

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
RIO GRANDE DO SUL
Campus Ibirubá**

BRUNA MENDES ALVAREZ

**O USO DA RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO COMO INDICADOR DE QUALIDADE
FÍSICA DE SOLO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**Ibirubá
2023**

BRUNA MENDES ALVAREZ

**O USO DA RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO COMO INDICADOR DE QUALIDADE
FÍSICA DE SOLO**

Trabalho de conclusão de curso entregue
ao Curso de Agronomia do Instituto
Federal de Educação Ciência e
Tecnologia do Rio Grande do Sul–
Campus Ibirubá como requisito parcial
para obtenção do título de Bacharel em
Agronomia

Orientador: Prof. Dr. Daniel Uhry

Ibirubá

2023

BRUNA MENDES ALVAREZ

O USO DA RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO COMO INDICADOR DE QUALIDADE FÍSICA DE SOLO

Trabalho de conclusão de curso entregue ao Curso de Agronomia do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – Campus Ibirubá como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Uhry

Aprovado em 14 de Julho, 2023.

Prof. Dr. Daniel Uhry– Orientador

Prof. Dr. Ben-Hur Costa de Campos

Prof. Ma. Pâmela Oruoski

Prof. Dra. Daniela Batista dos Santos– Coordenadora do Curso de Agronomia do IFRS – Campus Ibirubá

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por estar sempre presente, mostrando que as dificuldades existem para que nos tornamos cada vez mais fortes.

À instituição, que acolhe todos os alunos, tornou possível a elaboração do trabalho e todas as experiências vividas.

Aos Professores, Daniel Uhry e Ben-Hur Costa de Campos pela orientação, paciência, suporte e apoio para possibilitar a elaboração do trabalho.

Às minhas amigas e amigos, pela troca de experiências e incentivo.

A todos os participantes dessa pesquisa, sem os quais não seria possível a realização deste trabalho.

RESUMO

O solo é um sistema organizado de forma que propicie a disponibilidade de nutrientes, água, oxigênio e acomodação para as plantas através de suas características e propriedades, com destaque para a estrutura. Alguns parâmetros são usados como indicadores para identificar a qualidade de solos agrícolas, como densidade, porosidade, curva de retenção de água e resistência à penetração. A mensuração da qualidade do solo se apresenta como peça importante para tomada de decisões ligadas à produtividade e conservação. Solos com alto grau de compactação exigem um maior gasto de energia da planta para sua emergência e desenvolvimento do sistema radicular o que interfere no desenvolvimento da parte aérea e assim no potencial produtivo das culturas. A resistência à penetração é um método prático e de análise rápida pois consiste na medição da força utilizada para penetração das camadas que formam o solo, utilizando esse princípio como estimativa para avaliação da estruturação de solo, dificuldade da emergência de plântulas e desenvolvimento de raízes. Esse trabalho foi desenvolvido através da consulta da literatura existente em sites de documentos científicos como o Google Acadêmico, Biblioteca Digital Scielo, Periódicos da Capes e livros encontrados na Biblioteca do IFRS - Campus Ibirubá, sendo utilizados como referência 54 documentos passando por uma seleção de conteúdos de leitura. Os objetivos deste trabalho de conclusão de curso, são compreender os conceitos de qualidade de solo e quais os seus indicadores, investigar a utilização da resistência à penetração em solos agrícolas e analisar se a resistência a penetração de solo é um indicador confiável de qualidade de solo, tendo como justificativa a falta de trabalhos que tragam a resistência diretamente como um indicador de qualidade de solo e não como um avaliador de compactação de solo, tendo em vista que o sistema radicular das plantas depende de todos os fatores e características do solo e não somente a dificuldade na emergência e no desenvolvimento ao longo do ciclo em função das camadas compactadas. Com essa revisão bibliográfica concluiu-se que a resistência à penetração de solo pode ser utilizada como indicador de qualidade física de solo, desde que associada a outros parâmetros de avaliação de qualidade como a densidade de solo e taxa de infiltração.

Palavras-chaves: Penetrômetro. Qualidade de solo. Compactação. Indicadores de qualidade.

ABSTRACT

Soil is a system organized in a way that provides the availability of nutrients, water, oxygen and accommodation for plants through its structure, characteristics and properties. Some parameters are used as indicators to identify the quality of agricultural soils, such as density, porosity, water retention curve and resistance to penetration. Measuring soil quality is an important part of decision-making related to productivity and conservation. Soils with a high degree of compaction require a greater expenditure of energy by the plant for its emergence and development of the root system, which interferes with the development of the aerial part and, therefore, with the productive potential of the crops. Penetration resistance is a practical and quick analysis method as it consists of measuring the force used to penetrate the layers that form the soil, using this principle in comparison to soil structure, difficulty in seedling emergence and root development. This work was developed by consulting the existing literature on scientific document sites such as Google Scholar, Scielo, Capes Periodicals and books found in the IFRS Library - Campus Ibirubá, using 54 documents as a reference through a selection of reading contents. The objectives of this monograph are to understand the concepts of soil quality and what are its indicators, to investigate the use of resistance to penetration in agricultural soils and to analyze whether resistance to soil penetration is a reliable indicator of soil quality, having as justification the lack of works that bring resistance directly as an indicator of soil quality and not as an evaluator of soil compaction, considering that the root system of plants depends on all factors and characteristics of the soil and not just the difficulty in emergence and in the development throughout the cycle as a function of the compacted layers. With this bibliographic review, it was concluded that the resistance to soil penetration can be used as an indicator of soil physical quality, provided that it is associated with other parameters.

Keywords: Penetrometer. Soil quality. Compression. Quality Indicators.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Sintomas visuais de compactação nas plantas e no solo 16

Quadro 2: Valores de índice de cones limitantes ao crescimento do sistema radicular encontrados na literatura 26

Quadro 3: Propriedades do solo e suas relações com a qualidade do solo 34

Quadro 4: Métodos de análises de densidade do solo 41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Simbologia das variáveis das fórmulas de padronização do índice de cone25

Tabela 2: Porosidade e resistência do solo à penetração em relação à densidade do solo38

Tabela 3: Conjunto mínimos de indicadores biológicos, físicos e químicos para avaliar a qualidade e as condições dos solos43

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema para escolha de material de leitura da revisão bibliográfica.15

Figura 2: Método umidade gravimétrica e fator “f”23

Figura 3: Amostras de solo vedadas para quantificação de umidade.24

Figura 4: Penetrômetro de impacto modelo STOLF 1983 adaptado.28

Figura 5: Detalhe da haste que mede a profundidade enquanto penetra no solo.30

Figura 6: Teste do equipamento. a) protótipo da régua b) modelo definitivo em alumínio c) nível de leitura definitiva 30

Figura 7: Exemplo de penetrômetro estático da Falker 32

Figura 8: Página onde os dados de resistência à penetração são importados32

Figura 9: Agregados com evidências de feições de degradação.36

Figura 10: Triângulo de classificação textural de solos.40

LISTA DE ABREVIÇÕES E SIGLAS

| | |
|------------------|---|
| RP | Resistência à penetração |
| IC | Índice de cone |
| ASAE | American Society of Agricultural Engineers |
| ASAE R313 | Norma R3131 - American Society of Agricultural Engineers |
| NRCC | Natural Research Council – Conselho de Pesquisas Naturais |

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO12

2 DESENVOLVIMENTO 14

2.1 METODOLOGIA DA PESQUISA 14

2.2 RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE SOLO 16

2.2.1 Compactação 16

2.2.2 Penetrometria 19

2.2.2.1 Influência da umidade na resistência 21

2.2.3 Índice de cone23

2.2.4 Penetrômetros26

2.2.4.1 Penetrômetro dinâmico ou de impacto28

2.2.4.2 Penetrômetro estático ou eletrônico 30

2.3 QUALIDADE DE SOLO 33

2.3.1 Estrutura35

2.3.2 Porosidade37

2.3.3 Densidade40

2.3.4 Indicadores de qualidade física de solo43

3 CONCLUSÃO46

REFERÊNCIAS

1 INTRODUÇÃO

A degradação do solo em si, pode ser definida como o declínio da qualidade do solo por meio do uso incorreto pelo homem. Assim, tratar à cerca da degradação é um termo amplo e aberto, ele pode ser mais específico quando definido como mudanças adversas no status dos nutrientes, atributos estruturais, e concentração de eletrólitos e elementos tóxicos, ou seja, é a perda da capacidade do potencial do solo em produzir bens e serviços quantitativos ou qualitativos como resultado dos processos degradativos (SANTOS, 2023) como, erosão, lixiviação, compactação do solo e a perda de matéria orgânica (D'ANDRÉA, 2001). Sendo um processo que aumenta anualmente e é observado em todo o mundo (PEREIRA, et al., 2021; citado por BARBOSA e OLIVEIRA, 2022).

O Brasil tem uma área de solos degradados maior do que toda a área ocupada com lavoura que, segundo a CONAB é de 77 milhões de ha nesta safra de 2022/2023, ou seja, as terras degradadas no Brasil representam praticamente toda a área agrícola ocupada, enquanto a área de pastagens é de 159 milhões de ha, das quais 69 milhões de ha eram degradadas em 2015, podendo chegar a 80 milhões na atualidade (DA SILVA, 2023).

De acordo com Bünemann et al. (2018) a qualidade do solo é mensurada pela capacidade do solo de funcionar dentro dos limites do ecossistema e do uso da terra para assegurar a produtividade biológica, preservar a qualidade ambiental e promover a saúde das plantas e animais. O conceito de qualidade do solo foi desenvolvido para poder avaliar a condição de um solo sob um manejo específico (SARMIENTO, FANDINO e GOMEZ, 2018). Entretanto, desde o início dos diálogos a qualidade de solo é apontada como um aspecto chave, pois, parte-se do entendimento de que o solo é responsável por garantir a produtividade biológica dentro das fronteiras do ecossistema, mantendo o equilíbrio ambiental e promovendo a saúde de plantas, animais e o próprio ser humano (PEZARICO et al., 2013; citado por MENDANHA, 2022).

Tendo em vista que, além dos indicadores químicos e biológicos, os indicadores físicos também são utilizados para mensurar a qualidade do solo. Nesse contexto, parâmetros físicos, como a resistência mecânica à penetração (RP) podem ser utilizados para avaliar por exemplo o efeito da compactação de solo e a

produtividade de plantas. A penetrometria ou avaliação da resistência do solo à penetração é uma metodologia interessante para se avaliar, comparativamente, a variabilidade estrutural do perfil do solo, segundo RALISH et al., (2008).

A resistência à penetração de solo é variável conforme a condição estrutural e o conteúdo de água no solo no momento da avaliação (VALICHESKI et al., 2012). De acordo com Cavalcante et al. (2011) existem formas para fazer a determinação da resistência à penetração, logo, o uso de penetrômetros permite identificar a compactação nas camadas que limitam o desenvolvimento do sistema radicular das plantas. Devido a possibilidade de fazer um grande número de amostras, apresentar facilidade de manuseio e rapidez, a penetrometria é uma técnica quantitativa bastante utilizada (SILVEIRA et al., 2010). A mensuração das características e condições de qualidade de um solo estão diretamente ligadas à tomada de decisão de manejo adotado com objetivo de alcançar maiores produtividades e conservação dos recursos.

Nesse sentido, o trabalho tem como objetivos compreender os conceitos de qualidade de solo e quais os seus indicadores, investigar a utilização da resistência à penetração em solos agrícolas e analisar se a resistência à penetração de solo é um indicador confiável de qualidade de solo.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 METODOLOGIA DA PESQUISA

Para a elaboração desta revisão bibliográfica foram consultados 131 documentos, entre eles, artigos científicos, dissertações de mestrado, teses de doutorado, monografias e livros. Sendo que destes 131, foram utilizados como fonte de dados 114 documentos com relevância para o tema que passaram na seleção de material de leitura, a qual foi feita de acordo com o título, ano de publicação, palavras-chave do resumo e relevância para o tema como mostra o esquema a seguir (Figura 1).

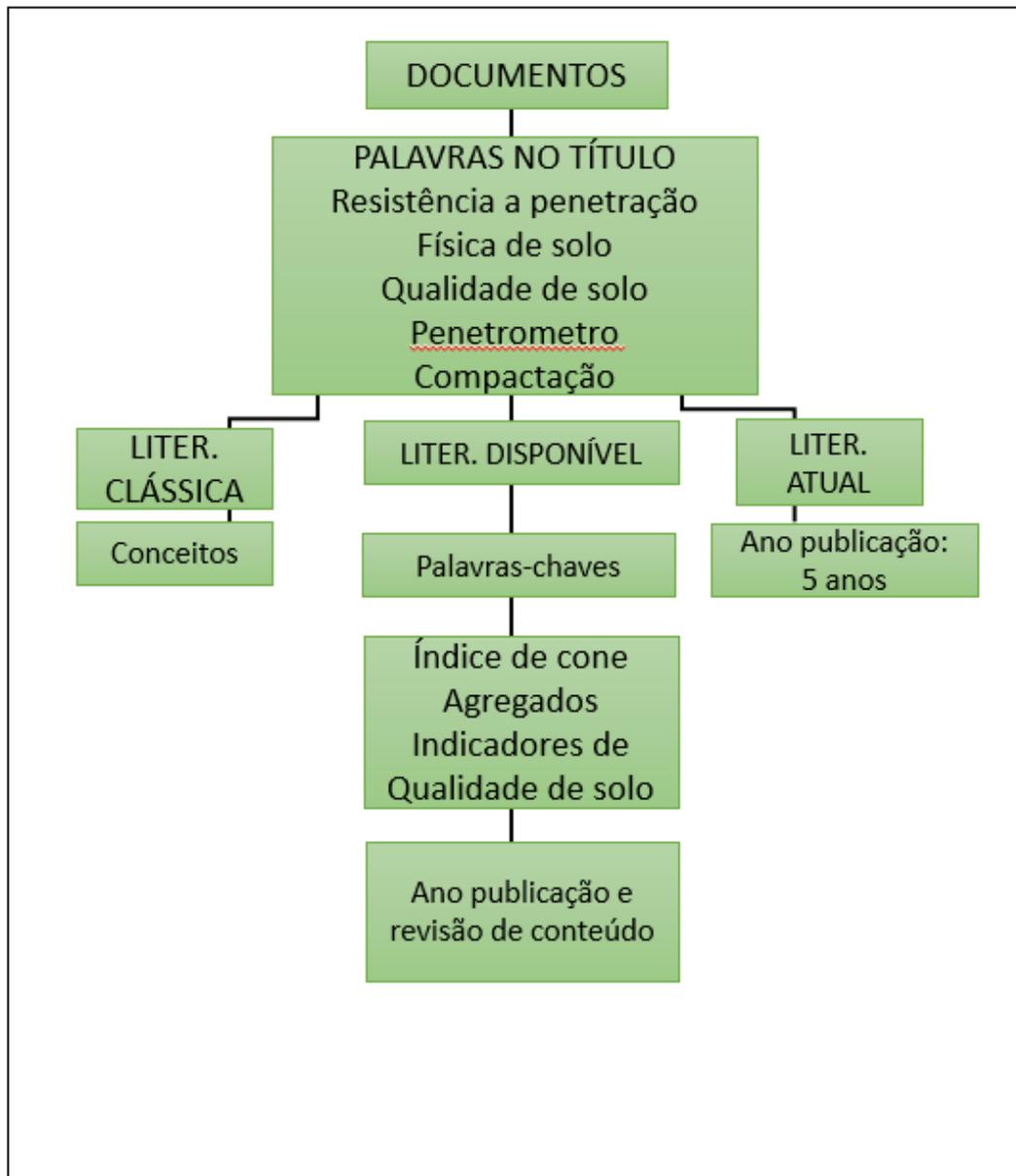
Como ferramenta de pesquisa de documentos para esta revisão bibliográfica foram usados os sites Google Acadêmico, Biblioteca Digital Scielo e Periódicos CAPES. Alguns livros foram consultados na Biblioteca Mário Quintana do IFRS – Campus Ibirubá. Sendo assim, o presente trabalho de conclusão de curso se apresenta como uma pesquisa de finalidade básica estratégica, com abordagem qualitativa, método de pesquisa hipotético dedutivo com o objetivo descritivo de procedimento bibliográfico.

Nesse contexto, a elaboração desta monografia se justifica pela falta de trabalhos que relacionam a resistência à penetração diretamente como um indicador de qualidade de solo e não apenas como um avaliador de compactação de solo, tendo em vista que, o sistema radicular das plantas depende de todos os fatores e características do solo e não somente a dificuldade na emergência e no desenvolvimento ao longo do ciclo em função das camadas compactadas.

Seguindo um critério de escolha dos materiais, foram avaliadas as palavras no título que tinham relação com o assunto “resistência à penetração” e “qualidade de solo”. Os documentos foram separados em literatura clássica da área, por conter principalmente os conceitos primários do tema abordado abrangendo documentos datados de antes dos anos 2000, literatura disponível classificada em função dos documentos de 2000 até 2018 onde foi encontrada a maior parte das informações e literatura atual, responsável pelos dados atualizados.

Para os documentos que se encaixavam em literatura disponível foram utilizados como critérios as palavras-chave citadas abaixo no esquema, levando em conta o ano de publicação e a relevância dos dados encontrados em cada um.

Figura 1 - Esquema para escolha de material de leitura da revisão bibliográfica



Fonte: ALVAREZ, (2023).

2.2 RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE SOLO

2.2.1 Compactação

Os solos representam o principal suporte para a vida na Terra e, quando bem estruturados, são capazes de propiciar a sobrevivência para as plantas e os animais. Entretanto, no aspecto físico, o manejo inadequado juntamente com a utilização de máquinas pesadas e suas ferramentas, pode causar danos irreversíveis na capacidade produtiva dos solos (MARQUES FILHO, 2023).

Segundo Caputo (1976), na área da engenharia civil, entende-se como compactação de um solo, o processo manual ou mecânico que tem como objetivo reduzir o volume de seus vazios e, assim, aumentar sua resistência, tornando-o mais estável. Já MANTOVANI (1987), traz a visão da compactação de solo para a realidade da agricultura, logo, o solo está compactado quando a proporção do volume total de poros do solo é inadequada ao máximo desenvolvimento de uma cultura ou manejo eficiente do campo. A compactação do solo pode ser considerada em relação à porosidade, densidade do solo e à resistência à penetração e seus efeitos visuais podem ser observados nas plantas e no solo, como mostra o Quadro 1.

Quadro 1 – Sintomas visuais de compactação nas plantas e no solo.

| Planta | Solo |
|--|---|
| Demora na emergência | Crosta no solo |
| Baixa estatura | Zona compactada em superfície |
| Folhas com coloração não características | Maior potência necessária para preparo do solo (sistema convencional) |
| Sistema radicular superficial | Erosão excessiva pela água |
| Raízes mal formadas | Água empoçada |

Fonte: MANTOVANI (1987).

Nesse sentido, Pezarico (2009) faz a seguinte citação:

Quando a compactação atinge limites críticos, prejudicando o crescimento radicular, diminuindo a quantidade de água disponível para as plantas e fazendo com que as raízes não atravessem a camada compactada do solo, os sistemas radiculares das plantas acabam afetados pela diminuição no volume de solo explorado, pouca quantidade de ar, água e nutrientes disponíveis e assim, limitando a produtividade das culturas.

Entre outros efeitos prejudiciais da compactação nas propriedades física dos solos, as deformidades ligadas diretamente ao sistema de poros, organização de agregados, permeabilidade a água e ao ar podem refletir em um crescimento deficiente do sistema radicular e assim na produtividade da cultura, segundo REICHERT et al. (2010).

Esses processos ocorrem, porque a compactação modifica a estrutura do solo que sofre uma reorganização dos seus componentes, aumentando sua impermeabilidade e, assim, reduzindo a porosidade total (BERGAMIN et al., 2010). Existem alguns fatores limitantes para o desenvolvimento das raízes em camadas compactadas de solo, são eles: a falta de nutrientes disponíveis, a água disponível e as relações entre água e ar. Porém, o suprimento de oxigênio, na camada compactada, não é fator limitante para a penetração e desenvolvimento das raízes (ZIMMERMAN, 1961; citado por GROHMANN e QUEIROZ NETO, 1966).

Partindo desse pressuposto, de acordo com Denardi, (2018) o desenvolvimento do sistema radicular sofre restrições em função da baixa disponibilidade de água e nutrientes em solos compactados, associados ou não às limitações de natureza química, como a falta de algum nutriente no solo.

Entretanto, a compactação do solo é definida pela diminuição da porosidade devido a aplicação de forças externas, causando aumento da densidade e alta resistência à penetração das raízes. Esta condição influencia no armazenamento de água e sua disponibilidade para as plantas, bem como, sua condutividade hidráulica, afetando o crescimento e desenvolvimento do sistema radicular (SHAH et al., 2017; citado por FERREIRA et al., 2019).

Seguindo o mesmo raciocínio, Ferreira et al., (2019) também apresentaram características de compactação do solo ligadas ao aumento de densidade em uma

amostra de solo com o mesmo volume e diminuição da porosidade, no qual resultaria na expulsão do ar contido no solo.

Como complemento ao estudo do entendimento da origem e dos motivos do aparecimento das camadas compactadas no solo, Jandrey, (2019) cita a influência do déficit de palhada no solo e a falta de rotação de culturas no sistema produtivo deixando o solo exposto ao sol, associado ao uso de máquinas pesadas e aumento de tráfego nas áreas em períodos chuvosos, assim podendo provocar outros problemas como lixiviação de nutrientes e escoamento superficial, gerando erosões e redução da população de organismos do solo.

Para Ferreira, (2019) para que os efeitos da compactação sejam minimizados, é fundamental que as atividades agrícolas sejam realizadas na faixa de umidade do solo abaixo do limite de plasticidade, o que caracteriza seu estado de friabilidade.

As alterações na estrutura do solo se apresentam em decorrência da compactação do solo e, conseqüentemente, ocorre a degradação física do solo. Essa degradação tem sido avaliada pelo uso de alguns atributos físicos do solo, tendo maior destaque a resistência do solo à penetração de raízes (RP) (MARQUES, 2022).

2.2.2 Penetrometria

A penetrometria é um método indireto de avaliação da compactação do solo, consiste no emprego de instrumentos que avaliam o grau de resistência do solo, por meio da introdução de uma haste rígida de metal, tendo na sua extremidade uma ponteira metálica na forma de cone. O aparelho mensura a pressão necessária para empurrar esta ponta a uma profundidade específica dentro de um volume de solo (ALBUQUERQUE et al., 2010).

A técnica da penetrometria é antiga, existem relatos que mostram que os primeiros protótipos de equipamentos que dariam origem ao que hoje são os penetrômetros, datam de 1846 (PERUMPRAL, 1987; citado por MOME FILHO, 2012). Segundo STOLF (1991) a engenharia civil é o ramo no qual se encontram as maiores contribuições ao estudo da determinação da resistência do solo e subsolo. São utilizados penetrômetros de grandes dimensões, numa escala cerca de 20 vezes maior do que no ramo agrícola.

A resistência à penetração se dá por dois fatores: a) compressão das partículas primárias e b) fricção entre partículas primárias e agregados durante o movimento

relativo da raiz (GROENEVELT et al., 1984; citado por ROSOLEM, 1994) sendo investigada através da penetrometria (BEUTLER et al., 2007). Logo, os valores de resistência do solo à penetração, mensurados por um penetrômetro, são indicadores secundários de compactação, não sendo medição física direta de qualquer condição do solo, pois a resistência à penetração é afetada por muitos outros fatores além da compactação do solo. O mais importante é o teor de umidade no solo, já que a densidade não pode ser medida diretamente pela leitura de penetrômetro, sendo que a textura do solo afeta diretamente os valores de resistência à penetração (MANTOVANI, 1987).

Segundo LAIA, MAIA e KIM (2006), a caracterização da camada compactada e do comportamento do solo em relação às suas propriedades físicas, como densidade, porosidade, umidade e capacidade de retenção e infiltração da água e, principalmente, a localização da camada compactada, é de extrema significância para o planejamento das técnicas modernas de produção.

No entanto, o sistema radicular não responde à compactação e sim a resistência do solo à penetração, e um dos fatores que causam o aumento dessa resistência é a compactação. Solos com maior teor de argila indicaram maiores valores de resistência à compactação e quando compactados apresentam maiores limitações para o desenvolvimento de raízes, conforme ROSOLEM, (1994).

Além da influência da quantidade de argila presente no solo, outro fator que tem influência direta na resistência a penetração é o teor de água, independente da densidade do solo analisado. Quando os solos estão molhados, as condições de aeração na ponta da raiz exercem maior controle sobre a penetração do que a resistência do solo. Em contraste, quando os solos estão ressecados, a impedância aumenta e o crescimento da raiz é limitado pela resistência do solo à penetração (RANEY e EDMINSTER, 1961; citado SILVA JUNIOR, 2001).

De acordo com Mome Filho, (2012) juntamente com as forças de adesão e coesão entre os sólidos do solo, o baixo teor de água no solo gera um maior estado de tensão de água nos poros, ocorrendo maior resistência à deformação da estrutura. Já com o aumento de umidade a força de coesão e o atrito entre as partículas tendem a diminuir fazendo com que a força necessária para penetração também diminua.

A resistência à penetração de solo é um atributo muito utilizado como parâmetro na avaliação do solo, como por exemplo, na criação de mapas de

compactação. Sua forma de amostragem é um assunto pouco abordado tanto quanto ao arranjo experimental no campo quanto aos aparelhos utilizados. A maioria dos métodos de avaliação dos atributos físicos do solo acaba sendo um empecilho perante algumas técnicas inovadoras, como a agricultura de precisão, pois diversas análises laboratoriais são trabalhosas e demandam muito tempo para obtenção de resultados que possam ser utilizados na tomada de decisões sobre o manejo do solo. Devido a isso muitos aparelhos foram desenvolvidos para facilitar e acelerar a obtenção de resultados, que é o caso dos penetrômetros, equipamentos simples que inferem a resistência à penetração (AGGARWAK, 2006; citado por MOME FILHO, 2012).

As decisões do manejo podem ter influência de alguns atributos do solo como matéria orgânica e densidade do solo, assim como umidade.

O crescimento das raízes é afetado diretamente pela resistência à penetração do solo resultando em taxas reduzidas no seu alongamento, crescimento superficial e atraso no início das raízes laterais devido às maiores tensões mecânicas impostas na ponta da raiz, gerando uma maior resistência ao atrito e maior pressão de expansão da cavidade. Portanto, valores altos de resistência à penetração no solo afetam principalmente a zona apical das raízes. A rotação de culturas com plantas de enraizamento profundo pode contribuir para a descompactação dos solos e conseqüentemente diminuir a resistência à penetração (COLOMBI e KELLER, 2019; citado por OLIVEIRA et al., 2022).

A medição da resistência à penetração do solo é feita através da prática de penetrometria, os valores encontrados nas verificações com o penetrômetro representam a força necessária para inserção da sonda no solo e se apresenta como uma ferramenta para o estudo da qualidade de solo (TUBA et al, 2021; citado por OLIVEIRA et al, 2022).

2.2.2.1 Influência da umidade na resistência à penetração

A umidade exerce uma influência sobre importantes processos no solo e na planta tais como: movimento de água, compactação do solo, aeração do solo e desenvolvimento radicular (TIMM et al., 2006).

A resistência à penetração é dependente dos valores de umidade do solo e da densidade, assim correlacionando esses indicadores, pode-se indicar qual a

qualidade do solo em função desses fatores (DEBIASI et al., 2013). Diversos estudos demonstram que a variabilidade da resistência do solo à penetração e a umidade do solo não ocorrem ao acaso, mas apresentam correlação ou dependência espacial. Para diferentes condições de umidade do solo, distintos comportamentos da variabilidade espacial da resistência do solo à penetração. Considerando que a umidade do solo é um dos fatores que exercem forte influência nos resultados da resistência mecânica do solo à penetração (SOUZA et al., 2006).

Montanari et al., (2013) também observaram que a umidade gravimétrica e a resistência do solo à penetração foram os atributos que mais se relacionaram com a estimativa da qualidade física do solo. A umidade e, por consequência, a resistência à penetração podem variar rapidamente ao longo do dia, o que pode mascarar as diferenças observadas na RP devido ao manejo, sugerindo desta forma, que a RP seja avaliada em diferentes áreas ou ao longo do tempo na mesma área, a fim de se verificar sua relação com a umidade (BUSSCHER, 1990 citado por; TAVARES, 2014).

Os valores de umidade para a normalização da RP devem ser definidos em função do tipo de solo devido às distintas capacidades de armazenamento de água desses solos. Para um melhor aproveitamento das potencialidades do penetrômetro de impacto é importante que as medidas sejam realizadas nas faixas de umidade estabelecidas entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente, uma vez que em solos muito úmidos não há diferenciação da medida e em solos muito secos a medida é muito demorada e dificultada pela excessiva resistência do solo. Mesmo nesta faixa relativamente pequena de umidades, é importante que a umidade seja medida, para uma posterior normalização dos dados de RP, uma vez que esta diferença de umidades pode causar variações da resistência à penetração da ordem de 5 Mpa (VAZ, 2002).

A umidade altera a coesão entre as partículas do solo (BELTRAME et al., 1981), assim, quando o solo está seco ou apresenta baixo conteúdo de água, suas partículas apresentam-se mais próximas e difíceis de serem separadas por qualquer força externa (SILVEIRA, et al 2010).

Valores entre 2 MPa têm sido indicados como os limites críticos de resistência do solo à penetração (TORMENA et al., 1998) porém, deve-se considerar que a resistência do solo à penetração possui relação potencial com a umidade do solo (BUSSCHER et al., 1997).

A quantidade de água existente no solo está intimamente ligada aos valores de resistência do solo à penetração, e qualquer alteração neste último fator pode modificar tais valores (BOTTEGA et al., 2011). Nesse sentido, quando a umidade do solo é muito alta, decorrente de elevadas precipitações anteriores ao momento da coleta da RP, acaba favorecendo a quantificação de menores valores desta variável. Ao passo que, quando a umidade do solo é muito baixa, os valores de RP serão mais altos (MIGUEL, 2021).

Vaz, (2002) enfatiza que o procedimento ideal seria medir a umidade no momento da leitura do penetrômetro e posteriormente efetuar algum tipo de correção para os valores de umidade, como o método de quantificação da umidade gravimétrica e o fator “f” (Figura 2).

Figura 2 - Método umidade gravimétrica e fator “f”.

Determinação do teor de umidade presente na amostra de solo, transportada em embalagem impermeável e vedada.

3.2 Procedimento

- Colocar a amostra, com ou sem estrutura deformada, em lata de alumínio numerada e de peso conhecido.
- Pesquisar e transferir para estufa a 105-110°C, deixando nesta condição durante 24 horas.
- Retirar da estufa, colocar em dessecador, deixar esfriar e pesar.

3.3 Cálculo

(1) Umidade Gravimétrica = $100 (a - b) / b$

$$U_r = \left(\frac{a - b}{b} \right)$$

$$f = \frac{a}{b}$$

Em que:

U_r – umidade residual, em $kg\ kg^{-1}$.

f – fator usado para correção da massa de solo utilizada para a massa de solo seca nas determinações em laboratório com a utilização de TFSA (Fator “f”).

a – massa da amostra seca ao ar, em g.

b – massa da amostra seca a 105 °C até atingir peso constante, em g.

A umidade atual representa o conteúdo de água presente na amostra em determinado momento e local, podendo ser determinada in situ ou por amostragem, para determinação em laboratório. Para determinação da massa de água presente na amostra de solo nas condições da coleta, a amostra precisa ser mantida sob as condições na qual foi coletada, transportada para o laboratório em embalagem impermeável e vedada (Figura 3), pesada, seguida da determinação da massa da amostra de solo seca em estufa. A massa de água presente na amostra é então obtida por diferença (Embrapa, 2017).

Figura 3 - Amostras de solo vedadas para quantificação de umidade.



Fonte: ALVAREZ (2019).

A importância de saber os valores de umidade é poder correlacioná-los juntamente com os dados de densidade e a própria resistência para quantificar o quanto o solo está denso e se as coletas foram feitas próximo a capacidade de campo através da umidade. O aumento de densidade e a diminuição de umidade, eleva os valores de resistência à penetração (GENRO JUNIOR et al., 2004). A relação de resistência mecânica do solo com a umidade e densidade do solo, descrita como curva de resistência do solo, pode ser utilizada para fazer inferências sobre as condições estruturais do solo em relação às resistências críticas para o crescimento das plantas. Deste ponto de vista, a avaliação da resistência do solo e a determinação da umidade é importante no estudo do efeito da compactação sobre as condições físicas de solo,

podendo ser utilizadas como orientar o manejo e o controle da qualidade física de solo (IMHOFF, SILVA e TOMENA, 2000).

2.2.3 Índice de cone

O índice de cone é definido como a força por unidade de área da base necessária para empurrar o penetrômetro através de um pequeno incremento de deslocamento no solo. Os valores são expressos em Mega pascais (Mpa) de índice de cone (IC) na profundidade em metros (m) ou índice de cone médio (SILVA JUNIOR, 2001).

O equipamento começou se chamando “cone penetrômetro” e tem sido usado há muitos anos, com uma aplicação bem variada em diferentes áreas, por causa de sua facilidade, rapidez e baixo custo de operação em medir a resistência à penetração do solo. Suas aplicações incluem: exploração de terrenos, determinação da resistência do solo, previsão de trafegabilidade, e a determinação do impedimento de penetração do sistema radicular e da compactação do solo. Os grandes fatores de influência que afetam a resistência do solo são: teor de umidade do solo, densidade do solo, dureza do solo e o tipo de cone, diâmetro da base, ângulo e aspereza da superfície (PERUMPRAL e MONTOVANI, 1993).

Uma grande restrição em relação à técnica do índice de cone foi a falta de informações na época, quanto a transformação da unidade prática para uma unidade física universal, sendo assim elencou-se três fórmulas mais usadas para transformação dos dados do índice de cone, são elas: Fórmula de Sanders, fórmula de Brix e fórmula dos holandeses, a última sendo a mais utilizada na época. Depois de estudá-las, foram encontrados alguns problemas de dedução e a falta de dados importantes para mensuração exata dos valores que o índice de cone sugeria (Stolf (1994).

Utilizando as variáveis descritas na Tabela 1, as deduções de fórmulas para padronização dos resultados eram seguidamente atualizadas, em função de nenhuma fórmula ser totalmente aceita (CAPUTO, 1976).

Tabela 1 – Simbologia das variáveis das fórmulas de padronização do índice de cone.

| SÍMBOLO | DESCRIÇÃO | UNIDADE |
|---------|------------------------------|-----------------|
| F | Força da resistência do solo | kgf |
| A | Área da base do cone | cm ² |

| | | |
|---------|--|---------------------|
| R=F/A | Resistência a penetração ou índice de cone | kgf/cm ² |
| M | Massa que provoca o impacto | kg |
| M | Massa excluída (demais componentes) | kg |
| M+m | Massa total | kg |
| G | Aceleração da gravidade | m/s ² |
| Mg e mg | Peso das massas consideradas | kg |
| H | Altura de queda | cm |
| X | Penetração unitário ocasionado por impacto | cm/impacto |

Fonte: STOLF (1991), adaptado pelo autor.

A fórmula de Sanders: $F = (M + m)g + Mgh/x$ foi proposta em 1851 e iguala a energia de queda do peso com o deslocamento da haste no solo, assim, desprezando qualquer perda de energia (STOLF, 1991).

A fórmula dos holandeses: $F = (M + m)g + \frac{M}{M+m} \cdot Mgh/x$ é uma atualização da fórmula de Sanders, levando em consideração as perdas de energia entre as massas, devido ao impacto (STOLF, 1991.)

A fórmula de Brix: $F = mg + \frac{M}{M+m} \cdot \frac{m}{M+m} \cdot \frac{Mgh}{x}$ trata-se da fórmula dos holandeses melhorada, logo, direcionada para penetrômetros sem frenagem (STOLF, 1991).

O Índice de cone atualmente é obtido, segundo uma recomendação de norma padrão denominada ASAE R313, onde a força por unidade de área é obtida a uma velocidade uniforme de penetração de 1829 mm por minuto ou 72 polegadas por minuto, com leituras a intervalos de 50 mm de penetração, utilizando-se um cone de 20,27 mm de diâmetro na base para solos macios, e 12,83 mm para solos duros. A recomendação é que a haste de suporte deve ter um diâmetro de 15,9 mm e 9,5 mm respectivamente, para solos macios e duros (BALASTREIRE, 1990; citado por LEITE, SANTOS e LANÇAS, 2010) e acrescenta também que os cones devem ser substituídos quando desgaste do diâmetro de base exceder a 3%, que, por conseguinte, pode afetar o índice de cone em 5%.

Atualmente, o valor de índice de cone de 2,0 Mpa tem sido adotado como o valor limitante ao desenvolvimento do sistema radicular e desenvolvimentos das plantas (TORMENA, 1996) porém, como mostra o Quadro 2, diversos autores estabeleceram valores limites de resistência à penetração de solo efetuando estudos com diferentes culturas e tipos de solos.

Quadro 2 - Valores de índice de cones limitantes ao crescimento do sistema radicular encontrados na literatura.

| Índice de cone (Mpa) | Tipo de solo | Cultura | Autores | Ano |
|-----------------------------|---------------------------|----------------|------------------|------------|
| 1,5 a 3,5 | Latossolo Vermelho-escuro | Milho | ROSOLEM et al | 1994 |
| 2 | Latossolo roxo | Milho | TORMENA et al | 1998 |
| 2 e 3 | Latossolo roxo | Pastagem | IMHOFF et al | 2000 |
| 1,65 | Latossolo Vermelho | Milho | FREDI et al | 2006 |
| 3 | Latossolo Vermelho | Soja | GIRARDELLO et al | 2014 |

Fonte: Adaptado pelo autor.

No entanto, a resistência à penetração serve para descrever a resistência física que o solo oferece a algo que tenta se mover através de suas camadas (PEDROTTI et al., 2001; citado por SILVEIRA et al., 2010). Esta resistência é um índice integrado, ou seja, uma consequência da compactação, da umidade, da textura, do tipo mineral das argilas, da quantidade e tipo do agregado e porosidade do solo (FOLEGATTI et al., 1990).

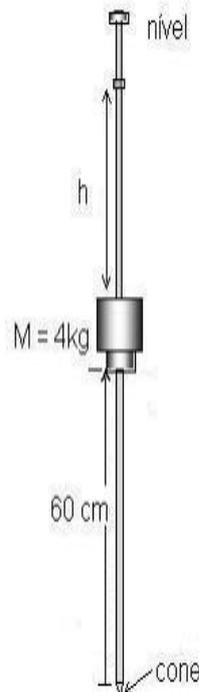
2.2.4 Penetrômetros

O primeiro relato do uso de um método de penetração dinâmica de solo foi encontrado através de um folheto por Goldman em 1669 na Alemanha, este folheto informa a listagem do equipamento comercializado, onde especifica uma estrutura para bater denominada “cabeça”, 20 hastes de um metro, uma marreta de madeira e 20 adaptadores em formato de tronco cônico para redução de atrito. Pode-se ter uma ideia da resistência do solo através da indicação de golpes deferidos na estrutura, logo, recomendava-se a medição do avanço das hastes no solo a cada 20 golpes (BROMS e FLODINS, 1988; citado por NAVEIRA, 2019).

Broms e Flodin, (1988) ainda citam que em 1936, Künzel desenvolveu e lançou um penetrômetro denominado de “Prüfstab”. Era um equipamento simples, com

hastes de cinco a oito metros e com diâmetro de 20 mm. Um peso de 5 a 6 kg era lançado de uma altura de 50cm para o avanço do conjunto das hastes. Eram registrados e anotados graficamente o avanço a cada 10 golpes ou o número de golpes necessário para o avanço a determinada distância, em geral de 10 cm, sendo que o método era empregado para determinar as espessuras de solo e o comprimento de estacas.

Figura 4 - Penetrômetro de impacto modelo STOLF 1983 adaptado.



Fonte: MANIERI (2005).

Segundo VAZ (2002) os penetrômetros são classificados com relação a sua unidade de funcionamento para a penetração do cone no solo, onde organizou dois grupos, o primeiro seriam os penetrômetros dinâmicos ou de impacto onde a penetração é feita através de impactos de um corpo metálico e segue como referência a metodologia dos primeiros penetrômetros desenvolvidos e um segundo grupo onde ficariam os penetrômetros eletrônicos ou estáticos que são aqueles que utilizam a penetração no solo com velocidade constante e dependem de um sistema hidráulico e geralmente apresentam associações com outras tecnologias como computadores de bordo onde os dados são salvos, mas enfatiza que penetrômetros ou penetrógrafos são instrumentos que medem a resistência à penetração em unidades de pressão (força/área) de um cone padronizado posicionado na extremidade de uma haste de

metal, quando inseridos no interior do solo independente do seu método de funcionamento.

Vários são os tipos de penetrômetros, variando desde os que funcionam por impacto até os mais modernos, constituídos de células de carga e programas computacionais que proporcionam melhor funcionalidade e precisão nos dados coletados segundo LAIA, MAIA e KIM (2006), sendo que todos adotam o método indireto chamado Índice de Cone (IC) que mede a resistência a que o solo exerce em relação a penetração de uma ponta cônica (MOLIN, DIAS e CARBONERA, 2012).

Com a evolução das tecnologias ao longo do tempo, hoje a aplicação e os tipos de penetrômetros variam muito, especialmente nas várias estratégias utilizadas nas montagens dos equipamentos, mas seguindo as especificações do cone e da velocidade de penetração apresentadas pela Sociedade Americana de Engenharia Agrícola (REINERT et al., 2008).

2.2.4.1 Penetrômetros dinâmicos ou de impacto

Algumas características do penetrômetro de impacto ou dinâmico se tornaram interessantes para a utilização no campo, em razão do baixo custo, resultados independentes do operador e a possibilidade de calibração pouco frequente segundo TORMENA E ROLOFF (1996). A simplicidade do equipamento faz com que se torne atrativo do ponto de vista econômico, apresentando grande facilidade na execução de seu funcionamento (BROMS e FLODIN, 1988).

O penetrômetro de impacto, é constituído de um peso de curso constante que provoca a penetração da haste no solo através de impactos. À medida que o penetrômetro atinge camadas mais adensadas/compactadas, a penetração por impacto é menor, possibilitando assim a localização dessas zonas no perfil. A leitura da penetração é feita na própria haste que é graduada em centímetros (PANDOLFI et al., 2007).

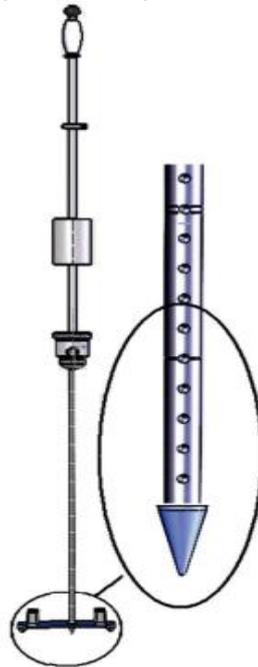
Em função das características de praticidade foi verificado que o penetrômetro de impacto é apropriado para todas as aplicações, porém, aconselha-se que durante o ensaio não haja interrupções, especialmente quando é realizado em solos argilosos e saturados (HENRRICK e JONES, 2002; citado por BEUTLER, 2007).

Depois das leituras feitas diretamente na haste de penetração inserida no penetrômetro, havia a necessidade de transformar esses dados para resistência de

carga estática, assim, utilizava-se algumas fórmulas matemáticas. Entre essas fórmulas, destacam-se a fórmula dos Holandeses que seria a mais utilizada na época, a de Brix e a de Sanders, porém, nenhuma dessas fórmulas foram aceitas integralmente na época (STOLF, 1991).

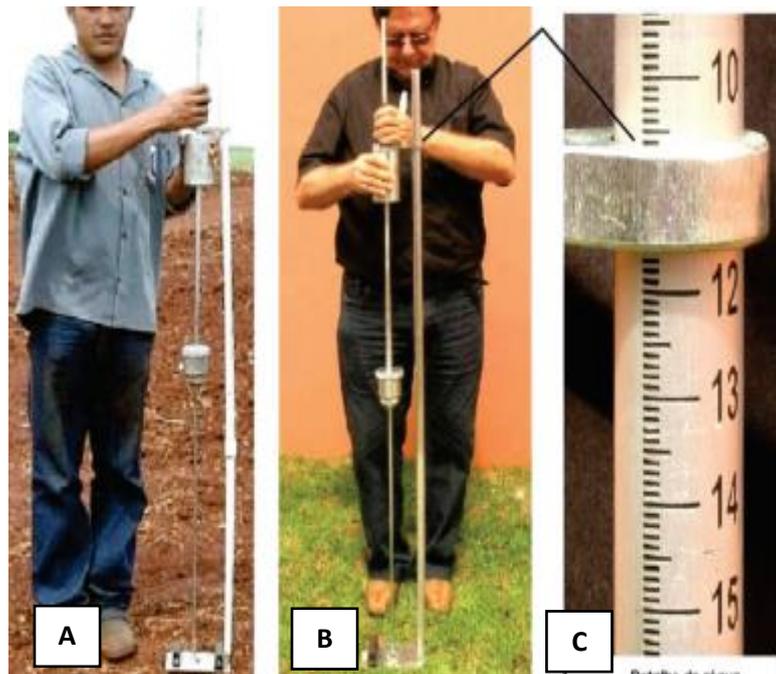
Com o maior emprego do equipamento notou-se a necessidade da padronização das leituras, assim foi desenvolvido uma régua acoplada no equipamento para as aferições, como mostra a Figura 5 e Figura 6 (STOLF, 2012).

Figura 5 - Detalhe da haste que mede a profundidade enquanto penetra no solo.



Fonte: STOLF (2012).

Figura 6 - Teste do equipamento. a) protótipo da régua b) modelo definitivo em alumínio c) nível de leitura definitiva.



Fonte: STOLF (2012).

Com seu lançamento em 1982, o penetrômetro de impacto tornou-se popular entre os produtores por meio de publicações técnicas que explicavam alguns aspectos práticos, elucidando características do equipamento e das operações de uso desenvolvidas por meio de estudos em cana-de-açúcar e pomares de laranja (STOLF, 2014).

2.2.4.2 Penetrômetro estático ou eletrônico

Com o incremento da régua de medida, foi observada uma necessidade de atualização do equipamento penetrômetro a fim de tornar o trabalho mais automatizado. Cappelli et al., (1999) projetaram e construíram um protótipo de um penetrômetro eletrônico geo-referenciado em conjunto com a empresa DLG – Automação Industrial Ltda., apoiado pelo Programa de Inovação Tecnológicas em Pequenas Empresas - PIPE da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, capaz de mensurar o índice de penetração até 600mm de profundidade, geo-referenciar a medição e armazenar os dados (SILVA, 2002).

Este equipamento possui um sensor que indica a profundidade e compõe o cálculo da velocidade, sendo as informações armazenadas na memória interna do equipamento (VOGEL et al., 2017).

Partindo da premissa que o penetrômetro de tipo estático se constitui basicamente de uma sonda, geralmente cônica, que é introduzida lentamente no solo através de uma haste graduada. Na parte superior da haste existe um indicador da carga necessária para a penetração. A média das leituras efetuadas pelo penetrômetro cônico, transformadas em kgf/cm^2 , é chamada Índice de Cone e é utilizada na construção de gráficos. Alguns sensores de força e de posição permitem a obtenção do índice de cone a cada medida de profundidade no penetrômetro eletrônico, sendo que, os sinais analógicos correspondem a força e a posição são condicionados e transformados em digitais, processados e armazenados na memória do equipamento (SILVA, 2002).

Penetrômetros automatizados ou automáticos (Figura 7), são capazes de obter medições de compactação com velocidades de trabalho constantes podem gerar mais dinamicidade no processo de amostragem, pois podem ser acoplados em equipamentos como quadricúlos, tratores e carros o que faz com que se abranja uma maior área em menos tempo de serviço (MOME FILHO, 2012).

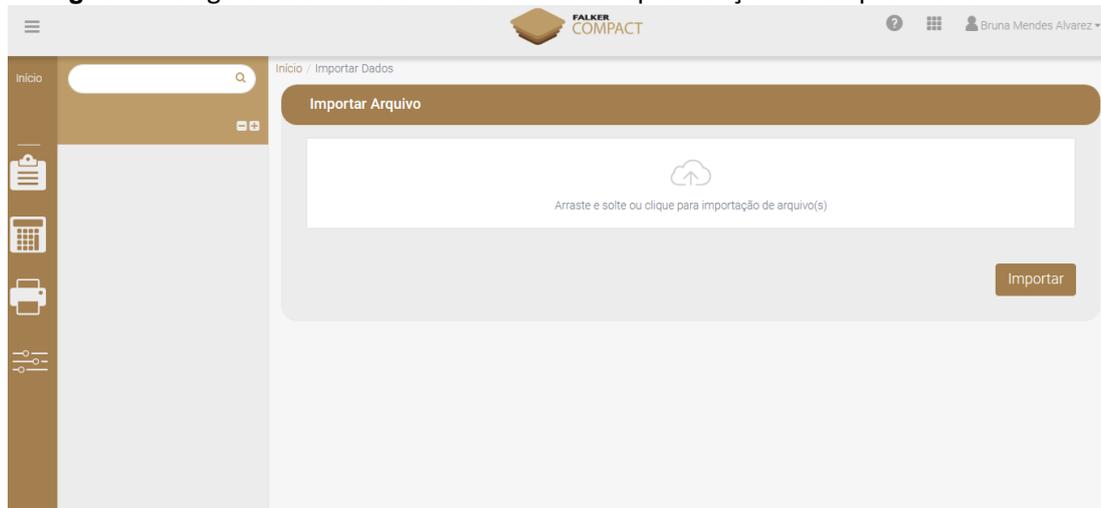
Figura 7 - Exemplo de penetrômetro estático da Falker.



Fonte: ALVAREZ (2019).

Os penetrômetros eletrônicos armazenam os dados de RP em uma memória interna, onde os dados ficam disponíveis para download pelo operador, como mostra a Figura 8.

Figura 8 – Página onde os dados de resistência à penetração são importados.



Fonte: FALKER (2023).

2.3 QUALIDADE DE SOLO

Compreendendo como qualidade do solo a aptidão em manter a fertilidade de sua fauna, visando assim a qualidade ambiental (CARVALHO et al., 2007), admite-se que há uma grande preocupação com a qualidade física do solo, entretanto as qualidades químicas e biológicas também são afetadas pelo manejo por serem dependentes entre si, sendo assim, melhorando a qualidade física de determinado solo indiretamente se está contribuindo para melhorias nas condições químicas e biológicas do solo (DEXTER, 2004).

Larzon e Pierce, (1991) sugerem que a qualidade de um solo deve ser considerada como composta de suas propriedades físicas, químicas e biológicas, de maneira que o solo proporcione meio para o crescimento das plantas, e regular a distribuição de água no meio ambiente, atenuando e degradando produtos danosos ao meio ambiente.

Nesse contexto, Dorin e Parkin (1994) citam:

Qualidade do solo é capacidade ou especificidade do solo de exercer várias funções, dentro dos limites do uso da terra e do ecossistema, para sustentar a produtividade biológica, manter ou melhorar a qualidade ambiental e contribuir para a saúde das plantas, dos animais e humana.

Se tratando da qualidade dos solos, a literatura apresenta duas feições – uma ligada à capacidade inerente do solo e outra ligada à parte dinâmica desse, influenciada pelo seu uso e manejo. A qualidade física de um solo depende de sua composição ou de características intrínsecas como profundidade efetiva, mineralogia e textura, assim como de propriedades que variam no tempo. A profundidade efetiva, mineralogia e textura são características importantes na comparação de sítios diferentes, enquanto, que a quantificação de propriedades dinâmicas é importante para detectar efeitos de sistemas de manejo de solos ao longo do tempo, no mesmo sítio ou solo (GREGORICH e CARTER, 1997; citado REINERT, 2006).

O termo qualidade de solo apenas se tornou mais utilizado depois de um relatório intitulado: “Qualidade do solo e da água – uma agenda para a agricultura.” (NATURAL RESEARCH COUNCIL - NRCC, 1993). Segundo esse relatório, a qualidade do solo havia sido concebida em razão do seu papel em ecossistemas naturais e agroecossistemas, uma vez que a qualidade deste recurso natural, historicamente, sempre esteve diretamente ligada à produtividade (SILVA, 2017).

Nesse contexto, a qualidade do solo é a integração das propriedades biológicas, físicas e químicas do solo, que o habilita a exercer suas funções na plenitude, como mostra o Quadro 3. Sendo assim, a qualidade física do solo também está relacionada com a sustentabilidade de sistemas agropecuários e sua avaliação deve ser realizada pelos indicadores que reflitam seu comportamento (PEREIRA et al., 2011; citado por ARCOVERDE, 2015).

Quadro 3 - Propriedades do solo e suas relações com a qualidade do solo.

| PROPRIEDADES | RELAÇÃO COM QUALIDADE DO SOLO |
|---|---|
| Matéria orgânica | Fertilidade, estrutura, estabilidade, retenção de nutrientes e resistência a erosão |
| Física: Estrutura, profundidade, agregação, infiltração e densidade | Retenção e transporte de água e nutrientes, habitat de microrganismos e porosidade |
| Química: pH, condutividade elétrica e nutrientes | Atividade química e biológica, fertilidade, potencial de perda de nutrientes |
| Biológica: biomassa, microbiana de C e N, N mineralizável, respiração do solo | Atividade catalítica potencial, reserva de C e N, potencial de ciclagem de nutrientes |

Fonte: Adaptado de HUNGRIA et al., (2013).

Segundo VEZZANI E MIELNICZUK (2009) a área de concentração dos pesquisadores está relacionada com as muitas propostas de indicadores, formas e fórmulas para avaliar a qualidade física de solos que surgiram.

Entretanto, estudos mais recentes que o citado anteriormente, dizem que o solo não possui padrões de qualidade como a água ou o ar, logo, não tem sido criadas regulamentações como forma de aferir sua qualidade. Além disso não existe até o presente momento, um consenso no que fiz respeito ao seu conceito, embora tenham surgidos vários conceitos de qualidade de solo, em sua maioria relacionados com as funções do solo em ecossistemas naturais e agrícolas (KARLEN et al., 1997; citado por ARAÚJO, 2012).

O conceito de qualidade física do solo engloba o conhecimento propriedades e processos relativos à habilidade do solo em manter efetivamente os serviços ambientais ou serviços ecossistêmicos essenciais à saúde do ecossistema, cujo estudo é realizado através de indicadores físicos da qualidade do solo responsáveis pela avaliação da sua estrutura (MEA, 2005; citado por STEFANOSKI, 2013).

Stefanoski (2013), ainda destaca que os atributos mais utilizados como indicadores de qualidade física de solo, deveriam ser aqueles que consideram a profundidade efetiva de enraizamento, porosidade total, distribuição e tamanho dos poros, distribuição do tamanho das partículas, densidade do solo, resistência do solo à penetração das raízes, intervalo hídrico ótimo, índice de compressão e estabilidade dos agregados. Portanto, a qualidade física está relacionada com as funções que capacitam o solo a aceitar, estocar e reciclar água, nutrientes e energia (CARTER, 2001; citado por VEZZANI, 2019.).

A avaliação e monitoramento de impedimentos mecânicos do solo ao desenvolvimento radicular tornam-se ferramenta importante para caracterizar a qualidade e a evolução de sistemas agrícolas. Servindo, como subsídio indispensável a ser usado no planejamento e direcionamento das práticas de cultivo empregadas dentro de uma propriedade agrícola (TORRES e SARAIVA, 1999).

2.3.1 Estrutura

O solo resulta da ação simultânea e integrada do clima e organismos que atuam sobre um material de origem (geralmente rocha), que ocupa determinada paisagem ou relevo, durante certo período de tempo. Esses elementos (rocha, clima, organismo, relevo e tempo) são chamados de fatores de formação do solo (LIMA, 2001). A matéria mineral ou as partículas minerais são aquelas que vieram da decomposição das rochas durante o processo de formação dos solos, sendo muito variáveis em tamanho.

A estrutura do solo é a forma como as partículas minerais (areia, silte e argila) e orgânicas (matéria orgânica) do solo estão organizadas no espaço (EMBRAPA, 2017). A definição de estrutura de solo é a organização das partículas orgânicas e minerais e poros do solo que resultam de processos na formação e são responsáveis pela regulação de processos dinâmicos no solo, entre eles, retenção e infiltração de água, fluxo de gases, teor de matéria orgânica, dinâmica de nutrientes, penetração de raízes e susceptibilidade a erosão (RABOT et al., 2018; citado por NUNES, 2022).

Em vista disso, o arranjo espacial das partículas do solo, dá origem aos poros, com importantes consequências para o comportamento físico do solo, tais como: a percolação e a difusão de fluidos, a resistência mecânica à ruptura e a penetração de raízes (VIANA, 2004).

Algumas características podem ser citadas como indicadores de degradação da estrutura física de solo, como mostra a Figura 9. Entre elas pode-se destacar raízes tortas, achatadas e crescendo na lateral ou preferencialmente nas fissuras, predomínio de agregados maiores que 7 cm e/ou com faces lisas e ângulos retos de ruptura coesos e com pouca porosidade, predomínio de agregados menores que 1 cm ou solo pulverizado, presença de canais com areia solta no sentido vertical do perfil do solo e a ausência ou poucos indícios de atividade biológica (TEIXEIRA et al., 2017).

Figura 9 - Agregados com evidências de feições de degradação.



Fonte: TEIXEIRA et al., (2017).

Entretanto as condições estruturais de um solo podem ser percebidas em diferentes escalas de intensidade. Na produção agrícola, os efeitos de um solo com baixas condições estruturais são evidenciadas com a redução da produtividade das culturas (NUNES, 2022). Sendo assim, métodos visuais objetivos e reprodutíveis de diagnóstico da qualidade estrutural do solo com base em medições de campo têm sido desenvolvidos e variam, desde facilmente compreensíveis, às mais complexas avaliações. Diagnosticando as relações de causa e efeito, possibilitam a identificação e definição de estratégias a serem adotadas em um sistema de produção agropecuário para melhoria da qualidade estrutural (EMBRAPA, 2017).

2.3.2 Porosidade

O solo é constituído, em diversas proporções, por matéria mineral e matéria orgânica que interagem entre si formando conjuntos de partículas chamadas de agregados, entre os quais existem espaços vazios que são preenchidos por água e ar, denominados poros. No entanto, as distintas características dos solos são definidas pelas suas propriedades físicas, como a cor, textura, estrutura, consistência e porosidade, e pelas químicas, como a composição e grau de acidez e alcalinidade (CORTEZ e ABREU, 2008).

A porosidade é a fração volumétrica do solo ocupada com ar e, ou, água, representando o local onde circulam a solução (água e nutrientes) e o ar, sendo, portanto, o espaço em que ocorrem os processos dinâmicos do ar e da solução do

solo (HILLEL, 1970; citado por KLEIN e LIBARDI, 2022). O arranjo das partículas é o que determina a porosidade, logo, se elas se arranjam em íntimo contato, ocorre predominância de sólidos na amostra de solo e a porosidade total é baixa; e se, ao contrário, as partículas se encontram arranjadas em agregados, há a predominância de vazios na amostra de solo e a porosidade é alta (RIBEIRO et al., 2007).

Operacionalmente, costuma-se classificar os poros do solo de acordo com as classes de tamanho, ou seja, macroporos e microporos, cujo limite está nos poros com diâmetros menores e maiores que 0,06 mm, respectivamente, e uma altura da coluna de água de aparelhos com a mesa de tensão de 60 cm, admitindo-se que os macroporos sejam responsáveis pelo livre movimento do ar, da água e do crescimento radicular, e os microporos um reservatório de água (REICHARDT, 1990). Seguindo o mesmo contexto, (BRADY, 1979; citado por CAVADAS et al., 2020) citam que os microporos, ou poros capilares, representam os poros responsáveis pela retenção da água no solo, enquanto os macroporos representam os poros responsáveis pela drenagem e arejamento do solo.

A compactação aumenta a densidade e sua resistência mecânica, mas diminui a porosidade total, o tamanho e a continuidade dos poros (MORAES, 1984). A Tabela 2 mostra que a porosidade total e a macro porosidade diminuíram linearmente com o aumento da densidade do solo, já a microporosidade não foi afetada pela densidade, apesar de tendência em seu aumento.

Tabela 2- Porosidade e resistência do solo à penetração em relação à densidade do solo.

| Ds (kg/dm ³) | Porosidade (m ³ m ⁻³) | | | Rp (Mpa) |
|--------------------------|--|-------|-------|----------|
| | Total | Macro | Micro | |
| 1,0 | 0,625 | 0,288 | 0,337 | 1,0 |
| 1,2 | 0,550 | 0,220 | 0,330 | 1,0 |
| 1,4 | 0,476 | 0,131 | 0,345 | 1,7 |
| 1,6 | 0,401 | 0,036 | 0,365 | 6,1 |

Fonte: STONE, GUIMARÃES e MOREIRA (2002).

Kiehl, (1979) propôs um sistema de classificação dos poros de acordo com seu diâmetro como forma de simplificar a separação desses poros.

Já Klein e Libardi (2002), classificam como macroporos, os poros com diâmetro maior que 0,05 mm que perdem a água com tensões menores que 6 kpa e, microporos os com diâmetro de 0,05mm e 0,0002 mm e que perdem a água a tensões entre 6 e 1500 kpa. Seguindo esse contexto Klein (1998) trás a seguinte citação:

Os microporos são definidos também como poros de armazenamento de água às plantas, enquanto os criptoporos são aqueles poros nos quais a água pode permanecer retida com energia muito alta, sendo, portanto, indisponível às plantas. É a água que o solo retém quando o seu potencial mátrico se encontra abaixo do ponto de murcha permanente.

Em complemento, para Tognon, (1991) a aeração, retenção de água, resistência a penetração, ramificação das raízes no solo e conseqüentemente, no aproveitamento de água e nutrientes disponíveis, são influenciados pela porosidade.

Logo, o sistema poroso do solo é caracterizado por uma combinação entre textura e estrutura (LAL e SHUKLA, 2004; citado por SILVA et al., 2020) sendo assim, a presença de uma rede ideal de poros no solo, também exerce expressiva influência sobre a fertilidade do mesmo, afetando as relações entre drenagem, absorção de nutrientes, penetração de raízes, aeração e temperatura, relacionando-se diretamente com o desenvolvimento e produtividade da cultura (LETEY, 1985; citado por RIBEIRO et al., 2007). A porosidade total, por se referir às fases líquida e gasosa do solo, está estreitamente ligada aos processos bioquímicos das plantas e sua produtividade (KIEHL, 1979).

Os atributos físicos, porosidade e densidade do solo apresentaram bom desempenho como indicadores da qualidade, distinguindo os efeitos proporcionados pelos sistemas de manejo do solo. Assim, contribuem para o monitoramento do manejo de solos (BEUTLER et al., 2001; citado por SILVA, 2005).

2.3.3 Densidade

A densidade do solo é uma propriedade física muito utilizada para avaliar a estrutura do solo e corresponde à massa de solo seco por unidade de volume de solo,

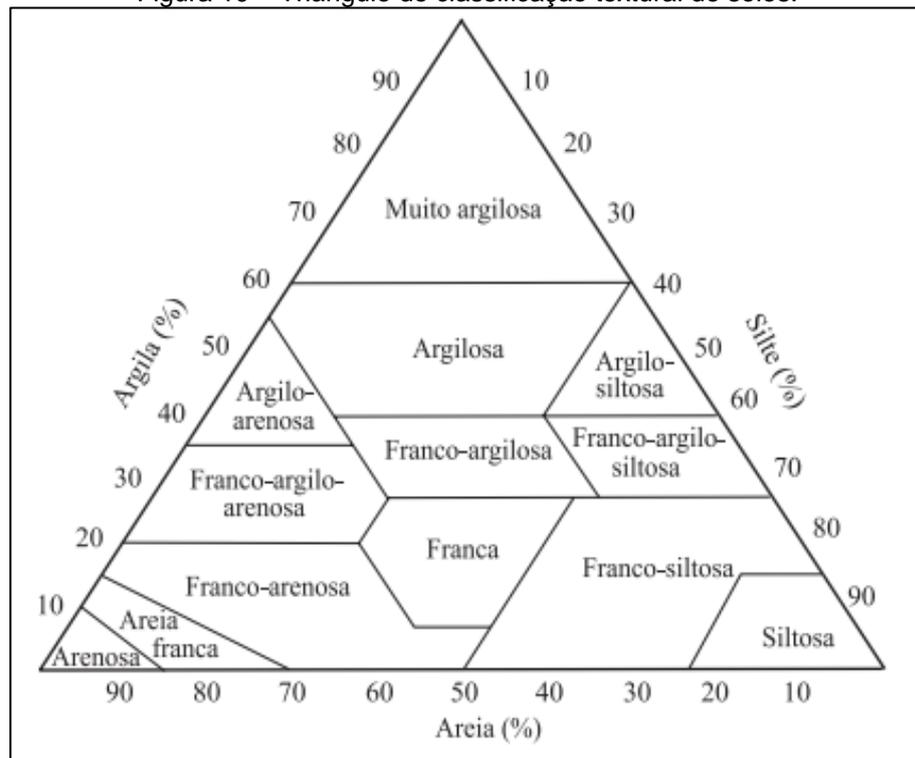
expressa em g/cm^3 . Reflete diretamente como as partículas estão dispostas no solo e a porosidade, ou seja, a estrutura em todos os seus aspectos. Portanto, qualquer intervenção nestas partículas irá afetar a densidade diretamente (FERREIRA, 2010). Como a densidade é a relação entre peso e volume, logo, quanto maior o número de poros que o solo tiver, menor será seu volume. Essa propriedade de flocular o solo e abrir espaços é dada pela matéria orgânica, e esta, possui densidade menor do que a matéria mineral (NOLLA, 1982).

Solos cultivados com culturais anuais possuem menos matéria orgânica, maior grau de compactação por máquinas agrícolas e ação direta de gotas de chuva, logo, apresentam um número menor de poros quando comparados a solos com vegetação nativa (TORMENA et al., 2002).

A avaliação da densidade fornece indicações a respeito do estado de compactação do solo (REICHART e TIMM, 2008; citado por GOLÇALVES et al, 2013), podendo indicar à necessidade de realização de prática mecânica de descompactação do solo.

O crescimento radicular é bastante relacionado com a densidade do solo, porém, existem características físicas que fazem com que haja uma densidade crítica de densidade para cada tipo de solo (ROSEMBERG et al., 1964; citado por REINERT et al., 2008) e depende principalmente da sua classe textural. Três grupos principais de classes texturais são conhecidos: solo arenoso, argiloso e franco (Figura 10). Dentro de cada grupo, classes texturais específicas fornecem uma ideia da distribuição de tamanho de partículas e indicam o comportamento das propriedades físicas do solo, como a densidade (COOPER, 2015).

Figura 10 – Triângulo de classificação textural de solos.



Fonte: SANTOS e LEMOS (1984).

Algumas metodologias foram propostas para a mensuração da qualidade do solo, entre elas se destacam as que levam em conta propriedades físicas como indicadores básicos nessa avaliação, como a densidade e a taxa de infiltração de água no solo (DORAN e PARKIN, 1994).

Segundo ALVES (2007) analisando os efeitos entre época de avaliação e profundidade, verificou-se maior densidade do solo na camada de 0,20-0,40 m, resultado que pode estar associado ao processo natural do solo ou ao acúmulo de pressões pelo tráfego de máquinas ou profundidade de trabalho dos implementos.

Na agricultura atual vários são os manejos utilizados, cada um com suas particularidades, entretanto alguns manejos ainda podem provocar alterações substanciais nos sistemas limitando o crescimento da fauna e da flora. Para avaliar esses impactos, alguns indicadores da qualidade do solo podem ser utilizados. Dentre eles destacam-se a umidade e densidade de solo CARVALHO et al., (2007).

Densidade do solo é considerada um indicativo de qualidade estrutural do solo por influenciar a permeabilidade, drenagem e água disponível às plantas, atuando diretamente na capacidade de retenção e/ou disponibilização da água aos corpos hídricos e nos processos do crescimento radicular que podem impactar na prestação

de serviços ecossistêmicos, como a produção de biomassa, controle de erosão e regulação climática (BÜNEMANN et al., 2018).

Alguns métodos para análise da densidade do solo foram desenvolvidos ao longo da evolução dos conhecimentos na área. Dentre esses métodos, o mais utilizado e considerado padrão, é o método do anel volumétrico, mas também pode-se citar o método da proveta, o método de torrão parafinado e o método do monolito (EMBRAPA, 2017). As descrições dos métodos de análise da densidade de solo estão no Quadro 4.

Quadro 4 – Métodos de análises de densidade do solo.

| MÉTODO | PRINCÍPIO |
|-------------------|--|
| Anel Volumétrico | Obtenção da massa por pesagem e do volume pela coleta de amostras de solo com estrutura indeformada por meio de um cilindro de volume interno conhecido. |
| Proveta | Obtenção da massa por pesagem após compactação da amostra de solo em uma proveta até o volume pré-determinado. |
| Torrão parafinado | Obtenção da massa por pesagem e do volume pelo deslocamento de líquido após a impermeabilização de um torrão com parafina fundida. |
| Monolito | Obtenção da massa por pesagem e do volume pelo deslocamento de líquido após a impermeabilização do monolito com resina ou verniz. |

Fonte: EMBRAPA (2017).

O método padrão do anel volumétrico é difícil de ser trabalhado e leva tempo até os dados poderem ser interpretados, sendo assim, a resistência à penetração se apresenta como um método mais fácil e rápido. Ainda existem métodos mais modernos de determinação da densidade do solo que utilizam técnicas nucleares. Entre essas técnicas, pode-se citar a tomografia computadorizada, o tomógrafo de resolução volumétrica e a sonda de superfície neutrôn-gama (CÁSSARO et al., 2000; citado por PIRES, ROSA e TIM 2001).

2.3.4 Indicadores de qualidade física de solo

As propriedades físicas do solo podem ser usadas como indicativos de sua qualidade, logo, o sistema solo apresenta características de uma boa estruturação, troca de gases e armazenamento de água, o qual possibilita um parâmetro de avaliação do ambiente de crescimento adequado para as plantas.

Os indicadores podem ser índices numéricos, como o que se usa em estabilidade de agregados e erodibilidade ou ainda utilizar linhas de modelagem, gráfica ou matemática e servem como referências para mensurar a qualidade dos solos, segundo ARAÚJO (2007).

É desejável obter um parâmetro simples para avaliação da qualidade física do solo e como os atributos indicadores estão relacionados refletindo a estrutura do solo, a medição desses atributos acaba consumindo bastante tempo e tornando mais difícil a mensuração (ROSSETTI e CENTURION, 2022.)

Entretanto, segundo REICHERT et al., (2003) a qualidade não pode ser medida, mas deve ser inferida através das medidas de propriedades do solo ou do agroecossistema, referidos como indicadores, sendo que valores de referência devem ser definidos e consistem em valores máximos para cada propriedade e valores aceitáveis para qualidade do solo. Já para Tótola e Cher, (2022) os indicadores que podem traduzir possíveis alterações no solo geralmente estão ligados com uma variável mensurável como temperatura do solo, um processo como a taxa de mineralização ou um índice, no qual incluem várias medidas de atributos do solo como densidade, porosidade, matéria orgânica e os indicadores microbiológicos.

A RP é uma variável sensível à textura, estrutura do solo e principalmente à densidade do solo e à umidade. Por esta razão é considerada um indicador das dificuldades ao crescimento do sistema radicular das plantas, contribuindo para a detecção e prevenção de camadas com impedimentos (COELHO et al., 2012).

Para Andrade, (2008) a qualidade de um solo é considerada sob três aspectos principais: físico, químico e biológico que darão origem aos indicadores como mostra a Tabela 3, onde a qualidade física assume importância na avaliação do grau de degradação do solo e na identificação de práticas de uso sustentáveis.

Tabela 3 – Conjunto mínimos de indicadores biológicos, físicos e químicos para avaliar a qualidade e as condições dos solos.

| Qualidade ou condição | Indicador | Descrição e valores |
|------------------------------------|---|--|
| Atividade biológica | Evolução de CO ² Biodiversidade Atividade enzimática | > média solos representativos > média solos representativos > média solos representativos |
| Matéria Orgânica | Cor da camada superficial Carbono orgânico | Preta ou marrom escura > 1% |
| Acidez Toxidez de Alumínio | pH Sistema radicular Saturação de Al | 5.6 a 6.5 Raízes rasas, ângulos acentuados e desenvolvimento limitado > 20% |
| Fósforo | P extraído (mg/kg - Mehlich) | > 10 solo argiloso > 20 solo de textura média > 30 solo de textura arenosa |
| Balanço de nutrientes | Aspecto da cultura (cor e vigor) Saturação de bases (V % -Ph 7) Equilíbrio de bases Saturação de Ca Saturação de Mg Saturação de K | Verde escuram saudável 40 a 60% 60% 15% 5% |
| Compactação | Enxurrada Sistema radicular Teste de infiltração Densidade global Teste de penetração com um pedaço de cobre | Água penetra lentamente, enxurrada ou água empoçada após chuva forte Raízes rasas, ângulo acentuado, desenvolvimento limitado > Média solos representativos < Média solos representativos Não penetra, camada adensada |
| Erosão | Perda de sol Espessura do horizonte A Medição local de perda de solo | Sinais de erosão laminar ou em sulco > Média solos representativos < Média solos representativos |
| Cobertura permanente na superfície | % cobertura permanente na superfície do solo no início da estação de chuvas | > 70% |

Fonte: SANTANA e BAHIA FILHO (1999).

Logo, indicadores de qualidade de solo e planta são propriedades qualitativas e quantitativas que podem ser usados para caracterizar, avaliar e acompanhar as alterações de um solo (KARLEN et al., 1997; citado por ARAÚJO, 2012).

Seguindo esse contexto Doran e Parkin, (1994) enfatizam que os indicadores devem seguir os critérios de: envolver processos ocorrentes no ecossistema; integrar propriedades e processos físicos, químicos e biológicos; ser acessível e aplicável no campo; ser sensível a variações de manejo e de clima; e ser componente de banco de dados de solos, sempre que possível.

Entretanto, Santos et al., (2011) diz que o processo de avaliação da qualidade física de solo pode se tornar um processo mais simples, rápido e menos complexo através de indicadores como a curva de retenção de água do solo, a condutividade hidráulica, a porosidade, as características de retenção de água do solo e a resistência à penetração.

A avaliação da qualidade do solo tem dimensão espacial e temporal. O intervalo entre medições para que o indicador avalie mudanças, portanto, depende do tempo necessário para que dado manejo produza alterações quantificáveis, e sua frequência no espaço deve considerar as variações espaciais provocadas pelo solo (REICHERT et al., 2003).

Os indicadores devem ser práticos para uso tanto por cientistas como por agricultores, extensionistas, ecologistas e instituições governamentais, numa ampla classe de situações ecológicas e socioeconômicas (GRANATSTEIN e BEZDICEK, 1992).

Para Arcoverde, (2015) a densidade do solo, macroporosidade e microporosidade foram atributos que melhor se destacaram como indicadores de qualidade do solo, sendo a macroporosidade, o atributo de maior peso relativo nos modelos de discriminação das amostras nas camadas de 0,00 - 0,10 e 0,10 - 0,20 m; já a microporosidade e a densidade, na camada de 0,20 - 0,40 m, sugeriram que essas variáveis são as principais responsáveis pela qualidade física dos solos.

Logo, a resistência à penetração está entre os indicadores físicos mais utilizados para mensurar a qualidade de solo, juntamente com densidade, taxa de infiltração de água, macro, micro e porosidade total e condutividade hidráulica (KAZMIERCZAK, 2018) pois, se relaciona com as propriedades físicas inerentes ao solo, tais com a textura, superfícies específicas, densidade do solo e constituintes (REICHARDT e TIMM, 2012).

Segundo Bottega et al. (2011) indicadores de qualidade devem se relacionar diretamente à produção das culturas e ser potentes medidores da capacidade do solo de fornecer adequada aeração e quantidade de água para o crescimento e expansão do sistema radicular, da mesma forma que devem medir a magnitude com a qual a matriz do solo resiste à deformação. Dentre os principais indicadores, destaca-se a resistência do solo à penetração (CHERUBIM et al, 2011) logo, sua relação com umidade e densidade, pode ser utilizada para fazer inferências sobre a condição estrutural e prever as relações entre a densidade crítica e o crescimento das raízes das plantas (IMHOFF et al, 2000).

Indicativos físicos de crescimento das raízes das plantas como a resistência à penetração e a disponibilidade de água no solo sofrem alterações preocupantes ao longo do tempo (CARTER, 2006), os índices de avaliação da qualidade do solo possibilitam analisar alterações nas propriedades decorrentes da compactação do solo causadas pela ação antrópica em ecossistemas naturais, principalmente de característica agrícola, permitindo caracterizar a situação atual e alertar para riscos futuros (CARDOSO et al, 2011). Nesse sentido (ARAÚJO et al, 2007), traz a seguinte citação:

A resistência à penetração de solo é um importante indicador da qualidade do solo, tanto para estimar, preliminarmente, o grau de sustentabilidade das atividades, quanto para quantificar danos ao meio ambiente, mediante perícias judiciais, laudos ambientais ou atividades de fiscalização.

A resistência à penetração de solo como indicador de qualidade, permite a identificação de camadas compactadas, bem como mudanças nas propriedades físicas do solo ao longo dos diferentes horizontes, mudanças essas que podem auxiliar na determinação da vulnerabilidade dos solos aos processos erosivos (REICHERT et al., 2010). Para a qualidade física, a resistência do solo à penetração é considerada por Silveira et al. (2010) e Santana et al. (2006) a propriedade mais adequada para expressar o grau de compactação do solo e, conseqüentemente, a facilidade de penetração das raízes, assim como, transporte e armazenamento de água e nutrientes, importante para o manejo de áreas e determinação da qualidade e classificação dos solos (SILVA, et al 2020).

Orellana et al, (1997) propuseram a metodologia para avaliação da qualidade física do solo denominada de intervalo hídrico ótimo. Nesse conceito utilizam para o cálculo da água disponível às culturas, além dos valores da capacidade de campo e do ponto de murchamento permanente, os valores limitantes da resistência do solo à penetração e da porosidade.

Já a metodologia do intervalo hídrico ótimo descrita por Klein e Libardi (2000), é baseada na determinação da resistência à mecânica do solo à penetração em amostras de solo com estrutura preservada submetidas a diferentes tensões. Assim, o intervalo hídrico ótimo representa ganhos em termos de biofísica do solo, sendo um indicador diretamente ligado a resistência à penetração, que reflete adequadamente a qualidade física do solo para as plantas (TORMENA et al., 2007).

A curva de resistência do solo é determinada pela relação da resistência à penetração com a umidade do solo e é um parâmetro útil na avaliação da qualidade física de solo (IMHOOF, 2000). Atributos do solo, tais como a densidade, a porosidade, a condutividade hidráulica, a curva característica de retenção de água e a resistência à penetração, têm sido comumente utilizados como indicadores de qualidade física, pela relativa facilidade de determinação e pelo baixo custo de obtenção das medidas (BALBINO et al., 2004 e IMHOFF et al, 2000).

A resistência dos solos à penetração também é correlacionada com os valores de densidade dos solos, confirmando desta forma a sua importância na determinação de um índice de qualidade do solo (MORRIS, 2007).

Entretanto, nenhum indicador individualmente, conseguirá descrever e quantificar todos os aspectos de qualidade do solo, pois deve haver relação entre todos os atributos do solo. Os critérios para seleção de indicadores relacionam-se principalmente com sua utilidade em definir os processos do ecossistema (STENBERG, 1999; citado por ALVES, 2007). Com pesquisas voltadas para a qualidade de solo, mais se vê que o grande desafio não é a identificação e teste de veracidade de um indicador, mas sim o planejamento de agrossistemas complexos que tornem possível o cultivo diversificado de plantas. A complexidade dos ecossistemas é o que faz a diferença para o desempenho do sistema solo, determinando sua qualidade e a qualidade ambiental (VEZZANI e MIELNIEZUCK, 2009).

3 CONCLUSÃO

Conclui-se com o trabalho que os conceitos da qualidade do solo sempre irão ser interpretados de acordo com as propriedades do solo em relação ao crescimento das plantas e a conservação do solo.

Os indicadores de qualidade do solo são elaborados de acordo com propriedades físicas, químicas e/ou biológicas do solo que podem ser mensuradas quantitativamente.

Os indicadores de qualidade física de solo mais estudados são densidade de solo, umidade e resistência à penetração.

A resistência à penetração em solos agrícolas é utilizada como parâmetro de identificação de compactação de solo.

A resistência à penetração de solo é um indicador confiável para mensurar a qualidade do solo, desde que analisada juntamente com a umidade e densidade.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, J. M. et al. **Avaliação da compactação do solo em uma área de floresta ombrófila mista sob sistema faxinal**. Anais do II Seminário de Atualização Florestal e XI Semana de Estudos Florestais, 2010.
- ALVES, M. C.; SUZUKI, L.G. A.S; **Densidade do solo e infiltração de água como indicadores da qualidade física de um latossolo vermelho distrófico em recuperação**. R. Bras. Ci. Solo, 31:617-625, 2007.
- ANDRADE, R. S.; STONE, L.F. **Índice S como indicador da qualidade física de solos do cerrado brasileiro**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, PB, UAEA/UFCG v.13, n.4, p.382–388, 2009.
- ARAÚJO, R.; GOEDERT, W.J.; LACERDA, M.P.C. **Qualidade de um solo sob diferentes usos e sob cerrado nativo**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.31, p.1099-1108, 2007.
- ARAÚJO, W. O. **Impactos na variabilidade espacial da densidade e porosidade do solo em função da transformação de floresta em pastagem no Vale do Jamari, Rondônia**. Research, Society and Development, v. 11, n. 15, e284111537170, 2022.
- ARCOVERDE, et al. **Qualidade física de solos em uso agrícola na região semiárida do estado da Bahia**. Rio grande do Norte. R. Bras. Ci. Solo, 39:1473-1482, 2015.
- BARBOSA, T. C. S.; OLIVEIRA, V. P. V. **Indicadores químicos e biológicos de qualidade do solo utilizados no monitoramento da degradação em ambientes semiáridos: análise do estado da arte**. Brazilian Journal of Development, Curitiba, v.8, n.3, p.17403-17423, mar., 2022.
- BELTRAME, L.F.S.; GONDIN, L.A.P. & TAYLOR, J.C. **Estrutura e compactação na permeabilidade de solos do Rio Grande do Sul**. R. Bras. Ci. Solo, 5:145-149, 1981.
- BERGAMIN, et al. **Compactação em um latossolo vermelho distroférrico e suas relações com o crescimento radicular do milho**. Revista Brasileira de Ciência de Solo, 34:681-691, 2010.
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. **Resistência à penetração em latossolos: valor limitante à produtividade de arroz de sequeiro**. Ciência Rural, v.34, n.6, nov-dez, 2007.
- BOTTEGA, E. L. **Variabilidade espacial de atributos do solo em sistema de semeadura direta com rotação de culturas no cerrado brasileiro**. Rev. Ciênc. Agron., v. 44, n. 1, p. 1-9, jan-mar, 2011.
- BROMS, BB; FLODIN, N. **History of Soil Penetration Testing**. DERUITER (Org.). In: International Symposium on Penetration Testing. Amsterdam, 1988.
- BÜNEMANN, E.K. et al. **Qualidade do solo -uma revisão crítica**. Soil Biology and Biochemistry, v. 120, p. 105-125, 2018.
- BUSSCHER, W.J. et al. **Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plain soil**. Soil & Tillage Research, v.43, p.205-217, 1997.

- CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. Rio de Janeiro, livro técnico científico. 1976 v2, 456p.
- CARDOSO, E. L et al. **Qualidade química e física do solo sob vegetação arbórea nativa e pastagens no Pantanal Sul-MatoGrossense**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.35, n.2, p.613-622, 2011.
- CARTER, M. R. **Quality: Critical Limits and Standardization**. In: LAL, R. (Org.). Encyclopedia of soil science. 2. ed. Ohio, USA: Taylor e Francis Group, p. 1–1924, 2006.
- CARVALHO, A. J. A. et al. **Caracterização física dos solos dos quintais agrofloreais e cultivos monotípicos na região de Amargosa, Bahia**. Revista Brasileira de Agroecologia, Porto Alegre, v.2, n. 2, p. 941-944, 2007.
- CAVALCANTE, E. G. S. et al. **Variabilidade espacial de atributos físicos do solo sob diferentes usos e manejos**. R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental, v.15, n.3, p.237–243, 2011.
- CHERUBIM, M. R. **Variabilidade da resistência a penetração do solo em função da dimensão da malha amostral**. Revista Plantio Direto - 2011.
- COELHO, D. S.; CORTEZ, J. W.; Olszewski, N. **Variabilidade espacial da resistência mecânica à penetração em Vertissolo cultivado com manga no perímetro irrigado de Mandacaru**. Juazeiro, Bahia, Brasil. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.36, p.755-764, 2012.
- COOPER, M. **Arquitetura e propriedades físicas do solo**. USP – São Paulo. Disponível em: < https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/270125/mod_resource/content/1/Apostila%20Cap.%201%20%20Arquitetura%20e%20Propriedades%20F%C3%ADscas%20do%20Solo.pdf > Acesso em 29 de Maio de 2023.
- D'ANDRÉA, A. F. **Atributos indicadores da qualidade do solo em sistemas de manejo no Sul de Goiás**. 2001. 104 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2001.
- DA SILVA, JUACY. **Conservação do solo e degradação ambiental**. Disponível em: < <https://www.ecodebate.com.br/2023/04/17/conservacao-do-solo-e-degradacao-ambiental/> > Acesso em 25 de maio, 2023.
- DEBIASI, H.; FRANCHINI, J.; CONTE, O.; et al. **Sistemas de preparo do solo: trinta anos de pesquisas na Embrapa Soja**. 2013.
- DENARDIN, J. E. **Compactação e Adensamento de Solo: caracterização, origem, riscos, danos e soluções**. Embrapa, 2018.
- DEXTER, A.R. **Soil physical quality: part III**. Unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S-theory. Geoderma, v.120, p.227-239, 2004.
- DORIN, J. W.; PARKIN, T. B. **Definição e avaliação da qualidade de solo**. SSSA Special Publications, 1994.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos (Rio de Janeiro). **Manual de métodos de análises de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p

FERREIRA, M.M. **Caracterização física do solo.** In: LIER, Q.J. van. (Ed). Física do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010.p. 12-24.

FERREIRA, R. L. C. et al. **Tráfego de máquinas agrícolas em cultivo de palma de óleo: implicações na qualidade física do solo.** Revista Ciências Agrárias., v. 62, 2019.

FOLEGATTI, M.V. et al. **Avaliação da resistência do solo utilizando penetrômetro e penetrógrafo.** In: XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, p.525. Piracicaba: 1990.

FREDDI, O. S. et al. **Compactação do solo no crescimento radicular e produtividade da cultura do milho.** R. Bras. Ci. Solo, 31:627-636, 2007.

GABRIEL, J. L. et al. **Cover crops reduce soil resistance to penetration by preserving soil surface water content.** Geoderma, v. 386, p. 1-8, 2021.

GENRO JUNIOR, S.A.; REINERT, D.J. & REICHERT, J.M. **Variabilidade temporal da resistência à penetração de um Latossolo argiloso sob semeadura direta com rotação de culturas.** R. Bras. Ci. Sol o, 28:477-484, 2004.

GIRARDELLO, V. C. **Resistência à penetração, eficiência de escarificadores mecânicos e produtividade da soja em latossolo argiloso manejado sob plantio direto de longa duração.** Revista Brasileira Ciência de Solo, 38:1234-1244, 2014.

GOLÇALVES, F. C. **Métodos de determinação da densidade do solo em diferentes sistemas de manejo.** Energ. Agric., Botucatu, vol. 28, n.3, p.165-169, julho-setembro, 2013.

GROHMANN, F. QUEIROZ NETO, J. P. **Efeito da compactação artificial de dois solos limo-argilosos sobre a penetração das raízes de arroz.** Trabalho apresentado no II Congresso Latino-Americano e X Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. Piracicaba, julho de 1965. Recebido para publicação em 19 de julho de 1966.

GROHMANN, F.; QUEIROZ NETO, J. P. **Efeito da compactação artificial de dois solos limo-argilosos sobre a penetração das raízes de arroz.** II Congresso Latino-Americano e X Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. Piracicaba, julho de 1966.

HUNGRIA, M. et al. **Qualidade do solo.** Embrapa, folder15 – outubro, 2013.

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

IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; TORMENA, C.A. **Applications of the resistance curve in the control of the physical quality of soils under grass.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.35, p.1493-1500, 2000.

JANDREY, D. B. **Compactação de Solos Agrícolas.** Revista Pioneer Sementes. São Paulo. 2019. Disponível em: < Compactação de Solos Agrícolas.pdf (usp.br) > Acesso em: 20 abril de 2023.

KAZMIERCZAK, R. **Indicadores físicos e químicos de qualidade do solo em sistemas de preparo.** Dissertação (Mestrado em Agronomia – Área de concentração – Agricultura uso e manejo do solo), Universidade Estadual de Ponta Grossa -2018.

- KIEHL, E. J. **Manual de edafologia: Relações solo-planta**. 1.ed. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 264p.
- KLEIN, V. A. **Propriedades físico-hídrico-mecânicas de um latossolo roxo , sob diferentes sistema de uso e manejo**. Tese de Doutorado – Escola Superior de Doutorado Luiz de Queiroz, São Paulo. 1998.
- KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. **A faixa de umidade menos limitante ao crescimento vegetal e a sua relação com a densidade do solo ao longo de um perfil de um Latossolo roxo**. Ciência Rural. v.30; p.959-964, 2000.
- KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. **Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um latossolo vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo**. Revista Brasileira de Ciência de Solo, 26:857-867, 2002.
- LAIA, A. M.; MAIA, J. C. S.; KIM, M. E. **Uso do penetrômetro eletrônico na avaliação da resistência do solo cultivado com cana-de-açúcar**. R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental, v.10, n.2, p.523–530, 2006.
- LARZON, W. E.; PIERCE, F.J. **Conservation and enhancement of soil quality**. In: International Board for Soil Reserarch and Management (Bangkok, Thailand) Evaluation for sustainable land management in the developing world. Bangkok, 1991.
- LEITE, F.; SANTOS, J. G. E.; LANÇAS, K. P. **Comparação da resistência do solo à penetração entre penetrômetro elétrico-eletrônico e penetrógrafo manual**. Cascavel, v.3, n.1, p.32-39, 2010.
- LIMA, V.C. **Fundamentos de pedologia**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, 2001. 343p.
- MANIERI, J. M. **Utilização de um penetrômetro de impacto combinado com sonda de TDR para medidas simultâneas de resistência e de umidade do solo na avaliação da compactação em cana-de-açúcar**. Dissertação de mestrado – Instituto Agronômico de Campinas, 2005.
- MANTOVANI, E. C. **Compactação do solo**. Inf, Agropec., Belo Horizonte,II (147) março de 1987.
- MARQUES FILHO, A. C. **Compactação dos Solos: caracterização e práticas para evitar**. Campo e negócio, 23 de fev. de 2023. Disponível em: < <https://revistacampoenegocios.com.br/compactacao-dos-solos-caracterizacao-e-praticas-para-evitar/> > Acesso em: 17 maio de 2023.
- MARQUES, P. H. R. **Diagnóstico de compactação via atributos físico-hídricos dos solos coesos: da amostragem à geração de dados**. Universidade Federal Rural de Pernambuco, Maio, 2022.
- MENDANHA, et al. **Construção participativa de indicadores de qualidade do solo para monitoramento de pastagens em processo de transição agroecológica**. Anais de reunião técnicas sobre agroecologia – Agroecologia, resiliência e bem viver, Pelotas – v. 17 n. 3 – 2022.
- MIGUEL, V. S. **Variabilidade espacial da resistência mecânica do solo à penetração em sistemas de plantas de cobertura de inverno**. Universidade Federal de Santa Maria, 2021.

- MOLIN, J. P.; DIAS, C. T. S.; CARBONERA, L. **Estudos com penetrometria: Novos equipamentos e amostragem correta.** R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental, v.16, n.5, p.584–590, 2012.
- MOME FILHO, E. A. **Aplicação da penetrometria da quantificação da compactação do solo.** Dissertação de mestrado – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2012.
- MONTANARI, R. et al. **Variabilidade espacial da produtividade de sorgo e atributos físicos em um Planossolo.** Revista Agro Ambiente. On-line, v. 7, n. 3, p. 252-261, 2013.
- MORAES, W.V. **Comportamento de características e propriedades físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro, submetido a diferentes sistemas de cultivo.** Lavras: UFLA, 1984. 107p. Dissertação Mestrado.
- MORRIS, M. L. M. **Avaliação da qualidade do solo em sistema orgânico de cultivo.** 2007. 95 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) - Universidade de Brasília, Brasília, 2007.
- NAVEIRA, L. S. C. **O uso do penetrômetro dinâmico leve (dpl) para investigação geotécnica em projeto de habitação de interesse social.** Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2019.
- NOLLA, D. **Erosão do solo.** Secretária da Agricultura, Diretoria Geral, Divisão da divulgação e informações rurais. Porto Alegre. 1982.
- NUNES, J. A. **Avaliação visual da estrutura do solo em área produtora de cana-de-açúcar com diferentes manejos agrícolas.** Dissertação de mestrado, Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2022.
- OLIVEIRA, et al. **Uso do penetrômetro eletrônico manual na avaliação da resistência do solo em sistemas de cultivo com plantas de cobertura.** Research, Society and Development, v. 11, n.14, e257111435706, 2022.
- ORELLANA, J.A.; PILATTI, M.; GRENÓN, D.A. **Soil quality: an approach to physical state assessment.** Journal of Sustainable Agricultural. v.9; p.91-107, 1997.
- PANDOLFI, et al. **Utilização de um penetrômetro de impacto em estudos de avaliação da compactação do solo em diferentes coberturas.** XII Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e VIII Encontro Latino Americano de Pós-Graduação – Universidade do Vale do Paraíba, 2007.
- PERUMPRAL, J. V.; MONTOVANI, E. C. Aplicações do cone penetrômetro. **Metodologias para investigación en manejo de suelos**, v. 39, p. 51, 1993.
- PEZARICO, C. R. **Indicadores de qualidade do solo em sistemas agroflorestais.** Universidade Federal da Grande Dourados. Mato Grosso do Sul, 2009.
- PIRES, L. F.; ROSA, J. A.; TIMM, L. C. **Comparação de métodos de medidas de densidade de solo.** Maringá, v. 33, n. 1, p. 161-170, 2011.
- RALISH, et al. **Resistência à penetração de um Latossolo Vermelho Amarelo do Cerrado sob diferentes sistemas de manejo.** R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental, v.12, n.4, p.381–384, 2008.
- REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas.** São Paulo: Manole, 1990. 188 p.

- REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri: Manole, 2008.
- REICHERT, J. M. et al. **Mecânica do solo**. In: Jong Van Lier Q (Ed.) Física do solo. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. p. 29-102, 2010.
- REICHERT, J. M. et al. **Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas**. Santa Maria RS, 2013.
- REINERT, D.J. et al. **Qualidade física dos solos**. Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água, 16. Aracaju -SE, 2006.
- REINERT, et al. **Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em argissolo vermelho**. R. Bras. Ci. Solo, 32:1805-1816, 2008.
- RIBEIRO, K. D. et al. **Propriedades físicas do solo, influenciadas pela distribuição de poros, de seis classes de solos da região de Lavras-MG**. Ciênc. agrotec., Lavras, v. 31, n. 4, p. 1167-1175, jul./ago., 2007.
- ROSOLEM, C. A.; ALMEIDA, A. C. S.; SACRAMENTO, L. V.S. **Sistema radicular e nutrição da soja em função da compactação do solo**. Bragantia, Campinas 259-266, 1994.
- ROSSETTI, K. V.; CENTURION, J. F. **Uso do Índice S como parâmetro complementar da qualidade física em Latossolos**. Revista Ciências Agroambientais v.20, n.2, 2022.
- SANTANA, D. P.; BAHIA FILHO, A. F.C. **Indicadores de qualidade de solo**. Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, Minas Gerais -1999.
- SANTANA, M. B. **Atributos físicos do solo e distribuição do sistema radicular de citros como indicadores da coesão em dois solos dos Tabuleiros Costeiros do Estado da Bahia**. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 2003. 76p. (Tese de Mestrado)
- SANTOS, et al. **Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho após cultivo de soja**. Revista Brasileira Engenharia Agrícola. Ambiental, v.16, n.8, p.843–848, 2012.
- SANTOS, G. G. et al. **Impacto de sistemas de integração lavoura-pecuária na qualidade física do solo de um latossolo do cerrado**. XXXIII CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, Uberlândia, Minas Gerais – 2011.
- SANTOS, R.D. dos; LEMOS, R.C. de; SANTOS, H.G. dos; KER, J.C.; ANJOS, L.H.C. dos; SHIMIZU, S. H. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 6. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013. 100 p.
- SANTOS, V. R. **Degradação do solo: O que é e como ocorre**. XVIII Seminário de ensino, pesquisa e extensão. Universidade estadual de Goiás – 2023.
- SARMIENTO, E.; FANDINO, S.; GOMEZ, L. **Indexes of soil quality**. A systematic review. ECOSISTEMAS, Móstoles, v. 27, n. 3, p. 130-139, set. 2018.
- SILVA JUNIOR, R. L. **Variabilidade espacial do índice de cone correlacionada com mapas de produtividade**. Dissertação de Mestrado. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – Universidade de São Paulo, 2001.

SILVA, A. J. N.; CABEDA, M. S. V. **Compactação e compressibilidade do solo sob sistemas de manejo e níveis de umidade**. Revista. Brasileira Ciência de Solo, 30:921-930, 2006.

SILVA, G. **Métodos auxiliares para diagnóstico da necessidade de subsolagem de solos agrícolas**. Universidade estadual de campinas faculdade de engenharia agrícola – Dissertação de Mestrado, 2002.

SILVA, P. L. F.; OLIVEIRA, F. P.; AMARAL, A. J.; PEREIRA TAVARES, D. D. **Distribuição de poros por tamanho e sua relação com os parâmetros de ajustes da curva de retenção de água no solo**. e020011, 2020.

SILVA, R. R.; NAVES SILVA, M. L.; FERREIRA, M. M. **Atributos físicos indicadores da qualidade do solo sob sistemas de manejo na bacia do alto do rio grande**. Ciênc. agrotec., Lavras, v. 29, n. 4, p. 719-730, jul./ago., 2005.

SILVA, R. T. **Identificação da macrofauna edáfica em luvisolo com diferentes usos e coberturas vegetais**. Universidade Federal de Campina Grande – Paraíba, 2017.

SILVA, T. R. **Avaliação da qualidade do solo em sistema agroflorestral de café**. 14º Jornada Científica e Tecnológica – IF Sul de Minas, 2022.

SILVEIRA, et al. **Relação umidade versus resistência à penetração para um argissolo amarelo distrocoeso no recôncavo da bahia**. R. Bras. Ci. Solo, 34:659-667, 2010.

SOUZA, Z. M. et al. **Dependência espacial da resistência do solo à penetração e do teor de água do solo sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar**. Ciência Rural, v.36, p.128-134, 2006.

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

STOLF, R. et al. **Incorporação de régua para medida de profundidade no projeto do penetrômetro de impacto stolf**. R. Bras. Ci. Solo, 36:1476-1482 – 2012.

STOLF, R. et al. **Penetrômetro de impacto stolf - programa computacional de dados em excel-vba**. R. Bras. Ci. Solo, 38:774-782, 2014.

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

STONE, L. F.; GUIMARÃES, C. M.; MOREIRA, J. A. A. **Compactação do solo na cultura do feijoeiro. I: Efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.6, p.207-212, 2002.

TAVARES, et al. **Variabilidade espacial da resistência à penetração e da umidade do solo em Neossolo Flúvico**. Water Resources and Irrigation Management, v.3, n.2, p.79-89, 2014.

TEIXEIRA, P. C. **Manual de métodos de análise de solo**. Embrapa – Brasília, 2017.

TEIXEIRA, T. C. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Embrapa. Brasília, 2017.

- TIMM, L. C. et al. **Field spatial and temporal patterns of soil water content and bulk density changes**. Scientia Agrícola, Piracicaba, v. 63, n. 1, p. 55-64, 2006.
- TOGNON, A. A. **Propriedades físico-hídricas do latossolo roxo da região de Guaíba-SP sob diferentes sistemas de cultivo**. Universidade de São Paulo, 1991.
- TORMENA, C. A. **Atributos físicos e qualidade física do solo que afetam a produtividade da cultura do milho safrinha**. X Seminário Nacional do milho safrinha, Parana - 2009.
- TORMENA, C. A. et al. **Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo**. Scientia Agrícola, Piracicaba, v. 59, n. 4, p.795-801, 2002. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/sa/v59n4/a26v59n4.pdf>>. Acesso em: 18 de novembro de 2013
- TORMENA, C. A. **Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um latossolo vermelho distroférrico sob sistemas de plantio direto**. Universidade Estadual de Maringá, Departamento de Agronomia, Maringá, Paraná, Brazil – 2007.
- TORMENA, C.A.; ROLOFF, G. **Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v.20, p.333-339, 1996.
- TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L. **Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach**. Soil & Tillage Research, v.52, p.223-232, 1999.
- TORRES, E.; SARAIVA, O.F. **Camadas de impedimento do solo em sistemas agrícolas com a soja**. Londrina: Embrapa Soja, 1999. 58p. Embrapa Soja. Circular Técnica, 23.
- TÓTOLA, M.R.; CHAER, G.M. **Microrganismos e processos microbiológicos como indicadores da qualidade dos solos**. In: ALVAREZ V, V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R.; BARROS, N.F.; MELLO, J.W.V. & COSTA, L.M., eds. Tópicos em ciência do solo. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2002. v.2. p.196-276.
- VALICHESKI, R. R. et al. **Desenvolvimento de plantas de cobertura e produtividade da soja conforme atributos físicos em solo compactado**. R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental, v.16, n.9, p.969–977, 2012.
- VAZ, C. M. P. **Influência da Umidade na Resistência do Solo Medida com Penetrômetro de Impacto**. Embrapa, 2002.
- VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. **Uma visão sobre qualidade do solo**. Revista Brasileira de Ciência de Solo, 33:743-755, 2009.
- VIANA, J. H. M.; FERNANDES FILHO, E. I.; SCHAEFER, C. E. G. R. **Efeitos de ciclos de umedecimento e secagem na reorganização da estrutura microgranular de latossolos**. Revista Brasileira Ciência de Solo, 28:11-19, 2004.
- VOGEL, G. F. **Avaliação dos penetrômetros de impacto e eletrônico na determinação da resistência mecânica a penetração do solo**. Scientia Agraria, vol. 18, núm. 3, julio-septiembre, 2017, pp. 30-36 Universidade Federal do Paraná Curitiba, Brasil.