



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO
CAMPUS POSSE

**DETERMINAÇÃO DA CURVA DE RETENÇÃO PARCIAL UTILIZANDO
TENSIOMETRIA**

Marcus Gramacho Pires

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Zolin Lorenzoni

POSSE - GO
2026

Marcus Gramacho Pires

DETERMINAÇÃO DA CURVA DE RETENÇÃO PARCIAL UTILIZANDO TENSIOMETRIA

Projeto de Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Instituto Federal Goiano – Campus
Posse, como requisito parcial para obtenção do
título de Bacharelado em Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Zolin Lorenzoni

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema Integrado de Bibliotecas do IF Goiano - SIBi**

P667d Gramacho Pires, Marcus
DETERMINAÇÃO DA CURVA DE RETENÇÃO
PARCIAL UTILIZANDO TENSIOMETRIA / Marcus
Gramacho Pires. POSSE 2026.

36f. il.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Zolin Lorenzoni.

Tcc (Bacharel) - Instituto Federal Goiano, curso de 0720024
- Bacharelado em Agronomia - Posse (Campus Posse).

1. Água no solo. 2. Disponibilidade de água no solo. 3.
Manejo de irrigação. 4. Tensiometria. I. Título.

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

- ☐ Tese (doutorado)
☐ Dissertação (mestrado)
☐ Monografia (especialização)
☒ TCC (graduação)

- ☐ Artigo científico
☐ Capítulo de livro
☐ Livro
☐ Trabalho apresentado em evento

☐ Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

Marcus Gramacho Pires

Matrícula:

2021107200240181

Título do trabalho:

DETERMINAÇÃO DA CURVA DE RETENÇÃO PARCIAL UTILIZANDO TENSIOMETRIA

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: ☒ Não ☐ Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 14 / 09 / 2026

O documento está sujeito a registro de patente? ☐ Sim ☒ Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? ☐ Sim ☒ Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Documento assinado digitalmente
MARCUS GRAMACHO PIRES
Data: 14/09/2026 13:16:55-0300
Verifique em <https://validar.ifg.gov.br>

Posse - GO
Local

14 / 09 / 2026
Data

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:

Assinatura do(a) orientador(a)

Documento assinado digitalmente
MARCELO ZOLIN LORENZONI
Data: 14/09/2026 13:28:07-0300
Verifique em <https://validar.ifg.gov.br>



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL+
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 13/2026 - CCBAGR-POS/CE-POS/GE-POS/CMPPPOS/IFGOIANO

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CURSO

Aos vinte quatro dias do mês de junho do ano de dois mil e vinte seis, realizou-se a defesa de Trabalho de Curso do acadêmico **MARCUS GRAMACHO PIRES**, do Curso de Bacharel em Agronomia, matrícula 2021107200240181, cuja monografia intitula-se + **DETERMINAÇÃO DA CURVA DE RETENÇÃO PARCIAL UTILIZANDO TENSIOMETRIA**. A defesa iniciou-se às 14 horas e 04 minutos, finalizando-se às 14

horas e 28 minutos. Após apresentação do Trabalho de Curso, a Comissão Examinadora realizou a arguição que foi respondida pelo(a) discente, a média da apresentação oral foi de 9,2 a média do trabalho escrito foi de 9,2 perfazendo média geral de 9,2.

A comissão examinadora considerou o Trabalho de Curso:

- () Reprovado/Ausente
- (X) Aprovado, com recomendações que devem ser incorporadas à versão final.
- () Aprovado, sem recomendações de modificação da versão final.

Após atender às considerações da banca e respeitando o prazo disposto em calendário acadêmico, o discente deverá fazer a submissão da versão corrigida em formato digital (.pdf) no Repositório Institucional do IF Goiano 3 RIIF, acompanhado do Termo Ciência e Autorização Eletrônico (TCAE), devidamente assinado pelo autor e orientador. Os integrantes da banca examinadora assinam a presente.

(Assinado Eletronicamente)

Marcelo Zolin Lorenzoni
Orientador

(Assinado Eletronicamente)

Luciano Nogueira
Membro

(Assinado Eletronicamente)

Elson Barbosa da Silva Júnior
Membro

Documento assinado eletronicamente por:

- **Elson Barbosa da Silva Junior**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO , em 25/06/2026 13:43:31.
- **Luciano Nogueira**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO , em 25/06/2026 14:44:00.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 25/06/2026. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 834866

Código de Autenticação: d34e4c2d8e



INSTITUTO FEDERAL GOIANO

Campus Posse

Rodovia GO - 453 km 2,5, Fazenda Vereda do Canto, SN, Distrito Agroindustrial, POSSE / GO, CEP 73900-000

(62) 9390-5391, (62) 3605-3698

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conceder força, sabedoria e saúde durante toda essa caminhada.

À minha mãe, Maria Anir Gramacho de Carvalho, pelo amor incondicional, exemplo de luta e pelo apoio em todos os momentos da minha vida. Ao meu irmão, Wesley Gramacho de Lima, pelo incentivo constante e por acreditar em mim mesmo à distância.

Ao meu orientador, Professor Dr. Marcelo Zolin Lorenzoni, pela orientação, paciência, incentivo e dedicação durante a construção deste trabalho. Sua confiança e conhecimento foram fundamentais para que eu concluísse mais essa etapa.

Ao Professor Dr. Danilo Gomes de Oliveira, que foi meu orientador nos projetos de extensão e teve papel essencial no meu crescimento acadêmico e profissional. Sou grato pela parceria e pelos ensinamentos compartilhados ao longo dessa jornada.

Ao colega Júlio Cezar Brito Oliveira, por me acompanhar de perto durante essa trajetória. Sua experiência e apoio nos momentos mais difíceis foram fundamentais para que eu seguisse firme na caminhada.

Aos membros da banca avaliadora, por dedicarem seu tempo e contribuírem com suas considerações e sugestões para o aperfeiçoamento deste trabalho. Minha sincera gratidão pela disponibilidade e respeito com que avaliam este esforço.

Aos professores do curso de Agronomia, colegas, amigos e todos que, de alguma forma, contribuíram para a minha formação acadêmica e pessoal, deixo meu muito obrigado.

RESUMO

O manejo da irrigação via solo baseia-se na determinação da umidade por métodos diretos e indiretos. O tensiômetro é um método indireto que requer curvas de retenção de água no solo para relacionar a tensão da água com a umidade. Essas curvas são normalmente obtidas em laboratório por equipamentos como a câmara de Richards, método preciso, porém de maior custo e tempo de execução. Este estudo teve como objetivo elaborar curvas de retenção de água em solos arenoso e argiloso utilizando tensiômetros para obtenção de curvas parciais. O experimento foi conduzido em ambiente protegido na Escola Fazenda do Instituto Federal Goiano – Campus Posse, utilizando oito vasos de 11 dm³, sendo quatro preenchidos com solo arenoso e quatro com solo argiloso. Em cada vaso foi instalado um tensiômetro de cápsula porosa. Após a saturação e drenagem inicial, foram realizadas leituras de tensão com tensiômetro digital e pesagens sucessivas dos vasos para determinação da umidade gravimétrica. Os dados foram ajustados ao modelo de van Genuchten no software SWRC. As curvas apresentaram coeficientes de determinação superiores a 88% e baixos valores de erro quadrático médio, indicando bom ajuste do modelo. No solo arenoso, as tensões variaram de 5 a 12 kPa, enquanto no solo argiloso variaram de 3 a 84 kPa, demonstrando maior amplitude de retenção de água. Conclui-se que o uso de tensiômetros permite elaborar curvas de retenção de forma rápida e eficiente para estimar a umidade próxima à capacidade de campo e auxiliar o manejo da irrigação. Entretanto, para o dimensionamento de sistemas de irrigação, recomenda-se o uso de curvas obtidas em laboratório, que abrangem uma faixa mais ampla de tensões, incluindo o ponto de murcha.

Palavras-chave: água no solo; disponibilidade de água no solo; manejo de irrigação; tensiometria.

ABSTRACT

Abstract:

Irrigation management based on soil relies on determining soil moisture through direct and indirect methods. The tensiometer is an indirect method that requires soil water retention curves to relate soil water tension to moisture content. These curves are commonly obtained in the laboratory using equipment such as the Richards pressure chamber, a precise but time-consuming and costly method. This study aimed to develop soil water retention curves for sandy and clayey soils using tensiometers to obtain partial retention curves. The experiment was conducted in a protected environment at the School Farm of the Federal Institute of Goiás – Posse Campus, using eight 11 dm³ pots, four filled with sandy soil and four with clayey soil. A porous-cup tensiometer was installed in each pot. After soil saturation and initial drainage, soil water tension was measured with a digital tensimeter, while the pots were periodically weighed to determine gravimetric soil moisture. The data were fitted to the van Genuchten model using SWRC software. The resulting curves showed coefficients of determination above 88% and low mean square error values, indicating a good model fit. In the sandy soil, tension ranged from 5 to 12 kPa, whereas in the clayey soil it ranged from 3 to 84 kPa, demonstrating a wider range of water retention. It was concluded that tensiometers provide a rapid and efficient method for developing soil water retention curves to estimate soil moisture near field capacity and support irrigation management. However, for irrigation system design, laboratory-generated retention curves are recommended because they cover a broader range of soil water tensions, including the permanent wilting point.

Keywords: soil water; soil water availability; irrigation management; tensiometry.

SUMÁRIO

RESUMO.....	IV
ABSTRACT.....	V
1 INTRODUÇÃO	7
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	10
2.1 ÁGUA NO SOLO	10
2.2 MANEJO DE IRRIGAÇÃO.....	12
2.3 CURVA DE RETENÇÃO.....	15
2.3.1 DETERMINAÇÃO DA CURVA.....	17
3 MATERIAL E MÉTODOS:	19
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO:.....	24
5 CONCLUSÃO:	30
6 AGRADECIMENTOS.....	31
7 REFERÊNCIAS.....	32

1 INTRODUÇÃO

De acordo com a Associação de Agricultores e Irrigantes da Bahia (AIBA), a área irrigada no oeste da Bahia em 2025 foi de 332,5 mil hectares, esta região é o maior polo de irrigação por pivôs centrais do Brasil. Entre 2002 e 2024, a área irrigada na região cresceu de 232,8 mil hectares para 332,5 mil hectares, evidenciando a necessidade de adoção de tecnologias avançadas e práticas sustentáveis por parte dos agricultores (Aiba, 2025).

Atualmente, o oeste baiano concentra 82% da área irrigada do estado da Bahia, com destaque para os municípios de São Desidério e Barreiras, no qual São Desidério lidera o ranking nacional com 91,6 mil hectares irrigados, enquanto Barreiras ocupa o segundo lugar, com 60,9 mil hectares (Aiba, 2025). Este expressivo crescimento demonstra a importância crescente da irrigação para a segurança alimentar e o desenvolvimento agrícola no Brasil e no mundo, uma prática que remonta às antigas civilizações às margens dos rios Tigre e Eufrates, na qual a aplicação artificial de água ao solo permitiu suprir a demanda hídrica das culturas e garantir a produção em regiões de escassez hídrica (The brain chamber, 2023).

No Brasil, a irrigação tem se expandido e se modernizado continuamente, avançando sobre regiões de sequeiro que antes dependiam exclusivamente de regimes de chuva (Ana, 2021). Essa expansão é impulsionada por avanços tecnológicos significativos, que abrangem desde a evolução dos sistemas de irrigação, como os pivôs centrais predominantes no oeste baiano, até sofisticados sistemas de monitoramento e manejo da água.

O manejo eficiente da irrigação é primordial, pois visa determinar o intervalo correto e a quantidade necessária de água a ser aplicada, otimizando a produção e maximizando a eficiência do uso deste recurso cada vez mais valioso (Bernardo *et al.*, 2019). A tomada de decisão a partir do manejo de irrigação podem ser baseados em condições do solo, clima e planta, sendo que, dentre essas abordagens, o controle baseado nas condições do solo tem ganhado destaque, exigindo um profundo conhecimento da dinâmica da água no solo.

Nesse contexto, o tensiômetro surge como uma ferramenta prática e amplamente utilizada para o monitoramento da umidade do solo. Este dispositivo mede diretamente a tensão com que a água está retida no solo, ou seja, seu potencial matricial (Azevedo; Silva, 1999; Braga; Calgaro, 2010). A leitura do tensiômetro fornece uma indicação em tempo real do estado hídrico do solo, auxiliando o agricultor a decidir o momento ótimo para iniciar a irrigação. Apesar de sua utilidade, o tensiômetro possui limitações, como uma faixa de leitura que geralmente não ultrapassa 75-85 kPa, cobrindo apenas uma parte da água disponível,

especialmente em solos argilosos (Bernardo *et al.*, 2019). Além disso, sua adoção pode ser restringida pela necessidade de conhecimento técnico para instalação e interpretação, dificuldades operacionais e a exigência de manutenção periódica para garantir leituras precisas.

Para uma interpretação correta e quantitativa das leituras do tensiômetro, convertendo os valores de tensão em conteúdo de água no solo (volume ou massa), é indispensável o conhecimento da curva de retenção de água no solo (CRAS), também chamada de curva característica do solo. Esta curva descreve a relação específica entre o conteúdo de água e o potencial matricial para um determinado tipo de solo, sendo fundamentalmente influenciada pela sua textura e estrutura (Frizzone *et al.*, 2018).

Solos arenosos e argilosos, por exemplo, apresentam curvas distintas, refletindo suas diferentes capacidades de armazenar e liberar água. O conhecimento da CRAS permite não apenas calibrar o manejo via tensiometria, mas também definir parâmetros importantes como a capacidade de campo (ou capacidade de vaso, em estudos com recipientes) e o ponto de murcha permanente, delimitando a água disponível para as plantas (Casaroli; Jong van Ier, 2008; Bernardo *et al.*, 2019).

A determinação da CRAS é tradicionalmente realizada em laboratório com equipamentos como a câmara de pressão de Richards, um método preciso, porém muitas vezes oneroso e demorado (Otto; Alcaide, 2001). Pesquisas recentes e práticas de campo têm explorado métodos alternativos, incluindo o uso do próprio tensiômetro para gerar curvas parciais de retenção diretamente no campo ou em vasos. Estudo como o de Almeida, Araújo e Souza (2010) demonstraram a eficiência do tensiômetro na mensuração dos potenciais e validaram o uso da curva obtida por este meio para o manejo eficaz da irrigação.

Trabalho mais recente continuam a explorar e validar essas abordagens, buscando simplificar e tornar mais acessível a obtenção desta informação crucial para o manejo racional da água na agricultura irrigada (Incaper, 2024; SBICAFE, 2024).

Ao realizar o manejo de irrigação via solo, é fundamental conhecer a capacidade de retenção de água do solo (Libardi, 2005; Reichardt; Timm, 2012), especialmente quando se utilizam tensiômetros, que medem a tensão da água no solo para orientar a reposição hídrica (Braga; Calgare, 2010). Contudo, a conversão dessas tensões em umidade só é possível por meio da curva de retenção de água no solo (Frizzone *et al.*, 2018; Libardi, 2018), tornando-a essencial para a tomada de decisão. A construção da curva em vasos permite uma avaliação direta e prática da capacidade de retenção, facilitando estratégias precisas de irrigação para diferentes solos. O método tradicional, baseado na placa de Richards (câmara de pressão),

apresenta limitações como alto custo, poucos laboratórios e demanda de tempo (Klute, 1986; Dane; Hopmans, 2002; Otto; Alcaide, 2001). Nesse cenário, o uso de tensiômetros surge como alternativa acessível, rápida e eficiente, sobretudo em aplicações práticas. Assim, justifica-se o desenvolvimento de métodos alternativos para determinação da curva de retenção, visando aprimorar o manejo da irrigação e promover o uso mais racional da água na agricultura (Libardi, 2018; Reichardt; Timm, 2012)

Este trabalho tem por objetivo construir a curva de retenção parcial de água de um solo argiloso e um arenoso, em vasos, utilizando tensiômetros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 ÁGUA NO SOLO

A água é um elemento essencial para a vida vegetal, atuando como solvente universal, meio de transporte de nutrientes, reagente em processos metabólicos como a fotossíntese, e fundamental na manutenção da turgescência celular e regulação térmica das plantas (Taiz *et al.*, 2017). No contexto agrícola, o solo funciona como o principal reservatório de água para as culturas, e a compreensão da dinâmica da água no sistema solo-planta-atmosfera é crucial para o manejo eficiente dos recursos hídricos e para garantir a produtividade agrícola (Silva *et al.*, 2021).

O solo é um sistema poroso complexo, composto por partículas minerais de diferentes tamanhos (areia, silte e argila), matéria orgânica, ar e água. A forma como a água é armazenada e se movimenta no solo depende intrinsecamente de suas propriedades físico-hídricas, como textura (proporção relativa entre areia, silte e argila), estrutura (arranjo das partículas do solo), densidade e porosidade (volume de espaços vazios) (Libardi, 2005).

A água ocupa os espaços porosos do solo e é retida por forças de adesão (atração entre as moléculas de água e as superfícies sólidas do solo) e coesão (atração entre as próprias moléculas de água). A energia com que a água é retida no solo é quantificada pelo potencial da água no solo (Ψ), que representa a energia potencial da água por unidade de volume, massa ou peso, em relação à água pura e livre a uma mesma elevação e temperatura (Silva *et al.*, 2021).

O potencial total da água no solo (Ψ_t) é a soma de diferentes componentes: potencial matricial (Ψ_m), potencial gravitacional (Ψ_g), potencial de pressão (Ψ_p) e potencial osmótico (Ψ_o) (Hillel, 1998).

O potencial matricial (Ψ_m) resulta das forças de adesão e coesão e é o componente dominante em solos não saturados, sendo sempre negativo. Sua magnitude depende da quantidade de água presente e das características da matriz do solo, como textura e estrutura.

O potencial gravitacional (Ψ_g) refere-se à energia potencial devido à posição da água no campo gravitacional e é relevante principalmente em solos saturados ou durante a infiltração e drenagem.

O potencial de pressão (Ψ_p) é significativo em solos saturados abaixo do lençol freático, onde a pressão é maior que a atmosférica (potencial positivo), ou pode ser negativo devido à tensão superficial em solos não saturados (contribuindo para o Ψ_m).

O potencial osmótico (Ψ_o) está relacionado à presença de solutos dissolvidos na água

do solo e torna-se importante em solos salinos ou quando fertilizantes são aplicados em altas concentrações, afetando a capacidade das plantas de absorver água (Libardi, 2005; Silva *et al.*, 2021).

Para o manejo da irrigação, é fundamental conhecer alguns níveis críticos de umidade do solo. A saturação ocorre quando todos os poros do solo estão preenchidos com água ($\Psi_m \approx 0$). A capacidade de campo (CC) é definida como a quantidade de água retida no solo após a drenagem da água gravitacional cessar significativamente, geralmente correspondendo a potenciais matriciais entre -10 kPa e -33 kPa, dependendo da textura do solo. Representa o limite superior de água facilmente disponível para as plantas (Reichardt; Timm 2012).

O ponto de murcha permanente (PMP) é o teor de umidade no qual as plantas murcham de forma irreversível, pois não conseguem mais extrair água do solo em quantidade suficiente para atender à demanda transpiratória. Convencionalmente, adota-se o potencial matricial de -1500 kPa como referência para o PMP (Silva *et al.*, 2021; Souza *et al.*, 2024). A diferença entre o teor de água na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente define a água disponível (AD) para as plantas (Libardi, 2005).

A textura e a estrutura do solo influenciam diretamente a quantidade de água retida nesses limites. Solos arenosos, com macroporos predominantes, retêm menos água na CC e no PMP, mas a água presente está menos retida (potenciais menos negativos), facilitando a absorção pelas plantas, porém esgotando-se mais rapidamente. Solos argilosos, ricos em microporos, retêm grandes volumes de água na CC e no PMP, apresentando maior capacidade de armazenamento de água disponível, mas a água é retida com maior energia (potenciais mais negativos), especialmente próximo ao PMP (Reichardt; Timm, 2012; Souza *et al.*, 2024). A matéria orgânica também desempenha um papel importante, melhorando a estrutura do solo e aumentando sua capacidade de retenção de água, especialmente em solos arenosos (Brady; Weil, 2013).

Compreender essas relações é essencial para determinar a capacidade de armazenamento de água do solo e definir estratégias adequadas de manejo da irrigação, garantindo que a água esteja disponível para as plantas nos momentos e quantidades necessárias, evitando tanto o déficit quanto o excesso hídrico, que podem comprometer o desenvolvimento e a produtividade das culturas (Lemos filho *et al.*, 2016; Barbieri *et al.*, 2017).

2.2 MANEJO DE IRRIGAÇÃO

O manejo da irrigação consiste na aplicação de água às culturas na quantidade correta e no momento oportuno, visando suprir as necessidades hídricas das plantas, otimizar a produtividade e evitar o desperdício de água e energia (Cruz, 2019; Neves *et al.*, 2024). Um manejo inadequado, seja por déficit ou excesso hídrico, pode causar estresse nas plantas, reduzir a produtividade e a qualidade dos produtos agrícolas, além de favorecer a ocorrência de doenças e a lixiviação de nutrientes (Fernandes; Turco, 2018; Pereira *et al.*, 2019).

A definição de quando e quanto irrigar depende de uma análise integrada do sistema solo-planta-atmosfera. Diversos métodos podem ser empregados para auxiliar nessa decisão, os quais podem ser classificados, de forma geral, em métodos baseados no monitoramento das condições atmosféricas, no monitoramento da umidade do solo ou no monitoramento das condições da planta (Allen *et al.*, 1998; Bernardo; Soares; Mantovani, 2019).

O manejo baseado na atmosfera estima a necessidade de água da cultura com base na demanda evaporativa da atmosfera. O principal parâmetro é a evapotranspiração da cultura (ETc), que representa a perda de água do sistema solo-planta para a atmosfera através dos processos combinados de evaporação da superfície do solo e transpiração das plantas (Allen *et al.*, 1998). A ETc pode ser calculada a partir da evapotranspiração de referência (ETo) e do coeficiente de cultura (Kc). A ETo representa a evapotranspiração de uma cultura hipotética de referência (geralmente grama) sob condições ótimas de crescimento e sem restrição hídrica, e pode ser estimada por métodos como o de Penman-Monteith (considerado padrão pela Fao) utilizando dados climáticos (temperatura, umidade relativa, velocidade do vento e radiação solar) (ALLEN *et al.*, 1998; SOBRAL, 2024).

O coeficiente de cultura (Kc) é um fator adimensional que relaciona a ETc com a ETo ($Kc = ETc / ETo$) e varia ao longo do ciclo da cultura, refletindo as mudanças na área foliar, altura da planta e características fisiológicas (Allen *et al.*, 1998; Sobral, 2024). Valores de Kc são tabelados para diversas culturas (Fao-56), mas idealmente devem ser determinados experimentalmente para condições locais e cultivares específicas, utilizando métodos como lisimetria (Sobral, 2024). O manejo da irrigação consiste em repor a quantidade de água perdida por ETc, descontando a precipitação efetiva e considerando a eficiência do sistema de irrigação. Softwares e planilhas de balanço hídrico são ferramentas úteis para auxiliar nesse manejo (Bernardo; Soares; Mantovani, 2019).

Outro método de manejo se baseia no solo e monitora diretamente o estado da água no solo para determinar o momento da irrigação. O objetivo é manter a umidade do solo dentro da faixa de água disponível (entre a capacidade de campo e um nível crítico antes do ponto de murcha permanente), evitando o estresse hídrico. Diversos equipamentos podem ser utilizados. Tensiômetros medem o potencial matricial (tensão) da água no solo. Consistem em um tubo preenchido com água, com uma cápsula porosa na extremidade inferior (instalada no solo) e um vacuômetro na extremidade superior. À medida que o solo seca, a água sai da cápsula porosa, criando um vácuo que é registrado pelo vacuômetro. A irrigação é recomendada quando a tensão atinge um valor crítico pré-definido para a cultura e o tipo de solo (Braga; Calgaro, 2010; Martins *et al.*, 2024).

A tensiometria, associada ao conhecimento da curva de retenção de água no solo, permite determinar com precisão quando e quanto irrigar. No entanto, sua adoção pode ser limitada por fatores como a necessidade de conhecimento técnico para instalação e interpretação das leituras, dificuldades operacionais (manutenção da coluna de água, sensibilidade a variações bruscas de temperatura) e a necessidade de manutenção frequente dos equipamentos (recarga de água, verificação de bolhas de ar) (Martins *et al.*, 2024).

Também existem sensores de umidade, como blocos de resistência elétrica (gesso), sensores de capacitância (FDR - Frequency Domain Reflectometry) e reflectometria no domínio do tempo (TDR - Time Domain Reflectometry). Estes sensores medem propriedades elétricas do solo que se correlacionam com o teor de umidade volumétrica (Bernardo; Soares; Mantovani, 2019). Sensores como o Irrigas®, desenvolvido pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), também se baseiam na tensão da água no solo e podem ser utilizados para o manejo (Marouelli *et al.*, 2010). O manejo baseado no solo requer a instalação de sensores em profundidades representativas do sistema radicular da cultura e em locais estratégicos da área irrigada. A definição do momento de irrigar baseia-se em leituras de tensão ou umidade que indicam que a água disponível atingiu um nível crítico (fator de disponibilidade ou fração de esgotamento), geralmente entre 30% e 70% da água disponível total, dependendo da cultura e da fase de desenvolvimento (Bernardo; Soares; Mantovani, 2019).

Outro método de manejo se baseia no solo e monitora diretamente o estado da água no solo para determinar o momento da irrigação. A escolha do método de manejo da irrigação deve considerar as características da cultura, o tipo de solo, as condições climáticas, o sistema de irrigação, a disponibilidade de recursos (financeiros e mão de obra) e o nível técnico do irrigante. Frequentemente, a combinação de métodos (por exemplo, balanço hídrico ajustado

por monitoramento do solo) oferece maior segurança e eficiência no manejo (Agrosmart, 2018; Valeriano *et al.*, 2018 - citados em Neves *et al.*, 2024).

2.3 CURVA DE RETENÇÃO

A curva de retenção de água no solo (CRA), também conhecida como curva característica de umidade do solo, descreve a relação entre o teor de água no solo (geralmente expresso em base volumétrica, θ , ou gravimétrica, μ) e o potencial matricial (Ψ_m) com que essa água é retida pela matriz do solo (Libardi, 2005; Reichardt; Timm, 2012). Esta curva é uma propriedade físico-hídrica fundamental, pois governa o armazenamento e a disponibilidade de água para as plantas, bem como o movimento da água e de solutos no solo (Hillel, 1998).

A forma da CRA é característica para cada tipo de solo, sendo fortemente influenciada pela textura, estrutura, densidade e teor de matéria orgânica (Silva *et al.*, 2019). A curva geralmente apresenta um formato sigmoidal quando o potencial matricial é plotado em escala logarítmica. Em potenciais próximos a zero (solo saturado ou quase saturado), pequenas reduções no potencial matricial resultam em grandes liberações de água, principalmente dos macroporos. À medida que o solo seca e o potencial matricial se torna mais negativo, a água é progressivamente removida dos poros menores (meso e microporos), e a inclinação da curva diminui, indicando que maiores variações de potencial são necessárias para remover a mesma quantidade de água (Reichardt; Timm, 2012).

Solos de textura arenosa, com predominância de macroporos, apresentam uma curva de retenção com uma queda abrupta de umidade em potenciais matriciais relativamente baixos (menos negativos). Eles retêm menos água na capacidade de campo (CC) e no ponto de murcha permanente (PMP), resultando em menor capacidade de água disponível (AD). Por outro lado, solos argilosos, ricos em microporos e com maior área superficial específica, retêm mais água em toda a faixa de potencial, desde a saturação até o PMP. A liberação de água ocorre de forma mais gradual à medida que o potencial diminui, resultando em maior AD, embora a água esteja mais fortemente retida em potenciais mais negativos (Libardi, 2005; Souza *et al.*, 2024).

A estrutura do solo, especialmente a formação de agregados, também afeta a CRA, principalmente na faixa de potenciais menos negativos, influenciando a distribuição de poros maiores. A compactação do solo, por exemplo, reduz a macroporosidade e aumenta a microporosidade, alterando a forma da curva e diminuindo a aeração e a infiltração de água, embora possa aumentar a retenção de água em potenciais mais negativos (Brady; Weil, 2013; Silva *et al.*, 2019).

A CRA é essencial para o manejo da irrigação, pois permite converter as leituras de potencial matricial (obtidas por tensiômetros) em teor de umidade do solo, e vice-versa. Isso possibilita calcular a quantidade de água a ser aplicada para elevar a umidade do solo de um nível atual até a capacidade de campo (Martins *et al.*, 2024). Além disso, a inclinação da CRA em um determinado ponto (capacidade específica de água, $C(\theta) = d\theta/d\Psi_m$) é um parâmetro importante para modelar o fluxo de água em solos não saturados, conforme descrito pela equação de Richards (Hillel, 1998).

O fenômeno da histerese também é uma característica importante da CRA. Isso significa que a relação entre θ e Ψ_m não é única, dependendo se o solo está passando por um processo de umedecimento (absorção) ou secagem (dessorção). Geralmente, para um mesmo potencial matricial, o teor de água é maior durante a secagem do que durante o umedecimento. Isso ocorre devido a fatores como o efeito "garrafa de tinta" (poros maiores acessíveis apenas por gargalos menores), o ângulo de contato variável entre a água e as partículas do solo, e o ar aprisionado durante o umedecimento (Libardi, 2005; Reichardt; Timm, 2012). Embora a histerese possa complicar a interpretação exata da umidade a partir do potencial, para fins práticos de manejo da irrigação, geralmente se utiliza a curva de dessorção (secagem), pois o interesse principal está no esgotamento da água do solo pelas plantas.

Em resumo, a curva de retenção de água é uma ferramenta indispensável para caracterizar o comportamento hídrico do solo, fornecendo informações cruciais sobre a capacidade de armazenamento de água, a disponibilidade hídrica para as plantas e o movimento da água no perfil do solo, sendo fundamental para o planejamento e a execução de um manejo de irrigação eficiente e sustentável (Silva *et al.*, 2019; Neves *et al.*, 2024).

2.3.1 DETERMINAÇÃO DA CURVA

A determinação precisa da curva de retenção de água no solo (CRA) é fundamental para a aplicação prática dos conceitos de física do solo no manejo da irrigação e em estudos hidrológicos. A CRA pode ser determinada experimentalmente em laboratório ou no campo, ou ainda estimada por meio de modelos matemáticos e funções de pedotransferência (Silva *et al.*, 2019; Souza *et al.*, 2024).

Os métodos de laboratório são os mais comuns e geralmente considerados mais precisos para determinar a CRA em uma ampla faixa de potenciais matriciais. Eles envolvem a coleta de amostras de solo indeformadas, para preservar a estrutura original, ou deformadas, que são submetidas a diferentes potenciais matriciais controlados, medindo-se o teor de água correspondente em cada ponto de equilíbrio. Um dos métodos mais utilizados é a Câmara de Pressão de Richards (Placa ou Membrana de Pressão), que permite determinar a CRA na faixa de potenciais mais relevantes para a disponibilidade de água às plantas, geralmente de -10 kPa a -1500 kPa. Nesse processo, amostras de solo saturadas são colocadas sobre uma placa porosa ou membrana de celulose dentro de uma câmara vedada, onde pressões de ar positivas são aplicadas, forçando a água a sair das amostras até que o equilíbrio seja atingido. O teor de água da amostra é então determinado gravimetricamente em cada nível de pressão (Klute, 1986; Dane; Hopmans, 2002).

Outro método laboratorial é o Funil de Placa Porosa (ou Mesa de Tensão), utilizado na faixa de potenciais próximos à saturação, entre 0 e -10 kPa, em que uma sucção controlada é aplicada para medir a quantidade de água drenada até o equilíbrio (Libardi, 2005). Para potenciais mais negativos, especialmente na faixa mais seca da CRA, o psicrômetro é utilizado para medir o potencial hídrico total, incluindo o osmótico, por meio da umidade relativa do ar em equilíbrio com a amostra de solo em um espaço confinado (Klute, 1986).

Já os métodos de campo determinam a CRA *in situ*, refletindo as condições reais do solo, embora sejam geralmente mais trabalhosos e possam apresentar menor precisão ou cobrir uma faixa mais limitada de potenciais. Um exemplo é o Método do Perfil Instantâneo, que envolve a saturação de uma parcela de solo e o monitoramento simultâneo do teor de água (com uso de TDR, FDR ou sondas de nêutrons) e do potencial matricial (com tensiômetros) em várias profundidades durante o processo de drenagem. Esse método permite obter pontos da CRA na curva de dessorção sob condições naturais (Hillel *et al.*, 1972; Libardi, 2005). Outra abordagem é o uso combinado de sensores de umidade e de potencial matricial instalados no mesmo local e profundidade. Esses sensores permitem obter pares de dados (θ ,

Ψ_m) ao longo do tempo, à medida que o solo umedece e seca naturalmente ou devido à irrigação e evapotranspiração, possibilitando a construção da CRA em campo (Dane; Hopmans, 2002).

Quando a determinação experimental da CRA é inviável por limitações de custo, tempo ou disponibilidade de equipamentos, pode-se recorrer a métodos indiretos. As Funções de Pedotransferência (FPTs) são modelos matemáticos como regressões múltiplas ou redes neurais que estimam propriedades hidráulicas do solo, incluindo os parâmetros da CRA ou pontos específicos como a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP), a partir de propriedades mais fáceis de medir, como textura (percentagens de areia, silte e argila), densidade do solo, teor de matéria orgânica e, eventualmente, pH ou capacidade de troca catiônica (Wösten *et al.*, 2001; Silva *et al.*, 2019; Souza *et al.*, 2024).

Diversos modelos matemáticos são utilizados para descrever a forma da CRA, como os de Brooks e Corey (1964), van Genuchten (1980) e Durner (1994). As Funções de Pedotransferência FPTs podem estimar diretamente os parâmetros desses modelos. A precisão dessas funções depende do modelo adotado, das variáveis de entrada utilizadas e da semelhança entre o solo em análise e os solos empregados na construção da função. Embora menos precisas do que medições diretas, as FPTs são valiosas para estimativas em larga escala ou quando não há dados experimentais disponíveis (Silva *et al.*, 2019; Souza *et al.*, 2024).

A escolha do método mais adequado para a determinação da CRA deve levar em conta os objetivos do estudo, a faixa de potencial de interesse, o nível de precisão requerido, os recursos disponíveis e a escala de aplicação, seja em laboratório ou campo, em um ponto específico ou em área ampla (Dane; Hopmans, 2002).

3 MATERIAL E MÉTODOS:

O experimento foi conduzido em ambiente protegido na área da Escola Fazenda do Instituto Federal Goiano - Campus Posse, localizado no município de Posse, estado de Goiás (Latitude 14°06'30" S; Longitude 46°19'38" W e altitude de 811 m).

Foram utilizados dois solos com texturas distintas (arenoso e argiloso), coletados na camada superficial (0–0,20 m) em duas localidades. O solo argiloso foi coletado na Fazenda Garrotoinho e o solo arenoso foi coletado na Escola Fazenda do Instituto Federal Goiano – Campus Posse, ambas localizadas no município de Posse, Goiás (Tabela 1). Após a coleta, os solos foram destorroados e espalhados sobre lona plástica, separadamente, permanecendo em ambiente protegido até a obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA). Posteriormente, os solos foram peneirados para homogeneização e remoção de pedras e resíduos orgânicos. Os teores de areia, silte e argila de cada solo e sua respectiva classificação textural de acordo com o triângulo textural são apresentados na tabela 1.

Tabela 1. Localidades, frações granulométricas e texturas dos solos utilizados no experimento.

Local de coleta	Coordenadas		Frações granulométricas (%)			
	Latitude	Longitude	Areia	Silte	Argila	Textura
Escola Fazenda IF Goiano	14°06'34,3"S	46°19'35,63"W	96,2	0,8	3,0	Areia
Fazenda Garrotoinho	14°04'06,95"S	46°21'53,18"W	27,7	27,3	45,0	Argila

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

Foram usados 8 vasos plásticos com capacidade para 1 l litros cada, sendo quatro vasos preenchidos com o solo de textura arenosa e quatro com o solo de textura argilosa. Para o preenchimento dos vasos, foi montado um sistema de drenagem com uma camada de brita nº 1 no fundo, em quantidade suficiente para preencher o fundo do vaso, coberta por um disco de tecido não tecido (TNT) para evitar a perda da fração mais fina do solo.

O sistema vaso mais sistema de drenagem foi pesado para obter o peso da tara (M3). Em seguida, quatro vasos foram preenchidos com solo seco (TFSA) arenoso e quatro com solo seco argiloso, e pesados novamente, individualmente, para obter o peso seco total ($M2 = M3 + \text{peso do solo seco}$).

Após o preenchimento com o solo, foi instalado um tensiômetro de cápsula porosa (Marca: Hidrosense, Modelo: HID32, Comprimento: 40 cm) na profundidade de 15 cm em cada vaso. Para a instalação, foi necessário realizar previamente a preparação adequada do tensiômetro, garantindo a precisão das leituras.

A preparação consistiu na saturação da cápsula porosa, que foi imersa em água destilada por 24 horas, a fim de eliminar o ar presente em seus poros. Após a saturação, o corpo do tensiômetro foi preenchido com água destilada, evitando a introdução de bolhas de ar, que podem comprometer a leitura da tensão matricial. No momento da instalação no solo, abriu-se um furo vertical com o auxílio de uma haste com diâmetro similar ao do tensiômetro, para permitir sua inserção sem danificar a cápsula. O furo foi feito cuidadosamente até a profundidade desejada (15 cm), garantindo o contato firme da cápsula porosa com o solo, o que é essencial para a obtenção de leituras confiáveis (Teixeira *et al.*, 2016).

Em seguida, os vasos foram irrigados até constatar o início de drenagem do excesso de água, caracterizando a saturação do solo. Para evitar a saída de água por evaporação, os vasos foram cobertos com filme plástico e deixados para drenar livremente por 24 horas, de forma que ocorresse a saída de água do sistema solo/vaso apenas pela ação da gravidade (Figura 1).

Figura 1. Preparação dos vasos em laboratório para atingir a capacidade vaso.



Fonte: Arquivo pessoal (2026).

Após essa preparação, os vasos foram levados ao ambiente protegido e permaneceram vedados por 24 horas. Posterior a este período, os vasos foram descobertos e pesados (Figura 2A). As leituras dos tensiômetros foram realizadas diariamente, nos horários de 7h, 9h, 11h, 13h, 15h e 17h, visando padronizar as medições e acompanhar a variação do potencial matricial da água no solo ao longo do dia. Os valores registrados foram utilizados para a construção das curvas parciais de retenção de água no solo. Inicialmente, determinou-se o peso úmido (M1) dos vasos após o período de drenagem, correspondente à capacidade do vaso, definida por Casaroli e Jong van Lier (2008) como a umidade referente à máxima capacidade de retenção de água do solo para aquele recipiente.

Figura 2. Experimento instalado em ambiente protegido. A) Disposição dos vasos; e, B) Realização de leitura no tensiômetro.



Fonte: Arquivo pessoal (2026).

A partir deste ponto, as leituras de tensão (potencial matricial) foram iniciadas nos tensiômetros, com o uso de um tensímetro digital de agulha (Marca: Blumat, Modelo: HID07), com faixa de medição de 0 a 750 mbar e resolução de 1 mbar (Figura 2B) e a pesagem dos vasos. Com secagem natural do solo, cada leitura de tensão correspondeu a uma umidade no solo, sendo que para cada medida realizada com o tensímetro, o vaso foi pesado em balança digital com precisão de 0,001 g (três casas decimais) para obter o peso úmido (M1) correspondente aquela tensão.

O teor de água no solo ou umidade (g g^{-1}) em cada ponto de leitura foi calculado pela diferença de peso, utilizando a equação 1 (Mantovani; Bernardo; Palaretti, 2009):

$$\mu = \frac{(M1-M2)}{(M2-M3)} \quad (1)$$

Em que:

μ : Umidade em base seca (%);

M1: Massa de solo úmido (g);

M2: Massa de solo seco (g);

M3: Massa do recipiente ou tara (g).

Para este estudo M1 corresponde ao peso do vaso com solo úmido no momento da leitura (g); M2 o peso do vaso com solo seco (peso da tara + peso do solo seco) (g); e M3 consiste no peso da tara (vaso vazio + brita + TNT) (g).

Os dados foram registrados considerando a tensão (kPa) e umidade gravimétrica (g g⁻¹) correspondentes a diferentes condições de umidade do solo durante o ciclo de secagem para cada repetição e tipo de solo.

Com os pares de dados de tensão e umidade gravimétrica obtidos, foram construídas as curvas de retenção de água no solo (CRA) para cada tipo de solo e repetição. O ajuste dos dados aos modelos matemáticos de retenção de água foi realizado no software SWRC (Soil Water Retention Curve, versão 2.00, seguindo Dourado neto *et al.* (2000), utilizando o modelo de van Genuchten (1980) (equação 2), amplamente empregado por sua capacidade de representar com precisão o comportamento da retenção hídrica no solo.

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha \cdot \Psi_m)^n]^m} \quad (2)$$

Em que:

θ : umidade do solo (g/g);

θ_r : umidade residual (g/g);

θ_s : umidade de saturação (g/g);

Ψ_m : potencial matricial (kPa);

α , n e m : constantes de ajuste.

Na avaliação da qualidade do ajuste dos dados experimentais ao modelo de van Genuchten, foi utilizado o erro do quadrado médio (EQM) (equação 3), uma métrica amplamente empregada na análise de desempenho de modelos em estudos de física do solo e hidrologia (Legates; McCabe jr., 1999; Moriasi *et al.*, 2015). O EQM quantifica a magnitude média dos erros ao elevar ao quadrado as diferenças entre os valores observados e estimados, reduzindo o efeito de cancelamento entre erros positivos e negativos e atribuindo maior peso a desvios de maior magnitude.

$$EQM = \frac{\sum(\theta_{obs} - \theta_{est})^2}{n} \quad (3)$$

em que:

EQM: erro do quadrado médio;

θ_{obs} : valor observado;

θ_{est} : valor estimado;

n : número de observações.

O EQM foi calculado com base nos valores de umidade observados experimentalmente e nos valores estimados pelo modelo de van Genuchten ajustado no software SWRC. Essa métrica permite avaliar a precisão do ajuste nas mesmas unidades da variável analisada, sendo amplamente recomendada para complementar o coeficiente de determinação (R^2), uma vez que fornece uma medida direta do erro associado ao modelo (Willmott, 1982; Moriasi *et al.*, 2015).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Os valores de tensão de água no solo coletados durante a condução do experimento demonstram que pequenas tensões estão associadas a elevados valores de umidade enquanto valores maiores de tensão ocorreram quando o solo possuía menor teor de água. Esse comportamento é esperado, pois o potencial matricial só ocorre em condição de solo seco, apresentando valores negativo, indicando que valores mais próximos de zero corresponde a solo úmido. Comportamento semelhante também foi observado por Almeida; Araújo; Souza (2010) e Andrade; Stone (2009) ao determinar curvas parciais de retenção de água em solos do cerrado brasileiro.

A partir dos dados coletados, os coeficientes da equação de van Genuchten foram ajustados (Tabela 2) utilizando o software SWRC.

Tabela 2. Parâmetros da equação de van Genuchten, coeficiente de determinação (R^2) e Erro do Quadrado Médio (EQM).

Solo	Repetição	θ_r	θ_s	α	n	m	R^2	EQM
Areia	1	0,0000	0,3460	0,1324	2,7960	1,1612	0,9790	0,000037
	2	0,0000	0,2880	0,1086	3,0628	1,3931	0,9830	0,000029
	3	0,0000	0,2740	0,1065	2,9434	1,2747	0,9610	0,000059
	4	0,0000	0,2460	0,0944	3,1945	1,4630	0,9610	0,000055
Argila	1	0,0460	0,5850	1,4121	3,0090	0,1795	0,8970	0,000123
	2	0,0000	0,2540	0,2266	2,5335	0,0899	0,9740	0,000228
	3	0,1100	0,7560	1,5790	3,1590	0,2069	0,9460	0,000076
	4	0,0730	1,1950	0,7077	4,5070	0,2715	0,8850	0,000564

Fonte: Elaborado pelo autor (2026)

O ajuste dos parâmetros de van Genuchten para a curva de retenção apresentou umidade residual igual a zero para todas as repetições no solo de textura arenosa e valor médio de 0,2885 g g⁻¹ para a umidade de saturação. Os coeficientes de determinação (R^2) foram superiores a 0,96, indicando forte correlação entre os valores de umidade observados e os valores de tensão medidos. Para o solo de textura argilosa, apesar de alguns coeficientes de ajuste serem inferiores aos do solo arenoso, os valores ainda foram considerados satisfatórios, com R^2 superiores a 0,88. Os valores médios de umidade de saturação e residual foram de 0,6975 g g⁻¹ e 0,0570 g g⁻¹, respectivamente.

Além do coeficiente de determinação (R^2), o erro do quadrado médio (EQM) foi utilizado para avaliar a precisão do ajuste do modelo de van Genuchten aos dados experimentais. Enquanto o R^2 expressa o grau de correlação entre os valores observados e

estimados, o EQM quantifica diretamente a magnitude dos erros, sendo considerado um dos principais indicadores de desempenho em modelos hidrológicos e de retenção de água no solo (Moriasi *et al.*, 2015).

Os valores de EQM obtidos neste estudo foram baixos para ambos os solos, variando de 0,000029 a 0,000059 no solo arenoso e de 0,000076 a 0,000564 no solo argiloso (Tabela 2). Esses resultados indicam elevada precisão do modelo na estimativa da umidade do solo, uma vez que valores próximos de zero representam menor discrepância entre os dados observados e estimados.

Observa-se que o solo arenoso apresentou, de modo geral, menores valores de EQM quando comparado ao solo argiloso, indicando melhor ajuste do modelo nesse tipo de solo. Esse comportamento pode estar relacionado à menor variabilidade dos dados no solo arenoso, associada à sua menor capacidade de retenção de água e menor amplitude de tensões observadas ao longo do experimento.

De acordo com Moriasi *et al.* (2015), modelos podem ser considerados satisfatórios quando apresentam baixos valores de métricas de erro, como o EQM. Em estudos envolvendo a modelagem da curva de retenção de água no solo, valores reduzidos de erro são frequentemente associados a ajustes adequados dos modelos matemáticos (Fashi *et al.*, 2016; Seo *et al.*, 2017).

Comparando com esses trabalhos, os valores de EQM obtidos neste estudo são considerados baixos, indicando que o modelo de van Genuchten apresentou desempenho adequado na representação da relação entre tensão e umidade do solo. Dessa forma, os resultados obtidos demonstram que o ajuste realizado foi eficiente, apresentando boa precisão e confiabilidade tanto para o solo arenoso quanto para o solo argiloso.

Além disso, a associação entre altos valores de R^2 e baixos valores de EQM reforça a qualidade do ajuste obtido, indicando que o modelo foi capaz de representar de forma consistente o comportamento da retenção de água nos solos estudados.

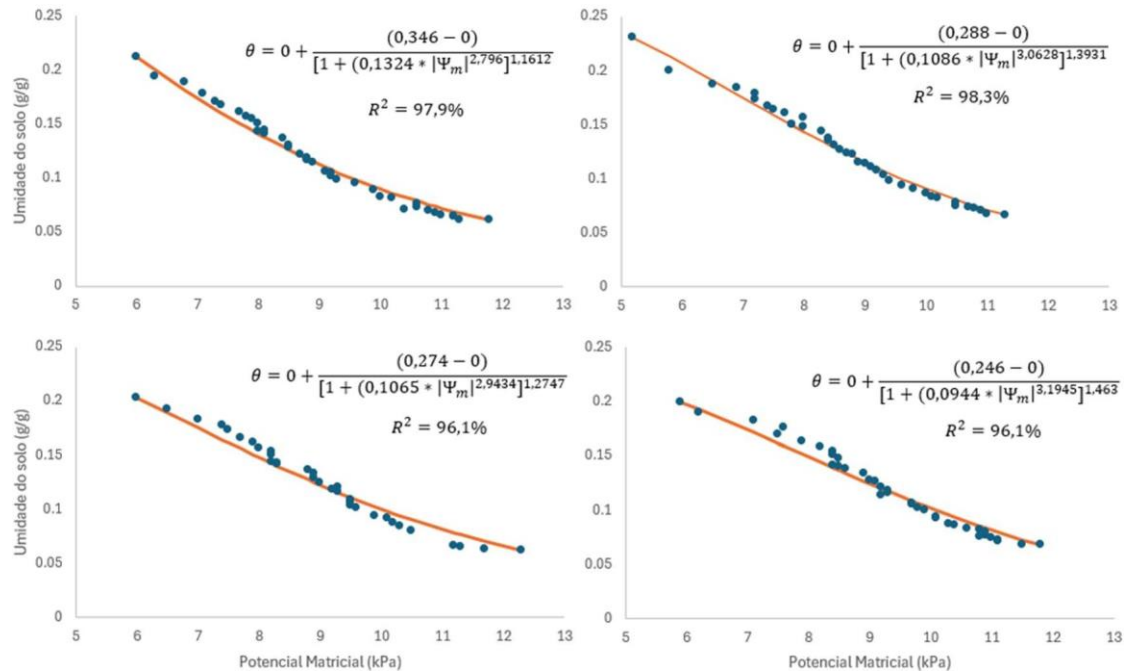
Os valores de R^2 obtidos no presente estudo são comparáveis ou superiores aos encontrados em outros trabalhos que modelaram a curva de retenção de água no solo para diferentes condições (Fashi *et al.*, 2016; Seo *et al.*, 2017).

Os resultados obtidos confirmam a eficiência do uso do tensiômetro na obtenção de curvas parciais de retenção de água no solo, corroborando Brito *et al.* (2009), que destacam o tensiômetro como uma ferramenta eficiente para o monitoramento da água no solo em condições de campo, auxiliando no manejo da irrigação e no balanço hídrico.

As curvas de retenção de água no solo para cada repetição e textura foram geradas a

partir dos dados obtidos no software SWRC e são apresentadas a seguir (Figura 3).

Figura 3. Curvas de retenção de água para o solo arenoso e equações de ajuste.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Ainda na Figura 3 é possível observar que, com o uso dos tensiômetros, os intervalos entre as tensões de água no solo foram menores quando comparados aos intervalos de tensão para o solo argiloso. Isso ocorre porque o solo arenoso possui menor capacidade de retenção de água do que o argiloso devido à predominância de macroporos. A água nesses poros maiores é menos fortemente retida e drena mais rapidamente sob a ação da gravidade e pequenas tensões matriciais (Pessoa *et al.*, 2024). Consequentemente, o tensiômetro perde sua conexão hidráulica com o solo (cavitando) a tensões relativamente baixas (Muñoz-carpene, 2004; Roux; Jacobsz, 2021).

Os intervalos para o solo arenoso variaram de 5 a 12 kPa, sendo consideradas curvas parciais de retenção de água até esses limites. Diferente do que ocorre em laboratório, utilizando as Câmaras de Richards, o tensiômetro não consegue atingir tensões tão baixas (mais negativas), perdendo a escorva nas tensões a partir de 12 kPa.

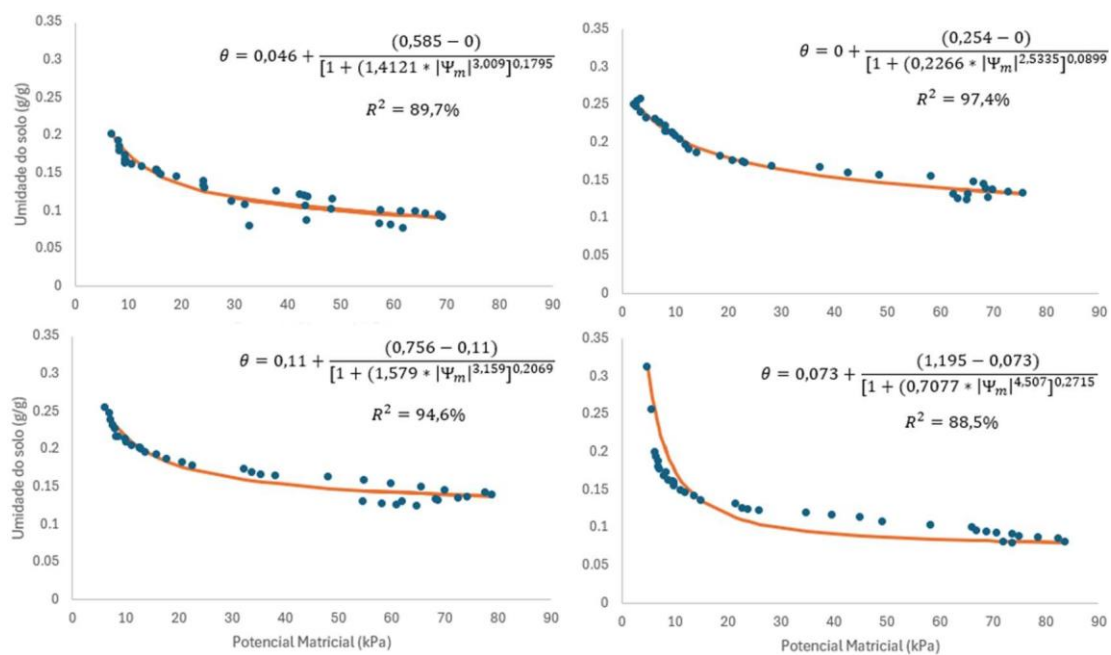
Lorenzoni (2016), utilizando a mesma metodologia empregada neste trabalho, obteve a curva parcial de retenção de água no solo para a caracterização hídrica do solo e encontraram, para um solo textura arenosa, intervalos variando de 8 a 50 kPa com R^2 de 95,6%. A diferença no limite superior da tensão para o solo arenoso em seu estudo e no presente trabalho pode ser atribuída a variações na estrutura do solo, na distribuição de macroporos ou nas condições

experimentais.

Adicionalmente, os parâmetros da equação de van Genuchten para solos arenosos, como os obtidos neste estudo, geralmente refletem uma menor capacidade de retenção de água e uma liberação mais rápida em baixas tensões. Por exemplo, estudos indicam que solos arenosos tendem a apresentar os maiores valores de α (alfa) e os maiores valores de n , resultando em curvas mais íngremes e uma liberação mais abrupta de água (Martin, 2019; YE *et al.*, 2021; Fang *et al.*, 2023). Essa característica torna os tensiômetros mais susceptíveis à cavitação em solos arenosos, especialmente em condições de secagem, o que pode levar a leituras de potencial matricial que não correspondem à umidade real do solo, podendo indicar um potencial estável entre -60 e -90 kPa, mesmo quando o solo está muito mais seco (Whalley *et al.*, 2009). Tais limitações destacam a importância de se considerar a faixa de operação ideal dos tensiômetros, que geralmente não ultrapassa os 80 kPa, para um monitoramento preciso em solos de textura grosseira (Roux; Jacobsz, 2021).

Para o solo argiloso, esse intervalo foi muito maior, variando de 3 a 84 kPa (Figura 4). Isso se deve ao fato de o solo argiloso reter mais água, principalmente em seus microporos, que são abundantes e retêm a água com maior energia (Pessoa *et al.*, 2024). A presença de microporos permite que o tensiômetro mantenha a conexão hidráulica com o solo por um período mais longo e em uma faixa mais ampla de tensões, atrasando a cavitação (Roux & Jacobsz, 2021).

Figura 4. Curvas de retenção de água para o solo argiloso e equações de ajuste.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Em solos argilosos, a complexidade da rede de poros, incluindo efeitos de porosidade dupla (macroporos de drenagem rápida e microporos de drenagem lenta dentro dos agregados), pode levar a um comportamento mais não linear da CRAS e a uma maior variação de tensões (Salami & Jaafri, 2025). O gradiente de secagem do solo é menor e, consequentemente, a perda de água interna do tensiômetro para o solo ocorra mais lentamente, aumentando os limites de tensão e umidade para essa textura de solo.

Coutinho *et al.*, (2025), obteve intervalos variando de 1 a 70 kPa em uma curva de retenção parcial de água no solo para um solo de textura argilosa coletado em Cristalina/GO. Segundo os mesmos autores, a curva foi obtida com tensiômetros, como realizado neste estudo, com coeficiente de determinação de 86,3%. Os valores obtidos no presente estudo para o solo argiloso (3 a 84 kPa, com R^2 até 0,9740) estão em boa concordância com a literatura, demonstrando a robustez da metodologia empregada para esse tipo de solo na faixa de tensões mensuráveis pelo tensiômetro.

No caso dos solos argilosos, os parâmetros de van Genuchten geralmente indicam uma maior capacidade de retenção de água e uma liberação mais gradual de água ao longo de uma faixa mais ampla de potenciais matriciais (Grigolon et al., 2020; Gupta *et al.*, 2022). Os solos argilosos tendem a apresentar valores de α (alfa) menores e valores de n também menores em comparação com solos arenosos, refletindo uma maior pressão de entrada de ar e uma curva de retenção menos íngreme (Martin, 2019; YE *et al.*, 2021; Fang *et al.*, 2023).

A capacidade dos solos argilosos de manter a conectividade hidráulica com o tensiômetro por um período mais longo e em tensões mais elevadas é uma vantagem, conforme observado por Roux e Jacobsz (2021), que relataram que a textura mais fina do solo permite que a cerâmica do tensiômetro permaneça hidraulicamente conectada à água dos poros por mais tempo, resultando em medições de sucção mais elevadas antes da cavitação. Além da textura, a estrutura do solo, o teor de matéria orgânica e a densidade aparente também desempenham um papel crucial na forma da CRAS e nos valores dos parâmetros de van Genuchten (Fashi *et al.*, 2016; Montzka *et al.*, 2017; Gupta *et al.*, 2022). Por exemplo, um teor mais elevado de matéria orgânica pode aumentar a umidade retida para uma dada sucção e reduzir a sucção de entrada de ar (Reina-leal *et al.*, 2019).

Apesar dos limites impostos pelo uso do tensiômetro, como sua faixa de medição restrita (geralmente abaixo de 75-85 kPa ou 1 bar) (Muñoz-carpena, 2004; KumaR, 2012), a obtenção de curvas parciais utilizando este equipamento se mostrou eficiente, com altos coeficientes de

determinação. O tensiômetro é um método direto, relativamente barato e permite leituras contínuas, sendo bem adequado para o monitoramento e o manejo da irrigação no campo (Kumar, 2012). Segundo Almeida *et al.* (2010), o tensiômetro se mostra eficiente na mensuração dos potenciais de retenção de água no solo, podendo ser usado para obter a curva de retenção de água no solo para fins de manejo de irrigação. No entanto, sua limitação em medir suções mais altas, principalmente em solos argilosos, impede a determinação precisa do ponto de murcha permanente (Guillaume *et al.*, 2023).

É fundamental ressaltar que, enquanto os tensiômetros oferecem uma abordagem prática para a determinação de curvas parciais de retenção em campo, refletindo as condições reais do solo de forma mais representativa (Scherger *et al.*, 2020), métodos laboratoriais como a câmara de Richards são indispensáveis para abranger toda a faixa de potencial matricial, incluindo o ponto de murcha permanente (Grigolon *et al.*, 2020; Guillaume *et al.*, 2023). A combinação de diferentes métodos, cada um com sua precisão e faixa de medição é frequentemente necessária para caracterizar completamente a CRAS em toda a sua amplitude (Guillaume *et al.*, 2023). Estudos comparativos entre métodos de laboratório e de campo, ou mesmo entre diferentes métodos laboratoriais, demonstram que podem ocorrer diferenças sistemáticas nas curvas de retenção obtidas para a mesma amostra de solo, devido a fatores processuais e à representatividade da amostra (Guillaume *et al.*, 2023; Mosquera *et al.*, 2020). Assim, a escolha do método deve alinhar-se aos objetivos específicos do estudo, reconhecendo que a calibração e a manutenção adequadas são essenciais para garantir a confiabilidade dos dados em qualquer abordagem (Muñoz-carpena, 2004).

Portanto, vale destacar que, quando se busca o dimensionamento de sistemas de irrigação e a determinação de toda a faixa de água disponível, incluindo o ponto de murcha, deve-se utilizar curvas elaboradas em laboratório, com equipamentos como a câmara de pressão de Richards, pois elas apresentam intervalos maiores de tensão, estabelecendo os limites entre capacidade de campo e ponto de murcha. A combinação de diferentes métodos é frequentemente necessária para caracterizar completamente a CRAS em toda a sua amplitude (Guillaume *et al.*, 2023).

5 CONCLUSÃO

As curvas parciais do solo arenoso apresentaram intervalos limitados de tensão (5 a 12 kPa), indicando baixa retenção de água, enquanto as curvas parciais do solo argiloso apresentaram maior retenção de água, com intervalos de tensão variando entre 3 e 84 kPa. Em síntese, o tensiômetro mostrou-se eficiente e é recomendado para a elaboração rápida de curvas de retenção parciais quando o objetivo for determinar a umidade próxima à capacidade de campo (ou de vaso) para a reposição de água no manejo da irrigação. Não se recomenda, porém, seu uso isolado para o dimensionamento de sistemas de irrigação, que exige a curva completa de retenção, abrangendo toda a faixa de tensões até o ponto de murcha permanente.

No entanto esse método de obtenção demonstrou limitação da curva de retenção na faixa restrita de tensões que o tensiômetro consegue mensurar, que geralmente não ultrapassa 75 a 85 kPa. Dessa forma, o método não abrange toda a faixa de retenção de água do solo, uma vez que não atinge tensões próximas ao ponto de murcha permanente (-1.500 kPa), resultando apenas em curvas parciais, concentradas na região de maior disponibilidade de água para as plantas.

6 AGRADECIMENTOS

Ao Insituto Federal Goiano – Campus Posse pela infraestrutura e concessão da bolsa de Iniciação Científica e ao Grupo de Estudos em Otimização e Tecnologia no Uso da Água (GOTA).

7 REFERÊNCIAS

AIBA - ASSOCIAÇÃO DE AGRICULTORES E IRRIGANTES DA BAHIA. Bahia assume liderança nacional em irrigação sustentável com destaque para gestão hídrica responsável. AIBA Notícias, 2025. Disponível em: <<https://aiba.org.br/bahia-assume-liderancanacional-em-irrigacao-sustentavel-com-destaque-para-gestao-hidrica-responsavel/>>. Acesso em: 18 abr. 2025.

AGROSMART. Manejo inteligente da irrigação e uso de tecnologia no campo. São Paulo: AgroSmart, 2018. Disponível em: <https://agrosmart.com.br>. Acesso em: 18 abr. 2025

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements, **Irrigation and Drainage Paper, 56**. Rome: FAO, 1998. 300 p.

ALMEIDA, A. P. S.; ARAÚJO, F. S.; SOUZA, G. S. de. Determinação da curva parcial de retenção de água de um latossolo vermelho por tensiometria. **Scientia Plena**, v. 6, p. 094201, 2010.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Atlas Irrigação: Uso da água na agricultura irrigada**. 2. ed. Brasília: ANA, 2021. 130 p.

ANDRADE, R.S.; STONE, L.F. Uso do índice S na determinação da condutividade hidráulica não-saturada de solos do cerrado brasileiro Use of S index in the determination of unsaturated hydraulic conductivity of Brazilian 'Cerrado' soils. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, p.376-381, 2009

AZEVEDO, J. A.; SILVA, E. M. Tensiômetro: dispositivo prático para controle da irrigação. Planaltina: Embrapa Cerrados, 1999. (Embrapa Cerrados. Circular Técnica, 1).

BARBIERI, V.; SILVA, J. A. M. da; GUIMARÃES, D. P.; MACHADO, C. G.; MADALÃO, J. C. Dinâmica da água na planta. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2017. 44 p. (Embrapa Cerrados. Documentos, 367). Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/224699/1/Dinamica-da-agua-na-planta.pdf?locale=es>>. Acesso em: 29 abr. 2025.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de Irrigação**. 9. ed. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2019. 596 p.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The nature and properties of soils**. 14th ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2013.

BRAGA, M. B.; CALGARO, M. Uso da tensiometria no manejo da irrigação. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2010. 28 p. (Embrapa Semiárido. Documentos, 235).

BRITO, A. S.; LIBARDI, P. L.; MOTA, J. C. A.; MORAES, S. O. Desempenho do tensiômetro com diferentes sistemas de leitura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.17-24, 2009

BROOKS, R. H.; COREY, A. T. **Hydraulic properties of porous media**. Fort Collins: Colorado State University, 1964. 27 p. (Hydrology Paper, 3).

CASAROLI, D.; JONG VAN LIER, Q. de. Critérios para determinação da capacidade de vaso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 59-66, 2008.

COUTINHO, A. P. N.; SOUZA, A. H. C. de; COUTO, E. S.; TAVARES, C. J.; MENDONÇA, Y. C. da M.; VASCONCELOS, E. S.; ROCHA, G. A.; ALMEIDA, M. M. de. (2025). Efeito de diferentes tensões de água no solo no rendimento e crescimento do feijoeiro. **Observatório de La Economía Latinoamericana**, v. 23, e9161, 2025.

CRUZ, R. S. Manejo racional da irrigação em sistemas agrícolas. *Revista Engenharia Agrícola*, v. 39, n. 4, p. 455-463, 2019.

DANE, J. H.; HOPMANS, J. W. Water retention and storage. In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. (Ed.). *Methods of soil analysis: Part 4 – Physical methods*. Madison: SSSA, 2002. p. 671-720. (SSSA Book Series, 5).

DOURADO NETO, D.; VAN LIER, Q. D. J.; BOTREL, T. A.; LIBARDI, P. L. Software to model soil water retention curves (SWRC, version 2.00). **Scientia Agricola**, v. 57, p. 567-570, 2000.

DURNER, W. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. **Water Resources Research**, v. 30, p. 211-223, 1994.

FANG, S.; SHEN, P.; QI, X.; et al. **The distribution of van Genuchten model parameters on soil-water characteristic curves in Chinese Loess Plateau**. *Journal of Hydrology*, v. 617, 129057, 2023.

FASHI, F. H.; GORJI, M.; SHORAFI, M. **Estimation of soil hydraulic parameters for different land-uses**. *Catena*, v. 139, p. 1-8, 2016.

FERNANDES, A. L. T.; TURCO, J. E. P. Manejo da irrigação. In: TURCO, J. E. P.; FERNANDES, A. L. T.; KLAR, A. E. (Org.). *Engenharia de água e solo: irrigação e meio ambiente*. Jaboticabal: SBEA, 2018. v. 2, cap. 11, p. 269-298.

FRIZZONE, J. A.; REZENDE, R.; CAMARGO, A. P.; COLOMBO, A. **Irrigação por Aspersão: Sistema Pivô Central**. 1ª ed. Maringá: Eduem, 2018. 355p.

GENUCHTEN, M. T. van. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, v. 44, p. 892–898, 1980.

GRIGOLON, G. B.; DIOTTO, A. V.; SOUZA LIMA, C. J. G. de; et al. Minimum number of points for a reliable soil water retention curve using Richards' pressure chamber. *Geoderma*, 2020.

GUILLAUME, B.; BOUKBIDA, H. A.; BAKKER, G.; et al. Reproducibility of the wet part of the soil water retention curve. **European Journal of Soil Science**, 2023.

GUPTA, S.; PAPRITZ, A.; LEHMANN, P.; et al. Global soil hydraulic properties dataset based

on legacy site observations. *Scientific Data*, 2022.

HILLEL, D. Environmental soil physics. San Diego: Academic Press, 1998. 771 p.

HILLEL, D.; KRENTOS, V. D.; STYLIANOU, Y. Procedure and test of an internal drainage method for measuring soil hydraulic characteristics in situ. *Soil Science*, v. 114, n. 5, p. 395-400, 1972.

INCAPER - INSTITUTO CAPIXABA DE PESQUISA, ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL. Recomendações técnicas para o cultivo do mamoeiro. Vitória: Incaper, 2024. Disponível em:

<<https://biblioteca.incaper.es.gov.br/digital/bitstream/item/4777/1/LivroRecomendacoes-Tecnicas-Cultivo-Mamoeiro-Incaper.pdf>>. Acesso em: 29 abr. 2025.

KLUTE, A. Water retention: Laboratory methods. In: KLUTE, A. (Ed.). *Methods of soil analysis: Part 1 – Physical and mineralogical methods*. 2nd ed. Madison: ASA, SSSA, 1986. p. 635-662. (Agronomy Monograph, 9).

KUMAR, M. Problems, perspectives and challenges of agricultural water management. 2012.

LEGATES, D. R.; MCCABE JR., G. J. Evaluating the use of goodness-of-fit measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*, v. 35, n. 1, p. 233-241, 1999.

LEMO FILHO, L. C. A.; MORAES, M. G.; OLIVEIRA, D. M. T.; MEIRA, R. M. S. **A. Relações hídricas em plantas**. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2016. 168 p.

LIBARDI, P. L. Dinâmica da água no solo. Piracicaba: Ed. autor, 2005. 559 p. MARTINS, D. dos S. et al. Irrigação. In: MARTINS, D. dos S. et al. (Coord.). *Recomendações técnicas para o cultivo do mamoeiro*. Vitória: Incaper, 2024. cap. 8.5, p. 58-65. Disponível em: <<https://biblioteca.incaper.es.gov.br/digital/bitstream/item/4777/1/Livro-Recomendacoes-Tecnicas-Cultivo-Mamoeiro-Incaper.pdf>>. Acesso em: 29 abr. 2025.

LORENZONI, M. Z. Resposta da cultura do pimentão fertirrigado, no sistema de gotejamento, com doses de nitrogênio e potássio em ambiente protegido. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual de Maringá (UEM). 2016. 69f.

MARQUELLI, W. A.; SILVA, W. L. C.; SILVA, H. R. Sistema Irrigação para manejo da irrigação: teoria e aplicações. Brasília, DF: Embrapa Hortaliças, 2010.

MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação: princípios e métodos**. 3. Ed. Atual. Viçosa, MG: UFV, 2009.

MARTIN, M. Development of a hydrologic model of forest soils compacted partially usable in a situation of sparse data. 2019.

MARTINS, D. dos S.; et al. Irrigação. In: MARTINS, D. dos S.; et al. (Coord.). *Recomendações técnicas para o cultivo do mamoeiro*. Vitória: Incaper, 2024. cap. 8.5, p. 58-65.

MOSQUERA, G. M. et al. Soil water retention curve modelling under tropical soil conditions. *Geoderma Regional*, v. 22, e00315, 2020.

MONTZKA, C.; HERBST, M.; WEIHERMÜLLER, L.; et al. A global data set of soil hydraulic properties. *Earth System Science Data*, 2017.

MORIASI, D. N.; GITAU, M. W.; PAI, N.; et al. Hydrologic and water quality models: performance measures and evaluation criteria. *Transactions of the ASABE*, 2015.

MUÑOZ-CARPENA, R. Field devices for monitoring soil water content. 2004.

NEVES, E. das; SANTOS, T. M.; CAMPOS, J. C. A importância do manejo sustentável na irrigação. **Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana**, v. 22, p. 1-21, 2024.

OTTO, S. R. L.; ALCAIDE, M. Utilização do método TDR-tensiômetro na obtenção da curva de retenção de água no solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, p.265-269, 2001.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agrolivros, 2019. 478 p.

PESSOA, T. N.; BATISTA, A. M.; SOUSA, R. N. de; LIBARDI, P. L. Movement of water and solutes in agricultural soils. In: SOUSA, R. N. de (ed.). *Strategic tillage and soil management – new perspectives*. London: IntechOpen, 2024. p. 1-20. DOI: 10.5772/intechopen.114086.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. 2. ed. Barueri: Manole, 2012. 539 p.

REINA-LEAL, C. R.; RAMÍREZ, C.; COLMENARES, J. E. Influence of organic matter content on soil water retention. *Applied Clay Science*, 2019.

ROUX, P.; JACOBSZ, S. W. Performance of the tensiometer method for the determination of soil-water retention curves. *Geoderma*, 2021.

SALAMI, Y.; JAAFRI, R. Correlation between shape parameters of particle size distribution and soil water retention curves. *Journal of Hydrology*, 2025.

SBICAFE - SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA DOS CAFÉS ARÁBICA E CONILON. Florescimento do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) sob diferentes potenciais de água no solo. 2024. Disponível em: <<https://sbicafe.ufv.br/items/69410a1a-5d6f-4552-b3fe-a30b5c3340b6>>. Acesso em: 29 abr. 2025.

SILVASCHERGER, L.; ZANELLO, V.; LEXOW, C. Comparison of inverse modeling and traditional methods. *Geoderma*, 2020.

SEO, M.; HAN, K.-H.; CHO, H.-R.; et al. Interpreting in situ soil water characteristic curve. *Agricultural Water Management*, 2017.

- SILVA, A. C. et al. Relações hídricas no sistema solo-planta-atmosfera e manejo da irrigação. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v. 15, n. 2, p. 112-125, 2021.
- SILVA, J. P. et al. Curva de retenção de água e atributos físicos do solo sob diferentes manejos. *Revista Ciência Agronômica*, v. 50, n. 1, p. 77-86, 2019.
- SOBRAL, L. F. Evapotranspiração de referência e coeficiente de cultura aplicados ao manejo da irrigação. *Circular Técnica Embrapa*, n. 87, 2024.
- SOUZA, R. F. et al. Propriedades físico-hídricas do solo e disponibilidade de água para plantas. *Research, Society and Development*, v. 13, n. 2, 2024.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. *Fisiologia e desenvolvimento vegetal*. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.
- THE BRAIN CHAMBER. History of irrigation. 2023. Disponível em: <<https://thebrainchamber.com>>. Acesso em: 18 abr. 2025.
- TEIXEIRA, P. C. et al. *Manual de métodos de análise de solo*. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2016
- WILLMOTT, C. J. Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 63, n. 11, p. 1309-1313, 1982.
- WHALLEY, W. R.; LOCK, G.; JENKINS, N.; et al. Measurement of low matric potentials. *Soil Science Society of America Journal*, 2009.
- WÖSTEN, J. H. M.; PACHEPSKY, Y. A.; RAWLS, W. J. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. *Journal of Hydrology*, v. 251, p. 123-150, 2001.
- YE, Y.; CHEN, Y. F.; HU, R.; et al. Scaling relationships between van Genuchten parameters. *Journal of Hydrology*, 2021.