



Qualidade física de solos do Brasil e aplicabilidade de métodos para estimativas de retenção de água no solo: A revisão

Physical quality of soils in Brazil and applicability of methods for estimating soil water retention: The review

Bruno Campos Mantovanelli^{1*}
Mirta Teresinha Petry²
Juliano Dalcin Martins²
Reimar Carlesso²

¹ Universidade Federal do Acre,
69920-900, Rio Branco, Brasil.

² Universidade Federal de Santa
Maria, 97105-900, Ariquemes, Brasil.

* Autor Correspondente:
brunomantovanelli21@gmail.com

Palavras-chave:

Água no solo
Variabilidade
Qualidade estrutural
Solo-planta

Keywords:

Soil water
Variability
Structural quality
Soil-plant

Histórico do artigo:

Recebido: 15/12/2021
Aceito: 21/05/2022

RESUMO: O Sul, Centro-Oeste, Sudeste e parte do Nordeste são responsáveis por mais de 70% da produção agrícola brasileira. Muitas dessas áreas são irrigadas por aspersão e intensivamente cultivadas, podendo levar a uma diminuição da qualidade estrutural desses solos. A água no solo e a textura controlam uma série de processos, incluindo a infiltração e drenagem, e o balanço de energia no sistema solo-planta. A variabilidade dos atributos físicos é função dos fatores de formação pedológica, entretanto, essa variabilidade pode ser induzida por práticas de manejo. É atribuição da pesquisa desenvolver índices de qualidade adaptados a cada ecossistema, como forma de identificar seu status e definir limites críticos que podem funcionar como indicadores para diferentes solos. Diante do exposto, objetivou-se com esta revisão: (i) abordar sobre a qualidade física de solos em áreas irrigadas por aspersão a partir de índices físicos de qualidade do solo e atributos físicos e; (ii) fazer um levantamento de funções de pedotransferência que descrevam o conteúdo de água e o armazenamento de água no solo a partir de diferentes metodologias.

ABSTRACT: The South, Midwest, Southeast and part of the Northeast are responsible for more than 70% of Brazilian agricultural production. Many of these areas are irrigated by sprinkler and intensively cultivated, which can lead to a decrease in the structural quality of these soils. Soil water and texture control a number of these processes, including infiltration and drainage, and the energy balance in the soil-plant system. The variability of physical attributes is a function of pedological formation factors, however, this variability can be induced by management practices. It is the responsibility of the research to develop quality indexes adapted to each ecosystem, as a way to identify its status and define critical limits that can act as indicators for different soils. Given the above, this review aimed to: (i) address the physical quality of soils in sprinkler irrigated areas based on physical indices of soil quality and physical attributes and; (ii) carry out a survey of pedotransfer functions that describe water content and soil water storage using different methodologies.

1. INTRODUÇÃO

A qualidade de um solo inclui aspectos físicos, químicos e biológicos, que podem ser aplicados para avaliar a degradação ou melhorias em suas capacidades funcionais de manutenção dos sistemas agrícolas, além de indicar práticas de manejo para o uso sustentável do solo. Neste ponto, a qualidade física do solo desempenha papel fundamental nas pesquisas que avaliam a qualidade de solo (WALIA; DICK, 2018).

No Brasil, as regiões Sul, Centro-Oeste, Sudeste e parte do Nordeste representam quase toda a produção agrícola nacional, apresentando em sua grande extensão de terras agrícolas, solos intensamente manejados em função das práticas de cultivos. Estes mecanismos vêm ocasionando impactos na estrutura do solo, principalmente o aumento da densidade do solo, desestruturação dos agregados, redução da porosidade, etc., além de afetar diretamente a capacidade de armazenamento e retenção de água. Também nesse eixo produtivo concentra-se a maior parte da área irrigada do Brasil, devido a um período típico com limitada precipitação pluvial, elevando a necessidade de irrigação e intensificando o uso desses solos. A irrigação, associada ao uso intensivo do solo, evidencia algum tipo de limitação física nesses solos, levando em consideração a intensidade de uso e manejo a que estes solos são submetidos.

O conhecimento da dinâmica da água no sistema solo-planta-atmosfera aumentou significativamente nas últimas décadas, assim como o efeito das propriedades estruturais na qualidade de solos sob diferentes manejos. Porém, ainda são necessários avanços na quantificação das propriedades hidráulicas do solo, as quais desempenham um papel importante na produção agrícola, destacando o planejamento da irrigação, infiltração e drenagem, estresse hídrico e evapotranspiração (RAMOS et al., 2014; SILVA et al., 2017).

Existe uma forte correlação entre as propriedades estruturais, a capacidade de retenção e armazenamento de água nos solos. Nesse sentido, alguns métodos e índices para avaliar a capacidade estrutural de solos foram desenvolvidos, podendo-se destacar o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO), desenvolvido por Silva et al. (1994); o Índice S, proposto por Dexter (2004); “Integral Energy” ou Energia Integral,

proposto por Minasny e McBratney (2003). Em tentativa de quantificar a energia requerida pelas plantas para remover uma unidade de água ($J\ kg^{-1}$), destaque também para a Curva de Retenção de Água no Solo (CRAS), que fornece valiosas informações a respeito da relação entre o conteúdo de água no solo e os seus respectivos potenciais. E, por fim, atributos físicos amplamente conhecidos e difundidos na área de física de solos, como a densidade do solo, porosidade, estabilidade de agregados, resistência tênsil de agregados e resistência mecânica do solo à penetração, que podem fornecer indícios da baixa qualidade física a partir de suas medições, possibilitando inferir sobre a compactação dos solos agrícolas em geral.

Sabe-se da influência direta dos atributos físicos sobre o armazenamento e retenção de água no solo, e das dificuldades enfrentadas nas medições de tais atributos. Diante disso, Funções de Pedotransferência (FPTs) oferecem uma alternativa indireta para estimar as propriedades hidráulicas relacionadas a retenção de água no solo, a partir de propriedades de solo medidas em rotinas de laboratórios. As FPTs podem ser definidas como métodos que predizem variáveis do solo que são difíceis de medir diretamente, aplicando então correlações com atributos do solo que estão amplamente disponíveis ou podem ser determinados de forma simples e de baixo custo (OTTONI et al., 2018; HAGHVERDI et al., 2014). Botula et al. (2014); Haghverdi et al. (2014) desenvolveram FPTs para estimar o armazenamento e retenção de água fazendo uso de uma série de técnicas estatísticas, que relacionam propriedades físicas e químicas do solo (textura, porosidade, densidade do solo e matéria orgânica) com parâmetros que caracterizam a CRAS.

Nos últimos anos, um grande número de FPTs foram geradas em regiões tropicais e temperadas, destacando-se aquelas baseadas em modelos de Regressão Múltipla (RMs) (FIDALSKI ; TORMENA, 2007; MICHELON et al., 2010; MCNEILL et al., 2018); modelos baseados em Redes Neurais Artificiais (RNAs) (VERECKEN et al., 2010); e/ou estimativas por técnicas de krigagem baseadas em diagramas ternários (RAMOS et al., 2014; RAMOS et al., 2017).

No campo da ciência do solo, houve um acelerado avanço no desenvolvimento de FPTs para as estimativas de retenção de água, sobretudo àquelas oriundas de modelos por RMs. Entretanto, o uso de interpoladores geoestatísticos nas estimativas de retenção de água ainda é pouco frequente no Brasil, especialmente se considerar aquelas áreas que necessitam dessas informações, como aquelas com práticas de irrigação, onde as variações no conteúdo de água no solo são grandes em diferentes classes texturais, devido às alterações em propriedades estruturais e de textura.

Os solos brasileiros, nas diversas regiões (Sul, Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste) e que são intensamente agricultáveis, em geral, tendem a apresentar baixa qualidade física, principalmente pelas práticas adotadas, necessitando de uma avaliação mais complexa, abordando ferramentas e técnicas que possam descrever a sua variabilidade e capacidade em sustentar a produção agrícola. Assim, estimar a retenção de água no solo, agrupando os atributos físico-hídricos mais influentes com base em suas variações espaciais, de forma a gerar estimativas mais confiáveis é essencial. Sendo assim, a elaboração de uma base de informações acerca da qualidade física atual dos solos nas principais regiões agrícolas irrigadas, e o desenvolvimento de FPTs, faz-se necessário para orientar na tomada de decisão relativas ao manejo dessas áreas irrigadas. Propiciar o melhor manejo do solo e da água, evitar o acelerado processo de degradação física dos solos, além de aumentar o rendimento das culturas, reduzir os custos de produção, e buscar a sustentabilidade dos sistemas agrícolas irrigados é um desafio a ser alcançado.

Diante do exposto, objetivou-se com esta revisão: (i) abordar sobre a qualidade física de solos em áreas irrigadas por aspersão a partir de índices físicos de qualidade do solo e atributos físicos e; (ii) fazer um levantamento de funções de pedotransferência que descrevam o conteúdo de água e o armazenamento de água no solo a partir de diferentes metodologias.

2. REVISÃO

2.1 OCUPAÇÃO AGRÍCOLA DE SOLOS NO BRASIL

O território brasileiro dispõe de uma imensa

variedade de tipos de solos nas diversas regiões de interesse agrícola, correspondendo, diretamente, as diferentes formas e tipos de relevo, clima, material de origem, vegetação e organismos, os quais, por sua vez, condicionam diferentes processos formadores dos solos. Em virtude desta variabilidade de solos, associados a práticas exercidas nos cultivos agrícolas, as regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste e parte do Nordeste representam praticamente quase que a totalidade da agricultura brasileira em termos de produção (CONAB, 2020). A particularidade produtiva destas regiões está associada diretamente a dois fatores, (i) ao sistema de cultivo exercido (preparo convencional do solo ou plantio direto com pouco ou nenhum resíduo cultural na superfície) e; (ii) práticas de irrigação (CONAB, 2020).

Na região Sul, os solos originados de rochas básicas e de sedimentos diversos, se encontram distribuídos em uma paisagem com relevo diversificado, onde predomina o clima subtropical, com estações bem definidas e solos predominantemente férteis, com elevado potencial agrícola (STRECK et al., 2008). Associado a estas características, a região Sul é caracterizada por dois aspectos, a irrigação por contemplar uma área irrigada de aproximadamente da área irrigada no Brasil (49%), predominante por aspersão, em virtude do elevado crescimento no número de pivôs centrais (ANA, 2019) e sistemas de cultivo com adoção de plantio direto, principalmente aos estados de Rio Grande do Sul e Paraná, representando pouco mais de 90% dos 11,9 Mha cultivados (IBGE, 2017).

A região Centro-Oeste, com vasta superfície aplainada, com predominância de um clima tropical quente com veranicos acentuados, favorecem extensões de solos profundos, bem drenados, com baixa fertilidade natural, porém, com características físicas favoráveis, além das condições topográficas que permitem intensa mecanização agrícola das lavouras (COELHO et al., 2002). As práticas de cultivo do solo nessa região, caracterizam-se principalmente pelo sistema convencional de preparo do solo, visto que, estudos desenvolvidos na Embrapa Cerrados, mostraram menor desenvolvimento inicial de plantas de soja sob plantio direto em comparação ao plantio convencional com

irrigação suplementar em ambos os sistemas (EMBRAPA, 2006). O avanço produtivo da região Centro-Oeste no cenário agrícola, além de uma melhor correção da acidez e fertilidade, parte também do uso das técnicas de irrigação. Destacou-se como a região de maior expansão nos últimos 20 anos, quadruplicando a área irrigada para 1,2 Mha (ANA, 2019), em grande parte pela expansão de pivôs centrais para a produção de grãos.

A região Sudeste é representada por planaltos e áreas serranas com variadas altitudes, e em algumas situações superiores a 2.000 metros, com clima tropical de verões quentes nas baixadas e mais amenos nas áreas altimontanas, predominância de solos bem desenvolvidos e geralmente com baixa fertilidade natural, representam uma enorme variabilidade e impactos quanto a aplicabilidade aos sistemas de cultivos praticados nesta região do território brasileiro (COELHO et al., 2002). Assim como no Centro-Oeste, existe predominância aos métodos convencionais de manejo do solo, no qual apenas 2,9 Mha são praticadas no sistema de plantio direto (IBGE, 2017). Em termos de uso e aplicabilidade de irrigação, São Paulo e Minas Gerais dispõem de 34,0% da área irrigada do País e 87,9% da área da região, deixando o Sudeste a responder pela maior área irrigada, com 39,0% do total (ANA, 2019).

Na região Nordeste, a variabilidade climática representa faixas do quente e úmido ao quente e seco (semiárido), passando por uma faixa de transição semiúmida (Zona da Mata). Nessa região, em grande parte ocorrem solos de média a alta fertilidade natural, em geral pouco profundos, em decorrência de seu baixo grau de intemperismo. O déficit hídrico e, em menor proporção, a ocorrência de salinidade e/ou sodicidade em alguns solos nordestinos são os principais fatores condicionantes à produção agrícola nesta região do país (COELHO, 2002). Neste caso, práticas voltadas a irrigação se fazem necessárias para elevar os índices produtivos, tanto que em 2006 a região ultrapassou 1 Mha de áreas irrigadas (ANA, 2019). A região é impulsionada pelo estado da Bahia, o qual apresenta forte crescimento atualmente, em especial em áreas de Cerrado do oeste (região Oeste da Bahia), com forte adoção de pivôs centrais (ANA, 2019).

As diferentes regiões do território brasileiro apresentam peculiaridades ambientais e culturais que refletem a ocorrência, a distribuição, a aptidão agrícola de suas terras, o uso e manejo diferenciados de seus solos. Nesta perspectiva, estudos se propuseram a medir os impactos a partir de diferentes formas de se praticar a agricultura, seja pela irrigação (MICHELON et al., 2009; MICHELON et al., 2010), ou manejo do solo em função de sistemas convencionais ou plantio direto (CHERUBIN et al., 2016; SILVA et al., 2021; LOVERA et al., 2021; VIZIOLI et al., 2021). Desta forma, surge a necessidade de mais estudos que contemplem e caracterizem os impactos exercidos sobre a enorme variabilidade existente no território brasileiro, caracterizando assim, regiões com possíveis limitações e que necessitam de medidas que atenuem o processo de degradação dos solos.

2.2 ÍNDICES DE QUALIDADE FÍSICA DE SOLOS

A qualidade física de solos é definida como a capacidade de um determinado solo em atender às exigências da planta, favorecer condições de aeração, apresentar resistência a processos antrópicos e se recuperar dos processos que possam diminuir essa capacidade.

Alguns dos indicadores mais importantes da qualidade física do solo são a capacidade de campo, capacidade de água disponível às plantas, porosidade de aeração, macroporosidade, densidade do solo e índice de estabilidade de agregados, pois quantificam (direta ou indiretamente) a capacidade do solo em armazenar ou fornecer água, ar e nutrientes necessários para as culturas (REYNOLDS et al., 2009). As limitações quanto à qualidade física de solos podem ser evidenciadas de diferentes maneiras. Por exemplo, pela infiltração incipiente da água, escoamento superficial, encrostamento da superfície, aeração deficiente, pouco enraizamento. Enquanto que um solo em boa condição física apresenta o inverso das condições listadas acima (DEXTER, 2004).

Dos indicativos da degradação física de solos, a compactação, ocasionada principalmente pelo excesso de tráfego de implementos agrícolas, é uma das principais ameaças à produtividade e ao bom funcionamento das funções do solo na agricultura mecanizada moderna. A

compactação modifica a arquitetura de poros, com impactos negativos em muitas funções do solo, principalmente na redistribuição de água, e, portanto, reduzindo a qualidade física do solo. A maioria das propriedades e processos físicos, químicos e biológicos do solo são afetados pela compactação do solo (DEXTER, 2004; VIZIOLI et al., 2021).

Diante dessas condições, pesquisas vem sendo desenvolvidas com o propósito de quantificar os efeitos das práticas de manejo adotadas e a sua influência nas propriedades físico-hídricas dos solos em nível nacional e mundial, com o critério de correlacionar propriedades físicas do solo com índices de qualidade, mas nem sempre os métodos aplicados correspondem as expectativas de se medir a real condição estrutural dos solos (CHERUBIN et al., 2016; MOREIRA et al., 2016; LIMA et al., 2020; ERKTAN et al., 2020).

Vários indicadores para detectar a degradação física do solo foram identificados, testados e aplicados em todo o mundo (BÜNEMANN et al., 2018; PAIVA et al., 2020). Propriedades do solo relacionadas com o fluxo de água (armazenamento de água, condutividade hidráulica e infiltração), arejamento do solo (porosidade), compactação (densidade do solo e resistência à penetração) e a estrutura do solo (agregação) são os indicadores frequentemente abordados nas avaliações da qualidade física do solo. Além disso, muitos estudos incluíram indicadores biológicos, tais como macroinvertebrados (abundância de minhoca, coleópteros, cupins), que afetam propriedades e processos físicos fundamentais do solo, principalmente aqueles inter-relacionados à formação dos poros biológicos que aumentam a macroporosidade e assim favorecem a maior difusão de oxigênio (ROSA et al., 2015; SANTOS et al., 2016; LEHMANN et al., 2017).

Conforme destacado na justificativa desse trabalho, para se melhor compreender sobre a qualidade física de um solo, uma série de índices físicos foram propostos, destacando-se a curva de retenção de água no solo (CRAS), intervalo hídrico ótimo (IHO), Índice S, e até os conceitos relativos à energia integral de água no solo, além de medições físicas tradicionais dos atributos físicos, como densidade do solo, macroporosidade, microporosidade e porosidade total. Todos estes índices apresentam influência

direta sobre a retenção de água no solo e relação envolvendo os fenômenos de adsorção e capilaridade, que regem a dinâmica da água no solo, associando-a com a estruturação de solos.

A eficiência do Índice S em refletir as funções físicas críticas do solo foi demonstrada em muitos estudos (DEXTER; CZYŻ, 2007; KELLER et al., 2007). Basicamente, um maior valor de S indica melhor qualidade física do solo; categoricamente em termos de valores, estes se enquadram em qualidade muito boa ($S \geq 0,050$), boa ($0,050 > S \geq 0,035$), pobre ($0,035 > S \geq 0,020$) e muito pobre ($0,020 > S$) (DEXTER, 2004).

Avaliando o índice S, Li et al., (2011) constataram que esta medida foi negativamente e significativamente correlacionada com a resistência do solo à penetração, e positivamente correlacionado com o carbono orgânico do solo. Naderi-Boldaji e Keller (2016) apontaram uma forte correlação positiva entre o grau de compactação e o índice S. Estes autores evidenciam a valiosa informação que o Índice S representa, favorecendo a identificação de propriedades físicas ou químicas de solos que mais atuam nos processos de avaliação da qualidade. Nesse sentido, o Índice S é uma alternativa no critério de inferir acerca da qualidade física de um solo, principalmente sobre as limitações impostas pela compactação, visto que, a partir do índice S é possível observar as possíveis mudanças na arquitetura dos poros do solo, com impactos negativos em várias funções do solo e, portanto, reduzindo a qualidade física desses, conforme associação com demais atributos físicos do solo.

Em outra perspectiva de índices físicos, a disponibilidade de água no solo para as plantas é um importante campo de estudo nas relações solo-planta-atmosfera, partindo da condição lógica de que um solo em condições físicas adequadas propicia um adequado ambiente para que a planta possa suprir suas necessidades. A água prontamente disponível às plantas, a faixa de água não-limitante, a faixa de água com menor limitação e a capacidade integral de água fornecem estimativas da quantidade de água disponível às plantas, calculada com base em diferentes suposições (ASGARZADEH et al., 2010; ASGARZADEH et al., 2011; ASGARZADEH et al., 2014).

Com isso, a abordagem do “Integral Energy” ou Energia Integral (EI) proposta por Minasny e McBratney (2003), surge como um novo conceito para relacionar os efeitos da estrutura do solo e disponibilidade hídrica as plantas. O conceito da energia integral foi inicialmente sugerido para quantificar a energia específica ($J\ kg^{-1}$ de água) que é necessária para absorver a água do solo no intervalo entre a capacidade de campo e ponto de murcha permanente. Minasny e McBratney (2003) analisaram um conjunto de dados de retenção de água em solos da Austrália e do mundo para correlacionar a energia integral com as propriedades físicas do solo. Os autores observaram que a energia integral aumentou consideravelmente com o aumento do teor de argila, de forma que, mais energia foi necessária para as plantas absorverem a massa unitária de água disponível em um solo com textura fina. Leon et al., (2019) constataram que o preparo do solo não influenciou a energia integral, associando esse parâmetro com a granulometria do solo e suas propriedades estruturais, com destaque para a densidade do solo.

Diante dos métodos de avaliação da qualidade física de solos apresentados até o momento, a CRAS é destacada como um método clássico de avaliação, e que associa a relação entre o potencial matricial e a respectiva faixa de conteúdo de água, podendo prever uma série de processos, com destaque para a distribuição de tamanho de poros. A CRAS é fundamental na caracterização das propriedades hidráulicas do solo, destacando estudos do balanço e disponibilidade de água às plantas, dinâmica da água e solutos no solo, infiltração e manejo da irrigação (CICHOTA; JONG VAN LIER, 2004).

A CRAS é um método que explica de forma complexa a retenção de água no solo, associando condições em diferentes potenciais matriciais, entretanto, é uma determinação demorada e, por isso, formas alternativas para sua estimativa têm sido continuamente desenvolvidas. Essas formas associam os atributos do solo, principalmente a granulometria, porosidade, densidade do solo e demais propriedades físico-hídricas como principais preditores (BOUMA; VAN LANEN, 1987). Diante da importância desse método, uma série de pesquisas relacionam à influência da CRAS com as práticas de manejo associadas à qualidade estrutural de solos, além da

aplicabilidade de estudos que se propõem em modelagens baseadas em atributos do solo (MANTOVANELLI, 2017; BORDONI et al., 2017; WANG et al., 2018).

2.3 QUALIDADE FÍSICA DE SOLOS NO BRASIL

Historicamente, a expansão agrícola se concentrou no Centro-Sul do Brasil, com 70% dessa expansão ocorrendo em pastagens degradadas. Ao longo do tempo houve uma migração para demais regiões no eixo Sudeste, Centro-Oeste e parte do Nordeste (ADAMI et al., 2012). O desenvolvimento da agricultura brasileira está atrelado ao uso e ocupação de extensas áreas, associadas com práticas de manejo muitas vezes não adequadas, resultando em uma série de fatores, tal como a perda da qualidade física (CHERUBIN et al., 2017).

No Brasil, nas últimas décadas, a comunidade científica vem se propondo a desvendar vários desses problemas físicos em solos, associando estratégias de manejo a índices de qualidade física, conforme destacado no item 2.1. Comparações entre efeitos dos sistemas de cultivo, associadas ou não as práticas de irrigação, têm sido abordadas na literatura e demonstram alterações nos atributos físicos do solo ocasionados pelas diferentes formas de cultivo conforme já destacado por Michelin et al., (2009) e Arcoverde et al., (2015).

Ao avaliar a qualidade física de solos sob uso e irrigação em algumas regiões do Centro-Oeste e Sudeste do Brasil, Michelin et al. (2009), propuseram avaliar a textura, densidade do solo e de partículas e porosidade, identificando que, na camada superficial, cerca de 14% das áreas do Estado de Goiás, 9,5% das áreas de Minas Gerais e 34% das áreas de São Paulo. Essa deterioração da qualidade física, a partir de um aumento na densidade do solo e diminuição da macroporosidade, evidencia há indícios de compactação em função desses parâmetros, podendo se caracterizar como um importante indicativo de como e quanto o manejo do solo pode afetar esses atributos. Em um trabalho anterior, Michelin et al., (2008), avaliaram a qualidade física de solos irrigados por aspersão no Brasil, mais especificamente aos estados de Goiás, Minas Gerais, Rio Grande do Sul e Bahia, quando identificaram que, todas essas

localidades estão suscetíveis a compactação a algum tipo de degradação física, sobretudo no Rio Grande do Sul, onde 66,5% das áreas apresentaram viés de degradação. Andrade e Stone (2009), aplicando o índice S como indicador da qualidade física de solos do Cerrado brasileiro, definindo índice pontual para o parâmetro físico do índice S, concluíram que o valor limite de $S = 0,045$ mostrou-se adequado à divisão entre solo de boa qualidade estrutural e solo com tendências a se tornar degradado, enquanto valores de $S \leq 0,025$ indicam solos degradados fisicamente.

Verificando a conversão de vegetação nativa para sistemas agrícolas, Cherubin et al., (2016) identificaram que houve aumento na compactação do solo (valores mais altos de densidade do solo e resistência a penetração), reduzindo a porosidade de aeração e a condutividade hidráulica e, conseqüentemente, criando uma relação desequilibrada entre o espaço de poros preenchido com água e ar no solo. Em áreas de cana-de-açúcar, Scarpore et al., (2019), avaliando os efeitos do preparo do solo na condição física do solo e crescimento de raízes no Estado de São Paulo, identificaram algumas diferenças entre as propriedades físicas do solo com o resultado das práticas de preparo do solo, o que influenciou diretamente na disponibilidade de água para o desenvolvimento da cultura. Cavalcanti et al., (2020), em solos no nordeste do país, destacaram que o cultivo da cana-de-açúcar no bioma Mata Atlântica induziu impactos negativos na porosidade do solo e estabilidade de agregados, embora a resistência à penetração do solo tenha sido reduzida.

A literatura apresenta uma série de pesquisas em diversas regiões do Brasil, porém, mais estudos são necessários, pois, em sua grande maioria, os solos agrícolas no Brasil tendem a uma deterioração na sua estrutura, em função da adoção de sistemas de cultivo que favorecem tal condição. Sendo assim, a associação de índices físicos com demais atributos do solo, como os do atual estudo, representaria um avanço em descrever se uma determinada região avaliada apresenta riscos e quais os limites críticos que estes solos suportariam. Além disto, o crescente e acelerado aumento nas áreas irrigadas, principalmente no Rio Grande do Sul, Paraná, Mato Grosso, Goiás, Minas Gerais e Bahia, , a

delimitação e o estudo das áreas críticas, pode trazer subsídios ao planejamento do uso de áreas agrícolas e a capacidade de carga que estes solos suportariam.

2.4 FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PARA ESTIMATIVA DO CONTEÚDO DE ÁGUA NO SOLO

O objetivo da modelagem hidráulica do solo é fornecer uma visão simplificada e abstrata dos complexos padrões hidráulicos em uma amostra de solo (BROWN; HEUVELINK, 2006). Propriedades hidráulicas do solo e os seus modelos são associados em uma vasta gama de aplicações, incluindo a irrigação (GRASHEY-JANSEN, 2014), modelagem de manejo em áreas agrícolas (HORNE; SCOTTER, 2016). Os dados necessários para modelos hidráulicos de solo usados em uma determinada aplicação usualmente são difíceis ou impossíveis de se obter diretamente a partir de detalhadas medições de campo, sendo caro e demorado coletar amostras para cada nova aplicação.

Uma abordagem diferente é estimar as propriedades hidráulicas do solo a partir de um conjunto representativo de solos com descrições e medidas associadas, que estão prontamente disponíveis a partir de observações de campo, juntamente com medições laboratoriais detalhadas correspondentes às propriedades hidráulicas do solo (MCNEILL et al., 2018). Em seguida, com base em dados de campo e laboratório, uma função matemática é escolhida para estimar os parâmetros hidráulicos do solo para outros solos com informações de campo semelhantes.

As funções de pedotransferência (FPTs) estabelecidas para determinar a retenção de água no solo podem ser classificadas em três grupos : métodos de estimativa pontual, métodos de estimativa de parâmetros e métodos semi-físicos. FPTs pontuais preveem o conteúdo de água no solo em um potencial fixo (SALTER; WILLIAMS, 1965). Métodos de estimativa de parâmetros estabelecem relações empíricas entre propriedades do solo e parâmetros da curva de retenção de água, descrevendo a evolução contínua do conteúdo de água no solo em diferentes potenciais com equações matemáticas (VAN GENUCHTEN, 1980). Abordagens semi-físicas se baseiam em suposições mecanicistas

sobre as relações entre retenção de água e estrutura do solo e distribuição do tamanho dos poros (ARYA; PARIS, 1981).

Desde 1970, um grande número de FPTs para prever propriedades hidráulicas foram desenvolvidas em todo o mundo em escala local, regional ou internacional (MICHELON et al., 2010; VERECKEN et al., 2010; SOUZA et al., 2014; MCNEILL et al., 2018; HAGHVERDI et al., 2018, TUREK et al., 2020). Desta forma, a literatura dispõe de um grande número de FPTs disponíveis e calibradas com dados de solo para a estimativa da retenção de água em solos. Grande parte dessas FPTs disponíveis utilizam-se de informações baseadas na textura do solo como principal preditor para estimar o comportamento hidráulico dos solos, e não incluem informações sobre a estrutura, o que pode influenciar diretamente nas estimativas.

Métodos baseados em regressões multivariadas (RMs) são questionados devido a confiabilidade no que se refere a correspondência com os dados aplicados na geração das FPTs, embora as RMs sejam destacadas como um dos inúmeros modelos estatísticos aplicados em séries temporais de dados. Sua base estatística advém da regressão linear e sua aplicação é especialmente importante, pois permite que se estime um valor de uma variável com base num conjunto de outras variáveis. Entretanto, em muitas condições, a entrada de uma determinada variável no modelo pode não apresentar significância e, mesmo assim, apresentar um alto coeficiente de determinação, ficando, portanto, restrito apenas àquela condição e localidade. Essa condição é justificável, pois os modelos baseados em redes neurais (RNAs) têm mostrado superioridade no desenvolvimento de algumas FPTs desenvolvidas quando comparadas aos modelos de RMs, sendo este desempenho atribuído principalmente à capacidade das RNAs de modelar as relações de entrada-saída dos dados e as camadas ocultas favorecerem a relação de sensibilidade com os dados de entrada e saída (HAGHVERDI et al., 2018). Desta forma, uma rede neural é uma estrutura adaptável de transferência de dados não-linear, que pode compreender dinamicamente as relações entre os dados de entrada e saída e, ao mesmo tempo, ser insensível ao ruído de medição (NIELSEN, 1990).

Recentemente, com base nas ferramentas e dados padrão disponíveis para a modelagem do solo, Turek et al., (2020) estimaram a capacidade de campo por critérios comuns, incluindo fluxo, potencial matricial e FPTs específicas, elaborando um mapa da capacidade de campo para o Brasil, com base nos dados globais disponíveis do solo nas funções Soil Grids e pedotransferência.

Seguindo os estudos de predição de propriedades hidráulicas do solo relacionados à retenção de água, técnicas baseadas na abordagem geoestatística, mais precisamente interpolações por krigagem, vêm se destacando, principalmente por considerarem a estrutura de distribuição espacial dos atributos envolvidos nas estimativas (RAMOS et al., 2014; RAMOS et al., 2017). A geoestatística é um método eficiente de estudo para a distribuição espacial de propriedades do solo (LIU et al., 2014; BEHERA; SHUKLA, 2015).

A aplicabilidade das técnicas geoestatísticas nos estudos voltados a ciência do solo tem sido relatada em uma série de pesquisas, principalmente aquelas que constatarem a variabilidade espacial de atributos físicos. Entretanto, a aplicação das técnicas de krigagem ainda não foi estabelecida para o desenvolvimento de FPTs para derivar propriedades hidráulicas do solo a partir de propriedades físicas básicas e de fácil aquisição e que possam prever o comportamento da retenção de água com base no triângulo textural em solos brasileiros. Dos poucos estudos no desenvolvimento de FPTs aplicando aproximação geoestatística, destaca-se o trabalho de Ramos et al., (2014) aplicando técnicas de krigagem, baseando-se na continuidade espacial das propriedades texturais, concluindo que o método de krigagem foi útil para compreender as estimativas de retenção de água no solo baseando-se em diagramas ternários e, portanto, evitando as extrapolações para solos de Portugal..

4. CONCLUSÕES

Esta revisão trouxe aspectos fundamentais acerca da situação atual dos solos brasileiros, principalmente no eixo centro-sul, evidenciando assim:

A intensificação da agricultura é um dos fatores que contribuem para aumentar a produção de alimentos e alavancar a lucratividade econômica. No entanto, o cultivo contínuo, as práticas convencionais de manejo, tendem a deteriorar a qualidade do solo, afetando diretamente processos que envolvem a qualidade física do solo. Concomitantemente ao exposto, a intensificação dos sistemas de uso e ocupação do solo, levam também ao uso de métodos que necessitem aprimorar as práticas de irrigação, junto a isto, é disponibilizado diversos modelos que necessitam de parâmetros ou variáveis hidráulicas de solo, e que em muitas situações, são de difícil mensuração, e nem sempre se encontram facilmente disponíveis na literatura e de forma pontual sem a necessidade de aplicação de equações.

Estudar a qualidade física do solo em macro escala, se torna relevante em virtude da possibilidade de associação com práticas de cultivos que são praticadas nas diversas regiões do Brasil. Desta forma, mesmo se tratando de solos que suportam uma agricultura altamente rentável, entretanto, precisamos estabelecer novas metodologias visando quantificar de forma mais abundante estas variações.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo fomento de bolsa de estudo que possibilitou o desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

ADAMI, M.; RUDORFF, B.F.T.; FREITAS, R.M.; AGUIAR, D.A.; SUGAWARA, L.M.; MELLO, M.P. Remote sensing time series to evaluate direct land use change of recent expanded sugarcane crop in Brazil. **Sustainability**, Basel, v. 4, n. 4, p. 574-585, 2012. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/4/4/574>. Acesso em: 10 jan. 2022.

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, v. 13, n. 4, p. 382-388, 2009. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/KsNMdcRkZ3NBxyzzw3vqxc/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 10 jan. 2022.

ARCOVERDE, S.N.S.; SALVIANO, A.M.; OLSZEWSKI, N.; MELO, S.B.; CUNHA, T.J.F.; GIONGO, V.; PEREIRA, J.S. Qualidade física de solos em uso agrícola na região semiárida do Estado da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 5, p. 1473-1482, 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/G8zfjS68cDbYK mTKH7DrPHf/?lang=pt>. Acesso em: 10 jan. 2022.

ARYA, L.M.; PARIS, J.F. A physicoempirical model to predict the soil-moisture characteristic from particle-size distribution and bulk-density data. **Soil Science Society of American Journal**, Madinson, v. 45, n. 6, p. 1023-1030, 1981. Disponível em: <https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2136/sssaj1981.03615995004500060004x>. Acesso em: 10 jan. 2022.

ASGARZADEH, H.; MOSADDEGHI, M.R.; MAHBOUBI, A.A.; NOSRATI, A.; DEXTER, A.R. Soil water availability for plants as quantified by conventional available water, least limiting water range and integral water capacity. **Plant Soil**, Basel, v. 335, p. 229-244, 2010. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-010-0410-6>. Acesso em: 01 Jan. 2022.

ASGARZADEH, H.; MOSADDEGHI, M.R.; MAHBOUBI, A.A.; NOSRATI, A.; DEXTER, A.R. Integral energy of conventional available water, least limiting water range and integral water capacity for better characterization of water availability and soil physical quality. **Geoderma**, Amsterdam v. 166, n.1, p. 34-42, 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016706111001789>. Acesso em: 01 jan. 2022.

ASGARZADEH, H.; MOSADDEGHI, M.R.; NIKBAKHT, A.M. SAWCal: A user-friendly program for calculating soil available water quantities and physical quality indices.

Computers and Electronics in Agriculture, Amsterdam, v. 109, p. 86–93, 2014. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168169914002221>. Acesso em: 21 dez. 2021.

BEHERA, S.K.; SHUKLA, A.K. Spatial distribution of surface soil acidity, electrical conductivity, soil organic carbon content and exchangeable potassium, calcium and magnesium in some cropped acid Soils of India. **Land Degradation & Development**, Lewisburg, v. 26, n. 2, p. 71–79, 2015. Disponível em:

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ldr.2306>. Acesso em: 14 jan. 2022.

BORDONI, M.; BITTELLI, M.; VALENTINO, R.; CHERSICH, S.; MEISINA, C. Improving the estimation of complete field soil water characteristic curves through field monitoring data. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 552, p. 283-305, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169417304559>. Acesso em: 03 fev. 2022.

BOTULA, Y.D.; RANST, E.V.; CORNELIS, W. M. Pedotransfer functions to predict water retention for soils of the humid tropics: a review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 3, p. 679–698, 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/tbj4bx7yLTZGPbwGgMtZRwj/?lang=en>. Acesso em: 02 fev. 2022.

BOUMA, J; VAN LANEN, J.A.J. **Pedotransfer functions and threshold values, from soil characteristics to land qualities**. In: BEEK, K.J. (Ed). Quantified land evaluation. Enschede, The Netherlands, v. 6, p. 106-110, ITC. International Institute of Aerospace Survey and Earth Science, 1987.

BROWN, J.D.; HEUVELINK, G.B.M. 79 Assessing uncertainty propagation through physically based models of soil water flow and solute transport. **Encyclopedia of Hydrological Sciences**, v. 32, p. 1-15, 2006. Disponível em:

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/0470848944.hsa081>. Acesso em: 05 jan. 2022.

BÜNEMANN, E.K.; BONGIORNO, G.; BAI, Z.; CREAMER, R.E.; DE DEYN, G.; GOEDE, R.; FLESKENS, L.; GEISSEN, V.; KUYPER, T.W.; MÄDER, P.; PULLEMAN, M.; SUKKEL, W.; VAN GROENIGEN, J.W.; BRUSSAARD, L. Soil quality – a critical review. **Soil Biology and Biochemistry**, Madinson v. 120, n. 2, p. 105–125, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038071718300294>. Acesso em: 12 fev. 2022.

CAVALCANTI, R.Q.; ROLI, M.M.; LIMA, R.P.; TAVARES, U.E.; PEDROSA, E.M.R.; CHERUBIN, M.R. Soil physical changes induced by sugarcane cultivation in the Atlantic Forest biome, northeastern Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 370, p. 114353, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016706119316428#>. Acesso em: 06 fev. 2022.

CHERUBIN, M.R.; FRANCO, A.L.C.; GUIMARÃES, R.M.L.; TORMENA, C.A.; CERRI, C.E.P.; KARLEN, D.L.; CERRI, C.C. Assessing soil structural quality under Brazilian sugarcane expansion areas using Visual Evaluation of Soil Structure (VESS). **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 173, p. 64-74, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198716300733>. Acesso em: 01 fev. 2022.

CHERUBIN, M.R.; KARLEN, D.L.; FRANCO, A.L.C.; TORMENA, C.A.; CERRI, C.E.P.; DAVIES, C.A.; CERRI, C.C. Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 267, p. 156-168, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016706116300039>. Acesso em: 01 fev. 2022.

CICHOTA, R.; JONG VAN LIER, Q. Análise da variabilidade espacial de pontos amostrais da

- curva de retenção de água no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 4, p. 585-596, 2004. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/bnHqKSNPkZxr5bXkqHW43Rp/abstract/?lang=pt> Acesso em: 03 mar. 2022.
- COELHO, M.R.; SANTOS, H.G.; SILVA, E.F.; AGLIO, M.L.D. **O recurso Natural Solo**. In: *Uso Agrícola dos Solos Brasileiros*. Manzatto, C.V.; FREITAS JUNIOR, E.; PERES, J.R.R. (Eds). Embrapa. 2002, 184p.
- DEXTER, A.R. Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, Amsterdam, v.120, p.201-214, 2004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016706103002891>. Acesso em: 03 mar. 2022.
- DEXTER, A.R.; CZYŻ, E.A. Applications of S-theory in the study of soil physical degradation and its consequences. **Land Degradation & Development**, Amsterdam, v. 18, n. 4, p. 369–381, 2007. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ldr.779>. Acesso em: 13 mar. 2022.
- ERKTAN, A.; OR, D.; SCHEU, S. The physical structure of soil: Determinant and consequence of trophic interactions. **Soil Biology and Biochemistry**, Madinson, v. 148, p. 107876, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038071720301735>. Acesso em: 26 fev. 2022.
- FIDALSKI, J.; TORMENA, C.A. Funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração em sistemas de manejo com plantas de cobertura permanente em citros. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 5, p. 1316-1322, 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cr/a/mBGgRg5SnM9gHrvHXQbyGys/?lang=pt>. Acesso em: 27 fev. 2022.
- GRASHEY-JANSEN, S. Optimizing irrigation efficiency through the consideration of soil hydrological properties – examples and simulation approaches. **Erdkunde**, Bonn, v. 68, n. 1, p. 33-48, 2014. Disponível em: <https://www.erdkunde.uni-bonn.de/archive/2014/>. Acesso em: 03 fev. 2022.
- HAGHVERDI, A.; ÖZTÜRK, H.S.; CORNELIS, W.M. Revisiting the pseudo continuous pedotransfer function concept: impact of data quality and data mining method. **Geoderma**, Amsterdam, v. 227, p. 31–38, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016706114000962>. Acesso em: 06 mar. 2022.
- HAGHVERDI, A.; ÖZTÜRK, H.S.; DURNER, W. Measurement and estimation of the soil water retention curve using the evaporation method and the pseudo continuous pedotransfer function. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 563, p. 251-259, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S002216941830413X>. Acesso em: 15 mar. 2022.
- HORNE, D.J.; SCOTTER, D.R. The available water holding capacity of soils under pasture. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 177, p. 165-171, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S037837741630258X>. Acesso em: 06 fev. 2022.
- KELLER, T.; ARVIDSSON, J.; DEXTER, A. Soil structures produced by tillage as affected by soil water content and the physical quality of soil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 92, p. 45–52, 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016719870600002X>. Acesso em: 03 fev. 2022.
- LEHMANN, A.; ZHENG, W.; RILLIG, M.C. Soil biota contributions to soil aggregation. **Nature Ecology & Evolution**, Los Angeles, v. 1, n. 12, p. 1828–1835, 2017. Disponível em:

<https://www.nature.com/articles/s41559-017-0344-y>. Acesso em: 18 fev. 2022.

LEON, H.N.; ALMEIDA, B.G.; ALMEIDA, C.D.G.C.; FREIRE, F.J.; SOUZA, E.R.; OLIVEIRA, E.C.A.; SILVA, E.P. Medium-term influence of conventional tillage on the physical quality of a Typic Fragiudult with hardsetting behavior cultivated with sugarcane under rainfed conditions. **Catena**, Amsterdam, v. 175, p. 37-46, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0341816218305411>. Acesso em: 14 mar. 2022.

LI, L.; CHAN, K.Y.; NIU, Y.; LI, G.; OATES, A.; DEXTER, A.; HUANG, G. Soil physical qualities in an Oxic Paleustalf under different tillage and stubble management practices and application of S theory. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 113, n. 2, p. 82–88, 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198711000420>. Acesso em: 07 mar. 2022.

LIMA, R.P.; TORMENA, C.A.; FIGUEIREDO, G.C.; SILVA, A.R.; ROLIM, M.M. Least limiting water and matric potential ranges of agricultural soils with calculated physical restriction thresholds. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 240, n. 1, p. 106299, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378377420306247>. Acesso em: 06 mar. 2022.

LIU, J.H.; YANG, M.; ZHAO, X.; ZHANG, H. Spatial distribution patterns of benthic microbial communities along the Pearl Estuary, China. **Systematic and Applied Microbiology**, Amsterdam, v. 37, p. 578–589, 2014. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25467555/>. Acesso em: 14 mar. 2022.

LOVERA, L.H.; SOUZA, Z.M.; ESTEBAN, D.A.A.; OLIVEIRA, I.N.; FARHATE, C.V.V.; LIMA, E.S.; PANOSSO, A.R. Sugarcane root system: Variation over three cycles under different soil tillage systems and cover crops.

Soil and Tillage Research, Amsterdam, v. 208, p. 104866, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198720306486>. Acesso em: 22 mar. 2022.

MCNEILL, S.J.; LILBURNE, L.R.; CARRICK, S.; WEBB, T.H.; CUTHILL, T. Pedotransfer functions for the soil water characteristics of New Zealand soils using S-map information. **Geoderma**, Amsterdam, v. 326, p. 96-110, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016706117312715>. Acesso em: 09 mar. 2022.

MICHELON, C. J.; CARLESSO, R.; OLIVEIRA, Z.B.; KNIES, A.B.; PETRY, M.T.; MARTINS, J.D. Funções de pedotransferência para estimativa da retenção de água em alguns solos do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 40, n. 4, p. 848-853, 2010. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cr/a/B3bjVtTGFFM4VfYCS7cRQYL/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 22 mar. 2022.

MINASNY, B.; MCBRATNEY, A.B. Integral energy as a measure of soil water availability. **Plant and Soil**, Basel, v. 249, p. 253-262, 2003. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1022825732324>. Acesso em: 06 mar. 2022.

MOREIRA, W.H.; TORMENA, C.A.; KARLEN, D.L.; SILVA, A.P.; KELLER, T.; BETIOLI JÚNIOR, E. Seasonal changes in soil physical properties under long-term no-tillage. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 160, p. 53-64, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198716300186>. Acesso em: 16 mar. 2022.

NADERI-BOLDAJI, M.; KELLER, T. Degree of soil compactness is highly correlated with the soil physical quality index S. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 159, p. 41–46, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198716300186>

i/S0167198716300101. Acesso em: 16 mar. 2022.

NIELSEN, H. R. **Neurocomputing**. Addison-Wesley, Reading, M.A. 1990. 433p.

PAIVA, I.A.; RITA, Y.L.; CAVALIERI, K.M. Knowledge and use of visual soil structure assessment methods in Brazil – A survey. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 204, p. 104704, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198720304864>. Acesso em: 22 fev. 2022.

RAMOS, T.B.; HORTA, A.; GONÇALVES, M.C.; MARTINS, J.C.; PEREIRA, L.S. Development of ternary diagrams for estimating water retention properties using geostatistical approaches. **Geoderma**, Amsterdam, v. 230-231, p. 229-242, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016706114001748>. Acesso em: 26 fev. 2022.

RAMOS, T.B.; HORTA, A.; GONÇALVES, M.C.; PIRES, F.P.; DUFFY, D.; MARTINS, J.C. The INFOSOLO database as a first step towards the development of a soil information system in Portugal. **Catena**, Amsterdam, v. 158, p. 390-412, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0341816217302515>. Acesso em: 16 mar. 2022.

REYNOLDS, W.D.; DRURY, C.F.; TAN, C.S.; FOX, C.A.; YANG, X.M. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. **Geoderma**, Amsterdam, v. 152, p. 252–263, 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016706109001967>. Acesso em: 15 mar. 2022.

ROSA, M.G.; KLAUBERG FILHO, O.; BARTZ, M.L.C.; SOUSA, J.P.F.A.; BARETTA, D. Macrofauna edáfica e atributos físicos e químicos em sistemas de uso do solo no planalto Catarinense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 6, p. 1545-1553, 2015. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/rbcs/a/vzngDFfmG5dgTLywPcGVPkk/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 14 mar. 2022.

SALTER, P.J.; WILLIAMS, J.B. Influence of texture on moisture characteristics of soils. 2. Available-water capacity and moisture release characteristics. **European Journal of Soil Science**, v. 16, p. 310-317, 1965. Disponível em: <https://bsssjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-2389.1966.tb01455.x>. Acesso em: 18 mar. 2022.

SANTOS, D.P.; SANTOS, G.G.; SANTOS, I.L.; SCHOSSLER, T.R.; NIVA, C.C.; MARCHÃO, R.L. Caracterização da macrofauna edáfica em sistemas de produção de grãos no Sudoeste do Piauí. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 51, n. 9, p. 1467-1475, 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/Q6mnLfkvdt3B7YBC7TSFQsH/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 16 fev. 2022.

SCARPARE, S.V.; DE JONG VAN LIER, Q.; CAMARGO, L.; PIRES, R.C.M.; RUIZ CORRÊA, S.T.; BEZERRA, A.H.F.; GAVA, G.J.C.; DIAS, C.T.S. Tillage effects on soil physical condition and root growth associated with sugarcane water availability. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 187, p. 110-118, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198718308742>. Acesso em: 06 mar. 2022.

SILVA, A.C.; ARMINDO, R.A.; BRITO, A.S.; SCHAAP, M.G. SPLINTEX: A physically-based pedotransfer function for modeling soil hydraulic functions. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 174, p. 261-272, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198717301381>. Acesso em 06 fev. 2022.

SILVA, A.P.; KAY, B.D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society American Journal**, Madinson, v. 58, p. 1775-1781, 1994.

- Disponível em:
<https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2136/sssaj1994.03615995005800060028x>.
Acesso em: 06 mar. 2022.
- SILVA, M.F.; FERNANDES, M.M.H.; SILVA, A.M.R.; FERRAUDO, A.S.; COELHO, A.P. Contribution of tillage systems and crop succession to soil structuring. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 209, p. 104924, 2021. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198720307066>. Acesso em: 19 mar. 2022.
- SOUZA, J.M.; BONOMO, R.; PIRES, F.R.; BONOMO, D.Z. Funções de pedotransferência para retenção de água e condutividade hidráulica em solo submetido a subsolagem. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 9, n. 4, p. 606-613, 2014. Disponível em: http://www.agraria.pro.br/ojs-2.4.6/index.php?journal=agraria&page=article&op=view&path%5B%5D=agraria_v9i4a3732. Acesso em: 08 mar. 2022.
- STRECK, E.V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P.C.; SCHNEIDER, P.; GIASSON, E.; PINTO, L.F.S. **Solos do Rio Grande do Sul**. Emater-RS. 2ª edição. 2008, 222p.
- TUREK, M.E.; JONG VAN LIER, Q.; ARMINDO, R.A. Estimation and mapping of field capacity in Brazilian soils. **Geoderma**, v. 376, p. 114557, 2020. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016706120301300>. Acesso em: 01 fev. 2022.
- VAN GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madinson, v. 44, p. 892-898, 1980. Disponível em:
<https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>. Acesso em: 06 mar. 2022.
- VERECKEN, H., WEYNANTS, M., JAVAUX, M., PACHEPSKY, Y., SCHAAP, M.G., VAN GENUCHTEN, M. Using pedotransfer functions to estimate the van Genuchten–Mualem soil hydraulic properties: a review. **Vadose Zone Journal**, Amsterdam, v. 9, p. 795–820, 2010. Disponível em:
<https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2136/vzj2010.0045>. Acesso em: 06 mar. 2022.
- VIZIOLI, B.; POLIZELI, K.M.V.C.; TORMENA, C.A.; BARTH, G. Effects of long-term tillage systems on soil physical quality and crop yield in a Brazilian Ferralsol. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 209, p. 104935, 2021. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198721000052>. Acesso em: 06 mar. 2022.
- WALIA, M.K.; DICK, W.A. Selected soil physical properties and aggregate-associated carbon and nitrogen as influenced by gypsum, crop residue, and glucose. **Geoderma**, Amsterdam, v. 320, p. 67-73, 2018. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016706117306122>. Acesso em: 06 mar. 2022.
- WANG, L.; HUANG, C.; HUANG, L. Parameter estimation of the soil water retention curve model with Jaya algorithm. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 151, p. 349-353, 2018. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168169917308517>. Acesso em: 05 mar. 2022.