apresenta uma intensa intemperização dos constituintes minerais primários e secundários menos resistentes, exibindo uma concentração relativa de argilominerais resistentes e/ou óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio. Adicionalmente, registra-se uma migração de argila pouco expressiva. O caráter distrocoeso associa-se à baixa fertilidade natural do solo e à presença de horizontes pedogenéticos subsuperficiais adensados, notavelmente resistentes à penetração de faca ou martelo pedológico. Estes horizontes variam de muito duros a extremamente duros quando secos, tornando-se friáveis ou firmes em condições úmidas (Embrapa, 2013).

O perfil P2 de Argissolo Amarelo Eutrocoeso típico, formado a partir de gnaisses do Pré-Cambriano, destaca-se por apresentar um estágio avançado de evolução, com a atuação parcial do processo de ferralitização e acúmulo de argila no horizonte subsuperficial, resultante do fenômeno de iluviação, ocasionando uma alteração abrupta na textura. Este tipo de solo revela uma cerosidade pouco pronunciada e fraca no horizonte Bt, caracterizada por revestimentos com um aspecto lustroso e brilho graxo, que cobrem unidades estruturais ou partículas primárias do solo. Esse atributo é crucial na identificação do horizonte diagnóstico Bt (Embrapa, 2013). Adicionalmente, apresenta um padrão mosqueado abundante e distintivo (10YR 4/4) no horizonte BA. A presença desse solo em áreas inclinadas está relacionada à elevada precipitação pluvial da região, o que propicia a translocação da argila do horizonte superficial para o subsuperficial.

O Argissolo Amarelo Eutrocoeso típico do P3 exibe um padrão mosqueado pouco pequeno e distintivo (5YR 4/6) no horizonte Bt1 e um padrão comum, médio e

proeminente (2,5YR 4/6) no horizonte Bt2. Por outro lado, o Argissolo Vermelho-Amarelo do P4 apresenta cerosidade pouco pronunciada e fraca nos horizontes Bt2 e Bt3.

A coexistência de diferentes classes de solo em uma mesma superfície geomórfica pode estar intrinsecamente relacionada à variação no material de origem. As correlações entre as variações dos atributos dos solos aqui estudados e as superfícies em que eles ocorrem, estão em consonância com resultados previamente identificados por Marques Júnior e Lepsch (2000).

Tabela 3 - Características morfológicas dos solos estudados

Perfil	Tipo de Solo	Horiz.	Prof.	Transição	Cor (úmida)	Cor (seca)	Textura	Estrutura	Consistência
P1	Latossolo Amarelo Distrocoeso típico	Ap	0-14	Ondulada e clara	10YR 3/2	10YR 5/3	Franco- argilo arenosa	Fraca a moderada pequena a média blocos subangulares e granular	Ligeiramente dura a dura, muito friável, plástica e ligeiramente pegajosa
		Bw1	30-45	Plana e difusa	7,5YR 5/6	7,5YR 6/6	Muito argilosa	Maciça e partes fracas pequena a média blocos subangulares e angulares	Muito dura a extremamente dura, friável, muito plástica e pegajosa
P2	Argissolo Amarelo Distrocoeso típico	Ap	0-14	Plana e gradual	10YR 3/3	10YR 5/3	Franco- arenosa	Fraca pequena a média blocos subangulares e granular	Ligeiramente dura a dura, friável, plástica e ligeiramente pegajosa
		Bt	28-80	Plana e gradual	7,5YR 5/8	-	Argila	Fraca pequena a muito pequena blocos angulares e subangulares	Dura a muito dura, friável a firme, muito plástica e muito pegajosa
P3	Argissolo Amarelo Eutrocoeso abrupto léptico solódico	Ap	0-15	Plana e abrupta	10 YR3/2	10YR 5/3	Franco- arenosa	Fraca pequena a média blocos subangulares e granular	Dura, friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa
		Bt	15-29	Plana e clara	7,5YR 5/6	10YR 5/4	Argila	Fraca pequena a média blocos subangulares	Muito dura a extremamente dura, friável, plástica e pegajosa
P4	Argissolo Vermelho- Amarelo Distrocoeso típico	Ap	0-12	Plana e clara	7,5YR 3/2	7,5YR 5/3	Franco- arenosa	Fraca pequena a média blocos subangulares e granular	Ligeiramente dura a dura, friável, plástica e pegajosa
		Bt1	26-60	Plana e clara	7,5YR 4/6	7,5YR 6/6	Argila	Fraca a moderada pequena a média blocos subangulares	Dura, friável a firme, muito plástica e pegajosa

Fonte: Adaptado de Marques (2014).

5.2 Atributos físicos do solo

Com base em informações preexistentes do solo encontradas em Marques (2014) e Silva et al. (2020). Foi possível realizar um compilado com a caracterização física do solo, nos perfis (P1, P2, P3 e P4) e horizontes estudados (superficial - PA e subsuperficial - PB), com base na granulometria, grau de dispersão, grau de floculação, coeficiente de saturação, densidade do solo e densidade de partículas (tabela 4).

Tabela 4 - Granulometria, grau de dispersão, grau de floculação, coeficiente de saturação, densidade do solo e densidade de partículas dos solos estudados

Perfil	Horiz.	Prof. (cm)	Granulometria (g.kg ⁻¹)			Relação Silte/Argila	Argila Natural(%)	Grau de dispersão(%)	Grau de floculação(%)	Ksat (mm.h ⁻¹)	Dp (g.cm ⁻³)	Ds (g.cm ⁻³)
			Areia	Silte	Argila							
P1A	Ap	0-14	558	144	298	0,48	12,5	88,23	11,77	5,87	2,64	1,52
P1B	Bw	30-45	314	72	614	0,12	1	0	100	5,87	2,74	1,47
P2A	Ap	0-14	656	161	183	0,88	14	47,04	52,96	11,75	2,63	1,57
P2B	Bt	28-80	322	86	592	0,15	0,833	0	100	5,24	2,74	1,57
P3A	Ap	0-15	629	185	186	0,99	7,83	42,18	57,82	17,13	2,67	1,62
P3B	Bt	15-29	419	119	462	0,26	0,733	0	100	3,85	2,75	1,63
P4A	Ap	0-12	636	192	172	1,12	12	70,6	29,4	8,14	2,60	1,63
P4B	Bt	26-60	338	101	561	0,18	0	0	100	5,14	2,74	1,57

Legenda: Horiz - Horizonte; Prof - Profundidade; Ksat - Coeficiente de Saturação; Dp - Densidade de Partículas; Ds - Densidade do Solo.

Fonte: Adaptado de Marques (2014) e Silva et al. (2020).

Observando a Tabela 04 é possível notar teores mais elevados de argila no horizonte Bw do solo P1 seguido do horizonte Bt do solo P2. Esses pontos exibem uma maior proporção de partículas finas, indicando uma taxa de erosão menor devido à sua posição na paisagem e ao seu caráter deposicional. Conforme Ruhe et al. (1956), as superfícies geomórficas podem variar em termos de forma e origem, podendo ser erosionais, deposicionais ou ambas. Uma superfície deposicional é aquela menos suscetível à erosão, encontrando-se geralmente em locais mais antigos e estáveis.

A relação silte/argila é um parâmetro que auxilia a determinar o grau de intemperismo dos solos (Jacomine, 2005). Quanto maior o valor encontrado, menos intemperizado é o solo. Observa-se que essa relação apresenta valores menores nos horizontes subsuperficiais dos solos dos perfis P1 e P2, com valores 0,12 e 0,15, respectivamente, corroborando a concepção de que se trata de uma superfície geomórfica mais estável e evoluída. Por outro lado, as relações com os valores elevados correspondentes a 1,12 e 0,99 foram registradas, respectivamente, nos horizontes superficiais dos solos P4 e P3, caracterizando-os como solos com menor grau de pedogênese. Resultados semelhantes foram relatados por Meireles et al. (2012) e Campos et al. (2007).

Quanto ao grau de flocculação das argilas nos horizontes subsuperficiais, observou-se que em todos os casos o resultado foi de 100%. Essa constatação pode ser justificada pela ausência ou pouco revolvimento do solo, conforme discutido na literatura (Alencar et al., 2015). Para os horizontes superficiais, verificou-se no solo P1A o menor valor para o grau de flocculação, atingindo 11,27%. Valores abaixo de 15% são considerados baixos, distanciando-se significativamente dos observados em solos fortemente micro estruturados, nos quais a argila dispersa em água se aproxima de zero e o grau de flocculação atinge 100% (Alleoni e Camargo, 1994).

Os resultados observados nos solos P1A e P4A indicam um significativo grau de dispersão, evidenciando que uma parte substancial da argila presente no solo foi prontamente mobilizada ao entrar em contato com a água. Esse fenômeno, na maioria dos casos, resulta na obstrução dos poros, provocando uma redução consequente na permeabilidade do solo tanto à água quanto ao ar (Corrêa et al., 2003; Cunha et al., 2011; Kämpf e Curi, 2012). Em um estudo conduzido por Mota (2010), foi estabelecida uma correlação entre a diminuição da condutividade hidráulica do solo saturado e a elevada quantidade de argila dispersa em água.

Conforme Mesquita e Moraes (2004), a condutividade hidráulica saturada revela-se mais sensível à estrutura do solo do que à sua textura. Destacam-se as amostras P3A e P2A, que apresentaram valores expressivos de K_{sat} , alcançando, respectivamente, valores de 17,13

e $11,75 \text{ mm.h}^{-1}$. Ambas as amostras apresentaram similaridades em termos de estrutura e textura, conforme detalhado na tabela 3. Esses valores são considerados elevados de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Terras para Irrigação (Andrade et al., 2011), pois superam a marca de 12 cm.h^{-1} . Mesquita e Moraes (2004) ressaltam que a interpretação do comportamento do Ksat não pode ser simplificada apenas pela análise da textura, uma vez que fatores concorrentes, como mineralogia, estrutura e porosidade, desempenham papéis igualmente cruciais. Diferentes classes texturais podem resultar em contrastes significativos na porosidade e, conseqüentemente, na Ksat do solo.

Os resultados obtidos para a densidade do solo e densidade de partículas revelaram uma consistente proximidade com as conclusões de estudos anteriores realizados por vários autores. No caso das amostras P1A e P1B, as constatações encontradas assemelham-se aos resultados apresentados por Melo e Cardoso (2010), Reichert et al. (2007), e Araujo, Tormena e Silva (2004). Para as amostras P2A e P2B, os valores observados estão em concordância com as análises conduzidas por Simões Neto et al. (2015), Costa et al. (2014) e Tavares et al. (2017). No que diz respeito às amostras P3A, P3B, P4A e P4B, os dados obtidos revelam uma proximidade notável e ligeiramente superiores aos parâmetros verificados por Gomes (2016).

5.3 Curva Característica de Retenção de Água no Solo (CCRAS) e Resistência do solo à Penetração de raízes (RP)

Devido às limitações impostas pelo equipamento de medição da resistência à penetração, que tem sua margem de segurança em 18 kPa, não foi realizada a medição da resistência no potencial de 1500 kPa, pois nos potenciais de 33,3 e 300 kPa diversas amostras apresentaram valores de RP muito próximos da pressão limitante. Em algumas amostras chegou à pressão limite, necessitando que o equipamento fosse desligado a fim de manter sua integridade. Desta forma foram estudadas as resistências à penetração em função dos volumes de poros e correspondentes potenciais de água no solo: Macroporos, de 0 a 1 kPa; Mesoporos, maior que 1 e até 6 kPa; Capacidade de Campo do solo arenoso, maior que 6 e até 10 kPa; Capacidade de Campo do solo argiloso, maior que 10 e até 33,3 kPa; e Microporos Estruturais e Biológicos, maior que 33,3 e até 300 kPa. Vale ressaltar que no ponto de 1500 kPa também não foi determinada a umidade volumétrica para a composição da CCRAS.

A resistência à penetração de raízes no solo revela uma notável variação nos valores mínimos e máximos, conforme documentado por diversos estudos, como já evidenciado na

revisão de literatura. neste trabalho Betioli Junior et al. (2012) ressaltaram a ausência de um patamar mínimo de resistência à penetração de raízes no solo. Para estes autores, quando o solo apresenta algum valor de resistência distinto de zero, inicia-se uma resistência gradual, aumentando progressivamente até atingir o seu máximo de 3,5 MPa, que é considerado o limite superior para a resistência à penetração de raízes. Os estudos de Souza et al. (2006) e Grant e Lafond (1993) convergiram para resultados semelhantes, com intervalos de resistência variando de 1,5 MPa a 3,0 MPa. Torres e Saraiva (1999) e Mercante et al. (2003) observaram valores mais elevados, situando-se entre 3,5 MPa e 6,5 MPa. O trabalho de Taylor et al. (1966) apresentou uma faixa intermediária, com valores de resistência variando de 2,0 MPa a 2,5 MPa.

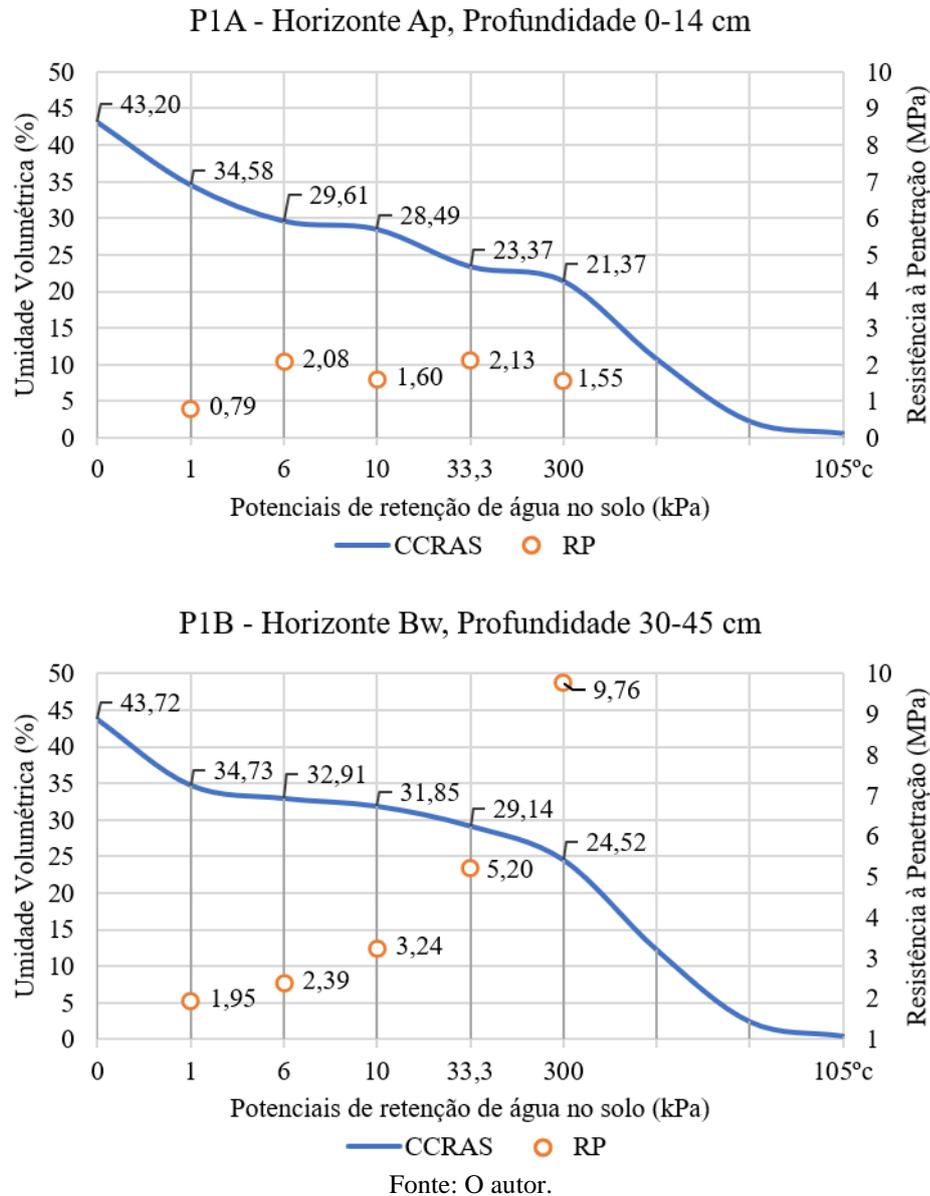
Neste contexto, para o presente trabalho, foi adotada uma categorização que classifica a resistência à penetração em faixas específicas. Valores de 0 a 1,49 MPa foram considerados como baixos e pouco limitantes ao desenvolvimento de raízes, enquanto a faixa de 1,5 a 2,49 MPa indicou uma moderada limitação ao desenvolvimento radicular. Por fim, valores acima de 2,5 MPa foram interpretados como uma significativa limitação no desenvolvimento de raízes.

Ao se analisar o solo P1 na profundidade de 0 a 14 cm (P1A) (Figura 9), observou-se uma baixa resistência à penetração de raízes. Este solo revelou-se como não limitante nos potenciais de retenção de umidade no valor de 1 kPa, indicando condições favoráveis ao desenvolvimento radicular. No entanto, foram identificadas condições de moderada limitação nos potenciais de 6; 10; 33,3 e 300 kPa.

Era esperado que conforme houvesse a secagem do solo através do aumento dos potenciais houvesse também um aumento da RP, na transição de 6 para 10 kPa, e de 33,3 para 300 kPa houve um decréscimo da RP, essa variação da resistência nos potenciais pode ser atribuída à presença de vazios deixados por raízes, pequenas pedras ou outros materiais orgânicos ou inorgânicos que possam ter influenciado a agulha de medição do penetrômetro, facilitando ou impedindo sua penetração.

Na profundidade de 30 a 45 cm do perfil 1 (P1B) (Figura 9), verificou-se nos potenciais de 1 e 6 kPa, uma moderada limitação à penetração de raízes. Entretanto, nos potenciais de 10 kPa, 33,3 kPa e 300 kPa, identificou-se uma significativa limitação, destacando-se que no ponto 300 kPa, onde a resistência atingiu 9,76 MPa, ficou evidenciada uma elevada resistência indicando condições extremamente limitantes ao desenvolvimento radicular.

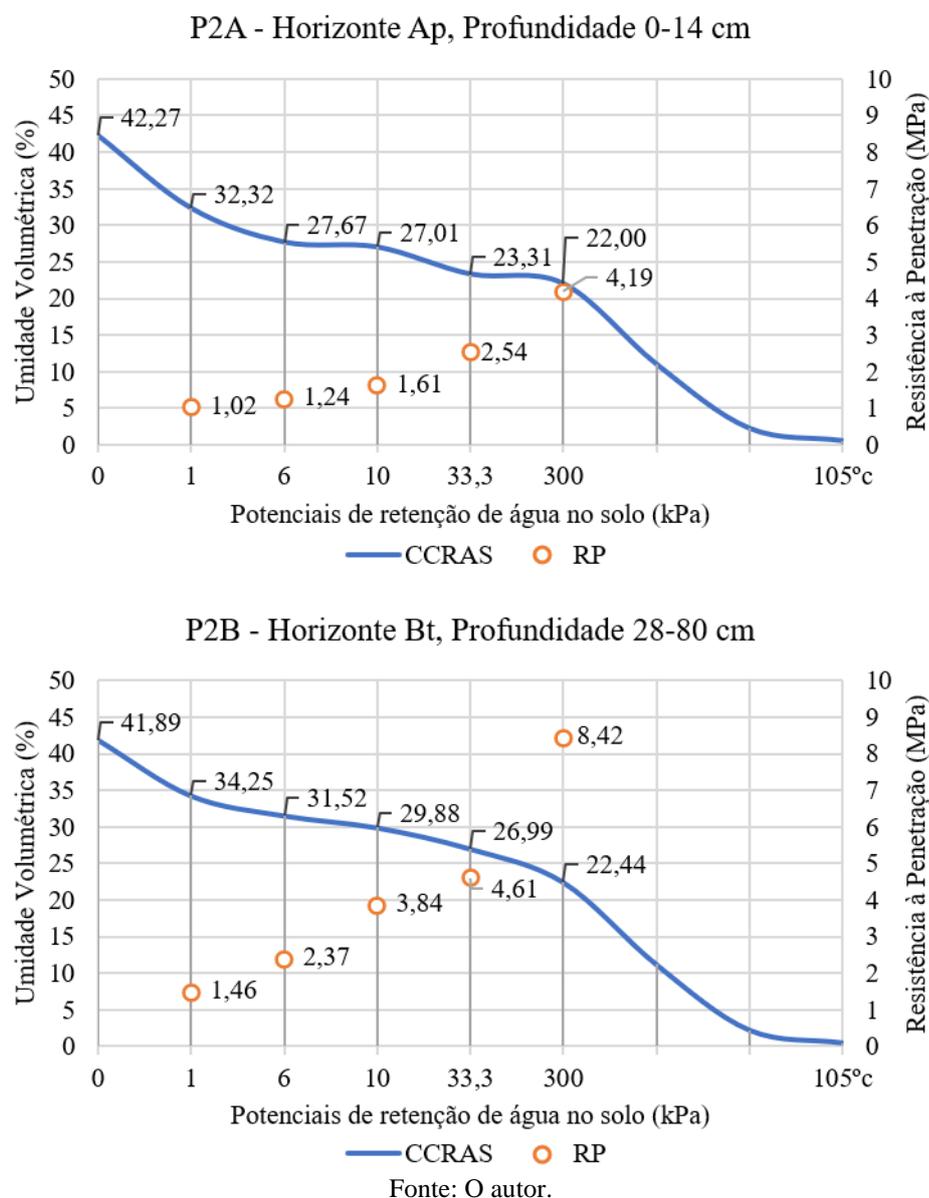
Figura 9 - Umidade volumétrica e Resistência do solo à Penetração de raízes em função do Potencial de retenção de água no solo nos pontos P1A (Horizonte Ap) e P1B (Horizonte Bw) de Latossolo Amarelo Distrocoeso típico.



O perfil 2 na profundidade de 0 a 14 cm (P2A) (Figura 10), nos potenciais de 1 e 6 kPa, ofereceriam baixa resistência ao desenvolvimento radicular. No potencial de 10 kPa ocorreu moderada resistência e com o aumento do potencial para 33,3 kPa e 300 kPa, a resistência à penetração aumentou a ponto de apresentar uma significativa resistência.

O horizonte subsuperficial do perfil 2 (P2B) (Figura 10) evidenciou uma baixa resistência no potencial de 1 kPa, uma resistência moderada no potencial de 6 kPa. No entanto, sob os demais potenciais estudados (10; 33,3 e 300 kPa), a resistência à penetração proporcionará um desenvolvimento limitado de raízes.

Figura 10 - Umidade volumétrica, Resistência à Penetração em função Potencial de retenção de água no solo nos pontos P2A (horizonte Ap) e P2B (horizonte Bt) de Argissolo Amarelo Distrocóeso típico.

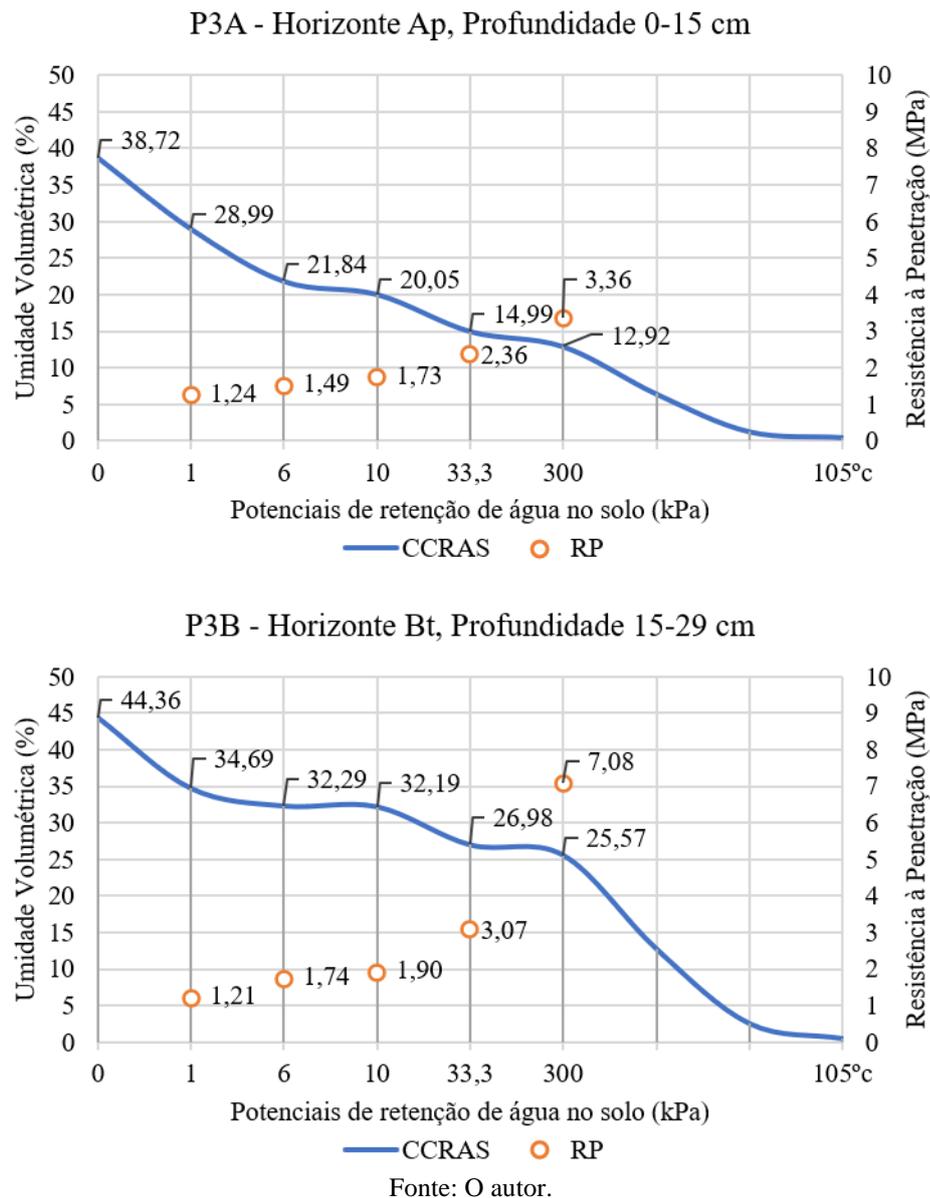


No perfil 3, o horizonte superficial de 0 a 15 cm (P3A) (Figura 11) destacou-se pelos maiores valores de resistência à penetração entre os horizontes Ap estudados. Nos potenciais de 1 kPa e 6 kPa, a resistência situou-se na faixa não limitante ao desenvolvimento de raízes, indicando condições favoráveis para o crescimento radicular. Entretanto, nos demais potenciais avaliados, a resistência alcançou níveis que se encontram na faixa moderada de limitação para o desenvolvimento de raízes.

No horizonte subsuperficial do perfil 3 (P3B) (Figura 11) os valores de resistência à penetração foram os menores entre os horizontes Bt estudados. No potencial de 1 kPa, a resistência se encontrou na faixa não limitante para o desenvolvimento de raízes, indicando

condições propícias para o crescimento radicular. Nos potenciais de 6 kPa e 10 kPa, a resistência assumiu níveis moderadamente limitantes, sugerindo desafios moderados ao desenvolvimento radicular nesse intervalo. Entretanto, nos potenciais mais elevados de 33,3 kPa e 300 kPa, a resistência atingiu níveis que se enquadram na faixa limitante, indicando condições consideráveis de restrição ao desenvolvimento radicular nesse horizonte.

Figura 11 - Umidade volumétrica e Resistência do solo à Penetração de raízes em função de retenção de água no solo nos pontos P3A (horizonte Ap) e P3B (horizonte Bt) de Argissolo Amarelo Eutrocoeso abrupto léptico solódico.

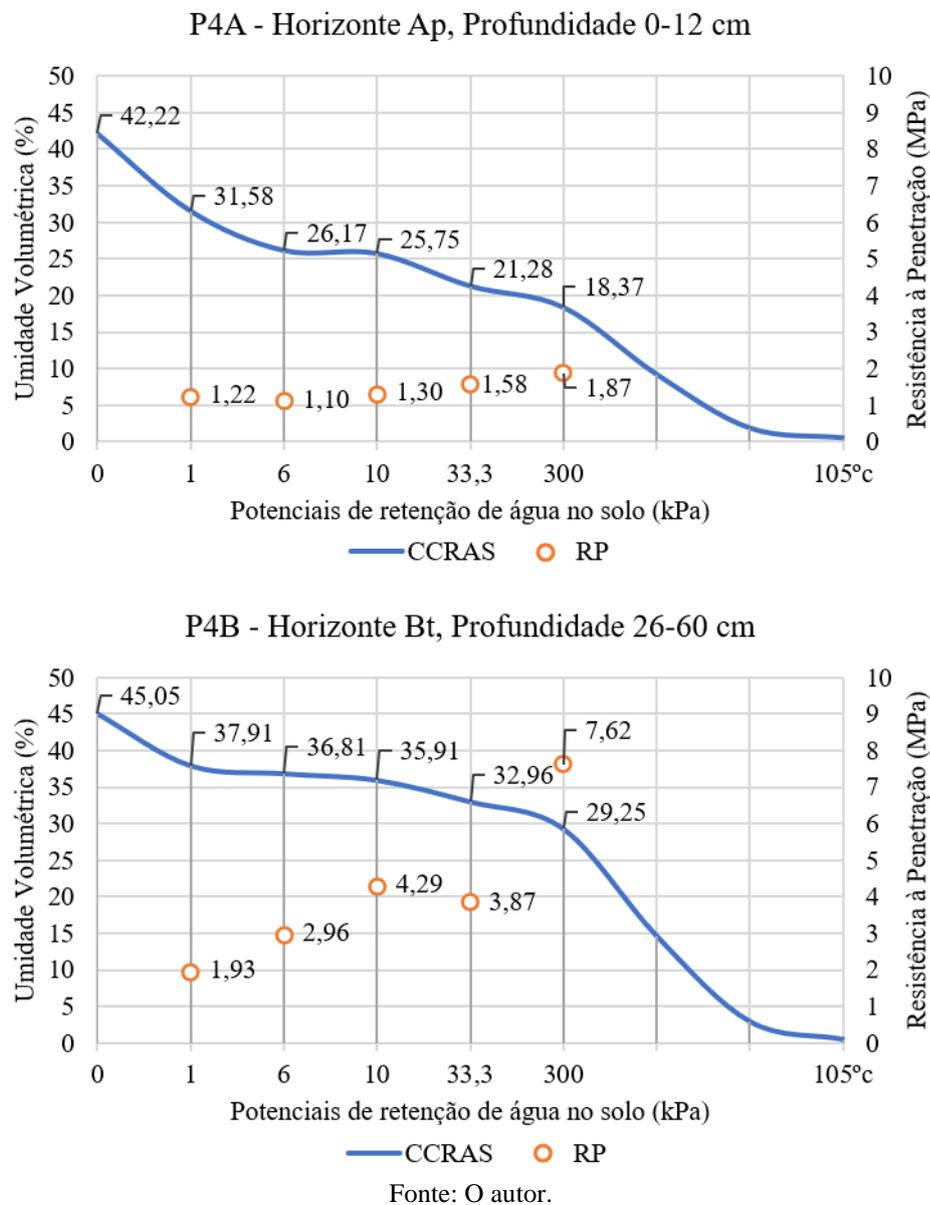


No perfil 4, no horizonte de 0 a 12 cm (P4A) (Figura 13) os potenciais de 1 kPa, 6 kPa e 10 kPa revelaram-se propícios ao desenvolvimento radicular, apresentando resistência que não limita o crescimento das raízes. No entanto, nos potenciais de 33,3 kPa e 300 kPa, observou-

se um aumento na resistência, indicando condições moderadamente limitantes para o desenvolvimento radicular.

Também no horizonte subsuperficial do perfil 4 (P4B) (Figura 13), o potencial de 1 kPa apresentou valor que se situa na faixa moderadamente limitante, indicando condições favoráveis para o desenvolvimento radicular. Contudo, nos demais potenciais estudados, a resistência atingiu níveis limitantes ao desenvolvimento de raízes.

Figura 12 - Umidade volumétrica e Resistência do solo à Penetração de raízes em função da retenção de água no solo nos pontos P4A (horizonte Ap) e P4B (horizonte Bt) de Argissolo Vermelho-Amarelo Distrocoeso típico.



5.4 Estatística descritiva dos atributos do solo

Na Tabela 5 encontram-se os atributos físicos dos solos usados na análise da estatística descritiva. Como a Análise de Componentes Principais (ACP) é uma técnica exploratória de dados, é importante que se realize uma estatística descritiva nas variáveis, para que haja uma melhor compreensão nos resultados obtidos.

Tabela 5 - Atributos físicos dos solos estudados

Pontos	Areia	Silte	Argila	S/A	A.N.	G.D.	G.F.	Ksat	Dp	Ds	MO	SAT	CTC	PST	pH	PT	U. V.	RP
P1A	558	144	298	0.48	12.50	88.23	11.77	5.87	2.64	1.52	1.93	62	10.6	11.32	5.7	43.2	34.58	1.55
P1B	314	72	614	0.12	1.00	0.00	100	5.87	2.74	1.47	1.12	37	5.7	7.02	4.8	43.72	34.73	9.76
P2A	656	161	183	0.88	14.00	47.04	52.96	11.75	2.63	1.57	2.38	38	7.3	5.48	5.2	42.27	32.32	1.87
P2B	322	86	592	0.15	0.83	0.00	100	5.24	2.74	1.57	1.16	61	4.9	12.24	5.6	41.89	34.25	7.62
P3A	629	185	186	0.99	7.83	42.18	57.82	17.13	2.67	1.62	1.9	66	9.1	7.69	6.0	38.72	28.99	3.36
P3B	419	119	462	0.26	0.73	0.00	100	3.85	2.75	1.63	1.01	66	8.3	10.84	5.4	44.36	32.69	7.08
P4A	636	192	172	1.12	12.00	70.60	29.4	8.14	2.60	1.63	3.35	64	10.2	13.73	5.5	42.22	31.58	4.19
P4B	338	101	561	0.18	0.00	0.00	100	5.14	2.74	1.57	1.38	57	4.7	4.26	5.5	45.05	36.91	8.42

Granulometria (g.kg^{-1}); S/A - Relação Silte/Argila (%); A.N. - Argila Natural (%); G.D. - Grau de dispersão (%); G.F. - Grau de floculação (%); Ksat - Condutividade hidráulica saturada (m.h^{-1}); Dp - Densidade de partículas (g.cm^{-3}); Ds - Densidade do solo (g.cm^{-3}); MO - Matéria orgânica (%); SAT - Saturação por bases (%); CTC - Capacidade de troca catiônica (%); PST - percentagem de sódio trocável (%); pH - potencial Hidrogeniônico; PT - Porosidade total (%); U.V. - Umidade Volumétrica (%); RP - Resistência à penetração (MPa).

Fonte: O autor.

Assim procedendo, os resultados das análises de campo e de laboratório dos atributos do solo foram submetidos ao tratamento de estatística descritiva com o intuito serem obtidas as informações dos seguintes parâmetros estatísticos: média, mediana, valores mínimo e máximo, variância, desvio-padrão, percentis, assimetria, curtose, média geométrica e coeficiente de variação. Também foram verificadas as normalidades dos dados por meio do teste de Shapiro-Wilk, complementando o sumário estatístico dos dados (Tabela 6).

Tabela 6 - Estatística descritiva dos dados de atributos físicos do solo

Estatística	Areia	Silte	Argila	S/A	A. N.	G.D	G. F.	Ksat	Dp	Ds	MO	SAT	CTC	PST	pH	PT	U. V.	RP
Min	314	72	172	0.12	0	0	11.77	3.85	2.6	1.47	1.01	37	4.7	4.26	4.8	38.72	28.99	1.55
Max	656	192	614	1.12	14	88.23	100	17.13	2.75	1.63	3.35	66	10.6	13.73	6	45.05	36.91	9.76
Sum	3872	1060	3068	4.18	48.89	248.05	551.95	62.99	21.51	12.58	14.23	451	60.8	72.58	43.7	341.43	266.05	43.85
Média	484	132.5	383.5	0.52	6.11	31.01	68.99	7.87	2.69	1.57	1.78	56.38	7.60	9.07	5.46	42.68	33.26	5.48
Erro Padrão	53.43	15.95	68.86	0.15	2.16	12.73	12.73	1.58	0.02	0.02	0.28	4.25	0.82	1.21	0.13	0.69	0.85	1.11
Variância	22839.14	2034.00	37931.43	0.17	37.29	1295.67	1295.67	19.92	0.00	0.00	0.63	144.27	5.41	11.73	0.13	3.78	5.78	9.82
Desvio Padrão	151.13	45.10	194.76	0.41	6.11	36.00	36.00	4.46	0.06	0.06	0.80	12.01	2.33	3.42	0.35	1.94	2.40	3.13
Mediana	488.5	131.5	380	0.37	4.415	21.09	78.91	5.87	2.705	1.57	1.64	61.5	7.8	9.265	5.5	42.735	33.47	5.635
Percentil (25%)	326	89.75	183.75	0.1575	0.755	0	35.29	5.165	2.6325	1.5325	1.13	42.75	5.1	5.865	5.25	41.9725	31.765	2.2425
Percentil (75%)	634.25	179.00	584.25	0.96	12.38	64.71	100.00	10.85	2.74	1.63	2.27	65.50	9.93	12.01	5.68	44.20	34.69	8.22
Assimetria	-0.03	0.05	0.04	0.50	0.25	0.55	-0.55	1.57	-0.33	-0.79	1.16	-1.21	-0.04	-0.09	-0.59	-1.12	-0.38	-0.01
Curtose	-2.35	-1.59	-2.29	-1.88	-2.32	-1.44	-1.44	1.99	-1.98	0.06	1.03	-0.34	-1.75	-1.58	1.29	1.98	0.51	-1.81
Média Geom.	462.59	125.44	336.49	0.38	0.00	0.00	56.64	7.01	2.69	1.57	1.64	55.06	7.27	8.45	5.45	42.64	33.18	4.54
Coef. de variação	31.22	34.04	50.78	78.98	99.92	116.09	52.17	56.68	2.25	3.58	44.75	21.31	30.62	37.75	6.49	4.56	7.23	57.17
Shapiro-Wilk (W)	0.833	0.942	0.838	0.848	0.809	0.8218	0.821	0.811	0.841	0.889	0.882	0.759	0.917	0.943	0.961	0.916	0.972	0.919
p(normal)	0.064	0.635	0.072	0.092	0.036	0.049	0.048	0.037	0.077	0.231	0.200	0.010	0.412	0.642	0.825	0.403	0.914	0.423

Granulometria (g.kg⁻¹); S/A - Relação Silte/Argila (%); A.N. - Argila Natural (%); G.D. - Grau de dispersão (%); G.F. - Grau de floculação (%); Ksat - Condutividade hidráulica saturada (m.h⁻¹); Dp - Densidade de partículas (g.cm⁻³); Ds - Densidade do solo (g.cm⁻³); MO - Matéria orgânica (%); SAT - Saturação por base (%); CTC - Capacidade de troca catiônica (%); PST - percentagem de sódio trocável (%); pH - potencial Hidrogeniônico; PT - Porosidade total (%); U.V. - Umidade Volumétrica (%); RP - Resistência à penetração (MPa)

Fonte: O autor.

O teste de normalidade de Shapiro-Wilk aplicado aos atributos físicos do solo mostrou que os atributos Granulometria (Areia, Silte e Argila); S/A - Relação Silte/Argila (%); Dp - Densidade de partículas (g.cm⁻³); Ds - Densidade do solo (g.cm⁻³); MO - Matéria orgânica (%); CTC - Capacidade de troca catiônica (%); PST - percentagem de sódio trocável (%); PT - Porosidade total (%); U.V. - Umidade Volumétrica (%); RP - Resistência à penetração (MPa), apresentaram distribuição normal (valor p > 0,05) ao nível de significância (α) de 5%.

Tabela 7 - Valores de padronização das variáveis dos atributos do solo com média e desvio padrão

Pontos	Areia	Silte	Argila	S/A	A.N.	G.D.	G.F.	Ksat	Dp	Ds	MO	SAT	CTC	PST	pH	PT	U. V.	RP	
P1A	0.49	0.25	-0.44	-0.10	1.05	1.59	-1.59	-0.45	-0.80	-0.93	0.19	0.47	1.29	0.66	0.67	0.27	0.55	-1.26	
P1B	-1.12	-1.34	1.18	-0.98	-0.84	-0.86	0.86	-0.45	0.85	-1.82	-0.83	-1.61	-0.82	-0.60	-1.87	0.54	0.61	1.37	
P2A	1.14	0.63	-1.03	0.87	1.29	0.45	-0.45	0.87	-0.97	-0.04	0.76	-1.53	-0.13	-1.05	-0.74	-0.21	-0.39	-1.15	
P2B	-1.07	-1.03	1.07	-0.90	-0.86	-0.86	0.86	-0.59	0.85	-0.04	-0.78	0.39	-1.16	0.92	0.39	-0.41	0.41	0.68	
P3A	0.96	1.16	-1.01	1.13	0.28	0.31	-0.31	2.07	-0.31	0.84	0.15	0.80	0.64	-0.40	1.52	-2.04	-1.77	-0.68	
P3B	-0.43	-0.30	0.40	-0.64	-0.88	-0.86	0.86	-0.90	1.01	1.02	-0.97	0.80	0.30	0.52	-0.18	0.86	-0.24	0.51	
P4A	1.01	1.32	-1.09	1.45	0.96	1.10	-1.10	0.06	-1.47	1.02	1.97	0.63	1.12	1.36	0.11	-0.24	-0.70	-0.41	
P4B	-0.97	-0.70	0.91	-0.83	-1.00	-0.86	0.86	-0.61	0.85	-0.04	-0.50	0.05	-1.25	-1.41	0.11	1.22	1.52	0.94	
Média	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Desv. Padr.	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

Granulometria (g.kg^{-1}); S/A - Relação Silte/Argila (%); A.N. - Argila Natural (%); G.D. - Grau de dispersão (%); G.F. - Grau de floculação (%); Ksat - Condutividade hidráulica saturada (m.h^{-1}); Dp - Densidade de partículas (g.cm^{-3}); Ds - Densidade do solo (g.cm^{-3}); MO - Matéria orgânica (%); SAT - Saturação por base (%); CTC - Capacidade de troca catiônica (%); PST - percentagem de sódio trocável (%); pH - potencial Hidrogeniônico; PT - Porosidade total (%); U.V. - Umidade Volumétrica (%); RP - Resistência à penetração (MPa); Desv. Padr. - Desvio Padrão.

Fonte: O autor.

5.5 Análise de componentes principais (ACP)

Um conjunto de dados com as 18 variáveis dos atributos físicos dos solos estudados e 8 objetos referentes aos perfis de solos coletados, 4 horizontes superficiais e 4 horizontes subsuperficiais, foram usados na análise da ACP (Tabela 5). Primeiramente, fez-se a padronização como forma de eliminar a influência que uma variável poderia causar sobre a outra na formação das componentes, devido às mesmas estarem dispostas em unidades de medidas diferentes.

A padronização foi realizada por meio da utilização da média e do desvio padrão como unidade de medida. Assim, cada valor dos atributos foi subtraído da média e o resultado dividido pelo desvio padrão. Desse modo foi obtida a nova média destes valores como sendo igual a zero (0) e o desvio padrão igual a um (1). Uma vez que dois ou mais conjuntos de valores foram padronizados, foi possível comparar os escores de cada conjunto (Tabela 7).

Considerando-se as 18 variáveis buscou-se escolher o número de fatores incluindo na análise aqueles componentes que conseguem sintetizar uma variância acumulada em torno de 75%. Como se pode observar, na tabela 8, os dois primeiros componentes possuem autovalores que correspondem a 59,21% e 15,69% da variância total, explicada pelos autovalores do modelo, ou seja, explicam juntos 74,90% das variações das medidas originais.

Tabela 8 - Autovalores e percentual da variância explicada de cada componente principal

Número de componentes principais	Autovalores	% da variância explicada	Autovalores acumulados	% da variância acumulada
1	8.289	59.209	8.289	59.209
2	2.197	15.695	10.486	74.904

Fonte: O autor.

Na ACP, a derivação de fatores se dá por meio de rotações de eixos que melhor expressam a disposição dos dados. No modelo final, as variações das medidas estão maximizadas, e as relações entre dimensões suavizadas. Devido a isso, buscou-se relação entre os fatores e as variáveis (atributos do solo) originais numa matriz fatorial.

A tabela 9 mostra o resultado das cargas fatoriais antes da rotação nos eixos, e mostra a contribuição das variáveis na formação dos componentes. Na mesma tabela, pode-se visualizar as ponderações de cada variável que irão compor a combinação linear. Observa-se que os valores em destaque são os que possuem uma significância maior que 0,70.

Buscou-se identificar, em cada combinação linear, um conjunto de variáveis que representem a composição dos componentes principais, atribuindo-se um nome para cada componente, representando um conjunto de variáveis. Por apresentar mais de um grupo de variáveis significativas no mesmo componente, recorreu-se a realização de rotação, possibilitando uma melhor visualização da disposição dos pontos. A rotação utilizada foi a *Varimax normalizada*, pois esta mantém os eixos ortogonais entre si.

A tabela 10 mostra o resultado das cargas dos fatores após a referida rotação. Observa-se que os valores que possuem uma significância igual, ou superior, a 0,7 em ambas as tabelas estão em destaque em cada componente principal (CP).

Tabela 9 - Resultados das cargas dos componentes principais antes da rotação nos eixos

Variáveis (Atributos do solo)	CP1	CP2
Relação Silte/Argila	0.932	0.167
Argila natural	0.909	-0.315
Grau de dispersão	0.894	-0.405
Grau de floculação	-0.894	0.405
Condutividade hidráulica saturada	0.660	0.565
Densidade de partículas	-0.932	0.285
Densidade do solo	0.415	0.550
Matéria orgânica	0.845	-0.218
Capacidade de Troca Catiônica	0.835	-0.186
Percentagem de Sódio Trocável	0.320	-0.150
pH	0.505	0.436
Porosidade total	-0.641	-0.620
Umidade volumétrica	-0.716	-0.579
Resistência à penetração	-0.902	0.138

Fonte: O autor.

Pode-se concluir através da tabela 8 que o CP1 é o mais importante para o estudo, pois ele deriva de um autovalor de 8,29 que corresponde a uma variância acumulada de 59,21, sendo as variáveis, que mais contribuíram: Relação Silte/Argila, Argila natural, Grau de dispersão, Grau de floculação, Densidade dos poros, Matéria orgânica, Capacidade de troca catiônica, Umidade volumétrica e Resistência à penetração. No caso do CP2, após a rotação *Varimax normalizada*, este componente ficou explicado por três atributos sendo eles: a Condutividade hidráulica, Porosidade total e Umidade volumétrica.

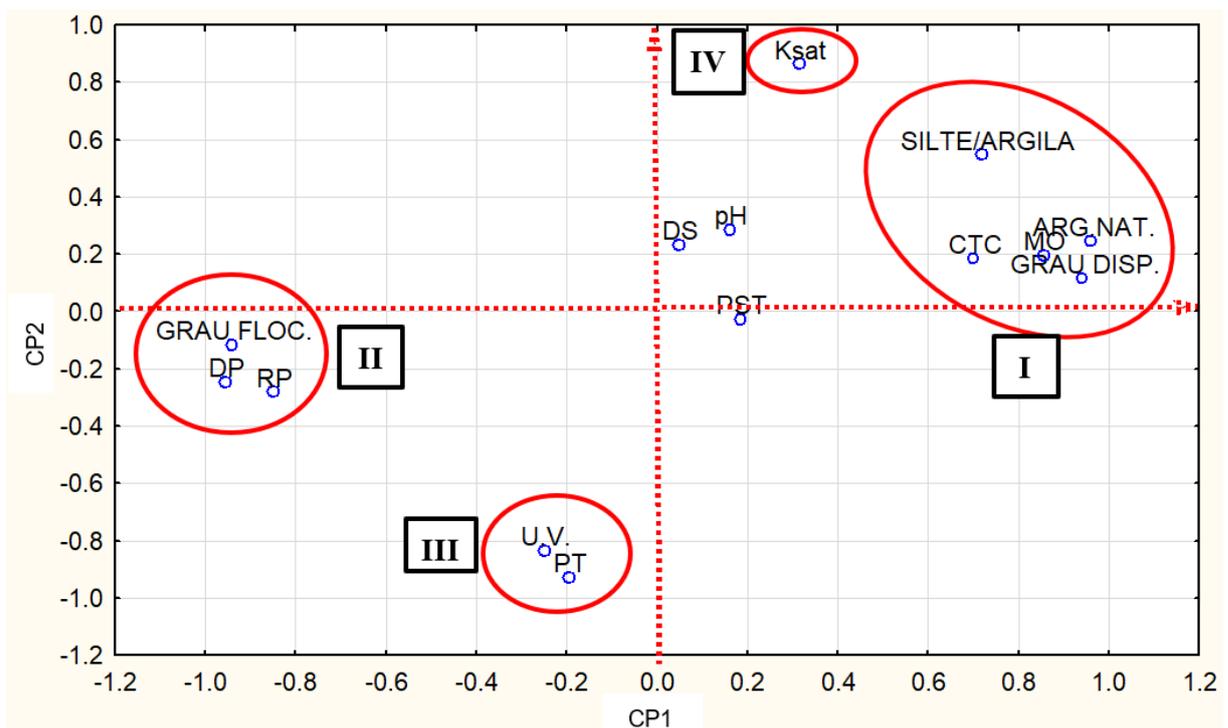
Tabela 10 - Resultados das cargas fatoriais dos componentes principais após a rotação *Varimax normalizada*.

Variáveis (Atributos do solo)	CP1	CP2
Relação Silte/Argila	0.720	0.547
Argila natural	0.959	0.246
Grau de dispersão	0.941	0.117
Grau de flocculação	-0.941	-0.117
Condutividade hidráulica saturada	0.314	0.865
Densidade de partículas	-0.955	-0.247
Densidade do solo	0.049	0.232
Matéria orgânica	0.855	0.195
Capacidade de Troca Catiônica	0.701	0.184
Percentagem de Sódio Trocável	0.184	-0.026
pH	0.163	0.285
Porosidade total	-0.195	-0.929
Umidade Volumétrica	-0.249	-0.836
Resistência à penetração	-0.849	-0.280

Fonte: O autor.

Para visualização desses componentes, buscou-se utilizar um gráfico de dispersão onde podem ser localizadas as variáveis em um sistema de coordenadas criado pelos fatores. Pela figura 13 foram analisados todos os fatores, sendo os fatores que apresentarem variáveis explicativas os que contribuirão para o estudo.

Figura 13 - Gráfico de dispersão dos componentes principais dos atributos do solo após a rotação nos eixos (CP1 vs. CP2)



Fonte: O autor.

Os componentes relacionados, no plano após a rotação *Varimax normalizada* foram CP1 com CP2. É importante salientar que o CP1 é composto pelas variáveis Relação Silte/Argila, Argila natural, Grau de dispersão, Grau de floculação, Densidade de partículas, Matéria orgânica, Capacidade de troca catiônica, Umidade volumétrica e Resistência à penetração. Estas variáveis possuem uma maior contribuição para este componente, conforme mostram os valores na tabela 10. Logo, ao fazer os planos fatoriais, o CP1 será mantido no eixo do x, e os fatores do eixo y serão modificados a cada plano, para que se possa verificar a importância de cada variável na formação de cada componente.

Analisando a figura 13, após a rotação dos eixos, observa-se que as variáveis que melhor representaram o CP1 formaram os Grupos I e II. Essas variáveis, por estarem localizadas mais distantes da origem em relação ao eixo x, são as de maior representatividade. Em relação ao CP2, as variáveis dos Grupos III e IV foram as mais representativas pelo mesmo motivo que as anteriores. Ainda segundo a mesma figura, observam-se alguns agrupamentos de variáveis que aparentaram similaridades, como é o caso da Relação silte/argila (SILTE/ARGILA), Argila Natural (ARG.NAT.), Matéria Orgânica (MO), Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e Grau de Dispersão (GRAU DISP.) que se encontram no Grupo I, e Grau de floculação (GRAU FLOC.), Densidade de partículas (DP) e Resistência à penetração (RP) que se encontram no Grupo II.

De acordo com a figura 13 considerou-se que, se a variância for nula, ou próxima de zero, significa que os atributos estão próximos, ou acima, da origem do plano principal da nuvem de pontos e, portanto, tais atributos possuem baixa representatividade como é o caso da densidade do solo (DS), potencial hidrogeniônico (pH) e percentagem de sódio trocável (PST).

Segundo a tabela 10, podem ser identificados os atributos do solo que possuem uma maior correlação com os componentes principais, sendo essas características de maior correlação as mais importantes. Neste caso, destacaram-se as variáveis: Relação Silte/Argila (SILTE/ARGILA), Argila natural (ARG. NAT.), Grau de dispersão (GRAU DISP.), Matéria orgânica (MO) e Capacidade de troca catiônica (CTC), todas com valores altos de correlações positivas, sendo a variável ARG.NAT. a que apresentou o maior valor de correlação (0,959) no CP1, caracterizando-se portanto como a mais importante neste estudo de similaridade.

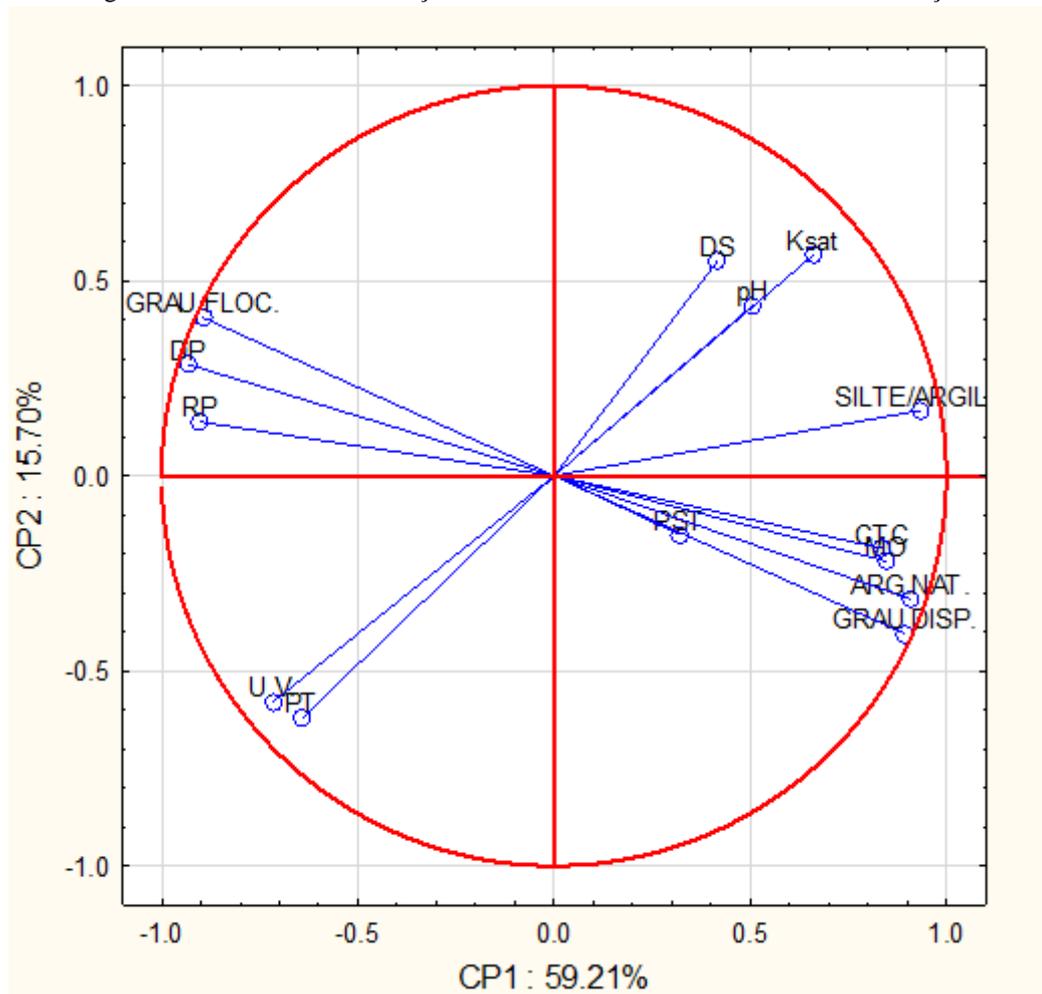
Ainda no mesmo estudo, verificou-se que as variáveis Grau de floculação (GRAU FLOC.), Densidade de partículas (DP) e Resistência à penetração (RP) apresentaram baixos valores de posicionamento no CP1 e altos valores de correlações negativas -0,941, -0,955 e -0,849, respectivamente, significando uma inversão de proporcionalidade, indicando que tais

variáveis possuem valores baixos de suas grandezas entre os atributos físicos dos solos avaliados.

Analisando a CP2, verificou-se que as variáveis Condutividade hidráulica saturada (Ksat), Porosidade total (PT) e Umidade volumétrica (UV) possuem correlações positiva e negativas, sendo 0,865 para Ksat; -0,929 para PT e -0,836 para UV. Neste componente (CP1) a condutividade hidráulica saturada foi a que mais se destacou, apresentando um alto valor de posicionamento e uma correlação positiva, enquanto que as outras variáveis apresentaram baixos valores de posicionamento e altos valores de correlação, indicando que tais variáveis possuem valores baixos de suas grandezas entre os atributos físicos dos solos para o componente analisado.

A Figura 14 mostra o gráfico da distribuição da nuvem de variáveis no círculo de correlação unitário. Como pode-se observar na referida figura, algumas variáveis estão sobrepostas umas às outras, mostrando que essas possuem a mesma representatividade no gráfico. Algumas variáveis estão bem próximas ao círculo unitário, mostrando que estas possuem uma maior contribuição em relação às variáveis que estão mais afastadas. Analisando a distribuição da nuvem de variáveis pode-se concluir que as variáveis atributos do solo Relação Silte/Argila (SILTE/ARGILA), Argila natural (ARG. NAT.), Grau de dispersão (GRAU DISP.), Umidade volumétrica (UV), Porosidade total (PT), Grau de flocculação (GRAU FLOC), Densidade de partículas (DP), Resistência à penetração (RP) são as variáveis mais representativas.

Figura 14 - Gráfico da distribuição da nuvem de variáveis no círculo de correlações



Fonte: O autor.

5.6 Análise de agrupamentos

Inicialmente, para que houvesse a validação dos dados obtidos no estudo de resistência à penetração e divisão do tamanho de poros foi realizada uma análise de agrupamentos de observações e gerado um dendrograma agrupando as amostras com base nos seus índices de similaridade. A análise de agrupamentos de observações visa identificar e classificar observações ou variáveis em grupos com características similares, permitindo a compreensão das relações existentes entre as variáveis de interesse.

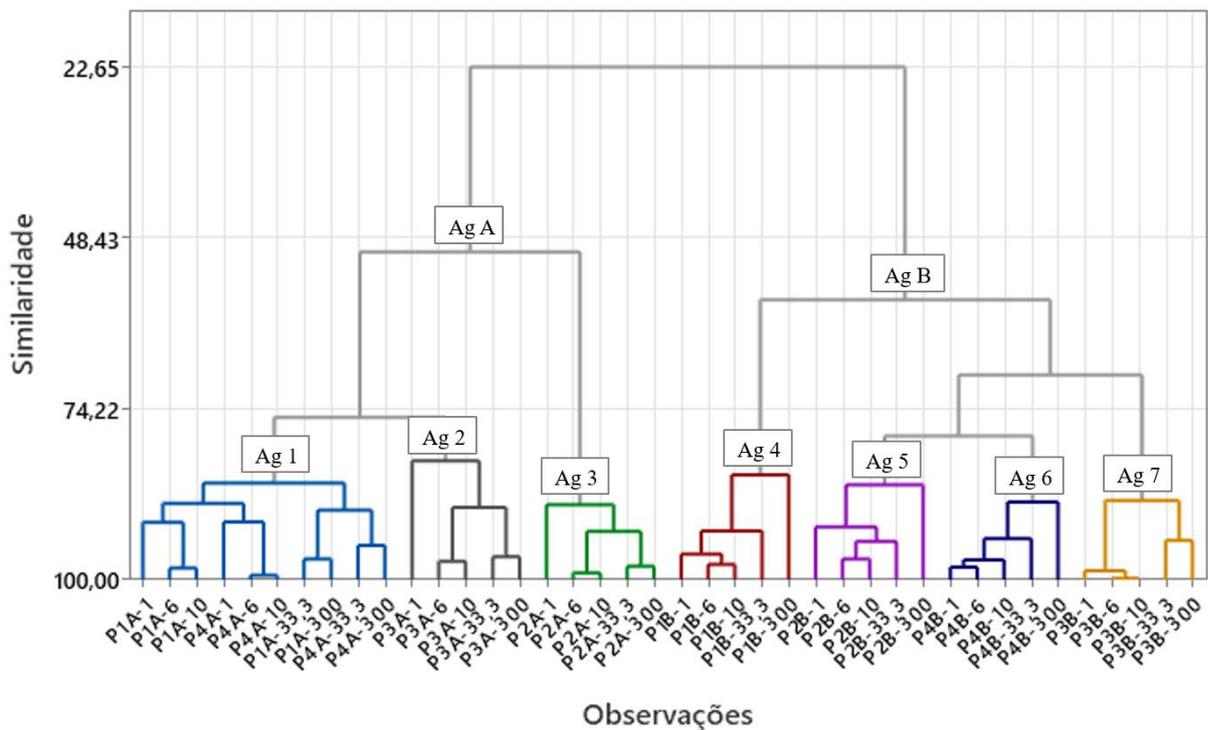
Objetivando a maior precisão da análise de agrupamentos, foi utilizado um conjunto de dados de análises químicas e físico-hídricas. A tabela contendo estes dados está disponível na tabela 7.

Para um melhor entendimento dos gráficos a seguir, foi adotada a nomenclatura da amostra utilizada na Tabela 4, em que por exemplo, “P1” significa o perfil de solo estudado, seguido da letra “A” ou “B” as quais significam, respectivamente, os horizontes Ap e Bw/Bt, seguidos do potencial em kPa ao qual a amostra foi submetida.

Na Figura 15 é possível observar a formação de 7 agrupamentos distintos. Inicialmente, esperava-se a criação de 8 agrupamentos, cada um representando um tipo de perfil de solo + horizonte específico. Contudo, devido à notável similaridade dos dados das variáveis estudadas, entre as amostras P1A e P4A (85,37%), estas acabaram sendo agrupadas em conjunto, resultando em um único agrupamento o Ag 1.

Os demais agrupamentos formados tiveram comportamento dentro do esperado, agrupando os solos iguais com os mesmos horizontes. Outra relação que pode ser notada é a separação das amostras dos horizontes Ap e Bw/Bt, em que as amostras Ap ficaram dispostas no agrupamento “A” com uma similaridade de 50,58 %, e as amostras Bw/Bt ficaram dispostas no agrupamento “B”, referente aos horizontes subsuperficiais, com similaridade de 57,78%.

Figura 15 - Dendrograma gerado a partir da Análise de Agrupamentos de Observações com ligação média e distância Euclidiana das amostras de solo estudadas.



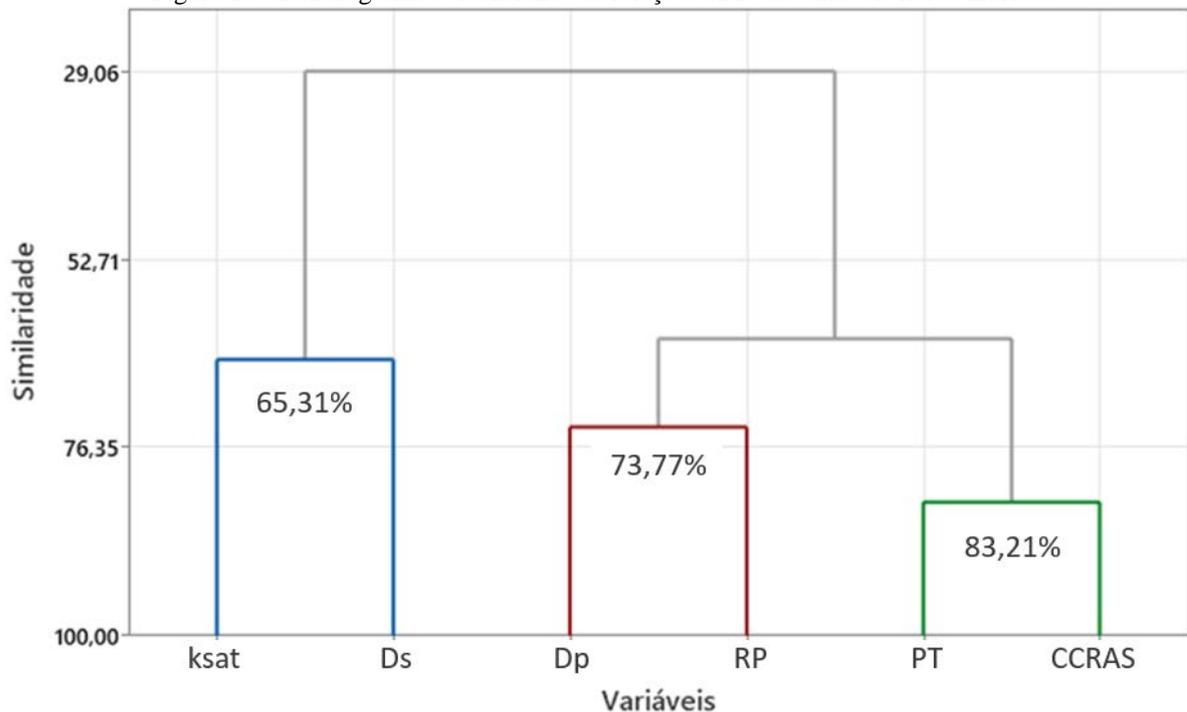
Fonte: O autor.

A análise dos agrupamentos das variáveis foi conduzida em duas fases distintas (figuras 16, 17). O primeiro dendrograma foi construído a partir das propriedades físico-hídricas (figura

16), delineando agrupamentos com base nessas características. Em seguida, o segundo dendrograma incorporou as propriedades físico-hídricas às análises químicas (figura 17).

Na análise dos agrupamentos, originados a partir das propriedades físico-hídricas (figura 16), destaca-se a notável relação entre a porosidade total (PT) e a Curva Característica de Retenção de Água no Solo (CCRAS), evidenciada por um índice de similaridade superior a 83%. Observou-se, ainda, que a resistência do solo à penetração (RP) correlacionou-se significativamente com a densidade de partículas (Dp), apresentando um índice de similaridade próximo a 74%, enquanto a condutividade hidráulica saturada (Ksat) revelou uma correlação de mais de 65% com a densidade do solo. Com base nesses resultados, foram identificados três agrupamentos distintos.

Figura 16 - Dendrograma evidenciando as relações entre as variáveis físico-hídricas.



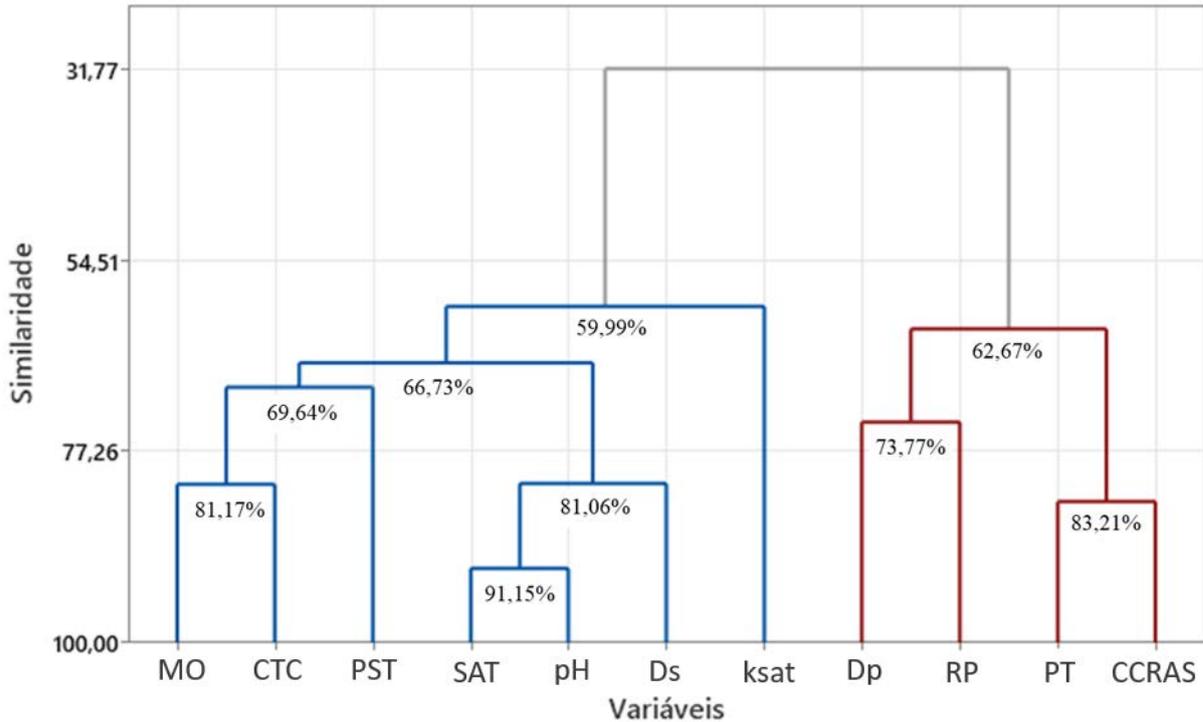
Ksat - Condutividade hidráulica saturada; Ds - Densidade do solo; Dp - Densidade de partículas; RP - Resistência à penetração; PT - Porosidade total; CCRAS - Curva Característica de Retenção de Água no solo.

Fonte: O autor.

Ao se analisar o segundo dendrograma (figura 17), torna-se evidente que todas as variáveis químicas adicionadas ao dendrograma estão concentradas no agrupamento azul, juntamente com Ksat e Ds. Destaca-se a alta similaridade entre SAT e pH, resultando em um agrupamento consistente que obteve uma correlação de 81% com Ds. No agrupamento vermelho, é perceptível a formação de um subgrupo composto por Dp, RP, PT e CCRAS, apresentando uma correlação de 62,67% com o agrupamento composto por RP e Dp,

evidenciando padrões consistentes de inter-relação entre essas propriedades físico-hídricas, conforme representado na Figura 16.

Figura 17 - Dendrograma formado a partir das variáveis físico-hídricas e variáveis químicas das amostras.



MO - Matéria orgânica; CTC - Capacidade de troca catiônica; PST - percentagem de sódio trocável; SAT - Saturação por base; pH - potencial Hidrogeniônico; Ds - Densidade do solo; Ksat - Condutividade hidráulica saturada; Dp - Densidade de partículas; RP - Resistência à penetração; PT - Porosidade total; CCRAS - Curva Característica de Retenção de Água no solo.

Fonte: O autor.

Notadamente houve uma correlação entre a porosidade total e a curva característica de retenção de água no solo, representada pela sigla CCRAS. Essa correlação é evidenciada pelo fato de que o somatório das partições de poros contribui diretamente para a porosidade total. Além disso, o dendrograma revela uma correlação significativa entre Dp e RP, com uma proporção menor de correlação com PT e CCRAS.

Dias Junior et al. (2004) e Almeida et al. (2008) destacaram que a resistência do solo à penetração é influenciada pela densidade e granulometria, sendo essencial considerar a umidade do solo como variável determinante. Libardi e Jong van Lier (1999) complementam essa perspectiva, explicando que o conteúdo de água no solo desempenha um papel crucial no controle da resistência mecânica e na quantidade de deformação que ocorre no solo.

As variáveis Ksat e Dp tiveram uma menor correlação com as demais variáveis físicas estudadas. Mesquita e Moraes (2004) explicaram em seus estudos que a dependência entre a Ksat e as propriedades físicas utilizadas por eles, como a densidade do solo, macro e micro porosidades e porosidade total não pode ser obtida diretamente por uma simples correlação.

Klein et. al (2015) também observaram em seus estudos que a densidade do solo e porosidade total apresentaram uma fraca correlação dentre os parâmetros físicos utilizados para estimativa de K_{sat} .

Mesmo em diferentes potenciais, as amostras se agruparam distintivamente com base no tipo de solo e profundidade, evidenciando a influência determinante das características do solo. Essa consistência nos agrupamentos destaca a confiabilidade dos resultados obtidos e a importância da análise estatística na interpretação de padrões, enriquecendo a compreensão das interações nos solos estudados.

A qualidade do solo está intrinsecamente ligada à sua funcionalidade nos ecossistemas, tanto aqueles que são gerenciados quanto os naturais. Essa qualidade reflete a capacidade do solo em sustentar a atividade biológica, preservar a qualidade ambiental e promover o crescimento e a saúde de plantas e animais. Em outras palavras, a saúde e a vitalidade do solo desempenham um papel crucial no equilíbrio e na prosperidade dos ecossistemas, impactando diretamente o desenvolvimento sustentável de diversas formas de vida.

6. CONCLUSÕES

Nos horizontes superficiais nos potenciais de 1 e 6 kPa, todos os solos apresentaram baixa resistência à penetração com exceção do solo P1 no potencial de 6 kPa que apresentou moderada resistência; todos os solos no potencial de 33,3 kPa apresentaram resistência moderada com exceção do P3 que apresentou resistência significativa, no potencial de 300kPa os solos P1 e P4 apresentaram moderada resistência enquanto o P2 e P3 apresentaram resistência moderada à penetração de raízes.

Nos horizontes subsuperficiais, no potencial de 1 kPa, os solos dos perfis P2 e P3, apresentaram baixa resistência à penetração, enquanto o P1 e P4 apresentaram moderada resistência; no potencial de 6 kPa, os solos apresentaram moderada resistência à penetração com exceção do P4 que apresentou baixa resistência; no potencial de 10 kPa, todos os solos apresentaram alta resistência, com exceção do P3 que apresentou moderada resistência; nos potenciais de 33,3 kPa e 300 kPa todos os solos apresentaram alta resistência à penetração de raízes.

A sobreposição de algumas variáveis no gráfico de distribuição da nuvem de variáveis indica sua similar representatividade. As variáveis Grau de Floculação, Densidade de Partículas e Resistência à Penetração assumem direções opostas às variáveis Grau de floculação, Argila Natural, Matéria Orgânica e Capacidade de Troca Cationica caracterizando uma correspondencia negativa. O mesmo ocorre com as variáveis Porosidade Total e Umidade Volumétrica em relação ao Coeficiente de Saturação e Relação Silte/Argila.

Na análise do dendrograma das variáveis físico-hídricas foi possível identificar uma alta correlação com valor de 73,77% de RP com a Dp, tendo estas uma correlação de 62,67% com as variáveis PT e CCRAS, também evidenciando uma menor correlação entre Ksat, Ds e variáveis químicas com valor de cerca de 29%.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AL-ANI, R. R.; AL OBAIDY, A. M. J.; HASSAN, F. M. Multivariate analysis for evaluation the water quality of Tigris River within Baghdad City in Iraq. **The Iraqi Journal of Agricultural Science**, v. 50, n. 1, p. 331-342, 2019.
- ALBUQUERQUE, J. A.; REINERT, D. J.; FIORIN, J. E.; RUEDELL, J.; PETRERE, C.; FONTINELLI, F. Rotação de culturas e sistemas de manejo do solo: efeito sobre a forma da estrutura do solo ao final de sete anos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 19, n. 1, p. 115- 119, jan./abr. 1995.
- ALENCAR, T. L.; CHAVES, A. F.; SANTOS, C. L. A.; ASSIS JÚNIOR, R. N.; MOTA, J. C. A. Atributos físicos de um Cambissolo cultivado e tratado com biofertilizante na Chapada do Apodi, Ceará. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 737-749, 2015.
- ALLEONI, L. R. F.; CAMARGO, O. A. Atributos físicos de Latossolos Ácricos do Norte Paulista. **Scientia Agrícola**, v.51, p.321-326. 1994.
- ALMEIDA, C. X.; CENTURION, J. F.; FREDDI, O. S.; JORGE, R. F.; BARBOSA, J. C. Funções de pedotransferência para a curva de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 32:2235-2243, 2008.
- ALVARENGA, R. C.; COSTA, L. M.; FILHO M. W.; REGAZZI, A. J. Crescimento de Raízes de Leguminosas em Camadas de Solo Compactadas Artificialmente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, 20:319-326, 1996.
- ALVARENGA, R. C.; COSTA, L. M.; MOURA FILHO, W.; REGAZZI, A. J. Crescimento de raízes de leguminosas em camadas de solo compactadas artificialmente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 20:319-326, 1996.
- ANDOGNINI, J.; ALBUQUERQUE, J. A.; WARMLING, M. I.; TELES, J. S.; SILVA, G. B. Soil compaction effect on black oat yield in Santa Catarina, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**;44:e0190157. 2020.
- ANDRADE, D. O.; AMARAL, F. C. S.; TAVARES, S. R. L.; BHERING, S. B. Parâmetros do sistema relacionados ao solo. In: AMARAL, F. C. S. do. Sistema brasileiro de classificação de terras para irrigação: enfoque na região semiárida. 2. ed. Rio de Janeiro: **Embrapa Solos**, 2011.
- ANDRADE, E. M.; ARAÚJO L. F. P.; ROSA M. F.; DISNEY W.; ALVES A. B. Seleção dos indicadores da qualidade das águas superficiais pelo emprego da análise multivariada. **Engenharia agrícola**, v. 27, p. 683-690, 2007.
- ARAUJO, M. A.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho Distrófico cultivado e sob mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.337-345. 2004.
- BAESSO, M. M.; MENEZES, T. A. V.; MODOLO, A. J.; ROSA, R. G.; ZUIN, L. F. S. Comparison between three penetrometers in the evaluation of the soil penetration mechanical resistance of a red eutroferic latosol. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, Tupã, São Paulo, Brazil, v. 14, n. 2, p. 101–110. DOI: 10.18011/bioeng2020v14n2p101-110. 2020.

BATTISTI, L. F. Z.; SCHMITT FILHO, A. L.; LOSS, A.; FARLEY, J. Atributos físicos do solo em um sistema silvipastoril com núcleos arbóreos no estado de santa catarina. **Holos**. 36(6), 1-16. 2020.

BENGHOUGH, A. G.; MULLINS, C. E. Mechanical impedance to root growth: A review of experimental techniques and root growth responses. **European Journal of Soil Science**. 41:341-358, 1990.

BERTOLLO, A. M.; KOPPE, E.; KASPARY, T.; BONNA, S. D.; SILVA, V. Variabilidade espacial e temporal da resistência à penetração em diferentes umidades de um Latossolo Vermelho. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânica, v. 9, n. 16, p. 2102-2110, 2013.

BETIOLI JÚNIOR, E.; MOREIRA, W. H.; TORMENA, C. A.; FERREIRA, C. J. B.; SILVA, Á. P. D.; GIAROLA, N. F. B. Intervalo hídrico ótimo e grau de compactação de um Latossolo Vermelho após 30 anos sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 36, 971-982. 2012.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 39:581-588, 2004.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SOUZA, Z. M.; SILVA, L. M. Utilização dos penetrômetros de impacto e de anel dinamométrico em latossolos. **Revista de Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 22, n.2, p. 191-199, maio 2002.

BRIZZI, R. R.; PORTOCARRERO, H.; COSTA, N. M. C.; SOUZA, A. P.; COSTA, A. J. S. T. Análise Das Características Físico-Químicas Do Horizonte Superficial De Um Latossolo Amarelo Sob Pastagem Como Subsídio À Compreensão De Processos Erosivos No Município De Paraty-Rj. **Caminhos De Geografia**, 20(69), 223-236. 2019.

BYRNES, R. C.; EASTBURN, D. J.; TATE, K. W.; ROCHE, L. M. A global meta-analysis of grazing impacts on soil health indicators. **Journal of environmental quality**, 47(4), 758-765. doi/epdf/10.2134/jeq2017.08.0313. 2018.

CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**, Editora Piracicaba. 1997.

CAMPOS, B. C.; REINERT, D. J.; NICOLODI, R.; RUEDELL, J.; PETRERE, C. Estabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho Escuro distrófico após sete anos de rotação de culturas e sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Campinas, v. 19, n. 1, p. 121-126, jan./abr. 1995.

CAMPOS, M. C. C.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; MONTANARI, R.; CAMARGO, L. A. Relações solo-paisagem em uma litosequência arenito-basalto na região de Pereira Barreto, SP. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 3, p. 519-529, 2007.

COMIN, J.; BOURSCHEID, C.; SOUZA, M.; SEPULVEDA, C. M.; LOSS, A. Avaliação Da Arborização De Pastagens Em Pastoreio Racional Voisin Por Meio De Indicadores Quantitativos De Qualidade Do Solo. **Cadernos De Agroecologia**. 10(3), 1-5, 2016.

CORRÊA, M. M.; KER, J. C.; MENDONÇA, E. S.; RUIZ, H. A.; BASTOS, R. S. Atributos físicos, químicos e mineralógicos de solos da região das Várzeas de Sousa (PB). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.27, p.311-324. 2003.

COSTA, D. B.; ANDRADE, P. K. B.; SILVA, S. A. M.; SIMÕES NETO, D. E.; FREIRE, F. J.; OLIVEIRA, E. C. A. Adubação fosfatada em cana planta e soca em Argissolos do Nordeste de diferentes texturas. **Revista Caatinga**, v.27, p.47-56, 2014.

CUNHA, A. M.; LANI, J. L.; COSTA, L. M.; FERNANDES FILHO, E. I.; AMARAL, E. F. Morphological, physical and pedogenetic attributes related to water yield in small watersheds in Guarapari/ES, Brazil. **Revista Ceres**, v.58, p.493-503, 2011.

D'ANDRÉA, A. F. **Atributos indicadores da qualidade do solo em sistemas de manejo no Sul de Goiás**. 2001. 104 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2001.

DE OLIVEIRA, J. F.; DE SALES, E. J.; DA SILVA, S. S.; DE ALMEIDA LIMA, V. I.; PEREIRA, J. **Compactação de um chernossolo rendzico em sistema lavoura- pecuária pelo método uniaxial**. Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável (Mossoró – RN - Brasil), v. 8, n. 3, p. 52 - 59, 2013.

DIAS JUNIOR, M. S.; SILVA, A. R.; FONSECA, S.; LEITE, F. P. Método alternativo de avaliação da pressão de preconsolidação por meio de um penetrômetro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 28:805-810, 2004.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. **Defining and assessing soil quality**. Defining Soil Quality for a Sustainable Environment, n.35, p. 3-21, 1994.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Compactação e descompactação de solos**. – Passo Fundo: EMBRAPA TRIGO, 2000.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 33p. 2013.

FAO. Status of the World's Soil Resources. **FAO**. [s.l.], 2015.

FOLONI, J. S. S.; LIMA, S. L.; BÜLL, L.T. Crescimento aéreo e radicular da soja e de plantas de cobertura em camadas compactadas do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 30:49-57, 2006.

GHOLIZADEH, M. H.; MELESSE, A. M.; REDDI, L. Water quality assessment and apportionment of pollution sources using APCS-MLR and PMF receptor modeling techniques in three major rivers of South Florida. **Science Total Environment**, v. 566, p. 1552-67, jun. 2016.

GIRARDELLO, V. C.; AMADO, T. J. C.; SANTI, A. L.; CHERUBIN, M. R.; KUNZ, J.; TEIXIRA, T. G. Resistência à penetração, eficiência de escarificadores mecânicos e produtividade da soja em latossolo argiloso manejado sob plantio direto de longa duração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, p.1234-1244, 2014.

GOMES, D. S. **Qualidade de um argissolo vermelho-amarelo sob sistemas florestais e pastagem, em Conceição de Macabú, RJ**. Dissertação de Mestrado, - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro Campos dos Goytacazes, 2016.

GRANT, C. A.; LAFOND, G. P. The effects of tillage systems and crop sequences on soil bulk density and penetration resistance on a clay soil in southern Saskatchewan. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 73, p. 223-232, 1993.

HAIR JR., J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. **Análise Multivariada de Dados**, 6 ed. Bookman, Porto Alegre. 2009.

HARGREAVES, P. R.; BAKER, K. L.; GRACESON, A.; BONNETT, S.; BALL, B. C.; CLOY, J. M. Soil compaction effects on grassland silage yields and soil structure under different levels of compaction over three years. **European Journal of Agronomy**. 2019.

HECKLER, C. E. Applied multivariate statistical analysis: applied multivariate statistical analysis. **Technometrics**, 47(4):517-517. 2005.

HONGYU, K.; SANDANIELO, V. L. M.; DE OLIVEIRA JUNIOR, G. J. Análise de Componentes Principais: Resumo Teórico, Aplicação e Interpretação. **E&S Engineering and Science**, 5.1: 83-90. 2016.

ISLAM, M. H.; KONDO N.; OGAWA, Y.; FUJIURA, T.; SUZUKI, T.; FUJITANI, S. Detection of infertile eggs using visible transmission spectroscopy combined with multivariate analysis. **Engineering in agriculture, environment and food**, v. 10, n. 2, p. 115-120, 2017.

JACKSON, J. E. Principal components and factor analysis: Part I – principal components. **Journal of Quality Technology**. v.12, n.4, p.201-213, 1986.

JACOMINE, P. K. T. **Origem e evolução dos conceitos e definições de atributos, horizontes diagnósticos e das classes de solos do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS)**. In: TORRADO-VIDAL, P.; ALLEONI, L. R. F.; COOPER, M.; SILVA, A. P. eds. Tópicos em ciência do solo. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.4, p.193-231. 2005.

JUSTINO, F.; ALBERTO, C.; OLIVEIRA, A. de; ALMEIDA, S.; LIMA, L. P. de; GUIMARÃES, E. C.; Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração e produtividade do milho. **Revista de Agricultura Neotropical**, v.4, (3): p.77-84, 2017.

KAIRIS, O. R.; KOSMAS, C.; KARAVITIS, C.; RITSEMA, C.; SALVATI, L.; ACIKALIN, S.; ... & ZIOGAS, A. Evaluation and selection of indicators for land degradation and desertification monitoring: types of degradation, causes, and implications for management. **Environmental management**, v. 54, p. 971-982, 2014.

KÄMPF, N.; CURI, N. **Formação e evolução do solo (Pedogênese)**. In: KER, J. C.; CURI, N.; SCHAEFER, C. E. G. R.; VIDAL-TORRADO, P. (eds.) Pedologia: Fundamentos. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. p.207-302. 2012.

KAPALANGA, T. S. **A review of land degradation assessment methods**. Land restoration training programme, Keldnaholt, Iceland. 2008.

KLEIN, C.; KLEIN, V. A.; LEVINSKI, F.; BORTOLANZA, D. R. Predição da condutividade hidráulica do solo saturado a partir de propriedades físicas do solo. **Vivências**, v. 11, n. 21, p. 191-198, 2015.

KOCHHANN, R. A.; DENARDIN, J. E.; SERTON, A. L. **Compactação e descompactação de solos**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2000.

KOSMAS, C.; KAIRIS, O.; KARAVITIS, C.; RITSEMA, C.; SALVATI, L.; ACIKALIN, S.; ... & ZIOGAS, A. Evaluation and selection of indicators for land degradation and desertification monitoring: methodological approach. **Environmental management**, v. 54, p. 951-970, 2014.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2005.

LIBARDI, P. L.; JONG VAN LIER, Q. Atuação dos fatores físicos do solo no desenvolvimento do sistema radicular. In: FERNANDES, M.F.; TAVARES, E.D. & LEAL, M.L.; eds. **WORKSHOP SOBRE SISTEMA RADICULAR: Metodologias e estudo de casos**. Aracaju, Embrapa - Tabuleiros Costeiros, p.47-56. 1999.

MARQUES JÚNIOR, J.; LEPSCH, I. F. Depósitos superficiais neoceno-zóicos, superfícies geomórficas e solos em Monte Alto, SP. **Geociências**, 19:90-106, 2000.

MARQUES, K. P. P. **UTILIZAÇÃO DE SUPERFÍCIES GEOMÓRFICAS NO LEVANTAMENTO PEDOLÓGICO DE UMA MICROBACIA DO RIO CAPIBARIBE**. Monografia de Graduação em Geografia. Universidade Federal Rural de Pernambuco. 2014.

MARTINKOSKI, L.; VOGEL G. F.; JADOSKI, S. O. Qualidade Física do Solo Sob Manejo Silvopastoril e Floresta Secundária. **Floresta e Ambiente**, 24, 15-25. 2017.

MAZURANA, M.; FINK, J. R.; SILVEIRA, V. H.; LEVIEN, R.; ZULPO, L.; BREZOLIN, D.; Propriedades físicas do solo e crescimento de raízes de milho em um Argissolo Vermelho sob tráfego controlado de máquinas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.37, (5): p.1185-1195, 2013.

MEIRELES, H. T.; MARQUES JÚNIOR, J.; CAMPOS, M. C. C.; PEREIRA, G. T. Relações solo-paisagem em topossequência de origem basáltica. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 42, n. 2, p. 129-136, 2012.

MELO, F. B.; CARDOSO, M. J. **Qualidades físicas de um latossolo amarelo distrocoeso submetido à diferentes sistemas de manejo no cerrado do Leste Maranhense**. XVIII REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, MA. 2010.

MERCANTE, E.; URIBE-OPAZO, M. A.; SOUZA, E. G. Variabilidade espacial e temporal da resistência mecânica do solo à penetração em áreas com e sem manejo químico localizado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo [online]**. vol.27, n.6, pp.1149-1159. 2003.

MESQUITA, M. G. B. F.; MORAES, S. O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, v. 34, p. 963-969, 2004.

MIOTO, L. S.; ARAUJO, M. A.; SERON, C. C.; LAVANHOLI, R.; BATISTA, M. A.; LOZANO, C. S. Resistência do solo à penetração das raízes avaliada por dois penetrômetros em uma área cultivada com mandioca. **Acta Iguazu**, Cascavel, v. 5, n.1, p. 65-79, 2016.

MOHAMED, I.; OTHMAN, F.; IBRAHIM, A. I. N.; ALAA-ELDIN, M. E.; YUNUS, R. M. Assessment of water quality parameters using multivariate analysis for Klang River basin, Malaysia. **Environmental Monitoring and Assessment**.187, 4182. 2015

MOITA NETO, J. M.; MOITA, G. C. Uma introdução à análise exploratória de dados multivariados. **Química nova**, v. 21, p. 467-469, 1998.

MOTA, J. C. A. **Componentes do balanço de água em um Cambissolo cultivado com meloeiro irrigado por gotejamento, com e sem cobertura da superfície**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2010.

MÜLLER, M. M. L.; CECCON, G.; ROSOLEM, C. A. **Influência da compactação do solo em subsuperfície sobre o crescimento aéreo e radicular de plantas de adubação verde de inverno**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.25, n.3, p.531-538, 2001.

OLIVEIRA FILHO, F. X.; MIRANDA, N. O.; MEDEIROS, J. F.; SILVA, P. C. M.; MESQUITA, F. O.; COSTA, T. K. G.; Compactação de solo cultivado com cana de açúcar em Baía Formosa, Rio Grande do Norte. **Revista Ceres**, Viçosa, v.63, n.5, 2016.

RANGEL, O. J. P.; SILVA, C. A. **Estoques de carbono e nitrogênio e frações orgânicas de Latossolo submetido a diferentes sistemas de uso e manejo**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 31, p. 1609-1623, 2007.

REGAZZI, A. J. **INF 766 - Análise multivariada**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas. Departamento de Informática, 2001. 166p.

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

RICHARDS, L. A. Physical conditions of water in soil. In: BLACK, C. A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society for Testing and Materials, p. 128-152. 1965.

RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; BRITO, O. R.; LLANILLO, R. F.; FERREIRA, R.; **Compactação do solo: causas e efeitos**. Semina: Ciências Agrárias, Londrina, v. 26, n. 3, p. 321-344, 2005.

ROSOLEM, C. A.; ALMEIDA, A. C. S.; SACRAMENTO, L. V. S. **Sistema radicular e nutrição de soja em função da compactação do solo**. Bragantia, 53:259-266, 1994.

ROSOLEM, C. A.; FOLONI, J. S. S.; TIRITAN, C. S. **Root growth and nutrient accumulation in cover crops as affected by soil compaction**. Soil and Tillage Research, 65:109-115, 2002.

ROSSETTI, K. V.; CENTURION, J. F. Indicadores de qualidade em Latossolos compactados e suas relações com o crescimento do sistema radicular do milho. **Revista Agro@mbiente Online**, v. 11, n. 3, p. 181-190, 2017.

ROTH, C. H.; CASTRO-FILHO, C.; MEDEIROS, G. B. **Análise de fatores físicos e químicos relacionados com a agregação de um Latossolo Roxo distrófico**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v. 15, p. 241-248, 1992.

RUHE, R. V. Geomorphic surfaces and the nature of soils. **Soil Science**, v.82, n.6, p. 441-445, 1956.

SÁ, M. A. C.; SANTOS JUNIOR, J. D. G. **Compactação do solo: consequências para o crescimento vegetal**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2005.

SABIN, J. G.; FERRÃO, M. F.; FURTADO, J. C. Análise multivariada aplicada na identificação de fármacos antidepressivos. Parte II: Análise por componentes principais (PCA) e o método de classificação SIMCA. **Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas**, v. 40, p. 387-396, 2004.

SALES, R. P.; PORTUGAL, A. F.; MOREIRA, J. A. A.; KONDO, M. K.; PEGORARO, R. F. **Qualidade física de um Latossolo sob plantio direto e preparo convencional no semiárido**. *Revista Ciência Agronômica*, Fortaleza, CE, v. 47, n. 3, p. 429-438, jul-set, 2016.

SENA, K. N., MALTONI, K. L., FARIA, G. A., CASSIOLATO, A. M. R. Organic carbon and physical properties in sandy soil after conversion from degraded pasture to Eucalyptus in the Brazilian Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 41:e0150505. 2017.

SEYBOLD, C. A.; HERRICK, J. E.; BREJDA, J. J. Soil resilienc: a fundamental component of soil quality. **Soil Science**, Baltimore, v. 164, p. 224-234, 1999.

SILVA, F. R.; ALBUQUERQUE, J. A.; COSTA, A. Crescimento inicial da cultura da soja em Latossolo Bruno com diferentes graus de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 38:1731-1739, 2014.

SILVA, G. S. N.; ALMEIDA, C. D. G. C.; ARAÚJO FILHO, J. C.; ALMEIDA, B. G.; SANTOS, E. M. S.; OLIVEIRA, J. E. S. **MAPEAMENTO E USO DOS SOLOS DE UMA MICROBACIA DO RIO CAPIBARIBE**. In: XXIX CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UFRPE - CEGOE-UFRPE / UAST-UFRPE / UFAPE, 2020.

SILVA, I. F.; MIELNICZUK, J. Ação do sistema radicular de plantas na formação e estabilização de agregados do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 21, n. 1, p. 113-117, jan./mar. 1997.

SILVA, S. D.; ALVES, J. M.; MESQUITA, G. M.; LEANDRO, W. M.; Efeito da compactação do solo no desenvolvimento aéreo e radicular do pinhão manso (*Jatropha curcas* L.) e crambe (*Crambe abyssinica* Hochst). **Global Science and Technology**, Rio Verde, v. 05, n. 02, p. 87 – 97, 2012.

SILVA, V. R. **Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação**. (Tese de Doutorado). Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2003.

SILVA, V. R.; REICHERT J. M.; REINERT D. J. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, p. 399-406, mar./abr. 2004.

SIMÕES NETO, D. E. OLIVEIRA, A. C.; FREIRE, F. J.; FREIRE, M. B. G. S.; OLIVEIRA, E. C. A.; ROCHA, A. T. Adubação fosfatada para cana planta em solos representativos para o cultivo da espécie no Nordeste brasileiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.50, p.73- 81, 2015.

SINGH, V. B.; TRIPATHI, J. N. Identification of critical water quality parameters derived from principal component analysis: case study from NOIDA area in India. **American Journal of Water Resources**, v. 4, n. 6, p. 121-129, 2016.

SOUZA, A. M. **Monitoração e ajuste de realimentação em processos produtivos multivariados**. 2000. Tese (Doutorado Engenharia de Produção) – Universidade Federal Santa Catarina, 2000.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; COOPER, M.; PEREIRA, G. P. Micromorfologia do solo e sua relação com atributos físicos e hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, p. 487-492, 2006.

SZATANIK-KLOC, A.; HORN, R.; LIPIEC, J.; SICZEK, A.; SZEREMENT, J.; Soil compaction-induced changes of physicochemical properties of cereal roots. **Soil and Tillage Research**, v.175, (1): p.226-233, 2018.

SZYMCZAK, D. A.; BRUN, E. J.; REINERT, D. J.; FRIGOTTO, T.; MAZZALIRA, C. C.; DAL'COL, L. A.; MARAFIGA, J.; Compactação do solo causada por tratores florestais na colheita de *Pinus taeda* L. na região sudoeste do Paraná. **Revista Árvore**, v.38, (4): p.641-648, 2014.

TAVARES, U. E.; ROLIM, M. M.; ORTIZ, P. F. S.; PEIXOTO, F. B.; GALVAO NETO, O. L. A. Caracterização física de um Argissolo Amarelo distrocoeso no Estado de Pernambuco. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola**, 2017, Maceio. Anais. Jaboticabal: SBEA, v. 1. p. 1-4. 2017.

TAYLOR, H. M.; ROBERSON, G. M.; PARKER JÚNIOR, J. J. Soil strength-root penetration relations for medium to coarse textured soil materials. **Soil Science**, v.102, p.18-22, 1966.

TELES, J. S. **Desenvolvimento do jiggs em diferentes graus de compactação em solos de Santa Catarina**. Dissertação (mestrado) -Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência Do Solo, Lages, 2019.

TORRES, E.; SARAIVA, O. F. **Camadas de impedimento do solo em sistemas agrícolas com a soja**. Londrina: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 58 p. (Circular técnica, 23), 1999.

TRIPATHI, M.; SINGAL, S. K. Use of principal component analysis for parameter selection for development of a novel water quality index: a case study of river Ganga India. **Ecological indicators**, v. 96, p. 430-436, 2019.

TULLBERG, J.; ANTILLE, D. L.; BLUETT, C.; EBERHARD, J.; SCHEER, C.; Controlled traffic farming effects on soil emissions of nitrous oxide and methane. **Soil and Tillage Research**, v.176, (1): p.18-25, 2018.

VIEIRA, M. J.; MUZILLI, O. Características físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 19, n. 7, p. 873-882, jul. 1995.

WHITELEY, G. M.; DEXTER, A. R. Root development and growth of oilseed, wheat and pea crops on tilled and nontilled soil. **Soil and Tillage Research**, 2:379-393, 1982.

ZEINALZADEH, K.; REZAEI, E. Determining spatial and temporal changes of surface water quality using principal component analysis. **Journal of Hydrology: Regional Studies [online]** 13, 1–10. 2017.