



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

INDICADORES DE QUALIDADE FÍSICA DO SOLO EM LATOSSOLO
SOB DIFERENTES SISTEMAS DE USO E MANEJO

ANA CLARA BARBOSA DE SOUZA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM AGRONOMIA

BRASÍLIA-DF
DEZEMBRO/2022



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

INDICADORES DE QUALIDADE FÍSICA DO SOLO EM LATOSSOLO
SOB DIFERENTES SISTEMAS DE USO E MANEJO

ANA CLARA BARBOSA DE SOUZA

ORIENTADOR: TAIRONE PAIVA LEÃO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM AGRONOMIA

BRASÍLIA-DF
DEZEMBRO/2022

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

INDICADORES DE QUALIDADE FÍSICA DO SOLO EM LATOSSOLO
SOB DIFERENTES SISTEMAS DE USO E MANEJO

ANA CLARA BARBOSA DE SOUZA

Dissertação de mestrado apresentada à Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Brasília (UnB), como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, para obtenção do título de Mestre em Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. TAIRONE PAIVA LEÃO

BANCA EXAMINADORA:

Dr. Tairone Paiva Leão (Orientador)
(Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília)

Dr. Cícero Célio De Figueiredo
(Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília)

Dr. Marcos Aurélio Carolino de Sá
(Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Embrapa Cerrados)

FICHA CATALOGRÁFICA

Souza, Ana Clara Barbosa de

Indicadores de qualidade física do solo em latossolo sob diferentes sistemas de uso e manejo/ Ana Clara Barbosa de Souza. Orientação: Tairone Paiva Leão, Brasília, 2022.

Dissertação (Mestrado - Mestrado em Agronomia) – Universidade de Brasília / Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, 2022.

71 p.: il.

1. estrutura do solo, 2. análises visuais, 3. degradação, 4. sistemas de manejo. I. Leão, Tairone Paiva, orient. II. Título.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SOUZA, A. C. B. **INDICADORES DE QUALIDADE FÍSICA DO SOLO EM LATOSSOLO SOB DIFERENTES SISTEMAS DE USO E MANEJO.** Brasília: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, 2022. 71 p. Dissertação de Mestrado.

CESSÃO DE DIREITOS

Nome do Autor: ANA CLARA BARBOSA DE SOUZA

Título Dissertação: Indicadores de qualidade física do solo em latossolo sob diferentes sistemas de uso e manejo

Grau: Mestrado

Ano: 2022

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta monografia de graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva-se a outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Ana Clara Barbosa de Souza

E-mail: anacsouza.agro@gmail.com

Endereço: Universidade de Brasília - Campus Darcy Ribeiro, Asa Norte.

CEP: 70910-900. Brasília, DF. Brasil

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por todas as graças concedidas durante esses anos, por me dar sabedoria e perseverança mediante as adversidades.

Aos meus pais, Janete e Roilson, por todo amor e dedicação, por sempre acreditar e apoiar em todas minhas aspirações. Aos meus irmãos, Andressa, João Pedro e Yan por todo companheirismo. Aos meus avós maternos e tios, que sempre se fizeram presente e foram auxílio para todos os momentos. Obrigada por me ensinarem que família é a nossa maior riqueza!

Ao meu pai, a Emelly e ao Jhon por todo apoio e contribuição nas amostragens de solo e análises em laboratório. Sem a ajuda de vocês esse trabalho não teria acontecido. De todo meu coração, obrigada!

Aos amigos e colegas de profissão Jhon Kenedy, Thais França, Gustavo, Helen Neves, Ellen Griza, Ricardo, Luiz Flávio e Thamires por toda ajuda e incentivo, por todo aprendizado construído e compartilhado durante todos esses longos anos.

Ao meu amigo de vida Reinaldo, por estar comigo em todas minhas etapas. Sorte a minha ter sido presenteada com a sua amizade.

Aos profissionais da minha rede de apoio, em especial a minha psicóloga Sicília, por todo profissionalismo e cuidado.

Ao pesquisador Rafael Nunes, Valmir, Denes, Natalie e todos colaboradores do Setor de Solos da Embrapa Cerrados, pela amizade, apoio e partilha de experiências nesses três anos.

Ao professor José Ricardo e ao professor Cícero pelas contribuições neste trabalho.

A Universidade de Brasília e a todo corpo docente da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária por toda contribuição a minha formação.

Ao meu orientador, Tairone Leão, pelas orientações, conselhos e compreensão durante todo o processo da graduação e pós, meu muito obrigada!

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

O estudo da estrutura do solo permite avaliar as alterações que ocorrem no solo em resposta aos distintos usos e manejos ao qual está submetido. Esse diagnóstico da condição estrutural de um solo pode ser feito através de medições indiretas por propriedades físicas do solo como densidade, porosidade, resistência mecânica à penetração e outros. Outra maneira de ser mensurado é por meio das avaliações visuais, que são apontadas como metodologias semiquantitativas potenciais para avaliação da qualidade da estrutura do solo. Na literatura, uma infinidade de exames visuais para avaliação da qualidade da estrutura tem sido apresentada nos últimos dez anos. Dentre eles, o VESS (*Visual Evaluation of Soil Structure*) é mencionado como um dos mais importantes pela sua visibilidade e aplicação mundial. Recentemente no Brasil, foi desenvolvido um método de Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo (DRES), sendo uma adaptação do VESS para uso em condições tropicais e subtropicais. O DRES possui limitadas informações quanto a sua aplicabilidade em diferentes solos sob diferentes usos e manejos. Por essa razão, este estudo buscou avaliar a efetividade do DRES na avaliação da qualidade estrutural de um Latossolo sob Cerrado, pastagem, pomar de banana e semeadura direta. Foi realizado uma comparação entre os métodos DRES e VESS. A relação dos exames visuais com as propriedades físicas: densidade, porosidade total, diâmetro médio ponderado, resistência mecânica à penetração, argila dispersa em água e parâmetros da curva de retenção de água também foi avaliado. No geral, o solo da vegetação nativa, Cerrado, quando submetido aos manejos apresentados anteriormente, perdeu características de qualidade estrutural. Através da pontuação do DRES foi possível diferir os sistemas quanto a condição da qualidade da sua estrutura. O DRES também apresentou alta correlação com o método VESS. Os dados das análises visuais se relacionaram significativamente com as propriedades densidade, microporosidade, resistência mecânica à penetração e umidade de saturação. Esse resultado indica que DRES e VESS estão relacionadas as características diagnósticas e corrobora com a hipótese de que é possível avaliar modificações na estrutura de um solo sob diferentes usos e manejos por longos períodos por procedimento de diagnóstico visual.

Palavras-chave: estrutura do solo, análises visuais, degradação do solo, sistemas de manejo.

ABSTRACT

The study of soil structure makes it possible to assess the alterations that occur in the soil in response to the different uses and management to which it is submitted. This diagnosis of the structural condition of a soil can be made through indirect measurements by physical properties of the soil such as density, porosity, mechanical resistance and others. Another way to measure it is through visual assessments, which are identified as potential semi-quantitative methodologies for assessing the quality of soil structure. In the literature, a multitude of visual examinations to assess the quality of the structure have been presented in the last ten years. Among them, the VESS (Visual Evaluation of Soil Structure) is mentioned as one of the most important due to its worldwide visibility and application. Recently in Brazil, a method of Rapid Diagnosis of Soil Structure (DRES) was developed, being an adaptation of the VESS for use in tropical and subtropical conditions. DRES has limited information regarding its applicability in different soils under different uses and management. For this reason, this study sought to evaluate the effectiveness of DRES in assessing the structural quality of an Oxisol under Cerrado, pasture, banana orchard and no-tillage. A comparison was made between the DRES and VESS methods. The relationship of the visual examinations with the physical properties: density, total porosity, weighted average diameter, mechanical strength, clay dispersed in water and parameters of the water retention curve was also evaluated. In general, the soil of the native vegetation, Cerrado, when submitted to the previously presented managements, lost structural quality characteristics. Through the DRES score, it was possible to distinguish the systems regarding the condition of the quality of their structure. The DRES also showed a high correlation with the VESS method. Visual analysis data were significantly related to density, microporosity, mechanical strength and saturation moisture properties. This result indicates that DRES and VESS are related to the diagnostic characteristics and corroborates the hypothesis that it is possible to evaluate changes in the structure of a soil under different uses and managements for long periods by visual diagnostic procedure.

Keywords: soil structure, visual analyses, soil degradation, management systems.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Frequência de indicadores físicos em avaliações de qualidade do solo no Brasil. *Parâmetros hidrológicos: capacidade de campo, conteúdo de água disponível e parâmetros da curva de retenção de água. (ADA: argila dispersa em água; IEA: índice de estabilidade dos agregados; DMP: diâmetro médio ponderado; DMG: diâmetro médio geométrico). 23
- Figura 2.** Mapa de localização da área de estudo. Fonte: Google Earth, 2022. 44
- Figura 3.** Histórico das médias das precipitações mensais, temperaturas máximas e mínimas no intervalo de janeiro/2021 a janeiro/2022 (INMET, 2022). 45
- Figura 4.** Posicionamento das trincheiras em relação ao cultivo para cada sistema e dos pontos de retirada das amostras indeformadas. 49
- Figura 5.** Ilustrações das avaliações visuais a campo (DRES e VESS) da qualidade estrutural de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob diferentes usos e manejos. Da esquerda para a direita, as fotografias mostram características dos blocos, mudanças estruturais identificadas nas camadas e tipo de agregação encontrada nos sistemas (A) Cerrado, (B) banana, (C) pastagem e (D) semeadura direta sob cultivo de milho para silagem. 53
- Figura 6.** Pontuações gerais para o DRES (IQEA) e VESS (Sq) de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob diferentes sistemas de uso e manejo do solo (Cerrado; pomar de banana; pastagem, sistema de semeadura direta). Barra de erro representa o erro padrão (n=3). 54
- Figura 7.** Pontuações DRES (IQEA) e VESS (Sq) para as camadas superior (0–10 cm) e inferior (10–25 cm) de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob diferentes sistemas de uso e manejo do solo (Cerrado; Pomar de banana; Pastagem, Sistema de semeadura direta). Barra de erro representa o erro padrão (n=3). 55
- Figura 8.** Relação entre o índice VESS (*Visual Evaluation of Soil Structure*) e o Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo (DRES) para um conjunto de dados de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob diferentes usos e manejo. 56
- Figura 9.** Distribuição percentual da porosidade total do solo em macro e microporosidade para os sistemas: CER (Cerrado), BAN (Banana), PAS (Pastagem) e SSD (Sistema de semeadura direta) nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm. 60
- Figura 10.** Distribuição percentual por classe de tamanho dos agregados do solo sob os sistemas de CER (Cerrado), BAN (Banana), PAS (Pastagem) e SSD (Sistema de semeadura direta) nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm. 62
- Figura 11.** Curvas de retenção de água no solo para os sistemas de uso do solo sob CER (Cerrado); BAN (Pomar de banana); PAS (Pastagem), Sistema de semeadura direta (SSD).

Curvas apresentadas referem-se a média dos parâmetros para o modelo ajustado. Barra de erro representa o erro padrão (n=3)..... 63

Figura 12. Gráfico ACP (Análise de Componentes Principais) Biplot representando diferentes sistemas de manejo (BAN, CER, PAS e SSD) em dois principais componentes para atributos físicos do solo (ADA: argila dispersa em água; ARG: argila; DS: densidade do solo; DMP: diâmetro médio ponderado; MICROP: microporosidade; PT: porosidade total; RP: resistência mecânica à penetração; M.O.: matéria orgânica; theta_s: umidade de saturação; theta_r: umidade residual; alpha = inverso do valor de entrada de ar; n = parâmetro empírico de forma da curva) e avaliações visuais da estrutura do solo (DRES e VESS). Esses dois componentes explicaram 41,0% e 14,66% da variância total, respectivamente..... 65

Figura 13. Matriz de correlação de Spearman (parte superior) e regressões lineares (parte inferior) para atributos físicos do solo e avaliações visuais da qualidade estrutural do solo. Significância: * (p <0,05); ** (p <0,01); *** (p <0,001)..... 66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Históricos de uso do solo sob diferentes sistemas de manejo das áreas experimentais amostradas.	46
Tabela 2. Propriedades químicas do solo para os diferentes sistemas de uso e manejo das áreas experimentais amostradas nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm.	48
Tabela 3. Caracterização textural do solo para os diferentes sistemas de uso e manejo das áreas experimentais amostradas nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm.	50
Tabela 4. Valores médios dos atributos físicos, químicos e parâmetros da CRA dos solos avaliados nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm.	57
Tabela 5. Relações entre as propriedades físicas e parâmetros da CRA do solo e os exames visuais (DRES e VESS) da qualidade estrutural do solo.	64

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	14
2.1. Objetivo geral.....	14
2.2. Objetivos específicos.....	14
3. HIPÓTESE	14
4. CAPÍTULO I: REVISÃO DE LITERATURA	15
4.1. Qualidade do solo.....	15
4.2. Indicadores e índices de qualidade.....	18
4.3. Indicadores físicos.....	22
4.3.1. Textura.....	23
4.3.2. Densidade do solo	24
4.3.3. Porosidade.....	25
4.3.4. Resistência mecânica à penetração	25
4.3.5. Estabilidade de agregados.....	26
4.3.6. Curva de retenção de água.....	27
4.4. Avaliação visual da qualidade estrutural do solo.....	27
4.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	30
5. CAPÍTULO II. CORRESPONDÊNCIA ENTRE A QUALIDADE FÍSICA DO SOLO AVALIADA POR DIAGNÓSTICO VISUAL E PROPRIEDADES FÍSICAS E HÍDRICAS DO SOLO.....	41
5.1. RESUMO.....	41
5.2. ABSTRACT.....	41
5.3. INTRODUÇÃO	42
5.4. MATERIAL E MÉTODOS	44
5.4.1. Áreas de estudo	44
5.4.2. Amostragem e análises de solo	47
5.4.2.1 Avaliação visual da estrutura do solo	47
5.4.2.2 Propriedades químicas	47
5.4.2.3 Propriedades físicas	49

5.5.	Análise estatística.....	51
5.6	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	52
5.6.1	Qualidade estrutural do solo avaliada pelo DRES e VESS.....	52
5.6.2	Qualidade física do solo avaliada por parâmetros quantitativos.....	56
5.6.2.1	Argila dispersa em água.....	56
5.6.2.2	Densidade do solo.....	58
5.6.2.3	Resistência mecânica à penetração do solo.....	58
5.6.2.4	Porosidade.....	59
5.6.2.5	Estabilidade de agregados.....	60
5.6.2.6	Curva de retenção de água.....	62
5.6.3	Relações entre as pontuações da avaliação do campo visual e os valores das propriedades físicas do solo.....	63
5.7	CONCLUSÃO.....	67
5.8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	67

1. INTRODUÇÃO

São inúmeras as atribuições que o solo exerce enquanto parte da zona crítica da Terra (CHOROVER et al., 2007), sendo também um dos componentes mais influentes para o desempenho dos serviços ecossistêmicos (OSMAN, 2012). Produção de biomassa, regulação do clima, retenção e filtragem de água e nutrientes, reserva genética e habitat de organismos são algumas das funções do solo que podem ser mencionadas (ADHIKARI e HARTEMINK, 2016). O solo sendo um recurso natural não renovável, tem despertado fortes preocupações quanto a necessidade de que o seu uso e manejo sejam realizados de maneira sustentável (DORAN e PARKIN, 1996; BLUM, 2005).

Nas últimas décadas, tem se tornado ainda mais notório essas inquietações em decorrência do aumento da exposição do termo qualidade do solo (QS). Em termos gerais, a QS pode ser definida como a capacidade um solo atuar continuamente, em meio aos limites do ecossistema e uso da terra, garantindo produtividade vegetal, manutenção do equilíbrio do ambiente e promoção da saúde vegetal e animal (DORAN E PARKIN, 1994). De acordo com Ball, Hargreaves e Watson (2017), segurança alimentar e a saúde do solo continuam em declínio, demonstrando necessidade de adequação na agricultura e nos demais processos envolvendo a cadeia alimentar.

Para avaliação quantitativa da qualidade do solo é proposto o emprego de indicadores, sendo considerada uma medição indireta (ARSHAD e MARTIN, 2002). Os indicadores são atributos físicos, químicos, biológicos e ecológicos que conseguem expressar a condição do solo, e também os efeitos dos sistemas de uso e manejo aos qual está submetido (LAL, 2016; BÜNEMANN et al., 2018). Uma variedade de parâmetros são candidatos a indicadores, por isso, constantemente técnicas para seleção de um conjunto mínimo e eficiente vem sendo apontadas na literatura. Opinião de especialistas, frequência em trabalhos científicos e análises multivariadas são alguns exemplos (ANDREWS; KARLEN; MITCHELL, 2002; STEFANOSKI et al., 2016; ZUBER et al., 2017; KAZMIERCZAK et al., 2020). Outra abordagem de pesquisa, é o desenvolvimento de índices de qualidade do solo. Estes, são caracterizados pela determinação de um valor único, o qual é desenvolvido por modelos matemáticos que unem e em alguns casos, ponderam os resultados observados para um conjunto de indicadores (DORAN e PARKIN, 1994; QIN e ZHAO, 2000; QI et al., 2009).

Em circunstâncias em que se objetiva analisar a condição estrutural do solo, os parâmetros físicos são os mais representativos para a avaliação (NUNES; KARLEN; MOORMAN, 2020). É válido ressaltar que, o estudo da estrutura do solo é importante uma vez

que ela influencia diretamente processos físicos, químicos e biológicos no solo (EMMET-BOOTH et al., 2016). Densidade do solo, porosidade e resistência à penetração são os parâmetros mais frequentes em estudos objetivando examinar a qualidade física de um solo no Brasil. Alguns coeficientes específicos como, intervalo hídrico ótimo e índice S, são também sugeridos para obtenção de um valor único para mensurar a qualidade estrutural do solo (TORMENA et al., 1998; DEXTER, 2004).

Comumente esses indicadores físicos são determinados por meio de procedimentos laboratoriais e de campo, que muitas vezes são onerosos e demorados. Uma opção é o uso de funções de pedotransferência, que permitem determinar atributos mais complexos em função de outros atributos que são mais facilmente mensuráveis. Porém, em muitos casos a precisão das funções de pedotransferência pode ser questionável (BONE et al., 2010). A outra possibilidade é a adoção de avaliações visuais da estrutura do solo. Uma diversidade de métodos foi desenvolvida e adaptada em diversos países, predominantemente em regiões de climas temperados. Para climas tropicais destacam-se os trabalhos de Tavares Filho et al. (1999) e Guimarães, Ball e Tormena (2011). Um dos mais recentes métodos propostos foi o DRES (Diagnóstico rápido da estrutura do solo), que foi fundamentado nos dois procedimentos citados anteriormente. Trata-se de um procedimento de rápida e fácil execução, baseado na abertura de uma mini trincheira, e avaliação de forma, tamanho, porosidade, raízes e facilidade de quebra dos agregados, dentre outros critérios que caracterizam a estrutura do solo (RALISH et al., 2017).

Atualmente, a maior dificuldade já não está mais associada a falta de estratégias de avaliação da qualidade do solo, e sim, em determinar quais e como estes métodos devem ser empregados buscando atingir a máxima eficiência. Por exemplo, a quantidade de informações para o método visual DRES ainda são insuficientes para atestar sua aplicabilidade para o diagnóstico da qualidade estrutural. Por isso, tem-se a necessidade de avaliar o método visual DRES no estudo da qualidade estrutural do solo, tanto pelo seu desempenho individual, como também em associação a propriedades físicas.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Avaliar a viabilidade do uso de ferramentas visuais para qualificação da condição estrutural do solo em um Latossolo Vermelho-Amarelo sob diferentes sistemas de cultivo e manejo.

2.2. Objetivos específicos

1. Avaliar a efetividade das ferramentas visuais DRES e VESS na análise da qualidade estrutural do solo sob diferentes sistemas de cultivo em um Latossolo Vermelho-Amarelo.
2. Avaliar a eficiência do DRES em distinguir a qualidade estrutural de um solo sob diferentes sistemas de manejo e sua correlação com as avaliações quantitativas dos atributos físicos do solo determinados em laboratório e a campo.
3. Avaliar as alterações nos atributos físicos em relação ao Cerrado, utilizados como indicadores da física do solo, em um Latossolo Vermelho-Amarelo submetido a diferentes usos.
4. Identificar os indicadores mais adequados e de fácil aplicação para serem adotados em análises de qualidade estrutural de um solo sob distintos usos e manejo.

3. HIPÓTESE

É possível avaliar modificações da qualidade estrutural de um Latossolo Vermelho-Amarelo submetido a diferentes usos e manejos a longo prazo por procedimento de diagnóstico visual e correlacioná-lo com atributos físicos e hídricos do solo.

4. CAPÍTULO I: REVISÃO DE LITERATURA

4.1. Qualidade do solo

O solo pode ser definido como um corpo físico natural na superfície da Terra, sendo composto por componentes sólidos, líquidos e gasosos. É formado por elementos orgânicos e inorgânicos que estão estreitamente combinados por processos naturais. Resultante desta mistura e alterações ele se agrega em um corpo poroso, onde se acomodam ar e água. Sendo assim, são quatro os principais componentes do solo: matéria mineral, matéria orgânica, solução e atmosfera do solo (OSMAN, 2012). O solo é ainda visto como a interface central da zona crítica terrestre, tendo como definição de zona crítica a faixa do planeta que se estende desde a rocha inalterada até o ápice da vegetação (BANWART et al., 2019).

Esse intervalo compreendido pela zona crítica tem como principal atribuição disponibilizar os recursos que sustentam a vida (BANWART et al., 2019). O solo enquanto um dos componentes desempenha parte dessa função. Dentre os papéis do solo pode-se citar alguns que estão associados aos serviços ecossistêmicos, como viabilizar a produção de alimentos para os seres humanos; realizar a ciclagem e o armazenamento de nutrientes, sendo indispensáveis para o desenvolvimento vegetal; servir como reservatório e filtro para água; comportar uma diversidade de macro e microrganismos funcionais; ser um significativo componente para o sequestro de carbono e regulação do clima, e servir de plataforma para as atividades humanas (BLUM, 2005).

Devido ao constante crescimento populacional e com ele um aumento intensivo das demandas para atender necessidades básicas para a sobrevivência humana, como alimentos, água potável e combustíveis que são de maneira, direta ou indireta, relacionados as atividades do solo, o solo é colocado continuamente como cerne para garantir o prosseguimento das atividades antrópicas (BANWART et al., 2019).

Essa demanda pelo aumento do desempenho das funções do solo reflete como ameaça ao seu estado de equilíbrio, podendo levá-lo à condição de degradação (BALL; HARGREAVES; WATSON, 2017; BANWART et al., 2019). Compreendendo o solo como um recurso esgotável, se utilizado de forma inadequada ou mal manejado ele pode ser degradado em um intervalo relativamente curto e com restritas possibilidades de reestruturação à condição anterior (NORTCLIFF, 2002). Em resposta a esta constatação já na década de 1990 popularizou-se a utilização do termo (QS) como consequência de uma maior preocupação quanto ao uso do solo de maneira sustentável (KARLEN et al., 2001).

Não há consenso entre os especialistas quanto à definição de qualidade do solo. Um dos conceitos mais aceito e citado na literatura é o de Doran e Parkin (1994, p. 4), que descreveu como sendo “a capacidade de um solo de funcionar dentro dos limites do ecossistema e do uso da terra para sustentar a produtividade biológica, manter a qualidade ambiental e promover a saúde vegetal e animal”, sendo uma das abordagens mais amplas. Estes autores também apontaram que abordagens apenas do ponto de vista de produção agrícola são limitantes, dada a infinidade de papéis que o solo pode desempenhar no ambiente.

Ao decorrer das últimas décadas a QS foi se desenvolvendo tanto como uma estratégia educacional, como também uma ferramenta de avaliação das práticas de manejo dos recursos do solo e diretriz para tomadas de decisões quanto ao uso do mesmo. As metodologias educacionais foram realizadas com base científica com o intuito de aumentar a compreensão e conscientização das pessoas em geral, desde legisladores a produtores rurais (KARLEN et al., 2001). Fazer com que as pessoas compreendessem melhor a dinâmica do solo e sua complexidade, o interpretando como um recurso natural esgotável, era uma aposta para a desenvolvimento do uso sustentável do solo (BÜNEMANN et al., 2018). Dentre as abordagens que se encontram associadas ao contexto da QS como ferramenta educativa e com aplicação direta em campo pode-se pontuar as avaliações visuais e participativas. Quanto aos métodos de avaliação visual, foram identificados na literatura registros de sua aplicação em, pelo menos, quatro países, Nova Zelândia (SHEPHERD et al., 2000), Reino Unido (BALL; BATEY; MUNKHOLM, 2007), Brasil (GUIMARÃES; BALL; TORMENA, 2011) e Alemanha (MUELLER et al., 2007). Já para as avaliações participativas, destaca-se o trabalho de Altieri e Nicholls (2002) com adaptações de Machado e Vidal (2006) e Souza et al. (2016).

As ferramentas de avaliação são desenvolvidas com o objetivo de tornar a qualidade do solo um fator quantificável (KARLEN e STOTT, 1994). Não podendo ser efetuado de maneira direta, a maneira mais plausível encontrada para quantificação se dá por meio da escolha de indicadores (LARSON E PIERCE, 1991, 1994). Estes indicadores precisam atender alguns critérios para que sejam eficientes em expressar a condição do solo no campo mediante o manejo ao qual está submetido (DORAN, 2002). Uma abordagem mais detalhada será dada em tópicos posteriores.

A estimativa analítica dos indicadores é a abordagem mais tradicional dentre as ferramentas de avaliação. Outra proposição é a integração dos resultados desses parâmetros em um valor único. Neste caso, um princípio importante é que o método de indexação deve apresentar atributos e processos inerentes e dinâmicos do solo (KARLEN et al., 2001).

Andrews, Karlen e Cambardella (2004) apresentaram o SMAF (Soil Management Assessment Framework) como uma metodologia, que consiste basicamente em três etapas: seleção dos indicadores, interpretação e integração em um índice. Por meio de 169 regras de decisão os autores propuseram um conjunto de indicadores dentre os 81 existentes no banco de dados que estão relacionados aos processos e funções possíveis do ecossistema. O principal objetivo de uso e manejo do solo é levado em consideração para reconhecer as funções críticas associadas a ele. A interpretação do indicador compreende em transformar cada valor do conjunto observado usando uma curva de pontuação não linear, assim são obtidos valores únicos que são combinados na etapa posterior. Nesta fase são somadas as pontuações de cada indicador e dividido pela quantidade total de indicadores, em sequência esse número é multiplicado por 10, obtendo o índice aditivo que representa a avaliação geral de QS. Esse número reflete os efeitos do manejo nas atividades do solo. Foi considerado pelos autores como uma estrutura de monitoramento passível de aplicação em diferentes climas, tipos de solo e sistemas de manejo.

Na última década um considerável crescimento em escala mundial vem sendo observado quanto ao interesse em estudar QS, levando em consideração a quantidade de trabalhos e resultados expostos na literatura (KARLEN et al., 2019). Em uma busca realizada na plataforma Web of Science - Clarivate Analytics com os seguintes termos: (*assessment OR index*) AND ("*soil quality*" OR "*soil health*") AND *indicator** and *Brazil* foram obtidos 211 resultados referentes a trabalhos de QS realizados no Brasil. Destes, cerca de 80% foram publicados nos últimos dez anos, corroborando a informação apresentada por Karlen et al., (2019). Até o momento, dezembro do ano de 2022, contabilizaram-se 22 (10%) artigos publicados.

Dentre estes, Cavalcante et al. (2021) compararam a QS em quatro ambientes: área nativa conservada, área nativa degradada, produção de eucaliptos e produção convencional de mandioca, todas no estado de Pernambuco. Para isso, foram avaliados 20 parâmetros físicos do solo que posteriormente passaram por uma análise de componentes principais para seleção do conjunto mais apropriado de indicadores e também para a ponderação dos mesmos para obtenção do índice. O índice foi calculado pela equação adaptada do modelo aditivo ponderado (KARLEN e STOTT, 1994). Na camada superficial (0 – 10 cm) foi identificado maior índice para a área nativa preservada e o pior no cultivo da mandioca. A floresta de eucaliptos e a área nativa degradada ocuparam respectivamente segundo e terceiro lugar no ranking de índices. Embora o sistema de cultivo de eucalipto possa ser implantado como uma alternativa de

produção sustentável, os resultados reforçam que a preservação do sistema nativo ainda representa a melhor condição de QS.

4.2. Indicadores e índices de qualidade

Como mencionado anteriormente, desde a década de 1990 quando surgiu o interesse em avaliar a QS muitos foram os questionamentos de como isso poderia ser feito de maneira quantitativa e a possibilidade de estabelecimento de padrões de qualidade. Diferentemente do ar e da água, o solo, por não ser consumido de forma direta por humanos e animais, dificulta a determinação de padrões, além de que muitas vezes a QS é considerada um aspecto abstrato dos solos que não pode ser definida porque depende de fatores externos, como seu uso e manejo (DORAN e PARKIN, 1996).

Tendo por princípio todas as funções que o solo desempenha, e assim para buscar mantê-lo em condições satisfatórias que garantam sua utilização por gerações futuras, mensurar a qualidade do solo, ainda que por meios indiretos, é algo de extrema relevância, uma vez que, é submetido a diferentes usos e manejos. Para isso, selecionar um bom conjunto de indicadores faz-se necessário para quantificar a QS. Os indicadores são atributos do solo determináveis que podem ser quantitativos ou qualitativos e permitem representar, aferir e identificar as mudanças ocorridas num dado ecossistema (KARLEN et al., 1997; ARSHAD e MARTIN, 2002).

Considerando os incontáveis parâmetros do solo que podem ser mensurados e, para que deste amplo grupo possam ser escolhidos aqueles que melhor expressem as condições de saúde do solo, foram dispostos alguns critérios na literatura para auxiliar na seleção dos indicadores (BÜNEMANN et al., 2018). Dentre os principais requisitos a serem atendidos é mencionado a correlação que o indicador deve apresentar com as funções do solo e/ou processos do ecossistema (NORTCLIFF, 2002; BONE et al., 2012). Outro parâmetro de seleção constantemente citado é a suscetibilidade às mudanças de manejo e ao clima, em que deve ser sensível o suficiente para refletir a influência da gestão e clima no intervalo de tempo proposto para avaliação (DORAN E PARKIN, 1996; DORAN, 2002; NORTCLIFF, 2002). Do mesmo modo, a interdependência entre indicadores, possibilitando integrar processos químicos, físicos e biológicos, também é demandada, e que ainda sirvam como insumos primários necessários para a estimativa de outras propriedades ou funções do solo que são mais difíceis de medir diretamente (DORAN E PARKIN,1996). Além disso, os indicadores devem apresentar acessibilidade e facilidade de aplicação no campo, bem como uma fácil interpretação (NORTCLIFF, 2002; KARLEN et al., 2003). Ser componentes de bancos de dados de solo existentes também é um fator interessante a ser atendido, sempre que possível (DORAN E

PARKIN,1996). Dispondo de um conjunto de indicadores, é comum que estes sejam subdivididos em grupos. Uma das propostas de classificação é a divisão em indicadores estáticos e dinâmicos, baseados na sensibilidade que apresentam em curto prazo de expressar modificações quando o solo é submetido a diferentes usos e manejos (SCHWILCH et al., 2016). Outra sugestão é categorizá-los quanto a quais serviços ecossistêmicos estão relacionados (KARLEN e STOTT, 1994; ARAÚJO et al., 2012). Uma classificação mais usual é a divisão em indicadores químicos, físicos e biológicos, similar à segmentação das propriedades do solo (CARDOSO et al., 2013).

A matéria orgânica do solo é o indicador adotado quase por unanimidade nas avaliações de qualidade do solo, sendo considerado um dos mais relevantes (BUNEMANN et al., 2018). Isso porque possui uma boa correlação com o rendimento das culturas (CARDOSO et al., 2013), além de se relacionar com diversas funções do solo, como a agregação e estabilidade de agregados (OBALUM et al., 2017), capacidade de retenção de água, armazenamento de nutrientes (MURYA et al, 2020), aumento da diversidade e atividade biológica (NORRIS e CONGREVES, 2018). Seu uso potencial como indicador é sobretudo dado pela determinação do conteúdo total de carbono orgânico no solo, porém nos últimos anos alguns trabalhos vêm demonstrando o potencial de uso de suas frações mais lábeis para determinação de QS (BASTIDA et al., 2008; BETINI et al., 2014; THOMAZINI et al., 2015; BONGIORNO et al. 2019).

Os parâmetros químicos do solo estão associados com a sua capacidade de fornecer nutrientes para as plantas e de atenuar os efeitos de elementos químicos ou compostos nocivos para o meio ambiente e desenvolvimento da vegetação (CARDOSO et al., 2013). Teor de matéria orgânica (MO), pH, capacidade de troca catiônica (CTC) e disponibilidade de macronutrientes (N, K, P e Mg) são indicadores químicos frequentes nas avaliações, em específico, quando o foco de uso e manejo do solo são a produção agrícola (BASTIDA et al., 2008; KELLY; ALLAN; WILSON, 2009; BUNEMANN et al., 2018). O pH do solo foi citado como uma das medidas mais informativas que pode ser feita para determinar as propriedades químicas de um solo (THOMAS, 1996) sendo um indicador chave porque se correlaciona diretamente com a solubilidade dos nutrientes e também afeta a atividade microbiana (MAURYA et al., 2020). Dessa maneira, o uso do pH como indicador permite presumir a potencialidade de um solo na disponibilidade de nutrientes em um determinado sistema de produção (CARDOSO et al., 2013).

Alguns dos atributos biológicos que vem sendo propostos como indicadores de qualidade do solo são: o carbono da biomassa microbiana, a atividade de algumas enzimas, respiração basal e a identificação e/ou quantificação da diversidade de microrganismos e da fauna edáfica (KASCHUK; ALBERTON; HUNGRIA, 2010; VEUM et al., 2014; MURYA et al., 2020). O crescente interesse do uso de enzimas como indicadores de QS deve-se à alta responsividade que possuem quanto ao preparo e manejo, decomposição da matéria orgânica e a facilidade de avaliação da sua atividade (GARCIA-RUIZ et al., 2009; ADETUNJI et al., 2017). Há uma relevante variabilidade do conjunto de enzimas atuantes no solo, e cada uma catalisa uma reação específica. Portanto, a caracterização da fertilidade do solo e do rendimento da planta usando uma única atividade enzimática tem se mostrado limitada, e não indica a atividade microbiológica do solo (NANNIPIERI et al., 2012). Desidrogenase, β -glucosidase, arilsulfatase, fosfatase e urease são algumas das enzimas que podem ser utilizadas como potenciais indicadores de QS citadas na literatura (GARCIA-RUIZ et al., 2008; GARCIA-RUIZ et al., 2009; ADETUNJI et al., 2017; MAURYA et al., 2020). Mendes et al. (2021) enfatiza que no Brasil a arilsulfatase e β -glucosidase vem sendo adotadas em análises de rotina. Em trabalhos anteriores (MENDES et al., 2018; MENDES et al., 2019), essas enzimas indicaram alterações precoces que ocorreram no solo e estão profundamente associadas à MOS e aos rendimentos das colheitas, além disso expõe facilidade na interpretação e baixo custo.

Os indicadores físicos tem como uma de suas atribuições permitir a avaliação das condições estruturais de um solo quando submetido a diferentes sistemas de manejo. Densidade do solo, textura, porosidade, resistência à penetração e estabilidade dos agregados são alguns dos indicadores regularmente adotados (BÜNEMANN et al., 2018). Estes indicadores também possuem altas correlações com os processos hidrológicos, por exemplo, taxa de infiltração, capacidade de retenção de água, drenagem e erosão (SCHOENHOLTZ; MIEGROET; BURGER, 2000). Serão abordados em maiores detalhes em tópicos posteriores.

Como observado, são múltiplas as propriedades físicas, químicas e biológicas que estão disponíveis para serem mensuradas rotineiramente e que atendem as especificações para ser um indicador, porém considerar todos ou um grande número deles é uma impossibilidade manifestada pelos altos custos atingidos, sendo necessário realizar uma seleção de um conjunto mínimo de indicadores (CMI) (DORAN E PARKIN, 1994; BÜNEMANN et al., 2018; ZUBER et al., 2017). Inicialmente foi proposto estabelecer o CMI com base no ponto de vista de pesquisadores e especialistas (KARLEN et al., 1994). Em um outro momento, o uso de técnicas estatísticas multivariadas como análise de componentes principais apresentou-se como

alternativa para a escolha eficiente de um CMI (ANDREWS; KARLEN; MITCHELL, 2002; ZUBER et al., 2017). No estudo de Stefanoski et al. (2016) além da análise de componentes principais foi explorada uma outra possibilidade, a triagem de indicadores tendo em consideração a frequência de uso na literatura.

Mediante a determinação de um conjunto de indicadores, ainda em meados dos anos 1990, alguns autores começaram a expor como necessidade gerar uma estrutura geral para avaliação de QS, se caracterizando por instituir um valor único como resultado para a avaliação, em formato de índices (LARSON E PIERCE, 1991). Doran e Parkin (1994) propuseram um modelo aditivo, que consiste em cada indicador ser atribuído a uma prioridade ou peso que reflete sua importância relativa. Aos indicadores são dadas pontuações individuais, que variam de 0 a 1, os pesos são multiplicados e os produtos são somados para fornecer o índice de qualidade do solo (IQS). Posteriormente vários outros modelos foram propostos, tanto de adaptações do modelo aditivo, quanto de inovações. Com isso, trabalhos posteriores buscaram estudar a eficiência destes índices na avaliação de QS.

Andrews, Karlen e Mitchell (2002) em avaliação de sistemas de produção vegetal na Califórnia (Estados Unidos da América) contrastaram técnicas alternativas para seleção do CMI, como também modelos para transformação da pontuação dos indicadores e três estratégias de indexação: aditivo, aditivo ponderado e hierárquico. Nesse cenário, em que os sistemas avaliados eram duas áreas de plantio convencional (2 e 4 anos), cultivo orgânico e um manejo de entrada baixa, tanto a PCA (quanto a opinião de especialistas resultaram em um CMI igualmente representativo para a análise da QS. Quanto aos índices gerados, não encontraram diferenças entre os métodos IQS aditivo e ponderado. Os produtos do IQS hierárquico foram análogos ao IQS aditivo, porém o primeiro necessita de uma classificação dos indicadores dentro de uma hierarquia definida pelo usuário e, portanto, pode ser mais complexo. Por meio da PCA, o subconjunto de indicadores selecionados e combinados em um índice produziu informações semelhantes ao índice que utilizou todos os indicadores. Assim é, factível que um menor número de indicadores escolhidos minuciosamente e pontuados de forma não linear sendo usados em um índice simples pode fornecer as referências necessárias para a tomada de decisão no manejo solo.

Em um estudo mais recente, Rahmanipour et al. (2014) avaliaram em terras agrícolas do Irã a performance de dois IQS com duas seleções para o conjunto de indicadores, um conjunto total de indicadores (CTI) e um CMI, sendo este último composto por indicadores designados por meio de PCA. Os métodos de indexação testados foram o IQS aditivo (DORAN

e PARKIN, 1994) e o IQS Nemoro, baseado na média e na pontuação mínima do indicador, sem considerar seu peso, segundo Qin e Zhao (2000). Na comparação destes índices com base nos métodos CTI e CMI, foi considerado que o arranjo do modelo IQS aditivo acompanhado de um menor número de indicadores como a abordagem adequada para avaliação da qualidade do solo.

4.3. Indicadores físicos

Textura, densidade do solo, porosidade, estabilidade de agregados, resistência à penetração, condutividade hidráulica e capacidade de retenção de água são alguns dos atributos físicos usados como indicadores de QS (BUNEMANN et al., 2018; MAURYA et al., 2020). Os parâmetros físicos estão relacionados ao arranjo das partículas e dos poros no solo (CARDOSO et al., 2013), e estes quando mensurados nos permitem ter uma aproximação da condição estrutural do solo sob análise (NUNES; KARLEN; MOORMAN, 2020). O estudo da estrutura do solo é considerado um componente importante da avaliação da qualidade, pois controla diversos processos físicos, químicos e biológicos (EMMET-BOOTH et al., 2016).

Parte das propriedades físicas do solo são consideradas estáticas, ou seja, não apresentam alta sensibilidade ao manejo (CARDOSO et al., 2013). Não obstante, alguns desses atributos são apresentados como possíveis indicadores por serem significativos para a caracterização e entendimento do comportamento do solo mediante um determinado uso pois se correlacionam e interferem em outros parâmetros, tendo como exemplo, textura e profundidade do solo. Outras características são mais dinâmicas, e prontamente se modificam em diferentes manejos. As propriedades responsivas neste grupo são densidade, estabilidade de agregados, resistência à penetração, parâmetros hidropedológicos e outros. O emprego de frequentes medições desses indicadores permite avaliar o impacto das técnicas de uso e manejo na QS e assim, auxiliar no discernimento quanto as práticas futuras (ARSHAD; LOWERY; GROSSMAN, 1996). Nem sempre esses indícios são facilmente mensuráveis, ou até mesmo pelo alto custo, em especial para atributos físico-hídricos, alguns pesquisadores consideraram úteis a adoção de funções de pedotransferência na avaliação da QS (DORAN E PARKIN, 1996; BONE et al., 2010).

Para identificar os indicadores físicos propostos com mais frequência no Brasil nos últimos anos, foram avaliados 45 artigos publicados em periódicos até novembro do ano de 2021, em que foi identificado um conjunto de 18 propriedades físicas do solo adotadas. Os atributos físico-hídricos (capacidade de campo, capacidade de água disponível, ponto de murcha permanente) foram agrupados na categoria conteúdo de água. As avaliações de

qualidade do solo em 37 (88%) dos trabalhos foram realizados na profundidade de 0 - 20 cm. A densidade do solo e a porosidade foram os dois indicadores físicos mais frequentes nos trabalhos revisados, estando presentes em mais de 85 e 60% dos estudos, respectivamente (Figura 1).

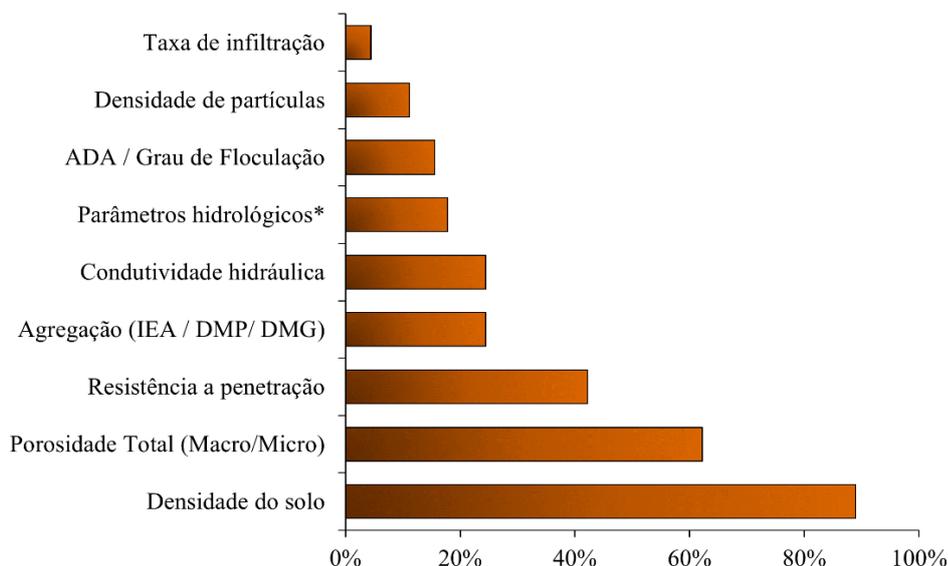


Figura 1. Frequência de indicadores físicos em avaliações de qualidade do solo no Brasil. *Parâmetros hidrológicos: capacidade de campo, conteúdo de água disponível e parâmetros da curva de retenção de água. (ADA: argila dispersa em água; IEA: índice de estabilidade dos agregados; DMP: diâmetro médio ponderado; DMG: diâmetro médio geométrico).

4.3.1. Textura

A composição granulométrica (textura) do solo é representada pela distribuição quantitativa das partículas sólidas minerais quanto ao tamanho, sendo dividida em três frações: argila, com diâmetro de partícula $<0,002$ mm, silte, com diâmetro entre 0,002 e 0,05 mm e areia com diâmetro entre 0,05 e 2 mm. As proporções dessas frações são determinadas com base na massa das partículas dentro de cada intervalo (HILLEL, 1998).

Dentre as características físicas do solo, a textura é vista como uma das mais estáveis (ARSHAD; LOWERY; GROSSMAN, 1996). Essa estabilidade faz com que a distribuição do tamanho de partículas seja relevante na descrição e classificação do solo (FERREIRA, 2010). Do mesmo modo, ela é considerada importante para a definição de categorias de uso e manejo, assim como para pesquisas de avaliação da qualidade do solo. Isso porque interfere em outras propriedades que afetam o desenvolvimento vegetal, tais como a disponibilidade de água e nutrientes (LEÃO, 2016).

De acordo com Vinhal-Freitas et al. (2017), existe uma carência de estudos envolvendo o uso e a textura do solo para avaliação da qualidade em sistemas agrícolas tropicais. Assim sendo, resolveram analisar os impactos da alteração do uso da terra em solos argilosos e franco-argilo-arenosos. De modo geral, foi observado maior concentração dos nutrientes nos solos argilosos, exceto para fósforo e magnésio. O conteúdo de carbono lábil diferiu significativamente entre as duas classes texturais, variando de 2,27 a 2,93 g kg⁻¹ e 0,66 a 1,71 g kg⁻¹ solo em solo argiloso e solo franco-argilo-arenoso respectivamente. Quanto as frações húmicas, a humina foi o principal constituinte observado nas amostras e demonstrou expressiva dependência da textura, como também do manejo do solo. Um aumento de vezes 1,83 (Cerrado), 1,68 (pastagem) e 1,36 (cana-de-açúcar) foi observado no solo argiloso em relação ao solo franco-argiloso. No que concerne as atividades das enzimas, para todos os sistemas, uma maior atividade foi atingida nos solos com maior teor de argila. Exceto para a urease, que foi similar para a cana nas duas classes.

O incremento do conteúdo da fração argila no solo proporciona um aumento da área superficial específica do solo, sendo uma das principais causas dos resultados citados anteriormente. Outros atributos do solo são influenciados pela área de superfície das argilas. Dentre elas, a capacidade de adsorção e disponibilidade de nutrientes e outras substâncias para a solução solo. Na superfície das argilas também ocorre a colonização por microrganismos, consequentemente processos microbiológicos como as atividades enzimáticas também são influenciados (WEIL e BRADY, 2017).

4.3.2. Densidade do solo

A densidade do solo (DS) corresponde à massa de solo seco por unidade de volume de solo. Quando um solo é submetido a inadequadas práticas de manejo, como excessivo pisoteio animal, tráfego de máquinas e cultivo intensivo, pode apresentar um aumento da sua densidade, indicando um possível estado de compactação (REINERT et al., 2008). Conforme observado por Cherubin et al. (2015), em um Latossolo Vermelho submetido a três distintos sistemas de manejo: plantio direto, escarificação e cultivo mínimo, com diferentes estratégias de fertilização (mineral e orgânica), constataram aumento dos valores de DS para todos os tratamentos em relação ao solo sob mata nativa. Na camada superficial (0 - 10 cm), os valores médios para a densidade ficaram entre 1,40 a 1,51 g cm⁻³, valores apontados pelos autores como limitantes para o desenvolvimento radicular de plantas cultivadas em solos argilosos.

4.3.3. Porosidade

A porosidade total do solo é representada pelo volume total do solo ocupado por poros, que por sua vez, podem ser ocupados por gás ou água (INDORIA; SHARMA; REDDY, 2020). A compreensão do sistema poroso é importante para avaliações do armazenamento e fluxo de água e gases no solo, do crescimento radicular das plantas, bem como também em análises de resistência mecânica à penetração do solo. Para isso, além da porosidade total, é importante conhecer o arranjo dos tamanhos dos poros no solo (KAY e VANDENBYGAART, 2002). A distribuição dos poros pode ser dada pela subdivisão em macroporos e microporos, os quais estão estreitamente relacionados a drenagem e aeração do solo, e a retenção de água, respectivamente (LIPIEC et al., 2006; FERREIRA, 2010). Os resultados da análise da porosidade podem demonstrar indícios da existência de compactação, sendo um atributo bastante influenciado pelo uso e manejo dado ao solo. Segundo Kazmierczak et al. (2020), a microporosidade (Mic) foi identificada como a propriedade física com maior sensibilidade às alterações às quais o solo foi submetido. Os tratamentos avaliados foram um sistema de plantio direto, plantio convencional e um sistema de cultivo mínimo, com mais de 30 anos, em um Latossolo Vermelho muito argiloso. O estudo buscava identificar os atributos físicos e químicos do solo que discriminam os sistemas de preparo do solo e assim, poder ser usados como indicadores para avaliações da QS. Além da alta correlação, a Mic demonstrou-se um indicador mais estável. No sistema de plantio direto, para a camada analisada (0 – 10 cm), foram identificados os maiores valores de Mic em comparação aos outros sistemas. O não revolvimento do solo explica esse aumento da Mic e uma redução da macroporosidade nesse sistema de manejo, podendo sinalizar uma possível compactação da superfície do solo. Cavalieri et al. (2009) apresentaram resultados semelhantes em análise de um sistema plantio direto em longo prazo.

4.3.4. Resistência mecânica à penetração

A resistência mecânica de um solo é descrita por Cairns et al. (2011) como o “resultado de forças coesivas entre as partículas individuais do solo e a resistência ao atrito encontrada por partículas que são forçadas a deslizar umas sobre as outras ou escapar de posições entrelaçadas, a fim de abrir caminho para o crescimento de raízes”. Por apresentar sensibilidade a mudanças de preparo do solo (TORMENA et al., 2002), ela tem sido levada em consideração como um indicador para a avaliação da qualidade estrutural do solo (LEÃO et al., 2006). A resistência mecânica à penetração (RP) pode ser mensurada por meio do uso de penetrógrafo ou penetrômetro, e o resultado pode ser usado para auxiliar na identificação de camadas do solo

compactadas (REICHERT et al., 2010). O conteúdo de água no solo e sua densidade devem ser integrados a interpretação da avaliação de RP, pois são parâmetros interdependentes (TORMENA et al., 2002; BLAINSKI et al., 2008). A associação desses parâmetros pode ser efetuada por meio do uso de modelos matemáticos dispostos na literatura (BUSSCHER, 1990; LEÃO e SILVA, 2006; LEÃO, 2019).

4.3.5. Estabilidade de agregados

A formação de um agregado ocorre quando partículas minerais (argila, silte e areia) e compostos orgânicos do solo agrupam-se devido a diferentes forças e escalas, sendo mais fortes que a força de união entre partículas adjacentes (WEIL e BRADY, 2017). Assim, a agregação do solo se dá por meio da união de agregados de distintos tamanhos que se mantêm interligados por meio de elementos cimentantes, de natureza orgânica e inorgânica (AMÉZKETA, 1999). É importante ainda ressaltar que a floculação da argila é um requisito importante para ocorrência da formação e estabilização dos agregados (FERREIRA, 2010). O arranjo dos agregados define o sistema poroso, que por conseguinte controla a aeração, retenção e fluxo da água no solo (CHIEZA et al., 2013). O propósito de se analisar a estabilidade de agregados é descrever o comportamento do solo quanto à sua tolerância à aplicação de forças externas, geralmente pela atividade da água, vento e manejo (NIMMO e PERKINS, 2002).

Os procedimentos de avaliação são dados pela análise da distribuição dos agregados por tamanho, sendo a interpretação dos seus resultados dada por meio de índices, tendo como exemplo, o diâmetro médio geométrico e o diâmetro médio ponderado (TORRES et al., 2014). A avaliação da estabilidade estrutural por meio da determinação do diâmetro médio ponderado foi proposta por Arshad e Cohen (1992) como um dos atributos físicos que pode ser adotado para análise da QS.

No estudo realizado por Balota et al. (2015) foi avaliado a estabilidade dos agregados em um Latossolo Vermelho de três sistemas: cultivo perene (café), plantio convencional e plantio direto de grãos em comparação a floresta nativa, sendo estes ensaios de 24 anos de duração. Os valores mais altos, tanto para o diâmetro correspondente ao peso médio, como também para o índice de estabilidade, foram identificados para a floresta nativa e plantio direto, enquanto os resultados mais baixos para o sistema convencional. Os autores explicam esta resposta com base no incremento de carbono orgânico no solo, por consequência, um aumento da atividade microbiana que proporcionou acréscimo de substâncias orgânicas para ligação entre partículas e domínios.

4.3.6. Curva de retenção de água

A curva de retenção de água (CRA) é dada pela relação entre o potencial mátrico e o conteúdo de água no solo e, representa a aptidão do solo para armazenar água em diferentes tensões (SILVA et al., 2010). Como mencionado anteriormente, o arranjo e distribuição dos poros por tamanho controla a aeração e armazenamento de água no solo, sendo assim a porosidade uma propriedade altamente relacionada a capacidade de um solo reter água. Além disso, textura e agregação também são atributos influentes nas funções hidráulicas do solo (HILLEL, 1998; KUTÍLEK, 2004). Para que um sistema agrícola seja considerado sustentável ele precisa preservar a disponibilidade hídrica do solo em níveis suficientes para atender o crescimento e desenvolvimento de plantas, bem como a manutenção dos processos químicos e biológicos. Dentre as propostas para melhor compreensão da qualidade estrutural do solo por meio da CRA estão o uso de métodos, como o intervalo hídrico ótimo e índice S (TORMENA et al., 1998; DEXTER 2004). O IHO define uma faixa de conteúdo de água do solo em que as limitações para o crescimento da planta são mínimas, sendo determinado a partir da CRA e da curva de RP em função da densidade do solo e umidade volumétrica (TORMENA et al., 1998; SILVA et al., 2011; FIDALSKI et al., 2013). O índice S é determinado pelo ponto de inflexão da CRA, em que a observação de maiores valores de inclinação é interpretada como uma melhor distribuição da geometria de poros no solo, próprio de um estado adequado da estrutura e funcionamento físico do solo (DEXTER, 2004; MAIA, 2011; SILVA et al., 2011). Foram adotados em vários estudos de avaliação da qualidade do solo para avaliação do efeito de diferentes sistemas de uso e manejo nas propriedades físicas (ARAÚJO et al., 2004; LEÃO et al., 2006; SILVA et al., 2011; MAIA, 2011; FIDALSKI et al., 2013; LEÃO, 2019; CAVIGLIONE, 2018; SERAFIM et al., 2019).

4.4. Avaliação visual da qualidade estrutural do solo

A organização das partículas do solo e dos poros existentes entre elas, incluindo o tamanho, a forma e arranjo dos agregados descreve a estrutura do solo (WEIL e BRADY, 2017). Existem duas abordagens possíveis para o estudo da estrutura do solo: morfogenética e a física. Quanto a morfogenética, busca-se descrever a condição estrutural do solo, enquanto a física considera as suas funcionalidades (FERREIRA, 2010). Como citado em tópicos anteriores, para a avaliação da qualidade do solo, a estrutura é um parâmetro essencial, dado o grande número de processos que influencia e por expressar claramente os principais efeitos da antropização (EMMET-BOOTH et al., 2016; RALISH et al., 2017). Dentre os processos, podemos citar a

retenção e infiltração de água, trocas gasosas, dinâmica da matéria orgânica e de nutrientes, desenvolvimento do sistema radicular e a susceptibilidade à erosão (RABOT et al., 2018).

Além das avaliações tradicionais de laboratório para análise da estrutura do solo, diversas técnicas de avaliação visual vêm sendo propostas nas últimas décadas (GUIMARÃES; BALL; TORMENA, 2011; EMMET-BOOTH et al., 2016). Se conduzidas de forma correta as análises laboratoriais são precisas e um importante recurso para gestão e estudo do manejo do solo, porém em algumas situações não são a opção mais adequada, tendo em consideração tempo e o custo demandado (NIERO et al., 2010). Em particular, para planejamento agrícola, técnicas de rápida avaliação e baixo custo são requeridas tanto para identificar sistemas de manejos de alto rendimento, como também seu nível de conservação ambiental e efeito no ecossistema (AMADO et al., 2007), requisitos que podem ser observados em métodos visuais de avaliação.

A avaliação visual da estrutura do solo não é uma tecnologia recente, visto que se encontra registros na literatura desde a década de 1940, como a técnica proposta por Görbing (1947). O método de diagnóstico *Spade*, proposto pelo autor, tinha por objetivo avaliar os impactos da antropização na estrutura do solo em relação ao crescimento da planta de maneira qualitativa. Para isso os critérios levados em consideração são a forma e o tamanho do agregado, porosidade e enraizamento até a profundidade de 30 cm. Com um tempo de execução estimado de até 90 minutos pelos usuários, se pretendia alcançar técnicos e agricultores. Posteriormente, foi proposto por Peerlkamp (1959) o primeiro método de avaliação visual com uma perspectiva quantitativa. Neste caso, seu critério de estudo era analisar a estrutura em função da fertilidade, resumido em uma pontuação única. Tamanho e distribuição dos agregados, resistência, porosidade, sistema radicular e dispersão do solo concebia o conjunto de medidas para avaliação. Além de técnicos e agricultores, a utilização por pesquisadores era ambicionada, em um intervalo de realização de até 30 minutos.

As duas propostas apresentadas anteriormente se enquadram como métodos de pá, caracterizado pela exposição manual de agregados, e avalia a condição estrutural até 50 cm de profundidade. Outros procedimentos que podem ser abordados nessa classificação são: Werner e Thamërt (1989), Munkholm (2000), Shepherd (2000), Ball e Douglas (2003), Ball, Batey e Munkholm (2007) e Guimarães, Ball e Tormena (2011). Outra categoria são os métodos de perfil, em que a análise de perfis de solo é feita até 1,5 m de profundidade em trincheiras, comumente escavadas utilizando máquinas. O primeiro estudo descrito foi por Henin et al. (1960), com posteriores adaptações por Batey (2000), Roger-Estrade et al. (2004) e Peigné et

al. (2013). A metodologia é baseada na observação da morfologia do solo com divisão do volume conforme a identificação de diferentes níveis de antropização, em profundidade e lateralmente, observando formato, tamanho, arranjo e resistência dos agregados, presença ou ausência de poros visíveis, entre outros fatores. Para ambientes tropicais destaca-se o trabalho de Tavares Filho et al. (1999).

O VESS (*Visual Evaluation of Soil Structure*) de Ball, Batey e Munkholm (2007) e adaptado por Guimarães, Ball e Tormena (2011) é compreendido como uma abordagem rápida, objetiva, e fácil de ser ensinada, sendo uma das metodologias mais amplamente utilizada. Consiste na extração de uma fatia não perturbada do solo, com a ajuda de uma pá de corte reto, nas dimensões de aproximadamente 25 cm de profundidade, 20 cm de largura e 10 cm de espessura. Em seguida, manualmente desagrega-se o bloco em fragmentos menores respeitando os limites naturais entre os agregados. Nestes são observados sua forma, porosidade, raízes e facilidade de quebra, e comparativamente as imagens da carta de avaliação lhe são atribuídas notas que compõem a interpretação da qualidade estrutural do perfil.

RALISCH et al. (2017) propuseram o Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo (DRES), adaptado do VESS e do método do Perfil Cultural (TAVARES FILHO, 1999), sendo também um método para qualificar a estrutura da camada superficial (até 25 cm) do solo. Além dos critérios avaliados no VESS, também são observados a presença ou não de feições de compactação ou outro gênero de degradação do solo, forma e orientação das fissuras, rugosidade das faces de ruptura, distribuição e aspecto do sistema radicular, como também indícios de atividade biológica. Uma pontuação é atribuída às camadas identificadas, variando de 1 a 6, onde a pontuação máxima indica uma boa condição da estrutura, enquanto a mínima representa um alto índice de degradação. Com a obtenção dessa pontuação e a determinação da espessura das camadas é possível calcular o Índice de Qualidade Estrutural do solo da Amostra (IQEA), por meio da equação (1). O IQEA corresponde à média das notas atribuídas às camadas, ponderada pela espessura das mesmas.

$$IQEA = \frac{(E_{c1} \times Q_{ec1}) + (E_{c2} \times Q_{ec2}) + (E_{c3} \times Q_{ec3})}{E_{total}} \quad (1)$$

onde:

IQEA = índice de qualidade estrutural do solo da amostra;

Ec = espessura de cada camada, em cm (o número de camadas pode variar de 1 a 3);

Qec = nota de qualidade estrutural atribuída a cada camada;

Ettotal = espessura/profundidade total da amostra (25 cm).

Em Valani, Vezzani e Cavalieri-Polizeli (2020) e Nunes et al. (2020) o DRES é apontado como uma possibilidade para avaliação da qualidade estrutural do solo, considerando como uma possível ferramenta para a identificação de alterações no solo e tomadas de decisões quanto a necessidade de readequação do sistema de manejo.

4.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADETUNJI, A.T.; LEWU, F.B.; MULIDZI, R.; NCUBE, B. The biological activities of β -glucosidase, phosphatase and urease as soil quality indicators: a review. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 17, n. 3, p. 794-807, set. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4067/s0718-95162017000300018>.

ADHIKARI, K.; HARTEMINK, A. Linking soils to ecosystem services — A global review. **Geoderma**, v. 262, p. 101-111, jan. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.009>.

ALTIERI M.A.; NICHOLLS, C.I. Un método agroecológico rápido para la evaluación de la sostenibilidad de cafetales. **Manejo integrado de plagas y agroecología**, Costa Rica, v.64, p. 17-64, 2002.

AMADO, T.; CONCEIÇÃO, P. C.; BAYER, C.; ELTZ, F. Qualidade do solo avaliada pelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 1, p. 109-121, fev. 2007. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832007000100012>

AMÉZKETA, E. Soil Aggregate Stability: a review. **Journal of Sustainable Agriculture**, v. 14, n. 2-3, p. 83-151, 16 jul. 1999. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1300/j064v14n02_08.

ANDREWS, S.; KARLEN, D.L.; MITCHELL, J.P. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 90, n. 1, p. 25-45, jun. 2002. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1016/s0167-8809\(01\)00174-8](http://dx.doi.org/10.1016/s0167-8809(01)00174-8).

ANDREWS, S.S.; KARLEN, D.L.; CAMBARDELLA, C.A. The Soil Management Assessment Framework. **Soil Science Society of America Journal**, v. 68, n. 6, p. 1945-1962, nov. 2004. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2004.1945>.

ARAÚJO, E.; KER, J.; NEVES, J.; LANI, J. L. Qualidade do solo: conceitos, indicadores e avaliação. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, v. 5, n. 1, p. 187-206, 30 abr. 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5777/paet.v5.n1.12>.

ARSHAD, M. A.; LOWERY, B.; GROSSMAN, B. Physical Tests for Monitoring Soil Quality. In: DORAN, John W.; JONES, Alice J. **Methods for Assessing Soil Quality**. 49. ed. Madison: Soil Science Society of America, 1996. Cap. 7. p. 123 – 141. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2136/sssaspecpub49.c7>.

ARSHAD, M.A.; COEN, G.M. Characterization of soil quality: physical and chemical criteria. **American Journal of Alternative Agriculture**, v. 7, n. 1-2, p. 25-31, jun. 1992. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1017/s0889189300004410>.

ARSHAD, M.A.; MARTIN, S. Identifying critical limits for soil quality indicators in agro-ecosystems. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 88, p. 153-160, 2002.

BALL, B. C.; BATEY, T.; MUNKHOLM, L. J. Field assessment of soil structural quality – a development of the Peerlkamp test. **Soil Use and Management**, v. 23, n. 4, p. 329-337, dez. 2007. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1475-2743.2007.00102.x>

BALL, B. C.; DOUGLAS, J.T. A simple procedure for assessing soil structural, rooting and surface conditions. **Soil Use and Management**, v. 19, n. 1, p. 50-56, 1 mar. 2003. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1079/sum2002166>.

BALL, B. C.; HARGREAVES, P. R.; WATSON, C. A. A framework of connections between soil and people can help improve sustainability of the food system and soil functions. **Ambio**, v. 47, n. 3, p. 269-283, 24 nov. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s13280-017-0965-z>.

BANWART, S. A.; NIKOLAIDIS, N. P.; ZHU, Y.; PEACOCK, C. L.; SPARKS, D. L. Soil Functions: connecting earth's critical zone. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, v. 47, n. 1, p. 333-359, 30 maio 2019. Annual Reviews. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-earth-063016-020544>.

BASTIDA, F.; ZSOLNAY, A.; HERNÁNDEZ, T.; GARCÍA, C. Past, present and future of soil quality indices: a biological perspective. **Geoderma**, v. 147, n. 3-4, p. 159-171, out. 2008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.08.007>.

BERTINI, S. C. B.; AZEVEDO, L. C. B.; MENDES, I. C.; CARDOSO, E. J. B. Hierarchical partitioning for selection of microbial and chemical indicators of soil quality. **Pedobiologia**, v. 57, n. 4-6, p. 293-301, nov. 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pedobi.2014.06.001>.

BLAINSKI, E.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; GUIMARÃES, R. M. L. Quantificação da degradação física do solo por meio da curva de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 3, p. 975-983, jun. 2008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832008000300007>.

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis: Part 1: physical and mineralogical methods**. 2nd ed. Madison: Soil Science Society of America, 1986. p. 363-375.

BLUM, W. E. H. Functions of Soil for Society and the Environment. **Reviews In Environmental Science and Bio/Technology**, v. 4, n. 3, p. 75-79, ago. 2005. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s11157-005-2236-x>.

BONE, J.; BARRACLOUGH, D.; EGGLETON, P.; HEAD, M.; JONES, D. T.; VOULVOULIS, N. Prioritising soil quality assessment through the screening of sites: the use of publicly collected data. **Land Degradation & Development**, v. 25, n. 3, p. 251-266, 26 jan. 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/ldr.2138>.

BONE, J.; HEAD, M.; BARRACLOUGH, D.; ARCHER, M.; SCHEIB, C.; FLIGHT, D.; VOULVOULIS, N. Soil quality assessment under emerging regulatory requirements. **Environment International**, v. 36, n. 6, p. 609-622, ago. 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2010.04.010>.

BONGIORNO, G.; BÜNEMANN, E. K.; OGUEJIOFOR, C. U.; MEIER, J.; GORT, G.; COMANS, R.; MÄDER, P.; BRUSSAARD, L.; GOEDE, R. Sensitivity of labile carbon fractions to tillage and organic matter management and their potential as comprehensive soil quality indicators across pedoclimatic conditions in Europe. **Ecological Indicators**, v. 99, p. 38-50, abr. 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.12.008>.

BÜNEMANN, E. K.; BONGIORNO, G.; BAI, Z.; CREAMER, R. E.; DEYN, G.; GOEDE, R.; FLESKENS, L.; GEISSEN, V.; KUYPER, T. W.; MÄDER, P. Soil quality – A critical review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 120, p. 105-125, maio 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>

BUSSCHER, W. J. ADJUSTMENT OF FLAT-TIPPED PENETROMETER RESISTANCE DATA TO A COMMON WATER CONTENT. **Transactions of the Asae**, v. 33, n. 2, p. 0519-0524, 1990. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.13031/2013.31360>.

CAIRNS, J.E.; IMPA, S.M.; O'TOOLE, J.C.; JAGADISH, S.V.K.; PRICE, A.H. Influence of the soil physical environment on rice (*Oryza sativa* L.) response to drought stress and its implications for drought research. **Field Crops Research**, v. 121, n. 3, p. 303-310, abr. 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2011.01.012>.

CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. A. S. **Métodos de Análise Química, Mineralógica e Física de Solos do Instituto Agrônomo de Campinas**. 106. ed. Campinas: Instituto Agrônomo, 2009. 77 p.

CARDOSO, E. J. B. N.; VASCONCELLOS, R. L. F.; BINI, D.; MIYAUCHI, M. Y. H.; SANTOS, C. A.; ALVES, P. R. L.; PAULA, A. M.; NAKATANI, A. S.; PEREIRA, J. M.; NOGUEIRA, M. A. Soil health: looking for suitable indicators. what should be considered to assess the effects of use and management on soil health?. **Scientia Agricola**, v. 70, n. 4, p. 274-289, ago. 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-9016201300040000>

CARPENEDO, V.; MIELNICZUK, J. Estado de agregação e qualidade de agregados de Latossolos roxos, submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 14, n. 1, p. 99-105, 1990.

CAVALCANTE, D. M.; SILVA, A. P. F.; ALMEIDA, B. G.; FREIRE, F. J.; SILVA, T. H. S.; CAVALCANTE, F. M. S. Physical soil quality indicators for environmental assessment and agricultural potential of Oxisols under different land uses in the Araripe Plateau, Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 209, p. 104951, maio 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2021.104951>.

CAVALIERI, K. M. V.; SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; LEÃO, T. P.; DEXTER, A. R.; HÅKANSSON, I. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a Rhodic Ferrasol in Paraná, Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 103, n. 1, p. 158-164, abr. 2009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2008.10.014>.

CAVIGLIONE, J. H. S-Index as an indicator of physical quality in soils of the Paraná state. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 7, p. 458-464, jul. 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n7p458-464>.

CHERUBIN, M. R.; EITELWEIN, M. T.; FABBRIS, C.; WEIRICH, S. W.; SILVA, R. F.; SILVA, V. R.; BASSO, C. J. QUALIDADE FÍSICA, QUÍMICA E BIOLÓGICA DE UM LATOSSOLO COM DIFERENTES MANEJOS E FERTILIZANTES. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 2, p. 615-625, abr. 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/01000683rbc20140462>.

CHIEZA, E.; LOVATO, T.; ARAÚJO, E. S.; TONIN, J. Propriedades físicas do solo em área sob milho em monocultivo ou consorciado com leguminosas de verão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 5, p. 1393-1401, out. 2013. Disponível em: [Http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832013000500028](http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832013000500028).

CHOROVER, J.; KRETZSCHMAR, R.; GARCIA-PICHEL, F.; SPARKS, D. L. Soil Biogeochemical Processes within the Critical Zone. **Elements**, v. 3, n. 5, p. 321-326, 1 out. 2007. Mineralogical Society of America. Disponível: <http://dx.doi.org/10.2113/gselements.3.5.321>.

DANE, J. H.; HOPMANS, Jan W. Water Retention and Storage. In: DANE, Jacob H.; TOPP, G. Clarke (ed.). **Methods of Soil Analysis: part 4 physical methods**. 5. ed. Madison: Soil Science Society of America Book Series, 2002. Cap. 33. p. 671-674.

DANIELSON, R. E.; SUTHERLAND, P. L. Porosity. In: KLUTE, Arnold (ed.). **METHODS OF SOIL ANALYSIS Part 1: physical and mineralogical methods**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. Cap. 18. p. 443-462.

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, jun. 2004. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.09.004>.

DORAN, J. W. Soil health and global sustainability: translating science into practice. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 88, p. 119-127, 2002.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and Assessing Soil Quality. **Sssa Special Publications**, p. 1-21, 1994. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2136/sssaspecpub35.c1>.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Quantitative Indicators of Soil Quality: a minimum data set. **Sssa Special Publications**, p. 25-37, 1996. Soil Science Society of America. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaspecpub49.c2>.

EMMET-BOOTH, J. P.; FORRISTAL, P. D.; FENTON, O.; BALL, B. C.; HOLDEN, N. M. A review of visual soil evaluation techniques for soil structure. **Soil Use and Management**, v. 32, n. 4, p. 623-634, 4 out. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1111/sum.12300>.

FERREIRA, M. M. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO. In: VAN LIER, Quirijn de Jong (ed.). **Física do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. Cap. 1. p. 1-27.

FIDALSKI, J.; TORMENA, C. A.; ALVES, S. J. Intervalo hídrico ótimo de um latossolo vermelho distrófico, após o primeiro período de pastejo contínuo de *brachiaria ruziziensis*, em sistema integração lavoura-pecuária. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 3, p. 775-783, jun. 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832013000300024>.

GARCÍA-RUIZ, R.; OCHOA, V.; HINOJOSA, M. B.; CARREIRA, J. A. Suitability of enzyme activities for the monitoring of soil quality improvement in organic agricultural systems. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 40, n. 9, p. 2137-2145, set. 2008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.03.023>.

GARCÍA-RUIZ, R.; OCHOA, V.; VIÑEGLA, B.; HINOJOSA, M.B.; PEÑA-SANTIAGO, R.; LIÉBANAS, G.; LINARES, J.C.; CARREIRA, J.A. Soil enzymes, nematode community and selected physico-chemical properties as soil quality indicators in organic and conventional olive oil farming: influence of seasonality and site features. **Applied Soil Ecology**, v. 41, n. 3, p. 305-314, mar. 2009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2008.12.004>.

GEE, G. W.; OR, D. Particle size analysis. In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. (Ed.). **Methods of soil analysis: Part 4: physical methods**. Madison: Soil Science Society of America, 2002. p. 255-293.

GÖRBING, J. Die grundlagen der gare im praktischen ackerbau, Band II. Landbuch- Verlag G.M.B.H, Hannover. 1947.

GUIMARÃES, R. M. L.; BALL, B. C.; TORMENA, C. A. Improvements in the visual evaluation of soil structure. **Soil Use and Management**, v. 27, n. 3, p. 395-403, jun. 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1475-2743.2011.00354.x>.

GUIMARÃES, R.M.L.; BALL, B.C.; TORMENA, C.A.; GIAROLA, N.F.B.; SILVA, Á.P. Relating visual evaluation of soil structure to other physical properties in soils of contrasting texture and management. **Soil And Tillage Research**, v. 127, p. 92-99, mar. 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2012.01.020>.

HENIN, S.; FEODOROFF, A.; GRAS, R.; MONNIER, G. **Le profil cultural: Principes de physique du sol**. Paris, Masson, 1960. 320p.

HILLEL, Daniel. **Environmental Soil Physics**. San Diego: Academic Press, 1998. 800 p.

INDORIA, A. K.; SHARMA, K. L.; REDDY, K. S. Hydraulic properties of soil under warming climate. **Climate Change and Soil Interactions**, p. 473-508, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-818032-7.00018-7>.

KARLEN, D. L., STOTT, D. E. A framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality. In: DORAN, J. W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. (Eds.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Wisconsin: Madison, Soil Science Society of America, 1994. p. 53-72.

KARLEN, D. L.; ANDREWS, S. S.; DORAN, J. W. Soil quality: Current concepts and applications. **Advances in Agronomy**, v. 74, p. 1-40, 2001.

KARLEN, D. L.; DITZLER, C. A.; ANDREWS, S. S. Soil quality: why and how? **Geoderma**, v. 114, n. 3-4, p. 145-156, jun. 2003. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1016/s0016-7061\(03\)00039-9](http://dx.doi.org/10.1016/s0016-7061(03)00039-9).

KARLEN, D. L.; MAUSBACH, M. J.; DORAN, J. W.; CLINE, R. G.; HARRIS, R. F.; SCHUMAN, G. E. Soil Quality: a concept, definition, and framework for evaluation (a guest editorial). **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, n. 1, p. 4-10, jan. 1997. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100010001x>.

KARLEN, D. L.; VEUM, K. S.; A SUDDUTH, K.; OBRYCKI, J.F.; NUNES, M. R. Soil health assessment: past accomplishments, current activities, and future opportunities. **Soil and Tillage Research**, v. 195, p. 104365, dez. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2019.104365>.

KARLEN, D.L.; WOLLENHAUPT, N.C.; ERBACH, D.C.; BERRY, E.C.; SWAN, J.B.; EASH, N.s.; JORDAHL, J.L. Crop residue effects on soil quality following 10-years of no-till corn. **Soil and Tillage Research**, v. 31, n. 2-3, p. 149-167, ago. 1994. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1016/0167-1987\(94\)90077-9](http://dx.doi.org/10.1016/0167-1987(94)90077-9).

KASCHUK, G.; ALBERTON, O.; HUNGRIA, M. Three decades of soil microbial biomass studies in Brazilian ecosystems: lessons learned about soil quality and indications for improving sustainability. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 42, n. 1, p. 1-13, jan. 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.08.020>.

KAY, B.D; VANDENBYGAART, A.J. Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter. **Soil and Tillage Research**, v. 66, n. 2, p. 107-118, jul. 2002. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1016/s0167-1987\(02\)00019-3](http://dx.doi.org/10.1016/s0167-1987(02)00019-3).

KAZMIERCZAK, R.; GIAROLA, N. F. B.; RIFERTE, F. B.; SANTOS, J. B.; FOGAÇA, A. M.; CARPINELLI, S. Selection of Indicators to Discriminate Soil Tillage Systems and to Assess Soil Quality in a Red Latosol. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 63, n. 1, p. 1-13, fev. 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/1678-4324-2020190489>.

KELLY, B.; ALLAN, C.; WILSON, B. P. Soil indicators and their use by farmers in the Billabong Catchment, southern New South Wales. **Soil Research**, v. 47, n. 2, p. 234, 2009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1071/sr08033>.

KUTÍLEK, M. Soil hydraulic properties as related to soil structure. **Soil and Tillage Research**, v. 79, n. 2, p. 175-184, dez. 2004. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2004.07.006>.

LARSON, W. E.; PIERCE, F. J. The Dynamics of Soil Quality as a Measure of Sustainable Management. **Sssa Special Publications**, p. 37-51, 1994. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2136/sssaspecpub35.c3>.

LEÃO, T. P. Particle size distribution of Oxisols in Brazil. **Geoderma Regional**, v. 7, n. 2, p. 216-222, jun. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geodrs.2016.04.003>.

LEÃO, T. P.; SILVA, A. P. A statistical basis for selecting parameters for the evaluation of soil penetration resistance. **Scientia Agricola**, v. 63, n. 6, p. 552-557, dez. 2006. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-90162006000600007>.

LEÃO, T.P. Water retention and penetration resistance equations for the least limiting water range. **Scientia Agricola**, v. 76, n. 2, p. 172-178, abr. 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/1678-992x-2017-0280>.

LEÃO, T.P.; SILVA, A.P. da; MACEDO, M.C.M.; IMHOFF, S.; EUCLIDES, V.P.B. Least limiting water range: a potential indicator of changes in near-surface soil physical quality after the conversion of brazilian savanna into pasture. **Soil and Tillage Research**, v. 88, n. 1-2, p. 279-285, jul. 2006. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2005.06.014>.

LIPIEC, J.; KUŚ, J.; SŁOWIŃSKA-JURKIEWICZ, A.; NOSALEWICZ, A. Soil porosity and water infiltration as influenced by tillage methods. **Soil And Tillage Research**, v. 89, n. 2, p. 210-220, set. 2006. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2005.07.012>.

MACHADO, C. T. T.; VIDAL, M. C. **Avaliação participativa do manejo de agroecossistemas e capacitação em agroecologia utilizando indicadores de sustentabilidade de determinação rápida e fácil**. Brasília: Embrapa Cerrados, 2006. 44 p. (Documentos).

MAIA, C. E. Índice S para avaliação da qualidade física de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 6, p. 1959-1965, dez. 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832011000600012>.

MAURYA, S.; ABRAHAM, J. S.; SOMASUNDARAM, S.; TOTEJA, R.; GUPTA, R.; MAKHIJA, S. Indicators for assessment of soil quality: a mini-review. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 604, n. 192, p. 1-22, 28 ago. 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-020-08556-z>.

MENDES, I. C.; TORMENA, C. A.; CHERUBIN, M. R.; KARLEN, Douglas L. Soil health assessment and maintenance in Central and South-Central Brazil. **Burleigh Dodds Series in Agricultural Science**, p. 379-415, 6 ago. 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.19103/as.2017.0033.35>.

MENDES, I.C.; SOUSA, D.M.G.; DANTAS, O.D.; LOPES, A.A.C.; REIS JUNIOR, F.B.; OLIVEIRA, M.I.; CHAER, G.M. Soil quality and grain yield: a win-win combination in clayey tropical oxisols. **Geoderma**, v. 388, p. 114880, abr. 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114880>.

MENDES, I.C.; SOUZA, L.M.; SOUSA, D.M.G.; LOPES, A.A.C.; REIS JUNIOR, F.B.; LACERDA, M.P.C.; MALAQUIAS, J.V. Critical limits for microbial indicators in tropical Oxisols at post-harvest: the fertbio soil sample concept. **Applied Soil Ecology**, v. 139, p. 85-93, jul. 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.02.025>.

MUELLER, L.; SCHINDLER, U.; SHEPHERD, T. G.; BALL, B. C.; SMOLENTSEVA, E.; PACHIKIN, K.; HU, C.; HENNINGS, V.; SHEUDSHEN, A. K.; BEHRENDT, A. The Muencheberg Soil Quality Rating for Assessing the Quality of Global Farmland. **Environmental Science and Engineering**, p. 235-248, 5 out. 2013. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-01017-5_13.

MUNKHOLM, L. J. **The spade analysis: - a modification of the qualitative spade diagnosis for scientific use**. Denmark: Danish Institute of Agricultural Sciences, 2000. 80 p.

NIERO, L. A. C.; DECHEN, S. C. F.; COELHO, R. M.; MARIA, I. C. Avaliações visuais como índice de qualidade do solo e sua validação por análises físicas e químicas em um latossolo vermelho distroférico com usos e manejos distintos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 4, p. 1271-1282, ago. 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832010000400025>.

NIMMO, J. R.; PERKINS, K. S. The Solid Phase: aggregate stability and size distribution. In: DANE, Jacob H.; TOPP, G. Clarke (ed.). **Methods of Soil Analysis: Part 4: physical methods**. Madison: Soil Science Society of America Book Series, 2002. Cap. 2. p. 317-328.

NORRIS, C. E.; CONGREVES, K. A. Alternative Management Practices Improve Soil Health Indices in Intensive Vegetable Cropping Systems: a review. **Frontiers in Environmental Science**, v. 6, n. 50, p. 1-18, 12 jun. 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3389/fenvs.2018.00050>.

NORTCLIFF, S. Standardisation of soil quality attributes. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 88, n. 2, p. 161–168, 2002.

NUNES, A. L. P.; BARTZ, M. L.; MELLO, I.; BORTOLUZZI, J.; ROLOFF, G.; LLANILLO, R. F.; CANALLI, L.; WANDSCHEER, C. A. R.; RALISCH, R. No-till System Participatory Quality Index in land management quality assessment in Brazil. **European Journal of Soil Science**, v. 71, n. 6, p. 974-987, 13 mar. 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1111/ejss.12943>.

NUNES, M. R.; KARLEN, D. L.; MOORMAN, T. B. Tillage Intensity Effects on Soil Structure Indicators—A US Meta-Analysis. **Sustainability**, v. 12, n. 5, p. 2071, 8 mar. 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/su12052071>.

OBALUM, S. E.; CHIBUIKE, G. U.; PETH, S.; OUYANG, Y. Soil organic matter as sole indicator of soil degradation. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 189, n. 4, p. 1-19, 21 mar. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-017-5881-y>.

OSMAN, K. T. Concepts of Soil. **Soils**, p. 1-7, 29 out. 2012. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1007/978-94-007-5663-2_1.

PEERLKAMP, P.K. A visual method of soil structure evaluation. Meded. v.d. **Landbouwhogeschool en Opzoekingsstations van de Staat te Gent**. XXIV 24: 216–221. 1959.

PEIGNÉ, J.; VIAN, J.; CANNAVACCIUOLO, M.; LEFEVRE, V.; GAUTRONNEAU, Y.; BOIZARD, H. Assessment of soil structure in the transition layer between topsoil and subsoil using the profil cultural method. **Soil and Tillage Research**, v. 127, p. 13-25, mar. 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2012.05.014>.

QI, Y.; DARILEK, J. L.; HUANG, B.; ZHAO, Y.; SUN, W.; GU, Z. Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China. **Geoderma**, v. 149, n. 3-4, p. 325-334, mar. 2009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.12.015>.

QIN, M.Z., ZHAO, J. Strategies for Sustainable Use and Characteristics of Soil Quality Changes in Urban-Rural Marginal Area: A Case Study of Kaifeng. **Acta Geographica Sinica**. v. 55, p. 545–554. 2000.

R CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna, Austria, 2021. Disponível em: <https://www.r-project.org>.

RABOT, E.; WIESMEIER, M.; SCHLÜTER, S.; VOGEL, H.-J. Soil structure as an indicator of soil functions: a review. **Geoderma**, v. 314, p. 122-137, mar. 2018. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009>.

RAHMANIPOUR, F.; MARZAIOLI, R.; BAHRAMI, H. A.; FEREDOUNI, Z.; BANDARABADI, S. R. Assessment of soil quality indices in agricultural lands of Qazvin Province, Iran. **Ecological Indicators**, v. 40, p. 19-26, maio 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.12.003>.

RALISCH, R.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; TOMAZI, M.; HERNANI, L. C.; MELO, A. da S.; SANTI, A.; MARTINS, A. L. da S.; BONA, F. D. de. **Diagnóstico rápido da estrutura do solo - DRES**. Londrina: Embrapa Soja, 2017. 63 p. (Embrapa Soja. Documentos, 390).

REICHERT, José Miguel et al. Mecânica do Solo. In: VAN LIER, Quirijn de Jong (ed.). **Física do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. Cap. 2. p. 29-102.

REINERT, D. J.; ALBUQUERQUE, J. A.; REICHERT, J. M.; AITA, C.; ANDRADA, M. M. C. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em argissolo vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 5, p. 1805-1816, out. 2008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832008000500002>.

ROGER-ESTRADE, J.; RICHARD, G.; CANEILL, J.; BOIZARD, H.; COQUET, Y.; DEFOSSEZ, P.; MANICHON, H. Morphological characterisation of soil structure in tilled fields: from a diagnosis method to the modelling of structural changes over time. **Soil and Tillage Research**, v. 79, n. 1, p. 33-49, set. 2004. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2004.03.009>.

SANTOS, H. G. dos et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos [Brazilian system of soil classification]**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SCHOENHOLTZ, S.H; MIEGROET, H.Van; BURGER, J.A. A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. **Forest Ecology and Management**, v. 138, n. 1-3, p. 335-356, nov. 2000. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1016/s0378-1127\(00\)00423-0](http://dx.doi.org/10.1016/s0378-1127(00)00423-0).

SERAFIM, M. E.; ZEVIANI, W. M.; ONO, F. B.; NEVES, L. G.; SILVA, B. M.; LAL, R. Reference values and soil quality in areas of high soybean yield in Cerrado region, Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 195, p. 1-8, dez. 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2019.104362>.

SHAPIRO, S.S., WILK, M.B., 1965. **An analysis of variance test for normality**. *Biometrika* 52, p. 591–611.

SHEPHERD, T.G. **Visual soil assessment: Field guide for cropping and pastoral grazing on flat to rolling country**. v.1. Palmerston North, Horizons.mw & Landcare Research, 2000. 84 p.

SILVA, A. P. da et al. INDICADORES DA QUALIDADE FÍSICA DO SOLO. In: VAN LIER, Quirijn de Jong (ed.). **Física do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. Cap. 7. p. 241-282.

SILVA, F. C. et al (ed.). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 627 p.

SILVA, G.L.; LIMA, H.V.; CAMPANHA, M.M.; GILKES, R.J.; OLIVEIRA, T.s.. Soil physical quality of Luvisols under agroforestry, natural vegetation and conventional crop management systems in the Brazilian semi-arid region. **Geoderma**, v. 167-168, p. 61-70, nov. 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.09.009>.

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

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to Soil Taxonomy**. 12. ed. Washington, DC: USDA-Natural Resources Conservation Service, 2014.

SOUZA H.A; FARIAS J.L.S.; PAIVA F.E.P.; GUEDES F.L.; POMPEU R.C.F.F.; ROUWS J. R.C. Avaliação participativa de indicadores de solo e sanidade de cultivos em sistemas de produção na Comunidade Pé de Serra Cedro, no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Agroecologia**, Rio de Janeiro, v. 11, n. 3, p. 206-215, 2016.

STEFANOSKI, D.C.; FIGUEIREDO, C.C.; SANTOS, G.G.; MARCHÃO, R.L. Selecting soil quality indicators for different soil management systems in the Brazilian Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1643-1651, set. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2016000900064>.

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

TAVARES FILHO, J.; RALISCH, R.; GUIMARÃES, M. F.; MEDINA, C. C.; BALBINO, L. C.; NEVES, C. S. V. J. Método do Perfil Cultural para avaliação do estado físico de solos em condições tropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 2, p. 393-399, jun. 1999. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06831999000200022>.

TEIXEIRA, P. C (ed.). **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2017. 577 p.

THOMAS, G. W. Soil pH and Soil Acidity. **Sssa Book Series**, p. 475-490, 11 set. 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c16>.

THOMAZINI, A.; MENDONÇA, E. S.; CARDOSO, I. M.; GARBIN, M. L. SOC dynamics and soil quality index of agroforestry systems in the Atlantic rainforest of Brazil. **Geoderma Regional**, v. 5, p. 15-24, ago. 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geodrs.2015.02.003>.

TORMENA, C. A.; BARBOSA, M. C.; COSTA, A. C. S.; GONÇALVES, A. C. A. Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo

do solo. **Scientia Agricola**, v. 59, n. 4, p. 795-801, dez. 2002. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-90162002000400026>.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um latossolo roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 22, n. 4, p. 573-581, dez. 1998. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06831998000400002>.

TORRES, J. L. R.; PEREIRA, M. G.; ASSIS, R. L.; SOUZA, Z. M. ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM LATOSSOLO VERMELHO CULTIVADO COM PLANTAS DE COBERTURA, EM SEMEADURA DIRETA. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 2, p. 428-437, abr. 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/01000683rbc20140597>.

VALANI, G. P.; VEZZANI, F. M.; CAVALIERI-POLIZELI, K. M. V. Soil quality: evaluation of on-farm assessments in relation to analytical index. **Soil and Tillage Research**, v. 198, abr. 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2019.104565>.

VEUM, K. S.; GOYNE, K. W.; KREMER, R. J.; MILES, R. J.; SUDDUTH, K. A. Biological indicators of soil quality and soil organic matter characteristics in an agricultural management continuum. **Biogeochemistry**, v. 117, n. 1, p. 81-99, 1 jun. 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s10533-013-9868-7>.

VINHAL-FREITAS, I. C.; CORRÊA, G. F.; WENDLING, B.; BOBUŠKÁ, L.; FERREIRA, A. S. Soil textural class plays a major role in evaluating the effects of land use on soil quality indicators. **Ecological Indicators**, v. 74, p. 182-190, mar. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.11.020>.

WEIL, Ray R.; BRADY, Nyle C. **The Nature and Properties of Soils**. 15. ed. England: Pearson, 2017. 1105 p.

WERNER, D.; THAMERT, W. Zur diagnose des physikalischen bodenzustandes auf produktionsflächen. **Acker-Pflanzenbau Bodenkd**, Berlim, v. 33, p. 729-739, 1989.

ZUBER, S. M.; BEHNKE, G. D.; NAFZIGER, E. D.; VILLAMIL, M. B. Multivariate assessment of soil quality indicators for crop rotation and tillage in Illinois. **Soil and Tillage Research**, v. 174, p. 147-155, dez. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2017.07.007>.

5. CAPÍTULO II. CORRESPONDÊNCIA ENTRE A QUALIDADE FÍSICA DO SOLO AVALIADA POR DIAGNÓSTICO VISUAL E PROPRIEDADES FÍSICAS E HÍDRICAS DO SOLO

5.1. RESUMO

A avaliação da estrutura do solo é um dos principais parâmetros no diagnóstico de alterações das propriedades de um solo sob uso e manejo agrícola. Avaliações visuais tem sido apontadas para determinação da qualidade estrutural do solo como uma possibilidade viável em relação a custos e aplicabilidade. O DRES (Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo) é um dos métodos visuais mais recente para avaliação da condição estrutural de solos tropicais. No entanto, existem poucos trabalhos que o seu desempenho e relação com as propriedades físicas do solo. Dessa maneira, este estudo buscou avaliar a qualidade estrutural de um Latossolo sob sistema de pastagem (PAS), semeadura direta (SSD), pomar de banana (BAN) e vegetação nativa, Cerrado (CER) pela metodologia do DRES. Além disso, buscou-se relacionar as pontuações das análises visuais com os parâmetros físicos: densidade (DS), macro (MAC) e microporosidade (MIC), porosidade total (PT), resistência mecânica à penetração (RM), diâmetro médio ponderado (DMP), matéria orgânica (MOS) e parâmetros da curva de retenção de água (CRA). Também foi realizado um comparativo entre a metodologia DRES e VESS (*Visual Evaluation of Soil Structure*). O solo sob PAS e SSD apresentou as menores pontuações para o DRES, e conseqüentemente a pior condição de qualidade estrutural do solo. As propriedades físicas DS, RM, microporosidade (MIC) apresentaram relações significativas com a análise visual do DRES e VESS. De modo geral, o DRES foi capaz de diferenciar a qualidade da estrutura do solo sob diferentes usos e manejo, e pode ser considerado um método semiquantitativo promissor no diagnóstico da qualidade estrutural do solo.

Palavras-chave: qualidade estrutural, DRES, VESS, degradação do solo, solos tropicais.

5.2. ABSTRACT

The evaluation of the soil structure is one of the main parameters in the diagnosis of changes in the properties of a soil under agricultural use and management. Visual assessments have been pointed out to determine the structural quality of the soil as a viable possibility in relation to costs and applicability. The DRES (Rapid Diagnosis of Soil Structure) is one of the most recent visual methods for assessing the structural condition of tropical soils. However, there are few

works that its performance and relationship with the physical properties of the soil. Thus, this study sought to evaluate the structural quality of an Oxisol under a pasture system (PAS), no-till (SSD), banana orchard (BAN) and native vegetation, Cerrado (CER) using the DRES methodology. In addition, we sought to relate the scores of the visual analyses with the physical parameters: density (DS), total porosity (PT), mechanical resistance (RM), weighted average diameter (DMP), organic matter (MOS) and parameters of the water retention curve (WRC). A comparison was also made between the DRES and VESS (Visual Evaluation of Soil Structure) methodologies. The soil under PAS and SSD presented the lowest scores for the DRES, and consequently the worst structural soil quality condition. The physical properties DS, RM, microporosity (MIC) showed significant relationships with the visual analysis of DRES and VESS. In general, DRES was able to differentiate the quality of soil structure under different uses and management, and can be considered a promising semi-quantitative method in the diagnosis of soil structural quality.

Keywords: structural quality, DRES, VESS, soil degradation, tropical soils.

5.3. INTRODUÇÃO

Um dos principais desafios da agricultura na atualidade é continuar abastecendo a população mundial com alimentos, tanto em quantidade, como também em qualidade. Para atender a essa demanda é necessário desenvolver modelos sustentáveis de produção agrícola para que se mantenha a integridade dos recursos naturais a longo prazo. O solo é um dos recursos que sob uso agrícola tem sofrido com altos níveis de degradação (DROBNIK et al., 2018). Estima-se que cerca de 33% dos solos mundiais encontram-se sob estágio de degradação de moderada a alta (FAO, 2015). Esse fato tem despertado um alerta quanto a necessidade de recuperação das funções produtivas e ecossistêmicas dos solos (ALAOUI et al., 2020).

Ademais do desenvolvimento e uso de manejos conservacionistas em solos agricultáveis, é necessário estabelecer métodos de avaliação que possam mensurar os efeitos dessas práticas sob a dinâmica do solo. Com isso, torna-se possível determinar vantagens e perdas provenientes dos diferentes usos e manejos aos quais o solo é submetido. Na última década, um crescimento exponencial sobre metodologias para avaliação da qualidade do solo tem sido apontado na literatura (KARLEN et al, 2019). A proposta é a adoção de indicadores físicos, químicos e biológicos que permitam, ainda que indiretamente, quantificar o nível de saúde do solo (ANDREWS et al., 2004; CARDOSO et al., 2013). No geral, as denominadas metodologias clássicas ou analíticas, que se refere a medições de laboratório e de campo, são

adotadas frequentemente como indicadores para caracterizar e monitorar a condição dos solos (JOHANNES et al., 2017).

A análise da estrutura está dentre as principais propriedades avaliadas para evidenciar as modificações da qualidade de um solo (PULIDO MONCADA et al., 2014a). Densidade do solo, porosidade, resistência mecânica à penetração e a curva de retenção de água são as propriedades físicas do solo geralmente associadas a avaliação de mudanças na qualidade estrutural (FRANCO et al., 2019; PULIDO MONCADA et al., 2014a). Embora sejam estimadores eficientes, essas propriedades apresentam custos expressivos e metodologias de determinação muitas vezes complexas, que dificultam acessibilidade e facilidade de aplicação no campo por agricultores (CUI; ASKARI; HOLDEN, 2014).

Dessa maneira, os métodos de avaliações visuais da qualidade estrutural do solo têm ganhado visibilidade, pois além da praticidade e baixo custo, tem demonstrado fácil reprodutibilidade em campo, auxiliando nas tomadas de decisões de agricultores quanto as práticas de cultivo (FRANCO et al., 2019; JOHANNES et al., 2017). Além disso, diversos estudos tem comparado os exames visuais com propriedades físicas do solo e encontrado relações significativas que concedem validade quanto ao uso dessas metodologias para avaliação da qualidade estrutural do solo (CASTIONI et al., 2018; CHERUBIN; CHAVARRO-BERMEO; SILVA-OLAYA, 2019; CORNELIS et al., 2019; GUIMARÃES et al., 2017; PULIDO MONCADA et al., 2014a, 2014b). Ainda assim, questionamentos quanto a falta de precisão pela subjetividade das avaliações visuais é um problema frequentemente mencionado (JOHANNES et al., 2017; LISBÔA et al., 2016).

Dentre os métodos de avaliação visual, o VESS (*Visual Evaluation of Soil Structure*) tem alcançado notoriedade mundialmente (FRANCO et al., 2019). O método integra propriedades do solo relacionadas ao tamanho, resistência e porosidade dos agregados, além de características das raízes em uma única pontuação (GUIMARÃES; BALL; TORMENA, 2011). No Brasil, em pesquisa recente foi apontado como o método de avaliação visual da estrutura do solo mais conhecido e mais utilizado (PAIVA; RITA; CAVALIERI-POLIZELI, 2020).

Há pouco tempo, outro método visual que tem estado em evidência nacionalmente é o Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo (DRES), sendo uma adaptação do VESS e do método do Perfil cultural (TAVARES FILHO et al., 1999). Ralish et al. (2017) menciona que o VESS não considera como um problema e como uma degradação da estrutura, o estado de desagregação do solo. Por isso, propõe o uso do DRES como a metodologia apropriada para

avaliação da condição estrutural do solo para solos tropicais e subtropicais, por contemplar essa condição.

Por se tratar de uma metodologia recente, o DRES possui insuficientes informações na literatura quanto à sua aplicabilidade para avaliação da estrutura e suas associações as propriedades físicas do solo. Assim sendo, o objetivo desse estudo foi de avaliar o desempenho do método visual DRES na avaliação da qualidade estrutural em um Latossolo sob uso e manejos contrastantes e compará-lo ao VESS. Além disso, verificar a relação entre a qualidade estrutural determinada pelos métodos visuais e propriedades físicas do solo.

5.4. MATERIAL E MÉTODOS

5.4.1. Áreas de estudo

O estudo foi realizado em áreas experimentais instaladas na Fazenda Água Limpa (FAL/UnB), Brasília-DF. Foram selecionados três experimentos distintos, a fim de se obter representação significativa da avaliação de diferentes manejos de sistemas agrícolas, a saber: pastagem (PA) ($15^{\circ} 56' 46''$ S e $47^{\circ} 55' 34''$ O), semeadura direta (SSD) ($15^{\circ} 56' 55''$ S e $47^{\circ} 55' 47''$ O), pomar de banana (BAN) ($15^{\circ} 57' 1''$ S e $47^{\circ} 55' 51''$ O) e uma área de cerrado nativo (CN) ($15^{\circ} 57' 4''$ S; $47^{\circ} 55' 44''$ O), considerada referência neste estudo (Figura 2).

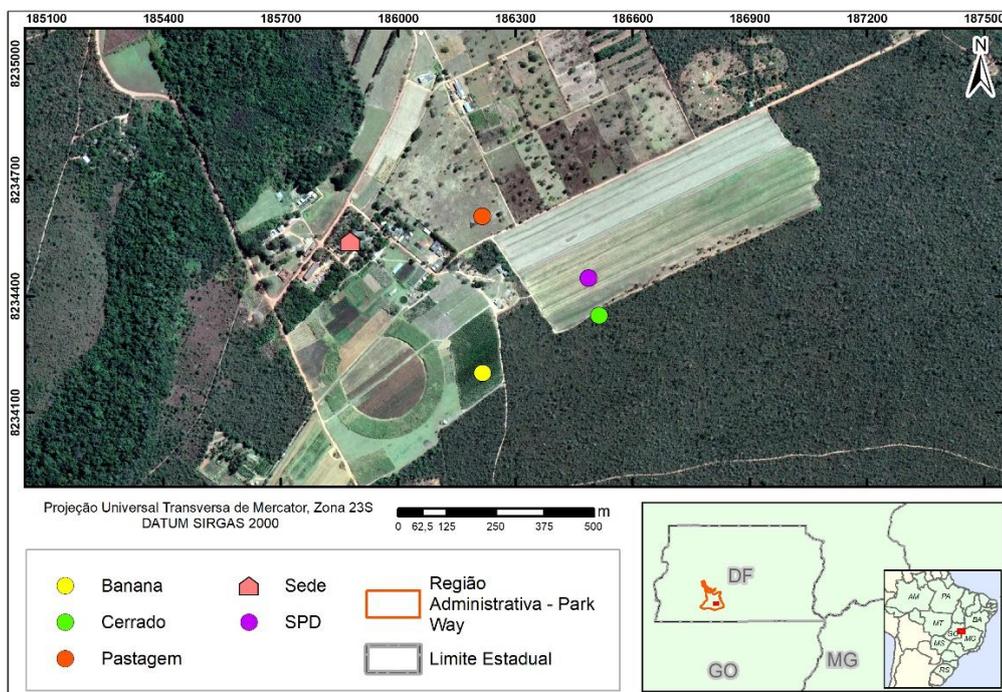


Figura 2. Mapa de localização da área de estudo. Fonte: Google Earth, 2022.

O clima da região é identificado como Aw (tropical de savana), conforme classificação de Köppen. A região apresenta estação chuvosa de outubro a março e estação seca definida de abril a setembro, com precipitação média anual de 1450 mm (2010 - 2021), temperatura média anual variando de 17,6 a 25,4°C e velocidade média do vento de 2,3 m/s (INMET, 2021). O registro das precipitações e temperaturas médias ao longo do período de janeiro de 2021 a janeiro de 2022 é apresentado na Figura 3. O solo da área foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo de textura argilosa ou Typic Haplustox (SOIL SURVEY STAFF, 2014). Os históricos das áreas são apresentados na Tabela 1.

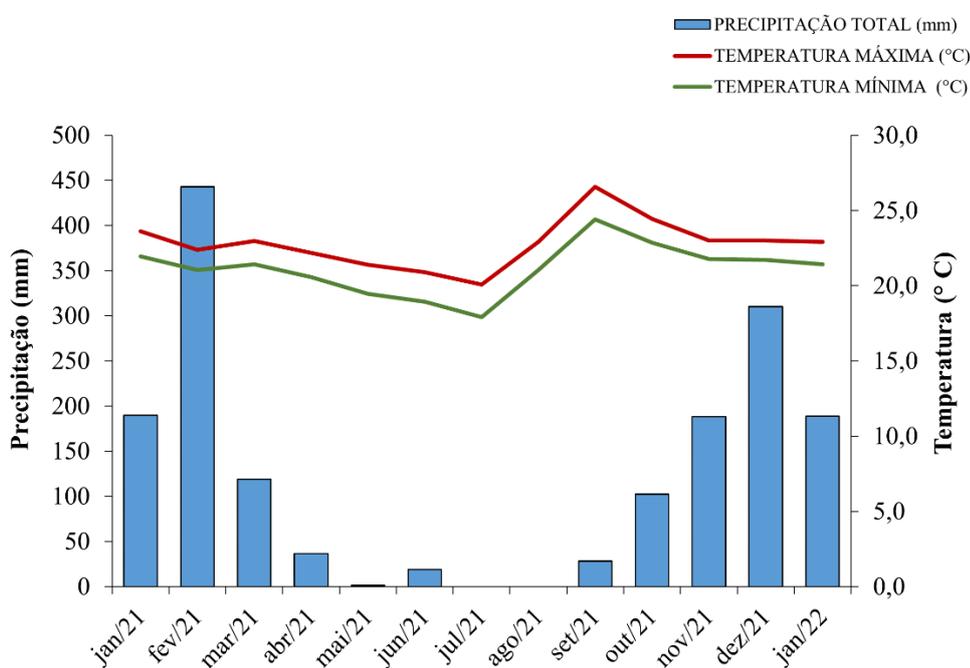


Figura 3. Histórico das médias das precipitações mensais, temperaturas máximas e mínimas no intervalo de janeiro/2021 a janeiro/2022 (INMET, 2022).

Tabela 1. Históricos de uso do solo sob diferentes sistemas de manejo das áreas experimentais amostradas.

Sistema	Descrição
Pomar de Banana (BAN)	O plantio das mudas das variedades Grand Naine e Prata anã no campo ocorreu em dezembro de 2012, quando também foi instalado o sistema de irrigação por gotejamento. No ensaio, foi realizado a correção do solo com 200 gramas de calcário dolomítico por cova, e a adubação com 500 gramas de Superfosfato Simples, 200 gramas de Termofosfato Magnésiano (Yoorin®) e 50 gramas de FTE por cova. Possuindo um arranjo experimental em parcelas subdivididas, sendo as parcelas formadas por 5 lâminas de reposição hídrica, 3,26 – 3,60 – 4,29 – 4,97 – 5,66 mm e as subparcelas formada por 5 doses de gesso agrícola, 0 – 1250 – 2500 – 3750 – 5000 kg ha ⁻¹ em aplicação única na instalação do pomar. Na área experimental não houve ocorrência de capinas, apenas incorporação dos resíduos ao longo dos anos. Nenhum outro tipo de revolvimento do solo foi realizado pós instalação do pomar.
Pastagem (PA)	A área foi implantada em 2010, com semeadura de <i>Brachiaria brizantha</i> na área total (4 ha) do piquete sendo roçado habitualmente uma vez por ano. São colocados em média um lote de 40 ovelhas pastejando por 15 dias, seguido de 30 dias de descanso. Não recebeu adubação pós estabelecimento do pasto.
Semeadura Direta (SSD)	A área foi aberta em 1991 (com expansão gradual). Inicialmente foi usada para estudos com adubação orgânica e avaliação de cultivares de mandioca. Até o ano de 2006 era adotado o preparo convencional do solo (aração e gradagem), e a partir de 2007 adotou-se o sistema de semeadura direta. A rotação de culturas básica era milho-sorgo, mas ocorreu plantio da soja em algumas ocasiões. Sendo válido ressaltar que o último registro de rotação feito na área foi em 2011, desde então têm sido feito plantio de milho para silagem todos os anos.

5.4.2. Amostragem e análises de solo

5.4.2.1 Avaliação visual da estrutura do solo

As avaliações e amostragens da qualidade estrutural foram realizadas em janeiro de 2022, por meio do DRES e VESS. Para isso, amostras de solo foram coletadas na camada de 0-25 cm. Foi realizado por meio de abertura de três mini trincheiras em cada área, com o auxílio de enxadão e pá de corte reta, medindo cerca de 40 cm de comprimento, 20 cm de largura e 30 cm de profundidade, no sentido transversal às linhas das culturas (Figura 4). Quando observado camadas distintas na amostra, cada camada recebeu um escore de acordo com a metodologia, e posteriormente foram usados na composição da pontuação final (Anexos). Todos os procedimentos de acordo com Ralish et al. (2017) e Guimarães et al. (2011).

5.4.2.2 Propriedades químicas

Em cada trincheira foi coletado amostras deformadas na profundidade de 0 – 20 cm. As amostras foram secas ao ar por tempo suficiente para estabilização da umidade. Os atributos químicos avaliados a fim de caracterização das áreas consistiram em: matéria orgânica do solo (MOS), pH, cálcio mais magnésio ($\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$), fósforo disponível (P), soma de bases (SB), capacidade de troca de cátions (T), acidez trocável (Al^{3+}), acidez potencial (H+Al), saturação por alumínio (m) e saturação por bases (V%) de acordo com Teixeira et al. (2017) e Raij et al. (2001). As análises foram realizadas no laboratório de solos da ESALQ/USP, com exceção da MOS, realizada no laboratório de Matéria Orgânica da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária – FAV/UnB. Os resultados para fins de caracterização das áreas experimentais estão dispostos na Tabela 2.

Tabela 2. Propriedades químicas do solo para os diferentes sistemas de uso e manejo das áreas experimentais amostradas nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm.

Sistema de manejo	Prof. (cm)	pH (H ₂ O)	pH (CaCl ₂)	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC	V	m	M.O.
				mg kg ⁻¹		cmol _c kg ⁻¹					%	g kg ⁻¹		
CER	0 - 10	5,1	4,1	<2,0	44,0	<0,1	<0,1	0,7	8,6	0,2	8,9	2,3	76,3	55,8
BAN		5,2	4,7	2,7	82,7	2,2	0,7	0,2	6,1	3,1	9,2	34,7	4,3	49,1
PAS		6,4	5,7	<2,0	27,7	3,0	2,2	<0,1	3,1	5,3	8,4	63,3	0,0	47,3
PD		5,8	5,4	16,4	45,7	3,4	1,3	<0,1	4,7	4,8	9,5	50,7	0,0	44,5
CER	10 - 20	5,2	4,3	<2,0	30,0	<0,1	<0,1	0,4	6,6	0,1	6,7	1,7	73,3	48,6
BAN		5,3	4,6	<2,0	37,3	2,2	0,7	0,2	6,0	2,8	8,8	31,0	12,7	47,5
PAS		6,4	5,5	<2,0	15,7	2,6	1,2	<0,1	3,4	3,8	7,3	53,3	0,0	44,6
PD		6,0	5,4	11,2	22,7	3,2	1,0	<0,1	4,5	4,4	8,8	49,3	0,0	43,0

5.4.2.3 Propriedades físicas

Para cada sistema agrícola foram coletadas doze amostras indeformadas, quatro em torno de cada trincheira, compreendendo as camadas de 0-10 e 10-20 cm e amostras deformadas nas mesmas profundidades (coletadas nas trincheiras). Os parâmetros físicos avaliados foram: granulometria, argila dispersa em água, densidade do solo (D_s), densidade de partículas (D_p), umidade gravimétrica (U_g), umidade volumétrica (U_v) porosidade total (PT), macroporosidade (Mac), microporosidade (Mic), resistência à penetração (RP), curva de retenção de água (CRA) e o índice de estabilidade de agregados (IEA). As análises físicas foram realizadas no Laboratório de Física do Solo da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária – FAV/UnB.

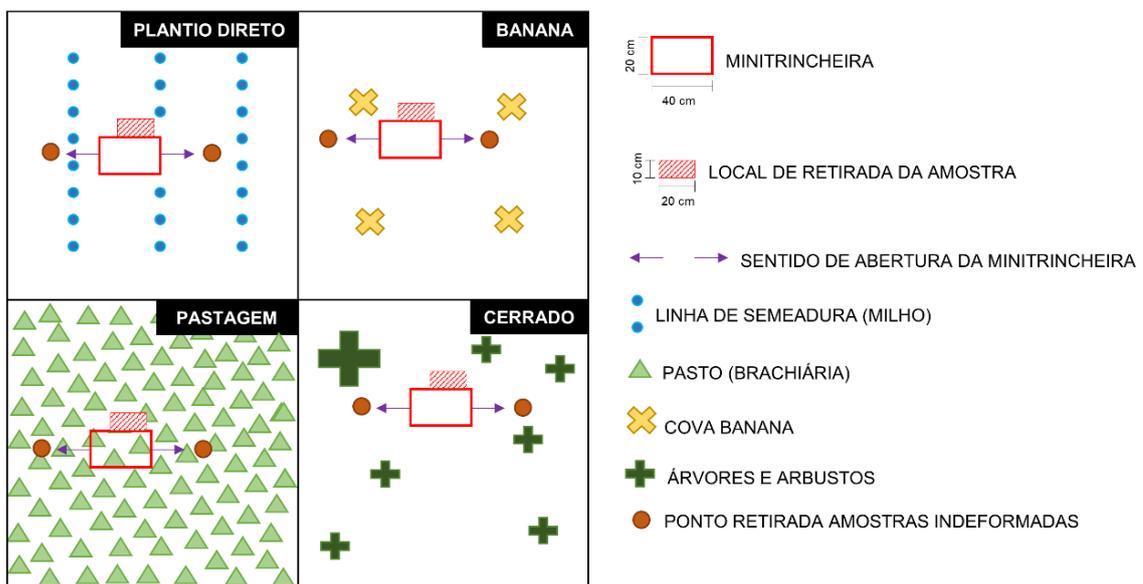


Figura 4. Posicionamento das trincheiras em relação ao cultivo para cada sistema e dos pontos de retirada das amostras indeformadas.

A análise da granulometria (Tabela 3) foi realizada pelo método do hidrômetro, baseado no princípio de sedimentação das partículas, conforme Lei de Stokes, utilizando-se como dispersantes químicos o NaOH (4 g L^{-1}) + Hexametáfosfato de sódio (HMP) 10 g L^{-1} (GEE e OR, 2002) e a argila dispersa em água (ADA) foi determinada seguindo a metodologia descrita para análise granulométrica na ausência dos dispersantes, com agitação lenta horizontal (GEE e OR, 2002).

Para a determinação de densidade do solo foi utilizado o método do anel volumétrico. A densidade de partículas pelo método do picnômetro foi realizada no laboratório de solos da ESALQ/USP (TEIXEIRA et al., 2017). A umidade pelo método termogravimétrico usando estufa de secagem (BLAKE e HARTGE, 1986).

Tabela 3. Caracterização textural do solo para os diferentes sistemas de uso e manejo das áreas experimentais amostradas nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm.

Sistema de manejo	Prof. (cm)	Classe textural	Argila	Silte	Areia	Dp
			g kg ⁻¹			g cm ⁻³
CER	0 - 10	Muito argilosa	663,80	166,33	169,86	2,67
BAN		Argilosa	553,24	258,65	188,12	2,67
PAS		Argilosa	473,77	255,34	260,50	2,67
PD		Muito argilosa	603,62	246,74	149,64	2,64
CER	10 - 20	Muito argilosa	679,67	138,66	181,67	2,66
BAN		Muito argilosa	593,81	239,32	166,87	2,67
PAS		Argilosa	526,14	263,58	210,27	2,67
PD		Muito argilosa	608,62	217,45	173,93	2,67

A porosidade total foi estimada pela relação entre densidade do solo e densidade de partículas, conforme a equação 2 (WEIL e BRADY, 2017). A MIC foi obtida calculando o volume de água presente na amostra uma tensão de 6 kPa (0,6 m de H₂O) (DANIELSON e SUTHERLAND, 1986), enquanto a MAC foi calculada pela diferença entre a PT e a microporosidade.

$$PT = 1 - \frac{Ds}{Dp} \quad (2)$$

Em que:

PT – porosidade total, em m³ m⁻³.

Dp – densidade de partículas sólidas do solo, em g cm⁻³.

Ds – densidade do solo, em g cm⁻³.

A curva de retenção de água no solo foi obtida pelo método da câmara de pressão, em que as amostras terão determinadas sua umidade no ponto de equilíbrio nas tensões: 0 kPa; 20 kPa; 40 kPa; 60 kPa e 80 kPa e 100 kPa, 200 kPa, 500 kPa, 1000 kPa e 1.500 kPa em câmara de Richards com placas porosas de cerâmicas (DANE e HOPMANS, 2002). Os parâmetros de ajuste da CRA no solo foram determinados conforme a equação 3 (van Genuchten, 1980). Para determinação do conteúdo de água na capacidade de campo (CC) e no ponto de murcha permanente (PMP) assumiu-se os conteúdos de água nas tensões de 10 e 1.500 kPa, respectivamente. Posteriormente o conteúdo de água disponível (CAD) foi determinado pela diferença entre as umidades na CC e PMP.

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha\Psi)^n]^m} \quad (3)$$

Em que:

θ = conteúdo volumétrico de água ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$);

θ_s = conteúdo de saturação de água no solo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$);

θ_r = conteúdo residual de água no solo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$);

Ψ = valor absoluto do potencial mátrico (kPa);

α = inverso do valor de entrada de ar (kPa^{-1})

n, m = parâmetros empíricos de forma da curva.

Foi coletado amostras indeformadas das trincheiras para a determinação da estabilidade dos agregados utilizando agitador de peneiras do tipo Yoder (1936), com agitação das peneiras em água a uma taxa de 30 ciclos por minuto (KEMPER e CHEPIL, 1965). As classes de tamanho de peneiras utilizadas foram: 8,0– 4,0 mm; 4,0–2,0 mm; 2,0–1,00 mm; 1,00– 0,5 mm, 0,5 – 0,25 mm; < 0,25 mm. Posteriormente, foi calculado o diâmetro médio ponderado determinado por via úmida (DMP) sendo igual à soma dos produtos do diâmetro médio x_i de cada fração de tamanho e a proporção do peso total da amostra w_i (equação 4) proposto por Van Bavel (1950) e adaptado por Youker e McGuinness (1956).

$$DMP = \sum_{i=1}^n x_i \cdot w_i \quad (4)$$

A avaliação da RP a campo foi obtida com penetrômetro de impacto com êmbolo de 4 kg (padrão) até a profundidade de 20 cm, com a transformação da penetração da haste do aparelho no solo (cm impacto-1) em RP, por meio da expressão simplificada por Stolf (1991).

5.5. Análise estatística

Para verificar diferenças estatísticas entre os diferentes sistemas de uso e manejo, os dados foram analisados por testes não paramétricos de soma de classificação de Kruskal-Wallis para cada variável medida conforme Pulido Moncada et al. (2014a). Quando observado significância ($p < 0,05$) para o teste de Kruskal-Wallis, posteriormente foi realizado o teste de comparações múltiplas de Dunn (*post-hoc* de Dunn). No entanto, as diferenças significativas encontradas devem ser vistas dentro das limitações do desenho experimental. O teste de correlação de *Spearman* e as análises de regressões lineares foram conduzidos para medir a

associação entre as propriedades físicas e hídricas do solo e as pontuações das análises visuais de avaliação da qualidade estrutural do solo (DRES e VESS). Uma análise de componentes principais (ACP) foi conduzida para revelar múltiplas relações entre as propriedades físicas e índices visuais. Todas as análises estatísticas foram realizadas usando o software R, versão 4.2.1 (R CORE TEAM, 2022)

5.6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.6.1 *Qualidade estrutural do solo avaliada pelo DRES e VESS*

Para as avaliações visuais cerca de 25 a 30 minutos em média foi necessário desde a abertura da mini trincheira até a atribuição das pontuações finais. De todas as áreas, o solo sob PAS e SSD foram os mais difíceis de extração e fragmentação dos blocos, apresentando indícios de compactação do solo. No CER existiu dificuldade em se posicionar os pontos de amostragem afastados do sistema radicular das árvores de grande porte. A remoção do bloco com a pá foi dificultada pela abundância de raízes espessas nas camadas superficiais. Na BAN não se teve maiores dificuldades quanto ao posicionamento das trincheiras e retirada dos blocos.

As informações e ilustrações da carta de avaliação do VESS, foram suficientes para determinar as diferenças entre as camadas do solo quanto a sua condição estrutural. A avaliação do tamanho e aparência dos agregados, juntamente com a porosidade visível foram importantes critérios de distinção para atribuição das notas. Quanto a chave de atribuição de pontuação do DRES, a tabela de descrição para pontuação das camadas em conjunto com o fluxograma e figuras, permitiram reconhecer as diferenças entre as camadas e os sistemas, no entanto, na ausência de sinais de degradação e predominância de agregados menores que 1 cm, tornou complexa a atribuição da pontuação, necessitando de consulta a publicação completa de Ralish et. al (2017). A observação de evidências de atividade biológica e aspecto do sistema radicular foram importantes critérios de discernimento da pontuação nesses casos.

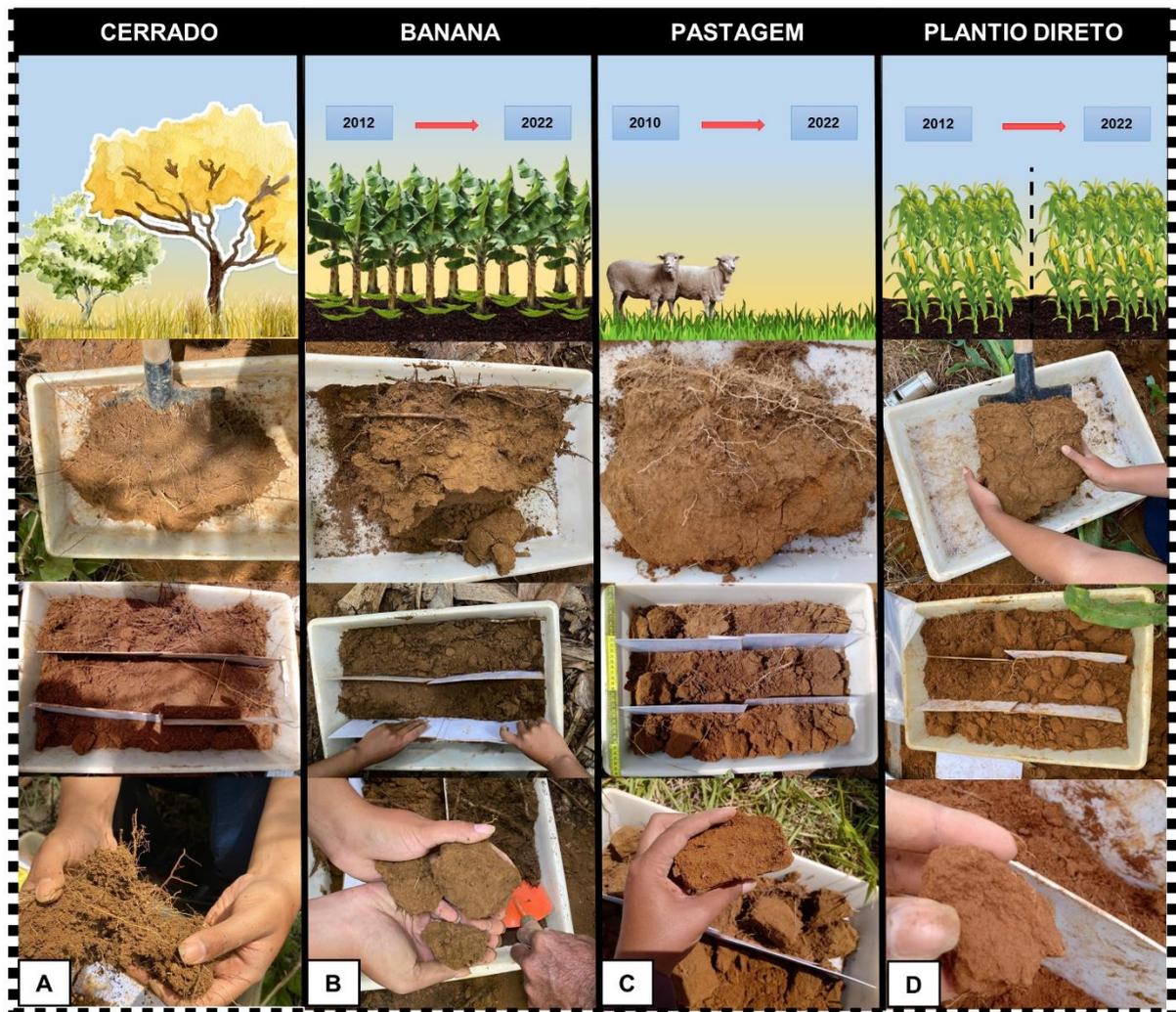


Figura 5. Ilustrações das avaliações visuais a campo (DRES e VESS) da qualidade estrutural de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob diferentes usos e manejos. Da esquerda para a direita, as fotografias mostram características dos blocos, mudanças estruturais identificadas nas camadas e tipo de agregação encontrada nos sistemas (A) Cerrado, (B) banana, (C) pastagem e (D) semeadura direta sob cultivo de milho para silagem.

As pontuações gerais do DRES variaram de 4,74 (CER) a 1,47 (PAS), e para o VESS de 1,13 (CER) a 3,96 (PAS) (Figura 6). Diferenças significativas foram encontradas entre os diferentes sistemas de uso e manejo para os escores do DRES e VESS ($p < 0,05$). Para os dois métodos a vegetação nativa (CER) apresentou a melhor pontuação, sendo assim considerado a melhor condição estrutural do solo. Já para os sistemas PAS e SSD, que não se diferenciam estatisticamente, indicaram situação de degradação da estrutura pelas pontuações observadas.

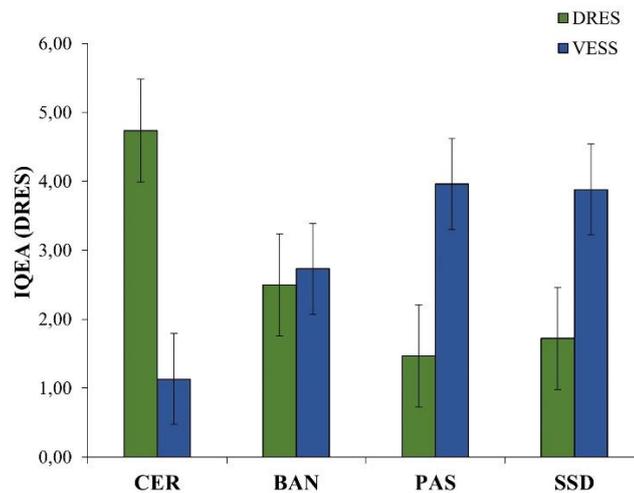


Figura 6. Pontuações gerais para o DRES (IQEA) e VESS (Sq) de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob diferentes sistemas de uso e manejo do solo (Cerrado; pomar de banana; pastagem, sistema de semeadura direta). Barra de erro representa o erro padrão (n=3).

Nos dois métodos visuais a classificação da qualidade estrutural indicou o CER como um sistema em condição adequada. As amostras desta área apresentaram predomínio de agregados grumosos com tamanho inferior a 1 cm, estrutura friável, de alta porosidade e o maior volume de raízes observado em relação aos demais sistemas. Na carta de avaliação do VESS essa condição quanto ao tamanho do agregado é contemplada (< 1 cm) para solos sem indício de feições de degradação, o que não ocorre na chave para atribuição de notas do DRES. Ou seja, embora uma amostra apresente evidências de qualidade estrutural, a classificação do tamanho dos agregados e porcentagem na amostra são considerados a partir de 1 cm, o que causa certa dificuldade na atribuição de notas na avaliação a campo. Sendo válido ressaltar que Ralish et al. (2017) mencionam como uma hipótese a ocorrência dessas características na camada superficial, sendo natural do tipo de solo avaliado, por condições da ação climática e alta atividade biológica ou em horizonte B de algumas classes de solo.

Na BAN as pontuações gerais indicaram interpretações de qualidade diferentes para os métodos DRES (2,74) e VESS (2,60), descrito como “ruim” e “aceitável”, respectivamente. As amostras foram caracterizadas pela predominância do sistema radicular e agregados menores (< 1 cm) na camada superficial, e presença de agregados maiores (entre 4 e 7 cm) e maciços, com uma maior dificuldade de fragmentação na camada mais profunda. Essa mudança de qualidade expressiva entre a camada superficial de 0-10 cm em relação a 10 – 25 cm ficou evidenciado na BAN quando comparado aos demais sistemas (Figura 7).

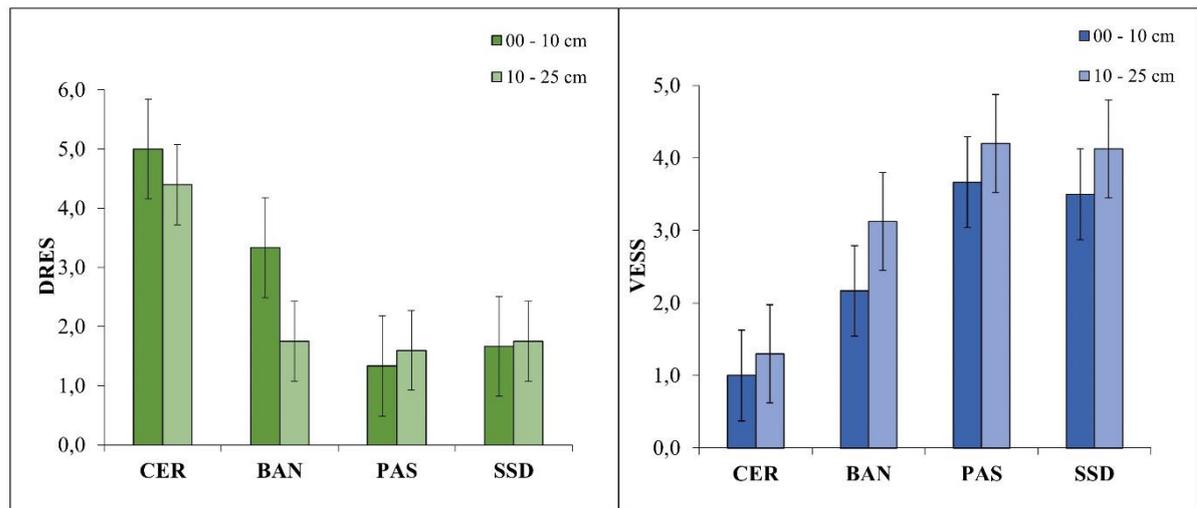


Figura 7. Pontuações DRES (IQEA) e VESS (Sq) para as camadas superior (0–10 cm) e inferior (10–25 cm) de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob diferentes sistemas de uso e manejo do solo (Cerrado; Pomar de banana; Pastagem, Sistema de semeadura direta). Barra de erro representa o erro padrão (n=3).

Para o solo sob SSD, as pontuações para os dois métodos indicaram necessidade de alterações quanto às práticas de manejo, dado os escores observados de 3,88 e 1,72, DRES e VESS respectivamente. Foi percebido nas amostras presença de agregados macios e com pouca porosidade visível, com um alto percentual de agregados com tamanho inferior a 1 cm e com pouco material orgânico entre eles e que são facilmente desagregados (0-10 cm). Já na camada mais profunda (10-25 cm) agregados maiores apresentando feições angulares e baixa presença de raízes, sendo indicativo de compactação. Esses resultados demonstram que um SSD em que o mínimo de revolvimento do solo é adotado, na ausência de cobertura permanente do solo e rotação de culturas se torna uma prática que se adotada por longos períodos pode proporcionar danos a qualidade estrutural do solo.

Assim como o sistema anterior, a PAS apresentou uma baixa classificação da qualidade da estrutura do solo para o DRES e VESS, em que foi identificado altos níveis de degradação e indícios de compactação ao avaliar a aparência dos agregados. O predomínio de agregados maiores que 4 cm, sendo estes angulosos e com uma porosidade visível quase inexistente salientou a necessidade de estabelecer novas estratégias de manejo que possam proporcionar a recuperação dessa área. Essa predominância de agregados grandes e de alta coesão ocorreu em quase todas as camadas da profundidade analisada (0-25 cm), o que proporcionou uma suave dessemelhança entre as pontuações individuais, como apresentado na Figura 5.

De modo geral, as duas medidas de avaliações visuais a campo foram capazes de distinguir as alterações de qualidade estrutural do Latossolo Vermelho-Amarelo sob diferentes usos e manejos. Ambas indicaram condições semelhantes da qualidade física para os sistemas, com exceção da BAN, citado anteriormente. Apesar dessa diferença de classificação identificada em um dos sistemas, foi observado correspondência alta e significativa entre as duas metodologias (Figura 8). Pode-se considerar que o principal fator de distinção entre os métodos dá-se pela classificação dos agregados apresentada nas chaves de pontuação. Embora ambos sejam posicionados como prática de avaliação visual adaptada para solos tropicais, no DRES na condição de predomínio de pequenos agregados em solos em estado de conservação da estrutura não é representado, como já mencionado. Já o VESS, não contempla uma condição oposta, de um solo com agregados menores predominantes, mas com feições de degradação da estrutura, comum em situações de intenso revolvimento do solo.

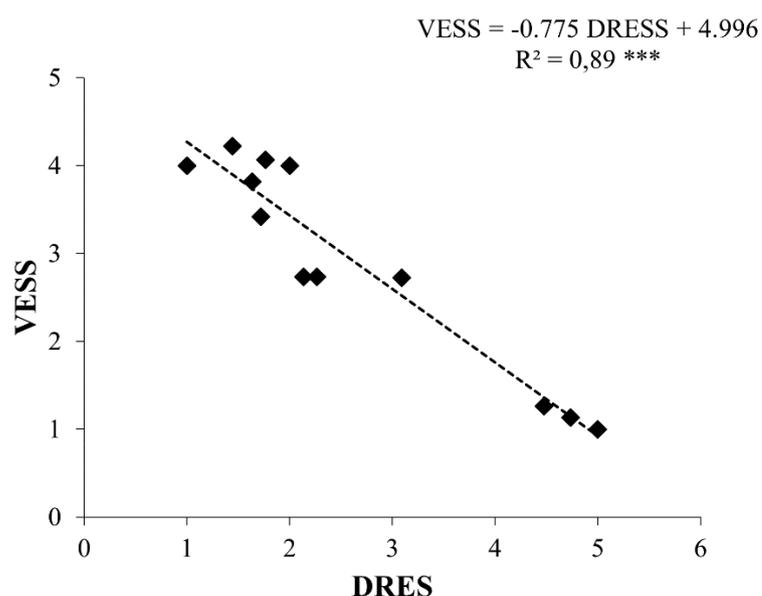


Figura 8. Relação entre o índice VESS (*Visual Evaluation of Soil Structure*) e o Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo (DRES) para um conjunto de dados de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob diferentes usos e manejo.

5.6.2 Qualidade física do solo avaliada por parâmetros quantitativos

5.6.2.1 Argila dispersa em água

Para os teores de ADA avaliado em duas profundidades, foi identificado diferença entre os sistemas apenas para a camada de 10-20 cm ($p < 0,05$). O solo sob BAN ($165,51 \text{ g kg}^{-1}$) nessa camada se diferiu do CER ($300,60 \text{ g kg}^{-1}$) (Tabela 4). Observou-se ausência de aumento

da ADA quando a vegetação nativa foi submetida a diferentes sistemas de manejo agrícola. Em Albuquerque et al. (2005), resultado similar foi encontrado quanto semelhança entre os resultados de ADA, para a profundidade de 0-10 cm, entre a mata nativa e sistemas agrícolas.

Tabela 4. Valores médios dos atributos físicos, químicos e parâmetros da CRA dos solos avaliados nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm.

Sistema de manejo	Prof.	CER	BAN	PAS	SSD
Atributos físicos					
ADA (g kg ⁻¹)		256,7±70,5	209,7±21,2	136,10±16,4	220,54±37,5
DS (g cm ⁻³)		0,69±0,04	0,81±0,03	0,94±0,07	1,00±0,06
DMP (mm)		5,45±0,31	5,10±0,64	5,19±0,44	2,46±0,53
MIC (cm ³ cm ⁻³)	0 - 10	0,31±0,02	0,40±0,01	0,45±0,04	0,46±0,02
MAC (cm ³ cm ⁻³)		0,43±0,04	0,30±0,02	0,19±0,06	0,17±0,04
PT (cm ³ cm ⁻³)		0,74±0,01	0,7±0,01	0,64±0,03	0,63±0,02
RM (MPa)		1,11±0,46	1,11±0,28	5,22±1,46	2,29±0,81
θ _v (m ³ m ⁻³)		0,25±0,02	0,29±0,02	0,26±0,03	0,34±0,01
ADA (g kg ⁻¹)		300,6±33,4	165,5±2,4	199,5±16,7	248,0±17,8
DS (g cm ⁻³)		0,72±0,04	0,86±0,04	0,87±0,05	0,93±0,05
DMP (mm)		5,48±0,21	4,05±0,95	5,19±0,46	2,08±0,53
MIC (cm ³ cm ⁻³)	10 - 20	0,32±0,02	0,41±0,02	0,41±0,02	0,42±0,03
MAC (cm ³ cm ⁻³)		0,41±0,03	0,27±0,03	0,26±0,04	0,23±0,04
PT (cm ³ cm ⁻³)		0,73±0,02	0,68±0,01	0,67±0,02	0,65±0,02
RM (MPa)		1,56±0,30	1,56±0,37	5,39±0,99	4,55±0,69
θ _v (m ³ m ⁻³)		0,26±0,02	0,30±0,03	0,24±0,01	0,29±0,02
Atributos químicos					
M.O. (g kg ⁻¹)	0 - 10	55,80±7,48	49,10±4,74	47,30±3,91	44,50±3,69
	10 - 20	48,20±6,80	47,50±5,10	44,60±4,80	43,00±4,24
Parâmetros da CRA e atributos hídricos					
θ _s (m ³ m ⁻³)		0,32±0,03	0,40±0,02	0,46±0,04	0,47±0,02
θ _r (m ³ m ⁻³)		0,10±0,11	0,14±0,09	0,22±0,03	0,18±0,09
alpha		0,08±0,08	0,04±0,03	0,09±0,09	0,05±0,03
n	0 - 10	1,32±0,38	1,40±0,44	1,30±0,17	1,21±0,10
CC (10kPa) (m ³ m ⁻³)		0,31±0,02	0,39±0,01	0,44±0,03	0,46±0,02
PMP (1500 kPa)		0,23±0,02	0,26±0,03	0,30±0,01	0,32±0,02
CAD (m ³ m ⁻³)		0,08±0,02	0,13±0,02	0,14±0,02	0,13±0,01
θ _s (m ³ m ⁻³)		0,32±0,02	0,42±0,03	0,42±0,04	0,43±0,03
θ _r (m ³ m ⁻³)	10 - 20	0,18±0,02	0,23±0,02	0,21±0,05	0,24±0,02
alpha		0,03±0,01	0,06±0,08	0,13±0,23	0,03±0,02
n		1,33±0,22	1,37±0,21	1,87±1,22	1,87±0,73

CC (10kPa) (m ³ m ⁻³)	0,32±0,02	0,41±0,01	0,40±0,02	0,42±0,02
PMP (1500 kPa)	0,24±0,02	0,28±0,02	0,27±0,01	0,27±0,01
CAD (m ³ m ⁻³)	0,08±0,01	0,13±0,01	0,13±0,02	0,50±0,01

ADA: argila dispersa em água; DS: densidade do solo; DMP: diâmetro médio ponderado; MAC: macroporosidade; MIC: microporosidade; PT: porosidade total; RM: resistência mecânica à penetração, θ_v : umidade volumétrica; M.O.: matéria orgânica; θ_s : umidade de saturação; θ_r : umidade residual; α = inverso do valor de entrada de ar; n = parâmetro empírico de forma da curva; CC: capacidade de campo; PMP: ponto de murcha permanente; CAD: conteúdo de água disponível.

5.6.2.2 Densidade do solo

No geral, houve aumento da DS para as duas profundidades avaliadas em todos os sistemas em relação ao CER (Tabela 4). Ou seja, os resultados mostraram que os diferentes sistemas de uso e manejo aos quais o solo foi submetido a longo prazo afetaram negativamente a DS. Os quocientes variaram de 0,69 g cm⁻³ (CER) a 1,0 g cm⁻³ (SSD) na profundidade superior e de 0,72 g cm⁻³ (CER) a 0,93 g cm⁻³ (SSD) na profundidade de 10-20 cm. Um aumento expressivo de 36,23% e 44,93% foi observado para o solo sob PAS e SSD, respectivamente, em comparação a vegetação nativa na profundidade de 0-10 cm. Na profundidade inferior, apenas SSD diferiu-se estatisticamente do CER, com um ganho de 30,43%. Embora o solo sob BAN tenha sido considerado estatisticamente similar ao CER, foram observados ganhos na DS de 17,29% e 20,29% nas profundidades de 0-10 cm e de 10-20 cm, respectivamente. A elevação da DS pode ser considerada indicativo de alterações estruturais quando um solo é submetido a uso agrícola (SPERA et al., 2008).

Em solos sob pastoreio aumentos na DS ocorrem em razão ao pisoteio de animais e taxa de lotação inadequada (BYRNES et al., 2018; CHERUBIN et al., 2016; LISBÔA et al., 2016). Enquanto que para solos sob SSD alterações na DS são decorrentes do tráfego de maquinário e ausência de revolvimento do solo por longos períodos (CHERUBIN et al., 2015; CHERUBIN; TORMENA; KARLEN, 2017), sendo os efeitos potencializados quando ocorre entrada dos equipamentos em condições de alta umidade (WEIL e BRADY, 2017). Esse aumento na DS sugere impedimentos ao crescimento radicular, redução da aeração e infiltração de água no solo que são características essenciais para o desenvolvimento das culturas, posicionando os sistemas PAS e SSD em condições físicas inadequadas para seus cultivos. A incorporação dos resíduos e ausência de tráfego de máquinas no solo sob BAN possivelmente mitigaram a compactação do solo.

5.6.2.3 Resistência mecânica à penetração do solo

Os valores para RM variaram de 1,11 MPa (CER e BAN) a 5,22 MPa (PAS) na profundidade de 0-10 cm e de 1,56 MPa (CER e BAN) a 5,39 MPa na profundidade de 10-20 cm. O solo sob BAN foi semelhante ao CER para resistência mecânica à penetração do solo.

Os resultados de RMP apresentaram aumentos significativos ($p < 0,05$) para o solo sob PAS (nas duas profundidades) e SSD (na profundidade inferior). A conversão da vegetação nativa em PAS induziu aumentos acentuados na RMP de 370% e 245% na camada superior e inferior, respectivamente. Em sistemas de pastagens a degradação superficial da estrutura do solo por pisoteio animal têm sido recorrentes (BENEVENUTE et al., 2020; CHERUBIN; CHAVARRO-BERMEO; SILVA-OLAYA, 2019; GUIMARÃES et al., 2017). Para o solo sob SSD foram de 106% (0-10 cm) e 192% (10-20 cm), sendo considerada como estatisticamente diferentes ($p < 0,05$), em que uma tendência do aumento da RMP em profundidade para este sistema foi observada. Essa predisposição quanto ao aumento de RMP na faixa de 7 a 20 cm, conseqüentemente elevando os níveis de compactação do solo em profundidade, advém da ausência de rotação de culturas e revolvimento do solo, associadamente ao tráfego de máquinas em solos em condições inadequadas de umidade do solo (CHERUBIN et al., 2015; MORAES et al., 2020).

Como demonstrado, ao submeter um solo ao uso e manejo agrícola, a DS e RMP são afetadas simultaneamente, e mediante ausência de adoção de práticas conservacionistas tendem a restringir o desenvolvimento das culturas. Na literatura, a faixa de 2 MPa a 4 MPa para RMP é apontada como limitante para o crescimento das plantas (GIRARDELLO et al., 2014). Neste estudo, a PAS apresenta valores superiores nas duas profundidades, bem como também para o SSD na profundidade inferior, indicando a necessidade de intervenção e mudanças do manejo.

5.6.2.4 Porosidade

Existe uma interdependência entre os atributos físicos do solo fazendo com que sofram alterações simultâneas, como ocorre com a DS e a PT (CAVALCANTE et al., 2021). A análise e interpretação da DS permite uma predição da condição do volume de poros de um sistema de manejo. Neste trabalho, numericamente, houve redução da PT para as duas profundidades analisadas independente do sistema de manejo, em relação a vegetação nativa (Tabela 4). Para a profundidade de 0-10 cm os resultados variaram de $0,74 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (CER) a $0,63 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (SSD). Na profundidade inferior, foram observados valores médios de $0,73 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (CER) a $0,65 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (SSD). Os sistemas apresentaram homogeneidade para a PT na profundidade no solo avaliado. PAS e SSD foram estatisticamente inferiores ($p < 0,05$) ao CER quanto a porosidade total na profundidade superior, e apenas SSD se diferiu do CER na profundidade de 10-20 cm.

Embora a PT seja sensível a alterações quando o solo é submetido a distintos usos e manejos, a avaliação da distribuição de tamanho de poros pode refletir de uma forma mais

detalhada a condição físico-hídrico do solo. Isso porque as diferentes classes de diâmetros dos poros desempenham distintas funções. Neste estudo, assumiram-se apenas duas divisões de classes: macroporos ($> 0,08$ mm) e microporos ($< 0,08$ mm) definidas de acordo com *Soil Science Society of America* (2001). No geral, ocorreu um aumento percentual da MIC e, conseqüentemente redução da MAC, para todos os sistemas quando contrastados com o CER (Figura 9). Os resultados quanto aos sistemas que se diferiram da vegetação nativa para a MIC foram similares aos apresentados para PT, para as duas profundidades. A diminuição do volume de macroporos remete a uma preocupação quanto a interferência na aeração e na dinâmica da solução (água e nutrientes) do solo que ocorre majoritariamente nesta classe (KLEIN E LIBARDI, 2002). Nos solos sob PAS e SSD que apresentaram estas condições, o desenvolvimento das plantas possivelmente ficou restrito pelos valores de MAC na camada superficial próxima a $0,1 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, considerado que alguns pesquisadores adotam este valor como limite inferior crítico (REICHERT et al., 2009; SILVA et al., 2010).

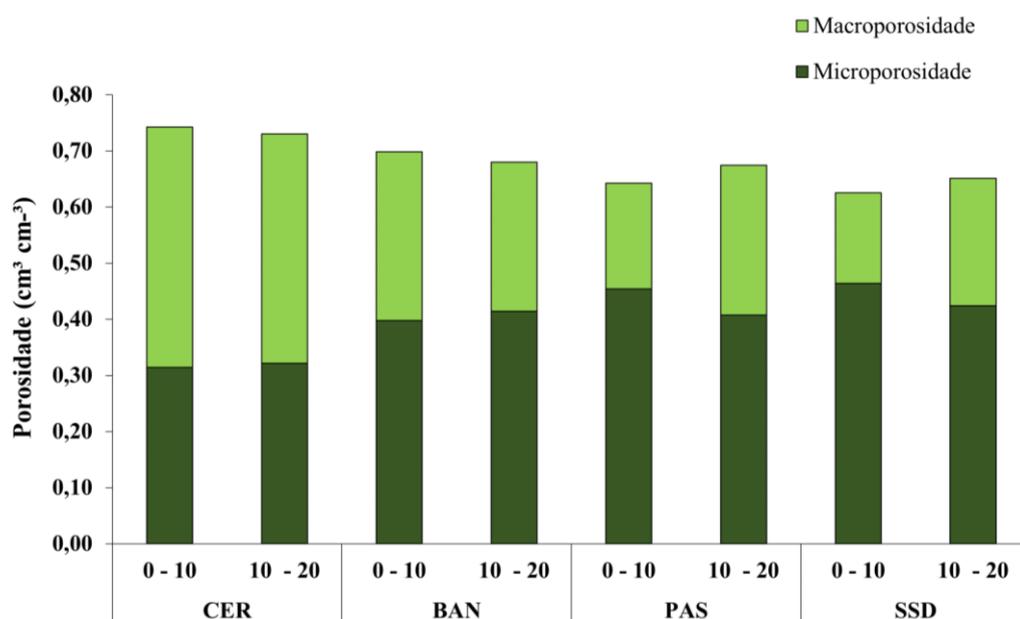


Figura 9. Distribuição percentual da porosidade total do solo em macro e microporosidade para os sistemas: CER (Cerrado), BAN (Banana), PAS (Pastagem) e SSD (Sistema de semeadura direta) nas profundidade de 0-10 e 10-20 cm.

5.6.2.5 Estabilidade de agregados

Para os resultados quanto a agregação do solo avaliado pelo DMP constatou-se que apenas o SSD diferiu-se estatisticamente do CER, para as duas profundidades. O solo sob SSD apresentou um DMP de 2,46 mm, indicando redução em torno de 55% quando comparado ao

DMP que a vegetação nativa (DMP de 5,45 mm) na profundidade de 0-10 cm e cerca de 62% para a profundidade inferior, DMPs de 2,08 e 5,48 mm (SSD e CER, respectivamente) sendo o pior resultado encontrado para estabilidade de agregados. Os sistemas BAN e PAS apresentaram diferenças inferiores a 10% na camada superior. Para a BAN foi observado um decréscimo de 26% na profundidade de 10-20 cm. Apesar disso, a distribuição pela quantidade de agregados estáveis em água pela classe de tamanho foi considerada homogênea ao longo do perfil (0-20 cm) de cada sistema.

Na Figura 10 é explorado graficamente o percentual de cada classe de tamanho dos agregados que se mantiverem resilientes a agitação em água. Essa metodologia permite avaliar a susceptibilidade dos agregados a desagregação e erosão (SOUZA et al., 2021), quanto mais agregados retidos nas peneiras de malhas maiores maior a estabilidade, e conseqüentemente menor sensibilidade aos processos erosivos (KEMPER e CHEPIL, 1965). Ficando evidente a diferença de agregação do SSD em relação aos demais sistemas, com aproximadamente 60% da sua agregação sendo composta por microagregados (< 2 mm). A MOS é um dos fatores mais importantes quanto ao processo de formação e estabilização dos agregados, dado sua atividade como agente cimentante entre as partículas minerais do solo e os materiais orgânicos presentes no solo. A qualidade da MOS também influencia na estabilidade dos agregados (CORNELIS et al., 2019). Os menores teores de COT foram encontrados para o SSD, nas duas profundidades. Isso possivelmente explica a menor estabilidade de agregação do sistema em comparação aos demais. Possivelmente esses menores teores são decorrentes do revolvimento do solo na semeadura, que podem acelerar a taxa de decomposição da MOS. Outro ponto, é o baixo aporte de material orgânico no manejo, devido à ausência de uso plantas de cobertura e por se tratar de produção de milho destinado a silagem.

Porém, com apenas a avaliação individual do DMP e MOS as informações não foram conclusivas para avaliação da qualidade física do solo. Outros estudos também os apontaram como indicadores tênues na sensibilidade de distinguir os efeitos de distintas práticas de uso e manejo do solo (CORNELIS et al., 2019).

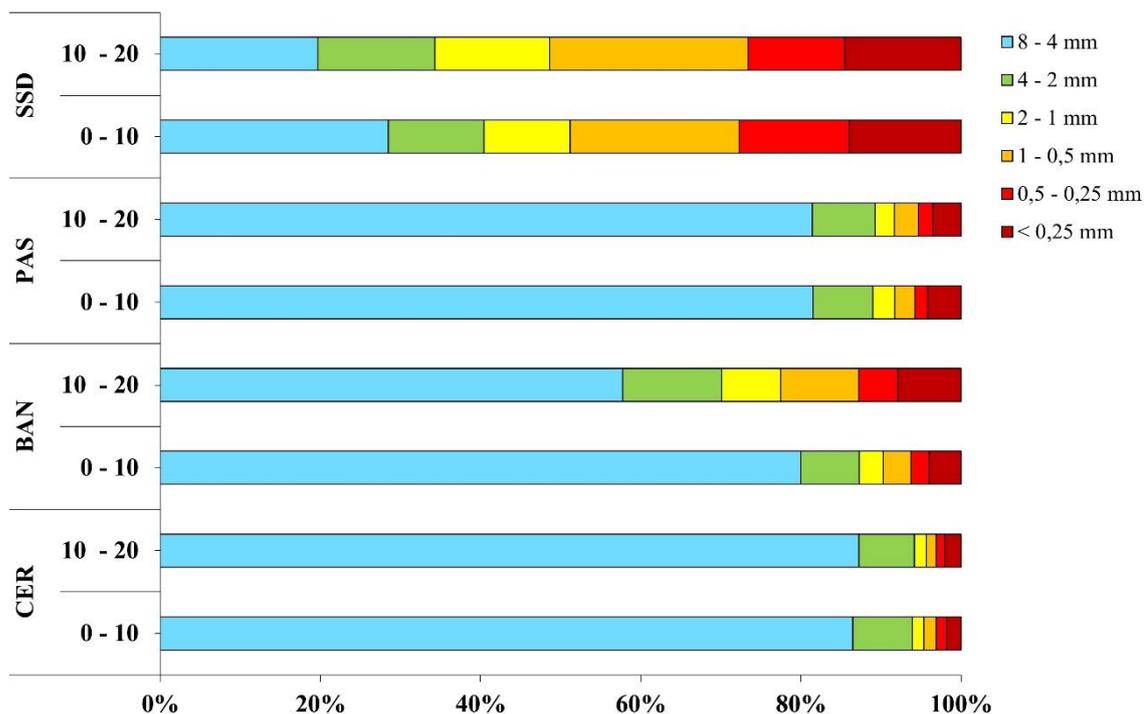


Figura 10. Distribuição percentual por classe de tamanho dos agregados do solo sob os sistemas de CER (Cerrado), BAN (Banana), PAS (Pastagem) e SSD (Sistema de semeadura direta) nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm.

5.6.2.6 Curva de retenção de água

Para a CC, para PAS e SSD apresentaram valores médios superiores ao CER, com aumentos percentuais de 43,18% e 47,73% respectivamente, para a profundidade superior. Na profundidade de 10-20 cm, os solos sob BAN E SSD foram significativamente ($p > 0,05$) superiores, com acréscimo de 27,67% e 31,45% em seus valores médios quando comparados ao CER. Para o PMP, os menores valores observados foram para o CER, nas duas profundidades, em que se diferiu dos solos sob PAS e SSD na profundidade de 0-10 cm e da BAN na profundidade de 10-20 cm. O CAD também apresentou o menor valor observado para a vegetação nativa, sendo que este se diferiu estatisticamente de todos sistemas na profundidade superior, com ganhos de 16,56%, 17,86% e 19,81% para BAN, SSD e PAS, respectivamente. Embora na profundidade de 10-20 cm a diferença para o CAD do solo sob CER e os demais sistemas tenham sido numericamente superior em relação a camada superior, estatisticamente ($p < 0,05$) apenas o solo sob SSD foi considerado diferente da vegetação nativa.

Os diferentes sistemas de uso e manejo do solo apresentaram diferentes curvas de retenção de água no solo (Figura 11). Essa alteração da forma da CRA da vegetação nativa pelo uso do solo para agricultura. Os resultados deste estudo divergiram de outros trabalhos, em que o comportamento observado para os parâmetros da curva como θ_s e θ_r , e os atributos CC e

CAD foram de superiores para vegetação nativa em comparação a diferentes sistemas de uso e manejo agrícola (MACHADO et al., 2008).

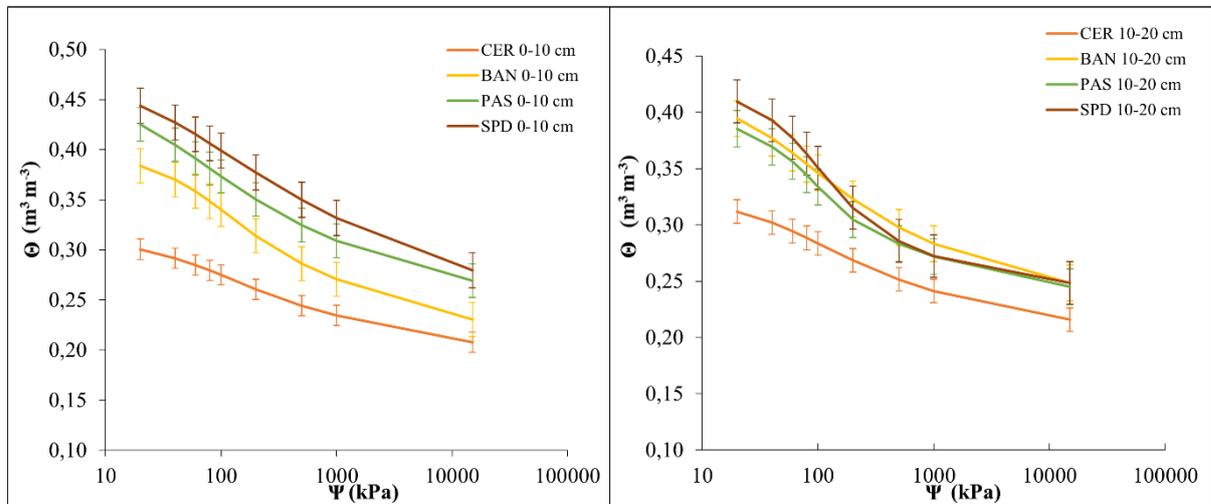


Figura 11. Curvas de retenção de água no solo para os sistemas de uso do solo sob CER (Cerrado); BAN (Pomar de banana); PAS (Pastagem), Sistema de semeadura direta (SSD). Curvas apresentadas referem-se a média dos parâmetros para o modelo ajustado. Barra de erro representa o erro padrão (n=3).

5.6.3 *Relações entre as pontuações da avaliação do campo visual e os valores das propriedades físicas do solo*

Por meio da matriz de correlação de *Spearman* (Figura 13 – posição superior) verifica-se que as pontuações gerais das avaliações visuais com os resultados obtidos para as propriedades físicas determinadas em laboratório e a campo, apresentaram correlações significativas. Na Figura 10 está em destaque (asteriscos na cor azul) apenas as correlações significativas ($p < 0,05$). Esse resultado indica que os índices DRES e VESS estão relacionados a características diagnósticas. Essas avaliações visuais, que são baseadas na estrutura do solo, consideram valores baixos para DS e RMP como indicativo de boa qualidade (PULIDO MONCADA et al., 2014b). Neste estudo, as propriedades DS, MOS, MICRO, θ_s (theta_s) foram as propriedades que melhor se correlacionaram aos escores do DRES e VESS. Ressalta-se que o VESS obteve correlações mais significativas com a DS, MICRO e θ_s quando comparado ao DRES. Outros estudos que fizeram comparação de métodos visuais com parâmetros físicos encontraram resultados semelhantes para as propriedades DS, RP e MICRO (CASTIONI et al., 2018; CHERUBIN; TORMENA; KARLEN, 2017; GUIMARÃES et al., 2017; PULIDO MONCADA et al., 2014b; TUCHTENHAGEN et al., 2018). Dentre as

correlações significativas, a menor correlação com os indicadores visuais foi observada para a MOS. O teor de argila e o DMP não se correlacionaram com nenhum dos métodos visuais.

Em confirmação aos resultados observados pela correlação de *Spearman*, quando os escores dos exames visuais VESS e DRES foram usados como preditor na estimativa de propriedades físicas e parâmetros da CRA validou-se relações lineares simples significativas ($p < 0,05$). As relações lineares significativas entre as avaliações visuais e as propriedades físicas estão destacadas pelo preenchimento em azul nos gráficos de dispersão da parte inferior da Figura 10. As equações e parâmetros dessas relações estão dispostas na Tabela 5. Isso sugere que, para solos com características similares ao Latossolo Vermelho-Amarelo avaliado, pelo menos um parâmetro físico quantitativo está associado a avaliação visual da qualidade estrutural do solo. Ressalta-se que é necessário cuidado quanto ao uso destas equações apresentadas para outras classes de solos e condições de uso e manejo, em razão ao número restrito de dados ($n=12$) utilizados para o desenvolvimento das equações. Ainda assim, estas equações podem auxiliar na validação de uso dos exames visuais para análise da qualidade estrutural do solo.

Tabela 5. Relações entre as propriedades físicas e parâmetros da CRA do solo e os exames visuais (DRES e VESS) da qualidade estrutural do solo.

Equação	R ²	p
ADA = 140,89 DRES + 24,89	0,35	0,04
ARG = 466,69 DRES + 41,04	0,34	0,05
DS = 1,095 DRES -0,082	0,74	0,00
MIC = 0,504 DRES -0,037	0,76	0,00
MO = 4,2 DRES + 0,274	0,57	0,00
RMP = 5,627 DRES-1,106	0,45	0,02
$\theta_s = 0,504$ DRES-0,037	0,72	0,00
$\theta_r = 0,313$ DRES-0,049	0,53	0,01
ARG = 725,95 VESS-51,18	0,35	0,04
DS = 0,551 VESS + 0,111	0,88	0,00
MIC = 0,259 VESS + 0,049	0,88	0,00
MO = 6,007 VESS -0,367	0,68	0,00
RMP = -1,778 VESS + 1,52	0,57	0,00
$\theta_s = 0,264$ VESS + 0,049	0,86	0,00
$\theta_r = 0,01$ VESS + 0,059	0,49	0,01

ADA: argila dispersa em água; ARG: argila; DS: densidade do solo; MIC: microporosidade; PT: porosidade total; RMP: resistência mecânica á penetração; M.O.: matéria orgânica; θ_s : umidade de saturação; θ_r : umidade residual.

A análise de componentes principais (ACP) indicou que os dois primeiros componentes, retidos pelo critério de Kaiser 1961 (autovalor > 1), explicaram

aproximadamente 56% da variância dos dados. No gráfico biplot (Figura 12) é apresentado os dois primeiros componentes (PC1 e PC2). O PC1 que explicou a maior parcela da variação dos dados (41%), correlacionou-se positivamente ($> 0,60$) com os valores do VESS, DS, RP, MIC e θ_s e em direção oposta com o DRES e MO. O PC2, que explicou 14,6% da variância total, relacionou-se negativamente com θ_r e n. No gráfico é possível observar a existência de dois agrupamentos, em que os indivíduos do CER estão agrupados do lado negativo do eixo PC1, enquanto PAS e SSD do lado positivo. Ou seja, enquanto o CER apresentou maior pontuação do DRES, sendo assim, “melhor” qualidade estrutural, e menor pontuação para DS, MIC, RMP e VESS. Para PAS e SSD foi observado um padrão oposto. O sistema de manejo da BAN se manteve em posição central aos eixos.

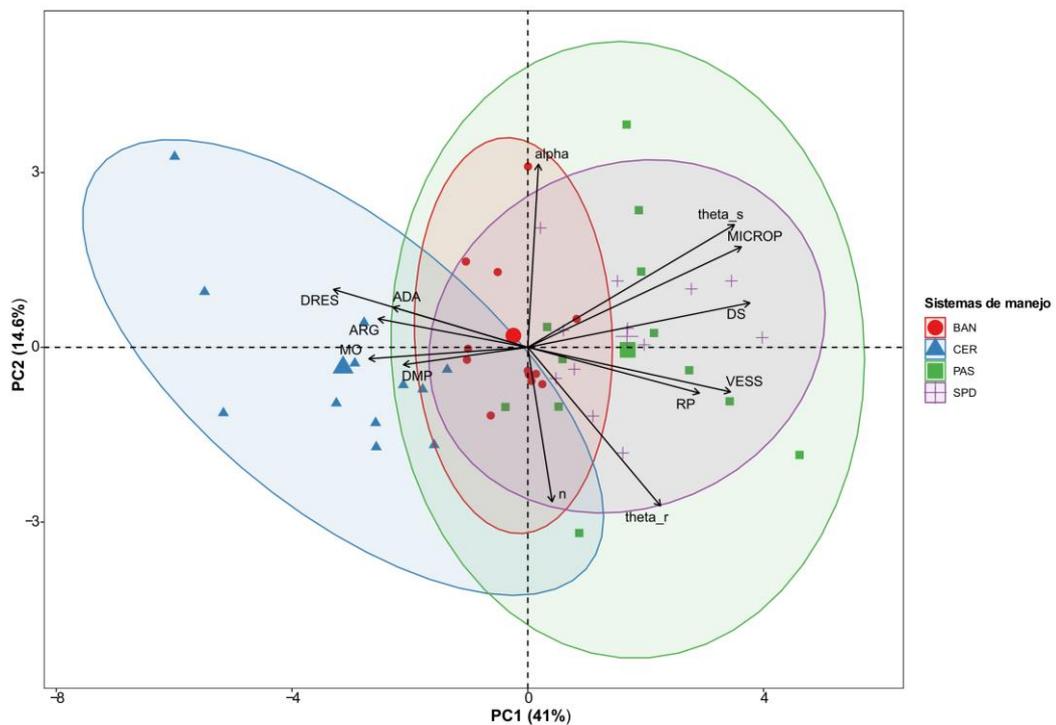


Figura 12. Gráfico ACP (Análise de Componentes Principais) Biplot representando diferentes sistemas de manejo (BAN, CER, PAS e SSD) em dois principais componentes para atributos físicos do solo (ADA: argila dispersa em água; ARG: argila; DS: densidade do solo; DMP: diâmetro médio ponderado; MICROP: microporosidade; PT: porosidade total; RP: resistência mecânica à penetração; M.O.: matéria orgânica; θ_s : umidade de saturação; θ_r : umidade residual; α = inverso do valor de entrada de ar; n = parâmetro empírico de forma da curva) e avaliações visuais da estrutura do solo (DRES e VESS). Esses dois componentes explicaram 41,0% e 14,66% da variância total, respectivamente.

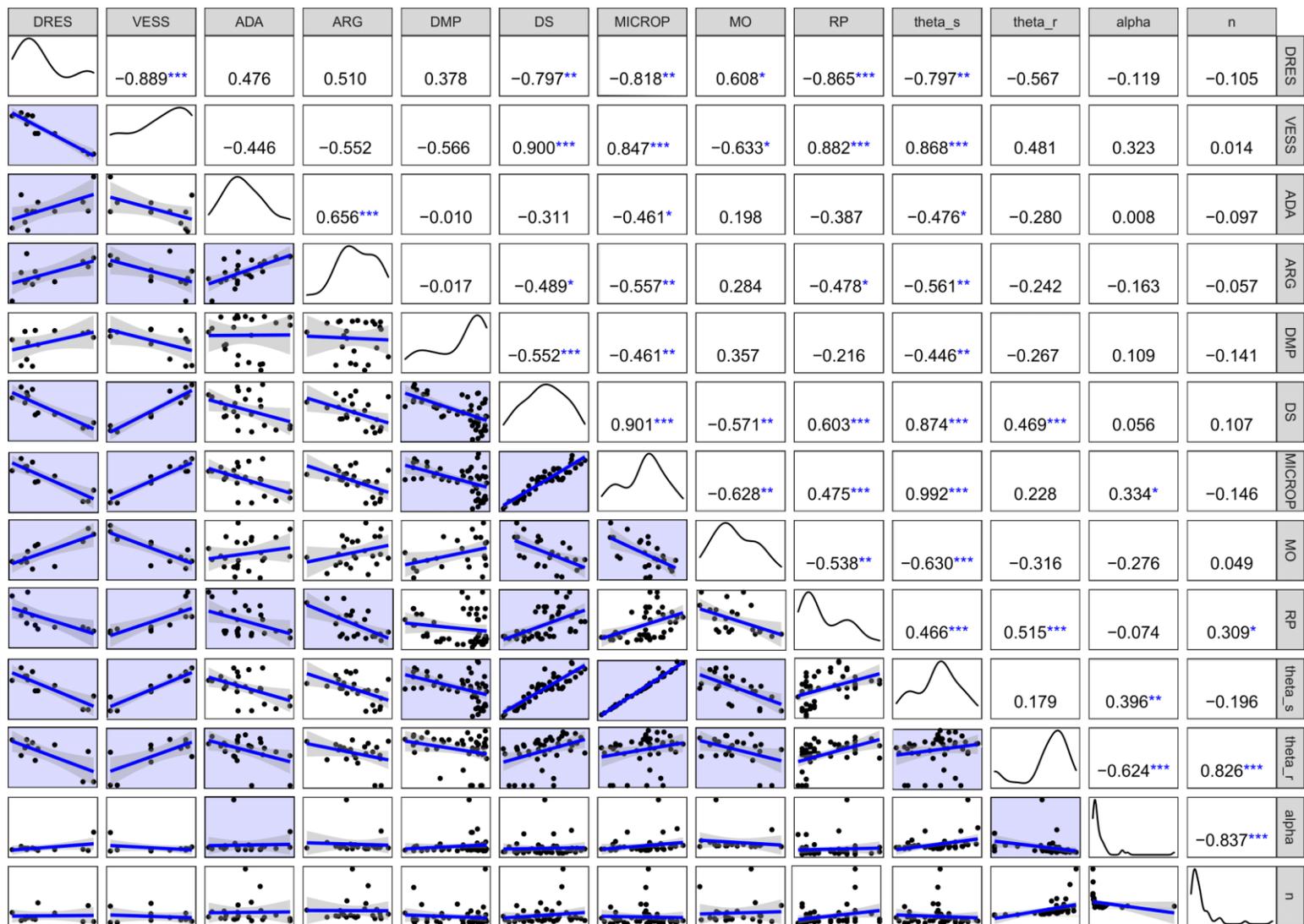


Figura 13. Matriz de correlação de Spearman (parte superior) e regressões lineares (parte inferior) para atributos físicos do solo e avaliações visuais da qualidade estrutural do solo. Significância: * ($p < 0,05$); ** ($p < 0,01$); *** ($p < 0,001$).

5.7 CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo demonstraram que os métodos visuais DRES e VESS são metodologias promissoras para estimativa de mudanças na qualidade estrutural de um solo sob diferentes usos e manejos. Porém, ressalva-se a sugestão de adaptação de ambos quanto a classificação do tamanho dos agregados para contemplar um maior número de condições de desagregação para solos tropicais. As propriedades físicas DS, RMP e PT se reafirmaram como potenciais indicadores para avaliação da qualidade do solo. Relações significativas foram identificadas entre os métodos visuais e as propriedades físicas e hídricas do solo, indicando que o DRES e o VESS estão associados as características diagnósticas. Sendo assim, ampara a confiabilidade quanto ao uso de metodologias visuais para análise da qualidade estrutural do solo. Pesquisas futuras são importantes para validar essas metodologias em outras classes e manejos de solo. Por fim, a conversão do CER em sistemas agrícolas proporcionou perda da qualidade física e estrutural do solo. O manejo do SSD sem adoção de práticas de rotação de culturas e cobertura do solo a longo prazo apresentou condições de degradação da estrutura similares a uma pastagem degradada.

5.8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALAOUI, A.; BARÃO, L.; FERREIRA, C. S. S.; SCHWILCH, G.; BASCH, Gottlieb; GARCIA-ORENES, F.; MORUGAN, A.; MATAIX-SOLERA, J.; KOSMAS, C.; GLAVAN, M. Visual assessment of the impact of agricultural management practices on soil quality. **Agronomy Journal**, v. 112, n. 4, p. 2608-2623, 30 abr. 2020. Wiley. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/agj2.20216>.

ANDREWS, S.S.; KARLEN, D.L.; CAMBARDELLA, C.A. The Soil Management Assessment Framework. **Soil Science Society of America Journal**, v. 68, n. 6, p. 1945-1962, nov. 2004. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2004.1945>.

BENEVENUTE, P. A.N.; MORAIS, E. G. de; SOUZA, A. A.; VASQUES, I. C.F.; CARDOSO, D. P.; SALES, F. R.; SEVERIANO, E. C.; HOMEM, B. G.C.; CASAGRANDE, Daniel R.; SILVA, B. M. Penetration resistance: an effective indicator for monitoring soil compaction in pastures. **Ecological Indicators**, v. 117, p. 106647, out. 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106647>.

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis: Part 1: physical and mineralogical methods**. 2nd ed. Madison: Soil Science Society of America, 1986. p. 363-375.

BYRNES, R. C.; EASTBURN, D. J.; TATE, K. W.; ROCHE, L. M. A Global Meta-Analysis of Grazing Impacts on Soil Health Indicators. **Journal Of Environmental Quality**, v. 47, n. 4, p. 758-765, jul. 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2134/jeq2017.08.0313>.

CARDOSO, E. J. B. N.; VASCONCELLOS, R. L. F.; BINI, D.; MIYAUCHI, M. Y. H.; SANTOS, C. A.; ALVES, P. R. L.; PAULA, A. M.; NAKATANI, A. S.; PEREIRA, J. M.; NOGUEIRA, M. A. Soil health: looking for suitable indicators. what should be considered to assess the effects of use and management on soil health?. **Scientia Agricola**, v. 70, n. 4, p. 274-289, ago. 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-9016201300040000>

CASTIONI, G. A.; CHERUBIN, M. Roberto; MENANDRO, L. M. S.; SANCHES, G. M.; BORDONAL, R. O.; BARBOSA, L. C.; FRANCO, H. C. J.; CARVALHO, J. L. N. Soil physical quality response to sugarcane straw removal in Brazil: a multi-approach assessment. **Soil And Tillage Research**, v. 184, p. 301-309, dez. 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2018.08.007>.

CHERUBIN, M. R.; FRANCO, A. L.C.; GUIMARÃES, R. M.L.; TORMENA, C. A.; CERRI, C. E.P.; KARLEN, D. L.; CERRI, C. C. Assessing soil structural quality under Brazilian sugarcane expansion areas using Visual Evaluation of Soil Structure (VESS). **Soil And Tillage Research**, v. 173, p. 64-74, nov. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2016.05.004>.

CHERUBIN, M. R.; CHAVARRO-BERMEJO, J. P.; SILVA-OLAYA, A. M. Agroforestry systems improve soil physical quality in northwestern Colombian Amazon. **Agroforestry Systems**, v. 93, n. 5, p. 1741-1753, 4 ago. 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s10457-018-0282-y>.

CORNELIS, W.M.; AKODI, D.; KOMUTUNGA, E.; AGABA, C.; AHUMUZA, E.; ORATUNGYE, K. Exploring visual soil evaluation and examination methods on highly-weathered tropical soil. **Soil And Tillage Research**, v. 195, p. 104360, dez. 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2019.104360>.

CUI, J.; ASKARI, M. S.; HOLDEN, N. M. Visual Evaluation of Soil Structure Under Grassland management. **Soil Use And Management**, v. 30, n. 1, p. 129-138, 31 jan. 2014. Wiley. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1111/sum.12100>.

DANIELSON, R. E.; SUTHERLAND, P. L. Porosity. In: KLUTE, Arnold (ed.). **METHODS OF SOIL ANALYSIS Part 1: physical and mineralogical methods**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. Cap. 18. p. 443-462.

DROBNIK, T.; GREINER, L.; KELLER, A.; GRÊT-REGAMEY, A. Soil quality indicators – From soil functions to ecosystem services. **Ecological Indicators**, v. 94, p. 151-169, nov. 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.06.052>.

FILHO, J.; RALISCH, R.; GUIMARÃES, M. F.; MEDINA, C. C.; BALBINO, L. C.; NEVES, C. S. V. J. Método do Perfil Cultural para avaliação do estado físico de solos em condições tropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 2, p. 393-399, jun. 1999. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06831999000200022>.

FRANCO, H. H. S.; GUIMARÃES, R. M. L.; TORMENA, C. A.; CHERUBIN, M. R.; FAVILLA, H. S. Global applications of the Visual Evaluation of Soil Structure method: a systematic review and meta-analysis. **Soil And Tillage Research**, v. 190, p. 61-69, jul. 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2019.01.002>.

GUIMARÃES, R. M. L.; BALL, B. C.; TORMENA, C. A. Improvements in the visual evaluation of soil structure. **Soil Use and Management**, v. 27, n. 3, p. 395-403, jun. 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1475-2743.2011.00354.x>.

GUIMARÃES, R.M.L.; NEVES JUNIOR, A. F.; SILVA, W. G.; ROGERS, C.D.; BALL, B. C.; MONTES, C. R.; PEREIRA, B. F.F. The merits of the Visual Evaluation of Soil Structure method (VESS) for assessing soil physical quality in the remote, undeveloped regions of the Amazon basin. **Soil And Tillage Research**, v. 173, p. 75-82, nov. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2016.10.014>.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA DO BRASIL – INMET. Normais Climatológicas (2011/2022). Brasília - DF, 2022.

JOHANNES, A.; WEISSKOPF, P.; SCHULIN, R.; BOIVIN, P. To what extent do physical measurements match with visual evaluation of soil structure? **Soil And Tillage Research**, v. 173, p. 24-32, nov. 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2016.06.001>.

KARLEN, D. L.; VEUM, K. S.; A SUDDUTH, K.; OBRYCKI, J.F.; NUNES, M. R. Soil health assessment: past accomplishments, current activities, and future opportunities. **Soil and Tillage Research**, v. 195, p. 104365, dez. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2019.104365>.

KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. Size distribution of aggregation. In: BLACK, C. A.; EVANS, D. D.; ESNMINGER, L. E.; CLARK, F. E. (Ed.). **Methods of soil analysis: Part 1: physical and mineralogical properties**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. p. 499-510.

LISBÔA, F. M.; DONAGEMMA, G. K.; BURAK, D. L.; PASSOS, R. R.; MENDONÇA, E. S. Indicadores de qualidade de Latossolo relacionados à degradação de pastagens. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1184-1193, set. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2016000900018>.

MACHADO, J. L.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; SCAPIM, C. A. Inter-relações entre as propriedades físicas e os coeficientes da curva de retenção de água de um latossolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 2, p. 495-502, abr. 2008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832008000200004>.

MONCADA, M. P.; PENNING, L. H.; TIMM, L. C.; GABRIELS, D.; CORNELIS, Wim M. Visual examinations and soil physical and hydraulic properties for assessing soil structural quality of soils with contrasting textures and land uses. **Soil And Tillage Research**, v. 140, p. 20-28, jul. 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2014.02.009>.

PAIVA, I. A.; RITA, Y. L.; CAVALIERI-POLIZELI, K. M. Knowledge and use of visual soil structure assessment methods in Brazil – A survey. **Soil And Tillage Research**, v. 204, p. 104704, out. 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2020.104704>.

PULIDO MONCADA, M.; GABRIELS, D.; LOBO, D.; REY, J. C.; CORNELIS, W. M. Visual field assessment of soil structural quality in tropical soils. **Soil And Tillage Research**, v. 139, p. 8-18, jun. 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2014.01.002>.

R CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna, Austria, 2022. Disponível em: <https://www.r-project.org>.

RALISCH, R.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; TOMAZI, M.; HERNANI, L. C.; MELO, A. S.; SANTI, A.; MARTINS, A. L. S.; BONA, F. D. de. **Diagnóstico rápido da estrutura do solo - DRES**. Londrina: Embrapa Soja, 2017. 63 p. (Embrapa Soja. Documentos, 390).

SPERA, S. T.; DENARDIN, J.E.; ESCOSTEGUY, P. A. V.; SANTOS, H. P.; FIGUEROA, Enrique Alberto. Dispersão de argila em microagregados de solo incubado com calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n., p. 2613-2620, dez. 2008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832008000700002>.

TEIXEIRA, P. C. (ed.). **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2017. 577 p.

TUCHTENHAGEN, I. K.; LIMA, Cl. L. R.; BAMBERG, A. L.; GUIMARÃES, R. M. L.; PULIDO-MONCADA, M. Visual Evaluation of the Soil Structure under Different Management Systems in Lowlands in Southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 42, n. 0, p. 1-13, 3 maio 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/18069657rbc20170270>

WEIL, Ray R.; BRADY, Nyle C. **The Nature and Properties of Soils**. 15. ed. England: Pearson, 201