



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PRÓ- REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
AMBIENTAL**



**CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA DE SOLOS: LIMITES
METODOLÓGICOS EM FUNÇÃO DA GEOMETRIA POROSA NO DIAGNÓSTICO
DE RESILIÊNCIA DE ÁREAS DEGRADADAS**

FAGNA MARIA SILVA CAVALCANTE

**RECIFE-PE
Fevereiro – 2021**

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PRÓ- REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

FAGNA MARIA SILVA CAVALCANTE

**CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA DE SOLOS: LIMITES
METODOLÓGICOS EM FUNÇÃO DA GEOMETRIA POROSA NO DIAGNÓSTICO
DE RESILIÊNCIA DE ÁREAS DEGRADADAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal Rural de Pernambuco como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador

Prof. Dr. Brivaldo Gomes de Almeida (DEPA/UFRPE)

Coorientadores

Dr. Douglas Monteiro Cavalcante (PNPD/UFRPE)

Dr. José Coelho de Araújo Filho (EMBRAPA Solos/UEP-Recife)

RECIFE-PE

Fevereiro – 2021

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)

C376c

Cavalcante, Fagna Maria Silva

Condutividade hidráulica saturada de solos: limites metodológicos em função da geometria porosa no diagnóstico de resiliência de áreas degradadas / Fagna Maria Silva Cavalcante. - 2021.
65 f. : il.

Orientador: Brivaldo Gomes de Almeida.

Coorientador: Jose Coelho de Araujo .

Inclui referências e apêndice(s).

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Recife, 2021.

1. Caatinga. 2. Índice qualidade física do solo. 3. Recuperação ambiental. I. Almeida, Brivaldo Gomes de, orient. II. , Jose Coelho de Araujo, coorient. III. Título

CDD 620.8

FAGNA MARIA SILVA CAVALCANTE

Dissertação intitulada: **CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA DE SOLOS: LIMITES METODOLÓGICOS EM FUNÇÃO DA GEOMETRIA POROSA NO DIAGNÓSTICO DE RESILIÊNCIA DE ÁREAS DEGRADADAS**, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como exigência para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental, e aprovada em 26 de fevereiro de 2021.



Prof. Dr. Brivaldo Gomes de Almeida (UFRPE)
Presidente da Banca Examinadora
(Orientador)



Prof. Dr. Alexsandro dos Santos Brito (IFBAIANO)
(Examinador Externo)



Prof. Dr. André Maciel Netto (UFPE/ CTG/ DEN)
(Examinador Interno)

A Cristo e todos que contribuíram para a finalização de mais um ciclo na minha formação, especialmente, minha família.

AGRADECIMENTOS

Todos os dias é um novo dia para recomeçar, e hoje só tenho a agradecer as tantas coisas que Deus tem me proporcionado viver. Venho dividir com todos vocês, família, amigos, colegas e professores, mais uma vitória alcançada. Vocês contribuíram em cada dia para que eu pudesse me tornar uma melhor versão de mim mesma. Por permanecerem ao meu lado, me apoiando e torcendo para mais uma realização, agradeço:

Primeiramente a Deus, pois se tudo que tenho é porque Ele me permite viver e alcançar.

A todos os meus familiares, em especial, meus pais e irmãos, por todo apoio e presença nos momentos de maior dificuldade.

Ao meu orientador, professor Brivaldo Gomes de Almeida, com quem aprendi muito mais do que conhecimentos acadêmicos, ensinou amor e dedicação pelo ofício e que a compreensão e a empatia devem fazer parte, sobretudo, do ensino nas intuições. A vida pode estar o maior caos lá fora, contudo dê o seu melhor, da melhor forma circunstancial possível.

Aos Co-orientadores Douglas Monteiro Cavalcante e José Coelho de Araújo Filho pela parceria e pelos ensinamentos, experiências e aprendizados, levarei todos comigo.

Aos meus colegas do laboratório de física do solo e da turma, especialmente, Eudes Oliveira, Talmo Henrique, Maykon Barros e todos que encontrei muitas ou poucas vezes, com os quais tive doses diárias de sorrisos, papos sérios e experiências de vida.

A Walquiria de Brito, secretária do PPEAMB, por todo o apoio quando cheguei, provando que provindência Divina nunca falha.

O apoio da instituição de fomento FACEPE pela concessão da bolsa e todos que fazem à UFRPE.

Enfim, obrigada a todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para esta realização.

Até aqui me ajudou o SENHOR.

RESUMO

A condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) expressa a intensidade ou taxa da movimentação da água nos poros do solo, constituindo uma ferramenta importante para a avaliação da dinâmica da água, nutrientes e poluentes no solo. Varia conforme as características do fluido percolante e seus valores podem ter influência da matriz porosa (textura, densidade, distribuição do tamanho de poros e estabilidade de agregados). A geometria porosa, por sua vez, é sensível às alterações promovidas pelo uso e manejo de áreas cultivadas. Tais modificações levam à dificuldades para o desenvolvimento da fauna e flora, para a produção agrícola e recuperação ambiental natural, ou por intervenção antrópica. Em virtude disso, objetivou-se definir os limites metodológicos para a determinação da K_{sat} de solos, em função das alterações associadas à sua matriz porosa, no diagnóstico da resiliência de áreas degradadas. A área experimental constituiu-se de três sistemas sob diferentes manejos: cultivo de palma forrageira; em pousio (herbáceas); e sob Caatinga preservada. As amostras foram coletadas na camada de 0-0,2 m, tendo-se: amostras deformadas, via trado do tipo holandês; e com estrutura preservada, por meio do método do anel volumétrico, com auxílio de amostrador tipo Uhland; e, também, amostras em forma de torrões. A K_{sat} foi determinada por meio da aplicação de diferentes cargas hidráulicas (CH), aplicadas via permeâmetro de carga constante (PCC) e de carga decrescente (PCD). Para os demais atributos físicos utilizaram-se os seguintes métodos: distribuição das frações granulométricas do solo, via desímetro modificado; estabilidade de agregados, avaliada por via úmida; densidade do solo, pelo anel volumétrico; resistência do solos à penetração de raiz, penetrômetro de bancada; porosidade total, via saturação; e distribuição do tamanho de poros, pelo uso da mesa de tensão. O processamento dos dados foi mediante um software de análise estatística, obtendo-se correlação de Pearson ($p < 0,01$; $p < 0,05$; $p < 0,1$), estatística descritiva, análise de variância e testes de médias ($p < 0,05$) para os atributos e, por fim, o índice de qualidade do solo (IQS), definidos para os sistemas de manejo por meio da análise de todos os atributos avaliados. Os resultados da K_{sat} mostram-se significativos pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) em ambos os métodos utilizados, e apresentam correlações positivas e negativas com os atributos estudados, referentes à matriz porosa do solo. Em geral, avaliando isoladamente cada manejo, observa-se que, com a aplicação das diferentes CH, identificou valores similares para ambas as metodologias, ou seja, o aumento da carga hidráulica não influenciou os resultados da K_{sat} , que não apresentaram diferenças significativas entre si, à 5% pelo teste de Tukey. Este resultado sugere que a avaliação da resiliência das áreas estudadas pode ser realizada pela K_{sat} , e que seus resultados não são influenciados pela escolha da carga hidráulica durante os respectivos ensaios. Por outro lado, os atributos físicos que melhor atenderam à classificação do IQS foram: o índice de estabilidade de agregados; os microagregados; a K_{sat} , quando obtida pelo PCD, nas cargas de 10 e 40 cca. Assim, os valores dos IQS para a Caatinga foram menores se comparado aos demais sistemas. É perceptível que as ações de desmatamento, na área em estudo, e seu subsequente uso para o cultivo, promoveram alterações no estado original da estrutura dos solos, onde uma década de conservação ainda não foi suficiente para detectar a melhoria das condições físicas da área.

Palavras-chave: Caatinga, índice qualidade física do solo, recuperação ambiental.

ABSTRACT

Saturated hydraulic conductivity (Ksat) expresses the movement of water in the soil pores, constituting an important tool for the evaluation of water dynamics, nutrients and pollutants in the soil. It is an attribute that varies according to the characteristics of the percolating fluid and its values may be influenced by the porous matrix (texture, bulk density, pore size distribution and aggregate stability). The porous soil geometry, in turn, is sensitive to changes promoted by the use and management of cultivated areas. Such modifications lead to difficulties for the development of fauna and flora, for agricultural production and natural environmental recovery, or for anthropic intervention. As a result, this research aimed to define the methodological limits for the determination of the Ksat of soils, in function of the alterations associated with its porous matrix, in the diagnosis of the resilience of degraded areas. The experimental area consisted of three systems under different managements: cactus forage; resting area (herbaceous cultivation); and under preserved Caatinga. The samples were collected at a depth of 0-20 cm, with: deformed samples, via the dutch type auger; and structured, using a volumetric cores, inserted into the soil with the aid of a Uhland sampler. In depth, samples were also collected in the form of clods. Ksat was determined through the application of different hydraulic loads, applied via constant-head permeameter (PCC) and falling head permeameter (PCD). The tests to obtain the other physical attributes of the soils were carried out by using the following methods: distribution of the particle size fractions of the soil, via modified desimeter; aggregate stability, assessed by wet; soil density, by the volumetric core; soil resistance to root penetration, bench penetrometer; total porosity, via saturation; and pore size distribution, using the tension table. Data processing was performed using statistical analysis software, obtaining Pearson's correlation ($p < 0.01$; $p < 0.05$; $p < 0.1$), descriptive statistics, means tests ($p < 0.05$) for the investigated properties and, finally, the soil quality index (SQI), defined for the management systems through the analysis of all evaluated attributes. The Ksat results are shown to be significant by the Tukey test ($p < 0.05$) in both methods used, and have positive and negative relationships with the studied attributes, referring to the porous soil matrix. In general, observing each management in isolation, it is observed that, with the application of the different hydraulic loads, it was possible to identify similar values for both methodologies, i.e., the increase in the hydraulic load did not influence the Ksat results, which did not present differences significant to each other, at 5% by the Tukey test. This result suggests that the resilience assessment of the studied areas can be performed by Ksat, and that its results are not influenced by the choice of hydraulic load during the respective tests. On the other hand, the physical attributes that best met the SQI classification were: the aggregate stability index; micro-aggregates; Ksat, when obtained by PCD, in loads of 10 and 40 cca. Thus, the values of the SQI for the Caatinga were lower when compared to the evaluated management systems. Therefore, it is noticeable that the actions of deforestation of the Caatinga in the study area, and its subsequent use for cultivation, promoted changes in the original condition of its soil structure, where a decade of conservation has not yet been sufficient to detect the resilience of the area.

Keywords: Caatinga, soil physical quality index, environmental recovery

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de h_1 e h_2 referentes aos limites aplicados para os diferentes Δh utilizados nos ensaios para a determinação da condutividade hidráulica saturada dos solos	30
Tabela 2 – Distribuição do tamanho de poros dos solos estudados, obtida via mesa de tensão, na faixa de umidade de 0-10 cca, 10-60 cca e 60-100 cca	32
Tabela 3 – Distribuição das frações granulométricas e classe textural do Cambissolo háplico sob diferentes sistemas de uso avaliados	39
Tabela 4 – Valores médios da condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) dos solos referentes à aplicação de diferentes cargas hidráulicas (1,0; 1,5 e 3,0 cca) pelo método do permeâmetro de carga constante (PCC) em diferentes sistemas de manejo	40
Tabela 5 – Médias para K_{sat} do solo pelo método do permeâmetro de carga decrescente (PCD) empregando cargas hidráulicas de 1,0; 10,0 e 40,0 cca nos diferentes manejos	41
Tabela 6 – Índices de avaliação da estabilidade dos solos em diferentes sistemas de uso	42
Tabela 7 – Índice de sensibilidade para os atributos de agregação do solo sob os sistemas de uso sob palma e pousio, calculados em relação à Caatinga preservada	43
Tabela 8 – Distribuição de tamanho de poros por classes de diâmetros equivalentes e porosidade total do solo	44
Tabela 9 – Resistência do solo à penetração de raízes (RP) e Densidade do solo (D_s) determinadas nos solos sob diferentes manejos	45
Tabela 10 – Correlação de Pearson para os atributos físico-hídricos do solo	46

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização da área de estudo.....	24
Figura 2 – Amostras de solo deformadas	25
Figura 3 – Amostras de solo estruturadas: (a) anel volumétrico; (b) em forma de torrões	26
Figura 4 – Ensaio para determinação das frações granulométricas do solo: (a) agitador mecânico tipo Wagner; (b) material em repouso; (c) leitura da suspensão via densímetro	27
Figura 5 – Desenho esquemático do permeâmetro de carga constante utilizado nos ensaios para a determinação da condutividade hidráulica saturada, destacando-se as cargas hidráulicas aplicadas (a); e fotos ilustrando os procedimentos dos ensaios em laboratório (b)	29
Figura 6 – Desenho esquemático do permeâmetro de carga decrescente utilizado nos ensaios para a determinação da condutividade hidráulica saturada, destacando-se as cargas hidráulicas aplicadas, decrescentemente (a); e fotos em laboratório durante os ensaios (b) e (c).....	30
Figura 7 – Determinação da distribuição do tamanho dos poros (DTP): (a) saturação das amostras; (b) mesa de tensão utilizada para aplicar aos conjuntos anel-amostra as tensões referentes aos potenciais de 1, 6 e 10 kPa, com detalhe, à direita, do contato hidráulico entre a amostra e a superfície da “camada de papel-caulim”	32
Figura 8 – Penetrômetro eletrônico de bancada utilizado nos ensaios para a determinação da resistência do solo a penetração de raízes	33
Figura 9 - Ensaio para obtenção dos parâmetros da estabilidade de agregados do solo: (a) agregados obtidos por tamisação a seco; (b) equipamento tipo Yoder; (c) retirada dos agregados retidos nas respectivas peneiras após peneiramento por via úmida, e posterior transferência para as latas de alumínio.....	35
Figura 10 – Índice de qualidade do solo (IQS) e contribuição dos atributos do solo para o IQS para os sistemas de sob palma, em pousio e Caatinga preservada em Triunfo-PE.	48

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS	15
2.1 Geral.....	15
2.2. Específicos	15
3. REVISÃO DE LITERATURA	16
3.1. Qualidade física do solo na avaliação ambiental.	16
3.1.1. A dinâmica da água e os atributos físicos do solo	19
3.2. Efeitos do uso e manejo do solo da Caatinga nos atributos físico-hídricos	22
4. MATERIAL E MÉTODOS	24
4.1. Área de estudo	24
4.2. Amostragem dos solos	25
4.3. Análise granulométrica e grau de floculação do solo	26
4.4. Condutividade hidráulica saturada.....	28
4.4.1. Permeâmetro de carga constante.....	28
4.4.2. Permeâmetro de carga decrescente	29
4.5. Porosidade total do solo	31
4.6. Distribuição de tamanho de poros do solo por classes de diâmetros equivalentes	31
4.7. Resistência do solo à penetração de raízes	33
4.8. Densidade do solo	34
4.9. Estabilidade de agregados.....	34
4.10. Índice de Qualidade do solo.....	36
4.11. Análise Estatística.....	38
5. RESULTADOS	38
5.1. Atributos físico-hídricos do solo.....	38
5.1.1. Distribuição das frações granulométrica do solo (Areia, Silte e Argila)	39
5.1.2 Condutividade hidráulica saturada solo	40
5.1.3 Estabilidade de agregados do solo	42
5.1.4 Distribuição do tamanho de poros e porosidade total do solo	43
5.1.5 Resistência do solo à penetração de raízes e a densidade do solo	45
5.2. Correlação entre os atributos físico-hídricos do solo e índice de qualidade do solo	45
6. DISCUSSÕES	48
6.1. Atributos físico-hídricos do solo.....	48

6.2. Correlação entre os indicadores físico-hídricos e índice de qualidade do solo	52
7. CONCLUSÕES.....	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54
APÊNDICES	63

1. INTRODUÇÃO

A caracterização físico-hídrica de solos é uma ferramenta importante para avaliação da dinâmica de água, nutrientes e poluentes no solo. Dentre os atributos físico-hídricos de solos, a condutividade hidráulica saturada (Ksat) tem maior relevância em estudos de movimento de água e solutos nos perfis, representando a permeabilidade de fluídos em meios porosos e fornecendo, indiretamente, informações sobre a sua estrutura (KLUTE; DIRKSEN, 1986; MESQUITA; MORAES, 2004).

Definida como a facilidade com que a água se movimenta através dos poros do solo (GONÇALVES; LIBARDI, 2013), a Ksat fornece dados de extrema importância ao uso agrícola e, conseqüentemente, à produção e produtividade das culturas, além da preservação do solo e do ambiente. A Ksat, além de variar de acordo com as características do fluído percolante, tem seus valores vinculados aos atributos físicos do solo que estão diretamente associados à sua matriz porosa, como: textura (areia, silte e argila); densidade do solo; distribuição de tamanho das classes de poros - DTP (macro, meso, micro e criptoporos); estabilidade de agregados (BRANDÃO *et al.*, 2006; GONÇALVES; LIBARDI, 2013). Desse modo, esse conjunto de atributos relacionados ao espaço poroso dos solos, que influenciam a Ksat, podem ser reunidos em um único termo: geometria porosa - GP (LIBARDI, 2012).

Os sistemas de manejo com uso de máquinas agrícolas, além de outros fatores como os ciclos de umedecimento e secagem, podem modificar a estrutura do solo, alterando a porosidade total, como também, segundo Ribeiro *et al.* (2007), a DTP. Desse modo, a GP dos solos pode ser alterada pelo tipo de cobertura vegetal e práticas de uso e manejo do solo, afetando as características hidráulicas que regulam o balanço hídrico, podendo causar grandes impactos na disponibilidade de água para as plantas e, conseqüentemente, afetar o crescimento e expansão do sistema radicular (PREVEDELLO, 2012).

Diante da importância do uso de dados da Ksat na sustentabilidade da produção agrícola, muitos métodos têm sido desenvolvidos para a sua determinação, tanto no campo como em laboratório; mas que, independentemente do método selecionado, os resultados apresentam alta variabilidade espacial (JONG VAN LIER; LIBARDI, 1999; GONÇALVES; LIBARDI, 2013), devido às diferenças inerentes ao meio ambiente, por depender em grande parte da forma e da continuidade do sistema poroso, variando fortemente de um local a outro, bem como das particularidades de cada método (MESQUITA; MORAES, 2004; MARQUES *et al.*, 2008).

Os métodos de laboratório são frequentemente utilizados, mesmo sob críticas destes determinarem apenas a componente vertical da Ksat (HUANG *et al.*, 1998), o que resulta em

superestimação dos valores (MAHESHWARI, 1997). Neste contexto, Borges e Libardi (2000) comentam que os métodos e as técnicas utilizadas para quantificar a K_{sat} devem ser aplicados de forma que não provoquem perturbações na estrutura do solo, fornecendo valores representativos com precisão e exatidão adequadas aos objetivos do seu uso. Entretanto, os métodos de laboratório permitem maior controle das condições experimentais, como verificado nos permeâmetros de carga constante e de carga decrescente (REYNOLDS; ELRICK, 2002; GONÇALVES; LIBARDI, 2013).

A K_{sat} é geralmente determinada em laboratório por ser mais fácil, prática e rápida em relação às determinações de campo (PREVEDELLO, 2012). Segundo Hangen e Vieten (2017), das várias maneiras convencionais para se determinar o valor da K_{sat} em laboratório, a mais comum é baseada em amostras saturadas de solos, coletadas em anel volumétrico, que são percoladas por fluido usando uma carga hidráulica constante ou decrescente.

Para os métodos de laboratório, embora a seleção dos permeâmetros seja baseada no pressuposto teórico de que, para solos com alta condutividade hidráulica são mais indicados o uso de permeâmetros de carga constante, enquanto que para solos com baixa condutividade, os permeâmetros de carga decrescente são os mais adequados (REYNOLDS; ELRICK, 2002; MARQUES *et al.*, 2008), ainda há dúvidas sobre os limites metodológicos e sua sensibilidade em diferenciar modificações promovidas por determinados uso e manejo do solo. Assim, faz-se necessário investigar os atributos do solo para a promoção da conservação e preservação das condições do solo, para que os processos naturais transcorram de forma ordenada e favoráveis ao desenvolvimento da fauna e flora do solo.

2. OBJETIVOS

2.1 Geral

- Definir os limites metodológicos para a determinação da condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) de solos, em função das alterações associadas à sua matriz porosa, utilizando seus resultados para diagnosticar a resiliência de áreas sob diferentes manejos.

2.2. Específicos

- Determinar a K_{sat} de solos utilizando dois métodos de laboratório: permeâmetro de carga constante (PCC); permeâmetro de carga decrescente (PCD), sob diferentes cargas hidráulicas;

- Avaliar a dependência dos resultados da Ksat dos solos em função da variação das cargas hidráulicas aplicadas aos solos nos ensaios de laboratório;
- Determinar os atributos físicos do solo: textura (areia, silte e argila), distribuição de tamanho de poros (macro e meso, microporos) e índices de agregação do solo;
- Avaliar a influência dos atributos físicos do solo nos resultados da Ksat, obtidos pelos métodos de laboratório, em função das alterações associadas à sua matriz porosa devido aos sistemas de manejo.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Qualidade física do solo na avaliação ambiental.

A qualidade do solo é considerada um dos componentes mais importantes da qualidade ambiental, além da qualidade do ar e da água (ANDREWS *et al.*, 2002). Com o importante papel que o solo desempenha no fornecimento de serviços ecossistêmicos locais e globais, sua manutenção em boas condições é vital. Então, o bom gerenciamento no uso do solo e tomadas de decisões dependem de ferramentas científicas capazes de avaliar as mudanças na qualidade e função do solo e que apresentem vantagens, como a facilidade na aplicação, custo acessível e eficiência nos resultados.

Os solos, em geral, possuem uma reação lenta às mudanças no uso e manejo da terra, o que pode tornar mais difícil a avaliação dessas alterações na sua qualidade, antes dos danos irreversíveis que possam ocorrer, se comparado a qualidade do ar e da água (NORTCLIFF, 2002).

Existem muitas definições para a qualidade do solo, porém, na maioria, os conceitos levam em consideração a utilização do solo pelo homem para fins agrícolas e as funções do solo em ecossistemas naturais e agrícolas (SINGER; EWING, 1999; SOJKA; UPCHURCH; 1999; GREGORICH *et al.*, 1997). Esses autores definem, de forma geral, que a qualidade do solo dependerá da extensão na qual o solo funcionará para benefício humano, colocando como importante o grau de aptidão de dado solo para um fim específico.

O conceito de qualidade do solo tem um sentido mais amplo, sendo definida como “a capacidade de funcionar adequadamente dentro dos limites das classes de aptidão agrícola e do bioma, de modo a manter a qualidade ambiental, sustentar a produtividade biológica, promover a sanidade mutualística dos seres vivos que o habitam e, portanto, mantendo o equilíbrio ecológico e proporcionando atividades sustentáveis” (DORAN; PARKIN, 1994; DORAN; PARKIN, 1996). A qualidade dos solos representa uma complexidade maior que a do ar e da

água, pois o solo constitui-se de fases sólidas, líquidas e gasosas e podem ser usados para uma maior variedade de propósitos (NORTCLIFF, 2002).

Dentro da perspectiva ambiental, qualidade do solo é “a capacidade do solo de promover o crescimento das plantas, proteger bacias hidrográficas, regulando a infiltração e particionamento de precipitação, e evitando a poluição da água e do ar por tamponamento de potenciais poluentes, tais como produtos químicos agrícolas, resíduos orgânicos e produtos químicos industriais” (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1993, como citado em SIMS *et al.*, 1997).

A avaliação da qualidade do solo pode ser realizada tanto para ecossistemas naturais, para manutenção da qualidade ambiental e conservação da biodiversidade, quanto em agroecossistemas onde o principal serviço, mas não exclusivo, é a produtividade (BÜNEMANN *et al.*, 2018).

Dentro da física do solo, essa qualidade está relacionada, principalmente, com atributos de transferência e de armazenagens, correspondentes ao conteúdo de água, solutos, ar e calor, e toda a dinâmica de massa e energia que envolve essas substâncias. Dessa forma, é necessário atentar-se para a relação com o desenvolvimento das plantas, minimização de degradação ambiental e a busca por manter a estabilidade estrutural do solo, visando sua saúde biológica e expansão de raízes (TOPP *et al.*, 1997; JON VAN LIER; GUBIANI, 2015).

O estudo do tamanho (granulometria) e arranjo (estrutura) das partículas minerais sólidas do solo basicamente o caracterizam fisicamente (FERREIRA, 2010). Sendo assim, a qualidade física do solo está relacionada ao bom arranjo das partículas primárias do solo (areia, silte e argila) em unidades secundárias (agregados), favorecendo o espaço entre elas (porosidade). Portanto, para se estabelecer uma boa qualidade do solo deve-se envolver boas práticas agrícolas, considerando, também, a capacidade solo (TOPP *et al.*, 1997).

Para executar essas práticas de manejo sustentáveis, que consideram os atributos estruturais do solo, a capacidade e a finalidade para a qual o solo será destinado, é importante estimar periodicamente o grau de degradação ou condicionamento do solo (DEXTER 2004a).

Portanto, para monitorar a degradação ou a recuperação da qualidade física do solo faz-se necessário avaliar os seus atributos e processos fundamentais envolvendo a água e o ar. No entanto, devido à complexidade da medição direta, utiliza-se a alternativa indireta, por meio de indicadores de qualidade física e/ou funções de pedotransferência, os quais têm a capacidade de representar um ou vários atributos do solo (CARTER *et al.*, 1997).

Os vários estudos sobre a qualidade física do solo, desenvolvidos ao longo dos anos, proporcionaram a valorização do solo de acordo com suas qualidades. Como resultado, tornou-se possível identificar os níveis de conservação, degradação ou recuperação de um determinado solo, terra ou paisagem, por meio das informações de seu estado atual, concernente às condições originais deste solo (REINERT *et al.*, 2006).

A qualidade da água de superfície e do lençol freático, bem como o ar circundante de um ambiente natural, possibilitam o conhecimento da qualidade ambiental dos agroecossistemas. Logo, a infiltração e o escoamento superficial são diretamente influenciados pelos atributos físicos e pelas condições da superfície do solo (existência de vegetação ou de resíduos de culturas) e indiretamente afeta a qualidade ambiental (REINERT *et al.*, 2006).

A qualidade física do solo e a sustentabilidade de agrossistemas estão relacionadas entre si; e, para identificação da situação do solo, faz-se necessário a utilização de indicadores que reflitam o seu comportamento e expressem a circunstância na qual o solo se encontra (PEREIRA *et al.*, 2011). Os principais indicadores propostos na literatura e, portanto, mais empregados são: densidade do solo (Ds), porosidade total (PT), resistência do solo à penetração de raízes (RP), estabilidade de agregados (EA), capacidade de retenção de água (representada pela curva característica de retenção de água no solo - CCRAS) e condutividade hidráulica saturada – Ksat (ARAÚJO *et al.*, 2012).

As características estruturais do solo relacionadas ao arranjo das partículas, à forma e/ou à estabilidade dos agregados, são importantes meios para a avaliação da qualidade estrutural do solo, devido sua sensibilidade às práticas de manejo adotadas, tráfego de máquinas, pisoteio animal, que promovem o processo de compactação. A qualidade estrutural reflete os processos que ocorrem no solo e uma alteração na sua estrutura produz interferências nos processos naturais, gerando um novo comportamento no solo (FERREIRA, 2010).

A interpretação correta das informações a cerca dos atributos físico-hídricos do solo, com as interrelações, traduzem mais precisamente a qualidade física do solo nos mais variados sistemas de produção. Sendo assim, pode-se indicar o grau de degradação do solo de uma área, quando comparada a solos sem alterações físicas (SANTOS, 2010; SANTOS *et al.*, 2011). Desta forma, a análise quantitativa e a interpretação dos atributos físico-hídricos do solo são indispensáveis para uma gestão segura dos recursos naturais (STEFANOSKI *et al.*, 2013).

3.1.1. A dinâmica da água e os atributos físicos do solo

O solo retém e disponibiliza água e nutrientes para as plantas por meio de fenômenos de adsorção e capilaridade, tornando-o armazenador e fornecedor. Desempenha papel fundamental nos processos que envolvem o sistema solo-planta-atmosfera, pois o potencial de água no solo determina a facilidade, maior ou menor, com a qual a água será extraída em função da necessidade da planta. À medida que o solo tem sua umidade reduzida, a disponibilidade hídrica será mais limitada, ocorrendo o aumento da força de retenção, fazendo com que nem toda a água presente nos poros consiga ser extraída pelas plantas (REICHARDT, 1990).

O potencial total da água em um sistema solo-planta-atmosfera, conforme Timm (2004), pode ser descrito pela energia livre de Gibbs, correspondendo a um conjunto de forças alimentadas por diferentes potenciais (gravitacional, de pressão, osmótico e matricial). Estes potenciais são resultado de atrações entre a matriz do solo e a água, e, também, da ação da pressão e da gravidade (HILLEL, 1998).

As principais propriedades físicas do solo que afetam significativamente a disponibilidade de água para as culturas são: a estrutura, a distribuição do diâmetro dos poros, a textura, o tipo e a quantidade de argila e o teor de matéria orgânica. A estrutura constitui a principal propriedade para que o solo tenha capacidade de cumprir suas funções e garantir sua qualidade (DORAN; PARKIN, 1994) e os poros de permitir as trocas gasosas, transmitir e armazenar água para o crescimento e desenvolvimento das plantas no ecossistema.

Um dos processos fundamentais que assegura o solo de exercer sua função é a infiltração, processo dinâmico de entrada de água através da superfície do solo. As características do solo e da água, como a capacidade de armazenagem do solo e a transmissão através do perfil, assim como os fenômenos de entrada de água, são os fatores que definem a infiltração e o escoamento na superfície do terreno (RICHERT *et al.*, 2009a).

Dentre os fatores que exercem grande influência sobre a infiltração da água no solo, podemos citar a compactação. A compactação da camada superficial do solo provoca o aumento da densidade e a redução da porosidade total, mudança na distribuição do tamanho dos agregados e aumento na capacidade de adsorção de água pelo solo (MAIA *et al.*, 2005), dificultando o movimento de água no perfil do solo, mesmo existindo condições favoráveis abaixo da camada compactada. A composição granulométrica, mineralógica e área superficial específica das partículas do solo, também intervêm negativamente na retenção de água. A composição granulométrica está intimamente ligada à estrutura e a variação da área superficial específica das partículas. Logo, com o aumento das tensões aplicadas, os horizontes arenosos

retêm menos água que os argilosos, em virtude da presença de poros com diâmetros maiores e menor área superficial específica das partículas (HILLEL, 1998).

Assim, outra propriedade física do solo é a textura, definida a partir da proporção entre as partículas com diferentes tamanhos (areia, silte e argila) em uma determinada massa de solo (EMBRAPA, 2017). Dessa forma, é uma propriedade que desempenha um papel essencial na descrição, identificação e classificação do solo, permitindo observar onde há contribuição do material de origem e os agentes cimentantes de formação do solo na condição textural, especialmente, da argila, fração mineral que exerce maior influência na estrutura e formação dos agregados do solo (FERREIRA, 1993).

A textura do solo influencia diretamente a susceptibilidade do solo à processos de compactação, disponibilidade hídrica, capacidade de troca de cátions, bem como na aeração do solo (KLEIN *et al.*, 2013). Um dos métodos para a sua determinação é o do densímetro, o qual baseia-se na relação entre as taxas das frações minerais pelo seus tamanhos, sendo para isso utilizado o princípio da sedimentação das partículas sólidas areia e silte (GEE; OR, 2002).

O solo pode ser facilmente modificado pelo manejo e por práticas culturais promovendo alteração na infiltração, na retenção de água e no potencial produtivo (DIAS JUNIOR *et al.*, 1999). Dentre os principais impactos negativos originados do uso indiscriminado do solo está a compactação e os processos erosivos decorrentes, acarretando restrições a capacidade de reserva de água e de estrutura de manutenção da flora.

A estrutura é um dos parâmetros mais importantes no sistema solo-planta. Geralmente, é avaliada por meio da densidade e porosidade do solo, pela facilidade e pouca interferência durante a coleta das amostras de solo (REICHERT *et al.*, 2003).

A densidade do solo é um atributo associado ao arranjo das partículas do solo que define as características do sistema poroso (FERREIRA, 2010), sendo frequentemente utilizada para a avaliação da compactação do solo (SÁ; SANTOS JUNIOR, 2005). Quando há modificação na densidade do solo pelo uso e manejo, a distribuição de tamanhos de poros tem alterações, em virtude da relação existente entre elas. Portanto, quando a proporção das classes de poros (macro, meso, micro e criptoporos) for alterada, isto influenciará o fornecimento de oxigênio e quantidade de água suficientes para o desenvolvimento das plantas e organismos.

O metabolismo vegetal depende de trocas gasosas entre o solo e a atmosfera. Com a compactação do solo, aumenta-se a sua densidade, com redução da taxa de difusão de oxigênio no solo, prejudicando o crescimento das culturas. A porosidade de aeração relaciona o volume de sólidos e de ar do solo, sendo afetada pelo conteúdo de água e pela compactação do solo (HILLEL, 1998). Seu valor mínimo para o desenvolvimento das plantas, segundo Klein e

Libardi (2002), é de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, pois, quando abaixo desse valor, ocorrerá redução na difusão do oxigênio no solo. Portanto, qualquer fator que afete a densidade do solo, afetará, conseqüentemente, o espaço poroso (BRADY; WEIL, 2013).

A capacidade do solo em reter e disponibilizar água é representado pela curva característica de retenção de água no solo (CCRAS). A CCRAS mede a relação entre a água no solo e a tensão na qual ela está retida, sendo elaborada determinando-se o conteúdo de água presente no solo em diferentes tensões (ABREU *et al.*, 2004; JORGE; CORÁ; BARBOSA, 2010). A composição granulométrica, a estrutura e a DTP determinam a relação entre o teor de água no solo e o potencial mátrico (BEUTLER; CENTURION, 2004).

Segundo Reichardt (1990), a diferença entre a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP) caracteriza a quantidade de água disponível para as plantas. Em termos de energia de retenção de água no solo, a CC, definida como o limite superior da disponibilidade de água no solo, em virtude do equilíbrio entre a percolação da água e a força de retenção desta pelo solo, apresenta dois valores de potenciais: -10 kPa, para os solos arenosos; e -33,3 kPa, para os argilosos. Por outro lado, o PMP é definido quando as plantas não conseguem mais extrair água dos poros do solo e suas folhas atingem, pela primeira vez, um murchamento irreversível, condições estas que ocorrem quando o potencial é -1500 kPa.

A disponibilidade de água no solo sofre e exerce influência conforme o manejo e a finalidade para o qual é empregado. Em manejos de irrigação, por exemplo, a capacidade de armazenagem de água no solo é ponto decisivo para o tipo de manejo que será adotado e a CCRAS assegura uma maior eficiência na estimativa da lâmina de água para a sua reposição ao solo, e conseqüente manutenção das culturas (SOUZA *et al.*, 2013).

O movimento de água no solo representa um dos fatores fundamentais para o ciclo hidrológico e crescimento vegetal. A vegetação presente e as práticas de uso e manejo desenvolvidas no solo afetam suas características hidráulicas que refletem no balanço hídrico. Alterações no uso do solo geram conseqüências na disponibilidade de água, na recarga do nível freático, na existência de escoamento superficial e erosão; devido, sobretudo, aos diversos efeitos na estrutura do solo que modificam a distribuição do tamanho de poros (DTP).

O fluxo de água é determinado pela condutividade hidráulica, por meio da qual é possível entender a facilidade com que o mesmo ocorre através dos poros do solo, sendo este fluxo proporcional ao gradiente hidráulico (GONÇALVES; LIBARDI, 2013). A equação de Darcy descreve o movimento de água no solo, representando a quantidade que passa por unidade de tempo e de área, em função da existência e da grandeza do gradiente de potencial total e tendo a condutividade hidráulica como parâmetro de proporcionalidade. Quando o solo

se encontra saturado, passa a ser caracterizado como condutividade hidráulica saturada - Ksat (REICHARDT, 1990; CARVALHO, 2002).

De acordo com Hillel (1998), a Ksat envolve a geometria e continuidade dos poros preenchidos por água, o que a torna dependente da forma, da quantidade, da distribuição e continuidade dos mesmos, e varia conforme o tipo de solo existente. Dessa forma, caracteriza-se como um dos atributos físico-hídricos fundamental para o estudo de movimento de água e solutos no solo, pela capacidade de gerar informações sobre a estrutura do solo.

A Ksat é influenciada pela morfologia, orientação e tamanho dos sistemas radiculares vegetais (MESQUITA; MORAES, 2004). É dependente em maior grau da estrutura, densidade do solo, porosidade total, principalmente macro, meso e microporosidade, ou seja, de propriedades físicas que influenciam diretamente a distribuição dos poros e permeabilidade do solo (PREVEDELLO, 2012). A macroporosidade representa os principais condutores de água no solo saturado e, portanto, segundo Mesquita e Moraes (2004), os maiores valores de Ksat são encontrados onde há os maiores valores de macroporosidade, mostrando a correlação direta e positiva existente entre Ksat e macroporosidade.

Para a determinação da Ksat, existem diversos métodos em campo e laboratório. Cada método possui suas particularidades: os de campo, podem apresentar variações devido à sua aplicação em condições naturais, onde ocorre fluxo horizontal e vertical; enquanto os de laboratório, podem representar maior facilidade e rapidez, proporcionando apenas fluxos verticais (MESQUITA; MORAES, 2004).

3.2. Efeitos do uso e manejo do solo da Caatinga nos atributos físicos-hídricos

O manejo da Caatinga dá-se, principalmente, para geração de fontes de alimentos e de preservação dos sistemas, levando-se em consideração a utilização racional dos fatores de produção. Assim, é necessário a adoção de práticas com diversidade de cultivo e preparo mínimo do solo, visando a manutenção e/ou melhoria da capacidade produtiva do solo e, por conseguinte, evitar processos que possam levar à degradação do atributos do solo (GONDIM *et al.*, 2015).

Um dos atributos considerados mais importantes do ponto de vista agrícola é a estrutura do solo (CORRÊA, 2002); portanto, todos os elementos ligados à ela precisam ser obtidos e cuidadosamente analisados, por ter relação com a agregação, que se relaciona com os movimentos de água, ar, calor e o crescimento das raízes. Em virtude disso, o uso, o manejo, o

nível e o tempo de utilização de uma área provocam inúmeras alterações nos atributos do solo (WENDLING *et al.*, 2005).

Nesse contexto, vale a realização prévia de uma avaliação da capacidade de uso do solo, sobretudo naqueles com baixas aptidões para o cultivo, pois manejos inadequados levam à sua degradação, principalmente se estes forem frágeis para emprego em processos produtivos, a exemplo de solos arenosos (SALES *et al.*, 2010; MOTA; VALLADARES, 2011). Para tanto, torna-se de grande importância o detalhamento das fragilidades e potencialidades das áreas a serem cultivadas, para melhor planejar a destinação e minimizar os impactos (CORRÊA *et al.*, 2010), principalmente os resultantes entre o manejo agrícola e as características do ambiente (CORRÊA *et al.*, 2010; MOTA; VALLADARES, 2011; URSULINO; MORENO, 2014).

Após o processo produtivo, é possível observar as modificações dos atributos do solo e comparar os diferentes usos aplicados num determinado solo; e a partir desses, pode-se avaliar a sustentabilidade, os sistemas produtivos, para adaptar sistemas e/ou propor outros mais sustentáveis (CORRÊA *et al.*, 2010). Assim, o entendimento das alterações decorrentes dos usos do solo são relevantes quando se fala em maximização da produção e prevenção da degradação e conservação dos solos.

Diante disso, o que se tem observado é o uso inadequado do solo com sistemas convencionais, o que tem gerado degradação dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo (IWATA *et al.*, 2012). A exemplo desses efeitos, têm-se: a desestruturação e a compactação, a redução da fertilidade, diminuição de indivíduos e da diversidade dos organismos do solo, bem como a oxidação acelerada da matéria orgânica (LEITE *et al.*, 2010).

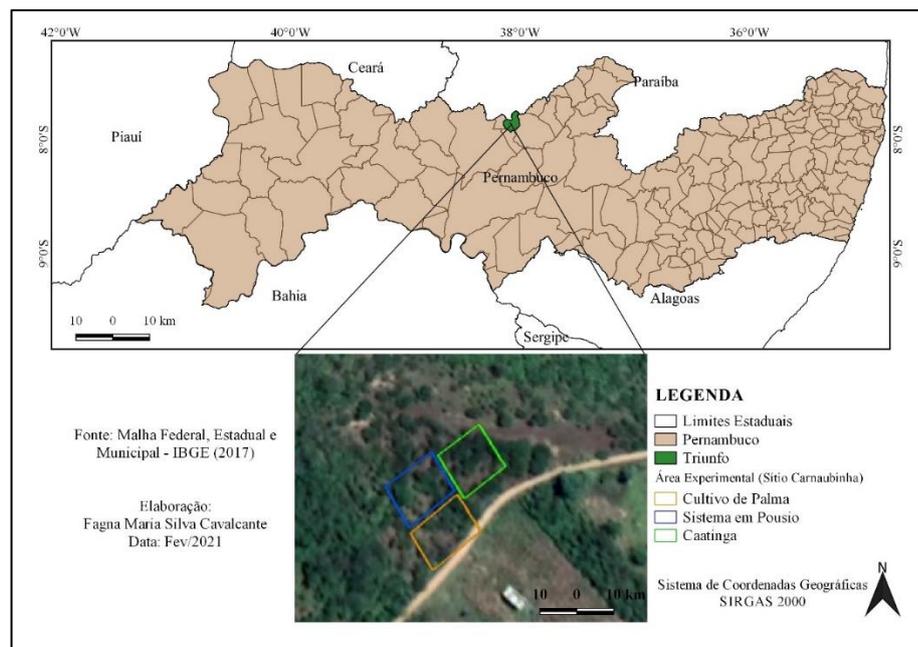
O bioma Caatinga naturalmente possui fatores ambientais desfavoráveis de escassez hídrica, elevadas temperaturas e evapotranspiração, por exemplo, e, quando não respeitados seus limites produtivos, ao adotar-se práticas de manejo aos seus recursos naturais (solo, vegetação), contribui ainda mais para o avanço da degradação, especialmente, onde esta é acentuada, como é o caso da região Semiárida brasileira (REBOUÇAS *et al.*, 2013). Portanto, faz-se necessário alternativas viáveis para um melhor desenvolvimento agrícola dessas áreas e conservação dos seus recursos naturais.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Área de estudo

O estudo foi conduzido em área rural, conhecida como Sítio Carnaubinha ($7^{\circ}53'39''\text{S}$ e $38^{\circ}03'38''\text{W}$), situada geograficamente no Município de Triunfo, Pernambuco ($7^{\circ}50'07''\text{S}$ e $38^{\circ}06'07''\text{W}$), mesorregião Sertão Pernambucano, microrregião do Pajeú (Figura 1).

Figura 1 – Localização da área de estudo



Fonte: Cavalcante, F. M. S. (2020).

O clima regional predominante em Triunfo é do tipo As, definido como Clima Tropical chuvoso, com estação mais seca no verão e chuvosa se adiantando para o outono, conforme a classificação de Köppen-Geiger (1936); isso por estar a 1.034 m de altitude, contradizendo com a aridez do sertão. A temperatura média anual é de $20,4^{\circ}\text{C}$, com precipitação média anual de 1.230 mm, e vegetação predominante é a Caatinga, tipo floresta subcaducifólia (possui dupla estacionalidade climática: uma tropical, com época de intensas chuvas de verão seguidas por estiagens acentuadas; e outra subtropical, sem período seco, mas com seca fisiológica provocada pelo intenso frio de inverno, com temperaturas médias inferiores a 15°C) (SOUZA *et al.*, 2010). O solo da região é classificado como Cambissolo háplico, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBICS (EMBRAPA, 2018).

Os tratamentos consistiram em: T1 = sistema com cultivo de palma; T2 = sistema em pousio (herbáceas); e T3 = Caatinga com 10 anos de preservação. Os sistemas sob palma e em pousio, inicialmente eram áreas de Caatinga, que foram queimadas e desbastadas para uso agrícola. A Caatinga preservada consistiu em área de uso agrícola, cessada de utilização antrópica há 10 anos, que, desde então, tem ocorrido o processo de recuperação naturalmente.

4.2. Amostragem dos solos

A investigação nas áreas estudadas realizou-se na camada superficial, na qual coletaram-se amostras deformadas e indeformadas, destinadas aos ensaios físico-hídricos do solo, realizados no Laboratório de Física do Solo do Departamento de Agronomia da UFRPE. A profundidade de coleta foi determinada levando em consideração a camada mais afetada pela mudança de vegetação, sendo definida como sendo de 0-20 cm.

As amostras de solo deformadas (Figura 2) foram coletadas para a determinação dos atributos que não dependem da manutenção da estrutura (granulometria, fator f), três repetições para compor uma amostra composta em cada área, sendo, para isto, utilizado um trado específico do tipo holandês. Após a coleta, as amostras foram acondicionadas em sacos plásticos, devidamente identificadas, e levadas ao laboratório, onde foram secas ao ar, destorroadas e, em seguida, tamisadas na peneira com malha de 2 mm de abertura, para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA).

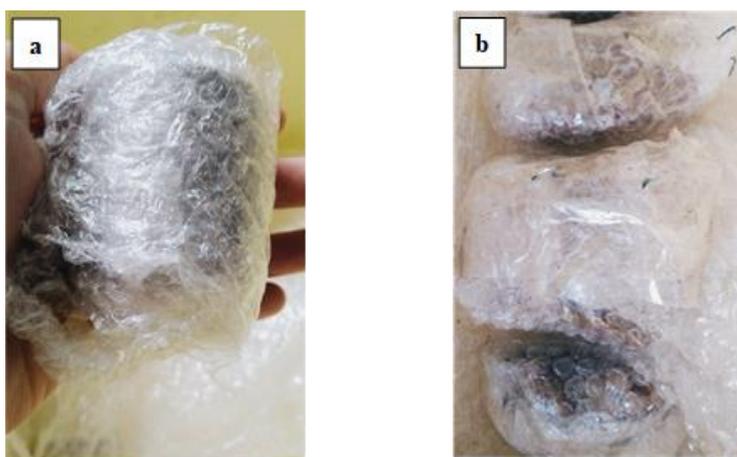
Figura 2 – Amostras de solo deformadas



Fonte: Arquivo pessoal Fagna M. S. Cavalcante.

As amostras estruturadas foram coletadas em anéis volumétricos ($\cong 100 \text{ cm}^3$), de aço inoxidável, com dimensões aproximadamente de $5 \times 5 \text{ cm}$ (altura e diâmetro), sendo sua inserção no solo obtida com auxílio de amostrador tipo Uhland. Foram coletados 48 amostras distribuídas em três repetições para cada área ($16 \text{ amostras} \times 3 \text{ repetições}$). Após a coleta, os conjuntos anel-amostra foram envoltos em filme plástico, plástico bolha e cuidadosamente acomodados em caixa de isopor, de modo a evitar perturbações na sua estrutura durante o transporte ao laboratório (Figura 3a).

Figura 3 – Amostras de solo estruturadas: (a) anel volumétrico; (b) em forma de torrões



Fonte: Arquivo pessoal Fagna M. S. Cavalcante.

Os ensaios físico-hídricos realizados nas amostras coletadas em anéis volumétricos foram: condutividade hidráulica saturada (K_{sat}); distribuição de tamanho de poros do solo - DTP (macro, meso, micro e criptoporos), e por último, a densidade do solo (D_s).

Simultaneamente, foram coletadas amostras também estruturadas, mas em forma de torrões, com volume aproximado de 250 cm^3 , destinados aos ensaios de estabilidade de agregados por via úmida. As amostras foram embaladas em plástico filme e plástico bolha (Figura 3b), e também transportadas em caixas de isopor, buscando-se evitar perturbações na estrutura, durante seu transporte para o laboratório.

4.3. Análise granulométrica e grau de floculação do solo

Os ensaios para a determinação da granulometria dos solos estudados, bem como os índices calculados a partir dos dados de areia, silte e argila, foram realizados pelo método do densímetro, modificado conforme descrito em Almeida (2008), cujo princípio se baseia na dispersão da fração argila do solo e sedimentação das demais partículas sólidas (areia e silte).

Neste método, 50 g de TFSA, sob ação de 0,25 mL de dispersante (calgon = hexametáfosfato de sódio + carbonato de sódio) e 250 mL de água, são submetidas à agitação, no agitador tipo Wagner por 16 horas (Figura 4a), seguidamente transferidas para a proveta de 1 L, até o volume de 0,94 L, pois o volume final (1L) será alcançado com a inserção do densímetro (Figura 4b). A suspensão é agitada manualmente com haste, seguida do repouso por 24 h. Após esse tempo, realiza-se as leituras do material em suspensão, utilizando o densímetro de Bouyoucos (Figura 4c), para determinar a argila totalmente dispersa (ATD), procedimento de leitura, também realizado na amostra branco (apenas com dispersante).

Figura 4 – Ensaio para determinação das frações granulométricas do solo: (a) agitador mecânico tipo Wagner; (b) material em repouso; (c) leitura da suspensão via densímetro



Fonte: Arquivo pessoal Fagna M. S. Cavalcante.

Na sequência, todo conteúdo da proveta foi passado através de peneira (malha 53 μm) e o material retido (areia total) lavado em água corrente e seco em estufa (105°C, 24 h). De posse dos resultados de areia e argila, o teor de silte foi calculado por diferença, por meio da equação (1).

$$\text{Silte}_{(\%)} = 100 - (\% \text{ areia total} + \% \text{ argila totalmente dispersa}) \quad (1)$$

A fração areia total foi separada em duas classes, utilizando-se uma peneira com malha de 0,212 mm, levando em conta o diâmetro equivalente das partículas (\varnothing_{eq}). A porção que ficou retida na peneira foi classificada como areia grossa [$0,212 < \varnothing_{\text{eq. (mm)}} < 2,000$] e a restante como areia fina [$0,053 < \varnothing_{\text{eq. (mm)}} < 0,212$].

Para a determinação da argila dispersa em água (ADA), repetiu-se os mesmos procedimentos descritos para a obtenção da ATD, excluindo a adição do Calgon. Com os resultados de ATD e ADA, calculou-se o grau de floculação (GF), utilizando-se a equação (2).

$$GF_{(\%)} = \left(\frac{ATD - ADA}{ATD} \right) \times 100 \quad (2)$$

4.4. Condutividade hidráulica saturada

Os ensaios para a determinação da condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) dos solos foram realizados em laboratório utilizando-se dois métodos: carga constante e carga decrescente, conforme sugerido por Reynolds e Elrick (2002); porém, empregando um permeâmetro que pode alternar a aplicação entre as cargas, sem a necessidade de movimentação da amostra. Assim, o equipamento utilizado nos ensaios foi um permeâmetro alternativo aos tradicionais, desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa do Laboratório de Física de Solos da UFRPE. O protótipo teve seu pedido de patente depositado junto ao Núcleo de Inovação Tecnológica (NIT) da UFRPE, sob o título “Permeâmetro contínuo de carga constante e decrescente para determinação de condutividade hidráulica em meios porosos” (ALMEIDA *et al.*, 2020).

O referido protótipo foi validado e, desde então, tem sido usado no citado laboratório para os ensaios de determinação da K_{sat} , tanto pelo método do permeâmetro de carga constante (PCC), como para o decrescente (PCD), como verificado em Santos (2020) e Barros (2020).

Para atender aos objetivos da pesquisa, foram aplicadas diferentes cargas hidráulicas, variando-se tanto a altura da coluna de água, como o modo de aplicação (constante ou decrescente), sendo a K_{sat} calculada com base na equação de Darcy, cujos detalhes dos ensaios são descritos a seguir.

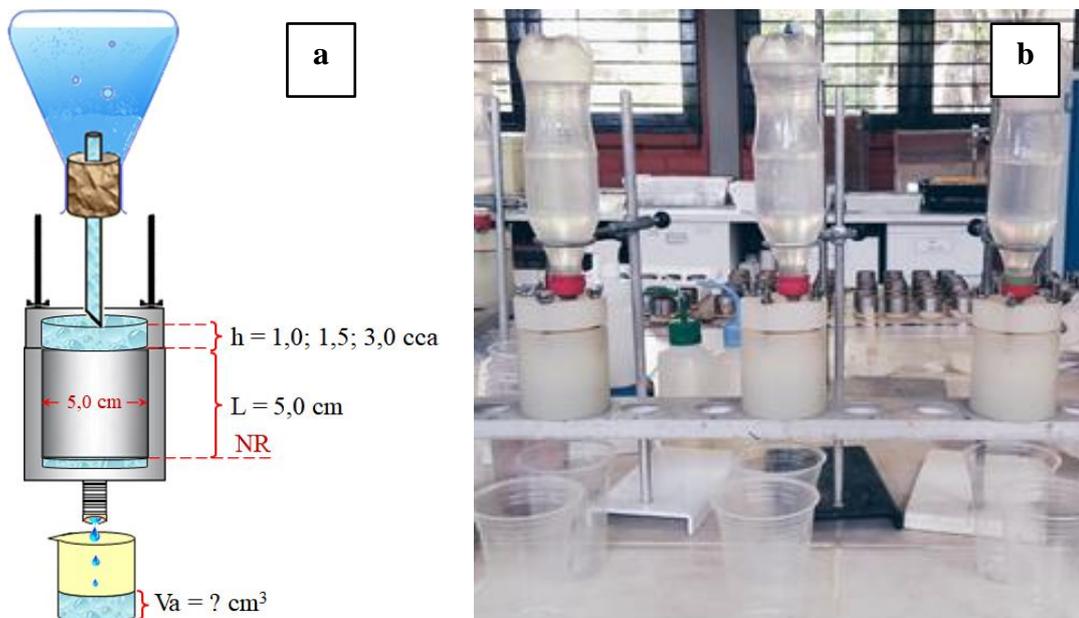
4.4.1. Permeâmetro de carga constante

Para os ensaios com o permeâmetro de carga constante - PCC (Figura 5), as amostras foram submetidas à diferentes cargas hidráulicas ($h = 1,0; 1,5$ e $3,0$ cm), mantidas constante pelo uso do frasco de Mariotte. Com os dados gerados a partir do equilíbrio do volume percolado, pode-se calcular a K_{sat} , neste caso, a partir da equação (3).

$$K_{sat} = \frac{V_a}{A t} \times \frac{L}{L+h} \quad (3)$$

onde: K_{sat} é a condutividade hidráulica saturada (cm h^{-1}); V_a é o volume do fluido percolado ao longo dos poros (cm^3), ou seja, o valor da última leitura quando não houver variação entre os valores anteriores, ou a média das duas últimas leituras, quando houver alguma variação ao longo do ensaio; L é a altura do solo contido no anel volumétrico (cm); h é a carga hidráulica aplicada (cm), assumindo-se os valores de 1,0; 1,5 e 3,0 cm ; A é a área da seção transversal do solo, aqui assumida como área da seção transversal do anel ($\pi \times r^2$), em cm^2 e; t é o tempo referente ao volume do fluido percolado ao longo da seção transversal do solo (em horas).

Figura 5 – Desenho esquemático do permeâmetro de carga constante utilizado nos ensaios para a determinação da condutividade hidráulica saturada, destacando-se as cargas hidráulicas aplicadas (a); e fotos ilustrando os procedimentos dos ensaios em laboratório (b)

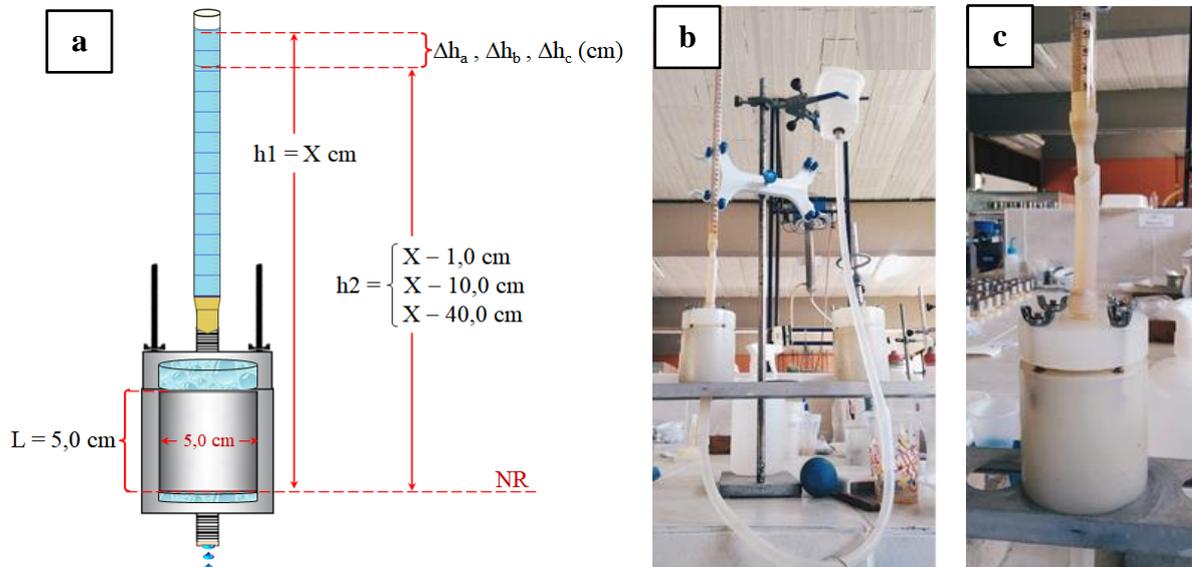


Fonte: Arquivo pessoal Brivaldo Gomes de Almeida (a) e Fagna M. S. Cavalcante (b)

4.4.2. Permeâmetro de carga decrescente

Para os ensaios de determinação da K_{sat} pelo permeâmetro de carga decrescente (PCD), as cargas hidráulicas foram alteradas de modo que o Δh (diferença entre h_1 - carga inicial e h_2 - carga final) tivesse valores iguais a: $\Delta h_a = 1 \text{ cm}$; $\Delta h_b = 10 \text{ cm}$ e $\Delta h_c = 40 \text{ cm}$, tendo-se como nível de referência (NR) a base do corpo de prova (Figura 6a). Os dados para a aplicação da carga inicial e carga final estão dispostos na Tabela 1.

Figura 6 – Desenho esquemático do permeômetro de carga decrescente utilizado nos ensaios para a determinação da condutividade hidráulica saturada, destacando-se as cargas hidráulicas aplicadas, decrescentemente (a); e fotos em laboratório durante os ensaios (b) e (c)



Fonte: Arquivo pessoal Brivaldo Gomes de Almeida (a) e Fagna M. S. Cavalcante (b e c)

Tabela 1 – Valores de h_1 e h_2 referentes aos limites aplicados para os diferentes Δh utilizados nos ensaios para a determinação da condutividade hidráulica saturada dos solos

Limite	Carga Hidráulica	Diferença entre Carga Hidráulica		
		Δh_a (1 cm)	Δh_b (10 cm)	Δh_c (40 cm)
		cm		
Palma	h_1	70	70	70
	h_2	69	60	30
Pousio	h_1	67	67	67
	h_2	66	57	29
Caatinga	h_1	66,5	66,5	66,5
	h_2	65,5	56,5	26,5

Fonte: Fagna M. S. Cavalcante

Estes procedimentos permitirão avaliar os efeitos que diferentes cargas hidráulicas (potenciais de pressão), aplicadas decrescentemente durante os ensaios, promovem na dinâmica da água dos solos. Desse modo, a K_{sat} foi calculada utilizando-se a equação (4).

$$K_{sat} = \frac{aL}{A \Delta t} \times \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \quad (4)$$

em que: K_{sat} é a condutividade hidráulica saturada (cm h^{-1}); a é a área da seção transversal do tubo graduado (pipeta ou bureta), na qual serão medidos os potenciais inicial e final (cm^2); A é

a área da seção transversal da amostra do solo (cm^2); L é a altura da amostra de solo (cm); h_1 e h_2 são os potenciais de pressão inicial e final, respectivamente (cm); Δt é o intervalo de tempo (h) para que o nível da água no tubo graduado (menisco) passe entre h_1 e h_2 .

Os ensaios utilizando os conjuntos anel-amostra seguem uma sequência lógica que permite, no mesmo conjunto, obter dados a serem usados nos cálculos de alguns atributos físico-hídricos do solo. Assim, para o melhor aproveitamento é sugerido na literatura a seguinte ordem de ensaios: K_{sat} ; porosidade total; distribuição de tamanho de poros do solo; resistência do solo a penetração de raízes e, por fim, a densidade do solo.

Nesta pesquisa, esta sequência foi mantida, e os ensaios após obtenção dos dados para a K_{sat} são comentados a seguir.

4.5. Porosidade total do solo

A porosidade total do solo foi determinada pelo método de saturação, conforme Almeida *et al.* (2017a), no qual o solo contido em anel volumétrico é saturado, pesado e seco em estufa a 105°C , até atingir o peso constante, utilizando-se nos cálculos a equação (5).

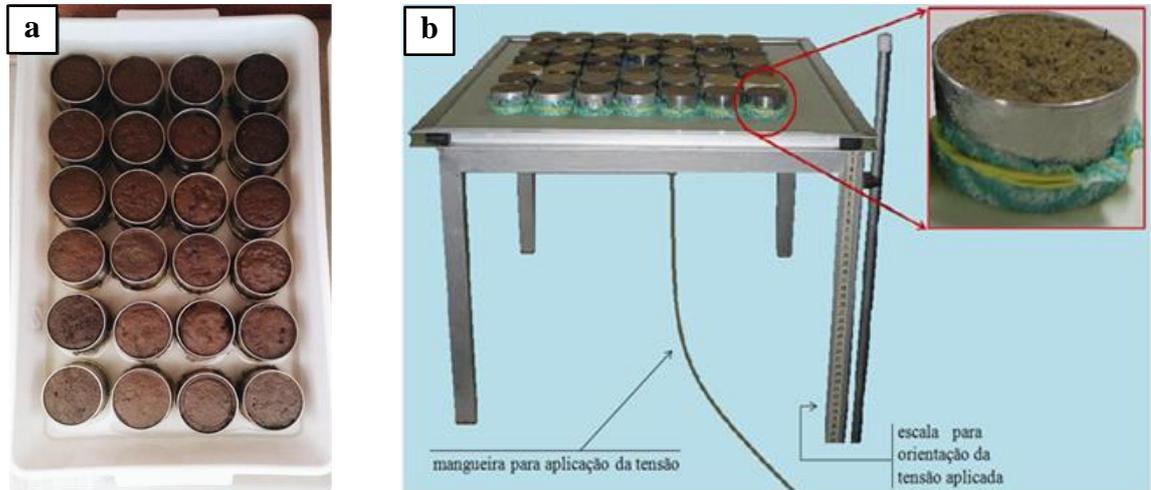
$$PT = \frac{V_{\text{poros}}}{V_{\text{solo}}} \quad (5)$$

onde: PT é a porosidade total do solo ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); V_{poros} é o volume de poros do solo (cm^3), assumido como sendo o volume de água obtido pela diferença entre o massa do conjunto anel-amostra saturado e após seco a 105°C (operação realizada só no final dos ensaios para a determinação da densidade do solo), convertidos em volume pela densidade da água; V_{solo} é o volume de solo, aqui assumido como o volume do anel ($\pi \times r^2 \times h$), expresso em cm^3 .

4.6. Distribuição de tamanho de poros do solo por classes de diâmetros equivalentes

Nos ensaios para determinação da distribuição de tamanho de poros do solo (DTP), os conjuntos anel-amostra foram re-saturados (Figura 7a), e posteriormente cada conjunto foi disposto na mesa de tensão e efetuada a aplicação das tensões: 1, 6 e 10 kPa (Figura 7b), onde a cada equilíbrio obtido, os conjuntos eram pesados e retornados à mesa, até se atingir o equilíbrio a 10 kPa.

Figura 7 – Determinação da distribuição do tamanho dos poros (DTP): (a) saturação das amostras; (b) mesa de tensão utilizada para aplicar aos conjuntos anel-amostra as tensões referentes aos potenciais de 1, 6 e 10 kPa, com detalhe, à direita, do contato hidráulico entre a amostra e a superfície da “camada de papel-caulim”



Fonte: Arquivo pessoal Fagna M. S. Cavalcante (a) e Brivaldo Gomes de Almeida (b)

Desse modo, foi possível determinar a DTP por classes de diâmetros equivalentes (\varnothing_{eq}), sendo obtidas as classes a partir da faixa de tensão selecionada, utilizada na equação universal de capilaridade, que foi rearranjada em função do \varnothing_{eq} , resultando na equação (6).

$$\varnothing_{eq} \text{ (m)} = \left(\frac{1,5 \times 10^{-5}}{\Psi \text{ (mca)}} \right) \times 2 \quad (6)$$

em que: \varnothing_{eq} é o diâmetro equivalente do poro (m); Ψ é a tensão aplicada e equilibrado, aqui assumido como a tensão equilibrada, em metros de coluna de água – mca.

As classes de poros por \varnothing_{eq} para a composição da DTP foram definidas utilizando-se faixas de tensão, definidas conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Distribuição do tamanho de poros dos solos estudados, obtida via mesa de tensão, na faixa de umidade de 0-10 cca, 10-60 cca e 60-100 cca

Faixa de tensão aplicada	Diâmetros equivalentes
cca	µm
0 a 10	> 300
10 a 60	300-50
60 a 100	50-30
100	< 30

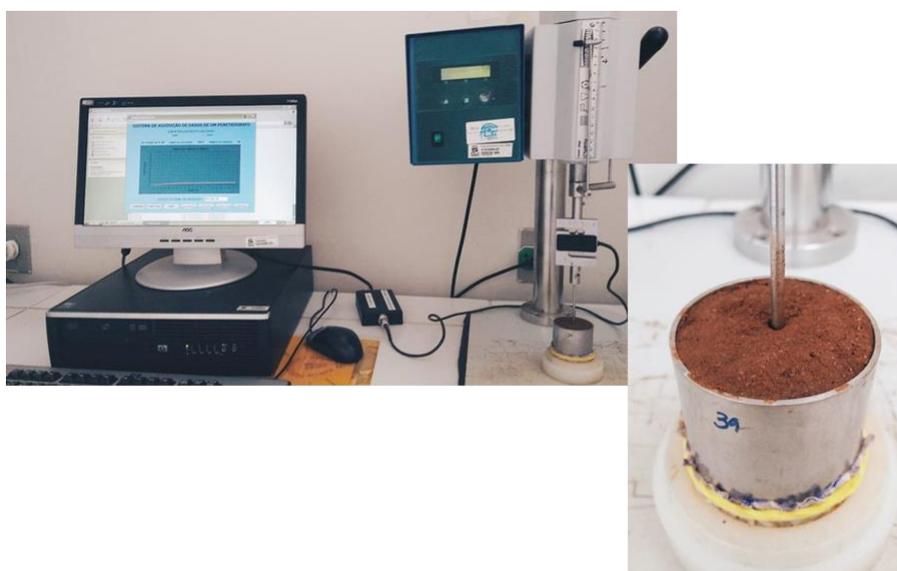
Fonte: Fagna M. S. Cavalcante

4.7. Resistência do solo à penetração de raízes

Os ensaios para a determinação da resistência do solo à penetração de raízes (RP) foram realizados em um grupo de conjunto anel-amostra equilibrados na tensão de 10 kPa. Após o equilíbrio, cada conjunto foi pesado (para obtenção da umidade na tensão de 10 kPa) e imediatamente acomodado na base do penetrômetro, tendo-se o início do processo de penetração na amostra.

Para tanto, foi empregado um penetrômetro eletrônico de bancada (Figura 8). Neste, a simulação da penetração das raízes é feita por uma agulha com 4 mm de espessura, ângulo de 30°, que é inserida na amostra a uma velocidade de 0,03 mm s⁻¹. A agulha é acoplada ao equipamento por meio de conexão com uma célula de carga, que registra a força exigida para penetração da agulha. O aparelho é conectado a um computador, onde um software específico registra a leitura da célula de carga (kgf), e converte os dados, gerando o resultado da RP em unidades de MPa. Considerando que os conjuntos anel-amostra têm altura de aproximadamente 5 cm, os resultados da RP foram calculados pela média dos valores obtidos entre os três centímetros centrais do corpo de prova, definindo o primeiro e último centímetro da amostra como bordadura. Assim, não foram utilizados os dados obtidos entre 0 e 1 cm (que são descartados), nem aqueles entre 4 e 5 cm, pois o ensaio é finalizado, automaticamente, quando a agulha alcança os 4 cm da amostra.

Figura 8 – Penetrômetro eletrônico de bancada utilizado nos ensaios para a determinação da resistência do solo a penetração de raízes



Fonte: Arquivo pessoal Fagna M. S. Cavalcante

4.8. Densidade do solo

Finalizados os ensaios para obtenção da RP, os conjuntos anel-amostra foram transferidos para a estufa e secos a 105°C, até massa constante. Na sequência, a densidade do solo foi determinada pelo método do cilindro volumétrico, conforme Almeida *et al.* (2017b), onde, de posse da massa do solo seco a 105 °C, os cálculos foram realizados via equação (7).

$$D_s = \frac{M_{\text{sólidos}}}{V_{\text{solo}}} \quad (7)$$

onde: D_s é a densidade do solo (g cm^{-3}); $M_{\text{sólidos}}$ é a massa de sólidos obtida pela diferença entre o peso do conjunto anel-sólidos seco a 105°C e o peso do anel (g); V_{solo} é o volume de solo, aqui assumido como o volume do anel ($\pi \times r^2 \times h$), expresso em cm^3 .

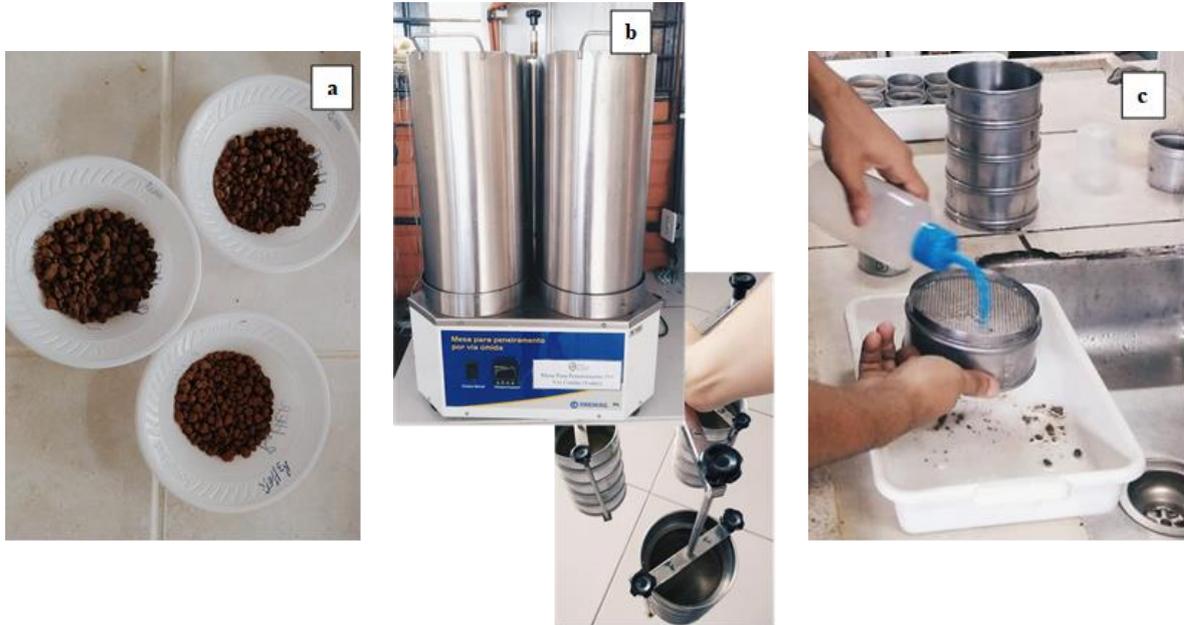
4.9. Estabilidade de agregados

A distribuição de tamanho dos agregados do solo por via úmida foi realizada seguindo-se a metodologia sugerida por Nimmo e Perkins (2002), utilizando-se um equipamento do tipo Yoder. As amostras de solos para os ensaios foram obtidas a partir da separação das superfícies de fraqueza dos agregados, promovida pela sua tamisação a seco, passando-os em peneira com abertura de malha com 7,1 mm, sendo retidos na peneira de 4,76 mm. A metodologia original foi adaptada, e os procedimentos adotados são descritos a seguir.

A porção de agregados (25 g) foi colocada em papel filtro e pré-umedecida por capilaridade, aplicando-se álcool etílico (96°), por 10 minutos (Figura 7a). Em seguida, a porção foi transferida para o topo de um conjunto de cinco peneiras (abertura de malhas: 2,00; 1,00; 0,50; 0,25 e 0,125 mm), acopladas entre si, sendo imerso em tanques cilíndricos contendo água (Figura 7b), iniciando-se o procedimento de peneiramento úmido no oscilador vertical, com 26 oscilações por minuto, durante 15 minutos. As massas obtidas em cada peneira foram postas em latas de alumínio (Figura 7c) e conduzidas à estufa (105°C, por 24h). Simultaneamente, determinou-se o fator de correção de umidade dos agregados, por meio de uma subamostra (25 g), convertendo sua massa inicial (seca ao ar) para seca em estufa a 105°C.

O cálculo para a distribuição dos agregados por classe de diâmetro foi realizado de modo a refletir o diâmetro médio ponderado (DMP) e diâmetro médio geométrico (DMG), utilizando-se, respectivamente, as equações (8) e (9).

Figura 9 - Ensaio para obtenção dos parâmetros da estabilidade de agregados do solo: (a) agregados obtidos por tamisação a seco; (b) equipamento tipo Yoder; (c) retirada dos agregados retidos nas respectivas peneiras após peneiramento por via úmida, e posterior transferência para as latas de alumínio



Fonte: Arquivo pessoal Fagna M. S. Cavalcante

$$DMP = \sum_{i=1}^n (X_i \times W_i) \quad (8)$$

$$DMG = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n n \cdot \log X_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \right] \quad (9)$$

em que: DMP é o diâmetro médio ponderado (mm); X_i é o diâmetro médio das classes (mm); W_i é a proporção de cada classe em relação ao total; DMG é o diâmetro médio geométrico (mm); $\log X_i$ é o log natural do diâmetro médio das classes; n é a porcentagem de agregados estáveis em cada classe.

Além do DMP e DMG foi possível também calcular o índice de estabilidade de agregados (IEA) e o percentual dos agregados > 2 mm estáveis em água (AGRI), por meio das equações (10) e (11), respectivamente.

$$IEA = \left(\frac{\text{Peso da amostra seca} - W_{p\ 0,125}}{\text{Peso da amostra seca}} \right) \times 100 \quad (10)$$

$$AGRI = (W_u > 2) \times 100 \quad (11)$$

em que: AGRI = agregado > 2mm estáveis em água (%); $W_p 0,125$ = peso dos agregados da classe < 0,125 mm (g); $W_u > 2$, é a proporção de agregados da classe > que 2 mm.

As proporções de macroagregados (MacroA) e microagregados (MicroA) foram obtidas somando-se a percentagem de agregados retidos nas classes acima e abaixo de 250 μm , respectivamente (TISDALL; OADES, 1982). Os resultados dos DMP e DMG foram usados para o cálculo do índice de sensibilidade (IS) sugerido por Bolinder *et al.* (1999), que utilizaram o princípio de comparação relativa entre os tratamentos e a área padrão, conforme equação (12).

$$IS = \frac{As}{Ac} \quad (12)$$

em que: As , é o valor do DMP (ou DMG) para o solo sob manejo de palma e em pousio; Ac , valor do DMP (ou DMG) do solo da área padrão (controle), neste caso, a área sob Caatinga preservada.

4.10. Índice de Qualidade do solo

Na determinação do índice de qualidade do solo (IQS), os atributos investigados são utilizados como indicadores da qualidade do solo, pois é importante a definição das funções que esses atributos exercem no solo, do ponto de vista ambiental ou agrícola. Para a análise dos parâmetros e obtenção do IQS utilizou-se a metodologia proposta por Cavalcante *et al.* (2021), onde um conjunto mínimo de dados é selecionado por meio de uma série de métodos estatísticos uni e multivariados, cujos procedimentos são descritos a seguir.

De início, foram selecionados os atributos físicos do solo: K_{sat} , PT, classes de tamanho de poros (> 300 μm ; 300-50 μm ; 50-30 μm ; < 30 μm), RP, D_s , DMP, DMG, AGRI, IEA, MacroA, MicroA. Os dados foram submetidos ao teste de hipótese de normalidade Lilliefors ($p < 0,10$), posteriormente, selecionando-se apenas as que apresentaram distribuição normal entre os tratamentos avaliados. Em seguida, aplicou-se o teste de multicolinearidade pelo método de análise de trilhas (CRUZ; CARNEIRO, 2006), eliminando as variáveis altamente correlacionadas, para identificar a presença ou ausência de dependências entre as variáveis. O método do fator de inflação da variância (FIV) foi utilizado para o diagnóstico da multicolinearidade por meio de software estatístico, sendo esta considerada quando os valores de FIV foram maiores que 10 (HAIR *et al.*, 2009). A análise de componentes principais (ACP) foi usada para selecionar indicadores apropriados e como método para extrair fatores de ponderação (KARLEN; STOTT, 1994; BREJDA *et al.*, 2000; MUKHOPADHYAY *et al.*,

2016). A partir daí, para a interpretação, foram utilizados apenas os parâmetros que apresentaram autovalores $\geq 1,0$ em pelo menos 5% da variação dos dados (BREJDA *et al.*, 2000; SHARMA *et al.*, 2005; MUKHOPADHYAY *et al.*, 2016), uma vez que um único atributo não seria capaz de explicar a variação total dos dados em análise. Após esta etapa, as variáveis foram sujeitadas a rotação varimax, para maximizar a relação entre os atributos dependentes, o que facilita a interpretação (MINGOTI, 2007); e em cada componente principal, somente as variáveis com altas cargas fatoriais foram retidas, ou seja, as que apresentaram valores absolutos dentro de 10% da maior carga fatorial (ANDREWS *et al.*, 2002). As cargas fatoriais rotacionadas dos atributos selecionados foram utilizados no cálculo dos pesos relativos dos atributos no IQS, seguindo a equação (13), recomendada por Andrade *et al.* (2005).

$$W_i = \frac{F_1 P_{1i} + F_2 P_{2i}}{(\sum_{j=1}^n F_1 P_{1j}) + (\sum_{j=1}^n F_2 P_{2j})} \quad (13)$$

onde, W_i : peso relativo do atributo na i -ésima variável que compõe o IQS; F_{1i} e F_{2i} : autovalor das componentes principais; P_i : carga fatorial rotacionada do atributo na i -ésima variável; P_j : carga fatorial rotacionada do atributo na j -ésima variável; i e j : índices para as variáveis; n : número de variáveis envolvidas na ACP.

Após esta seleção de indicadores, realizou uma nova normalização por meio de uma padronização relativa a ser incluído no IQS, transformando-se em escores dos indicadores (S_i), que variam de 0 a 1, de acordo com Liebig *et al.* (2001) e Bhardwaj *et al.* (2011). Os indicadores foram então relacionados em ordem ascendente ou descendente, atribuindo o conceito de prejuízo ou benefício, respectivamente, às funções do solo.

Dentro dessa indicação, os resultados foram relacionados com “mais é melhor” e divididos pelo maior valor observado; ou “menos é melhor”, onde o menor valor (no numerador) foi dividido por cada dado observado (no denominador), de modo que ao maior e ao menor valor, nas respectivas situações, é dado o escore de 1,0. Aos valores fora desse padrão, em que nem mais, nem menos é melhor, foram atribuídos um valor limite sendo até este valor considerado “mais é melhor” até o valor limite e acima dele “menos é melhor” (LIEBIG *et al.*, 2001). Desse modo, o IQS foi determinado pela equação (14).

$$IQS = \sum_{i=1}^n (W_i \times S_i) \quad (14)$$

onde, IQS: é um número entre 0 e 1; W_i : peso correspondente ao i -ésimo parâmetro, um número entre 0 e 1; e S_i é o escore do i -ésimo indicador, um número entre 0 e 1. No modelo, maiores índices indicam melhor qualidade do solo ou maior desempenho da função do solo.

4.11. Análise Estatística

Os dados obtidos ao longo dos ensaios foram submetidos à análise descritiva, onde foram calculados média, desvio padrão, erro padrão, e coeficiente de variação (CV) para todos os atributos. De acordo com a classificação proposta por Wilding e Drees (1983), os valores de CV de cada conjunto de dados foram classificados como baixo ($CV \leq 15\%$), moderado ($15 < CV\% \leq 35$); e alto ($CV > 35\%$).

Aplicou-se, ainda, análise de variância de classificação One-way ANOVA (análise de variância de classificação simples), e as médias comparadas pelo teste de Kruskal-Wallis, nos dados que não apresentaram distribuição normal, e Teste de Tukey, a $p < 0,05$. Assim, com os teste Kruskal-Wallis ($p < 0,05$) foram analisados os valores de granulometria e índice de sensibilidade para os parâmetros de agregados do solo.

Aos demais atributos (Ksat, PT, classes de distribuição do tamanho de poros, RP, Ds, índices para estabilidade de agregados), as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), bem como, análise de correlação de Pearson ($p < 0,01$; $p < 0,05$ e $p < 0,1$) e aplicação de técnicas multivariadas e componentes principais para a obtenção e análise do IQS. Em todas as etapas da análise estatística fez-se uso do software da Microsoft Excel XLSTAT, versão 2020.4.1.1016 (ADDINSOFT, 2020).

5. RESULTADOS

5.1. Atributos físico-hídricos do solo

Nos itens a seguir, estão descritos os resultados obtidos para os atributos físicos dos solos analisados, nos diferentes sistemas investigados na área de estudo. Mostra-se a quantificação das partículas areia, silte e argila, a Ksat pelo PCC e PCD com aplicação das diferentes cargas hidráulicas, os valores para os parâmetros da estabilidade de agregados do solo (DMP, DMG, AGRI, IEA, macroagregados - MacroA e microagregados - MicroA), a distribuição do tamanhos de agregados por classe de diâmetro equivalente, a porosidade total, a densidade do solo e os resultados para a simulação da resistência do solo à penetração de raízes; bem como a avaliação das relações entre os dados pela correlação de Pearson e os resultados da avaliação da qualidade do solo nos sistemas investigados, pelo IQS.

5.1.1. Distribuição das frações granulométrica do solo (Areia, Silte e Argila)

As informações acerca das frações granulométricas que compõe o solo é um importante recurso para entender como este se comporta, ao entrar em contato com a água via precipitação pluviométrica, por exemplo, permitindo verificar a permeabilidade, resistência à erosão, entre outros processos. Sendo assim, ao analisarmos os resultados referentes à granulometria dos solos avaliados, observamos que a Caatinga preservada, o valor de areia total (AT) é igual a 74,38% (Tabela 3), sendo superior aos outros sistemas de uso, e desse, 48,65% é de areia grossa (AG) e 51,35% de areia fina (AF). Porém, o sistema em pousio mostrou-se com quantidade de AG = 52,55% e o sob palma com AF = 53,60%, ou seja, resultados superiores ao sistema Caatinga preservada. Dessa forma, pelos números obtidos, o sistema pousio apresentou maior quantidade de AG e a área com palma foi superior em frações de AF.

Para o silte obteve-se maior percentual sob palma (19,03%), como, também, é observado para a argila totalmente dispersa - ATD (18,34%) e argila dispersa em água - ADA (15,63%), nesse mesmo sistema. Desse modo, os maiores teores de ATD e ADA foram encontrados sob o manejo de palma (18,34% e 15,63%, respectivamente) e os menores percentuais sob Caatinga preservada de 9,51% e 5,43%, nesta ordem.

Tabela 3 – Distribuição das frações granulométricas e classe textural do Cambissolo háplico sob diferentes sistemas de uso avaliados

Sistemas de uso	Distribuição das frações granulométricas do solo							Classe Textural
	Areia			Silte	Argila		GF ⁵	
	AT ¹	AG ²	AF ³		Total	ADA ⁴		
	%							
Palma	62,63	46,40	53,60	19,03	18,34	15,63	14,81	Franco-Arenoso
Pousio	70,60	52,55	47,45	15,14	14,27	8,15	42,86	
Caatinga Preservada	74,38	48,65	51,35	16,11	9,51	5,43	42,86	

¹AT – Areia Total; ²AG – Areia Grossa; ³AF – Areia Fina; ⁴ADA – Argila dispersa em água ou natural; ⁵GF – Grau de Floclulação.

Em relação à argila dispersa em água (ADA) e grau de floclulação (GF), observa-se que na área de Caatinga preservada e sob o sistema sob pousio, os valores de GF são iguais, ambos com 42,86%, e o sob palma, com grau bem inferior (14,81%). Quanto a classe textural, segundo método do triângulo textural da EMBRAPA, independentemente da área, os solos foram

classificados como franco-arenoso, indicando alto teor de areia, com frações de silte e argila semelhantes.

Os coeficientes de variação (CV) para as frações texturais da área sob palma, foram classificados como baixo ($CV \leq 15\%$), para a argila total, areia total e silte; e alto ($CV > 35\%$), para o GF. No sistema sob pousio e Caatinga preservada, em todas as partículas minerais avaliadas, obteve-se classificação baixa conforme referencial para o CV (Apêndice A).

5.1.2 Condutividade hidráulica saturada solo

Os resultados de condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) permitem o conhecimento da dinâmica da água nos poros do solo, sendo para este estudo, determinados em condições de laboratório, aplicando-se carga contante e decrescente.

Desse modo, analisando-se os resultados para K_{sat} , obtidos pelo método do permeâmetro de carga constante (PCC), entre os sistemas de uso, nota-se que, no sistema sob palma, independentemente da magnitude da carga hidráulica (CH) aplicada, foram observados os maiores valores (21,08; 17,97; e 17,07 mm h^{-1} , $p < 0,05$), para h igual a 1,0; 1,5 e 3,0 cca, respectivamente (Tabela 4). Os outros dois sistemas apresentaram valores semelhantes, não diferindo entre si ($p < 0,05$).

Tabela 4 – Valores médios da condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) dos solos referentes à aplicação de diferentes cargas hidráulicas (1,0; 1,5 e 3,0 cca) pelo método do permeâmetro de carga constante (PCC) em diferentes sistemas de manejo

Sistemas de uso	Carga hidráulica constante (cca)		
	1,0	1,5	3,0
	K_{sat} (mm h^{-1})		
Palma	21,08 Aa ($\pm 2,46$)	17,97 Aa ($\pm 1,64$)	17,07 Aa ($\pm 2,05$)
Pousio	6,09 Ba ($\pm 0,93$)	4,96 Bab ($\pm 0,57$)	2,80 Bb ($\pm 0,39$)
Caatinga Preservada	8,34 Ba ($\pm 1,77$)	7,29 Ba ($\pm 1,69$)	4,60 Ba ($\pm 0,71$)

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem significativamente pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$).

Ao analisar isoladamente os resultados da K_{sat} em cada manejo, observa-se que os valores para a área da Caatinga preservada não apresentaram diferenças significativas entre si ($p < 0,05$), independentemente da CH aplicada, com 8,34; 7,29 e 4,60 mm h^{-1} , para h igual a

1,0; 1,5 e 3,0 cca, nessa ordem (Tabela 4), assim como observado na área sob palma. O contrário foi constatado na área sob pousio, onde, embora os valores de Ksat para as cargas com 1,0 e 1,5 cca não diferissem significativamente entre si (6,09 e 4,96 mm h⁻¹, respectivamente, ao nível de $p < 0,05$), aqueles determinados sob CH = 3,0 cca foram menores (2,80 mm h⁻¹, $p < 0,05$) em relação aos dois anteriores.

Em relação aos resultados obtidos via método do permeâmetro de carga decrescente (PCD), de um modo geral, os resultados confirmaram que os menores valores da Ksat entre as áreas foram aqueles determinados na Caatinga preservada (Tabela 5).

Tabela 5 – Médias para Ksat do solo pelo método do permeâmetro de carga decrescente (PCD) empregando cargas hidráulicas de 1,0; 10,0 e 40,0 cca nos diferentes manejos

Sistemas de uso	Carga hidráulica decrescente (cca)		
	1,0	10,0	40,0
	Ksat (mm h ⁻¹)		
Palma	40,75 Aa (±6,49)	34,17 ABa (±4,20)	25,99 ABa (±4,19)
Pousio	33,26 ABa (±3,92)	35,54 Aa (±4,03)	32,60 Aa (±3,97)
Caatinga Preservada	21,41 Bab (±0,10)	22,96 Ba (±0,66)	16,55 Bb (±2,43)

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem significativamente pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$).

Os resultados também indicaram que, para as áreas sob palma e pousio, as alterações nas cargas hidráulicas aplicadas (1,0; 10,0; e 40,0 cca) não promoveram diferenças significativas nos valores de Ksat para essas áreas; diferentemente ao observado para os valores da área sob Caatinga preservada. Nessa área, os maiores valores de Ksat foram obtidos quando da aplicação de 1,0 e 10,0 cca (21,41 e 22,96 mm h⁻¹, respectivamente, não diferindo entre si, $p < 0,05$); apesar dos menores valores obtidos sob a CH de 40,0 cca (16,55 mm h⁻¹), não foram diferentes daqueles alcançados para a carga com 1,0 cca (21,41 mm h⁻¹).

Os valores de CV para os resultados da Ksat obtidos via PCC e PCD variaram de 22,39 a 39,51 %, para o sistema sob palma, e, de acordo com a classificação proposta por Wilding e Drees (1983), são valores agrupados como moderados a altos. Para a área sob pousio a variação foi de 27,81 a 37,50 %, classificados entre moderados a altos; e na Caatinga preservada os valores de CV variaram em faixa mais ampla (1,11 a 56,77 %), sendo então classificados entre baixo a alto (Apêndice A).

Desse modo, comparando todas as áreas, a sob Caatinga preservada foi a que apresentou a maior variabilidade nos valores de Ksat, confirmada pelo maior e menor CV, com 56,77%

(para os valores determinados via PCC, aplicando, CH com $h = 1,5$ cca); e 1,11% (para os valores determinados via PCD, aplicando CH de 1,0 cca), respectivamente.

5.1.3 Estabilidade de agregados do solo

A agregação do solo resulta do processo de cimentação e das forças de atração entre as partículas orgânicas e minerais do solo. Os parâmetros de agregação do solo possibilitam uma melhor compreensão da condição estrutural do solo e sua situação quanto à retenção de água e nutrientes, entrada e saída de ar (aeração), infiltração de água e desenvolvimento de raízes (HERNANI, 2021).

Isto posto, constata-se que os índices de estabilidade dos solos DMP; AGRI, quando comparados entre os três sistemas de uso, não apresentaram diferenças significativas entre si ($p < 0,05$); enquanto o DMG foi maior para a palma (0,845%) e menor para a Caatinga (0,641%); sendo que ambos não apresentam diferenças significativas entre os valores determinados na área sob pousio, com valor intermediário de 0,769% (Tabela 6). Por outro lado, os valores de IEA e MacroA, determinados nas áreas palma e pousio, não diferiram entre si ($p < 0,05$); sendo os menores valores desses índices observados na área sob Caatinga (82,101 e 71,69%, respectivamente). No entanto, para essa mesma área, foram observados os maiores valores para os MicroA (28,00%); ao mesmo tempo que as áreas sob palma e pousio, os menores (17,49 e 19,33%, respectivamente, que não diferiram entre si, ao nível de $p < 0,05$).

Tabela 6 – Índices de avaliação da estabilidade dos solos em diferentes sistemas de uso

Sistemas de uso	Índices de agregados do solo		
	DMP	DMG	AGRI
	mm		%
Palma	1,555 A ($\pm 0,11$)	0,845 A ($\pm 0,07$)	32,25 A ($\pm 3,61$)
Pousio	1,475 A ($\pm 0,09$)	0,769 AB ($\pm 0,03$)	32,13 A ($\pm 2,62$)
Caatinga Preservada	1,361 A ($\pm 0,05$)	0,641 B ($\pm 0,02$)	29,76 A ($\pm 2,65$)
	IEA	MacroA	MicroA
	%		
Palma	87,36 A ($\pm 1,54$)	79,64 A ($\pm 1,87$)	17,49 B ($\pm 0,22$)
Pousio	90,07 A ($\pm 0,21$)	80,84 A ($\pm 1,38$)	19,33 B ($\pm 1,34$)
Caatinga Preservada	82,10 B ($\pm 0,41$)	71,69 B ($\pm 0,59$)	28,00 A ($\pm 0,52$)

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna, não diferem significativamente ($p < 0,05$) pelo Teste de Tukey. DMP – Diâmetro médio ponderado; DMG – Diâmetro médio geométrico; AGRI – agregados > 2 mm estáveis em água; IEA – Índice de estabilidade de agregados; MacroA – macroagregados; MicroA – Microagregados.

O exame dos valores desses índices quanto a sua variabilidade nas áreas sob os sistemas de uso (Apêndice A), revela que: na palma, os valores do DMP, DMG, AGRI, foram classificados como moderado ($15 < CV\% \leq 35$), com 17,19; 21,19 e 27,44%, respectivamente; à medida que, para o IEA, MacroA e MicroA, com CV's de 4,31; 5,76 e 3,02 %, nessa ordem, foram agrupados como baixo ($CV < 15\%$).

Para a área sob pousio, os índices de agregação tiveram valores de CV com 19,98; 16,98 e 14,52 % (AGRI, MicroA e DMP, respectivamente), classificados entre moderado a baixo; ao passo que, para os demais índices desta área (IEA, MacroA e DMG) exibiram os menores valores de CV (0,57; 4,18 e 9,08 %, nessa sequência), todos considerados como baixo (Wilding e Drees, 1983) (Apêndice A).

Em relação à Caatinga, os menores valores de CV foram para IEA (1,24%), MacroA (2,01%) e MicroA (4,55%); DMG (5,88%) e DMP (9,71%), qualificados como baixo; enquanto AGRI foi único CV moderado, com valor igual a 21,77 % (Apêndice A).

Quanto aos valores do índice de sensibilidade (IS), nota-se que, para as três áreas, todos os valores médios ficaram acima de 1,00, exceto para o MicroA. Em geral, os maiores valores foram verificados para área sob palma, exceto para os atributos IEA e MacroA, indicando que essa área tem melhores condições estruturais que aquelas sob pousio. A respeito dos MicroA, os menores valores para das áreas palma e pousio ($\cong 0,70$), comprovam que a área sob Caatinga tem maiores quantidades dessas classe de poros. Contudo, quando esses valores foram avaliados pelo teste de Kruskal-Wallis, não foram constatadas diferenças significativas entre as variáveis, para todos os sistemas de uso investigados ($p < 0,05$).

Tabela 7 – Índice de sensibilidade para os atributos de agregação do solo sob os sistemas de uso sob palma e pousio, calculados em relação à Caatinga preservada

Sistemas de uso	Índices de sensibilidade dos atributos de agregação					
	DMP	DMG	AGRI	IEA	MacroA	MicroA
Palma	1,12A ($\pm 0,16$)	1,35A ($\pm 0,21$)	1,30A ($\pm 0,32$)	1,07A ($\pm 0,05$)	1,11A ($\pm 0,05$)	0,70A ($\pm 0,14$)
Pousio	1,09A ($\pm 0,13$)	1,29A ($\pm 0,20$)	1,10A ($\pm 0,20$)	1,10A ($\pm 0,01$)	1,11A ($\pm 0,04$)	0,70A ($\pm 0,11$)

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna, não diferem significativamente ($p < 0,05$) pelo Teste de Kruskal-Wallis ($p < 0,05$).

5.1.4 Distribuição do tamanho de poros e porosidade total do solo

A distribuição do tamanho de poros (DTP) na área dos sistemas foi organizada em classes, como mostra a Tabela 8. Dessa maneira, podemos indentificar as faixas de tamanhos

(diâmetros equivalentes) de poros e seus respectivos percentuais para cada classe e relacioná-los aos sistemas de uso e, conseqüentemente, interpretar sua contribuição para atual condição estrutural dos solos estudados.

Tabela 8 – Distribuição de tamanho de poros por classes de diâmetros equivalentes e porosidade total do solo

Sistemas de uso	Classes de tamanho de poros por diâmetro equivalente (\varnothing_{eq} μm)				PT
	> 300	300 - 50	50 - 30	< 30	
	(%)				
Palma	4,10 A ($\pm 0,02$)	8,29 A ($\pm 0,18$)	1,56 B ($\pm 0,03$)	24,04 A ($\pm 0,17$)	37,91 A ($\pm 0,206$)
Pousio	3,95 A ($\pm 0,30$)	9,23 A ($\pm 0,24$)	3,48 A ($\pm 0,11$)	18,92 B ($\pm 0,51$)	36,15 B ($\pm 0,754$)
Caatinga Preservada	3,71 A ($\pm 0,15$)	8,70 A ($\pm 0,50$)	1,59 B ($\pm 0,06$)	19,79 B ($\pm 0,44$)	33,49 C ($\pm 0,257$)

Classes de tamanho de poros >300 μm , 300-50 μm , 50-30 μm , < 30 μm ; PT – Porosidade total; Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna não diferem significativamente pelo Teste de Tukey ($p < 0,05$).

Posto isso, observa-se que as classes com diâmetros equivalentes de poros (\varnothing_{eq}) > 300 μm e entre 300-50 μm não distinguiram os sistemas de uso, visto que cada uma dessas classes não apresentaram diferenças entre si ($p < 0,05$). Em contrapartida, os poros com \varnothing_{eq} entre 50-30 μm foram menores nas áreas sob palma (1,56%) e Caatinga preservada (1,59%), não apresentando diferenças entre si; ao mesmo tempo que diferiram dos valores da área em pousio, que foram os maiores entre as três áreas (3,48%).

Na classe de poros com $\varnothing_{eq} < 30 \mu\text{m}$, os maiores valores foram encontrados na área sob palma (24,04%), diferindo-se daqueles alcançados nas outras áreas: pousio com 18,92% e Caatinga com 19,79%, valores estes que não diferem entre si ao nível de 5% de significância.

Sabe-se que o somatório dessas quatro classes de tamanho de poros equivale ao valor da porosidade total do solo (PT). Desse modo, analisando os valores de PT obtidos para as áreas de estudo, nota-se a seguinte ordem decrescente de valores (%): 37,91 > 36,15 > 33,49, para palma, pousio e Caatinga, respectivamente. Quando avalia-se os valores de PT em relação à DTP, observa-se que, na área sob palma, os poros com $\varnothing_{eq} < 30 \mu\text{m}$ contribuem com aproximadamente 2/3 do valor da PT (63,41% da PT); sendo esta relação menor para as demais áreas, com 52,34% da PT para o pousio e 59,09 % da PT para a Caatinga.

A variabilidade dos valores da DTP medida pelos respectivos CV revela que, para a área sob palma, os valores foram classificados como baixos (1,39 a 5,25%); igualmente como observados para a Caatinga (5,41 a 14,17%) e pousio, com valores entre 6,26 e 7,59%, exceto para poros com $\varnothing_{eq} > 300 \mu\text{m}$, onde os CV's (18,50%) foram agrupados como moderados (Apêndice A). Os resultados para PT seguiram a mesma tendência, com pequena

variabilidade entre os dados, portanto, sendo seus CV's classificados como baixos (< 15%), porém com valores bem menores aos da DTP: 1,33% (palma); 5,11 (pousio); e 1,88% para a Caatinga (Apêndice A).

5.1.5 Resistência do solo à penetração de raízes e a densidade do solo

A resistência do solo à penetração de raízes (RP) determinada sob umidade equilibrada na tensão (potencial - Ψ) de 10 kPa (Tabela 9), apontou que no manejo sob o cultivo de palma há maiores valores (0,713 MPa), quando comparados com os da Caatinga (0,448 MPa), onde esses valores não diferiram daqueles sob pousio, com 0,573 MPa ($p < 0,05$).

Tabela 9 – Resistência do solo à penetração de raízes (RP) e Densidade do solo (Ds) determinadas nos solos sob diferentes manejos

Sistemas de uso	RP (MPa)	Ds (g cm ⁻³)
Palma	0,713 A ($\pm 0,052$)	1,35 A ($\pm 0,003$)
Pousio	0,573 AB ($\pm 0,036$)	1,37 A ($\pm 0,013$)
Caatinga Preservada	0,448 B ($\pm 0,037$)	1,35 A ($\pm 0,009$)

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna, não diferem significativamente ($p < 0,05$) pelo Teste de Tukey. RP – Resistência do solo à penetração de raízes; Ds – Densidade do solo.

Além da RP, a densidade do solo (Ds) pode também ser utilizada como um dos indicadores de compactação do solo, pois possibilita a medição da situação da estrutura e porosidade do solo (REINERT *et al.*, 2006). Nos valores de Ds na Tabela 9, fica perceptível que, estatisticamente, não houve diferenças entre os sistemas de manejo, com valores de 1,35 g cm⁻³ (palma e Caatinga) e 1,37 g cm⁻³ (área em pousio).

Os coeficientes de variação (Apêndice A) para os valores da RP foram classificados como moderado, com 17,73% para a palma, 15,24% no pousio, e 20,01% na Caatinga; valores esses bem mais altos em relação aos CV's da Ds, classificados como baixos (CV < 15%). Para esse atributo, os valores de CV variaram em faixa menor, com 0,52% para a palma, 2,29% no pousio, e 1,67% na Caatinga.

5.2. Correlação entre os atributos físico-hídricos do solo e índice de qualidade do solo

Avaliando as relações entre os atributos físico-hídricos dos solos agrupando-os pela análise via correlação de Pearson (Tabela 10), verifica-se há 71 pares, com diferentes graus de significância ($p < 0,01$; $p < 0,05$; $p < 0,1$), distribuídos em relações positivas e negativas.

Tabela 10 – Correlação de Pearson para os atributos físico-hídricos do solo

Variáveis	KsatPCC1	KsatPCC1.5	KsatPCC3	KsatPCD1	KsatPCD10	KsatPCD40	>300	300-50	50-30	< 30	PT	RP	Ds	DMP	DMG	AGRI	IEA	MacroA	MicroA	
KsatPCC1	1																			
KsatPCC1.5	0,954***	1																		
KsatPCC3	0,937***	0,959***	1																	
KsatPCD1	0,606***	0,535**	0,646***	1																
KsatPCD10	0,286	0,233	0,362	0,872***	1															
KsatPCD40	0,125	0,065	0,112	0,736***	0,734***	1														
>300	0,076	0,100	0,175	0,288	0,206	0,129	1													
300-50	-0,364	-0,398	-0,339	0,152	0,259	0,257	0,277	1												
50-30	-0,499**	-0,539**	-0,532**	0,121	0,404*	0,554**	0,035	0,461*	1											
< 30	0,755***	0,820***	0,838***	0,320	0,062	-0,100	0,252	-	0,587**	-0,609***	1									
PT	0,471**	0,515**	0,575**	0,602***	0,478**	0,373	0,681***	0,041	0,097	0,569**	1									
RP	0,443*	0,501**	0,551**	0,390	0,451*	0,223	0,133	-	0,483**	-0,012	0,669***	0,588**	1							
Ds	-0,095	-0,134	-0,160	-0,020	0,032	0,289	-0,157	-0,150	0,423*	-0,140	-0,152	0,167	1							
DMP	0,336	0,210	0,278	0,184	0,231	-0,092	-0,043	-0,047	0,050	0,218	0,176	0,261	0,149	1						
DMG	0,509**	0,333	0,391	0,376	0,369	0,103	-0,003	-0,125	0,090	0,304	0,404*	0,427*	0,060	0,783***	1					
AGRI	0,032	-0,113	0,008	0,002	0,141	-0,235	-0,051	0,201	0,091	-0,056	0,047	0,069	-	0,856***	0,699***	1				
IEA	0,069	-0,072	0,010	0,400	0,522**	0,464*	0,187	0,017	0,607***	0,015	0,481**	0,413*	0,284	0,464*	0,730***	0,416***	1			
MacroA	0,271	0,142	0,205	0,463*	0,521**	0,437*	0,110	-0,060	0,444*	0,162	0,490**	0,470**	0,315	0,671***	0,812***	0,525**	0,897***	1		
MicroA	-0,406*	-0,404*	-0,459*	-0,526**	-0,498**	-0,481**	-0,254	0,133	-0,287	-0,437*	-0,738***	-0,665***	-	0,309	-0,454*	-0,597***	-0,248	-0,708***	-0,832***	1

KsatPCC1 – Condutividade hidráulica saturada pelo permeâmetro de carga constante aplicando h=1,0 cca; KsatPCC1.5 – Condutividade hidráulica saturada pelo permeâmetro de carga constante aplicando h=1,5 cca; KsatPCC3 – Condutividade hidráulica saturada pelo permeâmetro de carga constante aplicando h=3,0 cca; KsatPCD1 – Condutividade hidráulica saturada pelo permeâmetro de carga decrescente aplindo h=1,0 cca; KsatPCD10 Condutividade hidráulica saturada pelo permeâmetro de carga decrescente aplindo h=10,0 cca; KsatPCD40 Condutividade hidráulica saturada pelo permeâmetro de carga decrescente aplindo h=40,0 cca; GF – Grau de flocculação; Classes de tamanho de poros >300µm, 300-500µm, 50-300µm, < 30µm; PT – Porosidade total; RP – Resistência à penetração de raízes; Ds – Densidade do solo; DMP – Diâmetro médio ponderado; DMG – Diâmetro médio geométrico; AGRI – agregados >2mm estáveis em água; IEA – Índice de estabilidade de agregados; MacroA – macroagregados; MicroA – Microagregados. (*) Significante (p<0,1); (**) Significante (p<0,05); (***) Significante (p<0,01).

Nota-se ainda que 22 pares correlacionado-se positivamente e 6 negativamente ($p < 0,01$); 17 pares com relação positiva e 8 negativa ($p < 0,05$); e 13 pares se relacionando positivamente e 5 negativamente ($p < 0,1$).

Dentre as variáveis, lista-se aquelas com relação significativa e positiva: KsatPCC1.5, KsatPCC3, KsatPCD1, KsatPCD10, KsatPCD40, Classes de $\varnothing_{eq.}$ $>300 \mu\text{m}$, $300-50 \mu\text{m}$, $50-30 \mu\text{m}$ e $< 30 \mu\text{m}$, PT, RP, Ds, DMP, DMG, AGRI, IEA e MacroA; sendo negativas as demais relações, como visto para: Classe de $\varnothing_{eq.}$ entre $50-30 \mu\text{m}$ e $< 30 \mu\text{m}$, RP e MicroA.

De modo geral, os que mais se relacionaram significativamente com a maioria dos outros atributos foram os MacroA (positivamente) e MicroA (negativamente). A maior correlação positiva ocorreu entre os valores da KsatPCC1,5 e KsatPCC3 ($r = 0,959$), e a maior correlação negativa decorreu dos MacroA e MicroA ($r = -0,832$).

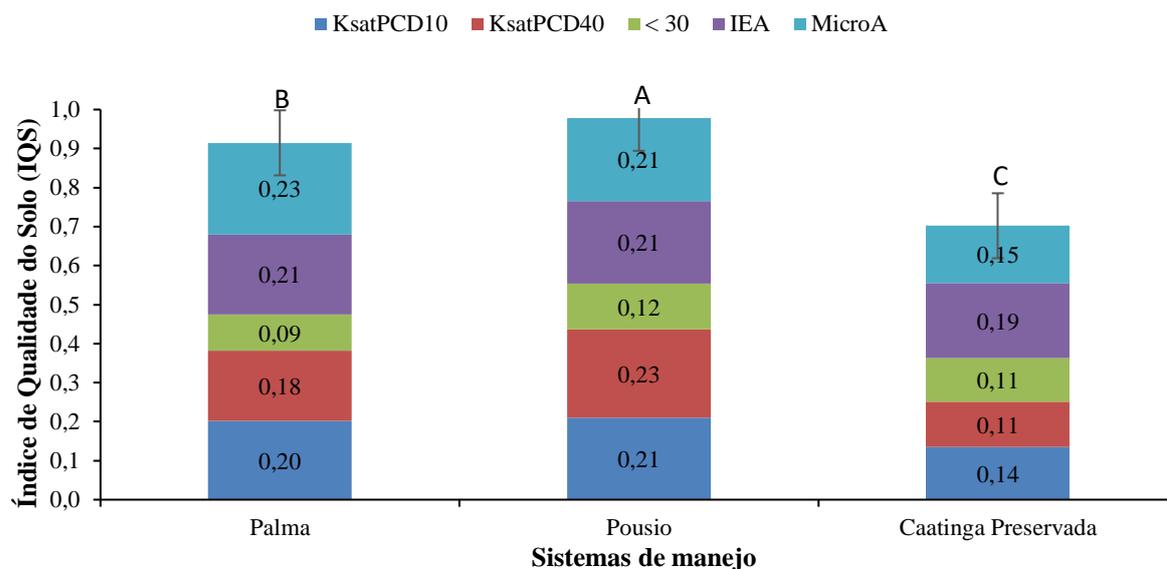
A Ksat relacionou-se positivamente com as classes de $\varnothing_{eq.}$ entre $50-30 \mu\text{m}$ e $< 30 \mu\text{m}$, PT, RP, DMG, IEA MacroA e negativamente com as classes com $\varnothing_{eq.}$ entre $50-30 \mu\text{m}$ e $< 30 \mu\text{m}$, RP e MicroA em algum dos métodos, cargas hidráulicas e níveis de significância ($p < 0,01$; $p < 0,05$; $p < 0,1$) abordados.

Levando-se em consideração os indicadores avaliados e sabendo-se que a qualidade do solo é analisada pelas características que influenciam os atributos do solo e o desenvolvimento da cobertura vegetal, e que considera uma contribuição interativa de todos os atributos, verifica-se pela Figura 10, a existência de diferenças significativas entre os valores dos IQSs dos sistemas avaliados ($p < 0,05$).

Maior IQS foi gerado pela área em pousio e o menor na Caatinga com 10 anos de preservação, ou seja, os valores de IQS sugeram a seguinte ordem de qualidade para os sistemas de uso: pousio $>$ palma $>$ Caatinga preservada.

Observando a contribuição de cada indicador para seus respectivos IQSs, e, conseqüentemente, para o IQS do sistema de uso (Apêndice B), temos maiores contribuições dos valores Ksat, especialmente, do sistema em pousio e do IEA e MicroA da área cultivada com palma. Dessa forma, temos o seguinte ordenamento para os valores dos IQS: IEA $>$ MicroA $>$ KsatPCD10 $>$ KsatPCD40 $>$ classe de poros com $\varnothing_{eq.} < 30 \mu\text{m}$.

Figura 10 – Índice de qualidade do solo (IQS) e contribuição dos atributos do solo para o IQS para os sistemas de sob palma, em pousio e Caatinga preservada em Triunfo-PE.



Médias seguidas de mesma letra maiúscula, não diferem significativamente ($p < 0,05$) pelo Teste de Tukey. (*) Significante. **Ksat PCD 10** - Condutividade hidráulica saturada pelo permeâmetro de carga decrescente, aplicando $h=10,0$ cca; **Ksat PCD 40** - Condutividade hidráulica saturada pelo permeâmetro de carga decrescente aplicando $h=40,0$ cca; **< 30** - Classes de tamanho de poros com $\varnothing_{eq.} < 30 \mu m$; **IEA** – Índice de estabilidade de agregados; **MicroA** – Microagregados.

6. DISCUSSÕES

6.1. Atributos físico-hídricos do solo

A classe textural do solo é um atributo importante que varia pouco ao longo do tempo, pois as alterações só ocorrem se houver mudança da composição do solo devido aos processos de intemperismo e estes possuem escala de séculos a milênios (REINERT *et al.*, 2006). Porém, mesmo assim, variações podem ocorrer em função das atividades antrópicas e pela erosão, principal causa para alterações na composição das frações do solo (HE *et al.*, 2004).

Em estudo no Semiárido da Bahia, os autores Arcoverde, Cortez e Pereira (2018) encontraram teores de argila superiores nas áreas com uso agrícola em comparação à Caatinga, o qual associaram a incorporação de matéria orgânica no solo ao longo do tempo de cultivo e pelo consequente aumento no grau de flocculação (GF). Para os valores de GF do estudo em tela (Triunfo-PE), temos o inverso, onde a palma obteve o menor valor (14,81%) em comparação à Caatinga preservada e ao pousio, corroborando os autores citados, onde verificaram que os valores de GF de algumas áreas sob uso agrícola foram inferiores aos da Caatinga.

Os maiores valores de areia fina (AF) foram encontrados no sistema sob palma, assim como o percentual para a classe de tamanhos de poros $\varnothing_{eq.} < 30 \mu m$ e de porosidade total (PT),

abordado anteriormente nos resultados, indicando dessa forma menores \varnothing_{eq} , o que pode aumentar a retenção e disponibilidade de água nessa área.

Os valores encontrados para areia grossa (AG) variaram de 46,40% a 52,55%. Altas quantidades de AG no solo podem indicar uma ligação com as práticas de uso do solo e com a erosão, além dos fatores de formação do solo (BARBOSA, 2017). A predominância dos altos percentuais da fração areia condiciona os valores de PT e Ds, independente do manejo adotado (CUNHA *et al.*, 2011).

Os resultados para argila dispersa em água (ADA) permitem avaliar as condições estruturais do solo (TAVARES FILHO *et al.*, 2010) e auxilia na previsão de riscos à erosão hídrica (CALERO *et al.*, 2008). Nesse caso, os valores indicam que o percentual ADA e GF são inversamente proporcionais, ou seja, há uma tendência de aumento no GF com redução da ADA.

A classificação da textura dos solos (franco-arenosa) encontrada em todos os sistemas de uso, aponta que as intervenções antrópicas no preparo do solo, provavelmente não resultaram em elevada heterogeneidade das frações granulométricas. Entretanto, não se pode afirmar isso, completamente, pois para tal seriam necessárias análises que avaliassem as condições ao longo de maiores profundidades no solo.

Os valores de Ksat pelo permeâmetro de carga constante (PCC) demonstram uma redução ao aumentar a carga hidráulica (CH) em todos os sistemas de uso; porém, sendo significativa apenas no sistema sob pousio. Para os resultados obtido pelo permeâmetro de carga decrescente (PCD), somente a área sob palma seguiu esse comportamento; nas demais foi observado um aumento quando aplicado a CH com $h = 10$ cca, seguida de uma queda ao aplicar a carga de 40 cca, mas com diferença significativa somente na área sob Caatinga preservada ($p < 0,05$).

A Ksat é dependente tanto da estrutura quanto da textura do solo (ALMEIDA *et al.*, 2017), e engloba a quantidade, tamanho, morfologia, continuidade e orientação dos poros e pode variar de um local para outro, podendo em alguns casos atingir valores extremos e diferir conforme a orientação do solo (RAMIREZ, 1997). Os valores de Ksat que se destacaram em ambos os métodos nos sistemas de uso investigados foram, possivelmente, devido a maior PT encontrada sob a palma e no sistema em pousio, pois, de acordo com Mesquita e Morais (2004), os diferentes usos do solo podem modificar a porosidade e paralelamente a isso deve-se modificar, também, a Ksat.

De acordo com Millar (1988), quando a Ksat de solos agrícolas apresentam valores entre 1 a 5 mm h^{-1} é considerada baixa, e valores entre 5-20 mm h^{-1} , é classificada como moderada. Adotando esse referencial, pelo método do PCC, a análise dos dados aponta valores moderados

no sistema com palma ($K_{sat} = 17,97 \text{ mm h}^{-1}$ em $h = 1,5 \text{ cca}$; $K_{sat} = 17,07 \text{ mm h}^{-1}$ em $h = 3,0 \text{ cca}$); e para aqueles valores obtidos sob $h = 1,0 \text{ cca}$, a K_{sat} ficou acima do limite de referência para moderada. No sistema em pousio ficou entre de moderada ($K_{sat} = 6,09 \text{ mm h}^{-1}$ em $h = 1,0 \text{ cca}$) e baixa ($K_{sat} = 4,96 \text{ mm h}^{-1}$ em $h = 1,5 \text{ cca}$; $K_{sat} = 2,80 \text{ mm h}^{-1}$ em $h = 3,0 \text{ cca}$). Já pelo PCD, a análise apresentou-se acima do referencial de maior valor em todas as cargas para os sistemas agrícolas.

O comportamento notado para os índices de DMP e DMG, com valores superiores nos sistemas agrícolas (palma e pousio) em oposição à Caatinga preservada, também foi observado por Arcoverde, Cortez e Pereira (2018), onde constataram redução no DMP e DMG para a Caatinga, em relação as áreas sob manejos agrícolas. Em outro estudo no semiárido, avaliando os atributos físicos do solo sob diferentes sistemas agrícolas, Arcoverde *et al.* (2015) destacaram que os índices de agregação são sensíveis às intervenções mecânicas realizadas no manejo agrícola, considerando a profundidade de 10-20 cm.

Segundo Reinert *et al.* (2006), baseados nos dados empíricos de campo, observaram que quando os valores de DMG atingem 2 mm, ou maior, a redução da erosão é significativa, podendo esse valor ser considerado como valor crítico, sendo, melhor, quanto maior for o valor do DMG. Desse modo, no caso investigado, os valores de DMG (palma = 0,85 mm; pousio = 0,77 mm e Caatinga preservada = 0,64 mm), todos abaixo de 1 mm, assinalam uma propensão maior a processos erosivos.

De acordo com Kiehl (1979), o limite entre baixa e alta estabilidade para DMP é atingido quando os valores alcançam 0,5 mm, sendo este considerado dependente do percentual de agregados $> 2 \text{ mm}$ estáveis em água (AGRI). Os resultados obtidos para o DMP foram acima deste limite, em todos os sistemas de uso (palma = 1,56 mm; pousio = 1,48 mm e Caatinga preservada = 1,36 mm), mostrando alta estabilidade segundo essa afirmativa.

Os percentuais dos agregados definidos como AGRI não apresentaram diferenças significativas, não correspondendo aos valores de GF, ou seja, os valores de GF tendenciaram ao decréscimo com a elevação dos AGRI, especialmente na área de palma, onde o GF foi menor. Todavia, apenas essa condição de flocculação não é suficiente para que ocorra a agregação, pois a atração entre partículas é um dos processos para a formação de agregados mais estáveis no solo (ALMEIDA NETO, 2007), sendo ainda necessários a ocorrência de processos cimentantes.

Os resultados do IS não foram significativos para os parâmetros de estabilidade do solo, porém, analisando isoladamente o IS dos microagregados calculados para os dois manejos em relação à Caatinga preservada (ambos $\cong 0,70$), indicam alterações nos agregados $< 0,25 \text{ mm}$,

modificações estas decorrentes do manejo nas áreas de palma e pousio. Esses dados sugerem que tais valores (palma e pousio) estão abaixo do referencial, ou seja, Caatinga preservada.

A faixa crítica para PT encontrada por Cunha *et al.* (2011), para solos com textura franco-arenosa é de 0,44 a 0,50 m³ m⁻³. Os valores nos sistemas de palma (37,91%), pousio (36,15%) e Caatinga preservada (33,49%) são inferiores a esta faixa. Fato que pode decorrer do manejo mais intenso praticado em algum momento nas áreas, seja antes de iniciar a recuperação, caso da Caatinga e pousio, ou pelo atual, na área sob o cultivo de palma, contribuindo para a redução no volume de macroporos e, conseqüentemente, aumento de microporos e porosidade total.

O aumento da Ds reduz a PT, a macroporosidade, a Ksat e a absorção iônica (SILVA *et al.*, 2017). Além disso, pode ocorrer maior resistência à penetração das raízes das plantas (Bengough *et al.*, 2011), com limitações da profundidade de exploração em busca de água e nutrientes (Valentine *et al.*, 2012).

Os limites críticos para a Ds em relação ao teor de argila totalmente dispersa (ATD), são de 1,45 g cm⁻³ para solos com mais de 55% de ATD, 1,55 g cm⁻³ para solos com ATD entre 20 e 55% e 1,65 g cm⁻³ para aqueles com menos de 20% de ATD (REINERT, REICCHERT e SILVA, 2001). Outros autores indicam como limite valores de Ds ≥ 1,40 g cm⁻³ (SOUZA *et al.*, 2005). Levando esses parâmetros em consideração, os três sistemas de uso (palma = 1,35 g cm⁻³; pousio = 1,37 g cm⁻³ e Caatinga preservada = 1,35 g cm⁻³), ficaram abaixo do limite dito como crítico por esses pesquisadores.

Os valores médio de Ds encontrados por Santiago (2015), na profundidade de 0-20 cm em diferentes manejos em área agrícolas derivadas da Caatinga em Cambissolo, variaram de 1,32 a 1,49 g cm⁻³, PT de 50,02%, ou seja, no limite mínimo proposto por Kiehl (1979); Azevedo e Dalmolin (2006), para PT que é de 50%. Considerando também esse valor de referência, os sistemas de manejo ficaram abaixo desse limite, indicando uma condição desfavorável ao uso desses solos, algo já posto anteriormente, com base em faixa estabelecida por Cunha *et al.* (2011).

Valores médios de Ds = 1,39 g cm⁻³ e PT = 48% foram observados por Souza *et al.* (2010) em área no município de Triunfo, sob cana-de-açúcar e frutíferas, na profundidade de 0-18 cm. Os valores de Ds, nesse caso, foram semelhantes aos encontrados nesta pesquisa.

Contudo, não se pode afirmar que essas variações têm por causa os manejos adotados nas áreas estudadas, uma vez que tais atributos (PT e Ds) em solos arenosos, parecem não ser afetados pela ação das ferramentas de preparo do solo (CORTEZ *et al.*, 2011; NAGAHAMA *et al.*, 2016), mas sim pelas características dos solos da região (ARCOVERDE *et al.*, 2015).

A resistência mecânica à penetração está associada à densidade do solo e é tanto maior quanto maior a D_s . Mas a D_s não é o fator mais importante que limita o crescimento radicular, mas sim a resistência que o solo oferece à expansão das raízes (REINERT *et al.*, 2006). Na literatura encontra-se que o limite crítico para o desenvolvimento das culturas é 2 MPa (TAYLOR *et al.*, 1966), e sendo assim, os valores da RP dos sistemas investigados (palma = 0,713 MPa; pousio = 0,573 MPa e Caatinga preservada = 0,448 MPa) estão abaixo do crítico.

Os valores de RP encontrados por Gondim *et al.* (2015) para uso da Caatinga em sistema convencional e agroecológico em Cambilosso háplico, região de Rosado-RN, não apresentaram limitações para o desenvolvimento de raízes, corroborando os resultados encontrados neste estudo. Por outro lado, segundo Costa *et al.* (2012), os valores de RP no estabelecimento de pastagens são inferiores a 1 MPa.

6.2. Correlação entre os indicadores físico-hídricos e índice de qualidade do solo

A correlação de Pearson mostrou que os macroagregados (MacroA) seguem o princípio da proporcionalidade com a maioria dos outros atributos, ou seja, à medida que o percentual de MacroA cresce há elevação nos demais que se relaciona com ele. E os microagregados (MicroA) seguem o inverso: à medida que seus valores aumentam, as propriedades que se relacionam com ele tendem a reduzir.

Os atributos do solo referentes às classes de diâmetros de poros com \varnothing_{eq} entre 50-30 μm e $\varnothing_{eq} < 30 \mu\text{m}$, PT, RP, DMG, IEA MacroA e MicroA, apresentaram relação com os valores da K_{sat} . Dentre estes, os resultados da K_{sat} pelo método do PCC e a classe de poros com $\varnothing_{eq} < 30 \mu\text{m}$, PT, RP, DMG se mostraram proporcionais, ou seja, à medida que um aumenta o outro tende a aumentar, o contrário também é verdadeiro, e inversamente proporcionais à classe de poros com \varnothing_{eq} entre 50-30 μm e os MicroA.

A K_{sat} pelo método do PCD teve comportamento de proporcionalidade com a classe de poros com \varnothing_{eq} entre 50-30 μm para $h = 10 \text{ cca}$ e $h = 40 \text{ cca}$; com a PT aplicando-se $h = 1 \text{ cca}$ e $h = 10 \text{ cca}$; com RP em $h = 10 \text{ cca}$; IEA adotando-se $h = 10 \text{ cca}$ e $h = 40 \text{ cca}$ e com os MacroA nas três cargas hidráulicas empregadas; e assim como a K_{sat} pelo PCC, foi inversamente proporcional aos MicroA. Dessa forma, a K_{sat} eleva-se à medida que as classes de poros com \varnothing_{eq} entre 50-30 μm , PT, RP, IEA e MacroA crescem, e tende a diminuir à medida que o percentual de MicroA ascende.

Os indicadores PT, RP e Ds são importantes para avaliar se o solo está em processo de compactação, por variarem bastante com as práticas de uso e manejo do solo; sobretudo, se de forma contínua e mal planejada. Além desses fatores, podem sofrer mudanças com o tipo de solo e a cobertura vegetal (STEFANOSKI *et al.*, 2013). Em virtude disso, como os resultados para PT e RP nos sistemas analisados se correlacionaram de alguma forma com a Ksat, seus valores também podem sofrer alterações em algum grau devido às atividades antrópicas desenvolvida na área de estudo.

O IQS gerado nos sistemas palma, pousio e Caatinga preservada foram de 0,91, 0,98 e 0,70, respectivamente. Santiago (2015), em área de Cambissolo, com classe textural franco-arenosa, na camada de 0-20 cm, submetida a manejo agroecológico, apresentou IQS de 0,80 e 0,45 em área de manejo convencional. Freitas *et al.* (2012), em estudos de áreas com manejo conservacionistas em eucalipto, obtiveram valores que oscilaram de 0,72 a 0,74. Monteiro (2012) encontrou IQS de 0,62 em área de cultivo de mandioca em consórcio com feijão de porco (*Canavalia ensiformis*) no Recôncavo baiano.

Mediante essas discussões e variações manifestadas pelos resultados, diz-se que tais variações, podem ocorrer devido à desestruturação nas camadas do solo, onde há emprego de ferramentas mecânicas de preparo, uma vez que, em sistemas conservacionistas, é comum encontrar maior agregação devida a proteção da estrutura e maior aporte de material vegetal (SALES *et al.*, 2016). Assim, esses resultados sugerem que o tempo de preservação da área sob Caatinga (10 anos) é insuficiente para sua resiliência. No entanto, vale salientar que as alterações nas propriedades do solo estão sendo avaliadas em relação à área de Caatinga com 10 anos de preservação, não significando que esta esteja na condição ótima, uma vez que não se sabe da sua condição no início da recuperação natural.

7. CONCLUSÕES

A condutividade hidráulica saturada (Ksat) apresentou relações com os atributos das áreas referentes à distribuição do tamanho de poros (classes com \varnothing_{eq} entre 50-30 μm e $\varnothing_{eq} < 30 \mu\text{m}$), estabilidade de agregados (DMG, IEA, MacroA e MicroA), porosidade total e resistência do solo à penetração de raízes.

A Ksat eleva-se à medida que aumentam os valores para a classe de poros com $\varnothing_{eq} < 30 \mu\text{m}$, PT, RP e DMG, pelo método de carga crescente; e no decrescente, à medida que aumenta a classe de poros com \varnothing_{eq} entre 50-30 μm , PT, RP, IEA e MacroA.

A Ksat tende a diminuir pelo PCC quando cresce o percentual dos poros com $\varnothing_{eq.} > 30 \mu\text{m}$ e MicroA; e no PCD, somente em função dos MicroA.

Os atributos que melhor atenderam à classificação dos IQS foram o índice de estabilidade de agregados (IEA), os MicroA, a Ksat pelo PCD nas cargas de 10 e 40 cca. O melhor IQS foi gerado pela área em pousio e o menor na Caatinga preservada (10 anos).

É perceptível que as ações de desmatamento da Caatinga na área em estudo e seu subsequente uso para cultivo, em solos ainda jovens como os Cambissolos, promovem alterações na condição original de sua estrutura, onde uma década em recuperação natural ainda não foi suficiente para detectar a resiliência da área; em virtude, principalmente, do IQS ter sido o menor entre os sistemas de manejo avaliados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, S. L. REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 519-531, 2004.

ADDINSOFT (2020). **XLSTAT statistical and data analysis solution**. New York, USA, 2020. <https://www.slstat.com>

ALMEIDA NETO, O. B. **Dispersão da Argila e Condutividade Hidráulica em solos com diferentes mineralogias, lixiviados com soluções salino-sódicos**. 2007. Tese de doutorado. Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais.

ALMEIDA, B. G. **Métodos alternativos de determinação de parâmetros Físicos do solo e uso de condicionadores químicos no estudo da qualidade do solo**, 105 p., Tese (Doutorado). ESALQ/USP, 2008.

ALMEIDA, B. G.; ALMEIDA, C. D. G. C.; SANTOS, E. M. S.; MAIA, A. J.; SILVA, T. H. S. “Permeâmetro contínuo de carga constante e decrescente para determinação de condutividade hidráulica em meios porosos”, BR1020200132024, Jun. 26, 2020.

ALMEIDA, B. G.; FREITAS, P. L.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. H. M.; DONAGEMMA, G. K. **Porosidade**. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (eds.). Manual de métodos de análise de solo. 3.ed. rev. ampl. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2017a. p.82-94. ISBN: 978-85-7035-771-7.

ALMEIDA, B. G.; VIANA, J. H. M.; TEIXEIRA, W. G.; DONAGEMMA, G. K. **Densidade do solo**. In: TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (eds.). Manual de métodos de análise de solo. 3.ed. rev. ampl. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2017b. p.65-75. ISBN: 978-85-7035-771-7.

ALMEIDA, K. S. S. A.; SOUZA, L. S.; SILVA PAZ, V. P; SILVA, F. T. S.; SANTOS, D. N.; PERREIRA, J. S. Variabilidade espacial da condutividade hidráulica do solo saturado em

latossolo amarelo distrocoeso, no município de cruz das almas. **Irriga**, Botucatu, v. 22, n. 2, p. 259-274, abril-junho, 2017.

ANDRADE, E. M.; PALÁCIO, H. A. Q.; CRISÓSTOMO, L. A.; SOUZA, I. H.; TEIXEIRA, A. S. Índice de qualidade de água, uma proposta para o vale do rio Trussu, Ceará. **Revista Ciência Agronômica**, p. 135-142, 2005.

ANDREWS, S.S., KARLEN, D.L., MITCHELL, J.P. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. **Agriculture, Ecosystems & Environment** 90, 25–45, 2002.

ARAÚJO FILHO, J. A. **Manejo pastoril sustentável da Caatinga**. Recife: Projeto Dom Helder Câmara, 2013. 200 p.

ARAÚJO, E. A. DE *et al.*, Resumo Qualidade do solo : conceitos, indicadores e avaliação. **Pesquisa Aplicada e Agrotecnologia**, v. 5, n. 1, p. 187–196, 2012.

ARCOVERDE, S. N. S.; CORTEZ, J. W.; PEREIRA J. S. Atributos físicos de solos em áreas sob diferentes usos no semiárido baiano. **Revista HOLOS**, v. 4, p. 65-77 (2018)

ARCOVERDE, S. N.S.; SALVIANO, A. M.; OLZEVSKI, N.; MELO, S. B.; CUNHA, T. J. F.; GIONGO, V.; PEREIRA, J. S. Qualidade física de solos em uso agrícola na Região Semiárida do Estado da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 39 (5), p. 1473-1482, 2015.

AZEVEDO, A. C.; DALMOLIN, R. S. D. **Solos e ambiente: Uma introdução**. Santa Maria, Pallotti, 2 ed. 2006. 100 p.

BARRIOS, E.; COUTINHO, H. L. C.; MEDEIROS, C. A. B. InPaC-S: Participatory knowledge integration on indicators of soil quality, methodological guide. **World agroforestry, Embrapa and Centro internacional de agricultura tropical**. 180p. 2012.

BARROS M. R. G. Atributos físicos do solo como indicadores do grau de degradação em áreas remanescentes da caatinga em Triunfo-Pe. **Dissertação** (Mestrado em Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE). 2020.

BENGOUGH, A. G. *et al.*, A. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. **Journal of Experimental Botany**, v. 62, n. 1, p. 59- 68, 2011.

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

BHARDWAJ, A. K.; JASROTIA, P.; HAMILTON, S.K.; ROBERTSON, G.P. Ecological management of intensively cropped agro-ecosystems improves soil quality with sustained productivity. **Agriculture, Ecosystems & Environment**.140, 419-429, 2011.

BOLINDER, M. A.; ANGERS, D. A.; GREGORICH, E. G.; CARTER, M.R. The response of soil quality indicators to conservation management. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 79 (1), p. 37-45. 1999.

BORGES, E.; LIBARDI, P. L. Propriedades hidráulicas de um solo não-saturado utilizando-se o permeâmetro a disco. **Scientia Agricola**, v.57, p.525-529, 2000.

BRADY, N. C; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades do solo**. Porto Alegre: Bookman, 686 p. 2013.

BRANDÃO, V.S.; CECÍLIO, R.A.; PRUSKI, F.F.; SILVA, D.D. **Infiltração da água no solo**. 3. ed. Viçosa: UFV, 2006. 120 p.

BREJDA, J. J.; MOORMAN, T. B.; KARLEN, D. L.; DAO, T. H. Identification of regional soil quality factors and indicators: I. Central and Southern High Plains. **Soil Science Society of America Journal**, 64, 2115-2124. 2000.

BÜNEMANN, E. K. *et al.*, Soil quality – A critical review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 120, n. February, p. 105–125, 2018.

CALERO, N.; BARRON, V.; TORRENT, J. Water dispersible clay in calcareous soils of Southwestern Spain. **Catena**, v.74, p. 22-30, 2008.

CARTER, M.R., GREGORICH, E.G., ANDERSON, D.W., DORAN, J.W., JANZEN, H.H., PIERCE, F.J., Concepts of soil quality and their significance. In: Gregorich, E.G., Carter, M.R. (Eds.), **Developments in Soil Science**. Elsevier, pp. 1–19, 1997.

CARVALHO, L. A. **Condutividade hidráulica do solo no campo: as simplificações do método do perfil instantâneo**. 98 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia). ESALQ/USP, 2002.

CAVALCANTE, D. M.; SILVA, A. P. F.; ALMEIDA, B. G.; FREIRE, J. F.; SANTOS SILVA, T. H. S.; CAVALCANTE, F. M. S. Physical soil quality indicators for environmental assessment and agricultural potencial of Oxisols under different land uses in the Araripe Plateau, Brazil. **Soil & Tillage Research**. 2021.

CHAER, G. M.; TÓTOLA, M. R. Impacto do manejo de resíduos orgânicos durante a reforma de plantios de eucalipto sobre indicadores de qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, n.6, p.1381-1396. 2007.

CORRÊA, J. C. Efeito de sistemas de cultivo na estabilidade de agregados de um latossolo vermelho-amarelo em Querência, MT. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 2, p. 203-209, 2002.

CORRÊA, R. M., FREIRE, M. B. G., FERREIRA, R. L. C., SILVA, J. A. A., PESSOA, L. G. M., MIRANDA, M. A., MELO, D. V. M. Atributos físicos de solos sob diferentes usos com irrigação no semiárido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 14 (4), pp. 358-365, 2010.

CORTEZ, J.W.; ALVES, A. D. S.; MOURA, M. R.D.; OLSZEWSKI, N.; NAGAHAMA, H. J. Atributos físicos do Argissolo amarelo do semiárido nordestino sob sistemas de preparo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 35(4), pp.1207-1216, 2011.

COSTA, M. A. T.; TORMENA, C. A.; LUGÃO, S. M. B.; FIDALSKI, J.; NASCIMENTO, W. G.; MEDEIROS, F. M. Resistência do solo à penetração e produção de raízes e de forragem em

diferentes níveis de intensificação do pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 36:993-1004, 2012.

CRUZ, C. D., CARNEIRO, P. C. S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 2.ed. Viçosa: Ed. UFV, v.2, 585p, 2006.

CUNHA, E. Q. DA.; STONE, L. F.; MOREIRA, J. A. A.; FERREIRA, E. P. B.; DIDONET, A. D.; LEANDO, W. M. Sistemas de preparo do solo e culturas de cobertura na produção orgânica de feijão e milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 35 (2), pp. 589-602, 2011.

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

DIAS JUNIOR *et al.*, Avaliação quantitativa da sustentabilidade estrutural dos solos em sistemas florestais na região de Aracruz-ES. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 23, n. 4, p. 371-380, out./dez. 1999.

DORAN, J.W.; PARKIN, T.B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F.; STEWART, B.A. (Eds.). Defining soil quality for a sustainable environment. Madison, Wisconsin: **Soil Science Society American**, p. 3-21. (Special Publication, 35), 1994.

DORAN, J.W.; PARKIN, T.B. Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. In: DORAN, J.W.; JONES, A.J. (Eds.). Methods for assessing soil quality. Wisconsin, USA: **Soil Science Society American**, p.25-37. (Special Publication, 49), 1996.

EMBRAPA. **Manual de Métodos de Análises de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF. Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 2017. 574 p.

FERREIRA, M. M. **Caracterização física do solo**, In: LIER, Q. de J. Van. Física do solo, Viçosa: SBCS, p. 1-28, 2010.

FERREIRA, M. M. **Física do solo**. ESAL/FAEPE, 1993, 63p.

FREITAS, D. A. F.; SILVA, M. L. N.; CARDOSO, E. L.; CURI, N. Índices de qualidade do solo sob diferentes sistemas de uso e manejo florestal e cerrado nativo adjacente. **Revista de Ciência Agronômica**, v. 43, n. 3, p. 417-428, 2012.

GEE, G. W.; OR, D. Particle-size analysis. In: DANE, J. H. **Methods of soil analysis**. 3. ed. Madison: Soil Science Society of America, 2002. Cap. 4: Physical methods, p. 255-293.

GONÇALVES, A. D. M. A.; LIBARDI, P. L. Análise da determinação da condutividade hidráulica no solo pelo método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.37, p.1174-1184, 2013.

GONDIM, J. E. F. REBOUÇAS, C. A. M.; PORTELA, J. C.; CAVALCANTE, J. S. J.; SILVA, S. Y. A. M.; DIAS, M. C. *et al.*, Resistência mecânica do solo à penetração em diferentes manejos do solo e da caatinga em Governador Dix-Sept Rosado-RN. **ACSA - Agropecuária Científica no Semi-Árido**, v.11, n.2, p.72-76, abr-jun, 2015.

HAIR, J.F., BLACK, W.C., BABIN, B.J., ANDERSON, R.E., TATHAM, R.L. **Análise multivariada de dados**. 6.ed. Porto Alegre: Bookman, 688p, 2009.

HANGEN, E.; VIETEN, F. A comparison of five different techniques to measure hydraulic conductivity of a riparian soil in north Bavaria, Germany. **Pedosphere**. 2017.

HE, W. Q. *et al.* Study on some factors influencing soil erosion by wind tunnel experiment in North Ectone between Agriculture and Pature. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 18, p. 1-8, 2004.

HERNANI, L. C. **Árvore do conhecimento, sistema plantio direto: Agregação do solo**. Agência Embrapa de Informação Tecnológica (AGEITEC), EMBRAPA. Acesso em: jan. 2021. Disponível:http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/sistema_plantio_direto/arvore/CON T000fwuzxobr02wyiv807fiqu9k024m72.html#:~:text=A%20estabilidade%20de%20agregado s%20% C3% A9,das%20camadas%20superficiais%20do%20solo.

HILLEL, D. **Everionmental Soil Physics: Fundamentals, Applications, and Everionmental Considerations**. Academic Press, London, 1998.

IWATA, B. F. *et al.*, Sistemas agroflorestais e seus efeitos sobre os atributos químicos em Argissolo Vermelho-Amarelo do Cerrado piauiense. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 7, p. 730-738, 2012.

JONG VAN LIER, Q.; GUBIANI, P. I. Beyond the “Least Limiting Water Range”. Rethinking soil physics research in Brazil. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, 925-939.

JONG VAN LIER, Q.; LIBARDI, P. Variabilidade dos parâmetros da equação que relaciona a condutividade hidráulica com a umidade do solo no método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 4, p. 1005-1014, 1999.

JORGE, R. F.; CORÁ, J. E.; BARBOSA, J. C. Número mínimo de tensões para determinação da curva característica de retenção de água de um latossolo vermelho eutrófico sob sistema de semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1831–1840, 2010.

KARLEN, D.L.; STOTT, D. E. A framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality. In: Doran, J.W. *et al.*, (Ed.). Defining soil quality for a sustainable environment. Madison: **Soil Science Society American**. 53-72, 1994.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia: Relações solo-planta**. Piracicaba-SP, Agronômica Ceres, 1979. 262 p.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 857-867, 2002.

KLEIN, V. A.; MADALOSSO, T.; REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; VEIGA, M.; ALBUQUERQUE, J. A.; PAULETTO, E. A. Metodologias de controle de qualidade de análises granulométricas do solo. **Ciência Rural**, v. 43, n. 5, p. 850-853, 2013.

KLUTE, A.; DIRKSEN, C. Hydraulic conductivity and diffusivity: laboratory methods. In: KLUTE, A., ed. Methods of soil analysis. Part 1. 2.ed. Madison, **American Society of Agronomy**, p.687-732, 1986.

LEITE, L. F. C. *et al.*, Soil organic carbon and biological indicators in an Acrisol under tillage systems and organic management in north-eastern Brazil. **Australian Journal of Soil**

Research, v. 48, n. 3, p. 258-265, 2010.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo, EDUSP, 2012. 352p.

LIEBIG, M. A.; VARVEL, G. E.; DORAN, J. W. A simple performance-based index for assessing multiple agroecosystem functions. **Agron. J.**, 93, 313-318, 2001.

MAIA, C. M. B. F.; DEDECEK, R. A.; MALUCELLI, C. S. Identificação de repelência à água em solos sob plantios florestais. **Colombo: Embrapa Florestas**, (Embrapa Florestas. Comunicado técnico, 147), 6 p, 2005.

MARQUES, J.D.O.; TEIXEIRA, W.G.; REIS, A.M.; CRUZ JUNIOR, O.F.; MARTINS, G.C. Avaliação da condutividade hidráulica do solo saturada utilizando dois métodos de laboratório numa toposequência com diferentes coberturas vegetais no baixo amazonas. **Acta Amazônia**, Manaus, v. 38(2), p 193-206, 2008.

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.

MINGOTI, S.A., 2007. Análise de dados através de métodos de estatística multivariada. 297 p. Belo Horizonte: UFMG.

MONTEIRO, J. F. **Avaliação da qualidade do solo em diferentes sistemas de uso e manejo agrícola em ambiente tropical**. Dissertação (Mestrado) UFRB. Cruz das Almas-BA, 2012.

MOTA, L. H. S. O.; VALLADARES, G. S. Vulnerabilidade a degradação dos solos da Bacia do Acaraú, Ceará. **Revista Ciência Agronômica**, 42 (1), pp. 39-50. 2011.

MUKHOPADHYAY, S.; MASTO, R. E.; YADAV, A.; GEORGE, J.; RAM, L. C.; SHUKLA, S.P. Soil quality index for evaluation of reclaimed coal mine spoil. **Science of the Total Environment**. 542, 540–550, 2016.

NAGAHAMA, H. J.; CORTEZ, J. W.; PIMENTA, W. A.; PATROCINIO FILHO, A.P.; SOUZA, E.B. Resistência do solo a penetração em sistemas de preparo e velocidades de deslocamento do trator. **Comunicata Scientiae**, 7 (1), pp. 56-65, 2016.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL – NRCC. **Soil and water quality**: and agenda for agriculture. Washington, DC: National Academy Press, 1993. 542 p.

NIMMO, J.R., PERKINS, K. Aggregate stability and size distribution. In: DANE, J.H., TOPP, G.C. (Eds.), *Methods of Soil Analysis: Part 4 – Physical Methods*, **Soil Science Society of America** Book Series 5, SSSA, Madison, p. 317 - 328. 2002.

NORTCLIFF, S. Standardization of soil quality attributes. **Agriculture Ecosystems e Environment**, v.88, n.2, p.161-168, 2002.

PEREIRA, F. S.; ANDRIOLI, I.; PEREIRA, F. S.; OLIVEIRA, P. R.; CENTURION, J. F.; FALQUETO, R. J.; Martins, A. L. S. Qualidade física de um Latossolo Vermelho submetido a sistemas de manejo avaliado pelo índice S. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.87-95, 2011.

PREVEDELLO, J. **Dinâmica do armazenamento e da disponibilidade de água em argissolo**

sob eucalipto e campo nativo. 120 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal), Universidade Federal de Santa Maria, 2012.

REBOUÇAS, C. A. M. *et al.*, Agregação de um Cambissolo em resposta ao manejo conservacionista do solo e da Caatinga, Governador Dix- Sept Rosado-RN. **Cadernos de Agroecologia**, v. 8, n. 2, p. 1-5, 2013.

REICHARDT, K. A **Água em Sistemas Agrícolas**. São Paulo: Ed. Manole Ltda. 1990

REICHERT, J. M.; REINERT, J. M.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência e Ambiente**, v.27, p.29-48, 2003.

REINERT, D. J.; REICHERT, D. J.; VEIGA, M.; SUZUKI, L. E. A. S. Qualidade física dos solos. In: **Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água**, 16, 2006. Aracaju, Resumos... Aracaju: SBCS, 2006.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; SILVA, V. R. Propriedades físicas de solos em sistema de plantio direto irrigado. In: CARLESSO, R. *et al.*, (Ed.). **Irrigação por aspersão no Rio Grande do Sul**. Santa Maria-RS, 2001. 165 p.

REYNOLDS, W. D.; ELRICK, D. E. Constant head well permeameter (vadose zone). In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. Eds, Methods of soil analysis, part 4, physical methods, p. 844-858. **Soil Science Society of America, Inc.**, Wisconsin, 2002.

RIBEIRO, K. D.; MENEZES, S. M.; MESQUITA, M. G. B. F.; SAMPAIO, F. M. T. Propriedades físicas do solo, influenciadas pela distribuição de poros, de seis classes de solos da região de Lavras-MG. **Ciência e Agrotecnologia**. v.31, n.4, p.1167-1175. 2007.

SÁ, M. A. C; SANTOS JUNIOR, J. D. G. **Compactação do solo: consequências para o crescimento vegetal**. Planaltina. DF: Embrapa Cerrados. p. 24, 2005.

SALES, L. E. O., CARNEIRO, M. A. C., SEVERIANO, E. C., OLIVEIRA, G. C., MOZART, M. F. Qualidade física de Neossolo Quartzarênico submetido a diferentes sistemas de uso agrícola. **Ciência e Agrotecnologia**, 34 (3), pp. 667-674. 2010.

SALES, R. P.; PORTUGUAL, 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**, 47 (3), pp. 429-438, 2016.

SANTIAGO, F. S. **Avaliação da qualidade do solo em sistemas de cultivo agroecológico e convencional no semiárido do Rio Grande do Norte**. Tese (Doutorado), Engenharia Agrícola, UFRPE. Recife-PE, 2015. 175 p.

SANTOS, E. M. S. Desenvolvimento de permeâmetro para determinação da condutividade hidráulica de solos em laboratório. **Dissertação** (Mestrado em Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo) - Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE). 2020.

SANTOS, G. G. **Impacto de sistemas de integração lavoura pecuária na qualidade física do solo**. Tese (Doutorado). 122p. Goiânia: UFG, 2010.

SANTOS, G. G.; Marchão, R. L.; Silva, E. M.; Silveira, P. M.; Becquer, T. Qualidade física do solo sob sistemas de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46,

p.1339-1348, 2011a.

SCHEMBERGUE, A. *et al.*, Sistemas agroflorestais como estratégia de adaptação aos desafios das mudanças climáticas no Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 55, n. 1, p. 9-30, 2017.

SHARMA, K. L.; MANDAL, U. K.; SRINIVAS, K.; VITTAL, K. P. R.; MANDAL, B., GRACE, J. K., *et al.*, Long-term soil management effects on crop yield and soil quality in a dry land alfisol. **Soil & Tillage Research**. 83, 246–259, 2005.

SICHE, R.; AGOSTINHO, F.; ORTEGA, E.; ROMEIRO, A. Índices versus indicadores: precisões conceituais na discussão da sustentabilidade de países. **Ambiente e Sociedade, Campinas**, v.X, n.2, p.137-148. 2007.

SILVA, B. E. C. *et al.*, Propriedades físicas do solo em função de diferentes manejos de pastagem. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável**, v. 7, n. 3, p. 66-75, 2017.

SIMS, J.T., CUNNINGHAM, S.D., SUMNER, M.E. Assessing soil quality for environmental purposes: roles and challenges for soil scientists. **Journal of Environmental Quality** 26, 20–25, 1997.

SINGER, M.J.; EWING, S.S. Soil quality. In: SUMNER, M.E. (Ed.). **Handbook of soil science**. Georgia, USA: University of Georgia, p. G-271-G-298, 1999.

SOJKA, R.E.; UPCHURCH, D.R. Reservations regarding the soil quality concept; discussion. **Soil Science Society of America Journal**, v. 63, n.5, p.1039-1054, 1999.

SOUZA *et al.* Caracterização de solos em uma topoclimosequência no maciço de triunfo – sertão de pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, 34:1259-1270, 2010.

SOUZA, E. D. *et al.*, Atributos físicos de um neossolo quartzarênico e um latossolo vermelho sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, n. 11, p. 1135-1139, 2005.

SOUZA, S. *et al.*, Parâmetros físicos do solo relacionados com o avanço da frente de molhamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 17, p. 153–161, 2013.

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

TAVARES FILHO, J.; BARBOSA, G. M. C.; RIBON, A. A. Water-dispersible clay in soils treated with sewage sludge. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 34, p. 1527-1534, 2010.

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

TISDALL, J.M.; OADES, J.M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Journal Soil Science**, 33:141-163, 1982.

TOPP, G. C.; REYNOLDS, W. D.; COOK, F. J.; KIRBY, J. M.; CARTER, M. R. Physical attributes of soil quality. Em E. Gregorich e M. carter, **Soil quality for crop production and**

ecosystem health. Developments in Soil Science, v. 25, pp 21-58. New York, NY: Elsevier. 1997.

VALENTINE, T. A. *et al.*, Soil strength and macropore volume limit root elongation rates in many UK agricultural soils. **Annals of Botany**, v. 110, n. 7, p. 259-270, 2012.

WENDLING, B.; JUCKSCH, I.; MENDONÇA, E. S. e NEVES, J. C. L. Carbono orgânico e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho sob diferentes manejos. **Pesquisa Agropecuária Braileira**, p. 487-494, 2005.

WILDING, L.P.; DREES, L.R. Spatial variability and pedology. In: Wilding, L.P., Smeck, N.E., Hall, G.F. (Eds.), **Pedogenesis and Soil Taxonomy: 1. Concepts and Soil Analysis**. second ed. American Society of Agronomy, Madison, pp. 635–662, 1983.

APÊNDICES

APENDICE A – Análise descritiva para os atributos do solo nos sistemas de manejo investigados

VARIÁVEIS	SISTEMAS DE USO			
	PALMA			
	Média	Erro Padrão	Desv. Padrão	CV (%)
KsatPCC1	21,08	2,46	6,03	28,61
KsatPCC1.5	17,97	1,64	4,02	22,39
KsatPCC3	17,06	2,05	5,03	29,49
KsatPCD1	40,74	6,49	15,89	39,00
KsatPCD10	34,17	4,20	10,30	30,13
KsatPCD40	25,99	4,19	10,27	39,51
Argila Total	18,34	0,00	0,00	0,00
Areia Total	62,63	0,24	0,41	0,66
Silte	19,03	0,24	0,41	2,17
GF	14,81	3,70	6,42	43,30
>300	4,10	0,02	0,06	1,39
300-50	8,29	0,18	0,44	5,25
50-30	1,56	0,03	0,06	4,02
< 30	24,04	0,17	0,41	1,71
PT	37,91	0,21	0,50	1,33
RP	0,71	0,05	0,13	17,73
Ds	1,35	0,00	0,01	0,52
DMP	1,55	0,11	0,27	17,19
DMG	0,84	0,07	0,18	21,19
AGRI	32,25	3,61	8,85	27,44
IEA	87,36	1,54	3,77	4,31
MacroA	79,64	1,87	4,59	5,76
MicroA	17,49	0,22	0,53	3,02
POUSIO				
Ksat (PCC1)	6,09	0,93	2,28	37,50
Ksat (PCC1.5)	4,96	0,57	1,40	28,11
Ksat (PCC3)	2,79	0,39	0,95	33,99
Ksat (PCD1)	33,26	3,92	9,61	28,89
Ksat (PCD10)	35,54	4,03	9,88	27,81
Ksat (PCD40)	32,60	3,97	9,73	29,85
Argila Total	14,27	0,00	0,00	0,00
Areia Total	70,60	1,21	2,10	2,98
Silte	15,14	1,21	2,10	13,89
GF	42,86	0,00	0,00	0,00
>300	3,95	0,30	0,73	18,50
300-50	9,23	0,24	0,58	6,26
50-30	3,48	0,11	0,26	7,59
< 30	18,92	0,51	1,26	6,64
PT	36,15	0,75	1,85	5,11

RP	0,57	0,04	0,09	15,24
Ds	1,37	0,01	0,03	2,29
DMP	1,48	0,09	0,21	14,52
DMG	0,77	0,03	0,07	9,08
AGRI	32,13	2,62	6,42	19,98
IEA	90,07	0,21	0,51	0,57
MacroA	80,84	1,38	3,38	4,18
MicroA	19,33	1,34	3,28	16,98

CAATINGA PRESERVADA

Ksat (PCC1)	8,34	1,77	4,34	52,02
Ksat (PCC1.5)	7,28	1,69	4,14	56,77
Ksat (PCC3)	4,60	0,71	1,75	38,02
Ksat (PCD1)	21,41	0,10	0,24	1,11
Ksat (PCD10)	22,96	0,66	1,61	7,01
Ksat (PCD40)	16,55	2,43	5,94	35,91
Argila Total	9,51	0,68	1,18	12,37
Areia Total	74,38	1,61	2,79	3,76
Silte	16,11	1,11	1,92	11,91
GF	42,86	3,34	5,78	13,49
>300	3,71	0,15	0,37	10,07
300-50	8,70	0,50	1,23	14,17
50-30	1,59	0,06	0,16	9,95
< 30	19,79	0,44	1,07	5,41
PT	33,49	0,26	0,63	1,88
RP	0,45	0,04	0,09	20,01
Ds	1,35	0,01	0,02	1,67
DMP	1,36	0,05	0,13	9,71
DMG	0,64	0,02	0,04	5,88
AGRI	29,76	2,65	6,48	21,77
IEA	82,10	0,41	1,01	1,24
MacroA	71,69	0,59	1,44	2,01
MicroA	28,00	0,52	1,27	4,55

Ksat (PCC1) - Condutividade hidráulica saturada pelo permeâmetro de carga constante aplicando h=1,0 cca; Ksat (PCC 1.5) - Condutividade hidráulica saturada pelo permeâmetro de carga constante aplicando h=1,5 cca; Ksat (PCC3) - Condutividade hidráulica saturada pelo permeâmetro de carga constante aplicando h=3,0 cca; Ksat (PCD1) - Condutividade hidráulica saturada pelo permeâmetro de carga decrescente aplindo h=1,0 cca; Ksat (PCD10) - Condutividade hidráulica saturada pelo permeâmetro de carga decrescente aplindo h=10,0 cca; Ksat (PCD40) - Condutividade hidráulica saturada pelo permeâmetro de carga decrescente aplindo h=40,0 cca; GF – Grau de flocculação; Classes de tamanho de poros >300µm, 300-500µm, 50-300µm, < 30µm; PT – Porosidade total; RP – Resistência do solo à penetração de raízes; Ds – Densidade do solo; DMP – Diâmetro médio ponderado; DMG – Diâmetro médio geométrico; AGRI – agregados > 2mm estáveis em água; IEA – Índice de estabilidade de agregados; MacroA – macroagregados; MicroA – Microagregados.

APÊNDICE B - Índice de qualidade do solo (IQS) e contribuição dos indicadores para o IQS

Sistemas de uso	Índice de Qualidade do Solo					
	Ksat (PCD10)	Ksat (PCD40)	< 30	IEA	MicroA	IQS
Palma	0,20	0,18	0,09	0,21	0,23	0,91 ($\pm 0,024$)
Pousio	0,21	0,23	0,12	0,21	0,21	0,98 ($\pm 0,020$)
Caatinga Preservada	0,14	0,11	0,11	0,19	0,15	0,70 ($\pm 0,015$)
IQS	0,55 ($\pm 0,024$)	0,52 ($\pm 0,032$)	0,32 ($\pm 0,008$)	0,61 ($\pm 0,005$)	0,59 ($\pm 0,026$)	

Ksat (PCD10) - Condutividade hidráulica saturada pelo permeâmetro de carga decrescente aplindo h=10cm; Ksat (PCD40) - Condutividade hidráulica saturada pelo permeâmetro de carga decrescente aplindo h=40cm; Classes de tamanho de poros >300 μ m; IEA – Índice de estabilidade de agregados; MicroA – Microagregados.