



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO**



HENRIQUE TEIXEIRA VILLARD PANZERA

**CALIBRAÇÃO DE SENSOR DE UMIDADE CAPACITIVO E OBTENÇÃO DA
CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA DO SOLO**

**OURO PRETO
2026**

HENRIQUE TEIXEIRA VILLARD PANZERA

**CALIBRAÇÃO DE SENSOR DE UMIDADE CAPACITIVO E OBTENÇÃO DA
CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA DO SOLO**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro de Controle e Automação

Orientador: Prof. Alan Kardek Rêgo Segundo

OURO PRETO
2026

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

P199c Panzera, Henrique Teixeira Villard.

Calibração de sensor de umidade capacitivo e obtenção da curva de retenção de água do solo. [manuscrito] / Henrique Teixeira Villard Panzera. HENRIQUE PANZERA. - 2026.

55 f.: il.: color., tab..

Orientador: Prof. Dr. ALAN RÊGO SEGUNDO.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Controle e Automação .

1. Irrigação. 2. Detectores. 3. Solos. I. PANZERA, HENRIQUE. II. RÊGO SEGUNDO, ALAN. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 658.5

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CONTROLE E
AUTOMACAO



FOLHA DE APROVAÇÃO

Henrique Teixeira Villard Panzera

Calibração de Sensor de Umidade Capacitivo e Obtenção da Curva de Retenção de Água do Solo

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação

Aprovada em 06 de fevereiro de 2026

Membros da banca

Dr. Alan Kardek Rêgo Segundo - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
Dr. Luis de Almeida Prado Bacellar - Convidado (Universidade Federal de Ouro Preto)
Dr. Paulo Marcos de Barros Monteiro - Convidado (Universidade Federal de Ouro Preto)

Alan Kardek Rêgo Segundo, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 18/02/2026



Documento assinado eletronicamente por **Alan Kardek Rego Segundo, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/02/2026, às 11:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1054607** e o código CRC **585D5C95**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.010523/2025-18

SEI nº 1054607

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35402-163
Telefone: 3135591533 - www.ufop.br

Este trabalho é dedicado às crianças adultas que, quando pequenas, sonharam em se tornar cientistas.

AGRADECIMENTOS

A conclusão deste Trabalho de Conclusão de Curso representa não apenas o encerramento de uma importante etapa acadêmica, mas também a soma de esforços, incentivos e aprendizados que levarei comigo com profunda gratidão.

Primeiramente, agradeço ao meu orientador, Professor **Alan Kardec Rêgo Segundo**, pela paciência, dedicação e orientação ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho. Seu conhecimento, disponibilidade e comprometimento foram fundamentais para meu crescimento, não apenas como estudante, mas também como profissional.

Agradeço ao **Diogo** e ao **Whilison**, do **NUGEO**, que foram essenciais para a obtenção da curva de retenção de água do solo, bem como ao **Edson**, do **PROFCAM**, pelo valioso auxílio na calibração do sensor capacitivo. A contribuição técnica de vocês foi determinante para a qualidade deste trabalho.

À minha mãe, **Karina Cordeiro Teixeira**, minha eterna inspiração, expresso minha mais profunda gratidão por todo o amor, apoio incondicional e por sempre acreditar em mim, inclusive nos momentos em que eu mesma duvidei das minhas capacidades. Nada disso seria possível sem você ao meu lado.

Aos meus amigos **João Paulo Estevão**, **Gabriel Matoso**, **Bruno Moreira** e **Gabriel Neopmuceno**, deixo meu sincero agradecimento pela amizade, companheirismo e por todas as conversas e risadas que tornaram essa jornada mais leve, especialmente nos momentos mais desafiadores.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho. Meu muito obrigado.

RESUMO

Esta pesquisa examina o papel crucial da agricultura no contexto brasileiro e a urgência de uma gestão hídrica eficaz. A meta primordial foi definir a curva de retenção de água (CRA) do solo e ajustar um sensor de umidade capacitivo para aplicação em sistemas de irrigação controlados automaticamente. O propósito desta pesquisa reside na convicção de que a falta de dados sobre as características do solo, juntamente com o uso incorreto de equipamentos de medição, pode levar à degradação do solo e ao consumo excessivo de recursos hídricos. A estratégia de pesquisa utilizada teve um caráter investigativo e se baseou em uma análise aprofundada de materiais já publicados sobre o tema. Para a avaliação do solo, o método do papel-filtro foi aplicado, em consonância com a norma ASTM D5298-16, para determinar o potencial de sucção e, por conseguinte, a CRA. Adicionalmente, a densidade aparente do solo foi apurada através do "Método da balança hidrostática", em linha com a norma NBR 16867-20. Vinte amostras de um bloco de solo situado nas proximidades do Laboratório de Automação Predial (LAP) da UFOP foram reunidas para os testes.

Palavras-chaves: Irrigação. Sensores. Solo.

ABSTRACT

This research examines the crucial role of agriculture in the Brazilian context and the urgency of effective water management. The primary goal was to define the soil's water retention curve (WRC) and adjust a capacitive moisture sensor for application in automatically controlled irrigation systems. The purpose of this research lies in the conviction that the lack of data on soil characteristics, together with the incorrect use of measurement equipment, can lead to soil degradation and excessive consumption of water resources. The research strategy used was investigative in nature and was based on an in-depth analysis of materials already published on the topic. For soil evaluation, the filter paper method was applied, in accordance with the ASTM D5298-16 standard, to determine the suction potential and, consequently, the WRC. Additionally, the soil's apparent density was determined using the "Hydrostatic balance method," in line with the NBR 16867-20 standard. Twenty samples from a soil block located near the Automation Building Laboratory (LAP) at UFOP were collected for the tests.

Keywords: Irrigation. Sensors. Soil.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplos de Sensores Capacitivos.....	20
Figura 2 – Sensor Resistivo	21
Figura 3 – Câmara de pressão de Richards.....	26
Figura 4 – Tensiômetro.....	28
Figura 5 – Amostras de solo para o método do papel-filtro	29
Figura 6 - Vala utilizada para retirar a amostra indeformada de solo	31
Figura 7 – Amostra indeformada do solo	32
Figura 8 – Amostra indeformada do solo armazenada em sala com umidade controlada	32
Figura 9 – Amostra indeformada do solo envolvida em parafina líquida	33
Figura 10 – Pesagem individual dos moldes	34
Figura 11 – Preparação das amostras	35
Figura 12 – Sistema para saturação das amostras.....	35
Figura 13 – Montagem detalhada do sistema	37
Figura 14 – Disposição final.....	37
Figura 15 – Curva de Calibração Papel Filtro Whatman N°42	39
Figura 16 – Sonda utilizada no experimento	40
Figura 17 – Recipiente usado	41
Figura 18 – Sistema balança e recipiente	42
Figura 19 – Sistema balança, recipiente e microcontrolador.....	42
Figura 20 – Curva de calibração para a relação entre a umidade do solo e a permissividade elétrica.	46
Figura 21- Comparação entre as umidades de referência e calculadas.	47
Figura 22 – Umidade volumétrica versus sucção matricial.....	48
Figura 23 – CRA a partir do Modelo de Van Genuchten.....	49
Figura 24 – CRA a partir do Modelo dual-Van Genuchten	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre modelos resistivos e capacitivos de sensores de umidade do solo	22
Tabela 2 – Comparação entre os métodos de medida de potencial mátrico do solo.	30
Tabela 3 – Dados diários exportados.....	44
Tabela 4 – Valores dos coeficientes obtidos para o modelo da Equação 4.2	45
Tabela 5 – Valores de sucção e umidade volumétrica obtidos pelo ensaio do papel-filtro.....	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society Testing and Materials
CC	Capacidade de Campo
CRA	Curva de Retenção de Água
IoT	Internet of Things
LABCAM	Laboratório de Controle e Automação Multiusuário
LAP	Laboratório de Automação Predial
NBR	Norma Brasileira
NUGEO	Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas
PMP	Ponto de Murcha Permanente
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
UFOP	Universidade Federal de Ouro Preto

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. JUSTIFICATIVA	16
1.2. OBJETIVOS GERAIS.....	17
1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	18
2.1. IRRIGAÇÃO AUTOMATIZADA.....	18
2.1.2.CALIBRAÇÃO DE SENSORES DE UMIDADE DO SOLO	22
2.2. MECÂNICA DOS SOLOS	24
2.2.1.CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO	24
2.2.2. MÉTODOS PARA OBTENÇÃO DA CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO.....	26
3. DESENVOLVIMENTO.....	31
3.1. COLETA DO SOLO	31
3.2. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO – MASSA ESPECÍFICA APARENTE...	32
3.3. ENSAIO COM PAPEL-FILTRO	34
3.3.1.PREPARO DAS AMOSTRAS	34
3.3.2. EXECUÇÃO DO ENSAIO	36
3.4. CALIBRAÇÃO DO SENSOR DE UMIDADE DO SOLO.....	39
3.4.1.PREPARAÇÃO DA AMOSTRA	39
3.4.2.REALIZAÇÃO DA CALIBRAÇÃO	41
4. RESULTADOS	44
4.1. CALIBRAÇÃO DO SENSOR DE UMIDADE DO SOLO.....	44
4.2. CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO	47
5. CONCLUSÃO.....	49
REFERÊNCIAS.....	53

1. INTRODUÇÃO

A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA, define a agricultura brasileira como responsável por 21% da soma de todas as riquezas produzidas no PIB nacional. Responsável por um quinto de todos os empregos do país e mais de 43% das exportações. (EMBRAPA, 2020)

Espera-se, ainda, que a agricultura venha a desempenhar um papel cada vez mais relevante na economia brasileira: dada sua versatilidade, passará a abranger em grande escala as produções de biomassa, biomateriais e química verde (produtos e processos cujo objetivo é a redução e/ou eliminação do uso e da geração de substâncias poluentes); a criação de biofábricas (produtoras de insumos biológicos como fertilizantes, adubos, entre outros) e, por consequência, na nutrição da população e desenvolvimento de aspectos culturais (como a gastronomia), o que pode contribuir, inclusive, com o turismo de diferentes regiões (EMBRAPA, 2020).

Nota-se, portanto, que a ideia da inserção da tecnologia em diferentes segmentos agrícolas não é novidade. Para a EMBRAPA (2020), a ampliação do uso de ferramentas digitais na agricultura pode contribuir para o aperfeiçoamento de todo o processo produtivo, uma vez que auxiliará na gestão mais eficiente da propriedade (desde o uso mais eficaz de fertilizantes e defensivos, até o controle das operações agrícolas), nas agriculturas de precisão e digital, na correção da fertilidade dos solos, no manejo integrado de pragas e, principalmente, na irrigação.

Segundo Testezlaf (2011, p.7), a irrigação é definida como sendo o conjunto de técnicas, meios ou formas de se aplicar água artificialmente às plantas. O autor enfatiza, porém, que tal prática é, na verdade, uma ciência, e, portanto, deve prezar pela eficiência a fim de evitar desperdícios e otimizando impactos de seu uso.

Um exemplo simplista de mau uso da irrigação é colocar um copo de água inteiro em um pequeno vaso de flores. Instantaneamente a água atravessa o vaso, transbordando o prato onde este foi colocado, sem ser absorvida pela terra ou substrato. Daí nota-se dois pontos: o primeiro é que a água aplicada de forma excessiva, ultrapassou a capacidade do vaso, sendo mais proveitoso para a planta caso tivesse sido executada diversas regas em quantidades inferiores; já a segunda é relacionada a forma de aplicação, sendo nesse caso, errônea. Para plantas dispostas sobre um vaso, é mais benéfico que efetue a rega no prato que dispõe o vaso, pa-

ra que, dessa forma, o solo absorva lentamente o líquido. Evidencia-se, assim, dois dos principais erros da irrigação moderna: método de aplicação incorreto e manejo de água malfeito.

Desta forma, quando se compara sistemas de irrigação manuais, comumente utilizados por agricultores, com sistemas automatizados, apesar destes terem custo mais elevado, é notório que geram benefícios de grande valia a respeito da redução de consumo de água e energia, além de aumentar a eficiência da plantação e preservação do solo (PEREIRA; OWEIS; ZAIRI, 2002).

A agricultura de precisão é um conjunto de técnicas que emprega tecnologias avançadas nas áreas de plantio, sendo uma prática recente no Brasil. Seu principal objetivo consiste em maximizar a produtividade agrícola, reduzindo o uso de insumos e minimizando os impactos ambientais. Nesse contexto, a adoção de sistemas de irrigação automáticos representa uma alternativa viável para minimizar erros operacionais e reduzir o consumo de insumos, consequentemente, diminuindo o custo de produção.

A irrigação automatizada é uma ferramenta fundamental para a agricultura moderna, pois permite a gestão eficiente dos recursos hídricos, garantindo a produção de alimentos de qualidade. Entretanto, a falta de conhecimento sobre as características do solo e o uso inadequado dos sensores de umidade podem resultar na degradação do solo, desperdício de recursos e, consequentemente, aumento nos custos do produto final.

Portanto, neste trabalho buscou-se reunir dados e informações com o propósito de responder ao seguinte problema de pesquisa: Como fazer a melhoria da rega e economia de recursos utilizando o estudo de mecânica dos solos e calibração dos sensores de umidade na irrigação automatizada?

No presente estudo, busca-se calibrar os sensores de umidade do solo e realizar uma avaliação detalhada da mecânica dos solos, obtendo a sua curva de retenção de umidade pelo método do papel-filtro. A correta calibração dos sensores e análise do solo são imprescindíveis para garantir uma irrigação precisa e eficiente. Ademais, a obtenção da curva de retenção de umidade é crucial para compreender a capacidade do solo em armazenar umidade, possibilitando uma gestão mais adequada e consciente da água no processo agrícola. Portanto, este trabalho tem como objetivo contribuir para o aperfeiçoamento da irrigação automatizada, tornando-a mais eficaz e sustentável.

O trabalho foi realizado recorrendo a pesquisa exploratória e bibliográfica, iniciando-se no estudo da mecânica dos solos a fim de realizar sua caracterização mediante a curva de retenção de água no solo. Para isso foi necessária a retirada de um bloco de solo no terreno localizado nas proximidades do Laboratório de Automação Predial (LAP) situado na Univer-

sidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Posteriormente, foram elaboradas vinte amostras abrangendo diferentes pontos do bloco para dar sequência ao ensaio de medição do potencial de sucção do solo usando o método do papel-filtro, com base na norma técnica da American Society for Testing and Materials (ASTM), D598-16. Esses dados são essenciais para obter a curva de retenção de água no solo.

Em um segundo momento, foi necessário determinar a massa aparente do solo para calibrar o sensor de umidade. Para isso, realizou-se o ensaio "Determinação da massa específica aparente de amostras indeformadas – Método da balança hidrostática" com base na norma técnica NBR16867-20.

Foram utilizadas fontes primárias (conhecimento adquirido no curso) e secundárias (livros, artigos, conteúdo encontrado na internet e normas técnicas) para fundamentar as pesquisas e capacitar a realização dos ensaios necessários para obter resultados quantitativos e qualitativos de forma que possa ser possível concluir que tais parâmetros são uma necessidade quando se busca uma irrigação automatizada, precisa e que economize recursos.

O trabalho de conclusão de curso estrutura-se em quatro capítulos, apresentando-se no primeiro as definições acerca da irrigação automatizada baseado em vários autores, além da sua importância e como é feita a constituição de um sistema de irrigação automatizado. Outrossim são destacados também os benefícios da utilização desse tipo de irrigação. No segundo capítulo é abordada a importância da caracterização do solo para o sucesso da irrigação e como isso pode ser feito, bem como a definição, características e o funcionamento dos sensores de umidade do solo, evidenciando a importância de realizar sua calibração e dissertando sobre os meios de fazê-lo.

No terceiro capítulo, Desenvolvimento, são apresentados os métodos utilizados para realização da pesquisa incluindo a amostragem do solo, a realização dos ensaios, a coleta de dados e a análise dos resultados de forma bem detalhada para que os passos possam ser replicados por outros pesquisadores. Já no quarto capítulo, Resultados, são destacados os resultados obtidos a partir da realização dos ensaios e da análise dos dados por meio de gráficos, tabelas e imagens. Além disso, são destacadas as principais conclusões e recomendações para futuras pesquisas.

1.1. JUSTIFICATIVA

A necessidade de garantir a eficiência e a sustentabilidade na produção agrícola tem sido um tema de constante preocupação, e a irrigação automatizada é uma ferramenta essen-

cial para atingir esse objetivo. No entanto, a falta de conhecimento sobre as características do solo e o uso inadequado dos sensores de umidade podem prejudicar o processo de irrigação e levar a problemas graves.

Portanto, a realização desta pesquisa é imprescindível para garantir a eficiência e a sustentabilidade da produção agrícola, contribuindo para o desenvolvimento da irrigação automatizada de forma mais eficiente e responsável. Além disso, a caracterização do solo por meio de sua curva de retenção de umidade é uma importante ferramenta para a gestão de recursos hídricos, sendo bastante relevante para diversos setores econômicos e sociais.

O que impulsionou a realização deste trabalho foi contribuir com o processo de irrigação automatizada, fornecendo um estudo focado em apresentar parâmetros, métodos e ferramentas necessárias que possa fazê-la de forma mais eficiente, precisa e econômica, tendo como base nos princípios de mecânica dos solos e calibração dos sensores de umidade do solo.

1.2. OBJETIVOS GERAIS

Neste trabalho objetivou-se obter a curva de retenção de água no solo por meio do método do papel-filtro e calibrar um sensor de umidade do solo visando fornecer informações técnicas para a automatização de sistemas de irrigação.

1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obter a curva de retenção de água no solo onde será instalado um sistema de irrigação automatizado;
- Obter a massa específica aparente do solo;
- Realizar a calibração do sensor de umidade do solo a ser usado no sistema de irrigação automatizado;
- Avaliar os dados obtidos e validar o resultado dos ensaios realizados;
- Determinar como esses dados podem nortear a automatização de sistemas de irrigação e, consequentemente, na economia de recursos.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. IRRIGAÇÃO AUTOMATIZADA

A irrigação automatizada é um método de irrigação que utiliza sensores, controladores e equipamentos de distribuição de água, para tornar autônomo o processo de fornecimento de nutrientes às plantas. Sua finalidade é fornecer a quantidade necessária de água, na hora certa às plantas, com o intuito de melhorar a eficiência da irrigação, reduzir o desperdício de recursos e maximizar o desempenho das culturas (REIS, 2015).

Como bem nos assegura Ali (2010), é válido mencionar que a irrigação automatizada é uma técnica que utiliza tecnologia para controlar e regular a aplicação de água em uma cultura de plantas predominantemente por meio de sensores de umidade do solo e microcontroladores. Não é exagero assegurar que a irrigação automatizada é importante porque permite uma gestão mais eficiente da água, especialmente em condições climáticas adversas e em ambientes onde a água é limitada. Em todo esse processo, pode-se dizer resumidamente que um sistema de irrigação automático gera uma melhoria na produção agrícola, bem como a um uso mais responsável e sustentável dos recursos hídricos.

Conforme explicado acima, é interessante afirmar que a automação deve-se estar cada vez mais presente na agricultura ao redor do mundo. Em um estudo realizado na Coreia, entre 2017 e 2019, um sistema de irrigação automatizado reduziu, em média, 12,7% do consumo de água quando comparado a um sistema de irrigação comum, enquanto a força de trabalho para o manejo de água obteve uma redução de 21,8% em uma cultura de arroz local (LEE, 2022).

Em outro estudo, dessa vez realizado na Austrália, "[...] a economia de água em um pomar de maçãs irrigado de forma automatizada usando controle de *feedback* em tempo real, gerou uma melhoria de 73% na eficiência do uso da água." (PEDERSEN; LIND, 2017, p.116).

Ora, em tese, o conceito de IoT (internet das coisas) inserido na agricultura auxilia na garantia da eficiência e a sustentabilidade da plantação. É importante considerar que um sistema de irrigação automatizado ajuda, por exemplo, a preservar a qualidade do solo, evitando o encharcamento, que, em conformidade com EMBRAPA (2018), pode levar a problemas como erosão e, conseqüentemente, à perda de nutrientes que seriam destinados às culturas agrícolas.

"Agricultura inteligente" baseada em tecnologias IoT permite que agricultores e fabricantes reduzam o tempo de investimento e aumentem a produtividade controlando a quantidade de fertilizantes, controlando a irrigação, regulando a temperatura. Na agricultura inteligente baseada em IoT, um sistema é construído para monitorar o campo de cultivo com a ajuda de sensores e automatizar o sistema de irrigação. Os agricultores podem monitorar as condições do campo de qualquer lugar. A agricultu-

ra inteligente baseada em IoT é altamente eficiente quando comparada com as abordagens convencionais (MARINKOVIC; ŽARKIC, 2018, p. 91).

Conforme Pelisson (2001) apud Jesus et al. (2021), a automação de sistemas de irrigação trata-se inegavelmente de uma grande aliada da agricultura por uma série de motivos. O autor deixa claro que seria um erro, portanto, deixar de atribuir a redução de custos com mão de obra como um destes motivos. Assim, reveste-se de particular importância lembrar que um sistema de irrigação automatizado poderá ficar em atividade 24 horas por dia, sem a necessidade de acompanhamento e, caso tenha sido configurado corretamente, com máxima preservação de recursos.

Por todas essas razões, a automação da irrigação pode ser considerada o futuro da agricultura. Além disso, a irrigação automatizada proporciona a diminuição da mão de obra, economia de água e evita a degradação do solo causada por práticas de irrigação imprecisas. No entanto, além de ter custos elevados para ser implementado, é importante destacar que a correta calibração dos sensores de umidade e o conhecimento da mecânica dos solos são fundamentais para a efetividade da irrigação automatizada. A curva de retenção de água no solo é um indicador importante de sua capacidade em reter umidade, e é por meio dela que se pode estabelecer as necessidades hídricas das culturas (LEÃO et al., 2007).

Portanto, há necessidade de se investir em pesquisas que permitam a compreensão e a utilização adequada da mecânica do solo e dos sensores de umidade para a irrigação automatizada. Dessa forma, é possível promover uma agricultura mais eficiente, sustentável e resiliente, atendendo às demandas da sociedade por alimentos de qualidade e produzidos de forma responsável.

2.1.1. SENSOR DE UMIDADE DO SOLO

O sensor de umidade do solo é um dispositivo que mede a quantidade de água presente no solo. Esses sensores são comumente usados na agricultura de precisão para ajudar a monitorar as condições do solo e determinar quando e quanto irrigar as plantas em sistemas de irrigação automatizados, funcionando a partir da condutividade elétrica do solo, que é diretamente proporcional à sua umidade. Tais sensores tem como intuito evitar o desperdício de água e a maximizar a eficiência da irrigação, o que pode melhorar o desempenho das culturas e aumentar a produção agrícola (ALI, 2011).

Pode-se categorizar os processos de medição de umidade do solo em duas tipologias: diretos e indiretos. O método direto envolve a obtenção de uma amostra do solo, removendo

toda a água presente e determinando o volume retirado. Já o método indireto, que é o mais utilizado em sistemas automatizados de irrigação, baseia-se em propriedades físicas, como capacitância e resistência elétrica. (MENDES, 2006).

Nesse contexto, é importante destacar que o componente do método indireto possui interface analógica digital. A parte digital fica responsável no acionamento de um sistema de irrigação, realizando esta tarefa de forma automática através de lógica binária, onde 1 representa o estado ligado e 0 o estado desligado. Já a interface analógica fornece uma informação mais precisa sobre a umidade do solo, apresentando-a como uma tensão variável, que pode ir de 0 a tensão de entrada (3,3-5 volts).

SENSORES CAPACITIVOS

O funcionamento dos sensores capacitivos se baseia na capacitância elétrica, pois a variação da capacitância do solo acontece de acordo com a variação de sua permissividade relativa por sua vez, tem relação com a variação da umidade. Esses sensores têm sido amplamente utilizados devido a seu método não destrutivo (CRUZ et al., 2010). Eles são capazes de medir com precisão elevada a quantidade de água presente no solo em qualquer profundidade. Isso é possível porque a técnica da capacitância elétrica permite medir a permissividade dielétrica do solo e, conseqüentemente, sua umidade (GARDNER et al. ,1998).

Em contrapartida, conforme destacado por Coelho e Teixeira (2004), sensores capacitivos apresentam oscilações nas respostas quando expostos a variações de temperatura. Além disso, de acordo com Silva (2013), eles possuem um processo de medição complexo, exigindo componentes eletrônicos sofisticados e, conseqüentemente, elevando seu custo. A Figura 1 ilustra um modelo de sensor capacitivo.

Figura 1 - Exemplos de Sensores Capacitivos



Fonte: Researchgate, s.d.

SENSORES RESISTIVOS

O funcionamento do sensor resistivo de umidade do solo consiste na medição da variação da resistência elétrica entre dois eletrodos inseridos no solo. De acordo com Mendes (2006), quanto maior a umidade do solo, menor será a resistência elétrica registrada.

Entre as vantagens do uso desse tipo de sensor estão o baixo custo, a fácil operação e a alta disponibilidade no mercado. No entanto, Ritter, Munoz-Carpena e Bosch, (2005) apontam que o sensor resistivo de umidade do solo apresenta baixa precisão nas leituras. Para obter resultados mais precisos, é importante que a superfície de contato da sonda esteja completamente enterrada no solo. A Figura 2 ilustra um sensor de umidade resistivo.

Uma das principais desvantagens dos sensores resistivos é a sua sensibilidade à salinidade do solo. A alta concentração de íons dissolvidos na água do solo aumenta a condutividade elétrica, resultando em uma diminuição da resistência que o sensor interpreta como um aumento na umidade. Este efeito pode levar a erros substanciais na medição, especialmente em solos com altos níveis de salinidade (RITTER et al., 2005)

Figura 2 – Sensor Resistivo



Fonte: directindustry, 2023

A Tabela 1 abaixo, representa uma comparação sucinta entre os dois tipos de sensores mais usados para sistemas de irrigação automatizados.

Tabela 1 – Comparação entre modelos resistivos e capacitivos de sensores de umidade do solo

Característica	Modelo Resistivo	Modelo Capacitivo	Modelo TDR
Custo	Baixo	Médio	Alto
Facilidade de Uso	Simples	Mais complicado	Complexo
Precisão	Média	Alta	Alta
Salinidade	Sensível	Pouco sensível	Pouco sensível

Fonte: Autor, 2023.

A Refletometria no Domínio do Tempo (TDR) é um método sofisticado e exato para avaliar a quantidade de água presente no solo. A técnica funciona emitindo ondas eletromagnéticas rápidas através de sensores fincados na terra. A presença de umidade no solo interfere na velocidade e no padrão dessas ondas, já que a água possui uma permissividade relativa elevada. Ao examinar o tempo necessário para a onda retornar, é possível calcular o nível de umidade do solo com notável precisão.

Vê-se, pois, que diante do que foi apresentado, é válido mencionar que um sistema de irrigação inteligente deverá, para obter uma maior precisão e garantir resultados mais próximos aos esperados, realizar ajustes in loco. Entretanto, é preciso ressaltar que, apesar de tudo que foi supracitado, sensores resistivos são vantajosos por terem custo reduzido e simplicidade de operação, apesar da grande desvantagem, quando comparado aos sensores capacitivos, em relação a precisão.

2.1.2. CALIBRAÇÃO DE SENSORES DE UMIDADE DO SOLO

Segundo a perspectiva apresentada por Miranda et al (2017), os sensores resistivos mostram-se bastante vantajosos ao serem integrados a sistemas de irrigação que funcionam de forma automática, principalmente porque dispensam manutenções que precisariam ocorrer de tempos em tempos. “O mais preocupante, contudo, é constatar que pelo fato de fazerem medições de umidade de forma indireta, é necessária a calibração específica para o solo onde o mesmo será utilizado”. (SILVA, 2013).

Ajustar precisamente é fundamental, sobretudo com sensores resistivos, que avaliam a capacidade do solo de conduzir eletricidade (σ). Essa capacidade é afetada tanto pela quantidade de água quanto pela concentração de sais, que muda muito de um solo para outro, prejudicando a exatidão das medições e demandando um ajuste minucioso.

Em contrapartida, nos sensores capacitivos, que medem a permissividade relativa (ϵ_r)

do solo, o efeito da concentração de sais é bem menor. A permissividade relativa reflete melhor a quantidade de água presente do que a quantidade de sais dissolvidos, fazendo com que esses sensores sofram menos com mudanças na concentração de sais do solo, precisando de um ajuste mais simples. Neste contexto, fica claro que a importância da calibração se deve à necessidade de ajustar o sensor para obter leituras precisas no solo específico em que será utilizado. A calibração resolve a variabilidade causada pelas diferentes características de cada tipo de solo. Uma vez calibrado para um solo específico e, no caso de sensores com compensação de temperatura, a precisão da medição é mantida, independentemente das condições climáticas (HANSON; ORLOFF; SANDEN, 2007).

O cálculo da relação entre o nível de umidade do solo e a resistência elétrica por esse método é baseado em medir a resistência elétrica do solo em diferentes níveis de umidade. A relação conhecida como curva de calibração, é usada para relacionar a resistência elétrica com o nível de umidade. Em geral, quanto maior o nível de umidade do solo, menor será a resistência elétrica.

A curva de calibração é usada para converter leituras de um sensor de umidade do solo em uma medida precisa do teor de água do solo. Este processo envolve a medição do milivolt bruto (mV) ou valor de contagem do sensor em diferentes recipientes de solo com teor de água conhecido. Os dados coletados devem abranger uma ampla gama de umidade do solo para criar uma curva de calibração precisa (HANSON; ORLOFF; SANDEN, 2007, p. 10).

De acordo com o estudo feito por Jiménez (2018), a calibração do sensor de umidade do solo de baixo custo, modelo YL-69 foi tão positiva que potencializou o uso do mesmo, profissionalmente no ramo de agricultura irrigada no estado de Pernambuco. Fica evidente, diante desse quadro que a calibração de sensores de umidade é fundamental para garantir a precisão nas medições da quantidade de água presente no solo, o que é essencial para o funcionamento eficiente da irrigação automatizada. Ao calibrar o sensor, é possível ajustá-lo de acordo com as propriedades do solo em questão, o que leva a uma melhor gestão da água e, consequentemente, a uma melhora no desempenho da irrigação.

Ajustar os sensores, tanto os que medem resistência quanto os que medem capacitância, é fundamental, e geralmente se faz isso usando o método da estufa, que é o mais comum. Esse método serve para descobrir como a umidade do solo se relaciona com o que o sensor indica (seja resistência, frequência ou outro dado). Essa relação, que chamamos de curva de calibração, surge quando se medem os valores do sensor em vários teores de umidade, descobertas com o uso da estufa.

2.2. MECÂNICA DOS SOLOS

A Mecânica dos Solos é uma área da engenharia civil que estuda o comportamento mecânico e hidráulico dos solos. O objetivo é estabelecer teorias e métodos que permitam prever o comportamento do solo sob as ações das estruturas que são construídas sobre ou dentro dele (POWRIE, 2013).

O comportamento mecânico se refere à maneira como o solo responde às alterações de tensão impostas pelas estruturas, incluindo a resistência, que é uma medida da tensão máxima que o solo pode suportar. O comportamento hidráulico se refere ao escoamento de água no solo, incluindo como isso afeta as tensões presentes no solo (FERNANDES, 2018).

Não é exagero afirmar, entretanto, que a caracterização das propriedades hidráulicas do solo é importante para a agricultura. Isto porque ela permite a compreensão das condições de disponibilidade de água para as plantas, incluindo estudos de balanço de água no solo, dinâmica da água e solutos no solo, infiltração e manejo da irrigação. Assim, preocupa o fato de que o descaso com esse aspecto pode prejudicar significativamente o desenvolvimento das plantações, o que pode ter impactos econômicos e sociais negativos (TORMENA; SILVA, 2002).

A curva de retenção de água no solo tem sido utilizada como importante ferramenta na descrição do comportamento físico hídrico e na mecânica dos solos não saturados. A curva é parte fundamental da caracterização das propriedades hidráulicas do solo, especialmente em estudos de balanço e disponibilidade de água às plantas, de dinâmica da água e solutos no solo, de infiltração e no manejo da irrigação (TORMENA; SILVA, 2002, p. 306).

É notório que o estudo da mecânica dos solos por meio da curva de retenção de água e outros comportamentos hidráulicos são cruciais para a agricultura e para o manejo da irrigação. É importante que as condições do solo sejam bem compreendidas para que a água possa ser distribuída de forma adequada e eficiente, sem prejudicar o desenvolvimento das plantas, visto que o não cumprimento desse critério pode resultar em erosão e até mesmo na falência do cultivo.

2.2.1. CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO

A curva de retenção de água no solo (CRA) é uma representação da relação entre a umidade volumétrica do solo (Θ) e o potencial matricial da água (medida da energia de retenção da água no solo, que reflete a capacidade do solo de reter água) (GENUCHTEN, 1980). Cada nível de umidade do solo é correspondido por um valor de energia de retenção da água,

medido pela componente matricial do seu potencial total. A curva de retenção é empregada para estimar o potencial matricial da água no solo, seja conhecendo a umidade do terreno ou vice-versa (SOUSA; PEIXOTO; DE TOLEDO, 1995).

De modo geral, a CRA é um aspecto crucial no manejo da irrigação para o produtor. Ela permite a estimativa da quantidade de água disponível para as plantas, sendo a capacidade de campo (teor de umidade retido pelo solo após o excesso de água ter drenado livremente por gravidade e a taxa de movimento descendente ter se tornado desprezível) (Salassier; Montovani; Soares, 2019), o limite superior e o ponto de murcha do solo (ponto a partir do qual o solo não possui mais água suficiente para atender às necessidades hídricas das plantas) o limite inferior de umidade no solo (NASCIMENTO, 2009). Após a água excedente, denominada água gravitacional, escoar para as profundezas do solo por meio da percolação, a capacidade de campo representa o volume máximo de água que o solo consegue armazenar. Simplificando, é a água ainda acessível às plantas após a drenagem natural, que normalmente leva de 24 a 72 horas após forte precipitação ou irrigação. Em contrapartida, o ponto de murcha permanente corresponde ao instante em que o solo já não detém água em volume suficiente para satisfazer as necessidades de hidratação das plantas (NASCIMENTO, 2009).

Em consonância com Urach (2007), a CRA representa o dinamismo da água no solo, pois possibilita o cálculo da quantidade de água que o solo pode reter dentro de certos limites de potencial matricial. Dessa forma, o conhecimento da CRA é importante para interpretar as características do armazenamento de água no solo e avaliar se está atendendo às necessidades hídricas da cultura.

Dentre os meios de se obter a curva de retenção de água no solo, é possível destacar três técnicas distintas no meio das mais utilizadas segundo Silva (2005). A primeira é a secagem ou drenagem, na qual uma amostra de solo é saturada e, ao longo do tempo, é aplicada uma sucção progressivamente maior. A segunda técnica é a molhamento ou umedecimento, na qual uma amostra de solo é mantida seca e é umedecida gradualmente ao longo do tempo. Finalmente, a terceira técnica é a partir de um teor intermediário de umidade do solo, onde é possível aplicar tanto o processo de secagem quanto de umedecimento.

De modo geral, a CRA é um importante indicador para a gestão da irrigação, pois permite avaliar a quantidade de água disponível para as plantas e sua retenção no solo. Vários métodos podem ser utilizados para obter a CRA, tais como a Câmara de Richards, Papel Filtro e tensiômetro. Cada um destes métodos possui suas vantagens e desvantagens e serão aprofundados no subcapítulo subsequente.

2.2.2. MÉTODOS PARA OBTENÇÃO DA CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO

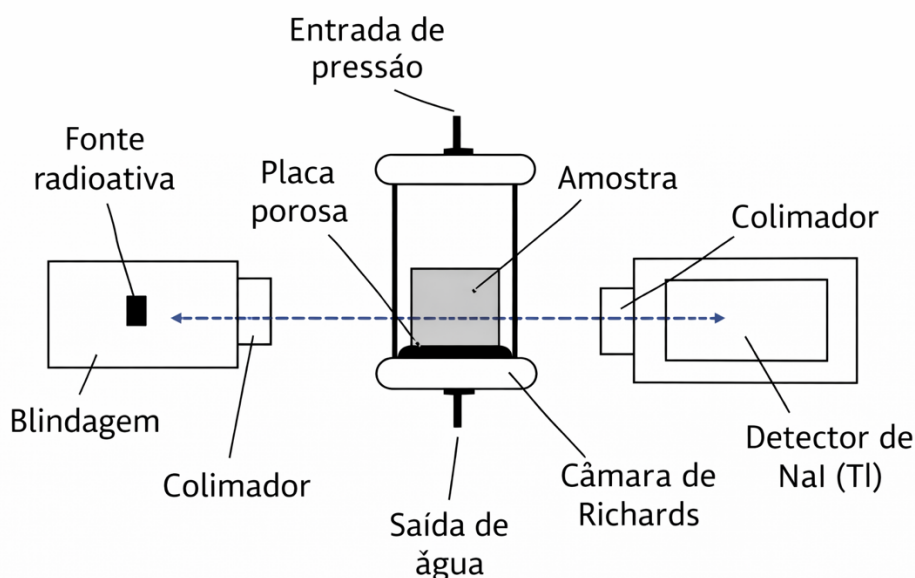
Tomando como base o estudo de Klein; Reichert; Reinert (2006), é possível obter a CRA através de métodos laboratoriais ou diretamente do campo através de diferentes metodologias. Contudo, em comparação com métodos de campo, os métodos laboratoriais são mais simples e bem mais rápidos de serem realizados, pois podem ser feitas análises de um grande número de solos em paralelo (URACH, 2007).

Os objetivos dos métodos são escolher de forma estratégica uma série de pontos, a fim de estabelecer uma relação entre a umidade presente no solo e o potencial matricial (NASCIMENTO et al., 2010). A maioria dos aparelhos usados para avaliar a retenção de água são mais eficazes quando as forças capilares têm predominância.

2.2.2.1. MÉTODO CÂMARA DE RICHARDS

A câmara de Richards, representada pela Figura 3, é um dispositivo comumente utilizado para medir a curva de retenção de água do solo. É composta por uma câmara fechada hermeticamente com uma placa porosa interna. A placa permite a passagem de água, mas impede a passagem de ar, por meio de vazios muito pequenos. Essa câmara é usada para medir a quantidade de água retida no solo a diferentes níveis de potencial matricial, que é fundamental para estimar a disponibilidade de água para as plantas (SILVA, 2005).

Figura 3 – Câmara de pressão de Richards



Fonte: PIRES; BACCHI, 2002

Resumidamente, o método é realizado em duas etapas. A primeira etapa é saturar a amostra de solo, o que pode ser feito por imersão ou por percolação. Em seguida, a amostra é colocada na câmara de Richards, que é fechada hermeticamente, impedindo o fluxo de ar e permitindo apenas o fluxo de água. A câmara é então conectada a uma fonte de sucção controlada, e a umidade do solo é medida ao longo do tempo enquanto a sucção é aumentada (SILVA; LIBARDI; GIMENES, 2018).

A câmara de Richards é um método amplamente utilizado para determinação da CRA, mas ele também tem suas desvantagens. Algumas dessas limitações incluem o alto custo de aquisição, a dependência de um sistema pneumático complexo, a fragilidade das placas porosas e a possibilidade de não haver contato ideal entre a amostra de solo e a placa. Além disso, o método pode ser demorado devido ao lento equilíbrio do potencial da água na amostra e pode ser difícil controlar o equilíbrio entre a pressão aplicada e a água retida no solo, especialmente para altos potenciais (CAMPBELL; SMITH; TEARE, 2007; COSTA; OLIVEIRA; KATO, 2008; NASCIMENTO et al., 2010).

Em suma, a câmara de Richards é uma metodologia útil e precisa para determinar a capacidade de retenção de água do solo, mas é importante ter em mente suas limitações e considerar outros métodos.

2.2.2.2. MÉTODO DO TENSÍÔMETRO

O tensiômetro, representado na Figura 4, é um dispositivo que mede a tensão da água no solo. O funcionamento básico deste método consiste em colocar o tensiômetro no solo, conectar o instrumento a uma fonte de pressão atmosférica e medir a tensão da água no solo, medida com a leitura da pressão negativa gerada pelo tensiômetro, que é relacionada com a retenção de água (TOLL et al., 2015).

Figura 4 – Tensiômetro



Fonte: Doutor Irrigação, 2023.

O método do tensiômetro é amplamente utilizado em estudos de hidrologia e agronomia, pois permite a medição da tensão da água no solo em diferentes profundidades e é uma ferramenta valiosa para avaliar a disponibilidade de água para as plantas. Além disso, de acordo com Otto e Alcaide (2001), estes instrumentos são úteis para monitorar a umidade e a tensão da água no solo, e podem ser utilizados na automatização do sistema de irrigação.

Contudo, apesar de ser um modo confiável de determinar a CRA, o método possui inúmeras desvantagens. Alguns dos problemas, na visão de Coelho e Teixeira (2004), incluem a necessidade de calibragem frequente, a influência de fatores como temperatura e salinidade na precisão das medições, e a dificuldade em realizar medições em solos com grandes variações na textura.

O tensiômetro tem uma precisão muito maior para medir o potencial hídrico na faixa úmida, que é onde ocorre a maior parte do movimento da água. Somente os tensiômetros têm a capacidade de medir diretamente faixas de alto potencial hídrico. No entanto, sua faixa de atuação prática não ultrapassa 80 a 85 cbar [80 a 85 kPa], um valor muito aquém do ponto de murcha permanente, que se aproxima de 1.500 kPa. (METER GROUP, 2024)

2.2.2.3. MÉTODO DO PAPEL-FILTRO

O método do papel de filtro é uma das formas mais comuns de se obter a curva de retenção de água do solo. Em função da sua simplicidade (não requer equipamentos sofisticados), fornece resultados em curto período de tempo, permite a obtenção de dados com precisão razoável e tem baixo custo (requer apenas papel filtro e alguns equipamentos de laboratório).

rio padrão) (BICALHO; CUPERTINO; BERTOLDE, 2013).

O método baseia-se no princípio de que, quando solo úmido é colocado em contato com um material poroso que possua capacidade de absorver água, a mesma passará do solo para este material até que o equilíbrio seja alcançado. No estado de equilíbrio, a sucção no solo e no material poroso é a mesma, apesar das respectivas umidades serem diferentes (MARINHO, 1994).

O método implica em utilizar papéis filtro em contato com a amostra de solo, representada pela Figura 5, que é colocada em um recipiente selado por tempo suficiente para que a pressão de vapor de água nos poros do solo, a pressão de vapor de água nos poros do papel filtro e a pressão parcial de vapor de água no ar dentro do recipiente alcancem o equilíbrio. A massa dos papéis filtro é medida em seguida, e a sucção da amostra é determinada por meio de uma curva de calibração do papel filtro, que estabelece a relação entre a sucção e o teor de água da amostra. A partir desses dados é possível construir a curva de retenção de água no solo (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2003). A técnica é amplamente utilizada e padronizada para garantir a qualidade e a confiabilidade dos resultados obtidos.

Figura 5 – Amostras de solo para o método do papel-filtro



Fonte: Autor, 2023.

Diante do que foi apresentado, é válido mencionar que o método do papel de filtro é uma técnica bastante útil para a determinação da curva de retenção de água no solo, permitindo obter informações valiosas sobre o comportamento hidráulico deste. Além disso, a padronização do procedimento pela norma ASTM D5298 contribui para a obtenção de resultados mais confiáveis e precisos. Na Tabela 2, é possível verificar uma comparação sucinta entre os métodos supracitados.

Tabela 2 – Comparação entre os métodos de medida de potencial mátrico do solo.

Método	Vantagens	Desvantagens
Método da Câmara de Richards	Mede potenciais mátricos com alta precisão	Alta sensibilidade à variação de temperatura. Alto custo de equipamento e manutenção. Requer pessoal treinado
Método do Tensiômetro	Mede potenciais mátricos de forma contínua. Requer baixa manutenção	Custo médio de equipamento e manutenção. Não é indicado para solos com alta condutividade hidráulica. Requer pessoal treinado
Método do Papel Filtro	Simples, fácil de operar e com baixo custo de equipamento e manutenção	Menor precisão e resolução dos dados obtidos.

Fonte: Autor, 2023.

3. DESENVOLVIMENTO

3.1. COLETA DO SOLO

As amostras utilizadas neste estudo foram preparadas a partir de solo, de aterro, coletado no terreno próximo ao NUGEO – Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas pertencente à UFOP (Universidade Federal de Ouro Preto), com coordenadas geográficas $20^{\circ} 23' 50.577''$ de latitude sul e $43^{\circ} 30' 27.389''$ de longitude oeste, situada a 1179 m acima do nível do mar.

Para coletar as amostras de solo, foi selecionada uma área passível a atividades agrícolas, onde será instalado posteriormente um sistema de irrigação automatizado que se beneficiará dos estudos do solo presentes neste trabalho.

De modo a evitar a presença de raízes, retirou-se uma camada superficial do solo, mediante a capina com enxadas. Posteriormente, com o auxílio de pás, foi escavada uma vala de aproximadamente 60 cm de profundidade, representada pela Figura 6.

Figura 6 - Vala utilizada para retirar a amostra indeformada de solo



Fonte: Autor, 2022.

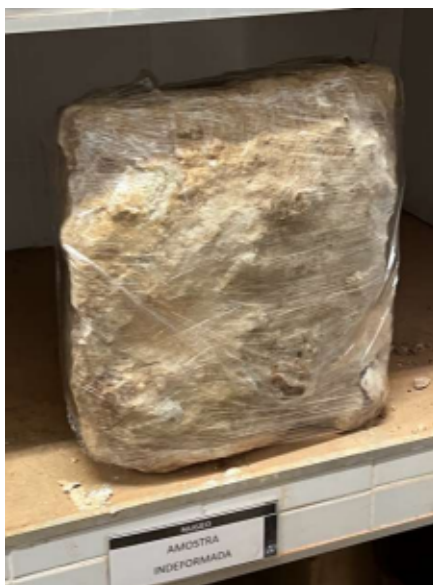
A partir da vala mencionada anteriormente, um bloco cúbico de amostra indeformada com dimensões próximas a 30 cm foi retirado com o auxílio de pás manuais, enxadas e facões. A amostra foi envolvida em plástico filme e armazenada em uma sala úmida no NUGEO/UFOP, como pode ser visto nas Imagens 7 e 8.

Figura 7 – Amostra indeformada do solo



Fonte: Autor, 2022.

Figura 8 – Amostra indeformada do solo armazenada em sala com umidade controlada



Fonte: Autor, 2022.

3.2. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO – MASSA ESPECÍFICA APARENTE

Logo após a coleta do solo e seu transporte para o laboratório, foi retirada uma amostra, adequada para a realização do ensaio de determinação de sua massa específica aparente. Para isso, seguiu-se o procedimento descrito no anexo da NBR 16867 (ABNT, 2020), utilizando equipamentos e instrumentos apropriados do Laboratório de Mecânica dos Solos do NUGEO/UFOP. A amostra utilizada no ensaio pode ser vista na Figura 9.

Figura 9 – Amostra indeformada do solo envolvida em parafina líquida



Fonte: Autor, 2023.

A partir dos procedimentos realizados de acordo com a norma NBR 16867, (ABNT, 2020) foram obtidos parâmetros necessários para, em um primeiro momento, calcular o volume do corpo de prova, utilizando a Equação 3.1:

$$V_{cp} = \frac{(M_p - M_{p(i)})}{P_w} - \frac{(M_p - M_u)}{P_{parafina}} \quad (3.1)$$

V_{cp} é o volume do corpo de prova de solo, expresso em centímetros cúbicos (cm^3);

M_p é a massa do corpo de prova parafinado, expressa em gramas (g);

$M_{p(i)}$ é a massa do corpo de prova parafinado e imerso em água, expressa em gramas (g); M_u é a massa do corpo de prova, expressa em gramas (g);

P_{paraf} é a massa específica aparente da parafina, expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm^3);

P_w é a massa específica da água (considerar igual a $1 \text{ g}/\text{cm}^3$).

Utilizando o resultado da Equação 3.1, foi possível calcular a massa específica aparente natural da amostra, a partir da Equação 3.2:

$$p_{nat} = \frac{M_u}{V_{cp}} \quad (3.2)$$

Em que:

P_{nat} é a massa específica aparente natural da amostra, expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm^3);

M_u é a massa do corpo de prova, expressa em gramas (g);

V_{cp} é o volume do corpo de prova, expresso em centímetros cúbicos (cm^3).

3.3. ENSAIO COM PAPEL-FILTRO

Para a medição da sucção do solo utilizando papel-filtro e, conseqüentemente, a CRA, foi adotada a metodologia padronizada pela norma D5298-16 da American Society for Testing and Materials (ASTM, 2016). A fim de obter a curva de retenção de água no solo por meio deste método, amostras foram preparadas com diferentes teores de umidade.

O ensaio foi conduzido no Laboratório de Mecânica dos Solos do NUGEO/UFOP, utilizando os equipamentos e instrumentos disponíveis neste local.

3.3.1. PREPARO DAS AMOSTRAS

Inicialmente, para a preparação das amostras de solo, foi necessário utilizar uma balança de precisão com erro máximo de 0,05 g para pesar 22 anéis com 3,04 cm de diâmetro e 5,13 cm de altura, que foram utilizados como moldes. Uma representação do que foi feito, pode ser observado pela Figura 10.

Figura 10 – Pesagem individual dos moldes



Fonte: Autor, 2023.

Posteriormente, o bloco de amostra, armazenado na sala úmida do NUGEO, foi talhado em 22 amostras menores, como pode ser observado na Figura 11, utilizando-se um canivete e um pincel como ferramentas, de forma que fossem encaixadas nos moldes preparados anteriormente.

Figura 11 – Preparação das amostras



Fonte: Autor, 2023.

Por fim, as amostras foram encaixadas nos moldes e submetidas a nova pesagem para prosseguimento do ensaio. Em seguida, em consonância com as diretrizes estabelecidas na norma D5298-16, procedeu-se a saturação das amostras em água destilada durante 48 horas, a fim de eliminar possíveis bolhas de ar. Para isso, utilizou-se papel filtro comum disposto na parte inferior do cilindro, seguido de uma pedra porosa e submergindo-as parcialmente em um recipiente com água como pode ser observado na Figura 12.

Figura 12 – Sistema para saturação das amostras



Fonte: Autor, 2023.

Após a saturação, algumas amostras foram retiradas e deixadas para secar por 24 horas, de modo a alcançarem diferentes níveis de umidade. A massa das amostras foi monitorada constantemente até que atingissem uma determinada umidade volumétrica, momento em que se estabilizavam com um valor igual ou ligeiramente inferior.

3.3.2. EXECUÇÃO DO ENSAIO

O ensaio foi realizado inteiramente em conformidade com a norma D5298-16 com a utilização do papel filtro modelo Whatman nº. 42 da GE Healthcare com 125mm de diâmetro. Inicialmente deu-se a preparação do papel filtro. Por conta dos papéis serem muito maiores que as amostras, foram confeccionadas 22 unidades com 53 mm de diâmetro e 11 unidades com 48 mm de diâmetro, com o uso de uma tesoura, pinças metálicas devidamente limpas e luvas de proteção a fim de preservar a umidade dos papéis, que em seguida, foram depositados em um recipiente metálico com tampa. O recipiente, foi levado a uma estufa com temperatura controlada a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$, de acordo com as instruções da norma de padronização do ensaio, permanecendo por um período de 24 horas para secar.

Para cada par de amostras, cuja quantidade de água foi ajustada para corresponder a uma determinada umidade volumétrica e, conseqüentemente, a um determinado potencial matricial, procedeu-se a montagem das amostras seguindo a disposição estabelecida pela norma D5298-16 para a medida do potencial matricial. Para tal, um papel filtro com 58 mm de diâmetro foi colocado entre dois papéis-filtro com 53 mm de diâmetro, e esses foram posicionados entre duas amostras de solo com a mesma umidade. O sistema foi construído envolvendo o conjunto completamente por plástico filme e, em seguida, envolvido em uma camada de papel alumínio, como mostrado nas Figuras 13 e 14.

Figura 13 – Montagem detalhada do sistema



Fonte: Autor, 2023.

Figura 14 – Disposição final



Fonte: Autor, 2023.

As amostras foram armazenadas em uma caixa de isopor, com grande capacidade, em uma sala com temperatura controlada. Após o fechamento da caixa, as amostras foram deixadas em repouso por um período de 14 dias para assegurar o equilíbrio termodinâmico entre a água no solo e o papel-filtro presente nos recipientes.

Ao final do período de equilíbrio, os papéis filtros centrais de cada conjunto foram retirados com o auxílio de pinças e transferidos rapidamente (em cerca de 5 segundos) para

capsulas de alumínio, cujas massas foram previamente medidas em uma balança de grande acurácia e registradas como T_c . A massa total da cápsula com o papel-filtro foi medida em balança analítica e registrada como M_1 . Em seguida, as cápsulas foram colocadas em uma estufa a $110 \pm 5^\circ C$ por um período de 2 horas para secagem.

Após a secagem, cada capsula foi retirada da estufa e transferida para um dessecador. Depois de esfriar por aproximadamente 5 minutos, a massa total da capsula com o papel-filtro foi medida e registrada como M_2 . Em seguida, o papel filtro foi removido e capsula teve sua massa medida e registrada como T_h .

De acordo com a norma D5298-16, foram calculados para cada papel-filtro por meio das Equações 3.3, 3.4 e 3.5

$$M_f = M_2 - T_h \quad (3.3)$$

$$M_w = M_1 - M_2 + T_h - T_c \quad (3.4)$$

$$w_f = 100 \frac{M_w}{M_f} \quad (3.5)$$

Em que:

M_f = massa do papel-filtro seco, em gramas;

M_1 = massa do sistema recipiente papel-filtro úmido, em gramas;

M_2 = massa seca total, em gramas;

T_h = massa do recipiente quente, em gramas;

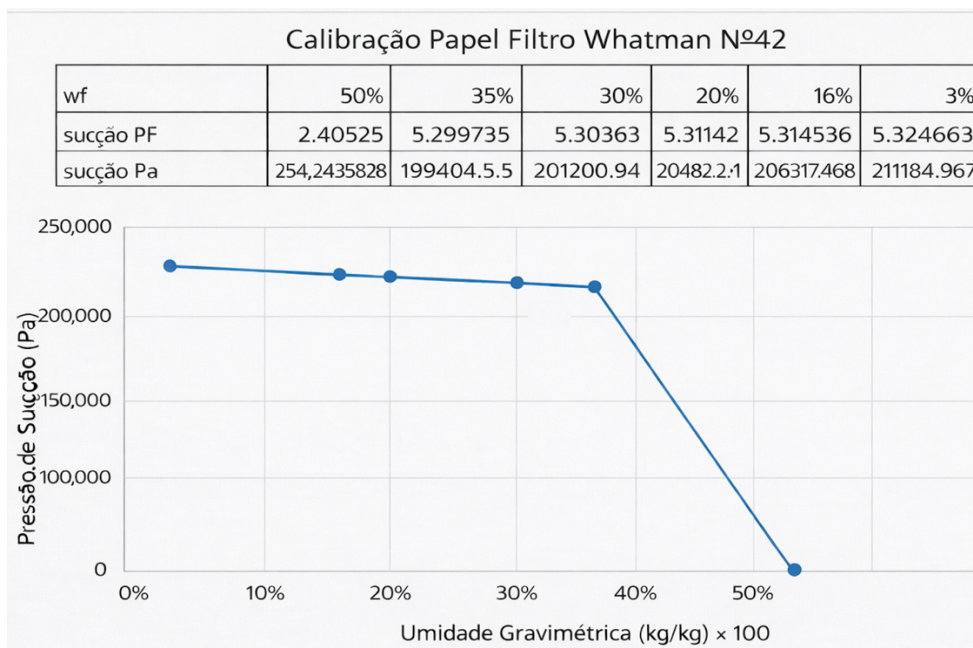
M_w = massa de água no papel-filtro, em gramas

T_c = massa do recipiente frio, em gramas;

W_f = teor de água no papel-filtro, em porcentagem.

A partir dos valores de w_f obtidos no ensaio, foi possível determinar o potencial matricial (sucção) das amostras de solo ensaiadas. Em seguida, esse potencial matricial foi utilizado na curva de calibração do papel-filtro (conforme a norma D5298-16), a fim de obter os valores de umidade volumétrica do solo para cada sucção avaliada no ensaio. Apresentada na Figura 15, essa conexão é facilmente observada, exibindo o gráfico de ajuste para o Papel Filtro Whatman N°42. Tal gráfico é fundamental para transformar as leituras de umidade do papel filtro em dados de potencial de água do solo, viabilizando uma análise exata da acessibilidade de água para as plantas, conforme a metodologia ajustada da norma ASTM (2016).

Figura 15 – Curva de Calibração Papel Filtro Whatman N°42



Fonte: Adaptado de ASTM, 2016.

A CRA foi gerada a partir dos valores de umidade volumétrica obtidos para cada ponto de sucção, utilizando os modelos de ajuste propostos por Van Genuchten (1980). Foram utilizados tanto o modelo tradicional proposto pelo autor, quanto o modelo adaptado (Dual-VG), este último indicado para solos que apresentam duas classes de poros contratantes, conhecidos como bimodais (dois pontos de entrada de ar).

3.4. CALIBRAÇÃO DO SENSOR DE UMIDADE DO SOLO

No projeto em questão, utilizou-se o sensor capacitivo de umidade do solo (Figura 16), desenvolvido por Rêgo Segundo et al. (2019). Para calibrar este sensor, recorreu-se ao método tradicional de estufa como padrão de aferição. O procedimento consistiu em determinar a conexão entre a permissividade relativa do solo e a umidade, viabilizando a transformação das leituras do sensor em dados exatos do nível de água no solo.

3.4.1. PREPARAÇÃO DA AMOSTRA

O presente método foi conduzido no Laboratório de Controle e Automação (LAB CAM) /UFOP, utilizando um recipiente construído em PVC, conforme a Figura 17, com aproximadamente 8 cm de diâmetro, um tampão de PVC e uma tela de náilon. O tampão foi cortado para permitir o escoamento de água e, em seguida, foi adicionada a tela de náilon pa-

ra evitar que a amostra de solo escapasse do recipiente durante o experimento.

Foi definida uma altura de 12 cm para a coluna a ser preenchida pela amostra deformada, que foi suficiente para cobrir completamente o sensor. O diâmetro interno do recipiente foi calculado em 7,12 cm, resultando em um volume de 475,1 cm³. A massa específica do solo, de 2 g/cm³, foi determinada utilizando-se o método da balança hidrostática, e a partir dela, a massa de solo necessária para o recipiente foi calculada em 950,2 g.

Na Figura 16, pode-se ver um exemplo de sensor de umidade do solo. Este dispositivo, que é essencial para recolher os dados, desempenha um papel muito importante na medição da umidade, e a sua eficácia é vital para garantir que os resultados obtidos sejam exatos e confiáveis.

Figura 16 – Sonda utilizada no experimento



Fonte: Autor, 2023.

Na Figura 17, observa-se o tipo de vasilhame utilizado durante a experiência. Este contentor foi escolhido com atenção, para ter a certeza de que era possível regular e acompanhar as propriedades do solo de maneira uniforme e, assim, calibrar com exatidão o sensor de umidade do solo.

Figura 17 – Recipiente usado



Fonte: Autor, 2019.

3.4.2. REALIZAÇÃO DA CALIBRAÇÃO

O recipiente foi preenchido com aproximadamente 950 g de amostra deformada do solo, a qual foi destorroada e peneirada previamente. Em seguida, a amostra foi compactada no recipiente de PVC e, em seguida, colocada em contato com água por 24 horas a fim de absorver umidade até que fosse saturada por capilaridade. Após o período de saturação da amostra de solo, o sensor foi inserido de modo que ficasse completamente coberto.

Logo que a amostra ficou totalmente saturada, ela foi posicionada em uma balança, como ilustrado nas Figuras 18 e 19. Visando assegurar a exatidão da leitura, o peso do sensor e do frasco foi zerado (subtraído) no painel de controle. Depois disso, a amostra foi levada para uma estufa ajustada a 45°C para que fosse libertando, aos poucos, umidade e, por efeito, massa. Por meio de um microcontrolador e um software de gestão, os dados captados pela balança eram salvos e a mudança de massa do conjunto, amostra e frasco, era vigiada. No instante em que a massa estabilizou, o frasco foi removido da estufa juntamente com a balança e o teste foi finalizado.

Figura 18 – Sistema balança e recipiente



Fonte: Autor, 2023.

Figura 19 – Sistema balança, recipiente e microcontrolador



Fonte: Autor, 2023.

Para obter a massa do solo completamente seco, a amostra foi colocada em outro recipiente, que foi submetido à estufa com temperatura de 110 ± 5 °C, sendo retirada e tendo sua massa mensurada após 24 horas. Com os dados coletados pelo sistema de supervisão, transferidos para o Excel para análise, foi viável criar, usando regressão linear, um modelo que cal-

culava a umidade do solo com base nas suas constantes dielétricas (ϵ) medidas pelo equipamento (RÊGO SEGUNDO, 2010). Essa adaptação considerou a permissividade relativa da água a 25°C, que gira em torno de 78,3, e a do ar, que corresponde a 1.

4. RESULTADOS

4.1. CALIBRAÇÃO DO SENSOR DE UMIDADE DO SOLO

Durante o período de 11 dias de experimentação, foram gerados e armazenados em torno de três mil dados referentes, sobretudo, à massa do material em diferentes graus de umidade e à permissividade relativa ou permissividade elétrica da amostra. A fim de facilitar a manipulação dos dados, todos foram exportados do sistema supervisorio para uma planilha do Excel. Alguns desses dados podem ser visualizados na Tabela 3.

Tabela 3 – Dados diários exportados

Dia	Massa (g)	Umidade Ref. (%)	Umidade Reg. (%)
1	1130,5	19,7	20,8
2	1120,6	18,7	19
3	1092,8	15,7	15,7
4	1065,4	12,8	13,1
5	1040,7	10,2	10,3
6	1016,5	7,6	7,4
7	1000,8	5,9	5,7
8	991	4,8	4,8
9	983,9	4,2	4,3
10	978,1	3,7	3,7
11	970,9	2,8	2,8

Fonte: Autor, 2023.

A partir da Equação 4.1, foram realizados cálculos de distintos valores de umidade de referência com base na massa do material seco e sua massa em diferentes níveis de umidade.

$$U(\%) = \frac{M_u - M_s}{M_s} \times 100 \quad (4.1)$$

Em que:

U (%) = Umidade de referência do solo em peso e base seca, em porcentagem;

M_u = Massa do solo úmido, em gramas;

M_s = Massa do solo completamente seco, em gramas.

De acordo com os dados obtidos foi desenvolvido um modelo matemático de regressão, através de uma planilha do Excel e do método dos mínimos quadrados, para estimar uma curva de calibração para o sensor através dos dados de sua permissividade elétrica e sua umidade. O modelo que mais se adequou aos dados de permissividade elétrica do solo e sua umidade foi expresso pela Equação 4.2.

$$y = Ax^3 - Bx^2 + Cx - D \quad (4.2)$$

em que:

y = valor de umidade;

x = Valor da permissividade relativa;

A = Coeficiente de regressão;

B = Coeficiente de regressão;

C = Coeficiente de regressão;

D = Coeficiente de regressão.

Os valores de umidade gravimétrica obtidos pela Equação 4.1 foram convertidos em umidade volumétrica através da Equação 4.2, utilizando a massa específica aparente do solo determinada anteriormente (Equação 3.2). Esta conversão é fundamental para relacionar diretamente as leituras do sensor com a Curva de Retenção de Água, que é expressa em umidade volumétrica. A umidade volumétrica representa a fração do volume total do solo ocupada pela água, sendo a grandeza fisicamente mais relevante para estudos de retenção hídrica.

Na Tabela 4, abaixo, pode ser verificado o valor dos coeficientes de A, B, C e D, bem como o valor de R^2 (coeficiente de determinação) obtidos pela Equação 4.2

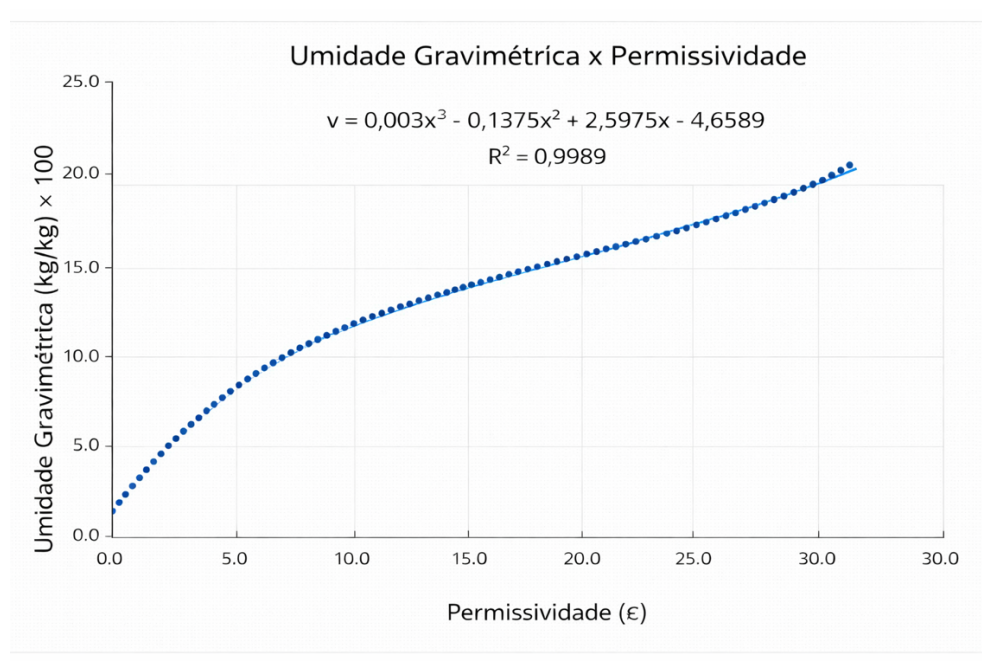
Tabela 4 – Valores dos coeficientes obtidos para o modelo da Equação 4.2

A	B	C	D	R^2
0.003	-0,1375	2,5975	-4,6589	0,9989

Fonte: Autor, 2023.

A curva de calibração gerada a partir do modelo de regressão pode ser vista na Figura 20. Pode-se observar uma relação não-linear entre a permissividade elétrica e a umidade do solo.

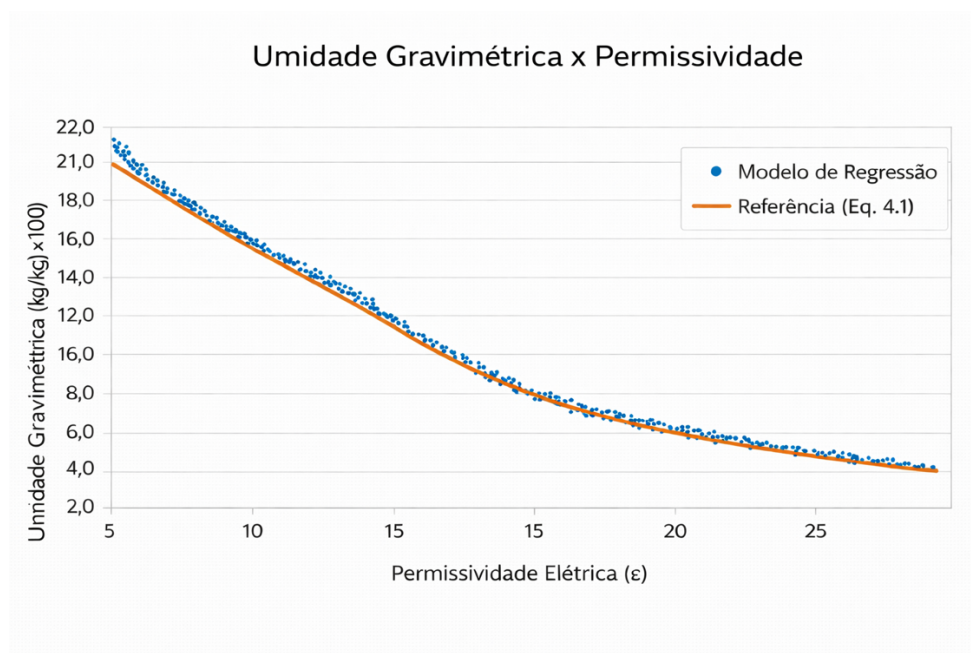
Figura 20 – Curva de calibração para a relação entre a umidade do solo e a permissividade elétrica.



Fonte: Autor, 2023.

A partir da curva de calibração, foi possível estimar a umidade do solo através da leitura de permissividade elétrica realizada pelo sensor. Na Figura 21, é possível comparar os valores de umidade obtidos pelo modelo de regressão (linha azul) com os valores de umidade de referência (linha laranja) calculados pela Equação 4.1. Constata-se que os resultados gerados pela regressão se afastam ligeiramente dos valores considerados ideais. Essa diferença, contudo, demonstra a precisão do sistema de análise, ao mesmo tempo que possibilita determinar o grau de incerteza da aferição, possivelmente influenciado por aspectos como a heterogeneidade intrínseca do solo.

Figura 21- Comparação entre as unidades gravimétricas de referência e calculadas.



Fonte: Autor, 2023.

A conversão dos dados de umidade gravimétrica para volumétrica (Equação 4.2) permitiu estabelecer uma relação direta entre as leituras do sensor e a Curva de Retenção de Água do solo. Considerando a massa específica aparente do solo de aproximadamente $1,90 \text{ g/cm}^3$, a faixa de umidade volumétrica medida pelo sensor variou de $0,05$ a $0,37 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, compatível com a faixa observada na CRA obtida pelo método do papel-filtro.

O coeficiente R^2 , apresentado na Tabela 4 indica o quão bem o modelo se ajusta aos dados experimentais, e um valor de $0,9989$ indica um ajuste muito bom do modelo aos dados (precisão de $99,89\%$), sugerindo que a variação na permissividade relativa a é um preditor confiável para a variação na umidade do solo.

4.2. CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO

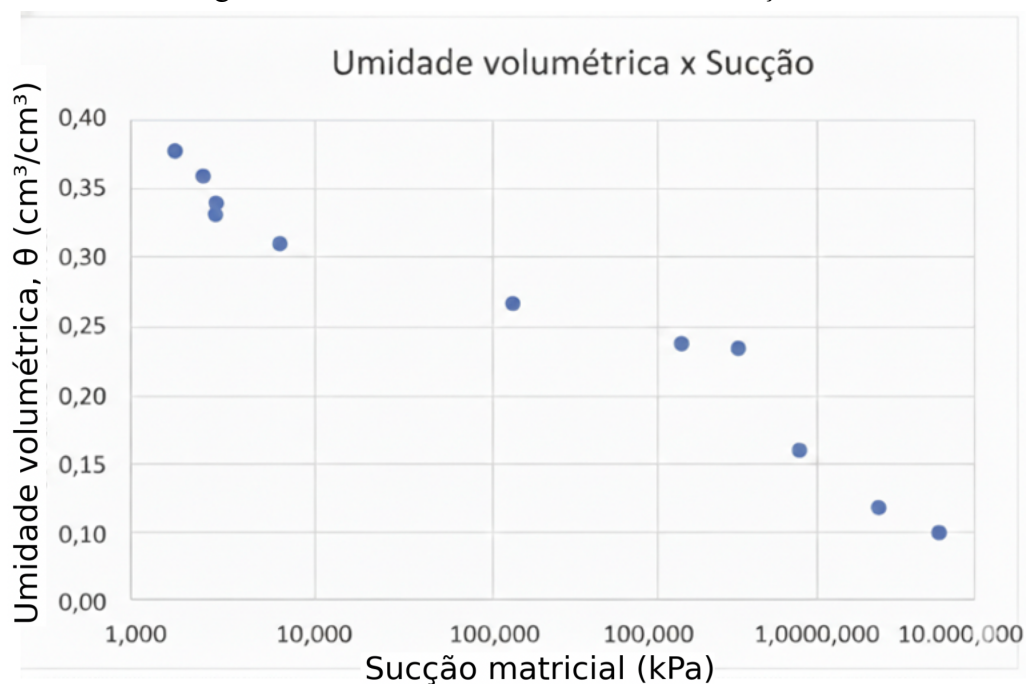
Os valores experimentais de sucção e umidade volumétrica estão apresentados na Tabela 5. Além disso, o gráfico que representa a relação entre ambos pode ser visto na Figura 22.

Tabela 5 – Valores de sucção e umidade volumétrica obtidos pelo ensaio do papel-filtro.

Sucção (kPa)	Umidade Volumétrica (θ)
1,7928	0,37
2,6566	0,35
3,1088	0,32
3,0526	0,31
7,8433	0,28
147,9920	0,24
2578,3916	0,19
1290,8605	0,19
6520,6471	0,09
21642,1644	0,04
5299,3640	0,02

Fonte: Autor, 2023.

Figura 22 – Umidade volumétrica versus sucção matricial

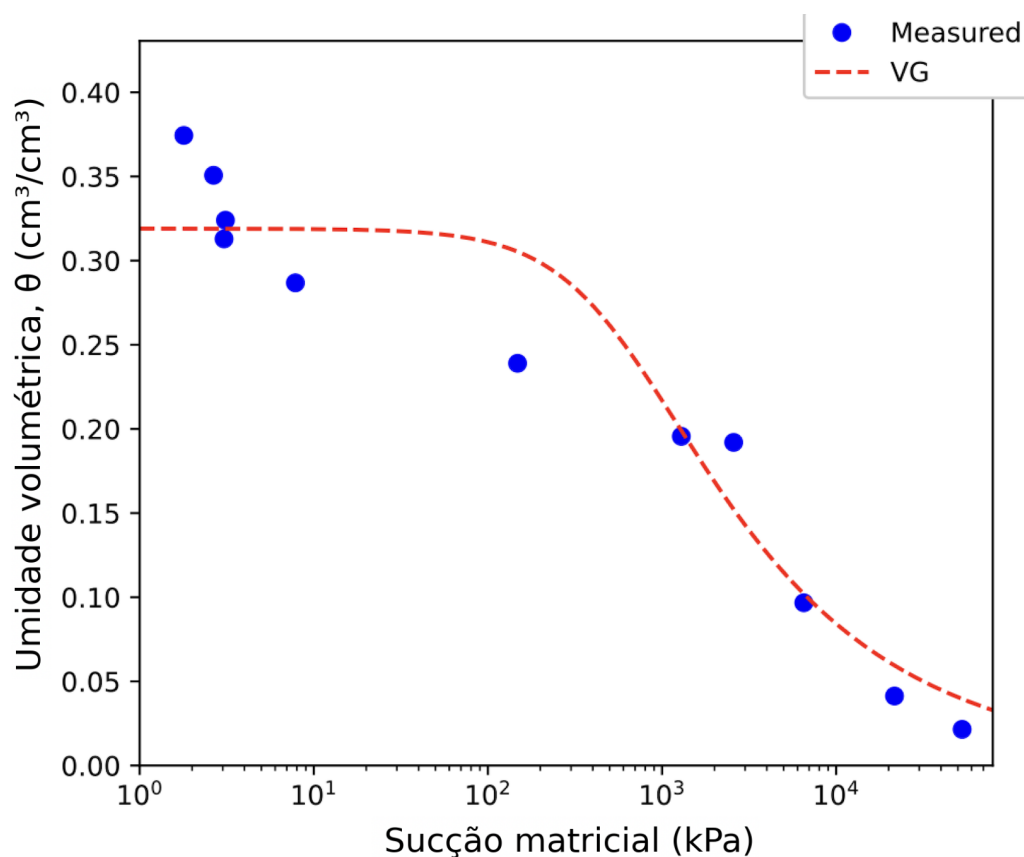


Fonte: Autor, 2023

Para ajustar os resultados obtidos pelo método do papel-filtro, foi utilizado o webapp SWRC – Fit produzido por Seki (2007). A amostra teve sua curva de retenção ajustada pelo

modelo de Van Genuchten (1980), para ter um resultado baseado no método mais utilizado. Entretanto por se tratar de um solo que apresenta distribuição heterogênea dos poros o modelo não ajustou de forma satisfatória a CRA, apesar de um alto R^2 , como pode ser observado na Figura 23.

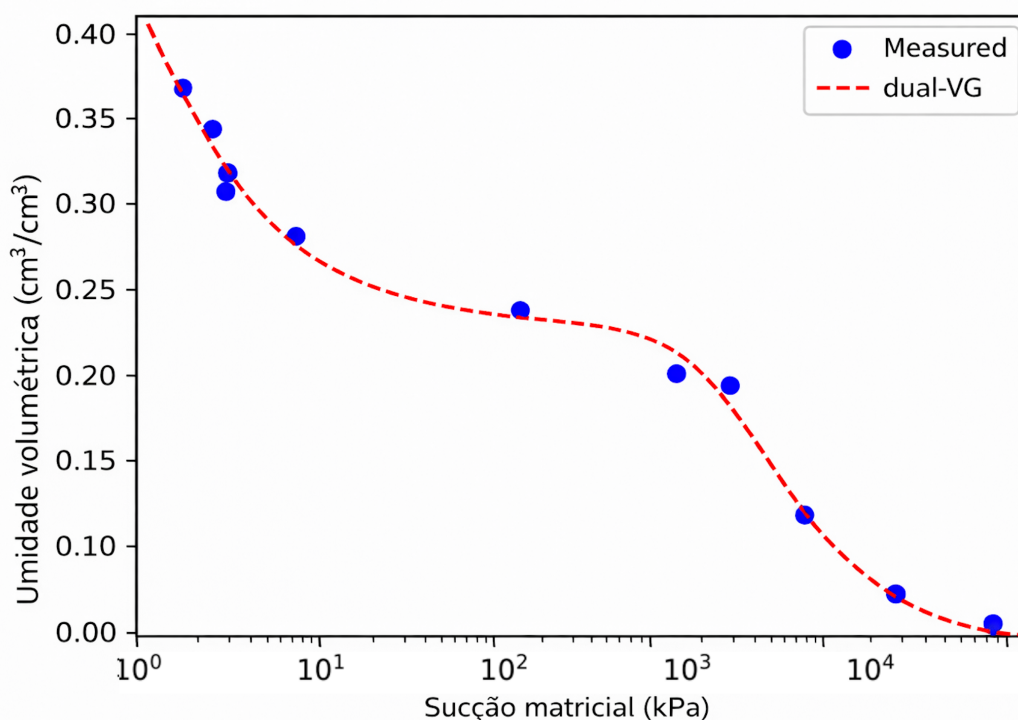
Figura 23 – CRA a partir do Modelo de Van Genuchten



Fonte: Autor, 2023.

Para obter um ajuste mais preciso, foi necessário utilizar um modelo que permitisse a construção de uma curva bimodal, ou seja, duas entradas de ar. O modelo selecionado apresentou um desempenho excelente, como pode ser observado na Figura 24, e foi uma adaptação multimodal do modelo de Van Genuchten, denominada Dual-VG (SEKI, 2007).

Figura 24 – CRA a partir do Modelo dual-Van Genuchten



Fonte: Autor, 2023.

Analisando a Curva de Retenção de Água (CRA), percebe-se que o solo analisado demonstra uma notável habilidade em reter água. A capacidade de campo (CC) manifesta-se numa humidade volumétrica que ultrapassa 0,28 (numa sucção de -10 a -33 kPa), enquanto o ponto de murcha permanente (PMP) ocorre por volta de 0,19 (sucção de -1500 kPa). Essa particularidade do solo pode gerar efeitos consideráveis na gestão agrícola, já que a elevada capacidade de retenção hídrica pode influenciar o crescimento das plantas. Em certas situações, assegura água suficiente para as plantas por mais tempo. Em contrapartida, a umidade em excesso pode provocar falta de oxigênio e o surgimento de ambientes anaeróbicos no solo, prejudicando o desenvolvimento das raízes (PRIMAVESI, 2002).

Em conclusão, é preciso estudar a CRA para definir a área de água disponível para as plantas, levando em conta a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente. Visando um controle automatizado de irrigação eficaz, a Embrapa ressalta a relevância de empregar ao menos dois sensores, o que assegura a exatidão dos dados e uma medição que represente a área, atenuando a variabilidade do solo. A lógica de controle, neste caso, seria acompanhar continuamente a média das leituras dos sensores inseridos na zona radicular. Quando a umidade do solo alcançar um patamar pré-definido (um ponto de sucção abaixo da capacidade de campo, mas acima do ponto de murcha), o sistema de irrigação é ativado de modo automático.

O sistema irriga até que a umidade do solo volte à capacidade de campo, cessando o fornecimento de água para evitar desperdício e excesso de saturação

5. CONCLUSÃO

Após uma avaliação minuciosa, ficou claro que compreender a Curva de Retenção de Água (CRA) é fundamental para uma irrigação eficiente. A pesquisa revelou que o solo examinado apresenta boa capacidade de armazenamento hídrico, com a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP) estabelecidos em níveis de umidade volumétrica de aproximadamente 0,28 e 0,19, respectivamente. Essa caracterização é crucial para determinar a quantidade de água disponível para as plantas e para fundamentar decisões de manejo da irrigação.

No que se refere ao desenvolvimento metodológico, o estudo permitiu ajustar um modelo de calibração para o sensor capacitivo de umidade do solo, proposto por Rêgo Segundo et al. (2019), utilizando o método padrão de estufa como referência. O modelo de regressão linear obtido demonstrou que a variação da permissividade relativa explica satisfatoriamente a variação da umidade do solo, com um coeficiente de determinação de 99,89%, indicando um bom ajuste para fins de monitoramento.

As conclusões deste estudo podem ser aplicadas diretamente na automação da irrigação. O conhecimento da Curva de Retenção de Água (CRA) possibilita um gerenciamento hídrico mais assertivo e eficiente. Seguindo as recomendações da Embrapa, torna-se viável implementar sistemas de monitoramento contínuo com sensores de umidade, acionando a irrigação automaticamente quando a umidade atinge níveis críticos e interrompendo-a quando o solo retorna à condição ideal. Essa abordagem não apenas otimiza o uso da água, mas também protege as plantas contra estresses hídricos por deficiência ou excesso.

REFERÊNCIAS

ALI, Hossain. **Fundamentals of irrigation and on-farm water management**. New York, NY: Springer, 2010. 560 p. v. 1. ISBN 978-1-4419-6335-2.

ALI, Hossain. **Fundamentals of irrigation and on-farm water management**. New York, NY: Springer, 2011. 571 p. v. 2. ISBN 978-1-4419-7637-6.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D5298-03: Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper**. Philadelphia, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023: informação e documentação: referências: elaboração**. Rio de Janeiro, 2023.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper**. Norma D5298-16. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2016.

BARBOSA, José Wilian. **Sistema de irrigação automatizado utilizando plataforma Arduino**. 2013. Disponível em: <https://cepein.femanet.com.br/BDigital/arqTccs/1011330043.pdf>. Acesso em: 20 maio 2022.

BICALHO, K.; CUPERTINO, K.; BERTOLDE, A. Evaluation of the suction calibration curves for Whatman 42 filter paper. In: **Advances in Unsaturated Soils**. [S. l.]: CRC Press, 2013. p. 225–230.

CAMPBELL, G. S.; SMITH, D. M.; TEARE, B. L. Application of a dew point method to obtain the soil water characteristic. **Experimental Unsaturated Soil Mechanics**, v. 112, p. 71–77, 2007.

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**, v. 28, n. 4, p. 585–596, 2004.

COELHO, S. L.; TEIXEIRA, A. dos S. Avaliação do tensiômetro eletrônico no monitoramento do potencial matricial de água no solo. **Engenharia Agrícola**, v. 24, n. 3, p. 536–548, 2004.

COSTA, W. A.; OLIVEIRA, C. A. da S.; KATO, E. Modelos de ajuste e métodos para a determinação da curva de retenção de água de um Latossolo Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 2, p. 515–523, 2008. DOI: 10.1590/S0100-06832008000200006.

CRUZ, T. M. L. et al. Avaliação de sensor capacitivo para o monitoramento do teor de água do solo. **Revista Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 1, p. 33–45, 2010.

DE OLIVEIRA, S. **Internet das Coisas com ESP8266, Arduino e Raspberry Pi**. 2. ed. Atualizado para ESP32. [S. l.]: Novatec Editora, 2021.

EMBRAPA. **Erosão causa prejuízos econômicos e ambientais no Paraná**. 2008. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/36905812/erosao-causa-prejuizos-economicos-e-ambientais-no-parana>. Acesso em: 10 fev. 2023.

FERNANDES, Manuel de Matos. **Mecânica dos solos: conceitos e princípios fundamentais**. [S. l.]: Oficina de Textos, 2018. 441 p.

GARDNER, C. M. K.; DEAN, T. J.; COOPER, J. D. Soil water content measurement with a high-frequency capacitance sensor. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 71, n. 4, p. 395–403, 1998.

HANSON, B.; ORLOFF, S.; SANDEN, B. **Monitoring soil moisture for irrigation water management**. [S. l.]: Regents of the University of California, 2007.

JESUS, A. M. de et al. Viabilidade econômica de um sistema de irrigação automatizado acionado via web. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 5, p. 53457–53477, 2021. DOI: 10.34117/bjdv.v7i5.30542.

JIMÉNEZ, Anabel de Los Ángeles Calva. **Calibração do sensor de umidade do solo modelo YL-69 para manejo da irrigação**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2018.

KLEIN, V. A.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Água disponível em um Latossolo Vermelho argiloso e murcha fisiológica de culturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 3, p. 646–650, 2006.

LEE, Jaenam. Evaluation of automatic irrigation system for rice cultivation and sustainable agriculture water management. **Sustainability**, 2022. DOI: 10.3390/su141711044.

LOURENÇO, S. et al. Determination of the soil water retention curve with tensiometers. In: **Springer Proceedings in Physics**. Berlin: Springer, 2007. p. 95–102.

MANUAL de irrigação. In: SALASSIER, B.; MANTOVANI, E. C.; SOARES, A. **Manual de irrigação**. 9. ed. Viçosa: Editora UFV, 2019.

MARINHO, F. A. M. Measurement of suction using the filter paper method. In: **Brazilian Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**, 10., 1994. Proceedings... Foz do Iguaçu: ABMS, 1994. p. 515–522.

MENDES, Paulo Cesar de Souza. **Caracterização de um sensor para medição de umidade do solo com termo-resistor a temperatura constante**. 2006. Tese (Doutorado) – Universidade Federal da Bahia.

METER GROUP. **Sensor de umidade do solo: qual sensor de solo é perfeito para você?** 2024. Disponível em: <https://metergroup.com/br/measurement-insights/which-soil-sensor-is-perfect-for-you/>. Acesso em: 19 jun. 2024.

MIRANDA, F. R. et al. Calibração do sensor dielétrico ECH2O em dois tipos de solo. **Revista Ciência Agronômica**, v. 38, n. 3, p. 317–321, 2007.

MUÑOZ-CARPENA, R.; RITTER, A.; BOSCH, D. Field methods for monitoring soil water status. In: ÁLVAREZ-BENEDÍ, J.; MUÑOZ-CARPENA, R. (eds.). **Soil-Water-Solute Process Characterization**. Boca Raton: CRC Press, 2005. p. 167–195.

NASCIMENTO, P. dos S. **Análise do uso da curva de retenção de água no solo determinada por diferentes métodos e planilha para manejo da irrigação**. 2009. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia.

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, n. 2, p. 226–269, 2001.

PEDERSEN, S.; LIND, K. M. (eds.). **Precision agriculture: technology and economic perspectives**. Cham: Springer, 2017.

PEREIRA, L. S.; OWEIS, T.; ZAIRI, A. Irrigation management under water scarcity. **Agricultural Water Management**, v. 57, n. 3, p. 175–206, 2002.

PIRES, L. F.; BACCHI, O. O. S. Determinação da curva de retenção da água no solo com auxílio da transmissão de raios gama. Disponível em: https://www.ipen.br/biblioteca/cd/inac/2002/ENAN/E08/E08_147.PDF. Acesso em: 14 fev. 2023.

POWRIE, W. **Soil mechanics: concepts and applications**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2013.

RÊGO SEGUNDO, A. K. **Desenvolvimento de sensor de teor de água do solo e de sistema de controle e automação em malha fechada para uso em irrigação**. 2010. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa.

SEKI, K. **SWRC fit**. Disponível em: <https://swrcfit.sourceforge.net/>. Acesso em: 8 mar. 2023.

SILVA, A. M. da. **Banco de dados de curvas de retenção de água de solos brasileiros**. 2005. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo.

SILVA, D. O. M. **Validação de um sensor de determinação da umidade do solo para o manejo da irrigação**. 2013. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Vale do São Francisco.

TESTEZLAF, Roberto. **Irrigação: métodos, sistemas e aplicações**. 2011. Disponível em: <https://bibliotecadigital.seplan.planejamento.gov.br/handle/iditem/451>. Acesso em: 20 maio 2022.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Incorporação da densidade no ajuste de dois modelos à curva de retenção de água no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 2, p. 305–314, 2002.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, n. 5, p. 892–898, 1980.

VII Plano Diretor da Embrapa: a agricultura brasileira. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**, 2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br/vii-plano-diretor/a-agricultura-brasileira>. Acesso em: 20 maio 2022.