

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**

**CALIBRAÇÃO E AVALIAÇÃO DE SENSOR CAPACITIVO  
PARA USO NA AGRICULTURA IRRIGADA**

**AELTON CRISTALDO PEREIRA  
LEONARDO DE OLIVEIRA SOUZA**

**DOURADOS  
2023**

# **CALIBRAÇÃO E AVALIAÇÃO DE SENSOR CAPACITIVO PARA USO NA AGRICULTURA IRRIGADA**

**AELTON CRISTALDO PEREIRA  
LEONARDO DE OLIVEIRA SOUZA**

**Orientador: PROF. Dr. LUCIANO OLIVEIRA GEISENHOF**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal da Grande Dourados, como parte das exigências para conclusão do curso de Engenharia Agrícola.

**DOURADOS  
2023**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

S729c Souza, Leonardo De Oliveira  
CALIBRAÇÃO E AVALIAÇÃO DE SENSOR CAPACITIVO PARA USO NA  
AGRICULTURA IRRIGADA [recurso eletrônico] / Leonardo De Oliveira Souza, Aelton Cristaldo  
Pereira. -- 2023.  
Arquivo em formato pdf.  
  
Orientador: Luciano Oliveira Geisenhoff.  
TCC (Graduação em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal da Grande Dourados, 2023.  
Disponível no Repositório Institucional da UFGD em:  
<https://portal.ufgd.edu.br/setor/biblioteca/repositorio>  
  
1. Umidade. 2. Irrigação de precisão. 3. Textura de solo. 4. Automação. 5. Eficiência. I. Pereira,  
Aelton Cristaldo. II. Geisenhoff, Luciano Oliveira. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

©Direitos reservados. Permitido a reprodução parcial desde que citada a fonte.

# **CALIBRAÇÃO E AVALIAÇÃO DE SENSOR CAPACITIVO PARA USO NA AGRICULTURA IRRIGADA**

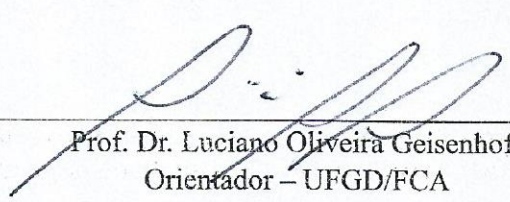
Por

Aelton Cristaldo Pereira

Leonardo de Oliveira Souza

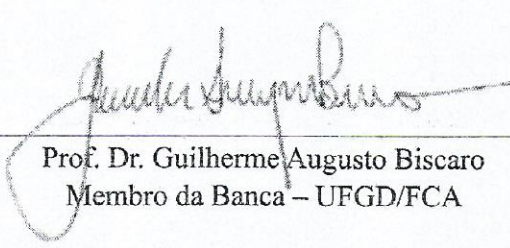
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos exigidos para  
obtenção do título de ENGENHEIRO AGRÍCOLA

Aprovado em: 19 de Abril de 2023.




---

Prof. Dr. Luciano Oliveira Geisenhoff  
Orientador – UFGD/FCA



---

Prof. Dr. Guilherme Augusto Biscaro  
Membro da Banca – UFGD/FCA



---

Prof. Dr. Elton Aparecido Siqueira Martins  
Membro da Banca – UFGD/FCA

## **AGRADECIMENTOS**

Aelton Cristaldo Pereira

Aos meus pais onde mesmo não tendo essa oportunidade me influenciaram a nunca desistir dos meus sonhos e com isso dando força e a coragem a seguir em frente.

Ao meu orientador, professor Dr. Luciano Oliveira Geisenhoff, pela orientação e suporte dado e pelo conhecimento transmitido.

A Universidade Federal da Grande Dourados e aos profissionais que a compõem, coordenação do curso em Engenharia Agrícola.

Leonardo de Oliveira Souza

Agradeço a Deus por essa etapa que se encerra.

Aos meus pais por estar ao meu lado me apoiando em tudo, sempre falando para eu não desistir.

Ao meu orientador, professor Dr. Luciano Oliveira Geisenhoff, pela orientação e suporte dado e pelo conhecimento transmitido.

A Universidade Federal da Grande Dourados e aos profissionais que a compõem, coordenação do curso em Engenharia Agrícola.

## SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1.    Objetivos.....	2
2. REVISÃO DE LITERATURA .....	3
2.1.    Importância da água na agricultura.....	3
2.2.    Irrigação em locais fechados.....	3
2.3.    Irrigação de precisão .....	4
2.4.    Automação como forma de melhorar a irrigação .....	4
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	6
3.1.    Apresentação do sensor .....	8
3.2.    Análises estatísticas .....	9
3.3.    Regressão linear.....	10
3.5.    Análise de variância e teste f .....	14
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	17
5. CONCLUSÃO.....	25
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	26

## RESUMO

O conteúdo de água no solo é um dos fatores mais importantes a se saber na hora de se implantar uma cultura numa área, pois ela pode ajudar ou atrapalhar no desenvolvimento da cultura. O trabalho tem como objetivo fazer a calibração do sensor capacitivo de baixo custo e como isso saiba o conteúdo de água mais precisamente. O modelo escolhido neste trabalho foi Hw – 390 v2.0, para fazer o monitoramento atual da umidade no solo. As amostras de solo foram coletadas nas cidades de Dourados, Amambai, Rosana, que tem predominância Latossolo Vermelho Distrófico, e suas classes texturais são areia, areia franca e muito argilosa, também é utilizado um substrato comercial Carolina Soil®, para testar o sensor com essa possibilidade. As amostras foram separadas em 5 recipientes para tipo 1 e tipo 3 e o substrato, onde cada um tinha um sensor em contato com os solos. Os recipientes foram feitos com cano PVC e tinha furos para o escoamento do excesso de água. A variação de umidade foi considerada pelo conteúdo de água determinado pelo método direto de estufa em 105°C e pelo sensor capacitivo. Os resultados apresentados neste presente experimento indicam que o modelo de sensor indica o valor correto de umidade no solo.

**Palavras-chave:** Umidade. Irrigação de precisão. Textura de solo. Automação. Eficiência.

## ABSTRACT

The soil water content is one of the most important factors to consider when implementing a crop in an area, as it can either aid or hinder crop development. The objective of this study is to calibrate a low-cost capacitive sensor to accurately determine soil water content. The chosen model for soil moisture monitoring was Hw – 390 v2.0. Soil samples were collected from Dourados, Amambai, and Rosana, which have predominantly Dystrophic Red Latosol and their textural classes are sandy, loamy sand, and very clayey. A commercial substrate, Carolina Soil ®, was also used to test the sensor with this possibility. The samples were separated into five containers for type 1 and type 3 soils, and the substrate, with each container having a sensor in contact with the soil. The containers were made of PVC pipes with holes for excess water drainage. The variation in soil moisture was determined by both the direct method of drying samples in an oven at 105°C and the capacitive sensor. The results of this experiment indicate that the sensor model accurately indicates soil moisture content.

Keywords : Moisture. Precision irrigation. Soil texture. Automation. Efficiency.



## 1. INTRODUÇÃO

Com a demanda na produção de alimento a agricultura vem buscando recurso para só usar o necessário dos recursos hídricos, energéticos e com isso ter maior lucratividade. Uma das formas de reduzir consumo é buscar dados de outra cultura que talvez já foram implantadas no local. (FREDERICO, 2022).

A irrigação é a metodologia que emprega a técnica de fornecer somente o necessário de água para as plantas, sendo como objetivo a sobrevivência da própria cultura e consequentemente ter o aumento da produtividade (CARVALHO; ARAUJO, 2010). Com a finalidade de propiciar água necessária as plantas também devem se levar em conta o alto custo com a energia, de forma a se tratar de forma racional entre os dois fatores (DORNELES; RUIVARO, 2012). Por meio do monitoramento do teor de água no solo é possível determinar a quantidade de água no solo e com isso adquirir o desenvolvimento e a sustentabilidade (MUÑOS-CARPENA et al., 2004).

Com o atual sistema de desenvolvimento agrário a irrigação tem se cada vez mais importância nos dias atuais, por ser um dos fatores mais limitantes para execução dos projetos. Onde a irrigação exige a demanda muita alta sobre a água, onde cerca de 70% de água doce do mundo deve se a irrigação e por isso a economia e a preservação dessa fonte está ganhando cada vez mais importância (SOUZA, 2014).

Conhecendo o movimento da água e suas formas de armazenamento no solo é essencial quando se busca otimizar a produção e minimizar a percolação e a lixiviação, garantindo uma sustentabilidade do sistema produtivo. (SOUZA et al.; 2013).

Existe várias técnicas para serem utilizadas no monitoramento de água no solo, mas cada metodologia tem suas vantagens e desvantagens, porém apresenta resultados significativos e confiáveis. Podendo ser separados por métodos direto e o indireto. No método direto a gravimetria é considerado simples, prático e preciso, só que o destrutivo e demorado. Os indiretos possuem respostas rápidas porem normalmente necessitam de algum tipo de calibração dos equipamentos (SILVA et al.; 2020).

Técnicas eletromagnéticas considerado como método indireto e rápido resultado, o funcionamento é basicamente emissões de ondas eletromagnéticas e sua propagação pelo solo. Os resultados são obtidos pelo tempo que as ondas levam para dispersar, podendo ser rápido ou lento. (SOUZA et al., 2016; SILVA et al., 2020).

Para que tenha um bom manejo e que tenha o sistema irrigação ajudando e não atrapalhado o desenvolvimento da cultura, é preciso saber a umidade solo. Com isso existe os

sensores capacitivos que registra os valores atuais umidade no solo e instantânea para tomar decisão rápidas. (GOMES et al., 2017; PIZETTA,2017).

### 1.1.Objetivos

O presente estudo busca avaliar o desempenho do sensor capacitivo de baixo custo, voltado a mensuração da umidade atual do solo. Objetivo é o estabelecimento da metodologia para uso eficiente da água na agricultura irrigada, estendido ao médio e pequeno agricultor, através da calibração de sensores capacitivos de baixos custo, como o Capacitivo soil moisture sensor, efetivado em solos com características texturas diversificadas e estendendo-se à pratica de cultivos em ambientes fechados, por meio da avaliação do desempenho em recipiente com uso de substrato.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. Importância da água na agricultura

A forma da distribuição da vegetação sobre a superfície terrestre e o potencial de produção das espécies cultivadas é devido ao manejo controlado e da disponibilidade de água no solo (PIMENTEL, 2004).

A água exercer a função de reagente e solvente nos vegetais, onde a primeira etapa cita-se os processos fisiológicos, incluindo a fotossíntese e a hidrólise do amido em açúcar. Na segunda é a possibilidade de dissolução das substâncias orgânicas e inorgânicas e de gases nas células, mais o fluxo de órgãos vegetais (PIMENTEL, 2004; VIEIRA et al., 2010).

A determinação da água disponível para a cultura é tida como um desafio para a ciência no solo, sendo um papel fundamental para o correto manejo de água, para tal projeto de irrigação (KLEIN et al., 2010).

As propriedades do solo é influência da quantidade de água presente no solo, consistindo em propriedades mecânicas, consistência, plasticidade, resistência, compactação, penetrabilidade, viscosidade e trafegabilidade. O nível de água no solo também rege o conteúdo de ar, com isso tendo trocas gasosas no solo. Com o nível alto de água no solo a possibilidade de afetar a respiração das raízes e a atividade dos microrganismos aumenta (HILLEL et al., 1998).

A absorção da água pelas plantas é liberada na forma de vapor para atmosfera, com isso estabelecendo uma coluna continua de água, que acaba satisfazendo um gradiente decrescente do potencial hídrico. A absorção só é possível caso haja o gradiente favorável entre solo e raiz, caso haja a constante perda de água por evapotranspiração e não tenha uma adequada reposição é possível ocorrer danos ou até mesmo perda da cultura (PIZETTA et al., 2015).

### 2.2. Irrigação em locais fechados

É definido ambiente fechado por conta que pode ser feito em qualquer estrutura que propicie controle do clima, podendo ser parcial ou total durante a produção vegetal. Os ambientes podem ser divididos em dois grupos; sendo o primeiro ambiente protegido, onde o ambiente restringe qualquer entrada de solar, e o segundo sendo ambiente controlado, onde as condições do clima no interior são geridas por equipamentos automatizados e sensores, onde o

objetivo é fornecer o ambiente mais propício para o desenvolvimento da cultura (TESTEZLAF et al., 2017).

o monitoramento da umidade do substrato é de grande importância, visando a permissão do manejo da irrigação por parte do produtor, com podendo dar novos recursos financeiros e água. Utilizando a água como recurso de forma racional é uma grande aliada a ter benefícios econômicos. Porém essa metodologia depende da demanda por técnicas de cultivo de baixo consumo de mão-de-obra, por isso aponta para utilização dos sensores eletrônicos voltados a automação (CRUZ et al., 2018)

### 2.3.Irrigação de precisão

A precisão na agricultura consiste em um conjunto de técnicas que proporcionam um gerenciamento localizado da cultivar, uma vez que feita modo correto e forma uniformemente, desconsiderando a não uniformidade do solo é possível se dizer que foi feita uma preservação do solo junto as técnicas (LAMPARELLI et al., 2015).

Agricultura de precisão junta as aplicações de métodos, práticas e tecnologias embasadas na permissão de cada cultivo se desenvolve de forma particular, isso levando em conta os fatores clima, água e solo. Com esse contexto, a irrigação de precisão tem como função promover água as plantas em quantidade específicas, com tendo uma maior produtividade e tendo menor custo com insumos e assim agregando qualidade com intuito da redução dos impactos ambientais (OLIVEIRA et al., 2018).

A agricultura de precisão é observada, com junção de advindos da ciência da computação e da agronomia através do manejo da coleta de dados, com objetivo do uso preciso das informações de clima e solo (SARAIVA et al., 2018).

### 2.4.Automação como forma de melhorar a irrigação

Com a utilização de novas tecnologias para projetos de automação e sendo tendência na utilização em grandes centros urbanos, acaba se tendo uma carência no meio rural, com isso acaba que a agricultura tem pontos falhos por conta de sinais não alcançados, como monitoramento de lavouras e métodos de irrigação, com a evidencia da carência em uso de sistemas automatizados acaba- se tendo desvantagens na agregação de novas tecnologias e com isso diminuindo a eficiência e a eficácia da irrigação e do manejo correto e preciso (ROCHA et al., 2014).

A agricultura de digital, vem se adaptando e barateando com as novas tecnologias nacionais, podendo torna- se um grande passo na irrigação precisa. E um dos primeiros a introduzir isso são os pequenos produtores, por não ter uma disponibilidade de recurso tão alta, acabam buscando novas tecnologias de pequeno porte e com isso inovando o mercado da agricultura (SIMÕES et al., 2017).

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento de calibração do sensor capacitivo de umidade do solo foi realizado no laboratório Relações Água, Solo, Planta e Atmosfera, na Faculdade de Ciência Agrárias (FCA), da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), no município de Dourados, localizados na região sul de Mato Grosso do Sul.

O desenvolvimento do experimento iniciou-se com a coleta de amostras, na camada 0 – 20 cm, nos municípios de Amambai (MS), como predominância de Latossolo Vermelho Distrófico, Dourados (MS), como Latossolos Vermelho Distrófico e Rosana (SP), como Latossolo Vermelho Distrófico. Para cada solo foram coletadas 5 amostras entre os municípios, essas amostras foram submetidas a ser secas ao ar livres por três horas, e depois de ser secas, foram desterroadas e peneiradas em uma malha de 2,0 mm.

Como foi feito a coleta de dois tipos de solos, classificado como tipo 1 -  $10\% \leq$  argila  $\leq 15\%$  e tipo 3 - argila  $\geq 35\%$  (BRASIL, 2008). E também para complementar o estudo foi usado substrato Carolina Soil ®. As amostras foram acomodadas em recipientes que foram utilizando cano de PVC de 100 mm e cada recipientes tinha uma altura de 10 cm.

Os recipientes foram divididos nas seguintes formas, 15 foram reservados para o tipo 1, pois esse foi dividido em subdivisão, 5 para ao tipo 3 e 5 recipientes para o substrato Carolina Soil ®.



**Figura 1.** Solos avaliados em condição de coleta.

Para fazer a drenagem dos recipientes foram feitos alguns furos que tinha em média espaçamento de 0,5 cm entre linhas dos 20 recipientes, 5 recipientes não foram feitos furos, esses foram deixados para solo com maior percentual de areia, isso foi feito para que não tivesse nenhum tipo de perda de massa. A base dos recipientes foi recoberta com uma manta Bidim e foram usados para fixar a manta uma fita Hellerman, ajustados para que possíveis perdas de massa pelos orifícios. Após todos os ajustes feitos nos recipientes, cada um foi pesado individualmente em uma balança com precisão de  $\pm 0,1$  g, com e sem solo, e depois foram levados a uma estufa a 105° C. As amostras permaneceram na estufa em média por 24 horas, até que a variação na massa deixasse de ocorrer.

Os cinco sensores utilizados para calibração foram numerados e utilizados sempre em seu respectivos recipiente. A primeira leitura dos sensores foi feita com solos em condições naturais de extração e com substrato em condição comercial.

As amostras, depois da extração do conteúdo de água em estufa, foram feitas a medida de sua massa. Com isso além de ter o valor de referência para cálculo da umidade pelo método direto, foi possível calcular a densidade dos solos pela Equação 1. Nessa etapa a leitura analógica do sensor foi registrada.

$$ps = \frac{m}{v} \quad (1)$$

Em que:

$ps$ : densidade do solo -g/cm<sup>3</sup>;

$m$ : massa da amostra seca a 105 °C até atingir peso constante -g;

$V$ : volume da amostra - cm<sup>3</sup>;

Os recipientes com as amostras secas, foram colocados em uma bandeja de polietileno, encima de um isopor perfurado. Para fazer a saturação das amostras, foi colocado água na bandeja, à medida que o solo atingiu sua máxima retenção por capilaridade, com isso água dentro da bandeja deixou de variar, e assim atingindo a saturação. Nesse processo os sensores foram colocados no centro das amostras na posição vertical.

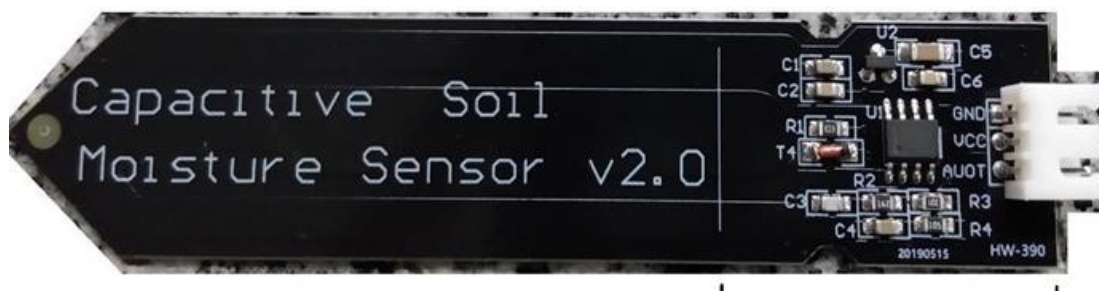
Depois de atingir a saturação os recipientes com as amostras foram pesados e lidos pelos sensores, e foram feitos o monitoramento da perda de água através da variação da massa pela balança e da variação na capacitância, por meio da aquisição computacional. Após a saturação todas as bandejas de isopor com furos foram substituídas por sem furos, essas bandejas tem uma massa de 4,0000 gramas. Outras massas também foram adicionadas como a

dos sensores que tem uma massa em média de 7,3295 gramas, e o três condutores jumpers de 2,2737 gramas. Todas as três massas citadas aforam desconsideradas na outras dos cálculos para determinação da umidade.

A drenagem das amostras saturadas foi monitorada em média por quatro dias, nas primeiras horas a cada hora e depois em intervalos maiores. Os postos de intermédio foram tidos pelas amostras na estufa, submetidas as condições de temperatura em média de 65 °C, tendo medição em intervalos de tempo de quatro horas. Esse procedimento foi repetido para o substrato.

### 3.1. Apresentação do sensor

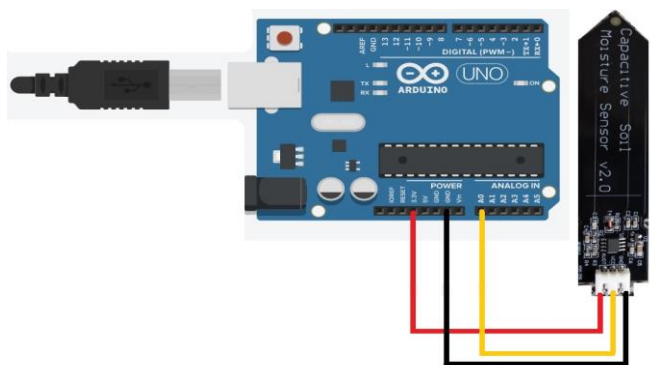
O sensor capacitivo escolhido para o experimento foi o modelo Hw-39 v2.0 (figura 7), tem uma tensão de alimentação de 3,3-3,5 volts, saída analógica de 0-3 V. As principais vantagens, evitar corrosão, isso aumentando a vida útil do sensor. O sensor faz uso de um sinal analógico e não tem um sinal digital.



**Figura 2.** Sensor capacitivo Hw – 390

A placa de prototipagem Arduino UNO foi alimentada por meio da entrada USB. A leitura é feita pelo pino A0, que tem um sinal analógico. Além da placa Arduino UNO ter a porta A0 existem outras 5 portas (A1, A2, A3, A4 e A5) e tem uma resolução máxima de 10 bits. O diagrama de funcionamento do circuito figura 3.





**Figura 3.** Diagrama de funcionamento do circuito.

A comunicação serial que é integração entre o hardware e software. O monitor serial fornece dados em bytes que consiste em uma unidade de informação digital. A tensão de saída retorna em valor inteiro que varia do nível baixo 0 bytes ao máximo 1023 bytes, isso acontece quando a tensão elétrica chega case a 3V. No caso do acompanhamento do teor de água no solo, a informação corresponde à umidade por meio da correlação negativa dada pela calibração. Isso significa que o solo ao redor do sensor perde umidade, a permissividade elétrica do meio diminui e reduz linearmente a capacitância.

Além disso, à medida que o teor de água do solo aumenta, a permissividade elétrica do solo aumenta e consequentemente diminui o valor da leitura em bytes em função da redução de tensão de saída. Desta forma, quando maior for a capacitância registrada pelo sensor, menor o sinal em bytes e com resultado a maior quantidade de água no solo.

O monitoramento dos valores lidos pelos sensores foi feito em relação à média dos cinco recipientes para cada amostra de solo e cada um com um sensor correspondente, em várias faixas de umidade distribuída entre solo seco e saturado, analisadas individualmente e estatisticamente usando o software Excel.

### 3.2. Análises estatísticas

Os parâmetros que foram usados para caracterizar o desempenho do sensor capacitivo, foi coeficientes de determinação ( $R^2$ ), coeficiente de correlação linear ( $R$ ), precisão do sensor em raiz quadrada do erro médio (RMSE), índice de concordância “d”, índice de confiança “c” e teste de significância “f”.

### 3.3. Regressão linear

Uma análise de regressão foi realizada para avaliar o desempenho dos sensores, dado o modelo  $y = ax + y$ . A onde as variáveis dependentes são a umidade volumétrica calculada pelo método estufa e a leituras em bytes registrada pelo sensor. Em seguida realizada regressão considerando a umidade volumétrica observada pelo método de estufa e a umidade volumétrica predita usando equação de calibração em função do sinal do sensor. Sendo calculados pelas Equações 2 e 3.

$$b = \frac{\sum O_i P_i - \frac{(\sum P_i)(\sum O_i)}{n}}{\sum O_i^2} \quad (2)$$

$$a = \bar{O} - b \bar{P} \quad (3)$$

Em que:

a: coeficiente angular;

b: coeficiente linear;

O: umidade volumétrica calculada –  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ;

P: leitura do sensor em bytes e umidade volumétrica estimada pelo modelo –  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ;

n: número de observações;

$\bar{P}$ : média das leituras do sensor em bytes e média das unidades volumétricas estimadas pelo modelo –  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ;

$\bar{O}$ : média das unidades volumétricas calculada -  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ;

O grau de ajuste do modelo estatístico foi obtido pelo coeficiente de determinação de  $R^2$  na Equação 4. Por outro lado, o coeficiente linear ou índice Correlação de Pearson R, foi obtido pela Equação 5.

$$R^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^n P_i O_i - n \bar{P} \bar{O}}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n P_i^2 - n \bar{P}^2)(\sum_{i=1}^n O_i^2 - n \bar{O}^2)}} \right)^2 \quad (4)$$

$$R = \sqrt{R^2} \quad (5)$$

Em que:

$R^2$ : coeficiente de determinação;

R: coeficiente de correlação linear ou índice de correlação de Pearson;

$P_i$ : i-ésima leitura do sensor em bytes e i-ésima unidade volumétrica predita -  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ;

$O_i$ : i-ésima unidade volumétrica calculada -  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ;

n :número de observações;

$\bar{P}$ : média das leituras do sensor em bytes e média das unidades volumétricas estimadas pelo modelo –  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ;

$\bar{O}$ : média das unidades volumétrica calculada -  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ;

A classificação dos valores da correlação de Pearson é mostrada na Tabela 1 dado por Cunha et al. (2013).

**Tabela 1. Classificação dos valores do índice de correlação de Pearson (R).**

Índice de correlação (R)	Classificação
0,0 a 0,1	Muito baixo
0,1 a 0,3	Baixa
0,3 a 0,5	Moderada
0,5 a 0,7	Alta
0,7 a 0,9	Muito alta
0,9 a 1,0	Quase perfeito

(Fonte: CUNHA et al., 2013)

### 3.4. Índices de desempenho

Ao correlacionar os valores estimados com os valores medidos usando regressão, também foram considerados índices de desempenho linear, exatidão entre os coeficientes de Willmott (d), confiança (c), estimativa de desvio padrão (RMSE) e o erro absoluto médio (MAE).

A precisão relacionada ao distanciamento dos valores estimados no registro pelo sensor em relação à umidade volumétrica da maneira observada pelo padrão de estufa. O índice de concordância é dado pela Equação 6 de WILLMOTT et al. (1981). Os valores variam de 0 para sem concordância e a 1 para concordância ideal.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (6)$$

Em que:

d: índice de concordância de Willomott;

O<sub>i</sub>: umidade volumétrica calculada – cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>;

P<sub>i</sub>: umidade volumétrica estimada pelo método – cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>;

$\bar{O}$ : média da umidade volumétrica calculada – cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>;

n: número de observação;

O índice de confiança ou desempenho dado por Camargo e Sentelhas (1997), é apresentado na Equação 7 e a classificação é dado na tabela 2.

$$c = R * d \quad (7)$$

Em que:

c: índice de confiança ou índice de desempenho;

R: correlação Pearson;

d: índice de concordância de Willmott;

**Tabela 2. Critérios de interpretação de desempenho (c).**

Índice de desempenho (c)	Classificação
> 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,5	Mau
< 0,40	Péssimo

(CAMARGO &amp; SENTELHAS, 1997)

O RMSE calcula a estimativa do desvio padrão do componente aleatório nos dados, e o melhor ajuste é quando o valor estiver próximo a zero (Equação 8).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - p_i)^2}{n}} \quad (8)$$

Em que:

RMSE: Raiz do Erro Quadrático Médio –  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ;

O<sub>i</sub>: Umidade volumétrica calculada -  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ;

P<sub>i</sub>: Umidade volumétrica estimada pelo modelo -  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ;

n: número de observações;

A classificação dos dados de raiz do erro quadrático médio (RMSE), que é mostrado na Tabela 3, que foi proposto por Fares et al. (2011).

**Tabela3. Classificação da exatidão dos sensores de umidade do solo conforme à raiz quadrático médio (RMSE).**

RMSE( cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	Classificação
RMSE ≥ 0,1	Muito pobre
0,1 > RMSE ≥ 0,05	Pobre
0,05 > RMSE ≥ 0,01	Justa
RMSE < 0,01	boa

(Fonte: FARES et al.,2011)

O erro absoluto médio (MAE) é calculado através dos valores reais e as predições dada pela Equação 9.

$$MAE = \sum_{i=1}^N \frac{|O_i - P_i|}{n} \quad (9)$$

Em que:

MAE: erro médio absoluto – cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>;

### 3.5. Análise de variância e teste f

O teste de F visa comparar a estimativas de variância, dados pelos quadrados médios (Q.M.) para cada variação. Os quadrados médios da regressão são diferentes em cada amostra, de acordo com diferentes texturas e o Q.M. do resíduo que é devido a fatores incontrolados. Para fazer o cálculo do coeficiente F pela Equação 14, primeiro foi feito cálculo da soma dos quadrados da regressão e dos resíduos Equações 10 e 11 e o quadrados médios de ambas Equações 12 e 13.

$$S.Q. regressão = \frac{\sum_{i=1}^n P_i O_i + n \bar{P} \bar{O}}{(\sum_{i=1}^n P_i^2 - n \bar{P}^2)} \quad (10)$$

Em que:

S.Q. regressão: soma dos quadrados da regressão;

$p_i$ : i-ésima unidade volumétrica calculada –  $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ;

$O_i$ : i-ésima leituras do sensor em bytes;

n: número de observações;

$\bar{P}$ : média das leituras do sensor em bytes;

$\bar{O}$ : média das unidades volumétricas calculadas -  $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ;

$$S.Q.residuo = \left( \sum O^2 - \frac{(\sum O^2)^2}{n} \right) - S.Q.regressão \quad (11)$$

Em que:

S.Q. resíduo: soma dos quadrados do resíduo;

S.Q. regressão: Soma dos quadrados da regressão;

$O_i$ : i-ésima leituras do sensor em bytes;

$\bar{O}$ : média das unidades volumétricas calculadas -  $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ;

$$Q.M.regressão = \frac{S.Q.regressão}{GL regressão} \quad (12)$$

Em que:

S.Q. regressão: soma dos quadrados da regressão;

G.L regressão: grau de liberdade da regressão\*;

\*regressão linear: K=1

$$Q.M.residuo = \frac{S.Q.residuo}{GL residuo} \quad (13)$$

Em que:

S.Q. resíduo: soma dos quadrados do resíduo;

G.L resíduo: grau de liberdade do resíduo \*;

\*G.L.= n – k -1=8-1-1=6

$$F = \frac{QM_{regressão}}{QM_{resíduo}} \quad (14)$$

Em que:

F: teste F;



#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os solos avaliados com ajuda da análise física, foram classificados quanto às frações granulométrica como tipo 1 e 3. O tipo 1 foi avaliado em três amostra de acordo com a diferentes frações, que se distingue entre si como: tipo 1-a maior porcentagem de areia; tipo 1 -b porcentagem de areia médio; e tipo 1- c maior porcentagem de silte.

Os valores de densidade, proporção granulométrica e umidade na saturação cada solos que foi avaliado está sendo mostrado na Tabela 4. Foi levado em consideração para a classificação da textura dos solos a porcentagens de areia, argila e silte. A subdivisão caracterizou as texturas dos solos como muito arenosa o solo tipo 1 -a, arenoso médio tipo 1 - b, c e muito argiloso tipo 3.

**Tabela 4. Análise física dos solos.**

Solos	Ds (g cm <sup>-3</sup> )	Areia	Argila (%)	Silte	Classe Textura	Umidade na saturação (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )
<b>Tipo 1 (a)</b>	1,30	94,8	4,8	0,4	Areia	0,37
<b>Tipo 1 (b)</b>	1,40	87,9	11,3	0,8	Areia franca	0,55
<b>Tipo 1 (c)</b>	1,16	80,6	10,2	9,2	Areia franca	0,46
<b>Tipo 3</b>	1,07	10,9	70,9	18,2	Muito argilosa	0,68

\*Ds = Densidade do solo.

Os dados apresentados na tabela 4 mostra que os valores máximos de umidade para cada solo dependem da quantidade de argila em cada um deles. A determinação do teor de argila e água retida foi a seguinte: textura muito argilosa: solo tipo 3 (0,7090 g g<sup>-1</sup>; 0,68 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>), textura areia franca: solo tio 1(b) (0,1130 g g<sup>-1</sup>; 0,55 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>), textura areia franca: solo tipo 1(c) (0,1020 g g<sup>-1</sup>; 0,46 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>) e textura muito arenosa: solo tipo 1 (a) (0,0408 g g<sup>-1</sup>; 0,37 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>).

O solo tipo 3 apresentou características superiores ao demais solos na saturação até redução de umidade. Segundo Hillel (1998), isso se deve pois os solos arenosos possuem grande quantidade de macro poros, diferente dos solos com maior teor de argila que tem um maior

equilíbrio entre macro e micro poros, com que faz ter uma quantidade considerável de água adsorvida e com isso tenta uma diminuição progressiva da umidade no solo.

Os dados apresentados sobre a densidade do solo na tabela, mostra que o solo com a menor densidade foi o solo argiloso ( $1,07 \text{ g cm}^{-3}$ ), mais com a maior umidade na saturação ( $0,68 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ). Já os solos arenosos solo tipo 1 (b) é o que teve uma densidade maior ( $1,40 \text{ g cm}^{-3}$ ), mais a maior umidade na saturação ( $0,46 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) ficou para o solo tipo 1 (c).

A tabela 5 foi mostra as análises química do solo com os teores de matéria orgânica (M.O) e o de carbono orgânico (C.O).

**Tabela 5. Análise química dos teores de matéria orgânica e carbono orgânico.**

Solo	M.O ( $\text{g dm}^{-3}$ )	C.O ( $\text{g dm}^{-3}$ )	Classificação
<b>Tipo 1 (a)</b>	10,93	6,34	Baixo
<b>Tipo 1 (b)</b>	12,46	7,37	Baixo
<b>Tipo 1 (c)</b>	16,37	9,5	Médio
<b>Tipo 3</b>	25,07	14,54	Alto

\*M.O = Matéria orgânica;

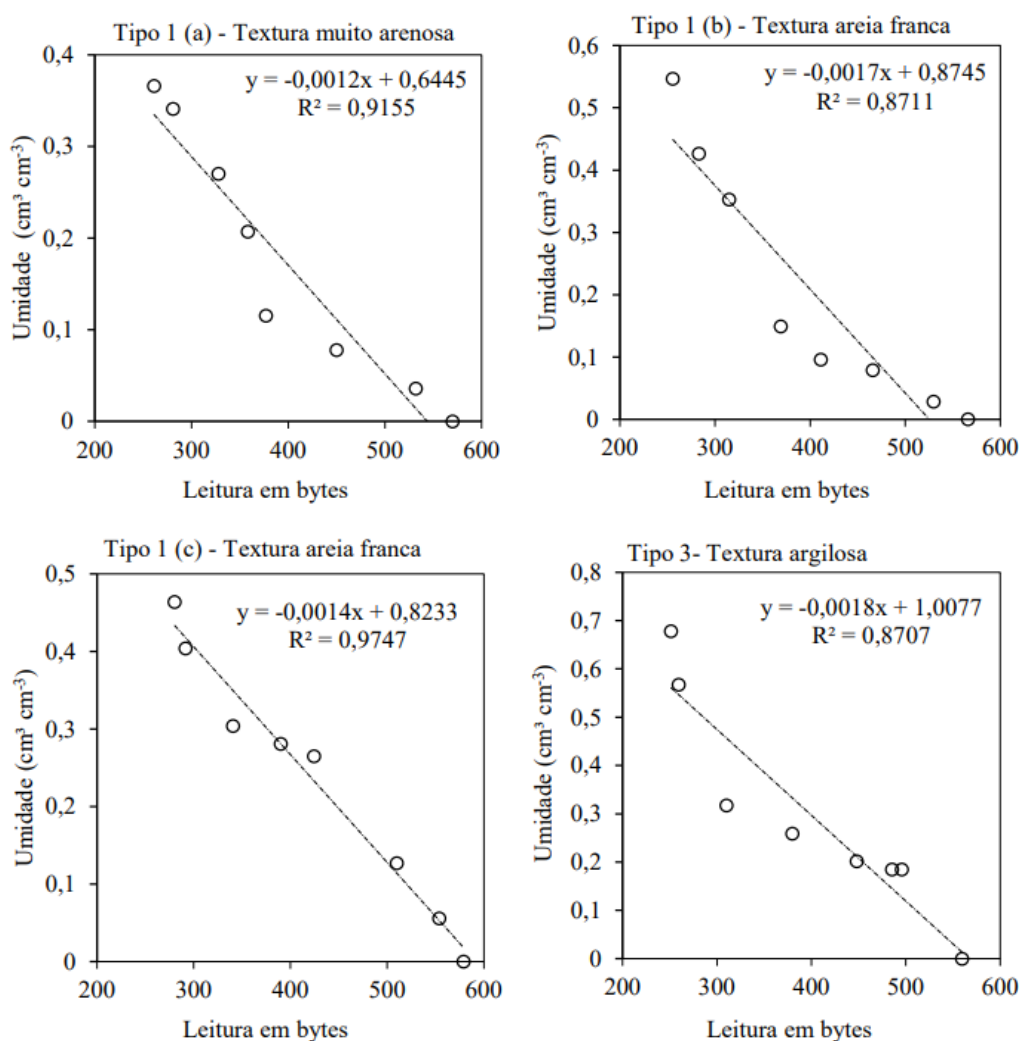
\*C.O = Carbono orgânico;

A relação entre a matéria orgânica e o carbono orgânico tem um fator de 1,72 (M.O/C.O).A matéria orgânica traz vários efeitos benéficos nos sistemas agrícolas como a estimulação da microbiota, condicionamento físico, controle térmico e melhor retenção de água ( UNGERA et al.,1991; CONCEIÇÃO et al.,2005;BOULAL et al.,2011).Também sabe que a manutenção do carbono orgânico é essencial para sustentabilidade da agricultura, pois aumenta a produtividade da cultura na eficiência de utilização dos nutrientes.(LAL,2004; MALHI et al.,2011; PAUL et al., 2013).

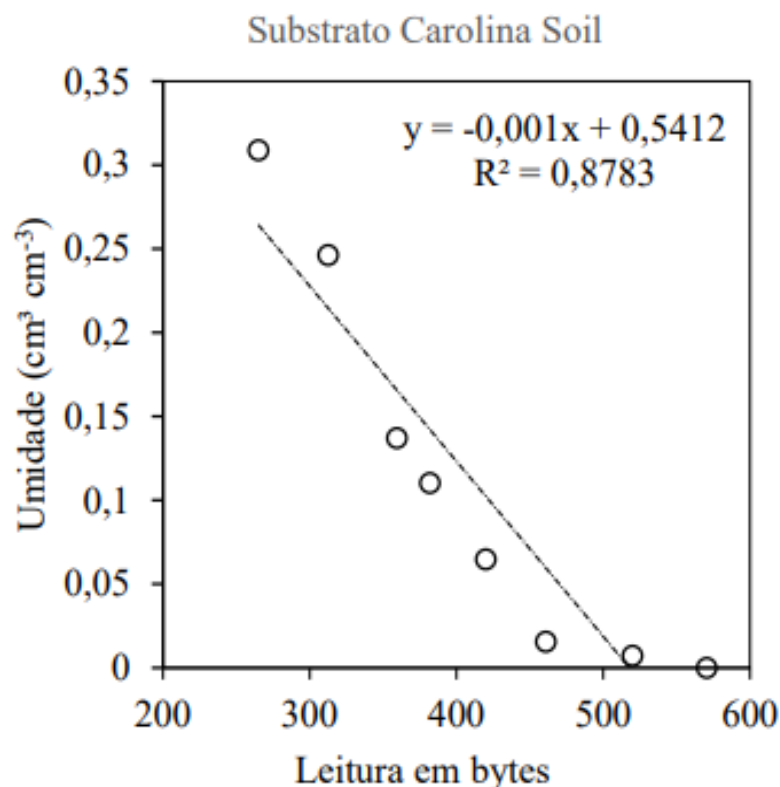
Relacionando a tabela 4 e 5 pode se observa que o solo que tem o maior conteúdo de matéria orgânica é o tem menor concentração de areia tipo 3 ( $0,109 \text{ g g}^{-1}$ ). E pode também perceber tipo 3 ( $25,07 \text{ g dm}^{-3}$ ;  $0,68 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) de solo, é que a matéria orgânica quantidade

matéria orgânica ajuda a reter mais, pois o solo tipo 1a ( $10,93 \text{ g dm}^{-3}$ ;  $0,37 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) tinha a menor quantidade de matéria orgânica e reteve a menor quantidade.

A (figura 4 e 5) são a correlação entre as medias do conteúdo volumétrico e as leituras do sensor em bytes, para obter as equações de calibração. Os pontos utilizados para gerar a equação de 8 pontos do valor médio das cinco repetição de cada amostra de solo, e a mesma dos valores registrado no sensor.



**Figura 4.** Relação entre umidade calculada e a leitura do sensor.



**Figura 5.** Relação entre umidade calculada e a leitura do sensor para substrato.

As amostras usadas no experimento tenderam a subestimar a umidade nos pontos extremos, na saturação e em conteúdo de água próxima à saturação ,e em conteúdo próximo a menor umidade.

As umidades subestimadas no solo tipo 1 (a) e (b) foram nos primeiros pontos entre os  $0,0 - 0,04$  e  $0,0 - 0,04 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , e nos dois últimos entre  $0,27 - 0,37$  e  $0,35 - 0,55 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ . O solo tipo 1(c) foi que subestimo mais pontos no total foram cinco, as faixas compreendida entre  $0,06 - 0,46 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ .O substrato ocorreu entre  $0,0 - 0,007$  e  $0,25 - 0,31 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ . A variação de resíduos para solo tipo 1 (a) de  $-0,07$  e  $0,04 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , tipo 1 (b)  $-0,09$  e  $0,10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , tipo 1 (c)  $-0,04$  e  $0,04 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , tipo 3  $-0,13$  e  $0,12 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  e o substrato  $-0,06$  e  $0,03 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ .

Os valores obtidos tem uma diferença considerada em relação aos valores obtidos por Santos Neto (2015), a onde os valores subestimados de solo arenoso são de 20%, em solos siltosos 4%, e de 34% argilosa, levando em conta o ajuste quadrático.

Na tabela 6 mostra o teste de significância, que tem objetivo apresentar o grau de confiança do modelo do estudo deste trabalho.

**Tabela 6. Teste de significância do modelo para os solos tipo 1 (a), (b), (c), (3) e substrato Carolina Soil®, nas condições de laboratório - UFGD / FCA 2023.**

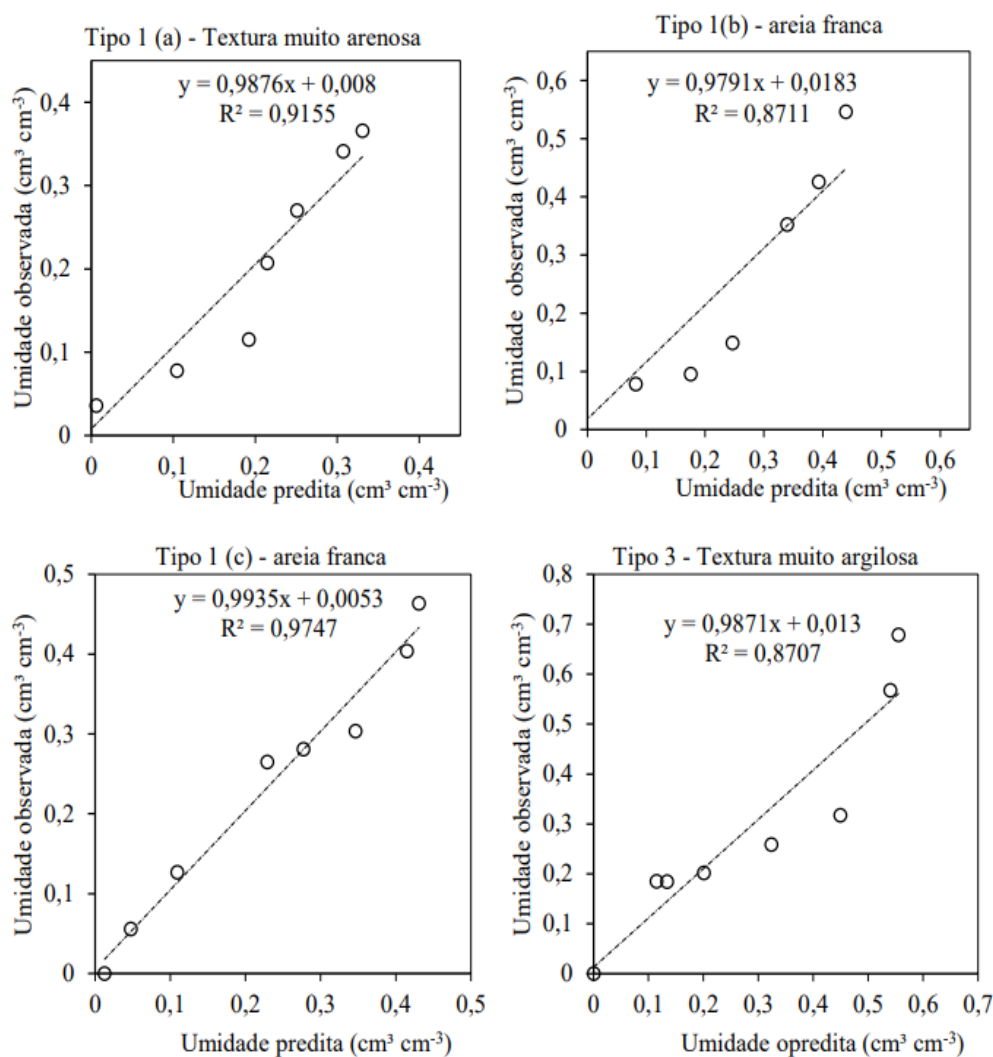
Classificação		QM	F	F de significação
Tipo 1 (a)	Regressão	0,12559	64,9692 (P<0,01)	1,95148 x 10 <sup>-4</sup>
	Resíduo	0,00193		
Tipo 1 (b)	Regressão	0,25383	40,5604 (P<0,01)	7,0396 x 10 <sup>-4</sup>
	Resíduo	0,00626		
Tipo 1 (c)	Regressão	0,18288	231,4160 (P<0,01)	5,09253 x 10 <sup>-6</sup>
	Resíduo	0,00079		
Tipo 3	Regressão	0,29853	40,3972 (P<0,01)	7,1184 x 10 <sup>-4</sup>
	Resíduo	0,00739		
Substrato	Regressão	0,08122	43,29874 (P<0,01)	5,91138 x 10 <sup>-4</sup>
	Resíduo	0,00188		

\* QM = Quadrado médio;

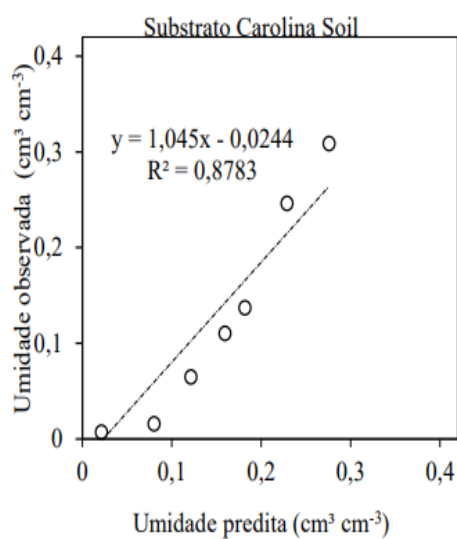
\*F = Teste F;

Com os cálculos de análise de variância a regressão linear foi aceita altamente significativa ( $p<0,01$ ), para todas as amostras, autenticar que é possível considerar a relação entre umidade no laboratório e as leituras do sensor. A 1% nível de significância do teste que pode dizer que a uma única possibilidade que não haja relação entre a umidade do laboratório e a leitura dos sensores. No F significação um solo de classificação tipo 1 (c), teve a ordem 10<sup>-6</sup> e outro solos do teste e substrato tiveram 10<sup>-4</sup> que é inferior ao alfa (0,01).

Os valores apresentados na tabela 7, que se associa com a metodologia de calibração dos sensores. Diante disso as variáveis apresentadas na figura 14 e 15 refere aos valores de umidade obtida pelo sinal do sensor.



**Figura 6.** Relação entre umidade observada e umidade predita.



**Figura 7.** Relação entre umidade observada e umidade predita para substrato

As leituras que os seroes fizeram em solo estava seco ou com pouca umidade geraram valores de umidades negativos, por isso não aparecem nas figuras 6 e 7. Esses valores correspondem ao primeiro ponto do solo de textura arenoso tipo 1 (a) (solo seco), aos dois primeiros do solo de textura areia franca tipo 1 (b) (solo seco) e em  $(0,028 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3})$ , e ao primeiro ponto para substrato (solo seco), já para os solos tipo 1(c) de textura areia franca e tipo 3 de textura muito arenosa isso não ocorre.

Considerando esse contexto, a quantidade de pontos nas figuras 6 e 7 situados entre a condição de solo seco e saturado, não coincidência com as figuras 4 e 5. No entanto, os indicadores estatísticos apresentados na tabela 7 levam em conta o módulo ou quadrado do resíduo, o que faz com que esses valores não interfiram nos resultados.

**Tabela7. Índice estatísticos para o sensor capacitivos Hw-390 modelo v2.0.**

Amostra	R	d	c	RMSE ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ )	MAE( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ )
Tipo1 (a)	0,957	0,997	0,9540	0,0386	0,0336
Tipo 1 (b)	0,933	0,993	0,927	0,0700	0,0596
Tipo 1 (c)	0,987	0,999	0,987	0,0247	0,0205
Tipo 3	0,933	0,996	0,93	0,0751	0,0587
Substrato	0,937	0,9950	0,933	0,0421	0,0385

R = coeficiente angular;

c= índice de concordância;

MAE= erro médio absoluto;

d= índice de concordância de Willmott;

RMSE= raiz do erro quadrático médio;

Os valores encontrados de coeficientes angular e linear, através dos cálculos no modelo gerado pela calibração dos sensores na proporção 1:1, explica a tendência em superestimar ou subestimar os valores de umidade previsto. Todas as amostras de solo mostraram valores menor que 1, isso tem de se caracterizar uma maior propensão a umidade subestimadas, analisando o modelo  $y = ax + b$ , em  $x=0$ . Já o substrato apresentou valor superior a 1, isso tende a propensão a ter valores de umidades superestimadas. Isso significa ausência de umidade baseado na umidade prevista pela calibração do sensor ( $x=0$ ), pelo método padrão, nos valores de coeficiente linear tem valores do solo tipo 1(a) de  $0,0080 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , tipo (b)  $0,0183 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , tipo (c)  $0,0053 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , tipo (3)  $0,0130 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  e o substrato –  $0,0244 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ . A

média dos resíduos comprova a hipótese de que apresentaram a se subestimar a umidade em solos tipos 1(a) com 0,06%, tipo 1(b) 1,4%, tipo 1(c) 0,04%, e o tipo 3 com 0,09%. O substrato se propensa a superestimar a umidade, com uma média em 1,9%.

O grau de dependência linear foi medido pelo o índice de correlação (R) entre as variáveis de conteúdo volumétrico e os valores em bytes do sensor. Hill (1998) diz que o valor desejado para grau de dependência seja maior que 0,9. Mais os valores apresentados na tabela 7 fica melhor classificado dada a forma que Cunha et.al (2013), que apresenta que é a correlação quase que perfeita seja  $0,9 \leq R \leq 1$  para todas as amostras e também válida para uma precisão dos resultados. Essa mesma classificação aconteceu para Feres et al. (2011) que obteve para três sondas capacitivas, e com solos com diferentes composições de argila, areia e silte.

Na Tabela 7 mostramos os valores determinados para os coeficientes de determinação ( $r^2$ ), aonde as amostras apresentaram variação entre 0,8707 e 0,9747, que foram considerados grau alto de ajuste para todas as amostras. O solo que exibiu o maior grau de elevação foi o com textura arenosa, especificamente o tipo (c) areia franca (0,9747). Payero et.al (2017) apresentou resultados  $R^2$  0,98 para sensor EC-5, com uma textura de areia franca. Na análise que Sena et. al (2020) a textura argila teve os menores valores de coeficientes 0,89 e 0,81 nas camadas 0,0-0,10 e 0,10-0,30. E segundo os autores os coeficientes de correlação variaram para os solos de textura arenosa entre 0,98 e 0,97 e para textura argilo arenoso 0,98 e 0,93, com profundidades iguais. Já Pizetta (2015) em relação o sensor Eletordex e Grove não teve resultados positivos, tendo coeficientes de determinação para argissolo vermelho distrófico variando entre 0,669 e 0,648, latossolo vermelho distrófico 0,725 e 0,116 e o nitossolo vermelho eutrófico 0,480 e 0,718.

Outros valores que encontra na Tabela 7 são o índice de concordância (d), os valores encontrados foram superiores a 0,9934, para solos e o substrato. Os coeficientes de confiança (c) foi classificado como ótimo ( $c > 0,85$ ) também para todos solos e o substrato.

Os valores RMSE que são as raízes quadradas do erro médio que estão demonstrado na tabela 7, apresentaram erro produzido pelo modelo, indicando um afastamento entre os valores de umidade volumétrica conseguida pelo o método de estufa e as estimativas da variável independente conduzida pela curva de calibração. Esse índice não teve um desempenho bom entre as amostras. Os solos tipo (a), (c) e o substrato tiveram acurácia justa ( $0,05 > RMSE \geq 0,01$ ), já os solos tipo 1 (b) e tipo 3 mostraram acurácia pobre ( $0,1 > RMSE \geq 0,05$ ). As amostras que tem a maior retenção de umidade saturada foram as que apresentaram a menor acurácia, isso é uma resposta de erros isolados de grande proporção, isso acaba tendo uma adição significativa, acontecendo em pontos em que o resíduo é subestimado ou superestimado



superior a  $10^{-1} \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ . Esta característica foram percebida no solo argiloso teve uma predição da umidade na saturação é subestimada em  $0,1232 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  e já no terceiro ponto início o processo de drenagem do excesso, com uma predição  $0,1322 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  de superestimou.

O erro absoluto médio (MAE) é o valor absoluto entre a diferença entre os valores observados e previsto, que estão presentes na tabela 7, tiveram próximos aos valores do RMSE, pode-se considerar erros uniformes.

As avaliações feita apresentaram índice estatísticos melhor desempenho para solos de textura arenosa na seguinte ordem, solo tipo 1 (c), (a), (b), e em seguida para solo com textura muito argila, tipo 3. Já o substrato Carolina ® teve um bom desempenho em todos índices avaliados.

## 5. CONCLUSÃO

Com tudo pode afirmar que o modelo linear é satisfatório a umidade atual dos solos e a do substrato Carolina Soil®, correspondendo uma correlação muito satisfatória de ( $R > 0,93$ ).

Com isso a calibração dos sensores capacitivos tendendo uma ótima performance e tendo uma concordância acima de 0,99, com desempenho de ( $c > 0,85$ ) e satisfatória acurácia ( $0,0751 \text{ cm}^3 > \text{RMSE} \geq 0,0247 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), isso em todas as amostras.

As equações de calibração não tiveram variações grosseiras entre os solos, com pouca dispersão de valores nos solos de estrutura arenosa e uma maior dispersão entre os argilosos, isso levando em conta a diferença de umidade entre solos de estruturas distintas.

Com isso o sensor capacitivo teve uma confiabilidade de 99%, tendo essas condições de quantidade adequada de água e o substrato ideal no solo é possível concluir, que com o manejo correto se pode ter o emprego na agricultura irrigada.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CARVALHO, E. S.; ARAUJO, L. A. O. **Irrigação inteligente**. Anuário da Produção de Iniciação Científica Discente. Vol. 13, N. 17, Ano 2010 - p. 323-336.
- CUNHA,P.C.R.;NACIMENTO,J.L.;SILVEIRA,P.M.;ALVES JÚNIOR,J.  
**Eficiência de métodos para o cálculo de coeficientes do tanque classe A na estimativa da evapotranspiração de referência**. Pesquisa Agropecuária Tropical, Goiânia, v.43, n. 2, p. 114-122, 2013.
- CRUZ, E. S.; AMBROZIM, C. S.; SOUZA, W.L.; PINTO, M. F.; CARVALHO, D.F.  
**Armazenador digital de dados de baixo custo para monitoramento de umidade em substrato isento de solo**. 2018.
- COSTA,E.M.;SILVA,H.F.;RIBEIRO,P.R.A. **Matéria orgânica do solo e o seu papel na manutenção produtiva dos sistemas agrícola**. Centro científico conhecer, Goiânia, v.9, n.17, p.1842, 2013.
- DORNELES, J. G. L.; RUIVARO, C. Proposta de procedimento para calibração de sensores de umidade ECH2 para o manejo de irrigação. Vivências: Revista Eletrônica de Extensão URI. ISSN: 1809-1636. 2012.
- FARES,A.; ABBAS,F.;MARIA,D.;MAIR,A. **Improved Calibration Functions of Three Capacitance Probes for the Measurement of Soil Moisture in Tropical Soils**. Sensors 2011,11,4858-4874.
- FREDERICO,C.A.; **Projeto de equipamento de monitoramento de umidade do solo comunicação LoRa**. Trabalho de conclusão de curso de graduação em engenharia elétrica, Santa cararina,2022.
- KLEIN, V. A.; BASEGGIO, M.; MADALOSSO, T.; MARCOLIN, C. D. **Textura do solo e a estimativa do teor de água no ponto de murcha permanente com psicrômetro**. Ciência Rural, v.40, n.7, jul, 2010. Ciência Rural, Santa Maria, v.40, n.7, p.1550-1556, jul, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782010005000110>. Acesso em: 18 jun. 2019.
- LAMPARELLI, R. A. C. **Agricultura de Precisão**. Ageitec - Agência Embrapa de Informação Tecnológica
- MUÑOZ-CARPENA, R. **Field Devices For Monitoring Soil Water Content**. Agricultural and Biological Engineering Department, University of Florida.
- PIMENTEL, C. **A relação da planta com a água**. Depto. de Fitotecnia - Instituto de Agronomia Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Seropédica, RJ: Edur, 2004. 12 p., 48 p. e 49 p.

- PIZETTA, S. C. **Calibração de sensores de capacitância (FDR) para estimativa da umidade em diferentes solos**. Tese (Mestrado em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas). Universidade Federal da Lavras, Lavras - MG. 2015.
- PIZETTA, S. C.; RODRIGUES, R. R.; PEREIRA, G. M.; PACHECO, F. E. D.; VIOLA, M. R.; LIMA, L. A. **Calibração de um sensor capacitivo para estimativa da umidade em três classes de solo**. *Irriga*, v.22 n.3. 2017.
- SARAIVA, J. L. R.; QUEIROZ, D. dos S.; LESSA, S. L.; RODRIGUES, A. A.; QUEIROZ, T. R. G.; TEIXEIRA, A. dos. S.; **A importância da utilização de sensores de umidade do solo para a eficiência da irrigação na agricultura de precisão**. *Rev. Encontros Universitários da UFC*. v. 3. Universidade Federal do Ceará. 2018.
- ROCHA, F. B.; SILVA, R. S.; AVELINO, A. M.; COSTA, C. M. **Plataforma de comunicação sem fio aplicada a sistemas de irrigação**. *HOLOS*, [S.l.], v. 5, p. 269- 282, out. 2014. ISSN 1807-1600.
- SENA, C. C. R.; JUNIOR, J. A.; Domingos, M. V. H. **Calibração do sensor capacitivo de umidade do solo EC-5 em resposta a granulometria do solo**. *Brazilian journal of development*, Curitiba, v.6, n.4, p.17228-17240, 2020.
- SILVA, S. M.; PESSOA, J. G.; SOUZA, C. F. **Calibração de sensores capacitivos para a estimativa da umidade do solo**. *Revista ciência, tecnologia e ambiente*, vol. 12, 2022.
- SILVA, J. A. G.; LAMEIRA, B. C.; RIBEIRO, D.; VIEIRA, R. **Calibração de sensores de umidade em substrato de casca de pinus utilizando Arduino**. XLVIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2019.
- SIMÕES, M.; SOLER, L. S.; PY, H. **Tecnologias a serviço da sustentabilidade e da agricultura**. *Boletim informativo da sbcs* | mai - ago 2017. 53 p.
- SOUZA, A. M.; OLIVEIRA, T. T.; RODRIGUES, A. A. **Desenvolvimento de um medidor portátil de frequência de sensores capacitivos de umidade para monitoramento de sistema de irrigação**. Conbea; Campo grande – 2014.
- VIEIRA, E. L.; SOUZA, G. S. de.; SANTOS, A. R. dos.; SILVA, J. dos S. **Manual de fisiologia vegetal**. São Luis: EDUFMA, 2010, 230 p.
- TESTEZLAF, R. **Irrigação: métodos, sistemas e aplicações**. Faculdade de Engenharia Agrícola. Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP. 2017.