

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA GOIANO - CAMPUS CERES
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM IRRIGAÇÃO NO CERRADO

ANÁLISE DA HIDRODINÂMICA COM SENSORES CAPACITIVO E RESISTIVO DE
ARDUINO EM SOLO DO CERRADO

Autor: Murilo de Moura e Silva

Orientador: Prof. Dr. Antônio Evami C. Sousa

Coorientador: Prof. Dr. Roriz Luciano Machado.

CERES – GO
Fevereiro – 2021

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA GOIANO - CAMPUS CERES
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM IRRIGAÇÃO NO CERRADO

ANÁLISE DA HIDRODINÂMICA COM SENSORES CAPACITIVO E RESISTIVO DE
ARDUINO EM SOLO DO CERRADO

Dissertação apresentada, como parte das exigências para obtenção do título de MESTRE EM IRRIGAÇÃO NO CERRADO, ao Programa de Pós-Graduação em Irrigação no Cerrado do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Ceres - Área de concentração: Tecnologias de Irrigação.

CERES – GO
Fevereiro – 2021



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

Formulário 291/2021 - GE-CE/DE-CE/CMPCE/IFGOIANO

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO - CAMPUS CERES
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM IRRIGAÇÃO NO CERRADO

**ANÁLISE HIDRODINÂMICA COM SENSORES CAPACITIVO E RESISTIVO DE
ARDUINO EM SOLO DO CERRADO**

Autor: Murilo de Moura e Silva
Orientador: Dr. Antonio Evami C. Sousa
Coorientador: Dr. Roriz Luciano Machado

TITULAÇÃO: Mestre em Irrigação no Cerrado - Área de Concentração:
Irrigação

APROVADO em: 26 de Fevereiro de 2021.

Prof. Dr. Antonio Evami Cavalcante Sousa - *Orientador* - IF Goiano - Campus Ceres

Prof. Dr. Roriz Luciano Machado - *Avaliador interno* - IF Goiano - Campus Ceres

Prof. Dr. Frederico Antonio Loureiro Soares - *Avaliador externo* - IF Goiano -
Campus Rio Verde

Prof. Dr. Vitor Marques Vidal- *Avaliador externo* - V&V Comércio de alimentos LTDA

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano

SM977a SILVA, MURILO
ANÁLISE DA HIDRODINÂMICA COM SENSORES CAPACITIVO
E RESISTIVO DE ARDUINO EM SOLO DO CERRADO / MURILO
SILVA; orientador ANTONIO EVAMI CAVALCANTE SOUSA; co-
orientador RORIZ LUCIANO MACHADO. -- Ceres, 2020.
47 p.

Dissertação (Mestrado em IRRIGAÇÃO NO CERRADO) --
Instituto Federal Goiano, Campus Ceres, 2020.

1. Arduino. 2. automação. 3. dessorção. 4.
calibração. 5. drenagem. I. EVAMI CAVALCANTE SOUSA,
ANTONIO, orient. II. LUCIANO MACHADO, RORIZ, co-
orient. III. Título.

Documento assinado eletronicamente por:

- **Vitor Marques Vidal, 2019102320140123 - Discente**, em 25/05/2021 09:50:58.
- **Frederico Antonio Loureiro Soares, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 17/05/2021 15:33:04.
- **Roriz Luciano Machado, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 12/05/2021 18:23:57.
- **Antonio Evami Cavalcante Sousa, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 12/05/2021 13:56:20.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 12/05/2021. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 267609

Código de Autenticação: 2c015b6ee1



INSTITUTO FEDERAL GOIANO

Campus Ceres

Rodovia GO-154, Km.03, Zona Rural, None, CERES / GO, CEP 76300-000

(62) 3307-7100

DEDICO

A meus pais, Vilmar Batista da Silva e Edjane Moura de Sá e Silva, pelo apoio, criação, pelos ensinamentos de ética, postura e perseverança, e por terem me mostrado o valor do estudo e do conhecimento.

OFEREÇO

À minha esposa Lorena Montalvão Nunes Mascarenhas,
pela compreensão, companheirismo e apoio nas horas difíceis.

À minha filha Liz Montalvão Moura, que nasceu no decorrer do curso e precisou, apesar de tão pequena, entender e compreender o tempo de dedicação a este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por me dar saúde, inteligência e disposição para chegar até aqui. Agradeço por permitir as conquistas e as bênçãos durante toda essa caminhada.

Agradeço também a meus pais Vilmar Batista da Silva e Edjane Moura de Sá e Silva que tanto contribuíram para minha formação de caráter e de perseverança e me ensinaram o valor do esforço e a importância do estudo.

Ao Instituto Federal Goiano – Campus Ceres e a todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Irrigação no Cerrado por todos esses anos de apoio.

Ao orientador, Prof. Dr. Antônio Evami, pelos ensinamentos, atenção, compreensão e amizade nesses anos de trabalho. Sempre prestativo e atencioso, contribuiu de maneira importante nessa caminhada.

Ao professor e coorientador, Dr. Roriz Luciano Machado, pelo conhecimento compartilhado e auxílio na condução dos trabalhos.

Aos membros da banca avaliadora, pelas sugestões e auxílio final.

Aos alunos do mestrado que tanto contribuíram para essa conquista, com companheirismo, auxílio e amizade.

Ao colega Flávio Henrique Ferreira Gomes, que tanto contribuiu com este trabalho, compartilhando experiências e conhecimento para seu melhoramento.

Ao Centro Universitário de Anápolis – Unievangelica – Campus Ceres, por conceder o acesso e a utilização do laboratório de solos, que foi de suma importância para a conclusão deste trabalho.

À minha esposa Lorena Montalvão Nunes Mascarenhas, que sempre esteve ao meu lado, dando suporte e aconselhando, sobretudo pela compreensão do tempo e dedicação exigidas pelo mestrado.

À minha filha Liz Montalvão Moura, que nasceu durante o mestrado e necessitou compreender as ausências e abdições necessárias para sua conclusão.

E a todos que contribuíram de forma direta ou indireta para a realização deste trabalho.

Gratidão a todos, muita luz, paz e amor!

BIOGRAFIA DO AUTOR

Murilo de Moura e Silva, filho de Vilmar Batista da Silva e Edjane Moura de Sá e Silva, nasceu em 17 de abril de 1992 em Ceres, Goiás.

Em 2010, iniciou o curso superior em Engenharia Civil pelo Centro Universitário de Anápolis – Unievangelica, tendo recebido em 2015 o título de Bacharel em Engenharia Civil. Em 2015, iniciou especialização em docência universitária na Faculdade Evangélica de Rubiataba, concluindo em 2016.

Em 2019, ingressou no curso de Mestrado em Irrigação no Cerrado, pelo Instituto Federal Goiano – Campus Ceres, Área de concentração: Tecnologia em Irrigação. Durante o curso de Mestrado, trabalhou na Empresa Centro Universitário de Anápolis – Unievangelica – Campus Ceres.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sensor de umidade de solo resistivo	18
Figura 2. Sensor de umidade de solo capacitivo	20
Figura 3. Arduino Mega 2560	21
Figura 4. Curva de retenção do solo.....	32
Figura 5. Curva de calibração do Sensor Resistivo.....	35
Figura 6. Curva de calibração do Sensor Capacitivo.	36
Figura 7. Curva da umidade gravimétrica em função do tempo	38
Figura 8. Curva da umidade gravimétrica em função do tempo da profundidade 0 a 10 centímetros	38
Figura 9. Curva da umidade gravimétrica em função do tempo da profundidade 10 a 20 centímetros	39
Figura 10. Curva da umidade gravimétrica em função do tempo da profundidade 20 a 30 centímetros	39

INDICES DE TABELAS

Tabela 1. Permissibilidade relativa de alguns constituintes do solo	19
Tabela 2. Análise química do solo da área experimental	32
Tabela 3. Análise textural do solo da área experimental	32
Tabela 4. Análise de variância do experimento	37
Tabela 5. Teste Tukey para o fator profundidade dentro de tempo	37

RESUMO

SILVA, MURILO MOURA. Instituto Federal Goiano - Campus Ceres – GO, fevereiro de 2021. **Análise da hidrodinâmica com sensores capacitivo e resistivo de arduino em solo do cerrado.** Orientador: Dr. Antônio Evami C. Sousa. Coorientador: Dr. Roriz Luciano Machado.

A utilização de sensores para a determinação do teor de água presente no solo é um processo que ganha espaço nos dias atuais, visto que, com a automação de sistemas de irrigação, tornou-se necessária a utilização de equipamentos eletrônicos para determinar de forma digital parâmetros indispensáveis para a tomada de decisão em relação ao manejo da irrigação. Nesse contexto, objetivou-se com este trabalho analisar a aplicação de dois tipos diferentes de sensores em solo do Cerrado. O experimento foi conduzido no município de Ceres – Goiás. O solo foi retirado de uma área em que estavam plantadas cultivares de capim elefante. Inicialmente foi feita uma calibragem nos dados dos sensores e encontrada sua equação da curva de tendência. O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com parcelas subdivididas de 2x3, e quatro repetições. As parcelas corresponderam ao tratamentos sensores capacitivos e sensores restritivos e as subparcelas, às três profundidades. Foram empregados sensores capacitivos e sensores resistivos, aplicados a profundidades de 0 a 10, de 10 a 20 e de 20 a 30 centímetros, com quatro repetições, totalizando 24 parcelas experimentais. Foram avaliados os teores de umidade do solo em 8 tempos diferentes após a amostra atingir a capacidade de campo. Para os resultados encontrados, foram feitas análises de variância pelo teste Tukey, e para os casos que apresentaram diferenças significativas, foram aplicadas análises de regressão para determinar a coerência nas tendências de variações. Foi constatado que os dois sensores mostraram estatisticamente serem opções confiáveis de medida de teor de umidade do solo, que o solo perde umidade de maneira diferente quando em profundidades variadas e que o sensor capacitivo se mostrou superior ao resistivo apenas no aspecto de durabilidade.

Palavras-chave: Arduino, automação, dessorção, calibração

ABSTRACT

SILVA, MURILO MOURA. Instituto Federal Goiano - Campus Ceres - GO, February 2021. Analysis of hydrodynamics with capacitive and resistive sensors in cerrado soil. Advisor: Dr. Antônio Evami C. Sousa. Co-advisor: Dr. Roriz Luciano Machado.

The use of sensors to determine the water content present in the soil is a process that gains space nowadays, with the automation of irrigation systems it became necessary to use electronic equipment to digitally determine parameters that are indispensable for making decision on irrigation management. In this context, the objective of this work was to analyze the application of two different types of sensors in cerrado soil. The experiment was carried out in the municipality of Ceres - Goiás. The soil was removed from an area where elephant grass cultivars were installed. Initially, a calibration was performed on the sensor data and the trend curve equation was found. The statistical design used was in randomized blocks in subdivided plots of 2x3 and in four blocks. Two types of treatments are considered, being the subplots, with three different depths being the plots and four repetitions. Capacitive sensors and resistive sensors were applied, applied at depths from 0 to 10, 10 to 20, and 20 to 30 centimeters, with four repetitions totaling 24 experimental plots. Soil moisture content was evaluated at 8 different times after the sample reached the field capacity. For the results found, analyzes of variance were performed by the tukey test, and for cases that showed significant differences, regression analyzes were applied to determine coherence in the trends of variations. It was found that the two sensors showed statistically to be reliable options for measuring soil moisture content, that the soil loses moisture differently when at varying depths and that the capacitive sensor was superior to the resistive only in terms of durability.

Keywords: Arduino, automation, desorption, calibration.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	12
2.	OBJETIVOS.....	14
2.1	Geral.....	14
2.2	Específicos.....	14
1.	REVISÃO DE LITERATURA.....	15
3.1	Solo.....	15
3.2	Métodos de determinação de umidade no solo.....	17
3.3	Plataforma arduino.....	20
3.4	Fluxo de água no solo.....	22
3.5	O processo de evaporação da água no solo.....	22
4	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	26
5	CAPÍTULO 1: CALIBRAGEM, COMPARAÇÃO E ANÁLISE DE DESSORÇÃO ..	29
5.1	Introdução.....	29
5.2	Material e métodos.....	31
5.2.1	Local.....	31
5.2.2	Delineamento estatístico.....	31
5.2.3	Clima e solo.....	31
5.2.4	Caracterização do equipamento.....	32
5.2.5	Preparação das amostras.....	33
5.2.6	Coleta de dados.....	34
5.2.7	Análise de dados.....	34
5.3	Resultados e discussões.....	35
5.4	Conclusão.....	40
5.5	Referências bibliográficas.....	42

1. INTRODUÇÃO

A irrigação é uma técnica utilizada para conseguir maior produtividade, sendo um instrumento que mais impacta a produção (Bernardo et al., 2008). Para que seja empregada de forma eficiente, é importante observar três aspectos básicos: como, quando e quanto irrigar. E a forma desse manejo pode variar de acordo com o tipo de cultura, solo e clima.

A escassez dos recursos hídricos é fator limitante, sendo um ponto de atenção mundial, já que o planeta atingiu a marca de 7 bilhões de habitantes. Esse número vem crescendo ainda mais, e a produção de alimento deve dobrar dentro de 39 anos para acompanhar este crescimento populacional (ONU, 2011).

O estresse hídrico é o principal fator limitante da produção vegetal. Mínimas reduções a interrupções da disponibilidade de água podem impactar negativamente no crescimento, desenvolvimento e, por consequência, na produtividade (Pizetta, 2015).

Utilizar racionalmente a água é um grande desafio da agricultura irrigada, visto que 69% do consumo de água do planeta é utilizado na irrigação (Siebert et al., 2010). Entretanto, para melhorar a produção agrícola, é necessário também cuidar da manutenção deste recurso, melhorando as técnicas de manejo para diminuir desperdícios. Desta forma, é importante ressaltar que o manejo deve ser uma técnica importante para a utilização dos recursos hídricos, minimizando desperdícios, otimizando a produção. Um programa eficiente de manejo significa incluir um sistema de monitoramento para que seja mensurável o momento certo de irrigar, incluindo aspectos relacionados a solo, clima, planta ou à associação entre eles (Bernardo et al., 2005).

Conhecer o teor de água no solo facilita e permite a elaboração eficiente de projetos de irrigação, pois, de posse dos dados acima mencionados, o manejo é feito somente quando necessário. Outro ponto importante é saber a característica detalhada das áreas dentro da propriedade, conhecendo assim quais têm mais facilidade ou dificuldade de armazenar água (Morais et al., 2015).

Existem vários métodos experimentais de estimativa do teor de umidade do solo. O método gravimétrico é amplamente utilizado para calibragem de outros métodos por medir diretamente a água contida na amostra, porém utiliza amostras destrutivas e deformadas, impossibilitando uma análise constante e variada na linha do tempo de um mesmo local.

Outras opções estão nos métodos baseados na constante dielétrica do solo úmido, que utiliza uma amostra, podendo ser deformada ou indeformada e não destrutiva (SANTOS, 2008)

O uso de sensores é bastante empregado por propiciar respostas rápidas e resultados coerentes (Morais et al., 2015). Os sensores utilizam de forma indireta dados de resistência ou capacitância elétrica, por exemplo, que variam de acordo com a característica atual do solo, mudando suas leituras de valores, permitindo determinar o teor de água existente. Por se tratar de uma determinação indireta, é imprescindível a realização de uma prévia calibragem para o solo em que o sensor irá ser instalado (Morais et al., 2015).

Tendo como base o exposto, o objetivo deste trabalho é calibrar, comparar e validar a utilização de dois tipos diferentes de sensores, obter a curva de calibração e verificá-la em ambos os equipamentos. O trabalho foi dividido em dois capítulos. O primeiro trata da calibragem dos sensores e o segundo, da verificação e da comparação da curva obtida na calibragem.

2. OBJETIVOS

2.1 Geral

Estudar, comparar e validar o uso de sistema medidor de umidade do solo com a plataforma arduino.

2.2 Específicos

- ✓ Obter curvas de calibragem de sensores capacitivo e resistivo de umidade do solo e compará-las;
- ✓ Validar a utilização dos sensores capacitivo e resistivo na obtenção de teor de umidade do solo;
- ✓ Comparar e verificar a melhor empregabilidade entre os sensores capacitivo e resistivo; e
- ✓ Estudar a hidrodinâmica no solo a partir de dados coletados por diferentes fontes.

1. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Solo

Denomina-se solo a camada superficial da superfície terrestre que foi desgastada e fragmentada com o passar do tempo. A atividade geológica contribui para a formação pela desintegração e decomposição de rochas oriundas de processos físico-químicos, juntamente com os mais diversos resíduos de plantas e de animais, que também foram sendo depositados.

O solo consiste em um conjunto polifásico, heterogêneo, particulado, disperso e poroso, que pode conter uma quantidade muito alta interfacial por volume. Este sistema é dividido em três fases: matriz, líquida e gasosa. A matriz também é chamada de fase sólida, pois é constituída pelas partículas sólidas que formam a composição da característica mineral juntamente com as partículas amorfas, sendo que a matéria orgânica contida na união dos grãos formam os agregados. A fase líquida também é conhecida como água do solo e ainda como solução do solo, e a fase gasosa consiste na atmosfera do solo (Hillel, 1980)

Libardi (1999) define o solo como um material natural, sólido e poroso, que abriga em seus poros variações de quantidade de vários eletrólitos e outros componentes imersos em solução aquosa ou em solução gasosa. A solução gasosa é composta principalmente por nitrogênio, oxigênio e vapor de água. Os sólidos porosos são constituídos principalmente por partículas minerais e substâncias orgânicas, sendo também chamados de matriz do solo, sólidos ou esqueletos. Conforme são selecionados, podem ser divididos em várias denominações principalmente de acordo com a quantidade de matéria orgânica e de acordo com a quantidade de água que ocupa seus espaços vazios.

Segundo Hillel (1980), a vegetação, o tempo e o manejo ditam a proporção das três fases descritas anteriormente, fato que caracteriza essas proporções como grandezas inconstantes e variáveis. Para o cálculo da água contida no solo, usa-se a premissa de que o solo seja um sólido com três dimensões, que, juntas, formam um volume, volume que, por sua vez, é formado por parte de volume dos sólidos e volume do espaço poroso. O espaço poroso é o volume que pode ser preenchido por água e/ou ar.

Segundo Libardi (1999), nos solos de estrutura rígida, o volume do espaço poroso é constante, sendo a variação do volume de água presente no espaço poroso inversamente proporcional ao volume de ar. A massa do solo, desde que não saturado, é a soma das massas do solo seco, do ar e da água, podendo ainda desconsiderar a massa de ar, ficando claro que podemos fazer uma relação direta entre o volume e a massa desses fatores.

A umidade contida no solo é um dos parâmetros fundamentais e básicos referentes a amostras, sendo, inicialmente expressada em relação à base de volume ou à massa (Libardi, 1999). A umidade utilizando a base da massa consiste na relação entre a massa do solo seco e a massa da água contida na amostra (U_g). Já a umidade utilizando a base do volume representa a relação entre o volume da água e o volume do solo presente na amostra (U_v), nesse caso, torna-se necessária a grandeza de densidade global do solo (Klar, 1988).

Existem, fundamentalmente, dois tipos de meios pelos quais o solo retém água, primeiramente, ocorre retenção nos microporos dos agregados, que pode ser exemplificada na forma de capilaridade. Porém não podemos afirmar que existem no solo tubos capilares, mas, sim, poros e canais formados pela composição e alocação dos poros, sendo esta composição formada pelos conceitos de adesão e coesão da água. O outro meio é definido pela retenção localizada na superfície dos sólidos, na camada exterior, sendo fundamentada pela adsorção (Libardi, 1999).

Essa superfície das partículas do solo se torna importante no quesito retenção de água, pois o aumento da superfície diminuindo o tamanho das partículas é diretamente ligado à capacidade de reter água, definindo as propriedades do solo (Reichardt, 1987).

Depois da caracterização do solo, é necessário analisar como ele se mostra na natureza. As profundidades se conectam de forma direta, mas estudar apenas uma camada não é o bastante, pois ela não reflete o comportamento de todas as camadas. Existe uma distinção entre as camadas de comportamento, já que o solo, em profundidade, dificilmente será uniforme constando de camadas sobrepostas de material mais ou menos distinto, chamadas de estratos (Hillel, 1980).

No quesito variabilidade espacial, de acordo com a abordagem, o solo pode ser considerado material homogêneo, e uma pequena área de poucos metros quadrados pode ser replicada em característica de centenas de hectares. Entretanto, devido aos diferentes usos, compactações, aplicações de correções, o solo é considerado com grande variabilidade espacial de forma real. O aspecto físico e químico pode ser alterado significativamente em um espaço curto de poucos metros (Chanzy et al., 1998).

3.2 Métodos de determinação de umidade no solo

A escolha do método de determinação de umidade é um ponto muito particular para cada caso. Entre todos os métodos conhecidos e aceitos, não é possível julgar o melhor ou o pior, pois o uso destes métodos está diretamente ligado à disponibilidade de alguns equipamentos necessários para usar cada método. Por conseguinte, os fatores que mais influenciam essa escolha, além da disponibilidade de equipamentos, são a precisão, as necessidades e algum outro fator operacional limitante. (Coelho, 2003)

Os métodos de determinação podem ser classificados em diretos e indiretos. Os diretos são os que usam diretamente da umidade, quantificando diretamente a água contida no solo, nesse caso, o principal é o gravimétrico. Os indiretos se baseiam em utilizar outras propriedades, podendo ser físicas ou químicas do solo, propriedades essas que são ligadas à quantidade de água contida no solo. Entretanto, nos métodos indiretos, é necessário fazer uma prévia calibragem para assegurar a qualidade na estimativa (Hillel, 1980; Libardi, 1999)

As variedades de possíveis métodos para estimar o conteúdo de água no solo podem ser verificadas na lista citada por Paltineanu & Starr (1997):

- Método gravimétrico;
- Método nuclear;
- Método eletromagnético;
- Método tensiométrico;
- Método higrométricos;
- Métodos de sensoriamento;
- Métodos óticos;

O método gravimétrico utiliza a técnica do forno secante, e é amplamente utilizado para medir a umidade contida no solo, e por se tratar de uma medida direta de umidade, este método é utilizado praticamente para calibragem de todas as outras técnicas. Nessa técnica, utiliza-se o peso da amostra úmida e seca para determinar o conteúdo da massa de água em relação à massa do solo seco. As desvantagens dessa técnica são a necessidade de equipamentos de laboratórios muito precisos, balança de precisão e estufa para secagem (Zazueta & Xin, 1994). Também é necessário um tempo de 24 horas para a secagem, e como é feito por amostras, esse método é destrutivo, dessa forma impossibilitando posteriormente a medida da umidade no mesmo ponto (Bernardo et al., 2005).

No método da dispersão de nêutrons, a unidade usada é relacionada ao volume. Sendo assim, são disparados nêutrons de fontes radioativas no solo e a velocidade desse disparo é

reduzida pelos átomos de hidrogênio localizados no meio. Partindo da premissa de que a maioria dos átomos de hidrogênio são os da água, essas grandezas ficam diretamente dependentes. Uma característica deste método é a possibilidade de quantificar grandes volumes de solo em diferentes profundidades. Mas este método tem uma desvantagem que praticamente o inviabiliza em grande parte dos casos por ser dependente de um equipamento extremamente caro. As diferenças significativas de leituras são medidas de 0,3 a 0,4 metros de distância em razão das variações de densidade do solo, causando erros de até 15% nas medidas (Roque, 2008).

De modo similar, o método de atenuação por raio gama usa radioatividade para determinar a proporção de água contida no solo. Parte-se do princípio de que a absorção dos raios gama está ligada à densidade global da matéria contida no meio, sendo assim, mudanças de densidade são medidas de modo que a presença de umidade altera a leitura, mostrando de forma indireta a quantidade de água contida na amostra (Zazueta & Xin, 1994).

Klar (1984) afirma que é possível também estimar a presença de água disponível no solo medindo a resistência elétrica, sendo os sensores resistivos utilizados de forma satisfatória em equipamentos de automação. Esse método utiliza a diferença de leitura causada pela alteração da resistência elétrica do solo entre dois eletrodos inseridos em qualquer matéria capaz de absorver água.

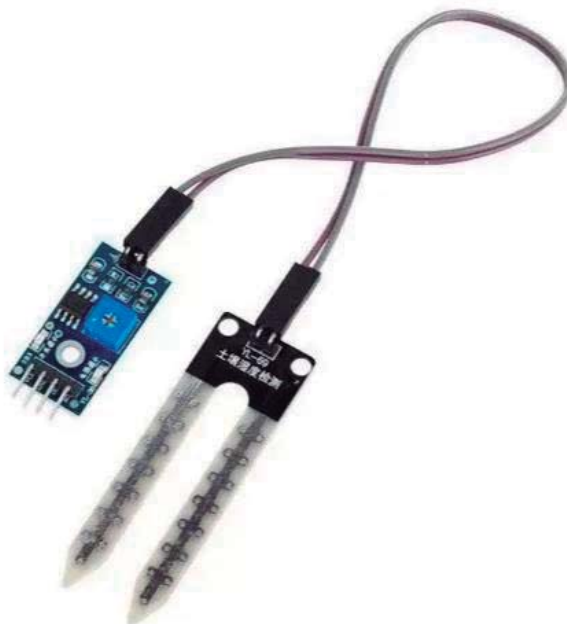


Figura 1. Sensor de umidade de solo resistivo

Fonte: <https://www.rs-online.com/> (2021)

Segundo Lima (1997), a resistência elétrica do solo sofre alterações consideráveis a partir de aspectos como textura e concentração de sais solúveis. O solo, como material não inerte, absorve em sua matriz parte de sais que também são absorvidos pelas plantas. Mas em alguns tipos de solos essas diferenças são pequenas de modo a possibilitar o uso de equações semelhantes para determinar o teor de umidade quando se tratar de solos franco-arenosos e areia.

O método da constante dielétrica é utilizado em sondas capacitivas, semelhante ao método nuclear, porém sem deixar resíduos radioativos nucleares (Baumhardt et al., 2000). Um dado material considerado homogêneo tem características físicas que moldam o comportamento dielétrico descrito pela sua permissividade ou permissividade relativa, sendo esse dado formado pela razão da permissividade do material em relação ao vácuo (Noborio, 2005).

Tabela 1. Permissibilidade relativa de alguns constituintes do solo

MATERIAL	PERMISSIVIDADE RELATIVA
Ar	1
Água	80
Gelo	3
Basalto	12
Granito	7 a 9
Silte Seco	3,5
Areia seca	2,5

Fonte: Curtis & Defandoff (1929) apud Silva et al. (2008)

Uma das maneiras de identificar a constante dielétrica é medindo a capacitância entre dois eletrodos inseridos no solo quando se deseja obter essa medida. A umidade do solo está em sua principal forma de água livre em razão da grande diferença entre as constantes dielétricas dos outros materiais contidos no solo e da água, sendo a variação diretamente proporcional à quantidade de água presente na amostra (Roque, 2008)

Um método comumente aplicado que utiliza constante dielétrica do solo, além do sensor capacitivo, é o Reflectômetro no Domínio do Tempo (TDR) para medida de permissividade do solo in loco. Mas é importante fazer uma distinção entre os dois métodos, pois cada sensor faz a leitura da constante dielétrica de forma diferente (Borim & Pinto, 2006).

O sensor capacitivo percebe o solo como um dielétrico poroso em um capacitor não fechado, cuja capacitância varia dependendo somente do tipo e da quantidade de material presente nas placas (Rêgo Segundo, 2010). Já no sensor TDR, o equipamento é composto por

um testador de cabos e guias de ondas, que enviam e recebem informações. Usam-se cabos específicos para emissão de ondas até a ponta de hastes de aço inoxidável. O funcionamento ocorre de forma que a emissão do pulso eletromagnético passa pelos cabos até a ponteira de aço, representando um sistema aberto, sendo recebida nas outras hastes e retornando para leitura. A unidade que se usa para indicar a constante dielétrica nesse caso é a velocidade com a qual as ondas se propagam entre as ponteiros do equipamento (Roque, 2008).



Figura 2. Sensor de umidade de solo capacitivo

Fonte: <https://www.usinainfo.com.br/> (2021)

A desvantagem do sensor TDR é o alto custo do equipamento, principalmente em casos em que se deseja monitorar vários pontos em diversas profundidades. Assim como o sensor capacitivo, as sondas TDRs também necessitam de calibração com base nas propriedades específicas de cada solo, com o objetivo de obter valores mais exatos e melhor aproveitamento do equipamento. As aplicações das equações formuladas pelos fabricantes não são totalmente adequadas para qualquer tipo de solo, principalmente solos tropicais, necessitando fazer ajustes em razão das características locais.

3.3 Plataforma arduino

A coleta de dados por computador ou de forma automatizada representa, principalmente em estudo, a possibilidade de obter dados e aplicar análises estatísticas mais precisas e completas. O tempo de coleta de dados também pode ser mais eficiente com o uso de equipamentos automatizados, permitindo uma conversão rápida para apresentação gráfica e computacional, produzindo uma melhor observação de fenômenos, por conseguinte, melhores resultados, deixando assim a formulação de hipóteses mais eficiente e dinâmica (Cavalcante et al., 2011).

Segundo Barbosa (2011), é importante a atualização da metodologia da coleta de dados, com a escolha de equipamentos que possibilitem a ampliação das quantidades de dados, de modo a favorecer a análise dos valores, das médias e das representatividades em larga escala e melhor precisão.

Diante dessa necessidade, foi criado um dispositivo sobre uma plataforma de prototipagem eletrônica, que consiste em um sistema de software e hardwares livres. O arduino é caracterizado por uma placa de circuito eletrônico contendo um microcomputador que permite a interação direta da eletrônica com o ambiente. Essa interação é feita a partir de simples portas ou entradas, aliadas a uma programação facilmente editável. Porém a grande versatilidade da aplicação de equipamentos com placas de arduino está no foco do baixo custo, que vem colocando esse tipo de equipamento mais próximo da realidade funcional (Santos, 2009).

O arduino mega2560, Figura 3, tem um total de 54 portas digitais e 16 analógicas. As portas podem ser utilizadas de diversas formas, aliadas a outros dispositivos como motores para movimentação, válvulas solenoides, alarmes e sensores, destacando as portas analógicas que têm a característica de ler ou reproduzir valores variantes, sendo utilizadas pelos sensores de umidade capacitivos e resistivos.



Figura 3. Arduino Mega 2560

Fonte. <http://arduino.cc/> (2021)

A plataforma arduino vem de forma inovadora mudar o rumo da automação de uma forma geral, por apresentar grandes possibilidades de associações e usos, fácil adaptabilidade e ajuste, sendo a principal característica a extrema facilidade de acesso a este equipamento. (Santos, 2009)

3.4 Fluxo de água no solo

Considera-se a água o componente móvel do solo. Seu fluxo em estado líquido é dado pela diferença de potencial de umidade, ou seja, a água transita no solo de uma zona de maior potencial matricial para uma de menor. E essa mobilidade pode ser identificada de três formas: fluxo não saturado, fluxo saturado e equalização de vapores (Brady, 1989).

O fluxo saturado acontece quando os poros na zona mais úmida estão completamente carregados de água. O fluxo não saturado ocorre quando existe nos poros porção de água juntamente com porção de ar. (Brady, 1989; Allen et al., 1998; Chandrasekaran et al., 2010).

A disponibilidade da água para as plantas é considerada possível desde que a quantidade presente no solo esteja dentro dos limites superior e inferior de umidade útil, que é caracterizada pela sua equivalência comparada à capacidade de campo e ao ponto de murcha permanente, ou seja, a água está disponível para a planta dentro dos níveis entre a capacidade de campo e os níveis de ponto de murcha permanente (Cassel & Nielsen, 1986).

A capacidade das plantas de absorver a água do solo diminui à medida que a umidade do solo se aproxima do ponto de murcha permanente. No momento em que o solo está satisfatoriamente úmido, ele permite que as plantas absorvam água fácil e rapidamente, atendendo à demanda hídrica do vegetal. Com a diminuição da umidade presente no solo, aumenta a dificuldade de absorção pela planta, que, por sua vez, necessita despende mais energia para atender à demanda necessária e começa a sofrer estresse hídrico. Isso ocorre porque quanto mais seco o solo estiver, mais intensamente a matriz do solo reterá a água. (Allen et al., 1998)

3.5 O processo de evaporação da água no solo

A evaporação é o processo pelo qual a água que está presente no solo úmido ou em superfície (rios, lagos, mares) muda seu estado físico líquido para vapor, subindo para a atmosfera. A taxa com a qual o vapor é elevado para a atmosfera depende da quantidade de energia disponibilizada, do acúmulo de radiação, para que as moléculas de água consigam

ganhar energia cinética necessária para se desprender da superfície do solo ou da película de água mais externa e formar vapor atmosférico (Philip & Vries, 1957; Rebouças, 2002; Vidal, 2009).

O fenômeno da evaporação ocorre tanto em águas superficiais quanto em águas subterrâneas, passando pelo solo e chegando à atmosfera. Os lençóis freáticos têm grande quantidade de água, que pode ser evaporada de acordo com efeitos químicos, com a profundidade do lençol e com a textura do solo acima dele (Karmann, 2003).

A evaporação da água apresenta dois estágios distintos para o mesmo fim, diferenciados ao longo do período de secagem do solo. No primeiro estágio, a taxa de evaporação é definida pela quantidade de energia disponível para conseguir transformar em vapor a água presente na camada mais superficial do solo. Neste momento, as perdas de umidade pela evaporação dependem diretamente da demanda evaporativa da atmosfera presente na superfície do solo, nesse sentido, o fluxo capilar da água mantém a superfície úmida, oferecendo uma elevada taxa de evaporação (Reichardt, 1996).

No segundo estágio, a evaporação é principalmente limitada pela diminuição da umidade na camada mais superficial do solo, simultaneamente ligada também à característica hidráulica, fator que altera diretamente a transferência de líquido e do vapor para a superfície. Nesse sentido, existe uma diminuição drástica na taxa de perda de água na linha corrente de tempo. As condições presentes na atmosfera perdem importância quando comparadas aos fatores intrínsecos do solo que afetam a perda de água (Reichardt, 1996; Lemon, 1956).

Alguns pesquisadores adicionam ainda um terceiro estágio nessa divisão quando o solo apresenta taxa de evaporação não linear, ou seja, quando ele tem mais dificuldade de perder água para a atmosfera. Nesse estágio, o fluxo de água do solo acontece por meio da difusão de vapor, processo extremamente lento, determinado em grande parte pelas propriedades físicas do solo. Por se tratar de um processo muito lento, a taxa de evaporação neste processo é considerada desprezível (Ventura et al., 2005; Reichardt, 1996)

Para que o fenômeno da evaporação de água do solo aconteça e se mantenha constante, é necessária a presença de três condições: suprimento necessário e contínuo de energia, gradiente de pressão de vapor da superfície para a atmosfera sempre favorável à transferência e um suprimento de água constante e contínuo das camadas mais profundas para a superfície do solo. As duas primeiras premissas são determinadas principalmente por variáveis meteorológicas. E a terceira depende do potencial matricial presente no solo, juntamente com as condições referentes à transferência hidráulica do meio (Hillel, 1980).

Os efeitos meteorológicos têm grande influência na evaporação da água contida no solo, pois a mudança do estado das moléculas de líquido para gasoso necessita de uma quantidade de energia indispensável para que essa reação aconteça, sendo gastas aproximadamente 590 calorias por grama de água evaporada. A energia necessária é suprida quase integralmente pela radiação solar, vindo o restante da temperatura do ar. A força impulsionadora que retira o vapor de água de uma superfície necessita de um gradiente de pressão de vapor entre a superfície e a atmosfera, que é dependente da umidade presente no ar. Na medida em que acontece a evaporação, o ar da camada mais próxima da superfície se satura aos poucos e deixa o processo gradativamente mais lento até se estabilizar a ponto de não haver mais transferência. Para que a transferência evaporativa se mantenha ininterrupta, é necessário manter o ar em volta da superfície em constante renovação para que o ar saturado saia dando espaço para um ar mais seco, mantendo o gradiente de pressão. Por consequência, são de extrema importância para a evaporação fatores como radiação solar, temperatura do ar, umidade do ar e velocidade do vento (Allen, 2005).

As características físicas e hídricas do solo também são fatores determinantes e influenciadores para a perda de água do solo, ambas relacionadas diretamente com a estrutura do solo, sendo a densidade e a porosidade fatores que influenciam na retenção de água no solo e na característica do fluxo líquido e gasoso interno do solo (Gordiyenko & Kostogryz, 1990). A condutividade hidráulica do solo não saturado também é considerada um fator fortemente influenciador da constância do processo de evaporação.

A estrutura do solo também é fator determinante para o fenômeno no que se diz respeito ao arranjo e à adesão das frações granulométricas tanto primárias quanto secundárias, formando seus agregados (Baver et al., 1972), já que alteram diretamente características como movimentação da água, variação de calor, presença de ar, densidade e porosidade. (Brady, 1989).

Existem no solo espaços livres entre as partículas sólidas, denominados poros, que são produto do arranjo, distribuição e orientação dos agregados do solo. Os poros podem armazenar ar e água disponível para plantas, microrganismos e animais. Esses poros são divididos em macroporosidade e microporosidade e essa divisão altera a hidrodinâmica no solo. Dentro das macroporosidades, a água tem uma movimentação mais livre e rápida, já nos microporos a água tende a ficar mais parada, limitando-se ao movimento referente à capilaridade (Hillel, 1980).

Outro fator determinante é a densidade do solo, que interfere na dinâmica da água do solo já que está totalmente ligada à massa sólida e ao volume vazio. A alteração dos espaços

livres do solo afeta a densidade, altera não só aspectos de areação, mas também a retenção de água e a disponibilidade hídrica (Carter, 1993; Klein, 1998).

4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M. Crop evapotranspiration Guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO – Irrigation and drainage, Paper 56, 1998. 319p.
- Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Smith, M.; Raes, D.; Wright, J.L. FAO-56 Dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v.131, p.2-13, 2005.
- Bernardo, S.; Soares, A.A.; Mantovani, E.C. Manual de Irrigação. Viçosa: UFV, 2008. 625 p.
- Barbosa, M.A.G. Calibração e uso de sensores FDR para determinação da umidade e salinidade em dois tipos de solos. Mossoró: Universidade Federal Rural do Semiárido, 2011. 89p. Dissertação Mestrado.
- Baumhardt, R.L.; Lascano, R.J.; Evett, S.R. Soil material, temperature, and salinity effects on calibration of multisensor capacitance probes. *Soil Science Society of America Journal*, v.64, p.1940-1946, 2000.
- Baver, L.D.; Gardner, W.H.; Gardner, W.R. *Soil Physics*: New York J. Wiley, 1972. 498p.
- Bernardo, S.; Soares, A.A.; Mantovani, E.C. Manual de irrigação. 7ed. Viçosa: Editora UFV, 2005. 611 p.
- Borim, A.C.A.; Pinto, C.A.R. Medição de umidade do solo através de sensores capacitivos. *Revista de Ciências Exatas e Tecnologia*, v.1, n.1, p.51-60, 2006.
- Brady, N.C. *Natureza e propriedades dos solos*. 7.ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1989. 898p.
- Carter, M.R. *Soil sampling and methods of analysis*. Canadian Society Soil Science, 1993. 823p.
- Cassel, D.K.; Nielsen, D.R. Field capacity and available water capacity. In: Klute, A. (Ed). *Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods*. 2.ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p.902-926.
- Cavalcante, M.; Tavolaro, C.; Molisani, E. Física com Arduino para iniciantes. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v.33, n.4, p.4503-1 a 4503-9, 2011.
- Chandrasekaran, B.; Annadurai, K.; Somasundaran, E. *A Textbook of Agronomy*. New Delhi: New Age International Limited Publishers, 2010. 835p.
- Chanzy, A.; Chadoeuf, J.; Gaudu, J-C.; Mohrath, D.; Richard, G.; Bruckler, L. Soil moisture monitoring the field scale using automatic capacitance probes. *European Journal of Soil Science*, Avignon, v.4, p.637-648, 1998.

- Coelho, S.L. Desenvolvimento de um tensiômetro eletrônico para o monitoramento do potencial de água do solo. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2003. 106p. Dissertação Mestrado.
- Gordiyenko, V.P.; Kostogryz, P.V. Patterns of moisture evaporation at variable bulk densities of the upper soil layer. *Soviet Soil Science*, New York, v.22, n.8, p.111-122, 1990.
- Hillel, D. *Fundamentals of soil physics*. London: Academic Press, 1980. 413p.
- Karmann, I. Ciclo da água: água subterrânea e sua ação geológica. In: Teixeira, W.; Toledo, M. C. M.; Fairchild, T. R.; Taioli, F. (orgs.). *Decifrando a Terra*. 2.reimpressão. São Paulo: Oficina de Textos, 2003. 557p. ISBN 85-86238-14-7.
- Klar, A.E. *A água no sistema solo-planta-atmosfera*. 2.ed. São Paulo: Nobel, 1984. 408p.
- Klein, V.A Propriedades físico-hídrico-mecânicas de um Latossolo roxo, sob diferentes sistemas de uso e manejo. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 1998. 150p. Tese Doutorado. <https://doi.org/10.11606/T.11.2020.tde-20200111-151027>
- Lemon, E.R. The potencialities for decreasing soil moisture evaporation loss. *Proceedings of Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.20, n.1, p.120-125, 1956.
- Libardi, P.L. *Dinâmica da água no solo*. 2.ed. Piracicaba: [s.n.], 1999. 497p.
- Lima, F. M. C., *Caracterização de um Sensor para Determinação da Água Disponível no Solo*. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1997. 71p. Dissertação de Mestrado.
- Morais, M.S.; Cruz, T.M.L.; Teixeira, A.S.; Dantas, L.A.; Araújo, D.C.C. Calibração de sensor capacitivo de umidade do solo destinado ao cultivo de hortaliças. In: XXV CONIRD – Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem, 08 a 13 de novembro de 2015. São Cristóvão/SE: UFS, 2015.
- Noborio, K. Measurements of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review. *Computer and Electronics in Agriculture*, Amsterdam v.31, n.11, p.213-237, 2005.
- ONU – Organização das Nações Unidas. *A ONU e a população mundial*. Disponível em: <http://www.onu.org.br/a-onu-em-acao/a-onu-e-a-alimentacao/> Acesso em: 03 dez. 2020.
- Paltineanu, I.C.; STARR, J.L. Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: laboratory calibration. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.61, p. 1576-1585, 1997.
- Philip, J.R.; de Vries, D.A. Moisture movement in porous materials under temperature gradients. *Transactions America Geophysical Union*, v.38, p. 222-232, 1957.
- Pizetta, S.C. *Calibração de sensores de capacitância (FDR) para estimativa da umidade em diferentes solos*. Lavras: UFLA – Universidade Federal de Lavras, 2015. 67p. Dissertação Mestrado.

- Rebouças, A. Águas subterrâneas. In: Rebouças, A.C.; Braga, B.; Tundisi, J.G. (Orgs.). Águas doces do Brasil: capital ecológico, uso e conservação. 2.ed. São Paulo: Escrituras, 2002. p.119-151.
- Rêgo Segundo, A. Desenvolvimento de sensor de teor de água do solo e de sistema de controle e automação em malha fechada para uso em irrigação. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2010. 65 p. Dissertação Mestrado.
- Reichardt, K. A água em sistemas agrícolas. São Paulo: Manole, 1987. 188p.
- Reichardt, K Capacidade de campo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.12, p.211-216, p1996.
- Roque, W. Desenvolvimento de um multissensor eletrônico para medida da umidade, temperatura e condutividade elétrica do solo. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2008. 45p. Dissertação Mestrado.
- Santos, C.C.; Teixeira, A.D.S.; Canafístula, F.J.F.; Daher, S.; Barroso, G.C. A wireless system for remote monitoring soil moisture and temperature. In: Brazilian Congress of Agricultural Engineering, 37., 2008. City Iguassu Falls - Brazil. Anais... Associação Brasileira de Engenharia Agrícola, 2008. 1 CD-ROM.
- Siebert, S.; Burke, J.; Faures, J.M.; Frenken, K.; Hoogeveen, J.; Döll, P.; Portmann, F.T. Groundwater use for irrigation – a global inventory. Hydrol. Earth Syst. Sci., v.14, n.10, p. 1863-1880, 2010. ISSN 1607-7938.
- Silva, C.C.; Andrade Júnior, A.; Souza, C.C. Aspectos práticos na utilização da técnica de capacitância: desafios e aprendizagem. In: II Workshop de aplicações de técnicas eletromagnéticas para o monitoramento ambiental. Taubaté: UNITAU, 2008. p.25-45.
- Ventura, F.; Snyder, R.L.; Bali, K.M. Estimating bare soil evaporation using experimental soil moisture data. Geophysical Research Abstracts. v. 7, 03181, 2005.
- Vidal, J.E.J. Evaporación desde napas freáticas someras en cuencas endorreicas del altiplano Chileno. Santiago de Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile - Escuela de Ingeniería, 2009. 180p. Tesis of Magíster.
- Zazueta, F. S.; Xin, J. Soil Moisture sensors. Gainesville: University of Florida, 1994. 12 p.

5 CAPÍTULO 1: CALIBRAGEM, COMPARAÇÃO E ANÁLISE DE DESSORÇÃO

Normas da Revista Acta Scientiarum. Tecnologia.

Murilo de Moura e Silva*, Antônio Evami C. Sousa e Roriz Luciano Machado

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Ceres, Rodovia GO-154, km 3, Zona Rural, Caixa Postal 51, 76300-000, Ceres, Goiás, Brasil. *Autor por correspondência. E-mail: murilomoura@live.com

5.1 Introdução

Conforme descrito em relatório do IPCC (2007), o grande aumento populacional no último século e o consumo exacerbado impactaram diretamente na quantidade de água potável disponível. Estima-se que nas próximas décadas cerca de 3 bilhões de pessoas estarão em regiões onde podem estar sujeitas a uma seca crônica e mais de 30% dos países terão a água como fator limitante para seu desenvolvimento. O Brasil tem a maior bacia hidrográfica do planeta, mas também está sujeito ao déficit hídrico gerado pela má gestão e distribuição de sua reserva. O aumento das demandas, o uso irracional e as perdas eventuais também são fatores agravantes para a conservação deste bem. (Nobre & Cavalcanti, 2000).

As zonas geográficas em que ocorrem regularmente períodos de estiagem de chuva apresentam condições críticas ao acesso à água. Um aumento significativo das atividades agrícolas influencia ainda mais no aumento dessa dificuldade. Com a precipitação em baixos níveis e com o aumento da demanda para recursos hídricos, as condições hídricas se agravam com as altas taxas de evaporação e o desperdício no emprego de recursos hídricos em plantações. Estas condições afetam negativamente a qualidade de vida das pessoas, desfavorecendo o desenvolvimento econômico e social das regiões afetadas (Tucci et al., 2004; Vidal, 2009).

Tendo em vista essa problemática, são necessários estudos para adequar as maiores exigências na compreensão dos processos físicos oriundos da perda de água do solo e também para desenvolver metodologias mais eficientes, confiáveis e economicamente viáveis para quantificar a quantidade de água no solo. Para compreender e mensurar estes fluxos hídricos, a modelagem dos transportes de água e calor entre os sistemas torna-se imprescindível em várias áreas do conhecimento, propiciando resultados confiáveis, utilizando tecnologias viáveis (Stannard & Weltz, 2006; Muñoz, Tyler & Vauclin, 2008; Centinari et al., 2009).

O transporte de água no estado líquido, combinado com o fluxo de calor do solo, foi estudado inicialmente por Philip e Vries (1957), que conseguiram correlacionar estes fluxos analisando não somente o gradiente de pressão matricial, mas também as variações de temperatura. Em solos de baixa umidade, o fluxo de vapor se torna de extrema relevância para o fluxo total de matéria e da energia dentro do solo (Merlin et al., 2012).

Desde então estudos referentes ao transporte de água nas camadas mais superficiais do solo vêm sendo feitos por vários pesquisadores. Zatarain et al. (2003) e Nassar e Horton (1989) correlacionaram também o efeito de gradiente de potencial osmótico ao transporte acoplado de água, vapor e solutos. O mecanismo predominante identificado pelos pesquisadores foi o da influência da convecção e da radiação, que fica mais evidenciada, em solos secos ou que não estejam saturados. Contudo, juntamente com a radiação, o gradiente de temperatura também é ligado de forma direta ao fluxo de água líquida e de vapor de água, contribuindo de forma significativa para os processos transportadores hídricos presentes no solo.

Para se aprofundar nos estudos do movimento da água no solo, devem ser identificadas a localização e a quantidade da água no solo, o que pode ser feito pela avaliação de umidade. Essa análise precisa é difícil de ser feita em campo porque os métodos convencionais de medida são complexos e caros. Outro agravante é a variação espacial das propriedades do solo, fato que dificulta a escolha de locais representativos em campo (Hemakumara et al., 2007; Merlin et al., 2012)

Entre as técnicas aplicáveis em campo, destacam-se as de sensoriamento digital ou automatizado. Tais técnicas podem ser adquiridas por custos relativamente baixos, podendo minimizar a quantidade de trabalho em campo e fornecer dados com melhor eficiência e rapidez. Umidade do solo é uma grandeza inconstante e variável no espaço, porém, contando com essas variações locais na medida, os dados podem ser corrigidos de acordo com sua heterogeneidade e utilizados para determinar com maior precisão as condições de umidade do solo (Courault, Seguin & Oliosio, 2005).

A umidade presente no solo é um índice primordial na análise laboratorial (Libardi, 2005), sendo possível, por meio de métodos indiretos ou diretos, identificar esse dado e assim melhorar a eficiência da irrigação com um manejo mais adequado (Miranda, 2003). O uso de sensores eletrônicos é fator de grande presença pelas crescentes inovações tecnológicas apresentadas. Eles propiciam leituras dinâmicas, precisas e de frequência variada segundo a necessidade com a qual se deseja obter estes dados (Costa & Albuquerque, 2014). Estes sensores usam, de forma correlacionada, medidas de parâmetros que estão

relacionados com a quantidade de água presente no solo. Assim, são caracterizados como forma indireta de medida, necessitando de prévio ajuste para melhor aproveitamento do equipamento. (Morais et al., 2015). Porém apresentam a vantagem de não necessitar de manutenção periódica, sendo necessária apenas forma corretiva, havendo possibilidade de inseri-los em um sistema automatizado de irrigação (Miranda, 2003).

Diante do exposto, neste capítulo, iremos estudar a evaporação de água em diferentes profundidades com dois tipos de sensores, avaliar a sua aplicabilidade e verificar por meio de análises estatísticas e teorias de movimento da água no solo a consistência, a coerência e a qualidade dos dados apresentados.

5.2 Material e métodos

5.2.1 Local

O experimento foi conduzido no Instituto Federal Goiano – Campus Ceres – GO, em outubro de 2020. Inicialmente o solo foi coletado de uma área experimental onde se pesquisam cultivares de capim elefante. O local tem as coordenadas 15°18'30" de latitude sul e 49°35'54" longitude oeste, altitude aproximada de 571 m. Para o experimento, foi utilizado o laboratório de solos do Centro Universitário de Anápolis Unievangélica - Campus Ceres, situado no Vale de São Patrício, Centro Goiano, na cidade de Ceres – GO.

5.2.2 Delineamento estatístico

O delineamento experimental foi em blocos casualizados (DBC), em parcelas subdivididas de 2x3X8, com 4 repetições. Foram aplicados 2 tratamentos, sensores capacitivos e sensores resistivos, dispostos em 3 profundidades diferentes, 0 a 10, 10 a 20 e 20 a 30 centímetros, dispersos em 8 tempos, compreendendo 0, 22, 46, 100, 190, 320, 420 e 540 horas após a capacidade de campo. São 4 amostras, portanto, 4 repetições.

5.2.3 Clima e solo

De acordo com a classificação de Köppen e Geiger, o clima da região é avaliado como AW, com inverno seco e verão chuvoso (Santos et al., 2018).

O solo foi classificado como Nitossolo Vermelho Eutrófico, segundo classificação sugerida por Santos et al. (2018). A Tabela 8 apresenta as características químicas do solo na profundidade de 0 a 30 centímetros.

Tabela 2. Análise química do solo da área experimental

pH	M.O	Ca	Mg	Al	H+ Al	K	T	K	P
em H ₂ O	g/dm ³				cmol _c /dm ³				mg/dm ³
5,5	18,1	3,7	1,2	0,1	2,0	0,1	6,9	22,5	7,1

Fonte: Laboratório de solos Instituto Federal Goiano Campus Ceres (2020).

Desta mesma amostra também foram feitas as análises físicas, cujos resultados estão descritos na Tabela 9.

Tabela 3. Análise textural do solo da área experimental

Textura		
Areia	Silte	Argila
g/Kg		
401	112	487

Fonte: Laboratório de solos Instituto Federal Goiano Campus Ceres (2020)

A curva de Van Genuchten mostra a característica de retenção do solo no local do experimento(Figura 4).

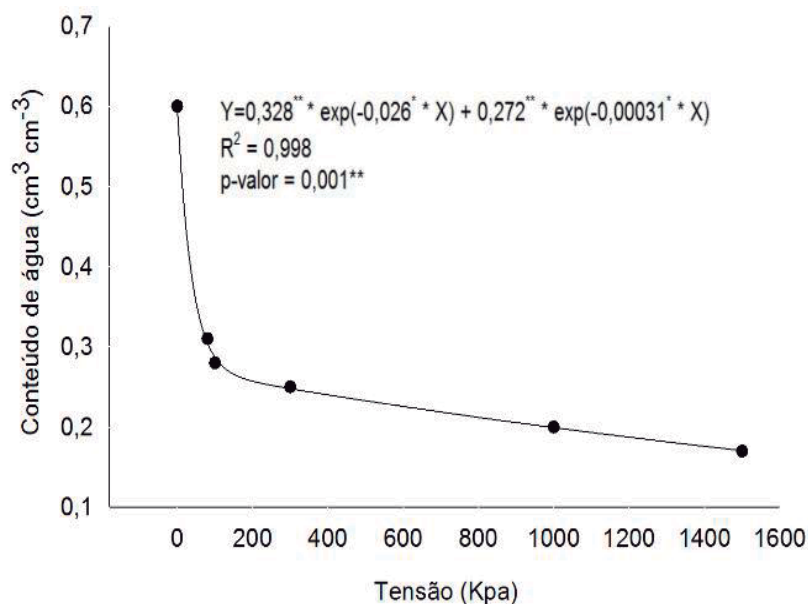


Figura 4. Curva de retenção do solo

5.2.4 Caracterização do equipamento

Os sensores resistivos utilizados para o experimento foram do modelo comparator LM393 e os sensores capacitivos utilizados, do modelo CS12, ambos da marca Texas Instruments. Foram utilizados 12 sensores de cada modelo, e para fazer a leitura e programação foram utilizadas duas placas arduino, modelo ATmega2560, da marca R3.

5.2.5 Preparação das amostras

Para a calibração dos sensores, foram separadas 24 amostras deformadas, sendo cada amostra lida com 2 sensores. A coleta das amostras foi feita de forma manual, escavando o solo do local do experimento, seguindo a profundidade pretendida para a coleta da amostra de 0 a 30 centímetros de profundidade. Após, o solo foi espalhado em bandeja e deixado por 72h para secar à sombra. O solo seco ao ar foi peneirado em peneira com abertura de 2,00 milímetros (nº10), destorroado e condicionado em Becker de 150ML de volume. Para uma leitura mais condizente com a realidade do solo natural, à medida que o solo era colocado, ele era acomodado de forma que a densidade se aproximasse da densidade do solo natural do local. Com as amostras dispostas, foram adicionados volumes de água variados, de zero a 60 mililitros. As amostras ficaram em repouso por 3 horas, vedadas para a homogeneização da umidade por todo o volume.

Para o experimento, foram coletadas 4 amostras indeformadas de aproximadamente 10 centímetros de diâmetro e 30 centímetros de altura da área do experimento. A região das amostras foi saturada para facilitar a inserção dos tubos para coleta. A metodologia de coleta de amostra indeformada foi a sugerida por Bortolon et al. (2009).

As amostras foram retiradas com um tubo de PVC, com golpes na parte de superior, para o tudo ser gradativamente inserido no solo. Aos poucos, a terra em volta dos tubos era retirada para que não exercesse resistência à penetração (Bortolon et al., 2009).

Com as amostras em laboratório, foram feitas as aberturas onde os sensores foram inseridos, tendo sido feitos 2 furos em 3 profundidades em cada amostra para corresponder aos dados do solo de 0 a 10, de 10 a 20 e de 20 a 30 centímetros. E os sensores foram inseridos.

As amostras foram saturadas e colocadas em capacidade de campo segundo a metodologia de tempo de perda de água após saturação sugerida por Casaroli e Lier (2008). Após o solo ser colocado com parte submersa em água por 24 horas, as amostras foram retiradas e deixadas em descanso para escoar e colocados filmes plásticos nas aberturas superiores para que o solo não perdesse umidade na parte superior por meio da saturação.

5.2.6 Coleta de dados

Para a calibração, os sensores foram inseridos cuidadosamente nas amostras, de forma que cada uma recebeu os dois tipos de sensores utilizados. Os sensores foram ligados à placa arduino e as leituras, armazenadas em arquivo digital. Para que as leituras fossem consideradas válidas, a placa foi programada para registrar a cada 3 segundos a leitura, tendo sido armazenada após uma estabilização de 3 leituras consecutivas idênticas. As amostras foram pesadas a fim de obter o peso total das amostras úmidas, sendo, posteriormente, colocadas em estufa a 105°C durante 24h. Passado o tempo indicado, as amostras foram pesadas novamente para obtenção do valor do solo seco. De posse dessas informações, foi calculado o teor de umidade em base gravimétrica presente nas amostras, seguindo a metodologia presente no manual da EMBRAPA (1979).

Com os valores das leituras e das análises pelo método gravimétrico, foram feitos cálculos para obtenção da correlação de Pearson (r), análise de regressão, teste t, correlação de Pearson e o coeficiente de determinação (R^2). O programa utilizado para as análises foi o Sigmaplot, versão 12.3.

Para o experimento, passado o tempo de espera para determinação da capacidade de campo das amostras, foram iniciadas as leituras dos sensores, feitas de modo a respeitar uma frequência de 2 leituras por dia, com horários semelhantes. Simultaneamente, foram feitas também as pesagens das amostras com a mesma frequência das leituras dos sensores.

No início, foram verificados os percentuais de diferença de leitura entre os sensores da mesma amostra, tendo sido identificadas diferenças de, no máximo, 5% entre as leituras. As coletas de dados foram encerradas quando as diferenças de leitura apresentaram os percentuais aproximados do início do experimento, totalizando 540 horas após a capacidade de campo.

5.2.7 Análise de dados

Para a análise dos dados e resultados mais contundentes, foram escolhidas 8 linhas de tempo, correspondentes a 0, 22, 46, 100, 190, 320, 420 e 540 horas após a capacidade de campo. Os tempos foram escolhidos por representar melhor as curvas simultaneamente de cada profundidade.

5.3 Resultados e discussões

No primeiro momento, na etapa de calibragem, os dados foram computados a fim de obtermos uma análise de regressão com as leituras dos sensores, tendo a análise de umidade sido feita pelo método da gravimetria.

O conteúdo de água obtido com a massa da fração líquida, mensurado após adição de água e secagem do solo, corresponde aos valores da umidade gravimétrica. Após análise, constatou-se estimativa de mínima de 0,025 e máxima de 0,372. O comportamento de ambos os sensores foi o de apresentar menores valores de leitura quanto maior fosse a umidade presente na amostra, ou seja, caracterizando grandezas inversamente proporcionais.

De posse destes dados, eles foram submetidos à análise de regressão, a qual gerou uma equação polinomial linear de coeficiente angular de valor -0,0005 e coeficiente linear de 0,534, ambos os coeficientes com significância $p < 0,0001$, dados normais de acordo com teste de Shapiro-Wilk, e R quadrado de valor 0,9743. Segundo a análise, considerou-se então a equação de calibração válida (Imagem 4).

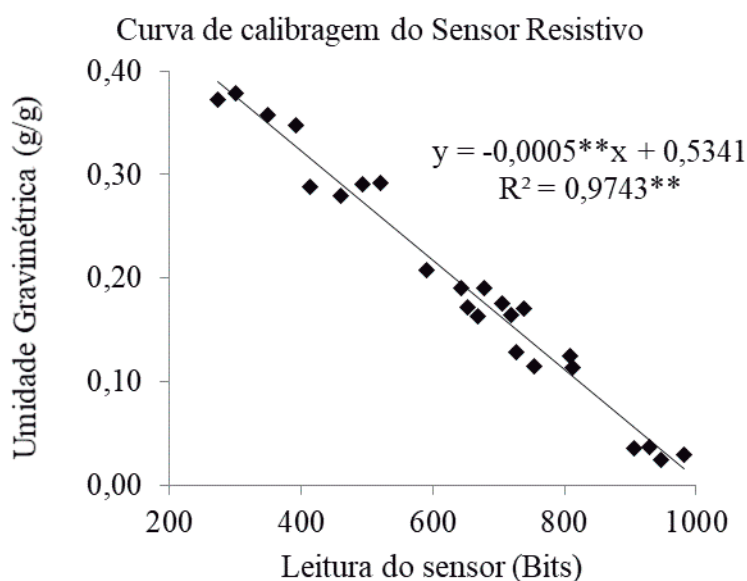


Figura 5. Curva de calibração do Sensor Resistivo.

Assim como no sensor capacitivo, os dados também foram submetidos à análise de regressão, a qual gerou uma equação polinomial linear de coeficiente angular de valor -0,0021 e coeficiente linear de 1,3477, ambos os coeficientes têm significância $p < 0,0001$, dados normais de acordo com teste de Shapiro-Wilk, e R quadrado de valor 0,9903. Segundo a análise, considerou-se então a equação de calibração válida (Figura X).

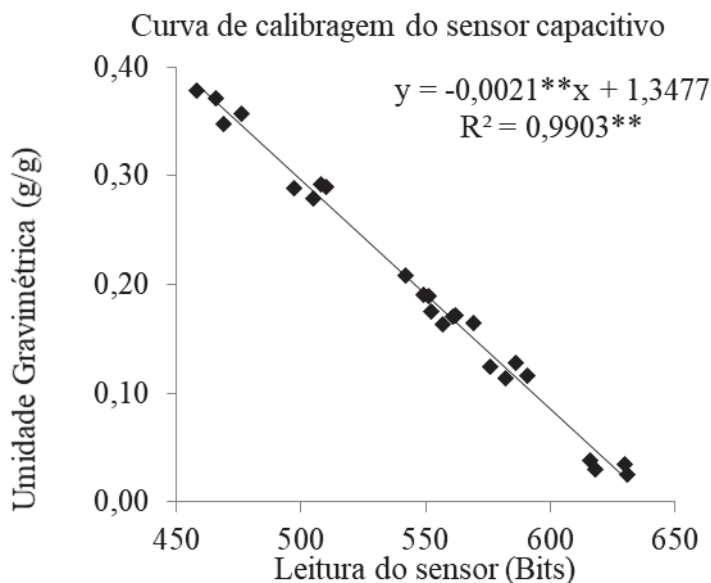


Figura 6. Curva de calibração do Sensor Capacitivo.

Nas Imagens 4 e 5, são apresentados os diagramas de dispersão de dados referentes à relação entre os valores de umidade gravimétrica na base da massa e os valores correspondentes à leitura em bits medidos pelos sensores resistivo e capacitivo, respectivamente. Em função da distribuição das coordenadas variáveis referentes aos valores independentes em Bits e variáveis dependentes em Y em umidade gravimétrica, o modelo de equação polinomial de primeiro grau se ajustou melhor aos dados da calibragem. Foram selecionados então os modelos lineares para a apresentação da relação entre as duas grandezas. A escolha do modelo de equação linear foi baseada na teoria da relação direta das grandezas estudadas neste experimento. Em estudo sobre a estimativa do teor de umidade a partir da constante dielétrica e resistência elétrica do solo a partir de sensores de materiais distintos, Borim e Pinto (2006) afirmam que os valores da capacitância e da resistência do sensor variam linearmente com a permissibilidade elétrica do meio, desde que a distância fixa entre as placas de eletrodos seja fixa e a área de contato do eletrodo com o solo seja constante.

No início do experimento, as amostras foram colocadas em capacidade de campo pelo método proposto por Casaroli e Lier (2008). O método foi verificado de modo que, de posse da curva de retenção do solo, foi possível estimar o teor de umidade do solo quando em capacidade de campo, tendo sido ambos compatíveis.

Conforme identificado neste experimento, a umidade obtida no início do estudo foi equivalente aos teores encontrados pelos sensores que ficaram entre 6 a 10 kPa, faixa de tensão atribuída para a capacidade de campo em solos. (Ferreira & Marcos, 1983; Reichardt, 1996; Andrade, Freitas & Luz, 1991; Mello et al., 2002)

Os dados foram analisados pelo programa SISVAR, de modo a verificar se as variações foram significativas, e os dados que mostraram variações significativas foram submetidos à análise de regressão.

Foi possível observar que estatisticamente não houve diferenças significativas entre os blocos, que foram as repetições do experimento, também não foram constatadas diferenças significativas entre as leituras dos dois sensores. Entretanto, conforme esperado, houve diferenças significativas no tempo, já que o solo estava em processo de desorção de umidade, também foram identificadas diferenças significativas entre as profundidades.

Tabela 4. Análise de variância do experimento

FV	GL	SQ	QM	F	F significação
Profundidade	2	3,28E-01	1,64E-01	257,93	0
Resíduo 1	6	3,82E-03	4,40E-05		
Sensores	1	4,40E-05	4,40E-05	0,04	0,85
Profundidade * Sensores	2	4,20E-05	2,10E-05	0,02	0,98
Resíduo 2	3	3,08E-03	1,03E-03		
Tempo	7	2,83E+00	4,04E-01	4341,64	0
Profundidade * Tempo	14	2,04E-01	1,46E-02	156,70	0
Profundidade*Tempo*Sensores	7	1,89E-04	2,70E-05	0,29	0,96
Resíduo 3	14	1,90E-05	1,00E-06	0,02	1
Total	191	3,39			

FV: fontes de variação; GL: número de graus de liberdade; SQ: soma de quadrados; MQ: quadrado médio; F: coeficiente calculado pela distribuição F e F significação: nível de significação para F.

A Tabela 7 mostra as interações que apresentaram ou não diferenças significativas das profundidades dentro de cada tempo, tendo sido possível observar que no início as interações entre as profundidades não apresentaram diferenças significativas, mas, ao se aproximar da metade do experimento, a tendência foi de apresentar diferenças significativas entre as profundidades. Posteriormente, ao se aproximar do fim do experimento, a tendência foi novamente de não apresentar diferenças significativas.

Tabela 5. Teste Tukey para o fator profundidade dentro de tempo

Profundidade (Cm)	Tempo (Horas)							
	0	22	46	100	190	320	420	540
5	0,397 a	0,366 a	0,289 a	0,209 a	0,120 a	0,079 a	0,064 a	0,029 a
15	0,399 a	0,367 a	0,342 b	0,307 b	0,222 b	0,125 b	0,071 a	0,030 a
25	0,402 a	0,387 b	0,365 c	0,347 c	0,328 c	0,282 c	0,175 b	0,068 b

Primeiramente o fator tempo foi analisado separadamente por apresentar diferença significativa com um comportamento de diminuir o teor de umidade conforme o decorrer do tempo, obtendo uma tendência de regressão linear com a qual podemos verificar o

comportamento da amostra como um todo. De modo similar, as demais regressões apresentaram melhores ajustes à equação polinomial de primeiro grau, apresentando precisões consideradas aceitáveis para identificar tendência de secagem do solo da amostra.

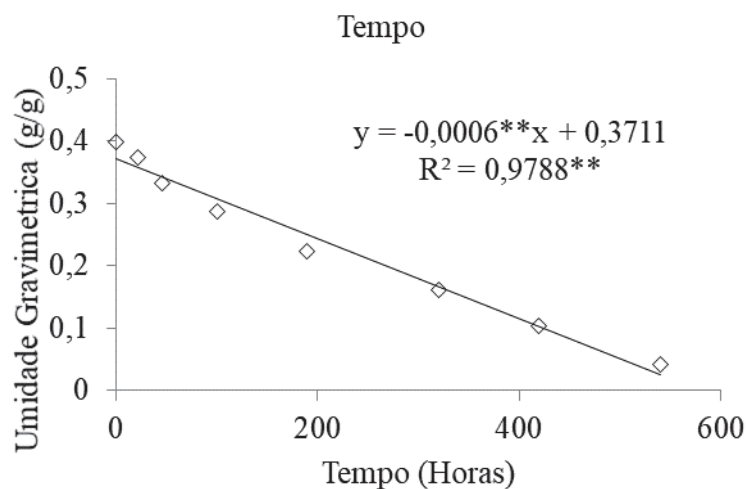


Figura 7. Curva da umidade gravimétrica em função do tempo

Para os dados em que foram identificadas diferenças significativas, foi feita análise de regressão para caracterizar tendência de variância. Em ambos os casos, foram encontrados modelos de regressão bem ajustados às variações encontradas. Na Figura 8, podemos notar uma queda logo no início, pois, em se tratando da superfície que está em contato com o solo, foi a primeira a perder água por evaporação.

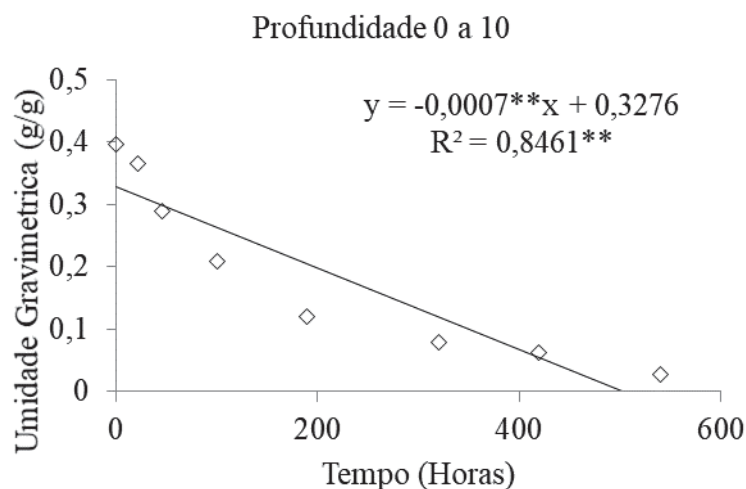


Figura 8. Curva da umidade gravimétrica em função do tempo da profundidade 0 a 10 centímetros

Posteriormente, na Imagem 7B, podemos notar comportamento diferente dos demais, iniciando por uma queda, menos atenuada que a da imagem 7A, que se mantém constante ao longo do tempo, e por se tratar de uma camada intermediária, a umidade ainda precisa passar pela camada superior para poder chegar à superfície, dificultando uma evaporação abrupta.

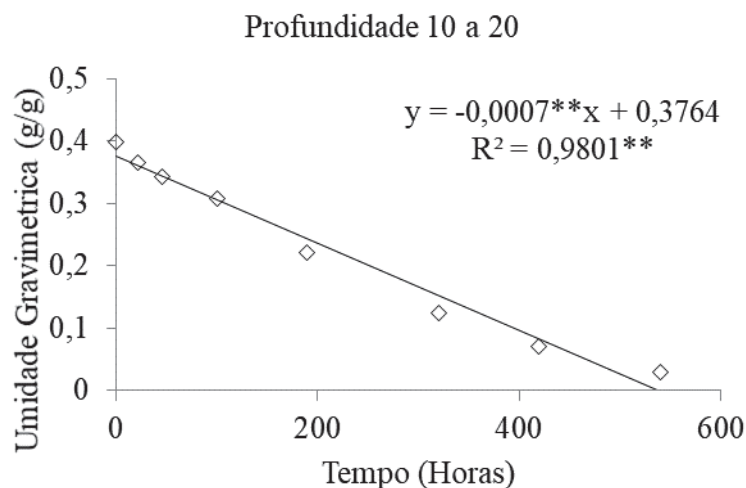


Figura 9. Curva da umidade gravimétrica em função do tempo da profundidade 10 a 20 centímetros

Na Imagem 7C, podemos notar um comportamento mais linear que o das outras camadas e no final uma queda bastante agressiva. Por se tratar da última camada da amostra, após as outras camadas estarem com o teor de umidade baixo, seu comportamento se assemelha ao da primeira camada, a evaporação se torna intensa já que essa camada está exposta ao ar, facilitando a evaporação.

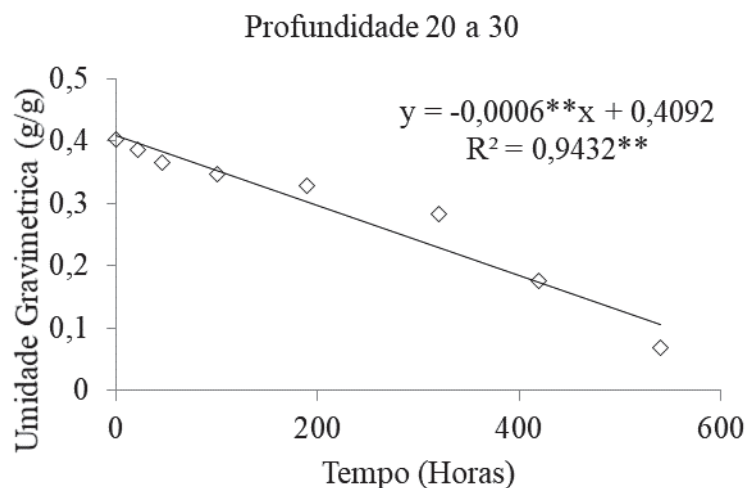


Figura 10. Curva da umidade gravimétrica em função do tempo da profundidade 20 a 30 centímetros

Ambas as profundidades apresentaram diminuição do teor de umidade no decorrer do tempo, seguindo uma sequência das camadas mais superficiais para as camadas mais profundas, condizente com o comportamento estudado por Karmann (2003), que concluíram que o solo retém umidade e a armazena, as camadas mais superficiais perdem essa água de maneira mais rápida, buscando se umedecer com a umidade armazenada nos horizontes mais profundos.

Se houvesse outras camadas abaixo da terceira, possivelmente o comportamento seria semelhante à camada representada na Figura 7B, porque haveria umidade nas camadas mais profundas para que ela pudesse retirar a água para, assim, poder evaporar.

É possível também perceber que o solo seca de maneira inconstante em alguns momentos com velocidade mais alta e em outros, mais baixa. Quando o solo está mais próximo da capacidade de campo, é possível notar uma queda mais contundente de umidade, e quando o solo está mais seco, ele perde água com mais dificuldade. Isso é explicado por Allen et al. (1998), e esse fenômeno ocorre porque quanto mais seco o solo estiver, mais intensamente a matriz do solo reterá a água. Este fato é explicado por Reichardt (1996), que mostra a distinção do processo de perda de água, havendo três modos em razão da quantidade de água presente no solo.

No experimento, apesar de não haver diferenças significativas nos dados obtidos pelas leituras dos dois sensores, o sensor capacitivo se mostrou mais estável nos momentos de leitura, com menor variação da leitura em bits. Esse fato pode ser explicado pela faixa de bits que o sensor utiliza para leitura. No experimento, notou-se uma diferença de 670 Bits para o sensor resistivo e 171 Bits para o sensor capacitivo. E essa diferença acontece pelo meio em que o sensor capta a leitura da constante dielétrica do solo. O sensor resistivo utiliza simplesmente a resistência que o meio produz entre os eletrodos (Lima, 1997) e o capacitivo utiliza a capacitância do solo (Roque, 2008). Os meios pelos quais os sensores promovem a leitura fazem com que o sensor resistivo tenha maior sensibilidade às mudanças de características dos meios.

A construção do sensor capacitivo tem em sua placa uma proteção contra corrosão e oxidação. Durante a utilização de cerca de 20 dias, foi possível notar oxidação no eletrodo do sensor resistivo, enquanto no sensor capacitivo não foi notado nenhum tipo de desgaste visível tanto no eletrodo quanto na placa e nos componentes.

5.4 Conclusão

Os dois sensores mostraram estatisticamente serem opções confiáveis de medida de teor de umidade do solo. Ambos não apresentaram diferenças significativas quando comparados à gravimetria.

O solo perde umidade de maneira diferente quando observado em profundidades diferentes, assim, para um melhor aproveitamento e precisão dos dados, os sensores podem

ser instalados em profundidade, visto poderem mostrar mais precisamente o volume de água contido em cada profundidade.

O sensor capacitivo se mostrou superior ao resistivo apenas no aspecto de durabilidade, pois no experimento não foi observado nenhum tipo de desgaste, de corrosão ou de oxidação nos seus eletrodos.

5.5 Referências bibliográficas

- Allen, RG, Pereira, LS, Raes, D, Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration Guidelines for computing crop water requirements*. Rome: FAO – Irrigation and drainage, Paper 56, 319p.
- Andrade, CLT, Freitas, JAD, Luz, LRQP (1991). Características físico-hídricas de solos arenosos de tabuleiro litorâneos. In: Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem, 9., 1991, Natal. *Anais...* Natal: ABID, 1991. v.1, p.1069-1095.
- Borim, ACA & Pinto, CAR (2006) Medição de umidade do solo através de sensores capacitivos. *Revista de Ciências Exatas e Tecnologia*, 1(1)51-60.
- Bortolon, L, Gianello, C, Conte, O, Oliveira, ES & Levien, R (2009). Equipamento para coleta de amostras indeformadas de solo para estudos em condições controladas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* [on-line], 33(6), 1929-1934. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000600042>
- Casaroli, D & Lier, QJV (2008). Critérios para determinação da capacidade de vaso. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32(1), 59-66. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000100007>
- Centinari, M, Poni, S, Filippetti, I, Magnanini, E & Intrieri, C (2009). Evaluation of an open portable chamber system for measuring cover crop water in a vineyard and comparison with a mini-lysimeter. Elsevier. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(11),1975-1982.
- Costa, É & Albuquerque, P (2014). Desenvolvimento e calibração de guias de onda para TDR. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 7(1), 173- 176.
- Courault, D, Seguin, B & Oliosio, A (2005). Review on estimation of evapotranspiration from remote sensing data: From empirical to numerical modeling approaches. *Irrigation and Drainage Systems*, 19(3-4), 223–249.
- Ferreira, MM, & Marcos, ZZ (1983). Estimativa da capacidade de campo de Latossolo Roxo distrófico e regossolo através do ponto de inflexão da curva característica de umidade. *Ciência e Prática*, 7, 96-101.
- Hemakumara, M, Kalma, J, Walker, J & Willgoose, G (2007). Downscaling of low resolution passive microwave soil moisture observations. 2007. In: *2º Workshop Internacional CAHMDA sobre o Ciclo da Água Terrestre: Modelagem e Assimilação de dados através de escalas de captação*, editado por A. J. Teuling et al., p. 67-71, Wageningen University, Wageningen, Países Baixos.
- Karmann, I. (2003) Ciclo da água: água subterrânea e sua ação geológica. In: Teixeira, W, Toledo, MCM, Fairchild, TR, Taioli, F. (Orgs.). *Decifrando a Terra*. 557p. 2.reimp. São Paulo: Oficina de Textos.
- Libardi, PL (2005). *Dinâmica da água no solo*. 2.ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo. 329p.

- Lima, FMC (1997). *Caracterização de um sensor para determinação da água disponível no solo*. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba. 71p. Dissertação Mestrado.
- Mello, CR, Oliveira, GC, Resck, DVS, Lima, JM, & Dias Júnior, MS (2002). Estimativa da capacidade de campo baseada no ponto de inflexão da curva característica. *Ciência e Agrotecnologia*, 26, 835-841.
- Merlin, O, Jacob, F, Wigneron, J-P, Walker, JP & Chehbouni, G (2012). Multidimensional Disaggregation of Land Surface Temperature Using High-Resolution Red, Near-Infrared, Shortwave-Infrared, and Microwave-L Bands. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50 (5), 1864-1880. DOI: [10.1109/TGRS.2011.2169802](https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2169802)
- Miranda, FR (2003). A distributed control system for priority-based site-specific irrigation. Knoxville, UT, USA: University of Tennessee. 137p. Doctor of Philosophy Thesis.
- Morais, MS, Cruz, TML, Teixeira, AS, Dantas, LA & Araújo, DCC (2015). Calibração de sensor capacitivo de umidade do solo destinado ao cultivo de hortaliças. In: *XXV CONIRD – Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem*, 08 a 13 de novembro de 2015. São Cristóvão/SE: UFS.
- Muñoz, JF, Tyler, S & Vauclin, M (2008). Mediciones de Evaporación com el domo. In: *Seminário Internacional em Cuendas del Norte de Chile*. Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de Ingeniería.
- Nassar, IN & Horton, R (1989). Water transport in unsaturated non isothermal salty soil: II. Theoretical development. *Soil Science, Society of America Journal* 53:1330-1337. <https://doi.org/10.2136/sssaj1989.03615995005300050005x>
- Nobre, P & Cavalcanti, IFA (2000). The prediction of drought in the Brazilian northeast: progress and prospects for the future. In: Wilhite, D. (Ed.). *Drought and Global Assessment*. Routledge, London, 1(389), 68-82. ISBN 0-415-16834-1.
- Philip, JR & Vries, DA (1957). Moisture movement in porous materials under temperature gradients. *Transactions America Geophysical Union*, 38, 222-232.
- Reichardt, K (1996). Capacidade de campo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 12, 211-216.
- Roque, W. Desenvolvimento de um multissensor eletrônico para medida da umidade, temperatura e condutividade elétrica do solo. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2008. 45p. Dissertação Mestrado.
- Santos, HG, Jacomine, PKT, Anjos, LHC, Oliveira, VA, Lumbreras, JF, Coelho, MR, Almeida, JÁ, Araújo Filho, JC, Oliveira, JB & Cunha, TJF (2018). *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 5ed.rev.ampl. Brasília, DF: Embrapa. 390p.
- Stannard, DI & Wertz, MA (2006) Partitioning evapotranspiration in sparsely vegetated rangeland using a portable chamber. *Water Resources Research*, 42(W02413), 1-13. <https://doi.org/10.1029/2005WR004251>

- Tucci, CEM (Org.). (2004) *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. 3ed. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, ABRH. 943p.
- Vidal, J.E.J. (2009). *Evaporación desde napas freáticas someras en cuencas endorreicas del altiplano Chileno*. Santiago de Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile - Escuela de Ingeniería. 180p. Tesis of Magíster.
- Zatarain, F, Fuentes, C, Haverkamp, R & Antonio, ACD (2003). Predicción de la forma de la característica de humedad del suelo a partir de la curva granulométrica. In: Congreso Nacional de Irrigación. 13. Zacatecas. *Resumos...* Zacatecas: ANEI, 2003. Desarrollo y transferencia de tecnología de riego y drenaje, 2, 212-219.