

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

Marcelo Lovato Brum

**CALIBRAÇÃO DE SENSORES CAPACITIVOS DE BAIXO CUSTO
UTILIZANDO A PLATAFORMA ARDUÍNO**

Santa Maria, RS

2022

Marcelo Lovato Brum

**CALIBRAÇÃO DE SENSORES CAPACITIVOS DE BAIXO CUSTO
UTILIZANDO A PLATAFORMA ARDUÍNO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração Engenharia de Água e Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Agrícola.**

Orientador: Prof. Ph.D. Alexandre Swarowsky

Santa Maria, RS
2022

Brum, Marcelo
Calibração de sensores capacitivos de baixo custo
utilizando a plataforma arduino / Marcelo Brum.- 2022.
104 p.; 30 cm

Orientador: Alexandre Swarowsky
Coorientadores: Adriano Arru  Melo, Rodrigo Varella
Tambara
Disserta o (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós
Gradua o em Engenharia Agrícola, RS, 2022

1. Prototipagem 2.  gua no solo 3. Calibra o de
sensores I. Swarowsky, Alexandre II. Arru  Melo, Adriano
III. Varella Tambara, Rodrigo IV. Título.

Sistema de gera o automática de ficha catalográfica da UFSC. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Dire o da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

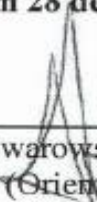
Declaro, MARCELO BRUM, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Disserta o) foi por mim elaborada e que as informa es necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obten o de qualquer outro grau acad mico, estando ciente de que a inveracidade da presente declara o poderá resultar na anula o da titula o pela Universidade, entre outras consequências legais.

Marcelo Lovato Brum

**CALIBRAÇÃO DE SENSORES CAPACITIVOS DE BAIXO CUSTO
UTILIZANDO A PLATAFORMA ARDUÍNO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração Engenharia de Água e Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Agrícola**.

Aprovado em 28 de fevereiro de 2022



Alexandre Swarowsky, Ph.D (UFSM)
(Orientador)



Anderson Clayton Rhoden, Dr. (UCEFF) - Videoconferência



Documento assinado digitalmente
DALVAN JOSE REINERT
Data: 28/04/2022 10:56:44-0300
Verifique em <https://verificador.it.br>

Dalvan José Reinert, Ph.D (UFSM) - Videoconferência

Santa Maria, RS
2022

AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal de Santa Maria, em especial o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola.

Ao orientador, professor Ph.D. Alexandre Swarowsky, pelos ensinamentos, paciência, amizade e por depositar sua confiança na realização deste trabalho.

Aos meus pais, Anselmo Souza Brum e Clélia Cecília Lovato Brum, por me apoiarem em seguir na carreira acadêmica e serem exemplos de honestidade e dedicação.

À namorada, minha melhor amiga, Lailla Soltau Missio Pinheiro, por me incentivar nesta jornada desde o início e por continuar me apoiando em todos os momentos difíceis.

Aos meus amigos Valmir Beltrame, Fernando Kunz, Ismael Brandt e William Cantarelli Arrivabene, por serem as pessoas que me dão força para continuar lutando e rindo ao mesmo tempo. Desculpe as ausências.

Aos meus colegas de Pós-graduação e grupo de pesquisa que foram incríveis nos momentos de convívio e pelas ajudas em todas etapas deste trabalho, Pablo Cocco Rodrigues, Rafaela Pohllmann, André Panziera, Gabriel Moreti.

Muito Obrigado a todos!

RESUMO

CALIBRAÇÃO DE SENSORES CAPACITIVOS DE BAIXO CUSTO UTILIZANDO A PLATAFORMA ARDUÍNO

AUTOR: Marcelo Lovato Brum

ORIENTADOR: Alexandre Swarowsky

Em um momento de extrema preocupação com a escassez hídrica, o uso de sensores para estimar o conteúdo de água no solo possui grande importância. Decisões rápidas, com utilização de dados instantâneos são base para o gerenciamento de recursos hídricos e na tomada de decisões nos usos múltiplos da água. No entanto plataformas comerciais ainda são muito caras e o desenvolvimento de sistemas mais acessíveis é essencial. Desta forma, o objetivo do estudo foi verificar fatores que interferem na calibração de sensores capacitivos v1.2 para estimar o conteúdo de água no solo usando a plataforma Arduino. Primeiramente, foi construída uma bancada de calibração destes sensores constituída por um total de 18 conjuntos (sensores + amostra de solo) para a coleta e armazenamento de dados. Após esta etapa foram coletados três tipos de solo em duas diferentes profundidades e três volumes distintos de amostras, onde posteriormente foram saturadas e deixadas secando sobre balanças na bancada de calibração. Para avaliação dos resultados obtidos foram usados recursos estatísticos como: Análise de Correlação de Pearson (r), Regressão Linear Simples, Regressão Polinomial de 2ª Ordem, Raiz Quadrada Média do Erro (RMSE), Índice de Willmott (I_w) e Índice de Desempenho (I_d). Foi possível verificar que fatores como o tipo de solo, volume da amostra e o intervalo de tempo entre as coletas, afetam o resultado final no desempenho destes sensores.

Palavras-Chave: Calibração de sensores. Água no solo. Prototipação.

ABSTRACT

CALIBRATION OF LOW COST CAPACITIVE SENSOR USING ARDUÍNO PLATFORM

AUTHOR: Marcelo Lovato Brum
ADVISOR: Alexandre Swarowsky

At a time of extreme concern about water scarcity, the use of sensors to estimate soil water content is of great importance. Quick decisions, using instant data, are the basis for managing water resources and making decisions in the multiple uses of water. However commercial platforms are still very expensive and the development of more accessible systems is essential. In this way, the objective of the study was to verify factors that interfere in the calibration of capacitive sensors v1.2 to estimate the water content in the soil using the Arduino platform. Firstly, a sensor calibration bench was built, consisting of a total of 18 sets (sensors + soil sample) for data collection and storage. After this step, three types of soil were collected at two different depths and three different volumes of samples, where they were later saturated and left to dry on balances on the calibration bench. To evaluate the results obtained, statistical resources were used, such as: Pearson Correlation Analysis (r), Simple Linear Regression, 2nd Order Polynomial Regression, Root Mean Square Error (RMSE), Willmott Index (I_w) and Performance Index (I_d). It was possible to verify that factors such as soil type, sample volume and the time interval between collections affect the final result in the performance of these sensors.

Keywords: Sensor calibration. Soil Water. Prototyping.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Solo como sistema trifásico e heterogêneo	17
Figura 2- Triângulo para determinação das classes texturais, em função da granulometria.....	19
Figura 3- Capacitor de placas paralelas (a) Campo elétrico (b).....	25
Figura 4- Fluxograma do desenvolvimento do trabalho	28
Figura 5 - Diagrama de coleta de dados (variação mássica e conteúdo de água no solo) em diferentes profundidades e diâmetros	30
Figura 6 - Esquema de ligação da placa Arduíno Mega, gravador de cartão SD, sensores capacitivos e as balanças da bancada de calibração	31
Figura 7 - Construção das balanças com suas medidas (a) e módulo Hx711 (b)..	32
Figura 8 - Algoritmo usado para a calibração das balanças. As linhas de comentários a respeito de cada parte do algoritmo estão escritas na cor cinza	34
Figura 9 - Coleta de amostra na profundidade de 20-30 cm.	36
Figura 10 - Processo de Saturação das Amostras.....	38
Figura 11 - Teste do nível de confiança das balanças usadas no experimento	43
Figura 12 - Ilustrações gráficas de cada conjunto de calibração (Set) durante o desenvolvimento da pesquisa no Solo 1 (Vertissolo hidromórfico). O eixo das abcissas apresenta os dias decorridos durante o período de coleta. O eixo das ordenadas esquerdo está a variação da porcentagem de massa da amostra (em azul) e o eixo das ordenadas direito estão apresentados os valores dos sensores (em vermelho). A profundidade dos Set 1, Set 2, Set 3, Set 5, Set 8, Set 9, Set13, Set 14 e Set 15 é de 0 à 10 centímetros, enquanto as demais é de 20 à 30 centímetros	46
Figura 13 - Ilustrações gráficas de cada conjunto de calibração (Set) durante o desenvolvimento da pesquisa no Solo 2 (Argissolo Vermelho Distrófico Arênico). O eixo das abcissas apresenta os dias decorridos durante o período de coleta. O eixo das ordenadas esquerdo está a variação da porcentagem de massa da amostra (em azul) e o eixo das ordenadas direito estão apresentados os valores dos sensores (em vermelho). A profundidade dos Set 1, Set 2, Set 3, Set 5, Set 8, Set 9, Set13, Set 14 e Set 15 é de 0 à 10 centímetros, enquanto as demais é de 20 à 30 centímetros	48

Figura 14 - Ilustrações gráficas de cada conjunto de calibração durante o desenvolvimento da pesquisa no Latossolo Vermelho Distroférrico Típico (Solo 3). O eixo das abcissas apresenta os dias decorridos durante o período de coleta. O eixo das ordenadas esquerdo está a variação da porcentagem de massa da amostra (em azul) e o eixo das ordenadas direito estão apresentados os valores dos sensores (em vermelho). A profundidade dos Set 1, Set 2, Set 3, Set 5, Set 8, Set 9, Set13, Set 14 e Set 15 é de 0 à 10 centímetros, enquanto as demais é de 20 à 30 centímetros	50
Figura 15 - Gráficos de comparação entre as regressões lineares da camada superior (0 – 10 cm) dos dois solos usados no estudo em amostras de 50mm de diâmetro.....	52
Figura 16 - Gráficos de comparação entre as regressões lineares da camada inferior (20 – 30 cm) dos dois solos usados no estudo em amostras de 50mm de diâmetro.....	53
Figura 17 - Gráficos de comparação entre as regressões lineares da camada superior (0 – 10 cm) em amostras de 100mm de diâmetro	55
Figura 18 - Gráficos de comparação entre as regressões lineares da camada superior (20 – 30 cm) em amostras de 100mm de diâmetro	56
Figura 19 - Gráficos de comparação entre as regressões lineares da camada superior (0 – 10 cm) em amostras de 150mm de diâmetro	57
Figura 20 - Gráficos de comparação entre as regressões lineares da camada superior (20 – 30 cm) em amostras de 150mm de diâmetro	58
Figura 21 - Dados diários das amostras de 50 mm de diâmetro em (a) superior e (b) inferior.....	60
Figura 22 - Dados diários das amostras de 100 mm de diâmetro em (a) superior e (b) inferior	62
Figura 23 - Dados diários das amostras de 150 mm de diâmetro em (a) superior e (b) inferior	64
Figura 24 - Oxidação do sistema eletrônico do sensor capacitivo V 1.2.....	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Lista de materiais usados na construção da bancada de calibração	29
Tabela 2 - Localização da coleta dos solos usados no estudo.....	36
Tabela 3 - Composição granulométrica dos solos usados no estudo	37
Tabela 4 - Critérios para avaliação do modelo com base no coeficiente (Id)	41
Tabela 5 - Análises das correlações de Pearson entre os valores obtidos de (% Vol.) da amostra e a leitura dos sensores	44
Tabela 6 - Comparação dos coeficientes de determinação com distintos intervalos de tempo entre as coletas.....	66
Tabela 7 - Valores obtidos dos Coeficientes de determinação, Equação de calibração linear, Raíz quadrada do erro médio, Índice de concordância de Willmott e Índice de desempenho através de análise de regressão linear simples	69
Tabela 8 - Valores obtidos dos Coeficientes de determinação, Equação de calibração linear, Raíz quadrada do erro médio, Índice de concordância de Willmott e Índice de desempenho através de análise de regressão polinomial de 2ª ordem	74

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Objetivos.....	14

1.1.1 Objetivo geral.....	14
1.1.2 Objetivos Específicos.....	14
2 REVISÃO DA LITERATURA	15
2.1 ÁGUA NO SOLO	15
2.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-HÍDRICA DO SOLO.....	16
2.2.1 Textura do solo	18
2.2.1.2 Conteúdo de argila no solo	20
2.2.2 Estrutura do solo	20
2.3 CONTEÚDO DE ÁGUA NO SOLO	21
2.4 MÉTODOS DE OBTENÇÃO DO CONTEÚDO DE ÁGUA NO SOLO.....	22
2.4.1 Métodos Diretos	22
2.4.2 Método Indireto	23
2.5 PLATAFORMA ARDUÍNO.....	25
2.5.1 A Internet das Coisas (IoT)	26
3 MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1 Descrição da Bancada de Calibração das Balanças (BCB)	28
3.1.1 Modelo Conceitual do Protótipo	29
3.1.2 Construção das Balanças	32
3.1.2 Calibração das Balanças	33
3.1.3 Processo de Verificação da Calibração das Balanças.....	34
3.2 Processo de Calibração dos Sensores Capacitivos v1.2	35
3.2.1 Coleta e preparação das amostras de solo.....	35
3.2.2 Coleta dos Dados da BCS.....	39
3.2.3 Análise dos Dados da BCS	39
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
4.1 Verificação da Bancada de Calibração da Balança (BCB)	42
4.2 Processo de Calibração dos Sensores Capacitivos	44
4.3 ANÁLISE VOLUMÉTRICA	51
4.3.1 Calibração em amostras de 50mm de diâmetro	51
4.3.2 Calibração em amostras de 100mm de diâmetro	54
4.3.3 Calibração em amostras de 150mm de diâmetro	56
4.3.4 Comparação Entre Volumes	58
4.4 ANÁLISE DA VARIAÇÃO TEMPORAL ENTRE COLETAS DE DADOS.....	59
4.4.1 Intervalo de tempo de 24 horas entra as coletas	59

4.4.2 Intervalo de tempo de 72 horas entre as coletas	65
4.5 AVALIAÇÃO GERAL DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	67
4.6 Dificuldades e Problemas Encontrados	78
4.6.1 Falta de energia.....	78
4.6.2 Falhas Apresentadas Pelos Sensores.....	79
4.6.3 Inserção dos sensores na amostra	80
4.7 CONSIDERAÇÕES finais	81
5 CONCLUSÃO.....	82
REFERÊNCIAS	83
APÊNDICE A – ALGORITMO DE EXECUÇÃO DA BANCADA DE CALIBRAÇÃO DOS SENSORES.....	97

1 INTRODUÇÃO

A água é o principal recurso natural necessário para a humanidade. Contudo, apenas 2,5% das águas doces que estão disponíveis no mundo são viáveis para o consumo humano, porém a maior parte encontra-se congelada ou em reservas subterrâneas, restando 0,5% como recurso prontamente disponível (ANA, 2018). Com isto surgem debates sobre seu gerenciamento a nível global, uma vez que os recursos hídricos são um dos principais meios que influenciam em atividades econômicas, como por exemplo, a produção agrícola (TESTEZLAF, 2017).

Com o aumento da demanda de alimentos devido ao crescimento populacional e as mudanças na economia mundial, que forçam a adaptação dos sistemas de produção a constantes incrementos, a irrigação se apresenta como a principal solução com o intuito de aumentar a produção de alimentos (GRASSINI et al., 2014). A necessidade de garantir a segurança alimentar da população e a sustentabilidade dos sistemas de produção, são fatores fundamentais para o desenvolvimento humano pois, nos próximos 30 anos a população mundial deve aumentar em 2 bilhões, atingindo a marca de 9,7 bilhões de pessoas (ONU, 2020).

Com isso, o aperfeiçoamento de técnicas que potencializem o uso eficiente da água pode auxiliar no aumento de sua disponibilidade, reduzindo problemas de déficit hídrico causados pelo aumento da demanda populacional em relação à oferta do meio ambiente, além de evitar o uso em excesso, gerando elevação nos custos de irrigação, lixiviação de nutrientes e agrotóxicos e ainda erosão do solo (BRAGA et al., 2018; HARA et al., 2019). Por isso é necessário monitorar a variação do conteúdo de água no solo, tornando possível o correto gerenciamento do seu uso.

O solo é considerado um reservatório de água, armazenando-a temporariamente e a liberando-a as plantas à medida em que esta é requisitada. Nesse sentido, conhecer a variável do conteúdo de água disponível no perfil do solo é um fator de grande relevância não somente nas atividades agrícolas, mas também no monitoramento ambiental, pois este interfere diretamente no abastecimento do nível do lençol freático (KUMAR et al., 2022; WESTERN et al., 2021).

Existem diversos meios de determinar o conteúdo de água no solo. Sendo que os métodos diretos se baseiam na medida direta do conteúdo de água no solo de uma amostra, porém, são métodos lentos e trabalhosos, dificultando o monitoramento prático

do conteúdo de água disponível a campo. Por outro lado, os métodos indiretos estimam a quantidade de água através de outras variáveis, possibilitando uma rápida aquisição e repetibilidade de dados. Dentre estes, destacam-se os sensores capacitivos de solo que possuem um menor custo quando comparado com outros métodos indiretos, como sensores TDR ou sondas de nêutrons.

O uso de sensores capacitivos aliados a uma plataforma que auxilia na medição prática desta variável no tempo e no espaço, faz com que a gestão dos recursos hídricos ocorra de forma dinâmica (BÉGUÉ et. al., 2018). Esta dinâmica na aquisição de dados pode ser cada vez mais otimizada com o auxílio da tecnologia da internet das coisas (IoT). A plataforma Arduino se mostra uma ferramenta muito interessante no monitoramento em tempo real do conteúdo de água no solo, gerando um sistema de apoio à decisão de lâminas de irrigação (ABBA et al., 2019; SURESH et. al., 2022).

Diante do exposto, este trabalho visa suprir a necessidade de estudar o correto funcionamento e compreender quais são os critérios e fatores que interferem na calibração de sensores capacitivos v1.2 utilizando a plataforma Arduino.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem por objetivo identificar os fatores mais importantes que interferem na calibração de sensores capacitivos v1.2 para estimar o conteúdo de água no solo usando a plataforma Arduino.

1.1.2 Objetivos Específicos

1. Determinar a influência de diferentes volumes de amostras de solo na calibração do sensor.
2. Avaliar o desempenho do sensor em diferentes tipos de solo.
3. Determinar intervalo de tempo ótimo entre as leituras a fim de obter melhor desempenho do sensor capacitivo v1.2.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica, através da revisão da bibliografia, de assuntos pertinentes ao desenvolvimento deste trabalho. Aqui, será abordada a importância e como obtém-se os valores do teor de água armazenada pelo solo.

2.1 ÁGUA NO SOLO

A água é fator fundamental a vida. Contudo, compreender corretamente seu comportamento e sua disponibilidade nos seus mais diversos usos é uma necessidade não somente para a gestão de recursos hídricos (EDEH, 2017; MOHANTY et al., 2017), mas também no uso racional da água em atividades agrícolas (MISHRA; KHARE, 2021; MZEZEWA, 2011; SENA et al., 2019). Para que isto que ocorra, torna-se imprescindível o monitoramento contínuo da água disponível no solo, uma vez que este possui papel importante no balanço hídrico, colaborando na compreensão da dinâmica da água em escala de bacias hidrográficas (SWAROWSKY et al., 2011).

A Política Nacional de Recursos Hídricos, lei nº 9.433/1997, fundamenta que a água é um bem de domínio público, dotado de valor econômico, com uso prioritário para o consumo humano e dessedentação animal e que ainda, a gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar os usos múltiplos da água.

A crescente demanda de água para seus mais diversos fins, tem se tornado uma questão de grande debate, pois seu manejo integrado é um tema complexo e não pode ser abordado de maneira breve. Por esta razão, ter o entendimento de como os processos hidrológicos ocorrem dentro de uma bacia hidrográfica, contribui com as tomadas de decisões no planejamento de bacias (BERGER et al., 2020; BRAZ et al., 2020; TARHULE, 2017).

As bacias hidrográficas, são caracteristicamente, complexas e heterogêneas (KIRCHNER, 2016). Nelas existem locais de grande importância para a captação de água advinda das precipitações, ou seja, são pontos vitais de recarga da água no sistema (ZUECCO, 2018). Dentre as diversas variáveis existentes para compreender a dinâmica de água em uma bacia hidrográfica, está a água disponível no solo, que revela uma importância singular, pois inúmeros processos ocorrem devido a capacidade de um determinado solo reter ou armazenar água (SANTOS et al., 2016; ZHU et al., 2020).

Há diversos processos hidrológicos que podem ocorrer em bacias hidrográficas. Dentre estes, estão os desastres como as inundações repentinas que ocupam o primeiro lugar dentre todos os perigos naturais em todo o mundo devido à sua alta frequência, gravidade e mortalidade (VARLAS et al., 2019; ZHAI et al., 2021). Contudo, a modelagem hidrológica aparece como uma ferramenta eficaz para simular as respostas da bacia a chuvas intensas (ZHANG et al., 2020). Mas para que isto seja possível, deve-se determinar o limite de precipitação para o alerta de enchentes, fato este que só é possível quando é monitorada a umidade anterior do solo e o padrão de chuvas, uma vez que estas variáveis afetam diretamente a taxa de escoamento da água em determinada área (CROW et al., 2017; ZHAI et al., 2018).

Por outro lado, na agricultura, existem conflitos pelo uso racional da água. Para isso, agricultores e agências governamentais buscam soluções para este problema. Desta forma, usar o balanço hídrico para análises hidrológicas surge como uma possível solução, principalmente quanto ao manejo da irrigação de lavouras (CUNHA et al., 2019; SUPRIYASILP; PONGPUT, 2021). Contudo, para poder compreender a dinâmica do balanço hídrico, deve-se analisar o comportamento da água disponível no solo, principalmente em eventos extremos de precipitação e evapotranspiração, uma vez que o solo tem grande função na água disponível para as plantas (PÁNTANO; PENELBA, 2018; TIFAFI, 2017). Por esta razão, quantificar o conteúdo de água disponível no solo melhora a gestão da água na agricultura (LAI; REN, 2016).

Muitos processos hidrológicos, ecológicos e biológicos, como escoamento superficial, taxa de infiltração, erosão, recarga de água subterrânea, transporte de soluto e transpiração de plantas são decorrentes do armazenamento de água no solo sendo que este armazenamento é fortemente influenciado pela granulometria, mineralogia, matéria orgânica e estrutura do solo (HE et al., 2019; REICHERT et al., 2020).

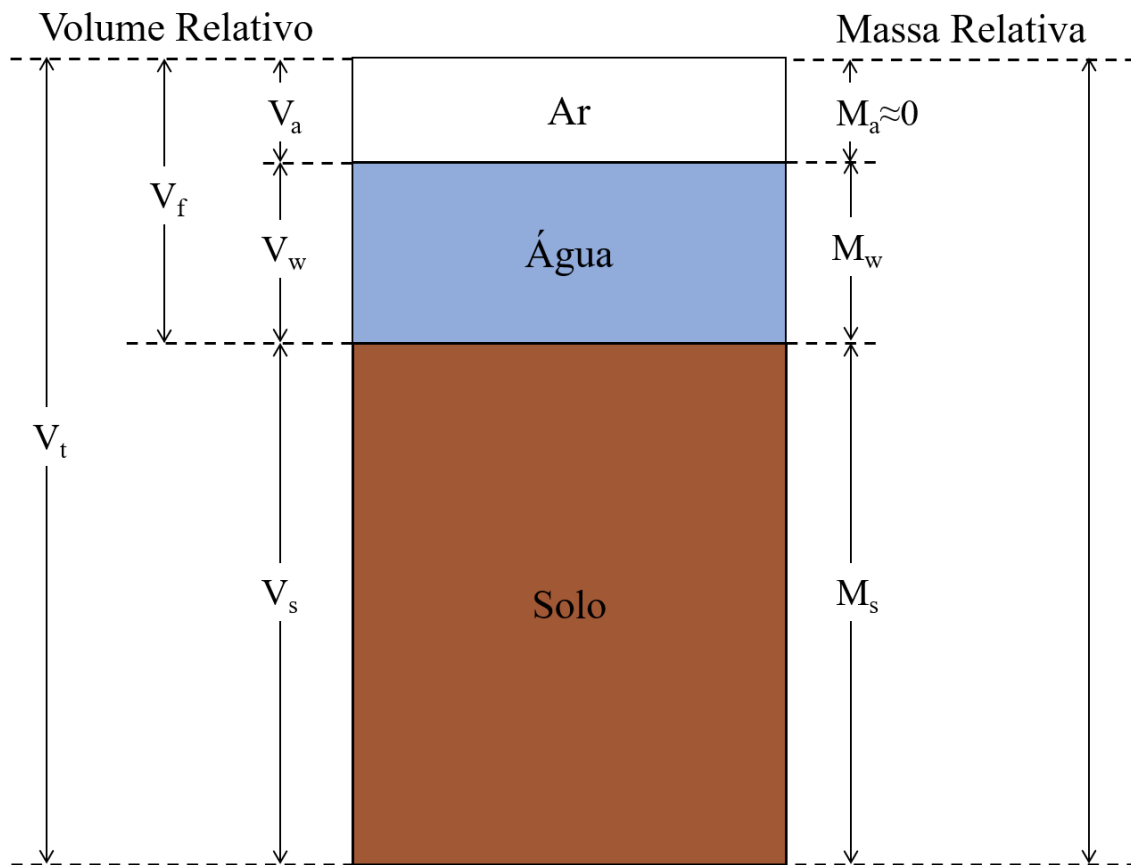
2.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-HÍDRICA DO SOLO

O solo é considerado um sistema trifásico e heterogêneo (Figura 1), com espaços porosos, sendo formado por partículas minerais e orgânicas (BRAGA et al., 2005), onde possui materiais de arranjo elétrico, iônico, orientados de formas distintas, por consequência de diversos mecanismos de polarização (XU et al., 2012). É o principal reservatório natural de água, armazenando, temporariamente, devido a variação de sua

umidade, desempenhando papel importante no ciclo hidrológico (REICHARDT, 1985; TUCCI, 2004).

A capacidade que um determinado solo possui para armazenar água está diretamente conexa às características como a textura, mineralogia e estrutura de seus poros, sendo os volumes de líquidos e ar, variáveis. Contudo, variações na textura do solo, topografia, preparo do solo, cobertura vegetal e práticas de irrigação resultam em grandes variabilidades espaciais e temporais do armazenamento de água nas camadas superiores solo (KLOTZSCHE et al., 2018; ZHOU et al. 2019). Por isto, torna-se necessário o estudo de algumas propriedades físico-hídricas como a sua composição textural e porosidade para compreender a dinâmica da água e sua disponibilidade às plantas.

Figura 1 - Solo como sistema trifásico e heterogêneo



Fonte: HILLEL, 1998. Adaptado pelo autor.

Onde: V_t é o volume total, V_a é o volume de ar, V_w o volume de água e V_s volume de sólidos, M_a é a massa de ar, M_w é a massa de água, M_s é a massa de sólidos, M_t é a massa total de solo.

O solo possui partículas com diferentes tamanhos. Por isto, a proporção relativa dessas partículas em determinada massa de solo é definida como textura do solo. Essa propriedade física é pouco ou nada alterada ao longo do tempo, pois está ligada aos fatores de formação do solo, principalmente, ao material de origem (SUZUKI et al., 2008), interferindo no teor de água disponível às plantas (REICHERT et al., 2009).

Por este motivo, a partir de agora será aprofundado o tema sobre a parte sólida do solo, como a sua textura e a estrutura, pois estas, exercem função primária na dependência da variação da água armazenada.

2.2.1 Textura do solo

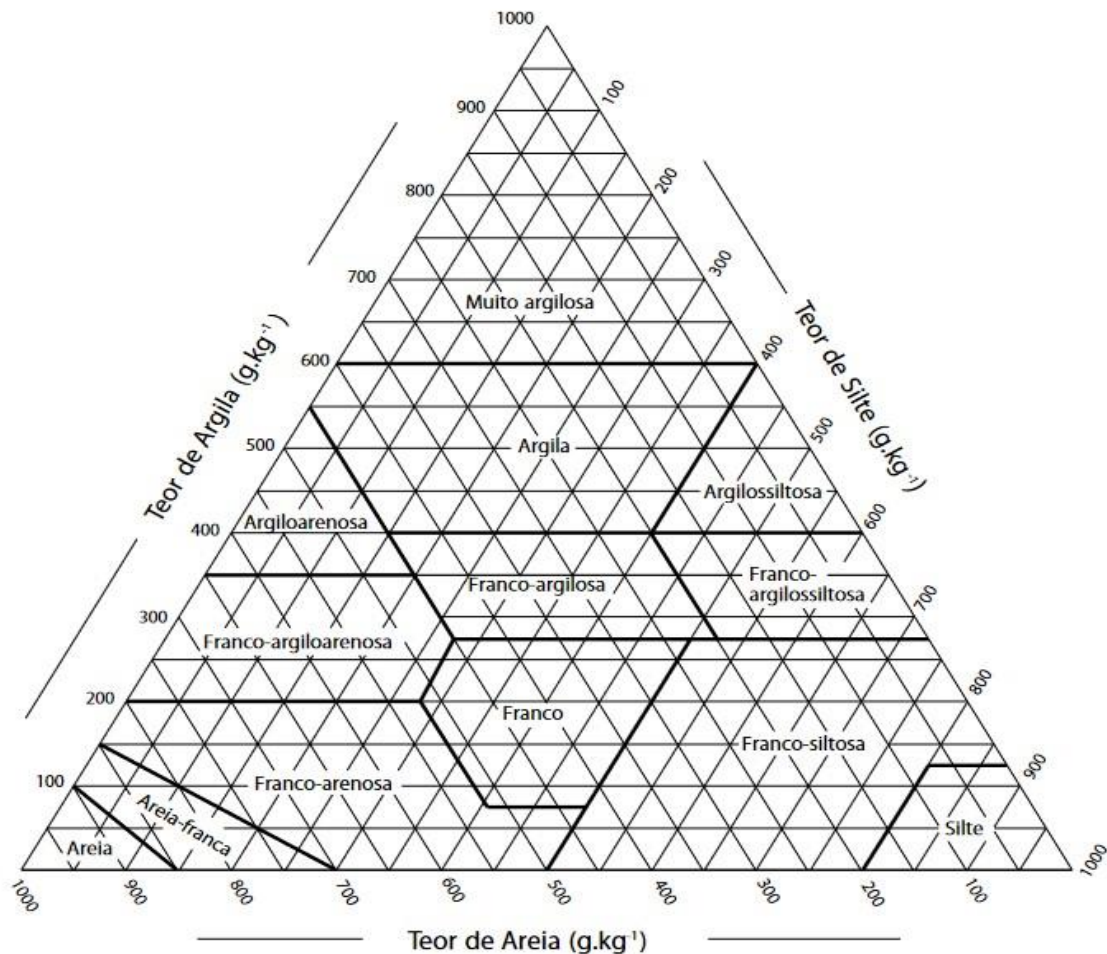
A textura é uma característica inerente ao solo (CENTENO et al., 2017), possuindo relação com as partículas primárias (areia, silte e argila) e a sensação que estas partículas oferecem ao tato (atrito, sedosidade e pegajosidade), sendo um dos principais indicadores de qualidade e produtividade dos solos (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2012; WANG et al., 2005). Contudo, ela não deve ser avaliada isoladamente para fins de produtividade, assim como este trabalho não tem por objetivo avaliar a produtividade do solo através de seus parâmetros físico-hídricos.

Em geral, o estudo da textura dos solos tem por objetivo analisar as implicações físicas, químicas e biológicas, uma vez que existem variáveis que estão fortemente ligadas à sua textura, como: a permeabilidade, capacidade de troca de cátions e retenção de água. Estas, afetam de maneira contundente algumas características que são base para a qualidade do solo, como o regime hídrico e a acessibilidade de nutrientes disponíveis para as plantas (BÜNEMANN et al., 2018; COBLINSKI et al., 2020). Por este motivo, vários autores consideram a textura do solo como a característica mais importante na obtenção de modelos matemáticos que estimam o conteúdo de água no solo (BRAUND, 2003).

Cada solo recebe uma designação referente à sua textura, para isto, deve ser realizada a análise granulométrica do solo, permitindo discriminar seus componentes sólidos em classes de acordo com seus diâmetros. A SBCS (Sociedade Brasileira de Ciência dos Solos), define os intervalos de tamanho de partícula de argila, silte, areia fina e areia grossa como: < 0,002; 0,05 – 0,002; 0,2 – 0,05; 2 – 0,2 mm, respectivamente.

Esta propriedade é usada para classificar os tipos de solo através do triângulo textural (Figura 2).

Figura 2- Triângulo para determinação das classes texturais, em função da granulometria



Fonte: instituto brasileiro de geografia e estatística. diretoria de geociências. coordenação de recursos naturais e estudos ambientais. **manual técnico de pedologia**. IBGE, 2007.

A análise granulométrica é usada para quantificar essas frações (argila, silte e areia) em que há na amostra de solo. Dentre os diferentes métodos de separação destas frações de partículas, está o método da pipeta. O qual é baseado na velocidade de queda de partículas através de um líquido, conforme descrito pela Lei de Stokes (1851), sendo assim, possível separar partículas de solo através de sua diferença de diâmetro e tempo de queda.

Existem implicações que a textura do solo oferece ao seu armazenamento de água. Solos com textura arenosa revelam teores de areia acima de 70% e de argila inferior a 15%, sendo estes considerados solos bem permeáveis, com baixa retenção de água e baixo teor de matéria orgânica. Por outro lado, solos considerados argilosos possuem seu teor de argila superiores a 35%, apresentando já baixa permeabilidade e alta capacidade de

retenção de água devido a maior quantidade de argila, apresentando maior quantidade de microporos (KLEIN, 2014).

2.2.1.2 Conteúdo de argila no solo

O lento intemperismo químico do material de origem, como por exemplo rochas, resulta na formação de pequenas partículas denominadas argilas. Esta fração do material resultante é composto por diversos elementos, como Sílica (Si^{4+}), Alumínio (Al^{3+}), Ferros (Fe^{3+} e Fe^{2+}), Magnésio (Mg^{2+}), Zinco (Zn^{2+}), Sódio (Na^+), Cálcio (Ca^{2+}), Potássio (K^+), Oxigênio (O^{2-}) e Hidroxilas (OH^-), sendo estas partículas consideradas mais finas do que as de silte. O arranjo destes elementos resulta em diferentes estruturas mineralógicas no solo que por sua vez afetam a disponibilidade da troca de cátions e sua expansividade ou contração (SHUKLA, 2013).

Existem três maneiras de compreender a relação solo-umidade, umidade gravitacional, umidade capilar e umidade higroscópica. A umidade gravitacional é definida como a umidade que se desloca rapidamente entre os macroporos, devido a força da gravidade, portanto, não é considerada como umidade disponível. Enquanto a umidade capilar é aquela que ocorre nos microporos devido a coesão e adesão contra a força gravitacional sendo responsável pelos processos físico-químico-mineralógico-biológico entre o solo e o ambiente. Já a umidade hidrosférica é dada através da formação de uma fina película ao redor da superfície das partículas do solo, sendo muito difícil removê-la devido a força de adesão extremamente alta (SU et al., 2014).

Por estes motivos o conteúdo de argila em uma mostra de solo é diretamente ligado ao potencial de retenção de umidade deste, pois, define em boa parte a distribuição dos diâmetros dos poros do solo, determinando assim a área de contato entre as partículas sólidas e a água, fazendo com que solo com maiores teores de argila percam umidade mais lentamente (KLEIN et al., 2010; PIZETTA et al., 2017).

2.2.2 Estrutura do solo

Enquanto a textura é usada em referência ao tamanho das partículas do solo, a estrutura é usada em referência ao arranjo das partículas do solo (VIEIRA et al., 2007). Este arranjo ou organização das partículas no solo (ou seja, a configuração interna da matriz do solo) é chamado de estrutura do solo. Como as partículas do solo diferem em

forma, tamanho e orientação e podem ser associadas e interligadas de várias maneiras, a massa delas pode formar padrões complexos e irregulares que são difíceis de caracterizar em termos geométricos exatos (HILEL, 2012). As partículas de areia, silte e argila são normalmente organizadas em partículas secundárias chamadas de agregados, sendo que sua forma e o tamanho determinam a estrutura do solo (FOTH, 1978).

A disposição destes agregados pode causar empacotamento do solo, afetando sua distribuição, tamanhos e formas. Por esta razão solos com textura mais arenosa possuem a tendência de formarem poucos agregados devido uma menor densidade entre as partículas enquanto em solos com maiores teores de argila, as partículas primárias tendem, em circunstâncias favoráveis, a agrupar-se melhor, formando mais facilmente seus agregados (PACHEPSKY; RAWLS, 2003; ROTHE et al., 1997).

As estruturas naturalmente formadas nos processos pedogenéticos são: a) Granulares, pequenos poliedros curvados; b) Angulares, sendo definidos como poliedros com faces e ângulos agudos; c) Subangulares, poliedros sub-arredondados com faces planas sem ângulos agudos; d) laminar, sendo unidades tabular e plana; e) prismática. Agregados alongados verticalmente (SCHOENEBERGER et al., 2012). Por razão de suas distribuições é que as características estruturais do solo acabam por afetar suas propriedades hidráulicas, resultando em diferenças na velocidade de infiltração de água (CRAWFORD et al., 1995; GHOSH et al., 2021).

2.3 CONTEÚDO DE ÁGUA NO SOLO

O conteúdo de água no solo é uma variável no tempo e no espaço, dependente da capacidade que um determinado solo tem de reter água em seus poros. Pode ser obtido através da relação da massa do solo e a massa de água contida no solo (Umidade Gravimétrica), ou então, por relação volumétrica.

Diversos autores afirmam não ser conveniente trabalhar com a quantidade absoluta de água no solo, mas sim, expressá-la através de seu valor mássico (U , kg.kg^{-1}) ou de seu volume (θ , $\text{m}^3.\text{m}^{-3}$). Ou seja, o conteúdo de água contido em uma determinada amostra de solo pode ser apresentada através de porcentagem de massa ou porcentagem de seu volume (CAMPBELL, 1988; DIRKSEN, 1999; KLUTE, 1986).

Dentre as características apresentadas em um determinado solo, quando analisamos o conteúdo de água armazenada por este, surgem dois parâmetros que são fundamentais na compreensão e utilização dos valores de conteúdo de água disponível.

Estes limites de retenção de água pelo solo são separados em dois: o limite superior, denominado capacidade de campo (CC), originalmente definida por Veihmeyer e Hendrickson (1950) como sendo considerada a quantidade de água retida pelo solo após a drenagem ter ocorrido ou cessado em um solo previamente saturado por chuva ou irrigação; onde a condutividade hidráulica não saturada se torna tão pequena que o fluxo de água pode ser considerado como sendo zero. Enquanto o limite inferior de água no solo que é denominado como ponto de murcha permanente (PMP), sendo considerado como quando o conteúdo volumétrico de água é muito baixo para a planta remover a água do solo, ou seja, o potencial matricial é tão elevado, em valor absoluto, que a maioria das plantas não conseguem mais extrair água deste solo (CASSEL; NIELSEN, 1986).

2.4 MÉTODOS DE OBTENÇÃO DO CONTEÚDO DE ÁGUA NO SOLO

Existem diversos métodos para a medir o teor de água do solo (ROMANO, 2014). Estes podem ser obtidos de maneiras diretas, como através da umidade gravimétrica, ou indiretos, sendo predominantemente dados através do uso de sensores (BATISTA et al., 2016; HE et al., 2021). Os métodos diretos de obtenção do conteúdo de água no solo, basicamente medem as diferenças de massa ou volume da amostra de solo, sendo que estes métodos do tipo direto são considerados padrão para a calibração dos métodos indiretos, demonstrando assim, seu nível de acurácia.

Por outro lado, métodos do tipo indireto, usam propriedades físicas ou químicas do solo que possuem relação com seu conteúdo de água. A resistência a condutividade elétrica, constante dielétrica e tensão do solo, são exemplos de propriedades afetadas pelo conteúdo de água disponível no solo. Por este motivo, são métodos não destrutivos, mas que requerem cuidados em suas calibrações a fim de que sejam obtidas correlações confiáveis entre sua variável observada e o conteúdo de água na amostra de solo (COSENZA, 2016; ZHUO; HAN, 2016).

2.4.1 Métodos Diretos

Estes métodos consistem em extrair a água de uma amostra de solo por meio de calor, determinando-se, assim, a umidade gravimétrica do solo pela relação entre a massa de água e a massa de solo seco. Contudo, este método é destrutivo e não pode ser automatizado, tornando-o assim pouco adequado para monitorar o teor de água no solo

(KLEIN, 2008). Existem também outros métodos para determinar o conteúdo de água em uma amostra de solo, como o método do forno elétrico, micro-ondas e do balão volumétrico. Contudo, todos estes métodos são considerados como gravimétricos, sendo o método da estufa considerado como o padrão (RIBEIRO et al., 2018).

2.4.1.1 Método Padrão da Estufa

É um método gravimétrico simples, porém, de alto grau precisão que estima diretamente o conteúdo de água do solo (FLORENTINO, 2011; OCHSNER et al., 2013). No entanto, é demorado, trabalhoso, destrutivo e muitas vezes não é considerado para desenvolver redes de monitoramento de conteúdo de água no solo, mas sim para calibrar outros sensores de umidade ou como um método de referência para validação de conjunto de dados obtido com outros métodos (SERRANO et al., 2020; ZHANG et al., 2018). Este método requer que a amostra de solo permaneça na estufa por um período de 24 horas a aproximadamente 105°C (EMBRAPA, 1997; SOUZA et al., 2016).

2.4.2 Método Indireto

Assim são chamadas as técnicas não destrutivas para monitorar a água do solo (TOPP *et al.*, 1980; FARES; POLYAKOV, 2006). Estas técnicas são baseadas em mudanças nas propriedades do solo como a variação na constante dielétrica do solo, frequência eletromagnética, temperatura, salinidade, teor volumétrico de água do solo, densidade do solo, forma das partículas do solo e do teor de umidade (YU et al., 2021).

Os métodos indiretos modernos utilizam sensores do tipo resistência do solo, tensiômetros e técnicas de capacitância do solo, como: reflectometria no domínio do tempo (TDR), reflectometria no domínio da frequência (FDR) ou capacitivos, e sensores de fluxo térmico da umidade do solo (MITTELBAACH et al., 2012; NOBORIO et al., 1996; SU et al., 2014).

Apesar de existirem diversas maneiras de determinar o conteúdo volumétrico de água no solo através de métodos indiretos, como sondas TDR, que utilizam a radiofrequência como maneira de medir o teor de água no solo, sendo os aparelhos mais usados para este fim (MIRANDA et al., 2007), estes apresentam um custo elevado quando vendidos por empresas da área, tornando fator limitante para o seu uso em pesquisas e também por agricultores (COELHO et al., 2006).

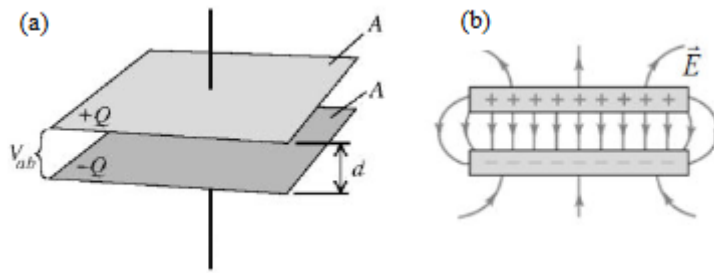
Contudo, sabe-se que sensores que usam a técnica da capacitância, são ótimas alternativas para substituir sensores TDR, tornando-se muito populares pois, além de possuírem um menor custo agregado ao produto final, ainda trazem a tecnologia de obtenção de dados como a Internet das Coisas (IoT), potencializando seu uso (KOJIMA et al., 2016).

2.4.2.1 Sensores Capacitivos e a Técnica da Capacitância

Clark Topp na década de 70 começou a trabalhar com sensores para medição do teor de água no solo conhecidos como TDR, contudo eram caros e complexos. Porém, a técnica da capacitância através da frequência (FDR) começou a ser usada para estimar o conteúdo de água no solo por Dean (1987). Esta técnica consiste em colocar uma amostra de solo em contato com um material dielétrico, que são materiais que não conduzem ou conduzem pouquíssima corrente elétrica (NEVES, 2001). Existe um circuito de detecção acoplado a este sistema pois, o valor da capacitância medida será afetado quando a constante dielétrica mudar, o que se dá pela diferença da umidade do solo (ELIA et al., 2012). Esta mudança na capacitância da amostra ocorre pois há uma relação entre a diferença de constante dielétrica em água (≈ 80), solo ($\approx 2\sim 9$) e ar ($=1$) (DENG et al., 2020). Contudo, a resistência elétrica do solo não é dependente apenas de seu teor de água, mas também de sua composição, textura e concentração de sais solúveis (HILLEL, 1998).

Os capacitores são componentes amplamente utilizados nas mais diversas aplicações eletrônicas com a finalidade de armazenar energia elétrica através de um campo eletrostático, onde as mudanças neste campo podem ser detectadas (WENDLING, 2010). Assim sendo, pode-se dizer que existem diversos tipos de capacitores, contudo a formação mais comum é a de duas placas paralelas, de área A , afastadas a uma distância d , por um material isolante ou dielétrico, como na Figura 3(a), enquanto na Figura 3(b) está ilustrado o campo elétrico E .

Figura 3- Capacitor de placas paralelas (a) Campo elétrico (b)



Fonte: Figura adaptada de Fenômenos Eletromagnéticos/UFABC.

Este tipo de técnica usada na determinação do conteúdo de água no solo tem se destacado nos últimos anos por apresentar boa precisão, baixo custo de aquisição e manutenção, apresentando resultados de maneira rápida, *in situ*, e de forma não destrutiva, fornecendo medições quase instantâneas, podendo permanecerem no solo durante um longo período, sendo ainda, capazes de fornecer leituras contínuas e que não utilizam radiação, permitindo medições precisas próximo à superfície do solo (OATES et al., 2017; RAED et al., 2014; SOUZA et al., 2016; TSHEKO; SAVAGE, 2006), tornando-se a melhor escolha para leituras diárias do conteúdo de água no solo em situações a campo (NAGAHAGE et al., 2019).

2.5 PLATAFORMA ARDUÍNO

É uma plataforma de prototipação eletrônica de código aberto (*open-source*), que usa a linguagem de programação do tipo C++ com pequenas modificações. Por ser construída sobre uma plataforma de prototipagem baseada em softwares e hardwares livres, consiste em uma placa de circuitos com microcontrolador AVR Atmel, tornando fácil a interação física entre o ambiente e o computador. Assim, qualquer pessoa pode produzir um projeto, pois é fácil de programar e usar, além de possuir preço acessível e ser facilmente encontrada no comércio (BANZI, 2016; LIMA et al., 2012; MCROBERTS, 2018).

Existem diversas placas de Arduino disponíveis no mercado atualmente, por isso é fundamental escolher a placa ideal para o tipo de projeto a ser desenvolvido. Por conta de sua versatilidade através da grande diversidade de peças para a montagem de um circuito eletrônico próprio e a quantidade disponível de sensores para os mais diversos

usos, fazem com que o Arduíno tenha sido cada vez mais usado para ajudar no ensino de determinadas disciplinas e desenvolvimento de pesquisas na academia (MARTINAZZO, 2014; WADHWANI et al., 2018).

Entre as placas de Arduíno, uma das que mais se destaca é a Arduíno Mega 2560. Devido a sua grande quantidade de portas analógicas e digitais, podendo se conectar a internet e demais dispositivos de forma remota, quando acoplado a alguns acessórios, tornando possível ler comandos e fornecer dados (BADAMASI, 2014; KUSRIYANTO; PUTRA, 2016; OKTARIAWAN et al., 2013). Desta forma, o Arduíno pode ser usado na tomada de decisões acionando ou desativando dispositivos remotamente, como por exemplo, quando usado em irrigações e nas mais diversas aplicações na agricultura (CAPRI et al., 2021; GANESH et al., 2022; GARCÍA et al., 2020; KUMAR et al., 2022).

Por isso, estudar, compreender e aperfeiçoar técnicas e dispositivos de baixo custo embarcados na plataforma Arduíno vai ao encontro das demandas atuais, onde o mundo torna-se cada vez mais conectado através das técnicas de *bigdata*, automação e robótica, tornando, desta forma, possível a indústria e a agricultura 4.0 através da IoT (RIBEIRO et al., 2018).

2.5.1 A Internet das Coisas (IoT)

A IoT foi proposta pela primeira vez por Kevin Ashton em 1999, e ele se referiu à IoT como objetos interconectados tornando possível a comunicação em tempo real entre objetivos e usuários. Desta forma, ao passar dos anos, esta ideia foi ficando cada vez mais possível, tornando-se hoje a próxima internet, transformando todos os processos e dispositivos *inteligentes* (GOKHALE et al., 2020).

A Internet das Coisas torna possível monitorar e gerenciar operações a centenas de quilômetros de distância através de aplicativos de celular ou computadores. Armazenando e transferindo dados em nuvem, radiofrequência e nas mais diversas maneiras de conexão entre eletrônicos (VAN KRANENBURG; BASSI, 2012). Através da internet é possível acessar imagens praticamente em tempo real, tornando possível até mesmo detectar a ocorrência de pragas ou doenças em lavouras e déficit hídricos, como também detectar perigos ambientais (LEITE et al., 2019; SHAFIQUE et al., 2020).

A agricultura de precisão está diretamente ligada à Internet das Coisas (IoT), por isto está tornando-se muito popular quando se trata da gestão prática da agricultura. As redes de sensores sem fio surgiram como uma abordagem promissora para monitorar

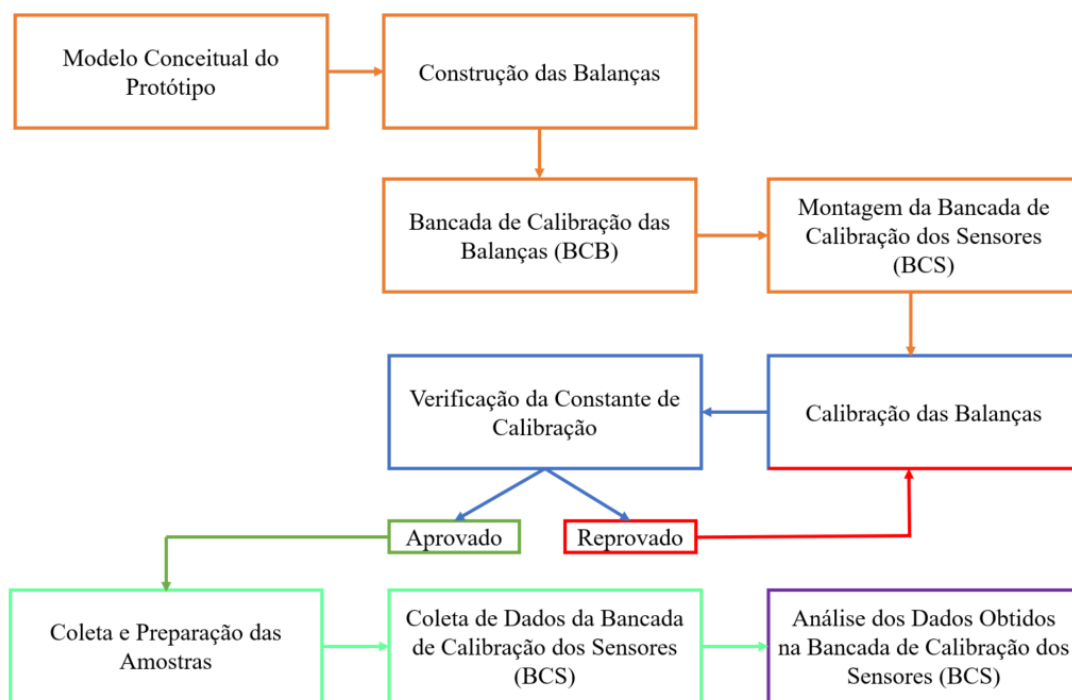
grandes áreas através de alta resolução temporal, por isto, esta caracterização espacial das propriedades do solo ajuda na coleta de dados obtidos (MORAIS et al., 2019; QU et al., 2016).

Há cada vez mais trabalhos no meio acadêmico que envolvem a plataforma Arduino. Isto deve-se a diversos processos de automatização através de uma infinidade de tipos de sensores disponíveis na plataforma que são criados muitas vezes por desenvolvedores independentes. Por isto a importância do desenvolvimento de pesquisas científicas que aprofundem a aplicação e meios de usar estes dispositivos na prática (GARCIA et al., 2020; MALCHE et al., 2019; OKAFOR et al., 2020; RIVAS-SÁNCHEZ et al., 2019).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados todos os procedimentos de coleta e tratamento de dados, preparação e coleta das amostras. Assim como a metodologia empregada para o desenvolvimento de todas as etapas do estudo. Inicialmente foi descrita a bancada de calibração constituída pelo modelo conceitual do protótipo, construção, calibração e verificação do funcionamento das balanças. Em seguida foi descrito o processo de calibração dos sensores constituído da coleta e preparação das amostras de solo, e por último a análise de dados da bancada de calibração dos sensores capacitivos. A sequência de execução está apresentada na Figura 4.

Figura 4- Fluxograma do desenvolvimento do trabalho



Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.1 DESCRIÇÃO DA BANCADA DE CALIBRAÇÃO DAS BALANÇAS (BCB)

Esta foi a primeira parte desenvolvida no projeto. O intuito desta fase foi desenvolver um sistema de medida e armazenamento de dados de massa e conteúdo de água no solo para calibração de sensores capacitivos utilizando um protótipo na plataforma Arduino que será descrito posteriormente. Esta etapa foi desenvolvida no

Laboratório de Engenharia do Meio Ambiente (LEMA), sala 441 Anexo 10 do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria.

A bancada de calibração foi constituída por um total de 18 conjuntos para a coleta e armazenamento de dados. Assim, considera-se a balança, o anel de amostra de solo de PVC (Policloreto de Vinila) e seu respectivo sensor de conteúdo de água no solo um conjunto (Set), totalizando 18 balanças, 18 anéis de amostras de solo e 18 sensores capacitivos v1.2. Os materiais eletrônicos usados na montagem da bancada de calibração estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Lista de materiais usados na construção da bancada de calibração

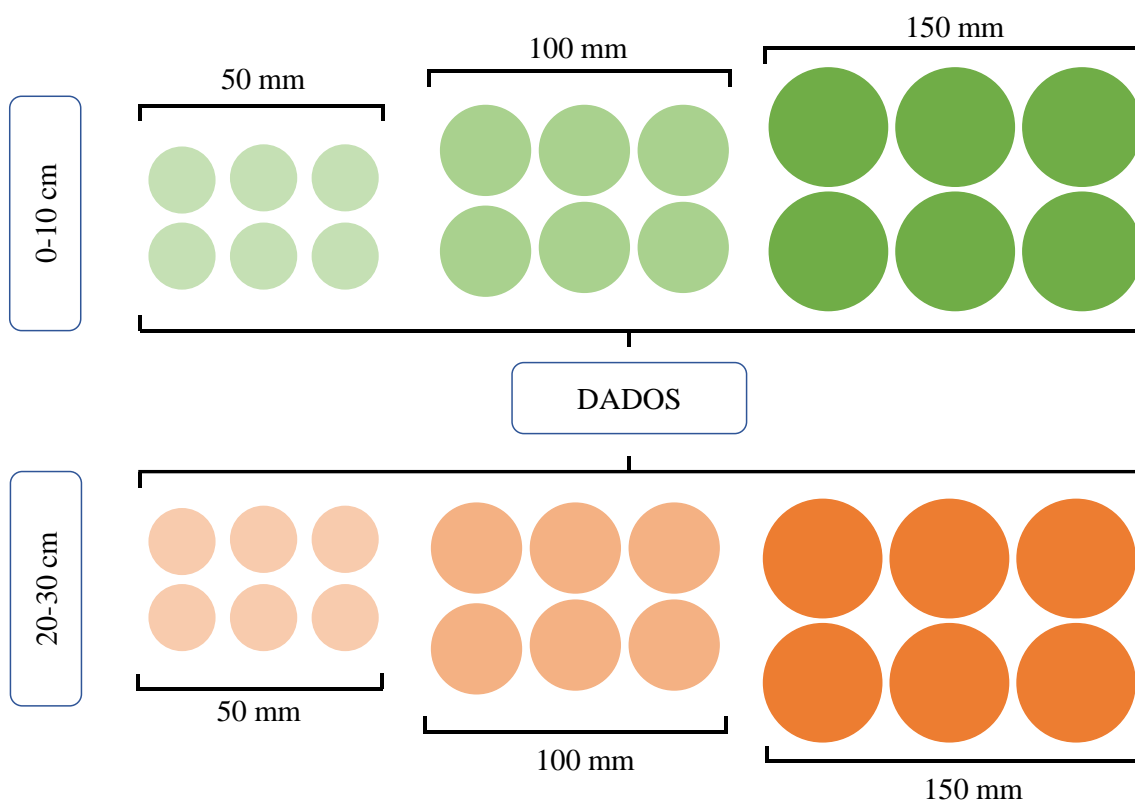
Equipamentos	Quantidade
Placa Arduíno Mega 2560 R3	2
Célula Strain-gauge	18
Módulo HX 711	18
Módulo de armazenamento SD	2
Cartão microSD	2
Sensor Capacitivo V1.2	18
Fios	22 metros

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.1 Modelo Conceitual do Protótipo

O modelo conceitual do protótipo é uma ideia organizacional de como foi montado o sistema de coleta e armazenamento de dados. A obtenção de dados precisos, rápidos e com um grande espaço amostral é fundamental para a compreensão do funcionamento de quaisquer sensores. Foram retiradas amostras de duas profundidades do solo, contemplando três diâmetros distintos de anéis (50 mm, 100 mm, 150 mm) com uma altura de 100 mm. Estes foram executados em triplicata, exemplificado pela Figura 5.

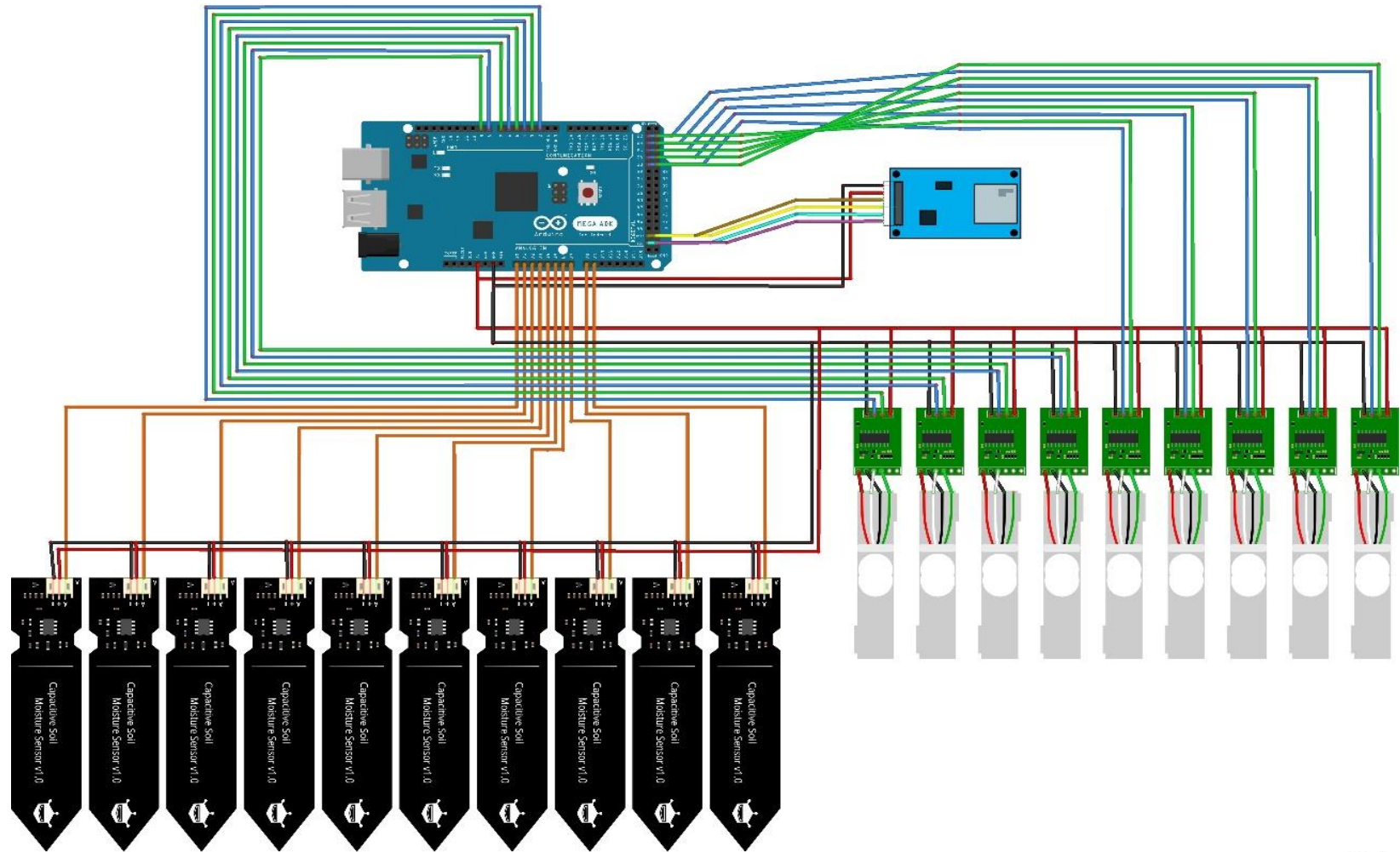
Figura 5 - Diagrama de coleta de dados (variação mássica e conteúdo de água no solo) em diferentes profundidades e diâmetros



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dados coletados foram armazenados a cada 5 minutos em cartões microSD a partir de dois Módulos de armazenamento de cartão microSD para plataforma Arduino, ou seja, um para cada 9 conjuntos. Para atender a demanda de portas de comunicação de dados e espaço para armazenamento de algoritmos, foram usadas duas placas Arduino MEGA 2560 R3, pois estas possuem 54 portas digitais, 16 portas analógicas (usadas para a conexão com os sensores capacitivos) e microcontrolador ATmega 2560 com Memória Flash de 256 KB, conforme descrito na Figura 6.

Figura 6 - Esquema de ligação da placa Arduino Mega, gravador de cartão SD, sensores capacitivos e as balanças da bancada de calibração



fritzing

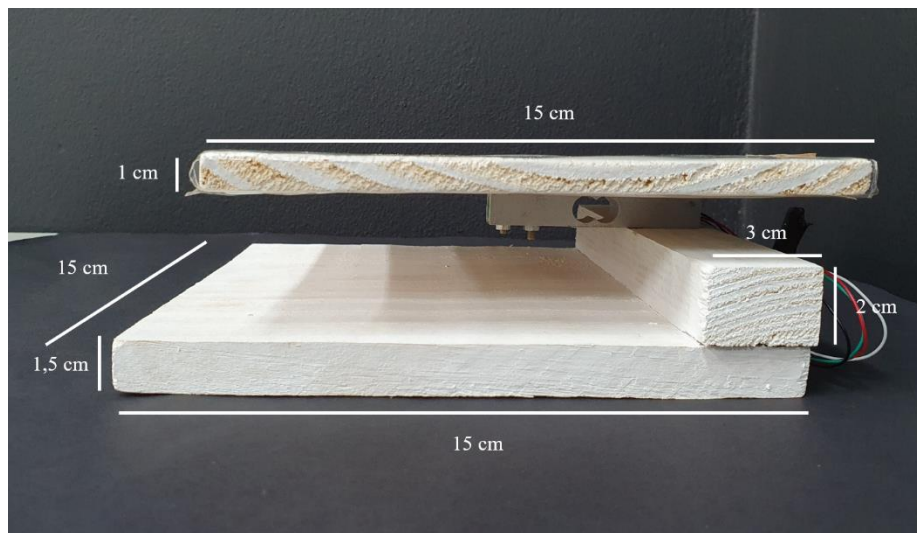
Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.2 Construção das Balanças

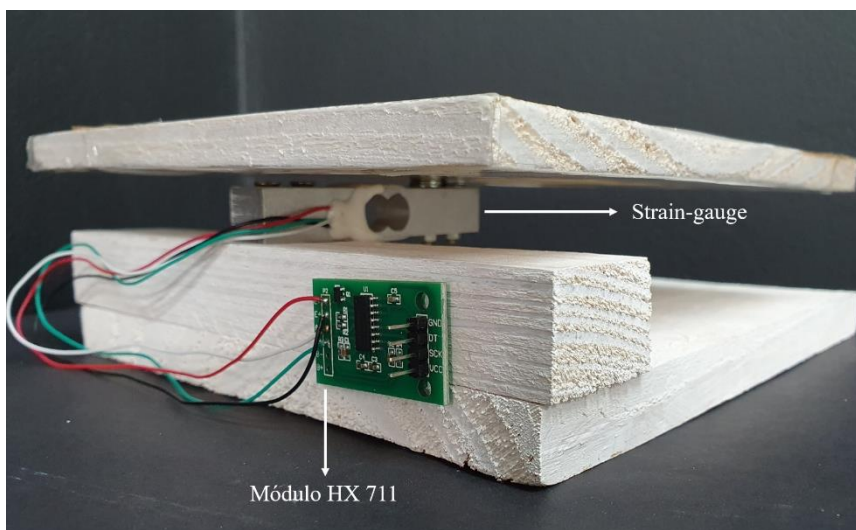
A estrutura das balanças foi construída pelo autor com madeira, sendo as medidas apresentadas na Figura 7(a). A estrutura é constituída de parte superior, porção medial e parte inferior. A parte superior com 15 cm de comprimento e 1 cm de espessura tem a função de sustentar o anel de medição, tendo uma célula strain-gauge acoplada abaixo dela. A porção medial é constituída de um suporte de madeira para sustentar a célula strain-gauge e fornecer espaço para deslocamento da porção superior. A parte inferior tem a função base para apoiar a estrutura.

A fim de preservar o material, as estruturas das balanças foram pintadas, envernizadas e revestidas na sua parte superior com papel plástico adesivo contact. Para medir a variação mássica das amostras foram instalados, em cada balança, uma célula strain-gauge conectadas junto a um módulo Hx711, onde posteriormente foram ligadas à placa Arduíno MEGA 2560 R3, conforme apresentado na Figura 7(b).

Figura 7 - Construção das balanças com suas medidas (a) e módulo Hx711 (b)



(a)



(b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Esta célula strain-gauge funciona como um transdutor, que por sua vez possui capacidade de medir pequenas deformações mecânicas e que ao serem deformadas, aumentam a resistência elétrica no sistema (ohms). Estes valores são amplificados pelo módulo Hx711 que nada mais é do que um conversor analógico-digital operacional de 24 Bits, ou seja, este módulo adequa o sinal enviado pela célula strain-gauge para o microcontrolador da placa Arduino, fazendo com que seja possível transformar estes valores em medidas de massa com precisão de até 1 grama.

3.1.2 Calibração das Balanças

Para o correto funcionamento do sistema é importante que as balanças reportem leituras precisas e fidedignas. Para isso foi necessário realizar um processo que verificou a veracidade e confiança dos dados medidos. Neste processo utilizou-se o algoritmo apresentado na Figura 8, onde o valor do sinal enviado pelo módulo Hx711 foi compreendido em quilogramas com precisão de até três casas decimais.

Figura 8 - Algoritmo usado para a calibração das balanças. As linhas de comentários a respeito de cada parte do algoritmo estão escritas na cor cinza

```
1 // Inclusão da biblioteca
2 #include <HX711.h>
3
4 // Define os pinos usados
5 #define pinoDT 2
6 #define pinoSCK 3
7
8 // Instanciar Objeto
9 HX711 scale;
10
11 // Declaração da variável
12 float massa = 0;
13
14 void setup() {
15     Serial.begin(57600); // comando para acompanhar os valores medidos na tela do computador
16
17     scale.begin(pinoDT, pinoSCK); // puxa o valor dos pinos usados na balança
18     scale.set_scale(); // Limpa o valor da escala que será usado posteriormente como valor de calibração da balança
19
20     delay(2000);
21     scale.tare(); // zera o valor, afim de desconsiderar a massa da estrutura da balança
22
23     Serial.println("Balança Zerada");
24 }
25
26 void loop() {
27
28     massa = scale.get_units(5); // guarda a variável com o valor da média de 5 medidas
29     Serial.println(massa, 3); // envia dado com precisão de três casas decimais
30     delay(1000); // Tempo de espera para repetir o processo em milisegundos
31
32 }
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Durante a execução do algoritmo de calibração descrito acima, foi posto uma anilha de massa constante de trezentos gramas sobre a balança e após, realizou-se a média dos primeiros cem valores apresentados. Posteriormente, este valor foi dividido pelo valor do recipiente, em quilogramas, conforme Equação 1.

$$Kcb = \frac{Lm}{0,3} \quad (1)$$

Onde: Kcb = Constante de calibração da balança; Lm = Leitura média dos cem primeiros valores.

3.1.3 Processo de Verificação da Calibração das Balanças

O processo de verificação da constante de calibração objetiva verificar a constância dos dados obtidos da balança. Assim, após encontrar o valor adimensional de Kcb durante a calibração de cada uma das dezoito balanças, estas constantes foram testadas em objetos de diferentes massas constante (0,3 Kg, 0,5 Kg, 1Kg) durante o

período de 24 horas, sendo usado o limite de variação de 1 grama. Caso este limite não fosse respeitado, o processo de calibração deveria ser repetido.

Após esta etapa, o valor K_{cb} de cada balança pode ser usado no algoritmo de coleta de dados apresentado no Apêndice I, nas linhas de programação 93 a 101. Este procedimento foi realizado para cada uma das dezoito balanças usadas no estudo, sendo sempre realizada uma nova calibração entre o término do estudo de um solo e o início de outro.

3.2 PROCESSO DE CALIBRAÇÃO DOS SENSORES CAPACITIVOS V1.2

A segunda parte foi constituída do processo de calibração dos sensores capacitivos. Para este processo, foram coletadas amostras indeformadas de solo em locais distintos, saturadas, e dispostas na bancada de calibração dos sensores capacitivos (BCS).

3.2.1 Coleta e preparação das amostras de solo

A coleta das amostras foi realizada utilizando os mesmos anéis de Policloreto de Vinila (PVC) utilizados para o processo de calibração dos sensores (BCS), de diferentes diâmetros (50 mm, 100 mm, 150 mm). Após a limpeza da serrapilheira no local de coleta das amostras de solo, os anéis foram inseridos no solo e removidos com cuidado de forma a não comprometer a estrutura da amostra, conforme Figura 9.

Para a realização deste estudo foram coletados três tipos distintos de solo Vertissolo Hidromórfico, Argissolo Vermelho Distrófico Arênico e Latossolo Vermelho Distroférico Típico (S1, S2, S3, respectivamente), em duas profundidades, 0-10 cm e 20-30 cm, localizados conforme Tabela 2, Figura 9. Os solos escolhidos são de características distintas em virtude da necessidade de se compreender o comportamento dos sensores capacitivos v1.2 nas diferentes condições. Assim, foram coletadas amostras de um Vertissolo de uma área de várzea com argilominerais expansivas. O segundo solo um Argissolo, sendo o solo com maiores percentuais de areia usados no estudo. E o terceiro solo um Latossolo com argilominerais 1:1 bastante intemperizados, caracterizando tipos de solos representativos do estado do Rio Grande do Sul.

Tabela 2 - Localização da coleta dos solos usados no estudo.

Solo	Localização	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Tipo de Solo
S1	São Pedro do Sul/RS	29°69'88,04" S	54°12'93,77" O	110	Vertissolo
S2	Santa Maria /RS	29°72'11,17" S	53°70'50,96" O	94	Argissolo
S3	Augusto Pestana/RS	28°27'34,19" S	53°59'09,60" O	390	Latossolo

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 9 - Coleta de amostra na profundidade de 20-30 cm.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Estas amostras foram enumeradas e seladas com papel filme ainda à campo para manter sua estrutura e posterior identificação de sua profundidade de coleta. Na Tabela 3 estão descritas as composições granulométricas dos três solos e sua classificação.

Tabela 3 - Composição granulométrica dos solos usados no estudo

Solo	Profundidade (cm)	Granulometria (g Kg ⁻¹)			Classe Textural
		Areia	Silte	Argila	
S1	0-10	360,6	288,3	351,1	Franco
S1	20-30	475,5	120,2	405,3	Argilosa
S2	0-10	689,8	225,5	84,7	Franco
S2	20-30	652,1	235,3	112,6	Arenosa
S3	0-10	541,3	202,6	309,4	Franco
S3	20-30	456,8	110,7	448,5	Argilo-Arenosa

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na profundidade 0 a 10 centímetros o solo S1 possui cor de fundo 5YR 3/10 pelo código de Munsell, sendo pouco cascalhento de estrutura fraca de tamanho pequena e granular. Sua cerosidade é pouca de grau fraco sendo moderadamente coeso de consistência solta, friável, muito plástica e não pegajosa com raízes finas e abundantes de poros muito pequenos e abundantes com transição topográfica plana de contraste difuso. Enquanto na profundidade de 20 a 30 centímetros possui cor 5Y 2,5/1, pouco cascalhenta de estrutura de blocos angulares de tamanho grande e estrutura fraca de pouca cerosidade de grau fraco fortemente coeso. A consistência é dura, extremamente firme, plástica e pegajosa com poucas raízes muito finas e de transição topográfica plana e difusa.

O solo S2 na profundidade de 0 a 10 centímetros possui cor 2.5 YR 3/2, sendo considerado cascalhento de estrutura fraca a moderada médio com blocos subangulares, poros pequenos médios comuns; ligeiramente duro, friável, ligeiramente plástico, ligeiramente pegajoso com transição topográfica clara e ondulada. Enquanto na profundidade de 20 a 30 centímetros possui cor 5YR 4/4, cascalhento, de estrutura fraca a média com blocos subangulares, poros pequenos médios comuns, ligeiramente duros, friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso com transição topográfica gradual e ondulada.

O solo S3 possui na profundidade de 0 a 10 centímetros cor 2,5R 3/4, sendo pouco cascalhento de estrutura granular média e fraca. Sua cerosidade é macia, friável e ligeiramente plástica, não pegajosa com poucas raízes médias com transição topográfica plana e difusa. Enquanto na profundidade de 20 a 30 centímetros possui cor 10R 4/6, sendo pouco cascalhento de estrutura laminar grande e moderada com poros pequenos, de macia cerosidade sendo friável e ligeiramente plástica, não pegajosa e de transição topográfica plana e difusa.

Após a coleta das amostras a campo, estas foram levadas ao laboratório para realização da limpeza e toailete dos anéis. Posteriormente, foram preparadas para saturação colocando em sua parte inferior papel feltro preso com elástico. Todas as dezoito amostras foram saturadas, submergindo-as parcialmente em água com uma lâmina a 1/3 de sua altura buscando atingir sua capacidade de campo através do processo de ascensão capilar, usado aqui, para que não fossem criados bolsões de ar dentro do solo. Ainda, abaixo dos anéis foram usados pequenos suportes de madeira para que houvesse espaço entre fundo do anel e o fundo do recipiente com água, demonstrado na Figura 10.

Figura 10 - Processo de Saturação das Amostras



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após atingirem a saturação, estas foram deixadas em espera por aproximadamente uma hora, também em suportes de madeira para que parte da água não retida pelo solo e papel feltro fosse eliminada da amostra. Posteriormente, todas as dezoito amostras foram acomodadas em suas respectivas balanças na bancada de calibração e então, inseridos os sensores, verticalmente nas seis amostras de 50mm de diâmetro e horizontalmente nas demais amostras de 100mm e 150mm.

3.2.2 Coleta dos Dados da BCS

Durante o processo de secagem das amostras ainda na bancada de calibração dos sensores, os dados referentes as massas das amostras e valores apresentados pelos sensores foram armazenados em intervalos de cinco minutos, gerando através do algoritmo de coleta de dados, um arquivo de texto com os valores de massa e leitura do sensor para cada amostra. No Apêndice I está descrito o algoritmo usado na coleta de dados.

Após apresentarem massa constante por um período de 24 horas cada amostra de solo foi removida de seu anel e conseqüentemente destorroada. Este processo serviu para que estas amostras fossem dispostas em recipientes de alumínio, onde posteriormente foram levadas a estufa a uma temperatura de 105° a 110 °C por período de 24h ou até atingirem massa constante. Este valor da massa da amostra encontrado após esta etapa é chamado de M_s (massa seca), sendo importante para compreensão da quantidade disponível de água em cada amostra.

No Software Excel foram criadas planilhas com os valores medidos pelas balanças durante o decorrer do experimento, sua massa final após secagem em estufa e valor lido pelos sensores. Para obter o valor real de cada uma das amostras, foi usada a Equação 2, onde os valores da massa dos anéis, sensores, feltro e borracha já haviam sido descontados dos valores obtidos e armazenados pelas balanças.

$$Ug = \left(\left(\frac{M_u - M_s}{M_s} \right) \times 100 \right) \quad (2)$$

Onde: Ug é o Conteúdo gravimétrico de água no solo (% de massa), M_s é a massa seca da amostra e M_u é a massa úmida da amostra.

Após a obtenção do conteúdo gravimétrico de água no solo à base de massa, foi calculado através da equação 3, o seu conteúdo volumétrico de água no solo θ (% Vol.). Este valor corresponde a quantidade de água armazenada em um determinado volume de solo.

$$\theta = Ug \times Ds \quad (3)$$

Onde: θ é o conteúdo volumétrico de água no solo (% volume), Ug é o Conteúdo gravimétrico de água no solo (% de massa) e Ds a densidade do solo.

3.2.3 Análise dos Dados da BCS

Utilizando o software R[®], foi realizado o teste de Correlação de Pearson, sendo uma ferramenta útil para obter o grau de correlação (equação 4), força e intensidade entre a variável massa e a variável de leitura do sensor. Este método indica que, à medida que uma variável for alterada, a outra variável terá um comportamento linear e previsível (ARAÚJO *et al.*, 2016). A correlação expressa o sentido da correlação, e sua intensidade é representada por um valor numérico que oscila entre -1 e 1, sendo considerado correlação linear negativa perfeita ($r = -1$) ou positiva perfeita ($r = 1$) ou, ainda, ausência de relação linear ($r = 0$). Este método é interessante de ser aplicado em estudos de regressão, independentemente do número de amostras (MIOT, 2018; CARGNELUTTI FILHO *et al.*, 2010; FERREIRA, 2009).

$$r = \frac{\sum xy - \frac{(\sum x)(\sum y)}{n}}{\left(\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}\right)\left(\sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{n}\right)} \quad (4)$$

Onde: n é o tamanho da amostra, X os valores observados da variável independente e Y os valores observados da variável dependente.

As análises estatísticas foram realizadas a fim de encontrar, através de regressão linear (Equação 5) e polinomial (Equação 6), equações que melhor representassem as medidas de umidade estimadas pelo sensor o conteúdo volumétrico de água medido, isto para cada um dos tipos de solo e suas variações de volume total das amostras.

$$x = ay + b \quad (5)$$

$$x = b_0 + b_1y + b_2y^2 + \dots + b_ny^n \quad (6)$$

A avaliação dos modelos de estimativa de umidade do solo baseou-se nos índices estatísticos, coeficiente de determinação (R^2), raiz quadrada média do erro (RMSE), usando a equação 7 e o índice de concordância de Willmott (1981) que apresenta o grau de precisão entre os valores medidos e os valores estimados, sendo como o valor de 1 (concordância perfeita) e 0 (nehuma concordância), calculado através da equação 8.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{n}} \quad (7)$$

$$Iw = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|E_i - \bar{E}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right] \quad (8)$$

Onde: I_w é o índice de concordância de Willmott, E_i é o valor da observação estimada, O_i é o valor da observação medida, \bar{E} é a média dos valores da observação estimada e \bar{O} é a média dos valores da observação medida.

A fim de avaliar o nível de confiança das equações utilizadas, foi realizado o teste do índice de desempenho (I_d), proposto por Camargo e Sentelhas (1997), onde calcula-se o produto entre o índice de concordância de Willmott e o coeficiente de correlação, e posteriormente, interpretam-se os resultados através dos critérios da Tabela 4.

Tabela 4 - Critérios para avaliação do modelo com base no coeficiente (I_d)

I_d	Classes de desempenho
> 0.85	Excelente
0.76 – 0.85	Muito bom
0.66 – 0.75	Bom
0.61 – 0.65	Regular
0.51 – 0.60	Ruim
0.41 – 0.50	Muito Ruim
≤ 0.40	Péssimo

Fonte: Camargo e Sentelhas (1997).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo trará de forma abrangente os resultados obtidos durante o desenvolvimento desta pesquisa e as dificuldades, problemas encontrados e soluções. Desta forma, os resultados e discussões apresentados aqui não obedecem necessariamente a uma sequência cronológica idêntica àquela aplicada durante o desenvolvimento da pesquisa. O primeiro item descreve os resultados encontrados no processo de verificação da calibração das balanças. O segundo item descreve os resultados do processo de calibração dos sensores. O terceiro item descreve as dificuldades, problemas encontrados e soluções propostas.

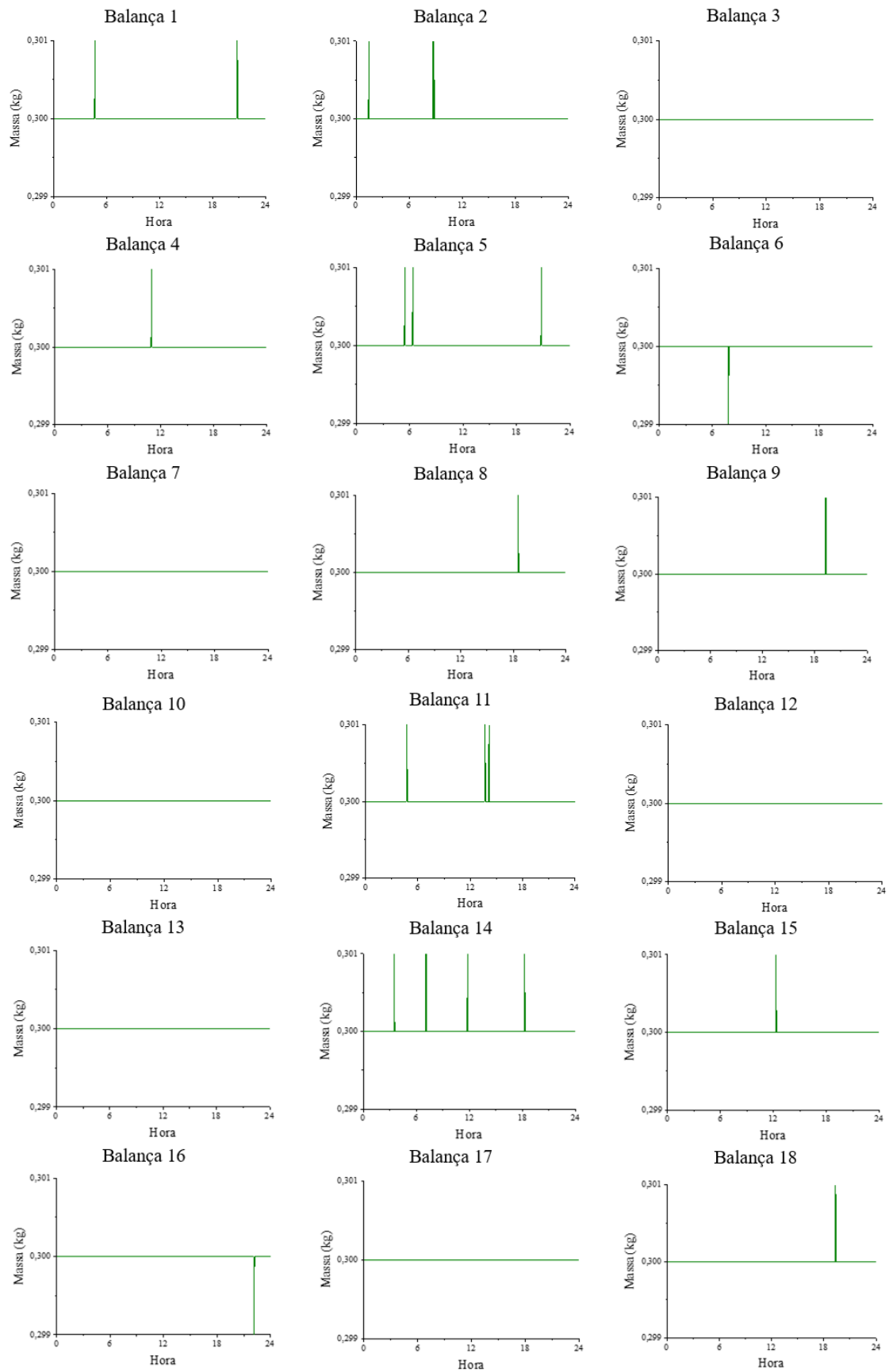
4.1 VERIFICAÇÃO DA BANCADA DE CALIBRAÇÃO DA BALANÇA (BCB)

Esta etapa teve como objetivo avaliar o nível de precisão das balanças construídas a fim de que fosse possível obter confiabilidade nos resultados colhidos. Para isto, foi usado um peso de massa constante de trezentos gramas.

Na Figura 11, os valores apresentados foram coletados durante período de 24 horas, sendo que a coleta dos dados foi realizada com intervalo de tempo de cinco minutos pois, este foi intervalo de tempo usado durante a posterior fase calibração dos sensores.

Os dados obtiveram um excelente nível de confiança uma vez que seis destas balanças não variaram a massa em momento algum, fato este considerado como o ideal. Contudo, as demais balanças variaram no máximo apenas 1 grama, respeitando o nível de precisão do equipamento usado. Cabe ressaltar que este valor não afeta o nível de precisão da relação massa/volume das amostras obtendo, portanto, excelente nível de confiança dos valores medidos.

Figura 11 - Teste do nível de confiança das balanças usadas no experimento



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 PROCESSO DE CALIBRAÇÃO DOS SENSORES CAPACITIVOS

Após o tratamento de todos os dados obtidos, foi possível avaliar o grau de correlação entre as variáveis do estudo, ou seja, a porcentagem de água contida em cada amostra de solo e sua respectiva leitura apresentada pelo sensor capacitivo.

Estes valores, apresentados na Tabela 5, denotam uma correlação negativa forte para a grande maioria dos conjuntos, ou seja, estas variáveis possuem boa correlação entre seus valores e, por serem negativas, inferem que, ao passo que uma diminui seu valor, a outra deverá, proporcionalmente, aumentar. Contudo, os conjuntos 2, 3 e 4 do Solo 2 e os conjuntos 1, 2 e 5 do Solo 3, apresentaram valores de correlação negativa fraca (FIGUEIREDO; SILVA, 2009; SOUSA, 2019). As razões que ocasionaram estes valores serão melhor debatidas no decorrer deste capítulo, onde foram realizadas outras análises estatísticas, uma vez que a Correlação de Pearson não deve ser a única ferramenta para avaliar a capacidade de representação de dados amostrais.

Tabela 5 - Análises das correlações de Pearson entre os valores obtidos de (% Vol.) da amostra e a leitura dos sensores

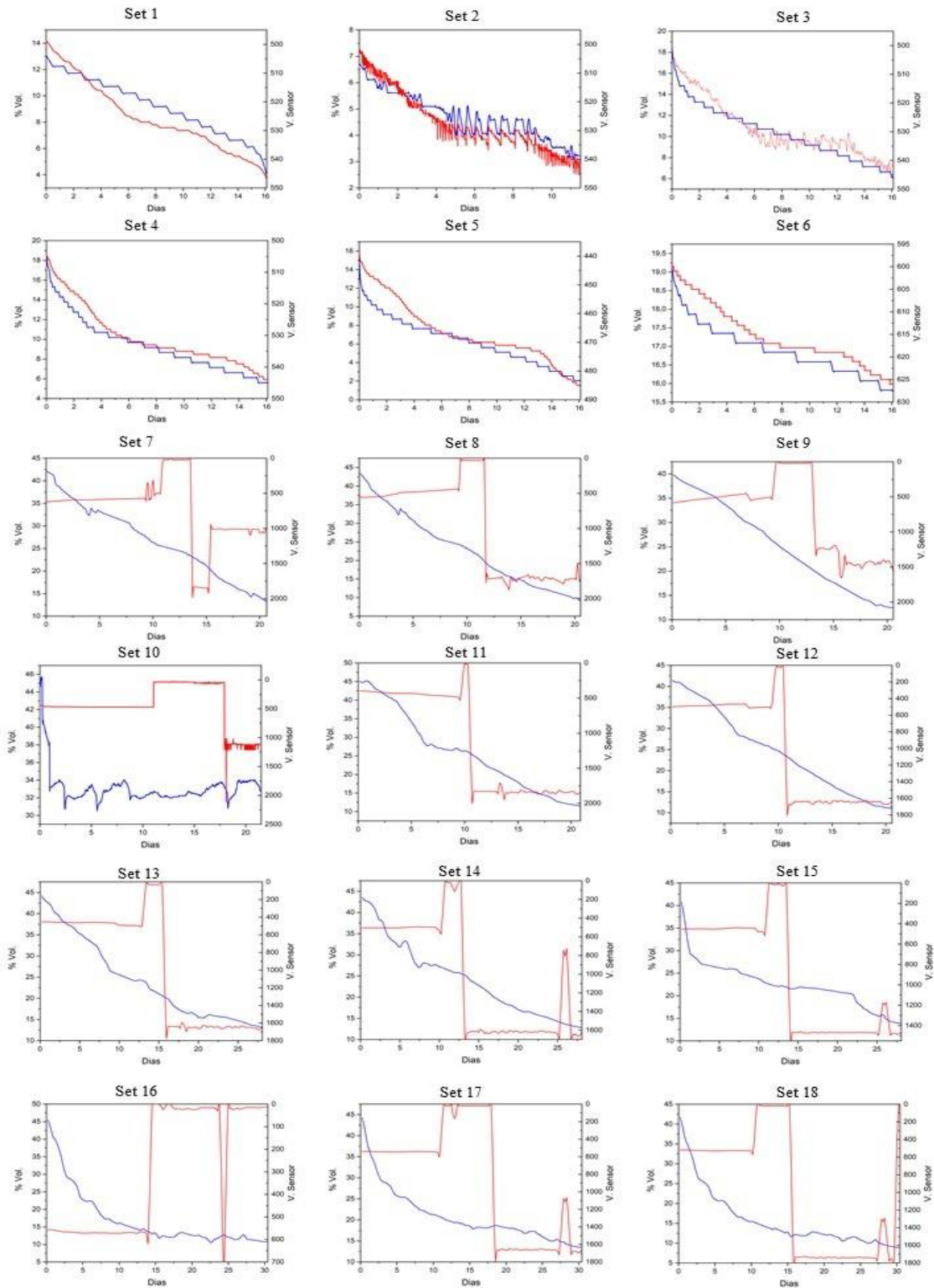
Conjunto	Solo 1	Solo 2	Solo 3
1	-0.963830	-0.810852	-0.6711237
2	-0.958529	-0.770184	-0.4530785
3	-0.940047	-0.765659	-0.6938946
4	-0.983115	-0.538612	-0.9262304
5	-0.969485	-0.888677	-0.4862255
6	-0.974159	-0.816499	-0.8964212
7	-0.405359	-0.872144	-0.850933
8	-0.476396	-0.907667	-0.8891962
9	-0.325211	-0.884506	-0.9471836
10	-0.374856	-0.944284	-0.9390826
11	-0.322145	-0.938880	-0.8998272
12	-0.299874	-0.938183	-0.9317391
13	-0.312491	-0.825674	-0.8271661
14	-0.289589	-0.872751	-0.8444094
15	-0.345178	-0.860853	-0.8148326
16	-0.341251	-0.991665	-0.9779806
17	-0.375641	-0.943470	-0.9847982
18	-0.368152	-0.974365	-0.9740899

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 12 estão apresentados os dados obtidos com o intervalo de tempo de cinco minutos entre as coletas. Estes dados mostram como evoluiu o experimento durante seu período de coleta de dados, apresentando a perda do conteúdo de água e o comportamento do sensor em cada amostra no Vertissolo Hidromórfico.

A mostras do Set 1 ao Set 6 possuem uma menor variação do conteúdo de água devido aos problemas mencionados na seção anterior. Este mesmo motivo, afetou as demais amostras que apresentaram erros nas suas leituras. A partir do Set 7 até o Set 18, todos os sensores usados nesta parte do estudo apresentaram o mesmo defeito. Devido a parte eletrônica acoplada ao sensor apresentar pontos de oxidação, estes valores não puderam ser levados em consideração para as análises de regressão que serão abordadas em seguida, uma vez que a Correlação de Pearson apontou baixa correlação entre as variáveis.

Figura 12 - Ilustrações gráficas de cada conjunto de calibração (Set) durante o desenvolvimento da pesquisa no Solo 1 (Vertissolo hidromórfico). O eixo das abcissas apresenta os dias decorridos durante o período de coleta. O eixo das ordenadas esquerdo está a variação da porcentagem de massa da amostra (em azul) e o eixo das ordenadas direito estão apresentados os valores dos sensores (em vermelho). A profundidade dos Set 1, Set 2, Set 3, Set 5, Set 8, Set 9, Set 13, Set 14 e Set 15 é de 0 à 10 centímetros, enquanto as demais é de 20 à 30 centímetros



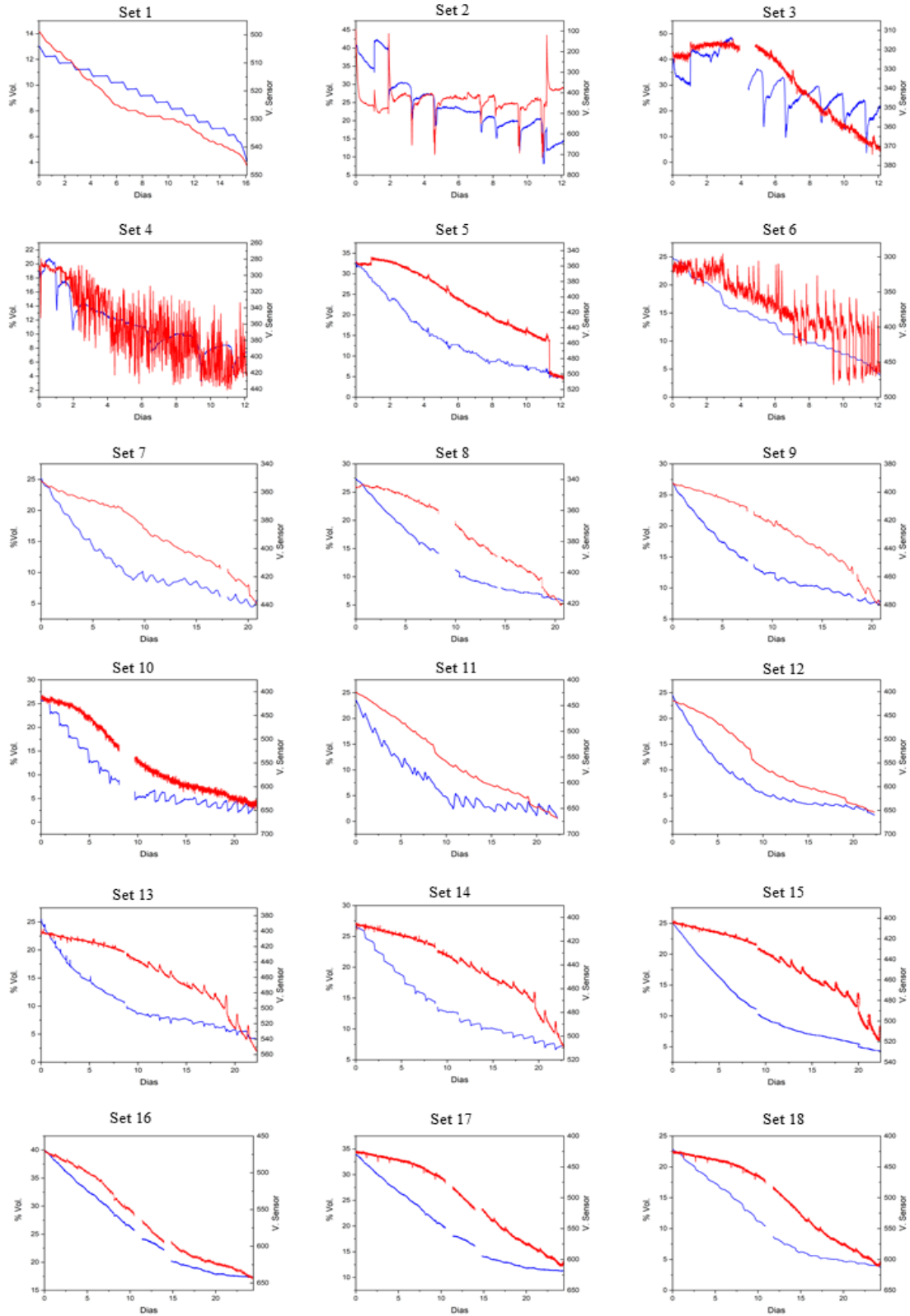
Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 13, estão as ilustrações gráficas de cada conjunto de calibração durante o desenvolvimento da pesquisa no Argissolo Vermelho Distrófico Arênico. Os Set 1 e Set 5 foram os conjuntos de menor volume que apresentaram comportamentos mais lineares. Contudo, no Set 1 apenas parte dos dados adquiridos foram possíveis de serem coletados devido a problemas encontrados na sua respectiva balança. O Set 5, por outro lado, apresentou as duas linhas de dados decrescendo juntas, mostrando uma boa correlação entre as duas variáveis, enquanto no final houve uma queda brusca nesse valor.

As amostras de volume médio, Set 7 ao Set 12, mostram que os sensores acompanharam o decréscimo do conteúdo de água da amostra, porém com um certo tempo de atraso. É possível notar que no tempo inicial (t_0) até o tempo final (t_f) as linhas de valores dos sensores aumentaram seu coeficiente angular da reta, em módulo, enquanto os valores do conteúdo de água da amostra diminuíram, ou seja, o coeficiente angular, em módulo, das retas do conteúdo de água diminuiu, mostrando que as amostras perdiam água mais rapidamente nos dias iniciais e que os sensores apresentaram um atraso na leitura desta mudança do conteúdo de água contida nas amostras.

Ao aumentar o volume das amostras, Set 13 ao Set 18, foi possível perceber que, as distâncias entre as duas retas nas ilustrações gráficas foram maiores quando comparada com amostras de volume médio. Isto significa que o tempo de atraso entre as mudanças do conteúdo de água da amostra e a leitura do sensor foi maior. Contudo, por se tratarem de amostras com volumes maiores, a relação massa/volume da perda de água pela amostra se deu mais lentamente, dando tempo para o sensor adaptar-se a nova situação de umidade.

Figura 13 - Ilustrações gráficas de cada conjunto de calibração (Set) durante o desenvolvimento da pesquisa no Solo 2 (Argissolo Vermelho Distrófico Arênico). O eixo das abcissas apresenta os dias decorridos durante o período de coleta. O eixo das ordenadas esquerdo está a variação da porcentagem de massa da amostra (em azul) e o eixo das ordenadas direito estão apresentados os valores dos sensores (em vermelho). A profundidade dos Set 1, Set 2, Set 3, Set 5, Set 8, Set 9, Set13, Set 14 e Set 15 é de 0 à 10 centímetros, enquanto as demais é de 20 à 30 centímetros



Fonte: Elaborado pelo autor.

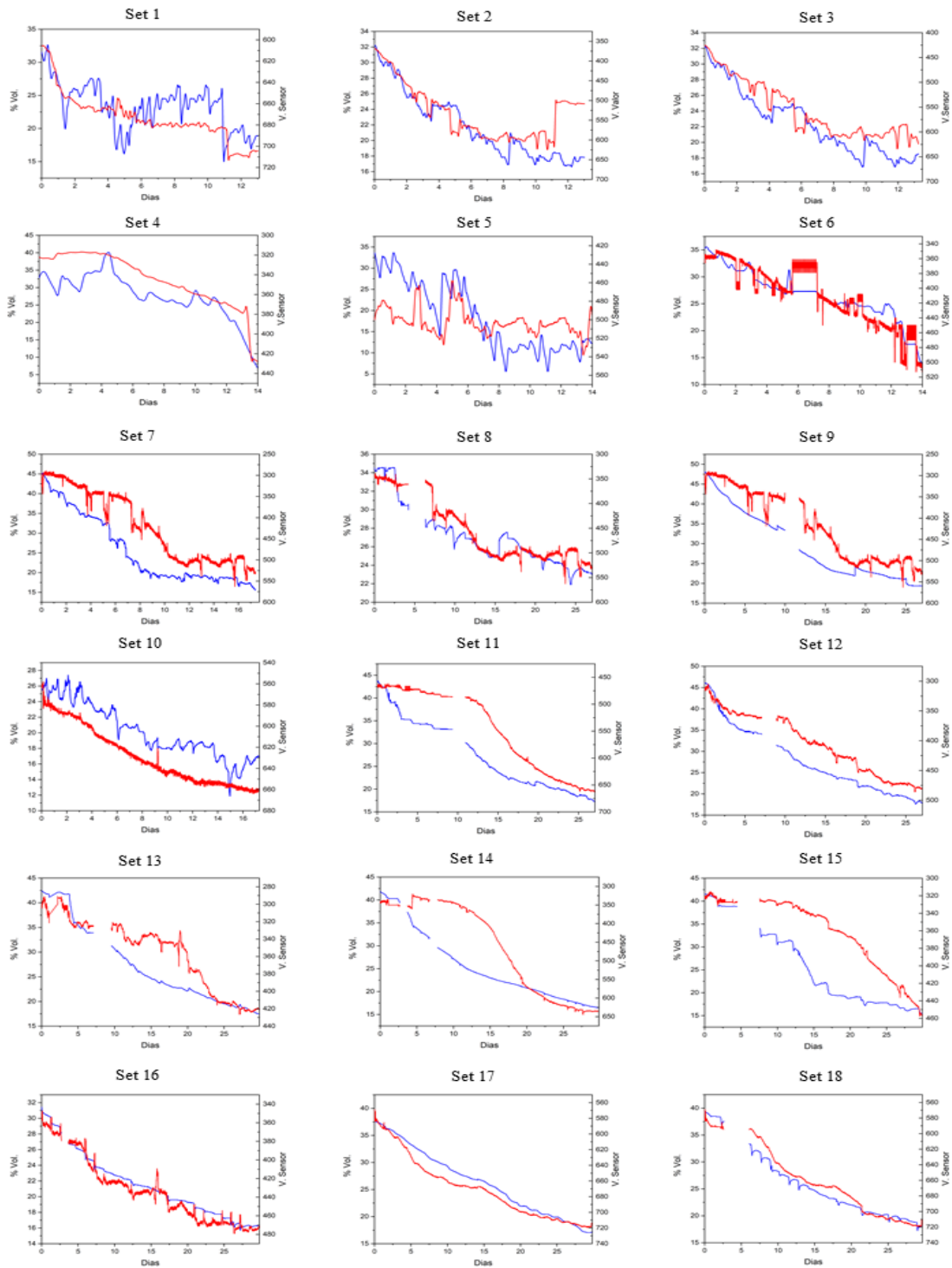
Os valores de cada conjunto de calibração durante o desenvolvimento da pesquisa do Latossolo Vermelho Distroférico Típico estão apresentados na Figura 14. As amostras de menor volume apresentaram dados bastante inconsistentes, uma vez que nestes, a variação dos valores encontrados pelos sensores não acompanhou de maneira satisfatória os valores da variação do conteúdo de água no solo.

Por outro lado, as amostras de volume médio mostram que os valores das duas variáveis possuíam uma boa correlação. Os dados apresentaram um menor tempo de atraso na leitura do sensor como apresentado nos Set 7, Set 8, Set 9 e Set 12.

Nas amostras de maior volume, as duas linhas dos gráficos seguiram apresentando coeficientes angulares próximos, ou seja, as linhas distanciavam-se pouco entre si, demonstrando que o sensor possuía condições de acompanhar o decréscimo do conteúdo de água das amostras.

As amostras que apresentaram menor diferença entre o conteúdo de água no solo e a leitura do sensor foram aquelas com maiores teores de argila em sua composição, Set 16, Set 17 e Set 18, demonstrando que amostras que perdem água mais lentamente, possuem melhores ajustes lineares.

Figura 14 - Ilustrações gráficas de cada conjunto de calibração durante o desenvolvimento da pesquisa no Latossolo Vermelho Distroférico Típico (Solo 3). O eixo das abcissas apresenta os dias decorridos durante o período de coleta. O eixo das ordenadas esquerdo está a variação da porcentagem de massa da amostra (em azul) e o eixo das ordenadas direito estão apresentados os valores dos sensores (em vermelho). A profundidade dos Set 1, Set 2, Set 3, Set 5, Set 8, Set 9, Set13, Set 14 e Set 15 é de 0 à 10 centímetros, enquanto as demais é de 20 à 30 centímetros



Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao comparar os gráficos apresentados nas Figura 13 e Figura 14, foi possível perceber que o solo mais arenoso (Argissolo Vermelho Distrófico Arênico) aumentou a diferença entre os coeficientes angulares das retas, apresentando um comportamento logaritmo ao gráfico, quando comparado os dados apresentados no Latossolo Vermelho Distroférico Típico.

4.3 ANÁLISE VOLUMÉTRICA

Neste item será descrito os resultados da calibração dos sensores individualmente por diâmetro das amostras. Será descrito correlação da variação de percentagem da água na amostra com a leitura do sensor. Inicialmente serão descritos os resultados nas amostras de menor diâmetro (50 mm), depois nos intermediários (100 mm) e finalmente nas amostras de maior diâmetro (150 mm). As discussões a seguir serão abordadas levando em conta análise de regressão linear realizadas com intervalo de tempo de cinco minutos entre as leituras dos dados.

4.3.1 Calibração em amostras de 50mm de diâmetro

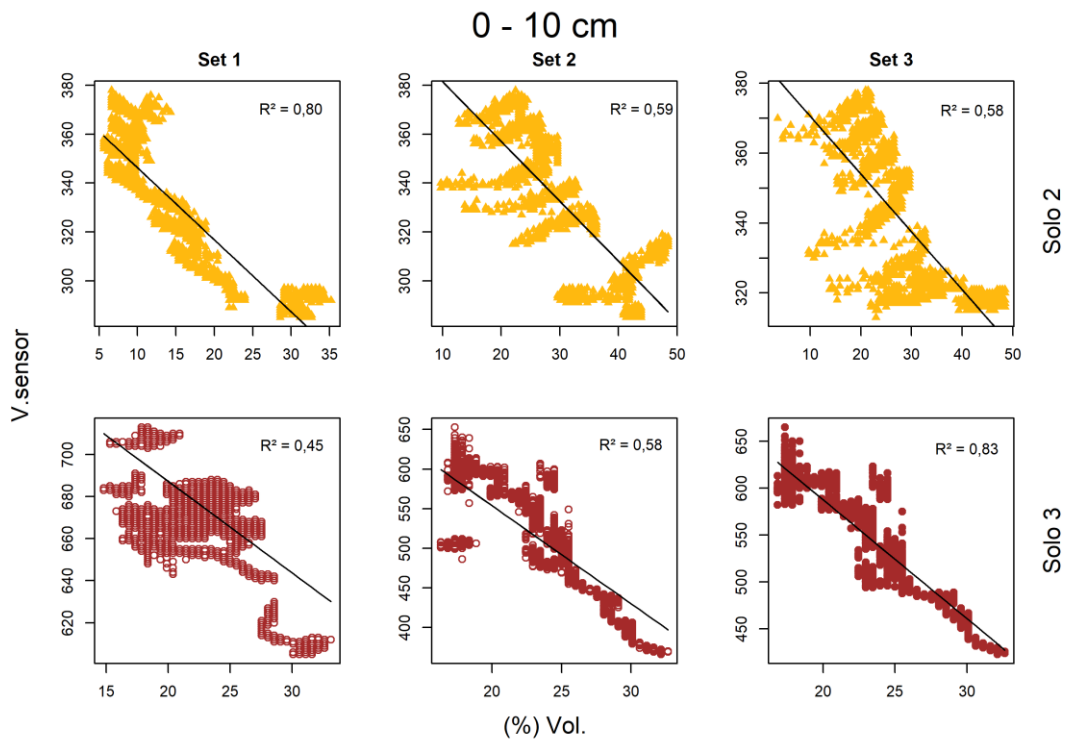
As amostras de menor diâmetro possuem uma particularidade perante as demais. Por questões de dimensão, os sensores foram inseridos verticalmente no solo. Desta forma, foi possível perceber que as leituras realizadas com esta orientação (vertical), em geral, apresentam baixo grau de confiabilidade. Tanto para as amostras de solo superiores (0 – 10 cm), Figura 15, quanto para as amostras de solo inferiores (20 – 30 cm), Figura 16.

Apesar de as amostras do solo 1, possuírem bons coeficientes de determinação, na realidade possuem pouco espaço amostral, ou seja, os valores de percentagem volumétrica de água contida no solo variaram pouco. Desta forma, representam apenas uma variação de 8% (Set 1) e de 12% (Set 2), enquanto as amostras dos demais solos chegaram a variar este valor em até 40%.

As razões que motivaram a falta de dados foram apresentadas na última seção deste capítulo onde existiram dificuldades, que acabaram por afetar a quantidade de dados coletados do Vertissolo Hidromórfico. Assim, foi possível concluir que quanto maior a variabilidade da percentagem de água na amostra de solo, mais confiável tende a ser sua regressão linear.

Os valores representados graficamente nos demais solos, Solo 2 e Solo 3, apresentam valores muito discrepantes entre si. Ao analisar, principalmente os conjuntos, Set 2 e Set 3 do solo 2, e também, Set 1 do solo 3. As leituras realizadas pelo sensor possuem mesmo valor para porcentagens de volume de água bastante diferentes, como por exemplo, o Set 2 no Solo 2, onde o valor de 340 pode representar a faixa de umidade do solo de 10% à aproximadamente 27% do volume da amostra. Ou ainda, o Set 1 do Solo 3, onde existe a faixa de leitura do sensor com valores que partem de 655 à 675 que podem representar o mesmo valor de umidade do solo.

Figura 15 - Gráficos de comparação entre as regressões lineares da camada superior (0 – 10 cm) dos dois solos usados no estudo em amostras de 50mm de diâmetro



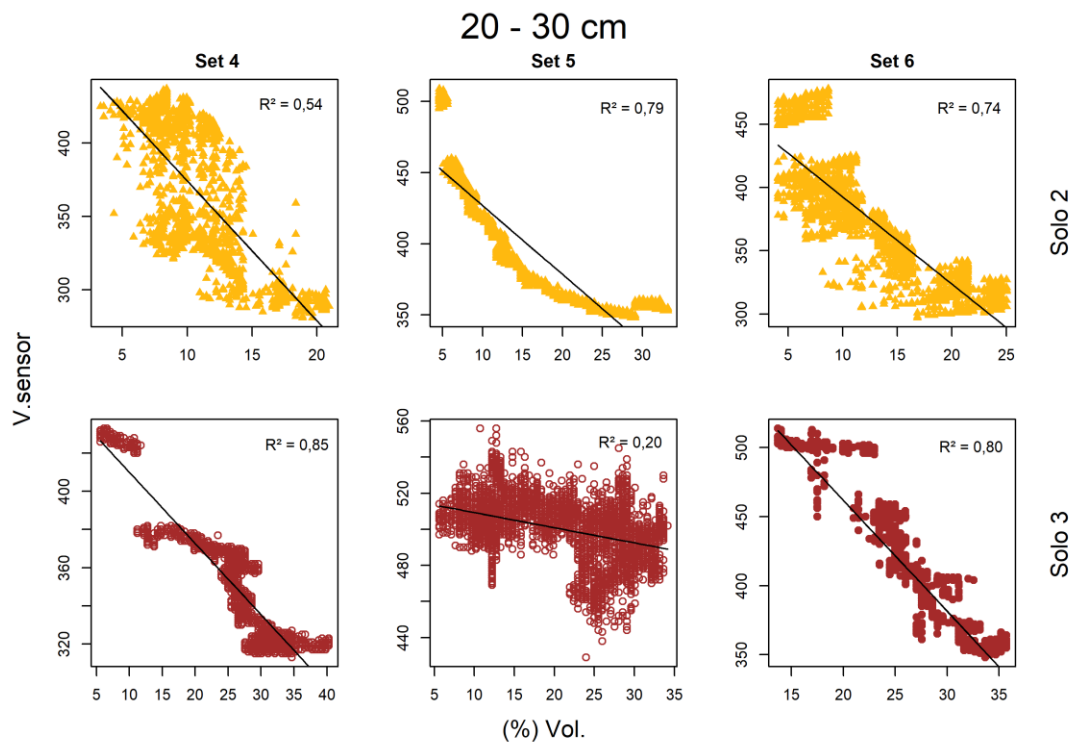
Fonte: Elaborado pelo autor.

Como estes sensores estavam dispostos verticalmente nas amostras de solo, ocorreram erros que confundiram o entendimento da maneira com que ocorre a perda de água na amostra de solo. Desta forma, pode-se perceber que, se a amostra de solo perde água e esta é removida de maneira com que a direção do fluxo de água dentro da amostra seja o mesmo da direção o qual o sensor foi inserido, desenvolve-se uma problemática. Pois, se ao longo do material dielétrico do sensor existem pontos com maior permissividade elétrica e outros com menor, e uma vez que a perda de água se deu de

cima para baixo da amostra, processo de drenagem, o solo estará perdendo umidade. Contudo, o sensor será incapaz de perceber esta mudança no conteúdo de água da amostra, uma vez que parte dele estará em contato com locais mais úmidos do solo, enquanto a outra extremidade estará com menores valores de conteúdo de água ao seu redor.

Desta forma, sensores capacitivos não devem ser inseridos verticalmente se usados para medir o conteúdo volumétrico de água do solo. E isto fica ainda mais perceptível ao analisar a Figura 16, onde são apresentados os dados dos conjuntos inseridos nas amostras da camada inferior dos solos, Set 4, Set 5 e Set 6.

Figura 16 - Gráficos de comparação entre as regressões lineares da camada inferior (20 – 30 cm) dos dois solos usados no estudo em amostras de 50mm de diâmetro



Fonte: Elaborado pelo do autor.

Este problema do uso de sensores instalados verticalmente no solo, não é particular deste tipo de sensor. Em estudo realizado por Hagenau *et al.* (2020), a fim de compreender o funcionamento de sensores TDR em situações a campo, constata que caso haja uma mudança acentuada nas propriedades do solo ou no conteúdo de água ao longo da sonda, torna-se difícil interpretar este sinal e, portanto, determinar o conteúdo de água correto.

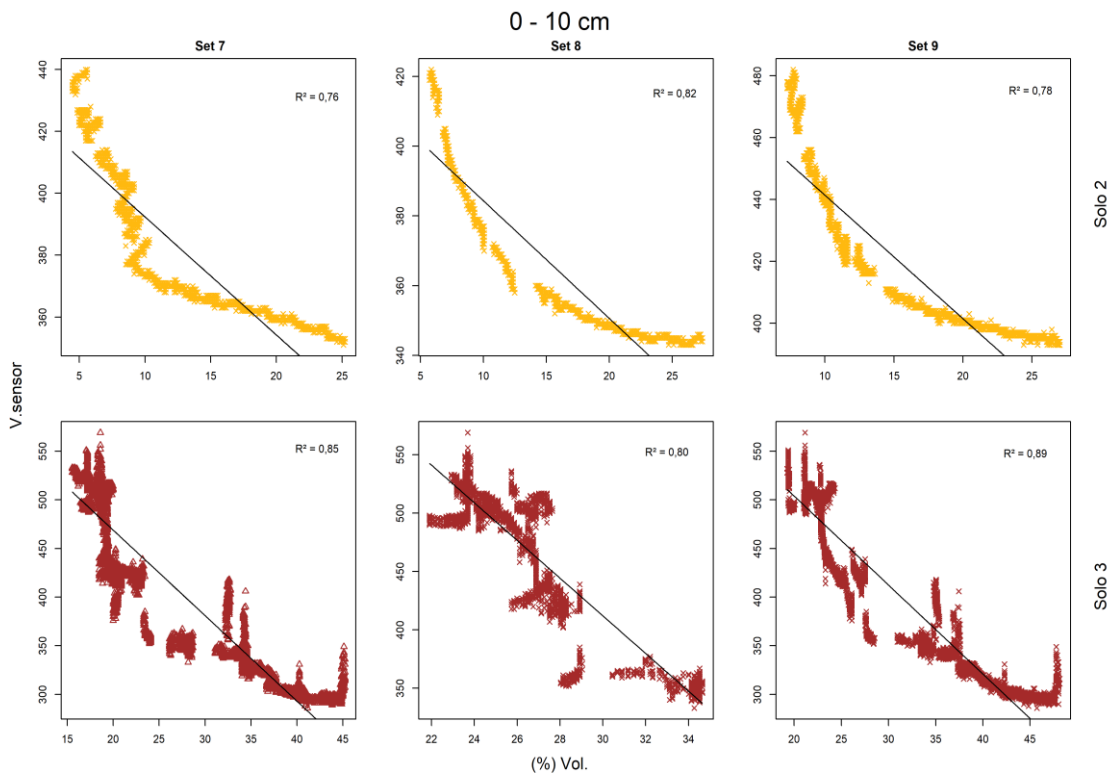
4.3.2 Calibração em amostras de 100mm de diâmetro

Na Figura 17, são apresentados os gráficos do comportamento dos sensores nas amostras de solo da profundidade de 0 a 10 centímetros, tanto para o Argissolo Vermelho Distrófico Arênico (Solo 2), quanto para o Latossolo Vermelho Distroférico Típico (Solo 3).

Devido a particularidade do Vertissolo Hidromórfico de expandir e contrair, os sensores exibiram comportamento irregular, apresentando defeitos como serão mencionados na seção das dificuldades e problemas encontrados, tornando os dados inutilizáveis.

Durante o processo de drenagem das amostras contidas com o Argissolo Vermelho Distrófico Arênico, houve em média 20% de variação do conteúdo volumétrico de água. Isto deve-se ao fato deste tipo de solo possuir textura mais arenosa, retendo uma menor quantidade de água em porcentagem por volume quando comparado com solo mais argilosos (GONDIM et al., 2010; SOUZA et al., 2019), exemplo aqui do Solo 3 (Latosolo Vermelho Distroférico Típico). Portanto, ao comparar os gráficos apresentados na Figura 18, pode-se observar um comportamento distinto entre os dois tipos de solo. Além de a faixa de conteúdo volumétrico de água no Solo 2 ser menor, este ainda apresentou uma leve não linearidade de dados, o que afeta de forma contundente o ajuste feito através de regressão linear simples.

Figura 17 - Gráficos de comparação entre as regressões lineares da camada superior (0 – 10 cm) em amostras de 100mm de diâmetro

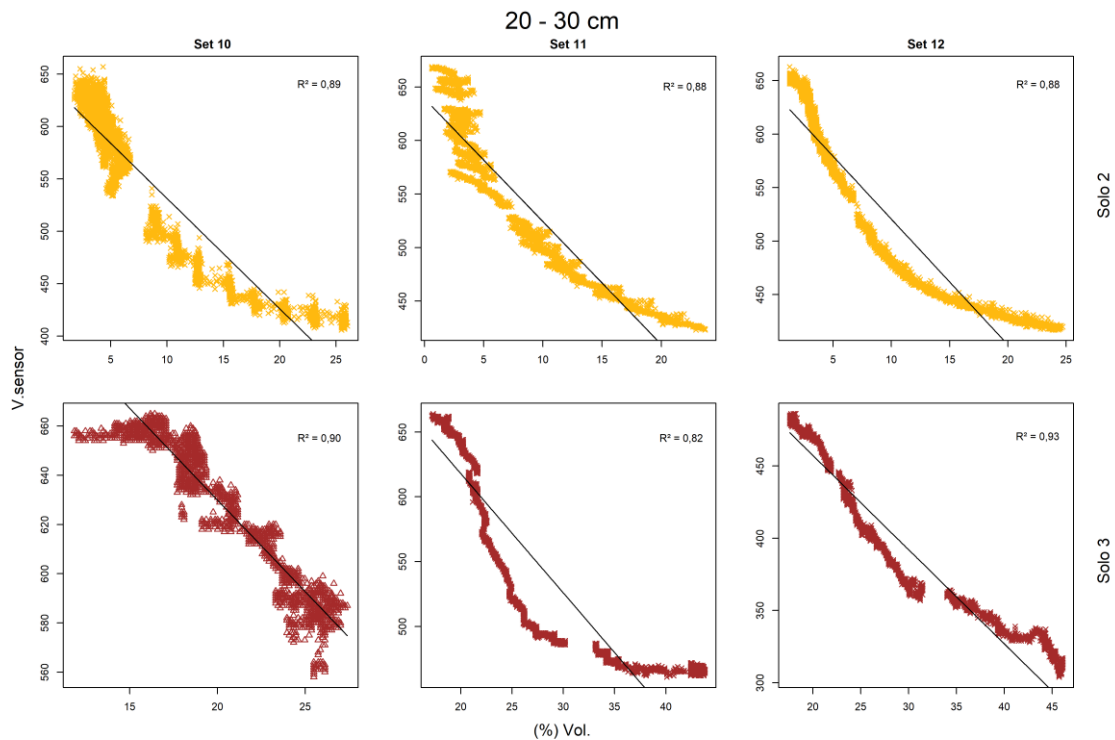


Fonte: Elaborado pelo autor.

Para as amostras de solo coletadas na profundidade de 20 a 30 centímetros, houve pouca diferença quando comparadas as suas respectivas amostras menos profundas. Contudo, o coeficiente de determinação médio das amostras superiores do Solo 2 foi de 78,67% enquanto na camada de 20 a 30 centímetros foi de 88,33%.

A camada inferior do Solo 2 possui maior quantidade de argila quando comparada a sua camada superior. Desta forma, foi possível perceber que a dispersão dos valores se deu de maneira mais linear, ou seja, o solo drenava mais lentamente, fazendo com que o sensor obtivesse maior precisão em suas medidas. Isto é devido ao fato de que havia menor variação no volume de água na amostra para uma mesma quantidade de tempo. Contudo, os dados ainda apresentaram uma tendência não linear, conforme Figura 18.

Figura 18 - Gráficos de comparação entre as regressões lineares da camada superior (20 – 30 cm) em amostras de 100mm de diâmetro



Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim, mesmo que os coeficientes de determinação sejam relativamente próximos como os do Set 6 e Set 11 do solo 3 ($R^2= 0,82$), não existem faixas de dados distantes da linha de regressão no Set 11 quando comparados os dois gráficos. E ainda, no Set 11 não há linhas contínuas de dados, verticais ou horizontais, representando um mesmo valor na leitura do sensor, gerando uma ampla variação do conteúdo volumétrico de água, assim como nas demais amostras de tamanho médio. Diferentemente, os sensores inseridos verticalmente, apresentam estes erros em conjuntos de pontos que representam erros na leitura dos dados através do material dielétrico do sensor.

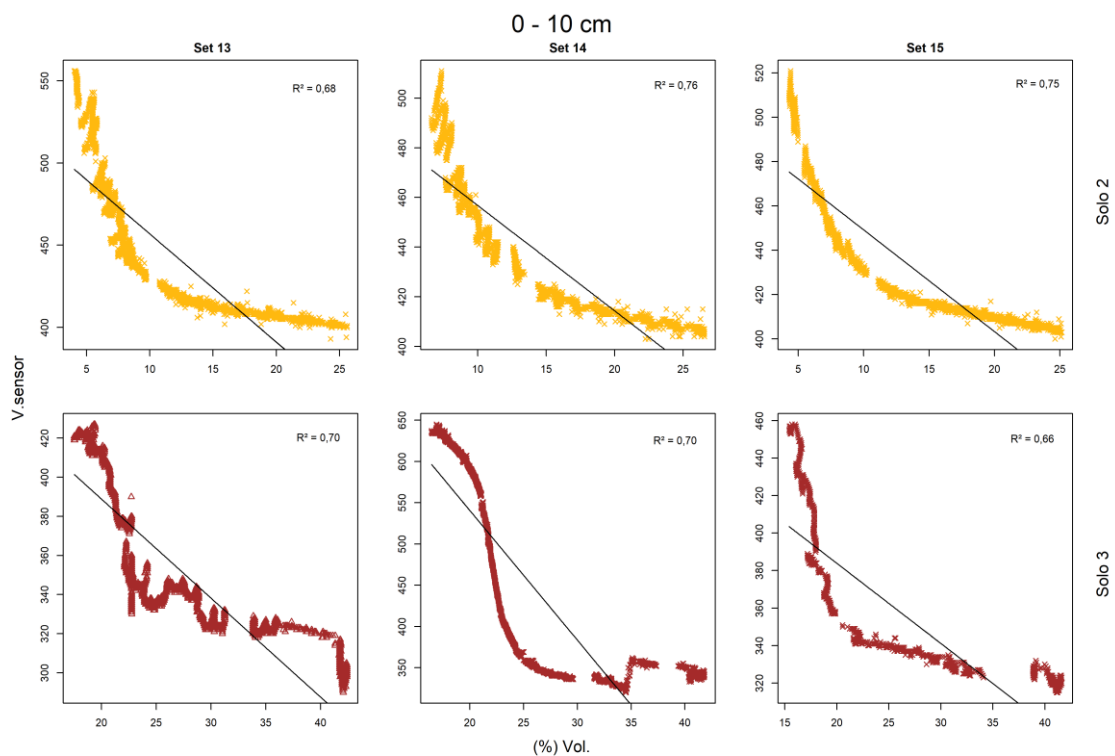
4.3.3 Calibração em amostras de 150mm de diâmetro

As amostras de maior diâmetro usadas neste estudo apresentaram, na camada superior do solo, uma variação média de 22,5 % do seu percentual de volume de água no solo 2, enquanto as amostras do solo 3 obtiveram 35,1% deste mesmo percentual. Isto ocorreu, pois, o Latossolo Vermelho Distroférico Típico (solo 3) possui maior

quantidade de argila na sua relação massa/volume da amostra quando comparado ao Argissolo Vermelho Distrófico Arênico (Solo 2), conseguindo, portanto, armazenar maiores volumes de água (BRADY; WIEL, 2013).

Ao analisar os dados apresentados pela Figura 19, é possível perceber que o solo 2 possui coeficiente de determinação linear médio de $R^2 = 0,73$, enquanto para o solo 3 foi de $R^2 = 0,686$. Contudo, o solo mais argiloso mostrou uma maior homogeneidade nos resultados obtidos pois, ao analisar a figura na sequência é possível perceber que a linha de pontos formadas do Set 14 e Set 15 do Latossolo Vermelho Distroférico Típico não apresentam sobreposições de dados. Ou seja, o mesmo valor apresentado pelo sensor não representou duas ou mais porcentagens distintas de conteúdo de água no solo, enquanto no Argissolo Vermelho Distrófico Arênico esta sobreposição de valores é mais perceptível.

Figura 19 - Gráficos de comparação entre as regressões lineares da camada superior (0 – 10 cm) em amostras de 150mm de diâmetro

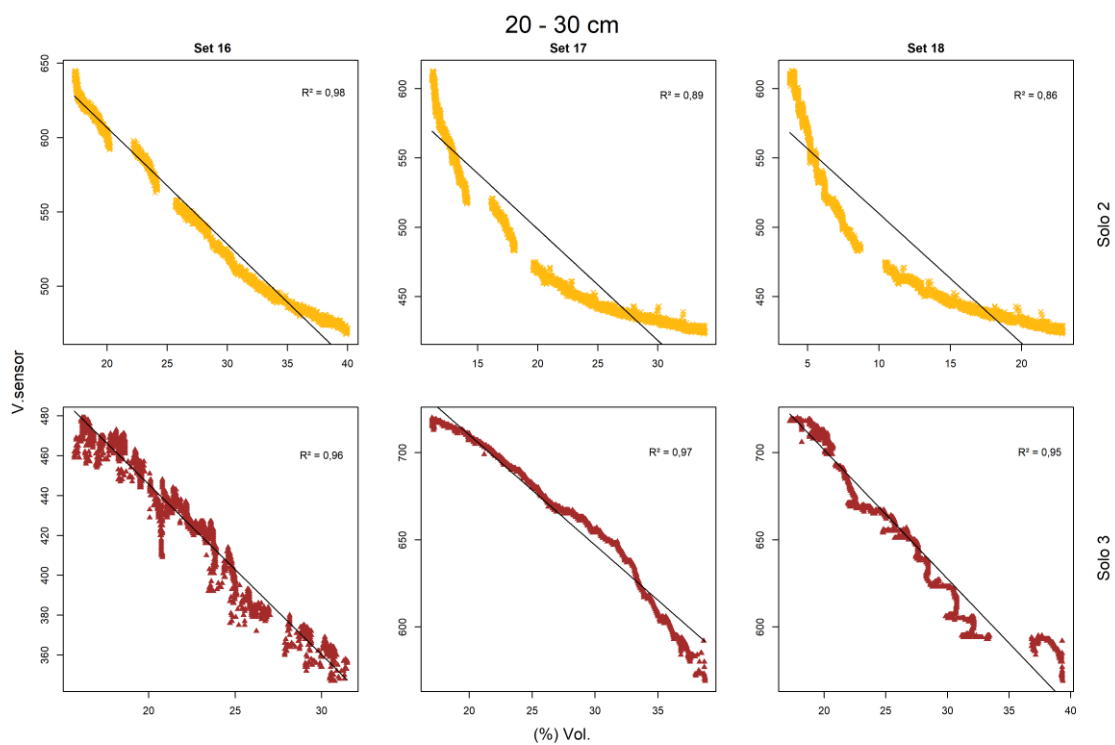


Fonte: Elaborado pelo autor.

As camadas inferiores tanto para o Argissolo Vermelho Distrófico Arênico (Solo 2), quanto para o Latossolo Vermelho Distroférico Típico (Solo 3), possuem mais argila em suas composições granulométricas. Este fato, sendo analisado juntamente com os

valores dos coeficientes de determinação apontam uma tendência de que amostras com maiores níveis de argila em sua composição possuem um melhor ajustamento linear pois, sua drenagem ocorre de maneira mais lenta, dando ao sensor mais tempo de adaptar-se a nova situação de umidade no solo. Na Figura 20 é possível perceber um aumento significativo na precisão das regressões lineares. As amostras do solo 2 obtiveram um coeficiente de determinação linear médio de $R^2 = 0,91$, enquanto as amostras do solo 3, uma média de $R^2 = 0,96$.

Figura 20 - Gráficos de comparação entre as regressões lineares da camada superior (20 – 30 cm) em amostras de 150mm de diâmetro



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.4 Comparação Entre Volumes

Foi possível notar uma melhora na precisão dos dados ao aumentar o volume total da amostra. Uma vez que, ao analisar somente os dados do Solo 2, quando comparado os valores do coeficiente de determinação (R^2) entre as amostras de diâmetro 100mm e 50mm, houve um aumento de 23% e 20%, nos Set 8 e Set 9, respectivamente. Porém,

houve uma diminuição no ajuste quando comparados os Set 1 e Set 4, onde houve 4% menos precisão no coeficiente de determinação da equação linear.

Quando comparado os gráficos entre as amostras de tamanho médio (100mm) e as de tamanho pequeno (50mm), independentemente da profundidade da amostra, foi possível perceber uma homogeneidade maior na distribuição dos dados em amostras com maiores volumes de solo. Nas amostras do Solo 3, foi possível verificar um aumento do coeficiente de determinação nas três repetições amostrais na situação de amostras de tamanho médio (100mm) com a profundidade de 0 a 10 centímetros, onde o valor médio do coeficiente de determinação por regressão linear simples foi de 84,34%, enquanto em amostras menores, este valor médio foi de apenas 62%.

As amostras de maior volume apresentaram uma maior confiabilidade nos resultados obtidos, apresentando coeficientes de determinação lineares médios superiores àqueles encontrados tanto em amostras de 50 mm, quanto nas amostras de 100 mm de diâmetro. Isto deve-se ao fato de que a velocidade da perda de água, em porcentagem, pela amostra de solo dá-se de maneira mais lenta em amostras de maior volume.

4.4 ANÁLISE DA VARIAÇÃO TEMPORAL ENTRE COLETAS DE DADOS

4.4.1 Intervalo de tempo de 24 horas entra as coletas

A variação entre os intervalos de tempo de cada coleta de dados acarreta em mudanças no resultado final de calibração. Durante o desenvolvimento deste trabalho os dados foram coletados com intervalos de tempo de cinco minutos, porém os dados coletados às 13:30h de cada dia foram selecionados para representarem a leitura diária da bancada de calibração.

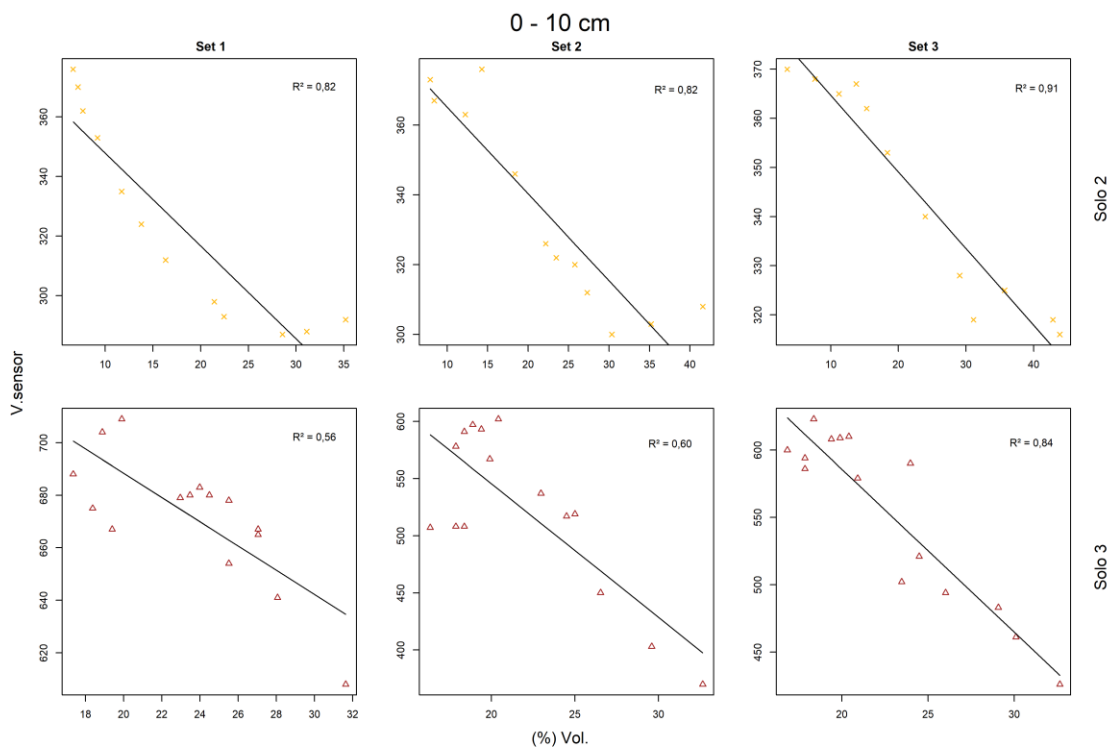
Desta forma, os resultados obtidos através de regressão linear simples em amostras de 50 mm de diâmetro, estão apresentados na Figura 21 (a) e (b) onde, ao comparar os coeficientes de determinação das análises de regressão linear simples dos dados obtidos com intervalo de tempo de cinco minutos com os valores de leitura diários, é possível verificar que há um pequeno aumento nestes coeficientes de determinação. Contudo, em alguns casos este coeficiente obteve um ajuste muito elevado quando comparado com os dados de leitura com intervalo de tempo de cinco minutos. Por exemplo, a amostra Set 3 do Solo 2, obteve uma melhora de 33% ao passo que para este mesmo solo, o Set 1 obteve uma melhora de apenas 2%.

A diferença entre as médias dos coeficientes de determinação, comparando-os entre leituras com intervalo de cinco minutos e de leituras diárias, denotam que solos mais arenosos afetam de maneira mais contundente o ajuste da equação de calibração quando estas são feitas apenas com leituras diárias. O Solo 2, por ser mais arenoso, obteve aumento das médias deste coeficiente, apresentando uma média para a camada superior de $R^2= 0,85$, e de $R^2= 0,80$ na camada inferior. Estes valores são maiores quando comparados as médias das leituras feitas com intervalos de cinco minutos, $R^2= 0,66$ na camada superior e $R^2= 0,69$ na camada inferior.

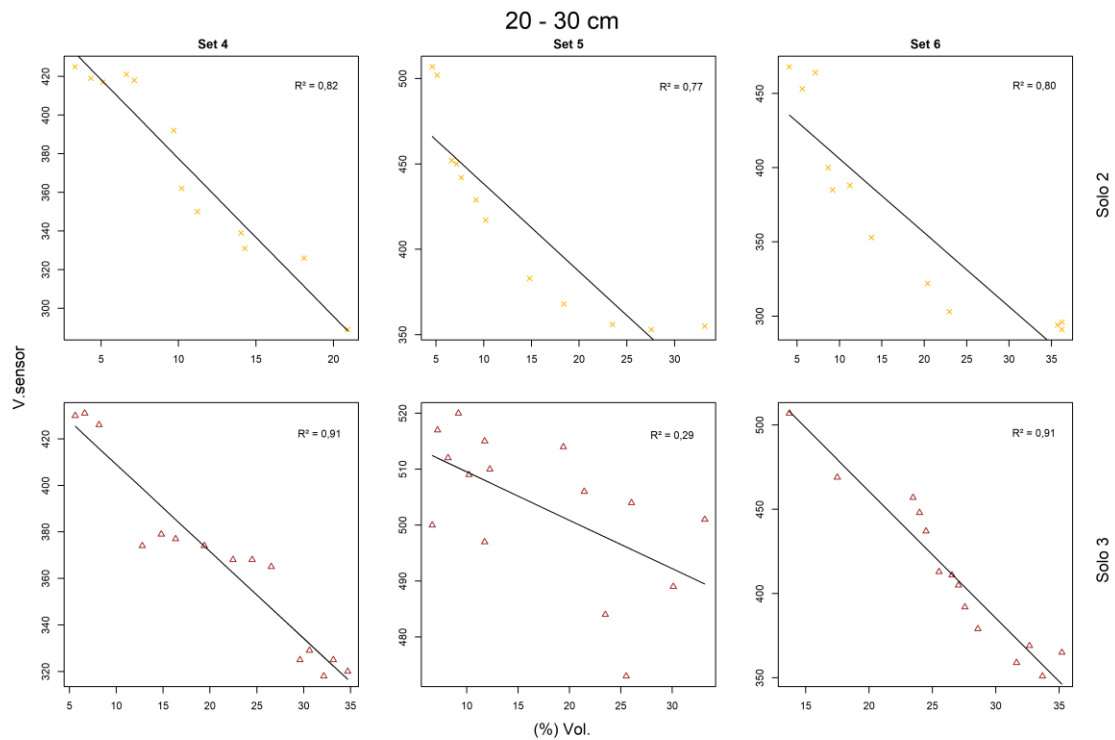
O Solo 3, por ser mais argiloso quando comparado ao solo 2, apresenta uma média do coeficiente de determinação na camada superior de $R^2= 0,57$, e de $R^2= 0,70$ na camada inferior. Estes valores são mais próximos quando comparados com as médias das leituras realizadas com intervalos de tempo de cinco minutos, $R^2= 0,62$ para ambas as camadas.

Sendo assim, é possível verificar que a diferença entre as médias das camadas superior e inferior do solo 2, medidas diariamente e compara-las com os dados obtidos em intervalo de tempo de cinco minutos, apresentam uma diferença de $R^2= 0,155$. Enquanto no solo 3 esta diferença foi de apenas $R^2= 0,015$.

Figura 21 - Dados diários das amostras de 50 mm de diâmetro em (a) superior e (b) inferior



(a)



(b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

A seguir na Figura 22 (a) e (b), estão dispostos os resultados obtidos através de regressão linear simples em amostras de 100 mm de diâmetro, onde apresentam uma menor diferença entre os valores dos coeficientes de determinação realizados através de dados diários e dados com intervalo de leitura de cinco minutos.

No solo mais arenoso usado neste estudo, os coeficientes de determinação foram majoritariamente menores nas análises em que os dados foram avaliados com intervalo de uma leitura diária. Exceto no Set 8 em que a diferença foi de um ajuste de $R^2 = 0,02$ maior em análises com leituras diárias, ou seja, uma diferença muito pequena, apontando que, por via de regra, variar o intervalo de coleta das amostras até um período de 24 horas não representa uma diferença relevante na precisão da regressão em solos arenosos.

Por outro lado, ainda nas amostras com 100 mm de diâmetro, o solo 3, mais argiloso, mostrou o comportamento oposto. No geral, os dados quando analisados com leituras diárias apresentam coeficientes de determinação maiores daqueles analisados com leituras de intervalo de tempo de cinco minutos.

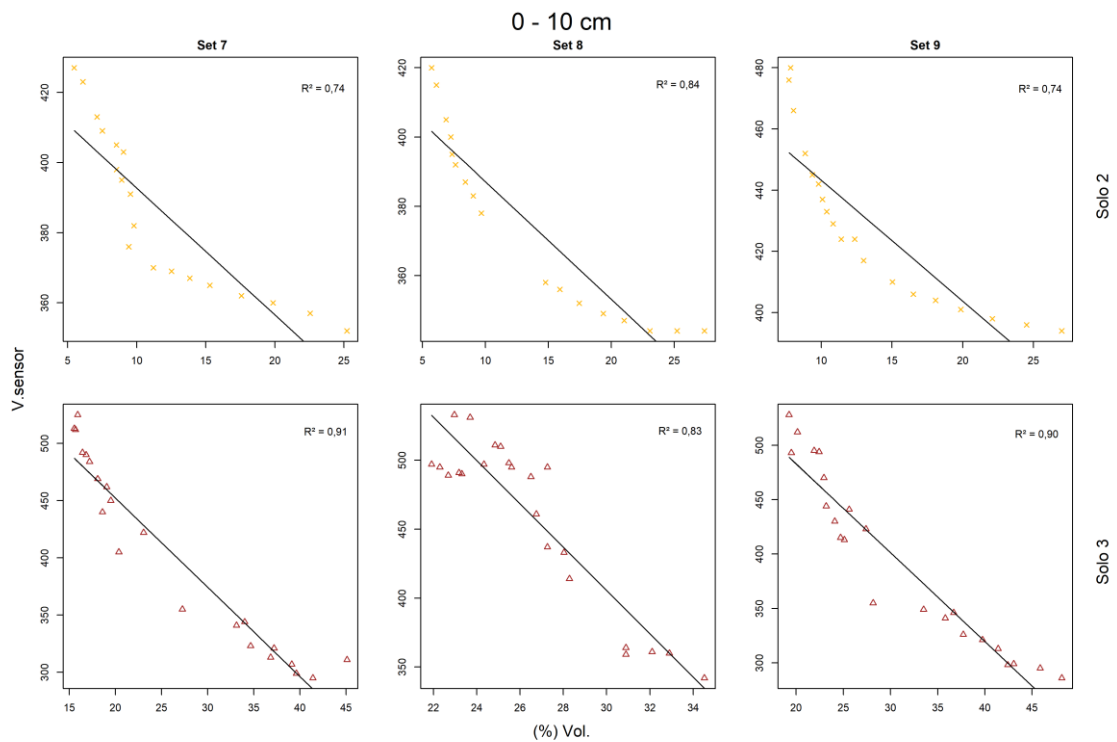
Os Set 10 e Set 11, não apresentaram mudanças no ajuste de regressão linear com a mudança no intervalo de leituras. Isto aponta que ao passo que aumenta o volume

total e os teores de argila da amostra de solo, há uma menor diferença entre os ajustes nos resultados para estes intervalos de tempo.

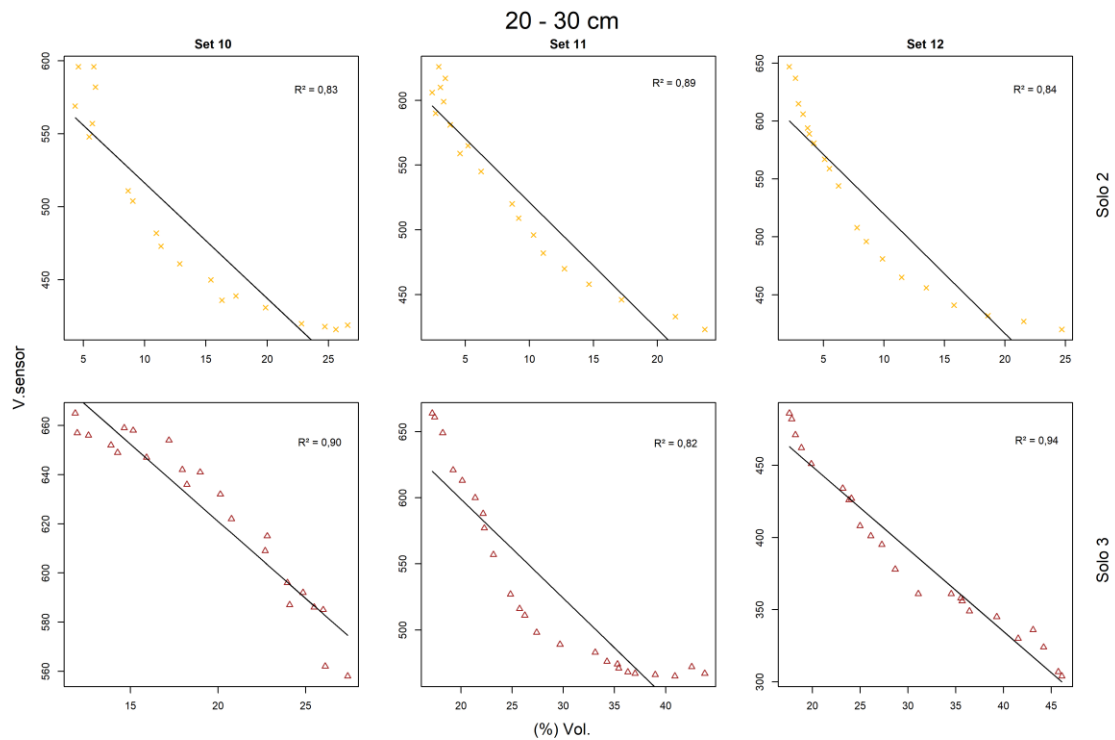
O Set 7 foi onde houve uma diferença mais relevante, na casa de $R^2= 0,06$ o seu ajuste, porém, não sendo ainda um valor que mude o valor de confiança do ajuste.

O Solo 2 apresentou uma média do coeficiente de determinação na camada superior de $R^2= 0,77$, e de $R^2= 0,85$ na camada inferior, apresentando uma média entre as camadas de profundidade de $R^2= 0,81$. Por outro lado, esta média para leituras com intervalo de cinco minutos foi de $R^2= 0,835$. Ao passo que, no Solo 3 evidenciou-se uma média do coeficiente de determinação na camada superior de $R^2= 0,88$, e de $R^2= 0,87$ na camada inferior, exibindo uma média entre as camadas de profundidade de $R^2= 0,875$.

Figura 22 - Dados diários das amostras de 100 mm de diâmetro em (a) superior e (b) inferior



(a)



(b)

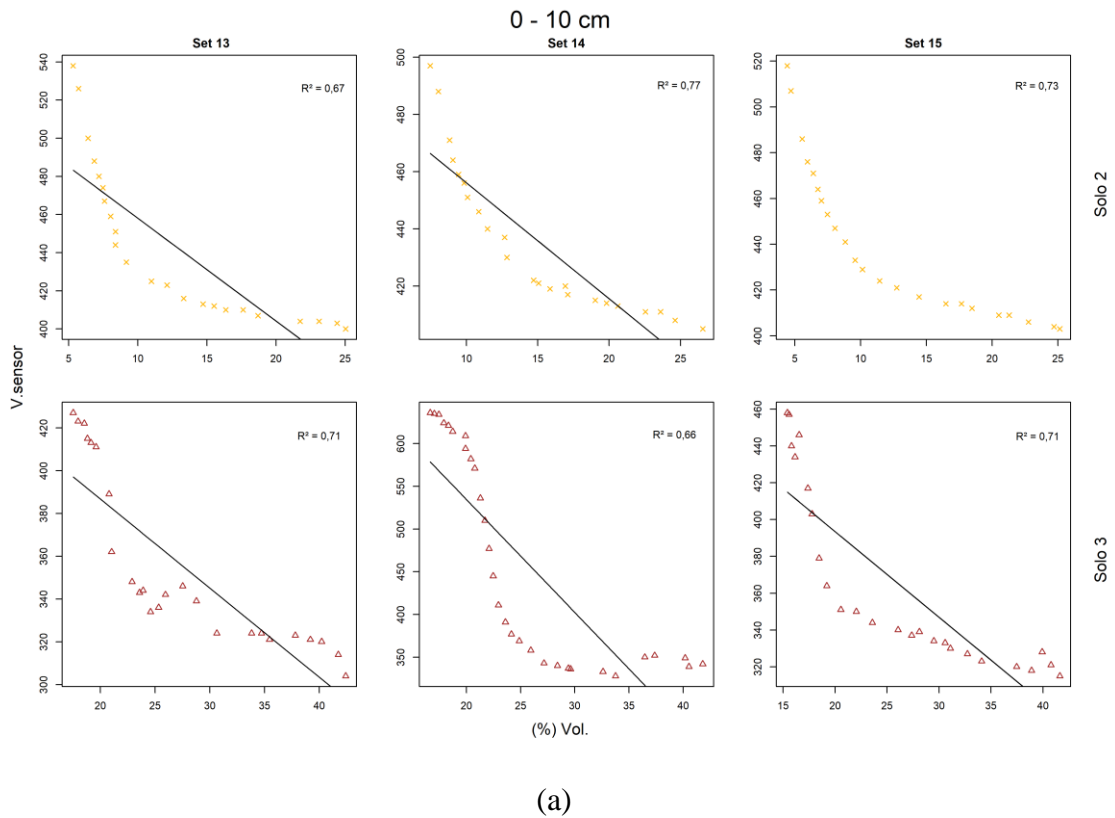
Fonte: Elaborado pelo autor.

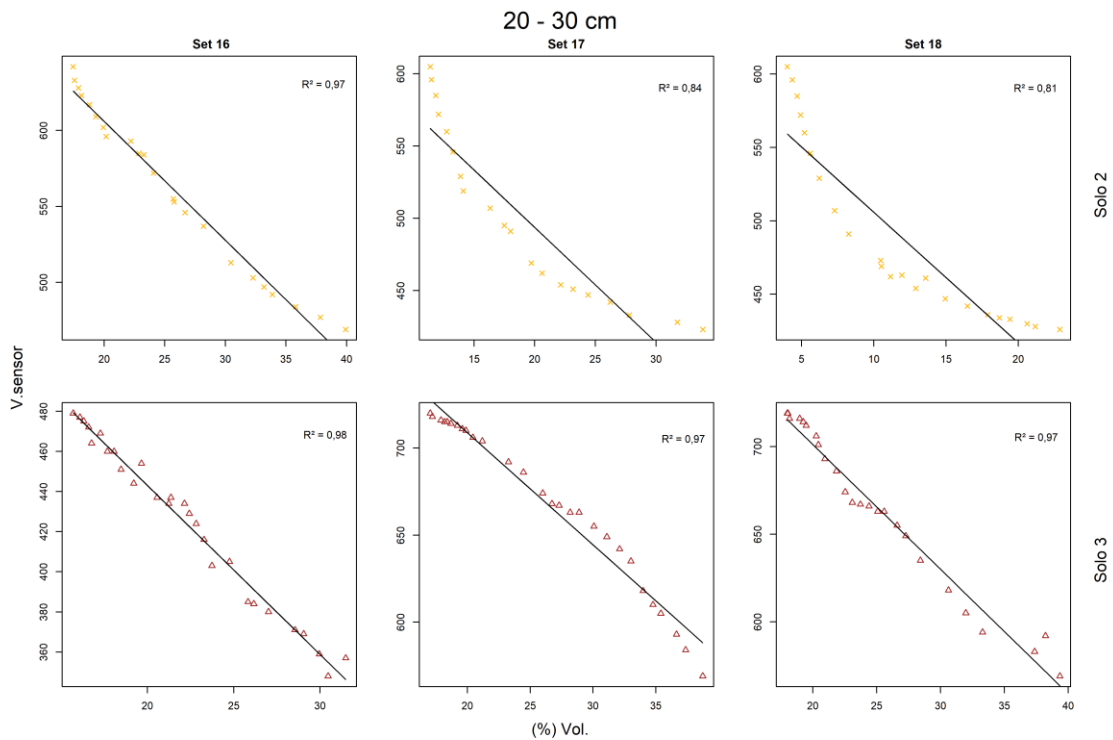
Ainda se percebe que amostras com maior volume, 150 mm de diâmetro, o ajustamento das equações lineares realizadas manteve pouca ou nenhuma diferença quando comparada as leituras realizadas com intervalo de tempo de cinco minutos ou com apenas uma leitura diária. Na Figura 2(a), isto torna-se ainda mais evidente pois, os coeficientes de determinação linear apresentaram valores muito próximos entre eles, diferindo no máximo 5% de ajuste na situação do Set 14 – Solo3. Contudo, ao ser feita a análise das médias deste coeficiente em cada solo temos que, o Solo 2 na sua camada superior obteve $R^2= 0,72$ quando com leituras realizadas com intervalo de tempo de cinco minutos, ao passo que com leituras diárias este valor foi de $R^2= 0,73$. Enquanto que o solo 3 com os dois intervalos de tempo em questão, resultou no mesmo valor de $R^2= 0,69$.

A Figura 23(b), ratifica que os coeficientes de determinação de correlação linear não diferem ou são muito próximos mesmo com os dados sendo tomados em diferentes intervalos de tempo. Nesta situação a maior diferença entre eles foi de 5% nos Set 17 e Set 18 do solo 2. Cabe ressaltar de que o Set 17 do solo 3 obteve o mesmo coeficiente de determinação, $R^2= 0,97$, nas duas situações de diferentes intervalos de tempo entre as coletas.

E ainda, as médias dos coeficientes de determinação foram muito próximas uma vez que o solo 2 em sua camada inferior obteve $R^2 = 0,87$, quando com leituras realizadas com intervalo de tempo de cinco minutos, ao passo que com leituras diárias este valor foi de $R^2 = 0,91$. Enquanto no solo 3 sua diferença foi de 1%, sendo $R^2 = 0,97$ com leituras com intervalo de cinco minutos e de $R^2 = 0,96$ com somente uma leitura diária.

Figura 23 - Dados diários das amostras de 150 mm de diâmetro em (a) superior e (b) inferior





Fonte: Elaborado pelo autor.

Desta forma, pôde-se observar que amostras de solo maiores possuem vantagens pois, sua variação de massa de água na amostra em porcentagem dá-se de maneira mais lenta quando comparada com amostras de menor volume. Isto afeta diretamente a leitura dos sensores capacitivos usados neste estudo. Contudo, intervalos com menores tempos entre as leituras indicam o funcionamento destes sensores, pois existe um período de atraso entre a situação real de umidade do solo e da leitura do sensor, isto é melhor compreendido quando as leituras são realizadas com maior frequência, ou seja, menores intervalos de tempo. Estes valores são considerados como os erros médios das leituras. Posteriormente, ainda neste trabalho, serão melhor apresentados e debatidos estes valores e as razões pelas quais é importante não aumentar exacerbadamente o intervalo de tempo entre as leituras destes dados.

4.4.2 Intervalo de tempo de 72 horas entre as coletas

Os dados obtidos no intervalo de tempo de 72 horas entre coletas apontam para um menor nível de confiabilidade do ajuste deste tipo de sensor. Isto deve-se ao fato de que ao aumentar o intervalo de tempo entre as coletas, aumenta-se também o nível de

aleatoriedade dos dados adquiridos, uma vez que os solos não diminuem seu conteúdo de água de maneira uniforme através do tempo e que os sensores capacitivos necessitam de um tempo de adaptação a nova situação de umidade do solo.

Na Tabela 6 estão apresentados os resultados dos coeficientes de determinação obtidos através de equação linear para três situações de intervalo de tempo realizadas neste estudo.

Tabela 6 - Comparação dos coeficientes de determinação com distintos intervalos de tempo entre as coletas

Amostras	Argissolo Vermelho Distrófico Arênico			Latossolo Vermelho Distroférrico		
	R ²	R ²	R ²	R ²	R ²	R ²
	5 minutos	24 horas	72 horas	5 minutos	24 horas	72 horas
1	0,80	0,82	0,76	0,45	0,56	0,68
2	0,59	0,82	0,79	0,58	0,60	0,19
3	0,58	0,91	0,88	0,83	0,84	0,89
4	0,54	0,82	0,92	0,85	0,91	0,99
5	0,79	0,77	0,64	0,20	0,29	0,90
6	0,74	0,80	0,78	0,80	0,91	0,92
7	0,76	0,74	0,67	0,85	0,91	0,90
8	0,82	0,84	0,78	0,79	0,83	0,92
9	0,78	0,74	0,74	0,89	0,90	0,94
10	0,89	0,83	0,84	0,88	0,90	0,86
11	0,88	0,89	0,89	0,80	0,82	0,79
12	0,88	0,84	0,81	0,92	0,94	0,95
13	0,68	0,67	0,58	0,71	0,71	0,69
14	0,76	0,77	0,71	0,71	0,66	0,52
15	0,75	0,73	0,67	0,67	0,71	0,70
16	0,98	0,97	0,96	0,96	0,98	0,99
17	0,89	0,84	0,77	0,97	0,97	0,96
18	0,86	0,81	0,78	0,95	0,97	0,98

Fonte: Elaborado pelo autor.

Este aumento nos intervalos de coleta de dados resultou em reflexo direto na potencialização das discrepâncias entre os valores reais e medidos. Posteriormente, serão apresentados os índices de desempenho das amostras em situação de intervalo de cinco minutos entre as coletas, onde se evidencia um comportamento típico em amostras que obtiveram elevado índice de desempenho devido ao seu volume. Este comportamento mostra que quando leituras diárias obtinham determinado valor do coeficiente de

determinação, podendo ser mais elevado ou não, quando comparado com leituras realizadas com intervalos de tempo de cinco minutos, as leituras realizadas com intervalo de 72 horas também apresentavam mesmo comportamento, contudo, aumentavam a magnitude desta diferença.

Desta forma, aumentar o intervalo de tempo entre as coletas da calibração de um sensor capacitivo, diminui o seu nível de confiança, pois o nível de resolução dos dados é baixo, fato que pode ser confirmado através da amostra 5 onde, os valores dos coeficientes de determinação através de análise de regressão linear apresentaram $R^2= 0,20$ em intervalo de tempo de 5 minutos, $R^2= 0,29$ em leituras realizadas diariamente e $R^2= 0,90$ em leituras realizadas com intervalo de tempo de 72 horas.

Portanto, intervalos de tempo superiores a um período de 24 horas não são indicados para realização da calibração de sensores capacitivos v1.2.

4.5 AVALIAÇÃO GERAL DOS RESULTADOS OBTIDOS

Na Tabela 7 estão apresentados os resultados obtidos dos Coeficientes de determinação, Equação de calibração linear, Raíz quadrada do erro médio (RMSE), Índice de concordância de Willmott e Índice de desempenho, no intervalo de tempo entre as coletas sendo de 5 minutos para cada amostra tanto para o Argissolo Vermelho Distrófico Arênico (Solo 2) quanto para o Latossolo Vermelho Distroférico Típico (Solo 3).

Os dados apontam que amostras com 50 mm de diâmetro, apresentam, em geral, um maior RMSE quando comparadas com amostras de maior volume. Contudo, ao comparar dados das amostras de 100 mm de diâmetro com amostras de 150 mm de diâmetro, é possível perceber pouca diferença entre seus RMSE. Desta forma, é possível inferir que a única diferença entres os tratamentos (diferentes volumes) foi a direção na qual o sensor foi inserido no solo em amostras de 50 mm de diâmetro. Assim, ratifica-se que sensores inseridos verticalmente aumentam os valores do RMSE do teor de umidade de água em amostras de solo, afetando de maneira direta na confiabilidade de calibrações realizadas com sensores capacitivos dispostos desta maneira.

A análise proposta por camargo e Sentelhas (1997) permite classificar qualitativamente os resultados de calibração obtidos. Desta forma, ao analisar as situações no Argissolo Vermelho Distrófico foi possível concluir que as amostras com 50 mm de diâmetro obtiveram uma média de 0,56 (Ruim), enquanto amostras com 100 mm de

diâmetro apresentaram 0,80 (Muito Bom) e amostras com 150 mm de diâmetro 0,78 (Muito Bom). Obtendo uma média geral de 0,719, sendo considerado como uma média boa.

As amostras do Latossolo Vermelho Distroférico Típico apresentaram valor médio de 0,56 (Ruim), 0,83 (Muito Bom), 0,80 (Muito Bom), para as amostras de 50 mm, 100 mm e 150 mm de diâmetro, respectivamente. Obtendo um valor médio de 0,736, ou seja, um bom ajuste.

Contudo, amostras com maiores volumes apresentaram valores do índice de desempenho elevados em alguns casos como a amostra 16, chegando ao valor de 0,98, sendo avaliado como um resultado excelente. A razão para o valor da média das amostras com 100 mm ser pouco superior à média das amostras com 150 mm de diâmetro deve-se ao fato de que as amostras 13 (Solo 2) e 15 (Solo3) terem apresentado erros pontuais nas suas leituras.

Tabela 7 - Valores obtidos dos Coeficientes de determinação, Equação de calibração linear, Raíz quadrada do erro médio, Índice de concordância de Willmott e Índice de desempenho através de análise de regressão linear simples

Amostra	Tipo de solo	Profundidade (cm)	Equação Linear	RMSE	I _w	I _d	Avaliação Qualitativa
1	Argissolo Vermelho	0-10	$x = -0,2733605y + 105,59792$	3,606789	0,944368	0,76	Muito boa
	Distrófico Arênico		$R^2 = 0,8064$				
	Latossolo Vermelho	0-10	$x = -0,1035832y + 93,0056582$	2,554253	0,8006723	0,36	Péssimo
	Distroférico Típico		$R^2 = 0,45$				
2	Argissolo Vermelho	0-10	$x = -0,2423211y + 110,6775381$	25,03334	0,3616927	0,21	Péssimo
	Distrófico Arênico		$R^2 = 0,593$				
	Latossolo Vermelho	0-10	$x = -0,04755401y + 47,08738114$	2,665604	0,8956885	0,52	Ruim
	Distroférico Típico		$R^2 = 0,5891$				
3	Argissolo Vermelho	0-10	$x = -0,3548421y + 149,4342278$	5,855711	0,8893443	0,52	Ruim
	Distrófico Arênico		$R^2 = 0,5861$				
	Latossolo Vermelho	0-10	$x = -0,06642193 y + 59,42935254$	1,625263	0,9676171	0,81	Muito Bom
	Distroférico Típico		$R^2 = 0,8399$				
4	Argissolo Vermelho	20-30	$x = -0,05726437y + 32,05083099$	2,511369	0,8619267	0,50	Ruim
	Distrófico Arênico		$R^2 = 0,5462$				
	Latossolo Vermelho	20-30	$x = -0,2299551 y + 106,7244594$	2,660292	0,9639622	0,82	Muito Bom
	Distroférico Típico		$R^2 = 0,8579$				
5	Argissolo Vermelho		$x = -0,1631235y + 80,5677655$	3,621679	0,9503271	0,75	Bom
	Distrófico Arênico		$R^2 = 0,7897$				
	Latossolo Vermelho	20-30	$x = -0,2450364 y + 141,4577676$	7,227287	0,6115956	0,12	Péssimo
	Distroférico Típico		$R^2 = 0,2051$				

Cont. Tabela 7

6	Argissolo Vermelho	20-30	$x = -0,1884891y + 85,0618894$	5,742284	0,9188035	0,65	Regular
	Distrófico Arênico		$R^2 = 0,7165$				
	Latossolo Vermelho	20-30	$x = -0,09998205y + 67,47593060$	2,036421	0,9501031	0,76	Muito Bom
	Distroférrico Típico		$R^2 = 0,8035$				
7	Argissolo Vermelho	0-10	$x = -0,1993936y + 88,5497917$	2,589954	0,9419847	0,71	Bom
	Distrófico Arênico		$R^2 = 0,7606$				
	Latossolo Vermelho	0-10	$x = -0,09720082y + 66,38422014$	3,275571	0,9710337	0,82	Muito Bom
	Distroférrico Típico		$R^2 = 0,8542$				
8	Argissolo Vermelho	0-10	$x = -0,2440239y + 104,3490037$	2,690999	0,9574573	0,78	Muito Bom
	Distrófico Arênico		$R^2 = 0,8238$				
	Latossolo Vermelho	0-10	$x = -0,0494526y + 49,7271105$	1,452246	0,9464478	0,74	Bom
	Distroférrico Típico		$R^2 = 0,7981$				
9	Argissolo Vermelho	0-10	$x = -0,1959042y + 97,3024780$	2,481657	0,9410754	0,73	Bom
	Distrófico Arênico		$R^2 = 0,7823$				
	Latossolo Vermelho	0-10	$x = -0,09800011y + 70,33380538$	2,71443	0,9810626	0,80	Muito Bom
	Distroférrico Típico		$R^2 = 0,8958$				
10	Argissolo Vermelho	20-30	$x = -0,0846845 y + 54,91533173$	2,289549	0,9776511	0,87	Excelente
	Distrófico Arênico		$R^2 = 0,8917$				
	Latossolo Vermelho	20-30	$x = -0,1217792y + 96,7330955$	1,043227	0,9819107	0,89	Excelente
	Distroférrico Típico		$R^2 = 0,9087$				

Cont. Tabela 7

11	Argissolo Vermelho	20-30	$x = -0,07672335y + 49,91526772$	2,031337	0,9713009	0,85	Muito Bom
	Distrófico Arênico		$R^2 = 0,8815$				
	Latossolo Vermelho	20-30	$x = -0,0896107y + 76,2502100$	2,722477	0,9610225	0,77	Muito Bom
	Distroférrico Típico		$R^2 = 0,825$				
12	Argissolo Vermelho	20-30	$x = -0,07503343y + 48,77524598$	2,067231	0,9737061	0,85	Muito Bom
	Distrófico Arênico		$R^2 = 0,8802$				
	Latossolo Vermelho	20-30	$x = -0,1428282y + 85,7318852$	1,8926	0,9822575	0,90	Excelente
	Distroférrico Típico		$R^2 = 0,9302$				
13	Argissolo Vermelho	0-10	$x = -0,1036738y + 57,5598992$	2,937404	0,9112653	0,62	Regular
	Distrófico Arênico		$R^2 = 0,6817$				
	Latossolo Vermelho	0-10	$x = -0,1393044y + 75,6598882$	3,266024	0,930276	0,66	Bom
	Distroférrico Típico		$R^2 = 0,7047$				
14	Argissolo Vermelho	0-10	$x = -0,1804095y + 93,2790677$	2,730969	0,9324285	0,71	Bom
	Distrófico Arênico		$R^2 = 0,7657$				
	Latossolo Vermelho	0-10	$x = -0,04457164y + 45,30398908$	3,220071	0,9493423	0,67	Bom
	Distroférrico Típico		$R^2 = 0,7007$				
15	Argissolo Vermelho	0-10	$x = -0,163214y + 83,604701$	2,95541	0,9298463	0,86	Excelente
	Distrófico Arênico		$R^2 = 0,7498$				
	Latossolo Vermelho	0-10	$x = -0,1551805y + 80,9122694$	4,62461	0,9173652	0,62	Regular
	Distroférrico Típico		$R^2 = 0,6633$				

Cont. Tabela 7

16	Argissolo Vermelho	20-30	$x = -0,1257264y + 96,3766446$	0,9419769	0,9969048	0,98	Excelente
	Distrófico Arênico		$R^2 = 0,9834$				
	Latossolo Vermelho	20-30	$x = -0,1130959y + 70,4435531$	0,7285377	0,991712	0,95	Excelente
	Distroférrico Típico		$R^2 = 0,9659$				
17	Argissolo Vermelho	20-30	$x = -0,1107294y + 75,1651937$	2,423943	0,9747221	0,86	Excelente
	Distrófico Arênico		$R^2 = 0,8901$				
	Latossolo Vermelho	20-30	$x = -0,1534883y + 129,1921609$	1,027037	0,9931416	0,96	Excelente
	Distroférrico Típico		$R^2 = 0,9707$				
18	Argissolo Vermelho	20-30	$x = -0,09211197y + 57,06752211$	2,301264	0,9675091	0,83	Muito Bom
	Distrófico Arênico		$R^2 = 0,8614$				
	Latossolo Vermelho	20-30	$x = -0,1284092y + 110,3292305$	1,161035	0,9894304	0,93	Excelente
	Distroférrico Típico		$R^2 = 0,9494$				

Fonte: Elaborado pelo autor.

A fim de solucionar os problemas envolvendo a não linearidade dos resultados obtidos em determinadas amostras, principalmente naquelas em que havia maior percentual de areia em sua composição, afetando, assim, sua velocidade de drenagem, os testes foram ajustados através de equações polinomiais de 2ª ordem.

Na Tabela 8 estão os valores obtidos dos Coeficientes de determinação, Equação de calibração, Raíz quadrada do erro médio, Índice de concordância de Willmott e Índice de desempenho resultantes da análise de regressão polinomial de 2ª ordem.

Os dados obtidos relativos a RMSE, no geral, diminuíram, aproximadamente, em 1 o erro quando comparados com os valores encontrados através da análise de regressão linear.

O Índice de desempenho nas amostras de 50 mm de diâmetro com Argissolo Vermelho Distrófico obteve uma média de 0,53 (Ruim), enquanto amostras com 100 mm de diâmetro apresentaram 0,93 (Excelente) e amostras com 150 mm de diâmetro 0,93 (Excelente). Obtendo uma média geral de 0,80, obtendo como resultado uma média qualificada como boa, sendo 0,082 superior à média do índice de desempenho neste mesmo solo quando aplicada a análise de regressão linear.

As amostras do Latossolo Vermelho Distroférico Típico apresentaram valor médio de 0,65 (Regular), 0,89 (Excelente), 0,89 (Excelente), para as amostras de 50 mm, 100 mm e 150 mm de diâmetro, respectivamente. Obtendo um valor médio de 0,81, ou seja, um ajuste qualificado como muito bom. Este valor foi superior em 0,08 quando comparada a mesma situação, porém com resultados obtidos através da análise de regressão linear.

Por conseguinte, realizar análises de regressão polinomial aumentam o nível de explicação das variáveis envolvidas na calibração de sensor para estimar o conteúdo de água no solo. Os resultados obtidos através de análise de regressão linear simples obtiveram como resultado $R^2 = 0,68$; $0,76$ e $0,75$ nos Set 13, 14 e 15, respectivamente quando com Argissolo Vermelho Distrófico. Contudo, estes mesmo dados ao serem executados através da análise de regressão polinomial de 2ª ordem apresentaram valores de $R^2 = 0,86$; $0,94$ e $0,92$.

Desta forma, amostras com maiores volumes, independente do tipo de solo, quando analisadas através de regressão polinomial de 2ª ordem conseguem explicar a maioria dos dados obtidos, resultando em elevados índices de desempenho.

Tabela 8 - Valores obtidos dos Coeficientes de determinação, Equação de calibração linear, Raíz quadrada do erro médio, Índice de concordância de Willmott e Índice de desempenho através de análise de regressão polinomial de 2ª ordem

Amostra	Tipo de solo	Profundidade (cm)	Equação Polinomial de 2ª Ordem	R ²	RMSE	I _w	I _d	Avaliação Qualitativa
1	Argissolo Vermelho	0-10	$x = 0,004467536y^2 - 3,211373797y + 585,345584408$	0,92	2,586781	0,944368	0,86	Excelente
	Distrófico Arênico							
	Latossolo Vermelho	0-10	$x = -0,00001802856y^2 - 0,0966787y + 85,08528$	0,45	1,954755	0,8006723	0,36	Péssimo
	Distroférico Típico							
2	Argissolo Vermelho	0-10	$x = -0,000547774y^2 + 0,4810717y + 14,00517$	0,004	24,43312	0,3616927	0,01	Péssimo
	Distrófico Arênico							
	Latossolo Vermelho	0-10	$x = 0,000220976y^2 - 0,271569778y + 102,735685820$	0,64	2,055630	0,8956885	0,57	Ruim
	Distroférico Típico							
3	Argissolo Vermelho	0-10	$x = 0,0753619y^2 - 5,514860y + 102,9656$	0,63	4,995733	0,8893443	0,56	Ruim
	Distrófico Arênico							
	Latossolo Vermelho	0-10	$x = 0,0001051765y^2 - 0,1794920753y + 89,4541247931$	0,84	1,025448	0,9676171	0,81	Muito Bom
	Distroférico Típico							
4	Argissolo Vermelho	20-30	$x = -0,000192575y^2 + 0,046465867y + 25,532258377$	0,54	1,151760	0,8619267	0,14	Péssimo
	Distrófico Arênico							
	Latossolo Vermelho	20-30	$x = -0,0003105585y^2 - 0,0045125022y + 66,1516271443$	0,86	1,460815	0,9639622	0,83	Muito Bom
	Distroférico Típico							
5	Argissolo Vermelho	20-30	$x = 0,001383696y^2 - 1,31600521y + 317,980692625$	0,91	2,600674	0,9503271	0,86	Excelente
	Distrófico Arênico							
	Latossolo Vermelho	20-30	$x = 0,001535612y^2 - 1,772589375y + 520,959830922$	0,86	5,997104	0,6115956	0,53	Ruim
	Distroférico Típico							

Cont. Tabela 8

6	Argissolo Vermelho Distrófico Arênico	20-30	$x = 0,006694644y^2 - 0,6185212y + 149,1499$	0,81	5,042064	0,9188035	0,75	Bom
	Latossolo Vermelho Distroférico Típico	20-30	$x = -0,001265503y^2 + 1,086584y - 204,5097$	0,86	1,106883	0,9501031	0,81	Muito Bom
7	Argissolo Vermelho Distrófico Arênico	0-10	$x = 0,003811585y^2 - 3,183072839y + 670,343195467$	0,88	1,778944	0,9714648	0,86	Excelente
	Latossolo Vermelho Distroférico Típico	0-10	$x = 0,0005719392y^2 - 0,570078y + 160,2954$	0,93	2,280682	0,9904322	0,92	Excelente
8	Argissolo Vermelho Distrófico Arênico	0-10	$x = 0,004881367y^2 - 3,933937701y + 798,803392579$	0,95	1,352722	0,9905934	0,94	Excelente
	Latossolo Vermelho Distroférico Típico	0-10	$x = 0,0002163556y^2 - 0,2388194332y + 90,28596253$	0,82	1,335673	0,9546059	0,78	Muito Bom
9	Argissolo Vermelho Distrófico Arênico	0-10	$x = 0,003750566y^2 - 3,439222787y + 796,167948118$	0,94	1,233639	0,9874322	0,93	Excelente
	Latossolo Vermelho Distroférico Típico	0-10	$x = 0,0004580785y^2 - 0,4770116y + 145,6925$	0,94	1,955093	0,9924165	0,94	Excelente
10	Argissolo Vermelho Distrófico Arênico	20-30	$x = 0,0004788159y^2 - 0,5862491y + 183,2458$	0,96	1,357558	0,9925811	0,95	Excelente
	Latossolo Vermelho Distroférico Típico	20-30	$x = -0,000410233y^2 + 0,3879519y - 61,28460$	0,91	1,013388	0,9828304	0,89	Excelente

Cont. Tabela 8

11	Argissolo Vermelho	20-30	$x = 0,0004285837y^2 - 0,5442682y +$	0,98	0,7808588	0,9961281	0,97	Excelente
	Distrófico Arênico		175,1531					
	Latossolo Vermelho	20-30	$x = 0,000568777y^2 - 0,7265588y +$	0,88	2,06188	0,9769969	0,86	Excelente
	Distroférico Típico		251,4357					
12	Argissolo Vermelho	20-30	$x = 0,0004273874y^2 - 0,5319886y +$	0,88	1,106421	0,992592	0,95	Excelente
	Distrófico Arênico		168,4561					
	Latossolo Vermelho	20-30	$x = 0,0007043902y^2 - 0,7147456y +$	0,97	1,100351	0,9935354	0,96	Excelente
	Distroférico Típico		199,7544					
13	Argissolo Vermelho	0-10	$x = 0,001301382y^2 - 1,319512833y +$	0,86	1,904853	0,9680884	0,83	Excelente
	Distrófico Arênico		339,033129114					
	Latossolo Vermelho	0-10	$x = 0,002247082y^2 - 1,796222416y +$	0,87	2,17679	0,9680884	0,84	Muito Bom
	Distroférico Típico		377,580240952					
14	Argissolo Vermelho	0-10	$x = 0,003100096y^2 - 2,966754091y +$	0,94	1,379862	0,9868683	0,92	Excelente
	Distrófico Arênico		716,826486972					
	Latossolo Vermelho	0-10	$x = 0,0001554632y^2 - 0,1919377175y +$	0,75	2,989368	0,9868683	0,74	Bom
	Distroférico Típico		77,6525540389					
15	Argissolo Vermelho	0-10	$x = 0,002557608y^2 - 2,482393642y +$	0,92	1,58367	0,9829687	0,91	Excelente
	Distrófico Arênico		606,614115568					
	Latossolo Vermelho	0-10	$x = 0,00263984y^2 - 2,16271236y$	0,89	2,714743	0,9757327	0,86	Excelente
	Distroférico Típico		+458,01981683					

Cont. Tabela 8

16	Argissolo Vermelho	20-30	$x = 0,0003273709y^2 - 0,490626y + 196,9584$	0,99	0,6113218	0,9986619	0,99	Excelente
	Distrófico Arênico							
	Latossolo Vermelho Distroférico Típico	20-30	$x = 0,00001237196y^2 - 0,1235468y + 72,63447$	0,96	0,7282496	0,9916655	0,95	Excelente
17	Argissolo Vermelho	20-30	$x = 0,0008208394y^2 - 0,9491819y + 286,0399$	0,97	1,181234	0,9950059	0,96	Excelente
	Distrófico Arênico							
	Latossolo Vermelho Distroférico Típico	20-30	$x = -0,0006246844y^2 + 0,6673311y - 139,4105$	0,99	0,4142863	0,9988985	0,99	Excelente
18	Argissolo Vermelho	20-30	$x = 0,0007996645y^2 - 0,9089384y + 262,5036$	0,97	1,021763	0,941441	0,96	Excelente
	Distrófico Arênico							
	Latossolo Vermelho Distroférico Típico	20-30	$x = 0,0004341612y^2 - 0,6989032y + 297,0207$	0,99	0,9443319	0,9929344	0,98	Excelente

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.6 DIFICULDADES E PROBLEMAS ENCONTRADOS

Existem diversas adversidades que podem ser encontradas ao conduzir uma pesquisa científica. Estas, geralmente são ocasionadas por problemas que por vezes ocorrem de maneira imprevista, ou prevista, mas sem a possibilidade de que seja solucionada a tempo de que esta não venha a ocorrer. Estas incertezas ocorrem diariamente nos mais diversos ramos da pesquisa científica e cabe a quem os encontra relatar, e se encontrada solução, compartilhar com a comunidade científica.

Durante o desenvolvimento desta pesquisa problemas como a falta de energia elétrica no campus da UFSM, aquisição de sensores com defeito, queima de material por picos de corrente elétrica na rede do prédio o qual o experimento encontrava-se e ainda, problemas na inserção de sensores na amostra de solo, dificultaram a execução do trabalho. Contudo, não foram suficientes a ponto de resultar em erros que implicassem na imediata interrupção da pesquisa ou que diminuíssem a importância ou relevância dos resultados obtidos.

4.6.1 Falta de energia

A fim de obter o valor mais preciso possível durante o decorrer do processo de drenagem das amostras, já na fase de calibração dos sensores, foi necessário inserir, anteriormente, o comando “*escala.tare()*,” no código-fonte das placas Arduino. Este comando define que, quando ligadas a energia elétrica, as placas devem realizar o processo de tara das balanças, tornando aquele valor de massa encontrado naquele dado momento, sendo como igual a zero. Isto acarretou em problemas devido a constantes quedas de energia elétrica no prédio o qual o experimento estava instalado. Sendo assim, após alguns destes acontecimentos, os valores de massa das amostras apresentavam valores negativos.

Desta forma, parte do problema pôde ser resolvido através de tabelas no Software Excel, em que foi obtido o valor anterior à queda de energia e descontado o valor apresentado após a Tara das balanças, ocasionada de forma involuntária devida à falta de energia elétrica. Contudo, após longos períodos de falta de energia elétrica estes valores poderiam não retratar a realidade, uma vez que as amostras poderiam ter perdido quantidade relevante de massa de água.

Sendo assim, todas as vezes em que era detectada a falta de energia por períodos superiores a 2 horas, todas as amostras eram removidas de suas respectivas balanças e o processo de calibração era repetido para cada uma das dezoito delas. Após este processo, todas as amostras

eram dispostas novamente em seus lugares. O problema da constante falta de energia elétrica tornou o processo de automatização da bancada de calibração muito dependente de interferências humanas, fazendo com que o trabalho ficasse mais dispendioso de tempo e suscetível a erros.

4.6.1.1 Problemas Envolvendo o Fornecimento de Energia Elétrica ao Sistema

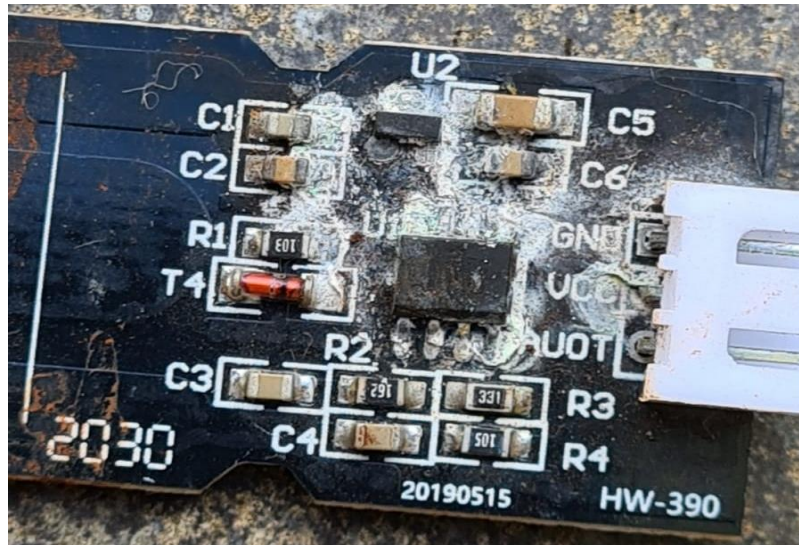
No período de desenvolvimento da pesquisa aconteceram tempestades de alta intensidade, como as ocorridas do dia 28 e 29 de janeiro de 2021, onde um pico de energia na rede elétrica que causou a queima de um dos alimentadores de energia (Entrada tipo Jack) de uma das placas.

A solução para este problema foi trocar a forma de alimentação da placa Arduino, sendo a partir de então, realizada através da entrada USB. Neste período as informações foram perdidas.

4.6.2 Falhas Apresentadas Pelos Sensores

Os sensores usados nesta pesquisa foram adquiridos de diversos fornecedores de eletrônicos. Contudo, alguns sensores apresentaram falhas e deixaram de funcionar durante o processo de drenagem das amostras, ou seja, quando já inseridos nas amostras de solo e já com alguns dias de pesquisa em andamento. O principal problema encontrado foi a oxidação das partes do sistema eletrônico que, por padrão deste modelo de sensor, vem sem nenhuma proteção contra umidade, Figura 24.

Figura 24 - Oxidação do sistema eletrônico do sensor capacitivo V 1.2



Fonte: Elaborado pelo autor.

Outro problema encontrado nestes sensores foi a qualidade do conector de dados e energia. Alguns sensores não permaneciam com este conector encaixado corretamente, de maneira que por vezes os dados vinham com valores bastante distintos a cada leitura realizada. Este não foi um fator limitante à pesquisa pelo fato de que quando encontrado este problema, o simples fato da troca deste conector sanou esta falha. Durante o desenvolvimento da pesquisa isto ocorreu somente na fase de drenagem do primeiro solo estudado (Vertissolo Hidromórfico) ocasionando perda de dados, porém, não se repetindo nos demais solos.

4.6.3 Inserção dos sensores na amostra

Não há uma barreira clara quanto ao comprimento ideal da parte do sensor a ser introduzido na amostra. Desta forma, é necessário que o sensor seja introduzido de maneira horizontal e mais o paralelamente possível referente ao nível superior ou inferior da amostra. Quando o solo está saturado, parte da água que entra em contato com a superfície do sensor, desliza lentamente para o lado de fora da amostra, acabando por umedecer de maneira contundente o sistema eletrônico do sensor. Alguns sensores que foram inseridos horizontalmente no primeiro solo do estudo, foram danificados. Após a inserção dos sensores no anel amostral, o solo acomoda-se dilatando e contraindo e ao passar do tempo faz com que o sensor seja deslocado mais para dentro da amostra, danificando, assim, o sistema eletrônico

do sensor. Portanto, é recomendado introduzir apenas sete centímetros do Capacitive Soil Moisture Sensor V1.2 na amostra de solo onde termina o material dielétrico destes sensores.

4.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao realizar pesquisas envolvendo sensores capacitivos v1.2, principalmente quando da sua calibração, é necessário que seja tomado cuidado na inserção dos sensores nas amostras de solo. A primeira consideração é que estes sensores não sejam inseridos no sentido vertical, pois isto acarreta em erros que inviabilizam o uso e a calibração destes sensores. Da mesma forma, o uso de um dispositivo que dê suporte ao fornecimento de energia elétrica como um *nobreak* pode sanar problemas que envolvam picos de energia e que afetam negativamente a plataforma Arduíno, bem como possíveis faltas de energia elétrica na rede, ocasionando perda de dados.

É imprescindível calibrar individualmente cada sensor capacitivo v1.2 antes de seu uso, pois cada sensor apresenta sua peculiaridade durante sua calibração. Além disso, durante o processo de calibração é possível verificar se o sensor em questão está funcionando corretamente, uma vez que existe a possibilidade de o sistema eletrônico acoplado a ele possuir defeitos, ocasionando distorções nas leituras.

As amostras do Argissolo Vermelho Distrófico Arênico, em todas as análises, apresentaram um comportamento não linear na sua perda de conteúdo de água pela amostra de solo, independentemente do volume da amostra. Isto é em razão do sensor necessitar de um tempo para adaptação a nova situação de umidade do solo.

O volume da amostra usada na calibração interfere diretamente na equação de calibração dos sensores capacitivos v1.2. As amostras de maior diâmetro obtiveram índices de desempenho superiores as demais, ao passo que as amostras de menor diâmetro obtiveram os menores valores.

5 CONCLUSÃO

Através dos resultados obtidos neste trabalho foi possível verificar os fatores que interferem no processo de calibração dos sensores capacitivos v1.2, bem como, fazer orientações sobre seu uso.

Pode-se afirmar que ao aumentar o volume das amostras de solo, há um acréscimo no nível de desempenho das equações de regressão, tanto lineares quanto polinomiais. Amostras com diâmetro de 150 mm e com 100 mm de altura apresentaram melhores resultados quando comparadas com amostras de menor volume. Por isto, indica-se usar no mínimo estas dimensões para calibração dos sensores capacitivos v1.2.

Também, foi possível concluir que o tipo de solo possui interferência direta no processo de calibração dos sensores capacitivos v1.2. Solos com textura mais argilosa mostraram maiores níveis de desempenho e de coeficientes de correlação linear. Contudo, para solos mais arenosos, onde a perda de água se dá mais rapidamente, indica-se o uso de equações de regressão de segundo grau.

Ainda, durante o processo de calibração destes sensores, é de extrema importância que os intervalos entre os períodos de coleta de dados seja o menor possível, nunca excedendo a um intervalo de tempo maior do que este será usado a campo. E ainda, durante a sua calibração, o intervalo de tempo entre as leituras dos dados não deve ser superior a um período de 24 horas.

REFERÊNCIAS

ABBA, S. et al. Design and performance evaluation of a low-cost autonomous sensor interface for a smart iot-based irrigation monitoring and control system. **Sensors**, v. 19, n. 17, p. 3643, 2019.

ANA – **Agência Nacional das Águas**. 2018. Disponível em: <<http://www3.ana.gov.br/portal/ANA/noticias-antigas/escassez-de-a-gua-pode-gerar-conflitos-no-futuro.2019-03-15.1958006093>>. Acesso em: 30/10/2021.

ARAÚJO, R. F.; CARAN. G. M.; SOUZA. I. V. P. Orientação temática e coeficiente de correlação para análise comparativa entre dados altmétricos e citações: uma análise da revista DataGramZero. Porto Alegre, v. 22, n. 3, p. 184-200, set/dez. 2016.

BADAMASI, Y. A. The working principle of an Arduino. In: **2014 11th international conference on electronics, computer and computation (ICECCO)**. IEEE, p. 1-4. 2014.

BANZI, M.; SHILOH, M. **Introducción a Arduino**; O'Reilly media-Grupo Anaya s.a.: Madrid, Spain, p. 208, 2016.

BATISTA, L.; COELHO, E.; DE CARVALHO, F.A.; DA SILVA, M.; GOMES FILHO, R.; GONÇALVES, A. Calibração de sonda artesanal de uso com TDR para avaliação de umidade de solos. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 10, n. 2, p. 522, 2016.

BÉGUÉ, A. et al. Remote sensing and cropping practices: A review. **Remote Sensing**, v. 10, n. 1, p. 99, 2018.

BERGER, L.; HENRY, A.; PIVO, G. Integrated water management recommendations in practice: coexistence of old and new ways in Arizona. **Water Policy**, v. 22, n. 4, p. 501-518, 2020.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. Conservação do solo. 8 ed. São Paulo: ícone, 2012. 355p.

BRADY, N.C.; WEIL, R.R. Elementos da natureza e propriedades dos solos. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 790p.

BRAGA, B. et al. **Introdução à Engenharia Ambiental**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 318p. 2005.

BRAGA, M. B. et al. Determinação simplificada da umidade do solo visando o manejo de irrigação em Hortaliças. **Embrapa Hortaliças-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E)**, 2018.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal. Lei nº 9.433: Política Nacional de Recursos Hídricos. Brasília: Secretaria de Recursos Hídricos, 1997. 72p.

BRAZ, A.; MIRANDOLA, G.; PINTO, A.; CHÁVEZ, E.; OLIVEIRA, I. Manejo integrado de cuencas hidrográficas: posibilidades y avances en los análisis de uso y cobertura de la tierra. **Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía**, v. 29, n. 1, p. 69-85, 2020.

BÜNEMANN, Else K. et al. Soil quality—A critical review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 120, p. 105-125, 2018.

CAMARGO, A.P., SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativas da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**. v.5, 89–97. 1997.

CAMPBELL, Gaylon S. Soil water potential measurement: An overview. **Irrigation Science**, v. 9, n. 4, p. 265-273, 1988.

CAPRI, C. et al. A low-cost portable chamber based on Arduino micro-controller for measuring cover crops water use. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 190, p. 106361, 2021.

CARGNELUTTI FILHO, Alberto et al. Tamanho de amostra para estimação do coeficiente de correlação linear de Pearson entre caracteres de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, p. 1363-1371, 2010.

CASSEL, D. K.; NIELSEN, D. R. Field capacity and available water capacity. **Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods**, v. 5, p. 901-926, 1986.

CENTENO, L. et al. Textura do solo: Conceitos e aplicações em solos arenosos. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade**, v. 4, n. 1, p. 31-37, 2017.

COBLINSKI, J. A. et al. Prediction of soil texture classes through different wavelength regions of reflectance spectroscopy at various soil depths. **Catena**, v. 189, p. 104485, 2020.

COELHO, E.F.; VELLAME, L.M.; COELHO FILHO, M.A. & LEDO, C.A.S. Desempenho de modelos de calibração de guias de onda acopladas a TDR e a multiplexadores em três tipos de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 30:23-30, 2006.

COSENZA, P. Indirect determination of soil water content. In: **E3S Web of Conferences**. EDP Sciences, p. 04004, 2016.

CRAWFORD, J. W.; MATSUI, N.; YOUNG, I. M. The relation between the moisture-release curve and the structure of soil. **European Journal of Soil Science**, v. 46, n. 3, p. 369-375, 1995.

CROW, W.T.; Chen, F.; Reichle, R.H.; Liu, Q. L band microwave sensing and land data assimilation improve the representation of prestorm soil moisture conditions for hydrologic forecasting. **Geophysical Research Letters**, 44, 5495-5503, 2017.

CUNHA, Henrique et al. A comprehensive water balance methodology for collective irrigation systems. **Agricultural Water Management**, v. 223, p. 105660, 2019.

DEAN, T. J.; BELL, J. P.; BATY, A. J. B. Soil moisture measurement by an improved capacitance technique, Part I. Sensor design and performance. **Journal of Hydrology**, v. 93, n. 1-2, p. 67-78, 1987.

DENG, Xiao et al. A method of electrical conductivity compensation in a low-cost soil moisture sensing measurement based on capacitance. **Measurement**, v. 150, p. 107052, 2020.

DIRKSEN, Christiaan et al. **Soil physics measurements**. Catena Verlag, 1999.

EDEH, J.A. **Quantifying Spatio-temporal Soil Water Content Using Electromagnetic Induction** (MSc Thesis). Department of Soil, Crop and Climate Sciences, University of the Free State, Bloemfontein, South Africa. 2017.

ELIA, S. et al. Francesco, Simultaneous monitoring of soil water content and salinity with a low-cost capacitance-resistance probe, *Sensors*. n.12, v.12, p.17588–17607. 2012.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Centro Nacional de Pesquisa de Solo. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, 1997.

FARES, A.; POLYAKOV, V. Advances in crop water management using capacitive water sensors. **Advances in agronomy**, v. 90, p. 43-77, 2006.

FERREIRA, D.F. Estatística básica.2.ed.Lavras:UFLA, 664p, 2009.

FIGUEIREDO FILHO, Dalson Britto; SILVA JÚNIOR, José Alexandre. Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r). **Revista Política Hoje**, v. 18, n. 1, p. 115-146, 2009.

FLORENTINO, A. Métodos para medir el contenido de agua en el suelo. **Venesuelos**, v. 14, n. 1, p. 48-70, 2011.

FOTH, Henry D. Fundamentals of soil science. **Soil Science**, v. 125, n. 4, p. 272, 1978.

GANESH, N. S. et al. Design of IoT-Enabled Farmer-Centric Multi-Crop Irrigation Support System. **Smart Systems: Innovations in Computing**. Springer, Singapore, v. 235, p. 209-217, 2022.

GARCÍA, L. et al. IoT-based smart irrigation systems: An overview on the recent trends on sensors and IoT systems for irrigation in precision agriculture. **Sensors**, v. 20, n. 4, p. 1042, 2020.

GARCIA, M. et al. IoT EcoHome: Internet das coisas e Sustentabilidade. **Brasil Para Todos-Revista Internacional**, v. 8, n. 1, p. 27-32, 2020.

GHOSH, Avijit et al. Do moisture conservation practices influence stability of soil organic carbon and structure?. **Catena**, v. 199, p. 105127, 2021

GOKHALE, P.; BHAT, O.; BHAT, S. Introduction to IOT. **International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology**, v. 5, n. 1, p. 41-44, 2018.

GONDIM, TM de S. et al. Infiltração e velocidade de infiltração de água pelo método do infiltrômetro de anel em solo areno-argiloso. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental**, v. 4, n. 1, p. 64-73, 2010.

GRASSINI, P. et al. Drivers of spatial and temporal variation in soybean yield and irrigation requirements, *Field Crops research*, v.136, p. 32-46, 2014.

HAGENAU, Jens; KAUFMANN, Vander; BORG, Heinz. Monitoring water content changes in a soil profile with TDR-probes at just three depths-How well does it work?. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 25, 2020.

HARA, A. T.; GONÇALVES, C.A.; DOMINGUES, J.V.S.; HASHIGUTI, H. T.; REZENDE, R et al. Estabilidade temporal da variabilidade espacial da umidade do solo obtida no campo e no laboratório. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v.12, n. 6, p. 3069-3077, 2019.

HE, H. et al. Time and frequency domain reflectometry for the measurement of tree stem water content: A review, evaluation, and future perspectives. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 306, p. 108442, 2021.

HE, Z. et al. Temporal stability of soil water storage in multiple soil layers in high-elevation forests. **Journal of Hydrology**, v. 569, p. 532-545, 2019.

HILLEL, Daniel. **Environmental soil physics: Fundamentals, applications, and environmental considerations**. Elsevier, 1998.

HILLEL, Daniel (Ed.). **Optimizing the soil physical environment toward greater crop yields**. Elsevier, 2012.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Diretoria de geociências. Coordenação de recursos naturais e estudos ambientais. **Manual técnico de pedologia**. Ibge, 2007.

KIRCHNER, J.W. Aggregation in environmental systems – Part 1: Seasonal tracer cycles quantify young water fractions, but not mean transit times, in spatially heterogeneous catchments. **Hydrology and Earth System Sciences** 20, 279-297, 2016.

KLEIN, V. A. Densidade dos sólidos do solo. In: KLEIN, V. A. **Física do solo**. 3. ed. Passo Fundo: UPF, p. 33-39, 2014.

KLEIN, V. A.; BASSEGGIO, M.; MADALOSSO, T.; MARCOLIN, C. Textura do solo e a estimativa do teor de água no ponto de murcha permanente com psicrômetro. **Ciência Rural**, v.40, n.7, p.1550-1556, 2010.

KLOTZSCHE, Anja et al. Measuring soil water content with ground penetrating radar: A decade of progress. **Vadose Zone Journal**, v. 17, n. 1, p. 1-9, 2018.

KLUTE, Arnold. Water retention: laboratory methods. **Methods of soil analysis: Part 1 Physical and mineralogical methods**, v. 5, p. 635-662, 1986.

KOJIMA, Y. et al. Low-cost soil moisture profile probe using thin-film capacitors and a capacitive touch sensor. **Sensors**, v. 16, n. 8, p. 1292, 2016.

KUMAR, N. et al. Development of an IoT-Based Smart Greenhouse Using Arduino. **Advances in Communication, Devices and Networking**. Springer, Singapore, v.776, p. 455-465, 2022.

KUSRIYANTO, M.; PUTRA, B. D. Smart home using local area network (LAN) based arduino mega 2560. In: **2016 2nd International Conference on Wireless and Telematics (ICWT)**. IEEE, p. 127-131, 2016.

LAI, J.; REN, L. Estimation of effective hydraulic parameters in heterogeneous soils at field scale. **Geoderma**, v. 264, p. 28-41, 2016.

LEITE, MA de A.; DUARTE, D. A.; MASSRUHÁ, SMFS. Agricultura digital: levantamento junto ao produtor rural na Região Metropolitana de Campinas. In: **Embrapa Informática Agropecuária-Artigo em anais de congresso**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROINFORMÁTICA, 12., 2019, Indaiatuba. Anais... Ponta Grossa: SBIAGRO, 2019., 2019.

LIMA, C.B DE, VILLAÇA, M.V.M. AVR e Arduino técnicas de projetos. Florianópolis: Edição dos Autores, 632p, 2012.

MALCHE, T.; MAHESHWARY, P.; KUMAR, R. Environmental monitoring system for smart city based on secure Internet of Things (IoT) architecture. **Wireless Personal Communications**, v. 107, n. 4, p. 2143-2172, 2019.

MARTINAZZO, C. A. et al. Arduino: Uma tecnologia no ensino de física. **Revista Perspectiva**, v. 38, n. 143, 2014.

MCROBERTS, M. **Arduino básico**. Novatec Editora, 2018.

MIOT, H. A. Correlation analysis in clinical and experimental studies. *J Vasc Bras*.17(4):275-279. Out.-Dez. 2018.

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.

MISHRA, P.; KHARE, G. P. Water controlling by soil moisture. **Materials Today: Proceedings**, 2021.

MITTELBACH, H. et al. Comparison of four soil moisture sensor types under field conditions in Switzerland, **Journal of Hydrology**. n. 430, p. 39–49. 2012.

MOHANTY, Binayak P. et al. Soil moisture remote sensing: State-of-the-science. **Vadose Zone Journal**, v. 16, n. 1, 2017.

MORAIS, R. et al. mySense: A comprehensive data management environment to improve precision agriculture practices. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 162, p. 882-894, 2019.

MZEZEWA, J., GWATA, E.T., VAN RENSBURG, L.D. Yield and seasonal water productivity of sunflower as affected by tillage and cropping systems under dryland conditions in the Limpopo Province of South Africa. **Agricultural Water Management**. 98, 1641–1648. 2011.

NAGAHAGE, E. A. A.; NAGAHAGE, I. S. P.; FUJINO, T. Calibration and validation of a low-cost capacitive moisture sensor to integrate the automated soil moisture monitoring system. **Agriculture**, v. 9, n. 7, p. 141, 2019.

NEVES, W. Materiais Eléctricos. **Notas de aula, Campina Grande, PB**, p. 501-559, 2001.

NOBORIO, K. et al. Measurements of soil moisture content, heat capacity and thermal conductivity with a single TDR probe, *Soil Science* n. 161, p. 22–28. 1996.

OATES, M. J. et al. Automatic fault detection in a low cost frequency domain (capacitance based) soil moisture sensor. **Agricultural water management**, v. 183, p. 41-48, 2017.

OCHSNER, E. et al. State of the art in large-scale soil moisture monitoring. **Soil Science Society of America Journal**, p. 1-32, 2013.

OKAFOR, N. U.; ALGHORANI, Y.; DELANEY, D. T. Improving data quality of low-cost IoT sensors in environmental monitoring networks using data fusion and machine learning approach. **ICT Express**, v. 6, n. 3, p. 220-228, 2020.

OKTARIAWAN, I. et al. Pembuatan sistem otomasi dispenser menggunakan mikrokontroler arduino mega 2560. **Jurnal Ilmiah Teknik Mesin**, v. 1, n. 2, 2013.

ONU. Consejo de Derechos Humanos. “La agroecología y el derecho a la alimentación” 2020, Disponível em: < <http://www.srfood.org/es/informes-oficiales> > Acceso: 20 Jan. 2021.

PACHEPSKY, Ya A.; RAWLS, W. J. Soil structure and pedotransfer functions. **European Journal of Soil Science**, v. 54, n. 3, p. 443-452, 2003.

PÁNTANO, Vanesa C.; PENALBA, Olga C. Soil response to long-term projections of extreme temperature and precipitation in the southern La Plata Basin. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 134, n. 3, p. 1257-1268, 2018.

PIZETTA, S. et al. Calibração de um sensor capacitivo para estimativa da umidade em três classes de solos. **Irriga**, v. 22, n. 3, p. 458-468, 2017.

QU, W. et al. The integrated water balance and soil data set of the Rollesbroich hydrological observatory. **Earth System Science Data**, v. 8, n. 2, p. 517-529, 2016.

RAED, A.; MOUAZEN, A. M. Combining frequency domain reflectometry and visible and near infrared spectroscopy for assessment of soil bulk density. **Soil and Tillage Research**, v. 135, p. 60-70, 2014.

REICHARDT, K. **Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera**. 4^a. ed. Campinas, Fundação Cargil, Vii, p. 466p, 1985.

REICHERT J.M.; SUZUKI L.; REINERT D.J.; HORN R., HAKANSSON I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil & Tillage Research**. 102: 242-254. 2009.

REICHERT, J.M.; ALBUQUERQUE, J.; PERAZA, J.; DA COSTA, A. Estimating water retention and availability in cultivated soils of southern Brazil. **Geoderma Regional**, v. 21, p. e00277, 2020.

RIBEIRO, J.; MARINHO, D.; ESPINOSA, J.W. Agricultura 4.0: desafios à produção de alimentos e inovações tecnológicas. In: **SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**. p. 1-7, 2018.

RIBEIRO, K. M. et al. estudo comparativo do método padrão da estufa e do método speedy na determinação do teor de água no solo/comparative study of the standard oven-drying and the speedy method for determining soil water content. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 12, n. 1, p. 18-28, 2018.

RIVAS-SÁNCHEZ, Y. A.; MORENO-PÉREZ, M. F.; ROLDÁN-CAÑAS, J. Environment control with low-cost microcontrollers and microprocessors: Application for green walls. **Sustainability**, v. 11, n. 3, p. 782, 2019.

ROMANO, N. Soil moisture at local scale: measurements and simulations. **Journal of Hydrology**, 516, 6-20. 2014.

ROTHER, A. et al. Changes in soil structure caused by the installation of time domain reflectometry probes and their influence on the measurement of soil moisture. **Water Resources Research**, v. 33, n. 7, p. 1585-1593, 1997.

SAJIL KUMAR, Pazhuparambil Jayarajan; SCHNEIDER, Michael; ELANGO, Lakshmanan. The State-of-the-Art Estimation of Groundwater Recharge and Water Balance with a Special Emphasis on India: A Critical Review. **Sustainability**, v. 14, n. 1, p. 340, 2022.

SANTOS, J.C.; DE ANDRADE, E.; GUERREIRO, M.; MEDEIROS, P.H.; PALÁCIO, H.; DE ARAÚJO NETO, J. Effect of dry spells and soil cracking on runoff generation in a semiarid micro watershed under land use change. **Journal of Hydrology**, v. 541, part B, p. 1057-1066, 2016.

SCHOENEGER, Philip J.; WYSOCKI, Douglas A.; BENHAM, Ellis C. (Ed.). **Field book for describing and sampling soils**. Government Printing Office, 2012.

SENA, C.; et al. calibração do sensor de umidade do solo dsmm500 em latossolo vermelho distrófico. **global science and technology**, v. 12, n. 2, 2019.

SERRANO, D. et al. Surface soil moisture monitoring with near-ground sensors: Performance assessment of a matric potential-based method. **Measurement**, v. 155, p. 107542, 2020.

SHAFIQUE, K. et al. Internet of things (IoT) for next-generation smart systems: A review of current challenges, future trends and prospects for emerging 5G-IoT scenarios. **Ieee Access**, v. 8, p. 23022-23040, 2020.

SHUKLA, Manoj K. **Soil physics: An introduction**. CRC press, 2013.

SOUSA, Áurea. Coeficiente de correlação de Pearson e coeficiente de correlação de Spearman: o que medem e em que situações devem ser utilizados?. **Correio dos Açores**, p. 19-19, 2019.

SOUZA, C. F.; DA SILVA, C. R.; DE ANDRADE JÚNIOR, A. S.; COELHO, E. F. Monitoramento do teor de água no solo em tempo real com as técnicas de TDR e FDR. **Irriga, Botucatu**, v. 1, n. 1, p. 26-42, 2016.

SOUZA, S., B. et al. velocidade de infiltração básica em áreas com diferentes usos e manejos. **velocidade de infiltração básica em áreas com diferentes usos e manejos**, p. 1-388–416, 2019.

STOKES, George Gabriel et al. On the effect of the internal friction of fluids on the motion of pendulums. 1851.

SU, S.L.; SINGH, D.N.; SHOJAEI BAGHINI, M.A critical review of soil moisture measurement. **Measurement**, v.54, p.92-105, 2014.

SUPRIYASILP, T.; PONGPUT, K. Water balance model as a tool for building participation and joint water use promotion at the river basin level. **Irrigation and Drainage**, v. 70, n. 2, p. 254-268, 2021.

SURESH, P. et al. IoT with Evolutionary Algorithm Based Deep Learning for Smart Irrigation System. **CMC-Computers, Materials & Continua**, v. 71, p.1713–1728, 2022.

SUZUKI L. E. A. S.; REINERT D. J.; REICHERT J. M.; LIMA C. L. R. Estimativa da susceptibilidade à compactação e do suporte de carga do solo com base em propriedades físicas de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 32:963-73.2008

SWAROWSKY, A., DAHLGREN, R. A., TATE, K. W., HOPMANS, J. W., & O'GEEN, A. T. Catchment-Scale Soil Water Dynamics in a Mediterranean-Type Oak Woodland. **Vadose Zone Journal**, 10(3), 800-815, 2011.

TARHULE, A. The future of water: Prospects and challenges for water management in the 21st century. In: **Competition for Water Resources**. Elsevier, p. 442-454, 2017.

TESTEZLAF, R. **Irrigação: Métodos, Sistemas e Aplicações**. Ed. Revisada. Não publicada. Campinas, SP: Faculdade de Engenharia Agrícola/UNICAMP 2017.

TIFAFI, M.; BOUZOUIDJA, R.; LEGUÉDOIS, S.; OUVRARD, S.; SÉRÉ, G. How lysimetric monitoring of Technosols can contribute to understand the temporal dynamics of the soil porosity. **Geoderma**, v. 296, p. 60-68, 2017.

TOPP, G.C., DAVIS, J.L., ANNAN, A.P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. **Water Resources**. Res. 16, 574–582. 1980.

TSHEKO, R.; SAVAGE, M. J. Calibration of a frequency-domain reflectometer for determining soil-water content in a clay loam soil. **Water SA**, v. 32, n. 1, p. 37-42, 2006.

TUCCI, C.E.M et al. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**, 3ª edição. Porto Alegre, Editora da UFRGS/ABRH, 2004.

VAN KRANENBURG, R.; BASSI, A. IoT challenges. **Communications in Mobile Computing**, v. 1, n. 1, p. 1-5, 2012.

VARLAS, G. et al.. A multi-platform hydrometeorological analysis of the flash flood event of 15 November 2017 in Attica, Greece. **Remote Sensing**, v. 11, n. 1, p. 45, 2019.

VEIHMEYER, F. J.; HENDRICKSON, A. H. Soil moisture in relation to plant growth. **Annual review of plant physiology**, v. 1, n. 1, p. 285-304, 1950.

VIEIRA, M. L.; KLEIN, V. A. Propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira Ciencia do Solo**,31, 1271-1280. 2007.

WADHWANI, S. et al. Smart home automation and security system using Arduino and IOT. **International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)**, v. 5, n. 2, p. 1357-1359, 2018.

WENDLING, M. Sensores. **Universidade Estadual Paulista. São Paulo**, v. 2010, p. 20, 2010.

WESTERN, Andrew W. et al. Impacts of stormwater infiltration on downslope soil moisture and tree water use. **Environmental Research Letters**, v. 16, n. 10, p. 104014, 2021.

WILLMOTT, C.J. On the validation of models. **Physcal Geography**. v.2, 184–194. 1981.

XU, Jinghui et al. Short, multineedle frequency domain reflectometry sensor suitable for measuring soil water content. **Soil Science Society of America Journal**, v. 76, n. 6, p. 1929-1937, 2012.

YU, L. et al. Review of research progress on soil moisture sensor technology. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 14, n. 4, p. 32-42, 2021.

ZHAI, X.; GUO, L.; ZHANG, Y.; ZHANGG, T Rainfall threshold determination for flash flood warning in mountainous catchments with consideration of antecedent soil moisture and rainfall pattern. **Natural Hazards**, v. 94, n. 2, p. 605-625, 2018.

ZHAI, X.; GUO, L.; ZHANG, Y.; ZHANGG, T. Comparing three hydrological models for flash flood simulations in 13 humid and semi-humid mountainous catchments. **Water Resources Management**, v. 35, n. 5, p. 1547-1571, 2021.

ZHANG, X; YANG, C; WANG, L. Research and application of a new soil moisture sensor. In: **MATEC Web of Conferences**. EDP Sciences, p. 02010. 2018.

ZHANG, Y.; CHEN Q.; XIA J. Investigation on flood event variations at space and time scales in the Huai River Basin of China using flood behavior classification. **Journal of Geographical Sciences**. 30(12):2073–2095, 2020.

ZHOU, Ligang et al. Soil water content estimation using high-frequency ground penetrating radar. **Water**, v. 11, n. 5, p. 1036, 2019.

ZHU, B.; Xie, X.; Meng, S.; Lu, C.; Yao, Y. Sensitivity of soil moisture to precipitation and temperature over China: Present state and future projection. **Science of The Total Environment**, v. 705, p. 135-774, 2020.

ZHUO, L; HAN, D. The relevance of soil moisture by remote sensing and hydrological modelling. **Procedia Engineering**, v. 154, p. 1368-1375, 2016.

APÊNDICE A – ALGORITMO DE EXECUÇÃO DA BANCADA DE CALIBRAÇÃO DOS SENSORES

```
1. // Inclusão das bibliotecas.
2. #include <HX711.h>
3. #include <SD.h>
4. #include <SPI.h>

5. // Definição dos pinos a serem usados.
6. #define pino_sinal_amostra1 A1
7. #define pino_sinal_amostra2 A2
8. #define pino_sinal_amostra3 A3
9. #define pino_sinal_amostra4 A4
10. #define pino_sinal_amostra5 A5
11. #define pino_sinal_amostra6 A6
12. #define pino_sinal_amostra7 A7
13. #define pino_sinal_amostra8 A8
14. #define pino_sinal_amostra9 A9

15. // Declaração das variáveis de leitura das balanças.
16. const int PINO_DT = 2;
17. const int PINO_SCK = 3;
18. const int PINO_DT2 = 4;
19. const int PINO_SCK2 = 5;
20. const int PINO_DT3 = 6;
21. const int PINO_SCK3 = 7;
22. const int PINO_DT4 = 8;
23. const int PINO_SCK4 = 9;
24. const int PINO_DT5 = 22;
25. const int PINO_SCK5 = 23;
26. const int PINO_DT6 = 24;
27. const int PINO_SCK6 = 25;
28. const int PINO_DT7 = 26;
29. const int PINO_SCK7 = 27;
30. const int PINO_DT8 = 28;
31. const int PINO_SCK8 = 29;
32. const int PINO_DT9 = 30;
33. const int PINO_SCK9 = 31;
```

```

34. //declaracao do intervalo de espera
35. const int TEMPO_ESPERA = 500;

36. // Instanciando objetos.
37. HX711 escala, escala2, escala3, escala4, escala5, escala6, escala7, escala8, escala9; //declaracao do
    objeto ESCALA na classe HX711 da biblioteca
38. File myFile;

39. // Declaração das variáveis de leitura dos senores.
40. int pinoSS = 53;
41. float valor_amostra1;
42. float valor_amostra2;
43. float valor_amostra3;
44. float valor_amostra4;
45. float valor_amostra5;
46. float valor_amostra6;
47. float valor_amostra7;
48. float valor_amostra8;
49. float valor_amostra9;
50. float medida=0;
51. float medida2=0;
52. float medida3=0;
53. float medida4=0;
54. float medida5=0;
55. float medida6=0;
56. float medida7=0;
57. float medida8=0;
58. float medida9=0;

59. void setup ()
60. {
61. {
62. // Define os pinos como entrada de dados.
63. pinMode(pino_sinal_amostra1, INPUT);
64. pinMode(pino_sinal_amostra2, INPUT);
65. pinMode(pino_sinal_amostra3, INPUT);
66. pinMode(pino_sinal_amostra4, INPUT);
67. pinMode(pino_sinal_amostra5, INPUT);
68. pinMode(pino_sinal_amostra6, INPUT);

```

```
69. pinMode(pino_sinal_amostra7, INPUT);
70. pinMode(pino_sinal_amostra8, INPUT);
71. pinMode(pino_sinal_amostra9, INPUT);

72. // Inicializacao e definicao dos pinos DT e SCK dentro do objeto ESCALA
73. escala.begin (PINO_DT, PINO_SCK);
74. escala2.begin (PINO_DT2, PINO_SCK2);
75. escala3.begin (PINO_DT3, PINO_SCK3);
76. escala4.begin (PINO_DT4, PINO_SCK4);
77. escala5.begin (PINO_DT5, PINO_SCK5);
78. escala6.begin (PINO_DT6, PINO_SCK6);
79. escala7.begin (PINO_DT7, PINO_SCK7);
80. escala8.begin (PINO_DT8, PINO_SCK8);
81. escala9.begin (PINO_DT9, PINO_SCK9);

82. // Ajusta a escala para o fator de calibracao (Kcb).
83. escala.set_scale();
84. escala2.set_scale();
85. escala3.set_scale();
86. escala4.set_scale();
87. escala5.set_scale();
88. escala6.set_scale();
89. escala7.set_scale();
90. escala8.set_scale();
91. escala9.set_scale();

92. // Zera o valor, a fim de desconsiderar a massa da estrutura da balança.
93. escala.tare();
94. escala2.tare();
95. escala3.tare();
96. escala4.tare();
97. escala5.tare();
98. escala6.tare();
99. escala7.tare();
100.escala8.tare();
101.escala9.tare();

102. }
103.pinMode(pinoSS, OUTPUT);
104.// Abre o Arquivo.
```

```

105.myFile = SD.open("dados1-9.txt");

106.// Imprime na tela.
107.if (myFile) {
108.Serial.println("Conteúdo do Arquivo:");

109.// Exibe o conteúdo do Arquivo.
110.while (myFile.available()) {
111.Serial.write(myFile.read());
112.}

113.// Fecha o Arquivo após ler.
114.myFile.close();
115.}

116.// Imprime na tela.
117.else {
118.Serial.println("Erro ao Abrir Arquivo .txt");
119.}

120.}

121.void loop ()
122.{
123.// Leitura do valor dos sensores.
124.valor_amostra1 = analogRead(pino_sinal_amostra1);
125.valor_amostra2 = analogRead(pino_sinal_amostra2);
126.valor_amostra3 = analogRead(pino_sinal_amostra3);
127.valor_amostra4 = analogRead(pino_sinal_amostra4);
128.valor_amostra5 = analogRead(pino_sinal_amostra5);
129.valor_amostra6 = analogRead(pino_sinal_amostra6);
130.valor_amostra7 = analogRead(pino_sinal_amostra7);
131.valor_amostra8 = analogRead(pino_sinal_amostra8);
132.valor_amostra9 = analogRead(pino_sinal_amostra9);

133.// Salvando na variavel o valor da média de 5 medidas.
134.medida = escala.get_units(5);
135.medida2 = escala2.get_units(5);
136.medida3 = escala3.get_units(5);
137.medida4 = escala4.get_units(5);

```

```

138.medida5 = escala5.get_units(5);
139.medida6 = escala6.get_units(5);
140.medida7 = escala7.get_units(5);
141.medida8 = escala8.get_units(5);
142.medida9 = escala9.get_units(5);

143.// Imprime na tela
144.if (SD.begin()) { // Inicializa o SD Card
145.Serial.println("SD Card pronto para uso.");
146.}

147.else {
148.Serial.println("Falha na inicialização do SD Card.");
149.return;
150.}

151.// Cria / Abre arquivo .txt
152.myFile = SD.open("dados1-9.txt", FILE_WRITE);
153.// Se o Arquivo abrir imprime:
154.if (myFile) {
155.// Imprime na tela
156.Serial.println("Escrevendo no Arquivo .txt");
157.// Escreve no Arquivo
158.myFile.print(medida,3);
159.myFile.print(" - ");
160.myFile.print(medida2, 3);
161.myFile.print(" - ");
162.myFile.print(medida3,3);
163.myFile.print(" - ");
164.myFile.print(medida4, 3);
165.myFile.print(" - ");
166.myFile.print(medida5, 3);
167.myFile.print(" - ");
168.myFile.print(medida6, 3);
169.myFile.print(" - ");
170.myFile.print(medida7, 3);
171.myFile.print(" - ");
172.myFile.print(medida8, 3);
173.myFile.print(" - ");
174.myFile.print(medida9, 3);
175.myFile.print(" - ");

```

```
176.myFile.print(" | ");
177.myFile.print(valor_amostra1, 3);
178.myFile.print(" - ");
179.myFile.print(valor_amostra2, 3);
180.myFile.print(" - ");
181.myFile.print(valor_amostra3, 3);
182.myFile.print(" - ");
183.myFile.print(valor_amostra4, 3);
184.myFile.print(" - ");
185.myFile.print(valor_amostra5, 3);
186.myFile.print(" - ");
187.myFile.print(valor_amostra6, 3);
188.myFile.print(" - ");
189.myFile.print(valor_amostra7, 3);
190.myFile.print(" - ");
191.myFile.print(valor_amostra8, 3);
192.myFile.print(" - ");
193.myFile.print(valor_amostra9, 3);
194.myFile.println(" - ");

195.// Fecha o Arquivo após escrever
196.myFile.close();
197.// Imprime na tela.
198.Serial.println("Terminado.");
199.Serial.println(" ");
200.}
201.else { // Se o Arquivo não abrir, imprime na tela.
202.Serial.println("Erro ao Abrir Arquivo .txt");
203.}

204.Serial.print(medida,3);
205.Serial.print(" - ");
206.Serial.print(medida2,3);
207.Serial.print(" - ");
208.Serial.print(medida3,3);
209.Serial.print(" - ");
210.Serial.print(medida4,3);
211.Serial.print(" - ");
212.Serial.print(medida5,3);
213.Serial.print(" - ");
```

```
214.Serial.print(medida6,3);
215.Serial.print(" - ");
216.Serial.print(medida7,3);
217.Serial.print(" - ");
218.Serial.print(medida8,3);
219.Serial.print(" - ");
220.Serial.print(medida9,3);
221.Serial.println(" - ");

222.delay(300000);
223.}
```