

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

THIAGO LESSA DE ALMEIDA

**USO DE SENSOR DE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE E UMIDADE DO
SOLO PARA MANEJO DE FERTIRRIGAÇÃO**

**VIÇOSA – MG
2025**

THIAGO LESSA DE ALMEIDA

USO DE SENSOR DE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE E UMIDADE DO SOLO PARA MANEJO DE FERTIRRIGAÇÃO

Relatório final, apresentado à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências para a obtenção do título de Engenheiro Agrícola e Ambiental.

Orientador: Andre Luiz de Freitas Coelho

Coorientadora: Catariny Cabral Aleman

**VIÇOSA – MG
2025**


THIAGO LESSA DE ALMEIDA

USO DE SENSOR DE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE E UMIDADE DO SOLO PARA MANEJO DE FERTIRRIGAÇÃO


Relatório final, apresentado a Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências para a obtenção do título de Engenheiro Agrícola e Ambiental.

APROVADO: 30 de junho de 2025.

Assentimento:

Documento assinado digitalmente
 **THIAGO LESSA DE ALMEIDA**
Data: 10/07/2025 16:29:52-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Thiago Lessa de Almeida
Autor

Documento assinado digitalmente
 **ANDRE LUIZ DE FREITAS COELHO**
Data: 10/07/2025 18:42:07-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Andre Luiz de Freitas Coelho
Orientador

Dedico à minha avó Geralda (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, Luciene, e ao meu pai, Roberto, por todo o apoio, amor e educação transmitidos durante toda a minha vida.

Aos meus familiares e amigos, que fizeram parte da minha trajetória e me ajudaram a chegar até aqui.

À minha companheira, Amanda, por todo amor, carinho e incentivo em minha vida.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Andre Coelho, por todo o conhecimento compartilhado, pela paciência e pelo apoio neste trabalho e durante minha atuação como bolsista de iniciação científica.

À MSc. Beatriz Vargas, à Profa. Dra. Catariny Aleman e à Profa. Dra. Fernanda por toda contribuição neste trabalho e pelos conhecimentos compartilhados durante minha graduação.

Ao Grupo de Estudo em Tecnologia Agrícola e Mecanização (GETAM), pela oportunidade e por toda a experiência compartilhada durante as reuniões e capacitações.

Aos técnicos José Antônio e Vicente, pelo auxílio neste trabalho e pelos conhecimentos transmitidos ao longo da minha graduação.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Agrícola, por proporcionarem a estrutura e os conhecimentos necessários para o desenvolvimento deste projeto.

“Uma jornada de mil milhas começa com um único passo”.

(Lao Tzu)

RESUMO

ALMEIDA, Thiago Lessa de, Universidade Federal de Viçosa, junho de 2025. **Uso de sensor de condutividade elétrica aparente e umidade do solo para manejo de fertirrigação.** Orientador: Andre Luiz de Freitas Coelho. Coorientadora: Catariny Cabral Aleman.

O uso racional de fertilizantes é essencial para o manejo eficiente dos recursos hídricos e do solo. Para isso, torna-se indispensável a adoção de sensores e técnicas de agricultura de precisão que possibilitem a otimização dos insumos agrícolas. Objetivou-se utilizar o multisensor *Soil Smart Sensor* para o monitoramento da condutividade elétrica aparente (CEa) e da umidade do solo em canteiro de alface fertirrigado. Adaptou-se o multisensor para operar de forma estacionária, sendo necessário realizar modificações no programa e integrar um módulo de relógio de tempo real. A medição da CEa foi baseada no método da resistividade, empregando quatro eletrodos dispostos linearmente e equidistantes. Um sinal elétrico foi gerado por meio de dois eletrodos externos. Um resistor shunt de 180 ohms foi inserido em série com um dos eletrodos, permitindo a medição da corrente elétrica. O campo elétrico induzido no solo teve seu potencial captado pelos dois eletrodos intermediários. O sensor de umidade operou com base no princípio capacitivo, aplicando um sinal elétrico no solo através de dois eletrodos. Para calibração do sensor de umidade, foram realizadas cinco medições de tensão gerada pelo circuito, com coleta de três amostras de solo para cada leitura, sendo a umidade determinada pelo método da estufa. A curva de calibração foi ajustada por meio de modelo logarítmico implementado em programa em *Python*, sendo o coeficiente de determinação (R^2) utilizado como critério de ajuste. O experimento foi conduzido em dois canteiros de alface. Em cada canteiro, instalou-se um multisensor. O sistema de irrigação por gotejamento foi composto por mangueiras com gotejadores de vazão de $1,32 \text{ L h}^{-1}$. No Canteiro 1 foi utilizada apenas irrigação e no Canteiro 2 aplicou-se fertirrigação. A CEa e a umidade do solo foram registradas automaticamente a cada 1 h. Foram calculadas médias aritméticas diárias dos valores de CEa e umidade, sendo elaborados gráficos em função dos dias de experimento, além da relação entre a umidade e CEa do solo. O processamento dos dados e a geração dos gráficos foram realizados com auxílio de programa em *Python*. A curva de calibração dos sensores de umidade demonstrou tendência de aumento da tensão elétrica conforme a umidade do solo diminuía. Os valores de R^2 obtidos para os multisensores foram de 0,959 e 0,998. Antes da primeira fertirrigação, a CEa no Canteiro 1 era superior à do Canteiro 2 e, após as aplicações de fertilizante, a CEa do Canteiro 2 tornou-se maior. Identificou-se uma tendência de redução da umidade do solo após as fertirrigações, o que contribuiu para a diminuição da CEa. Em dias

específicos do experimento, como nos dias 17 e 28, a variação da umidade foi de apenas 0,24%, enquanto a CEa apresentou variação de 16,3%, comportamento associado às alterações estruturais e redistribuição dos poros do solo durante os processos de umedecimento e secagem. Dessa forma, a versão adaptada do *Soil Smart Sensor* demonstrou capacidade de detectar variações na condutividade elétrica aparente e na umidade do solo em condições de campo, revelando seu potencial para aplicação no monitoramento e manejo da fertirrigação.

Palavras-chave: Agricultura de precisão; Sistema embarcado; Método capacitivo.

ABSTRACT

ALMEIDA, Thiago Lessa de, Universidade Federal de Viçosa, July 2025. **Use of apparent soil electrical conductivity and soil moisture sensor for fertigation management.** Advisor: Andre Luiz de Freitas Coelho. Co-adviser: Catariny Cabral Aleman.

Rational fertilizer use is essential for the efficient management of water and soil resources. To achieve this, the adoption of sensors and precision agriculture techniques becomes indispensable for optimizing agricultural inputs. This study aimed to use the multisensor Soil Smart Sensor to monitor apparent electrical conductivity (ECa) and soil moisture in a fertigated lettuce bed. The multisensor was adapted to operate in a stationary mode, requiring modifications to the software and the integration of a real-time clock module. ECa measurement was based on the resistivity method, using four electrodes arranged linearly and equidistantly. An electrical signal was generated through two external electrodes. A 180-ohm shunt resistor was inserted in series with one of the electrodes, allowing the measurement of electric current. The electric field induced in the soil had its potential measured by the two intermediate electrodes. The soil moisture sensor operated based on the capacitive principle, applying an electrical signal to the soil through two electrodes. For the calibration of the moisture sensor, five voltage measurements were carried out, with three soil samples collected for each reading. Soil moisture was determined using the gravimetric oven-drying method. The calibration curve was fitted using a logarithmic model implemented in Python, with the coefficient of determination (R^2) used as the adjustment criterion. The experiment was conducted in two lettuce beds, with a multisensor installed in each. The drip irrigation system consisted of hoses with emitters delivering 1.32 L h^{-1} , spaced 0.30 m apart. In Bed 1, only irrigation was applied, while in Bed 2, fertigation was used. ECa and soil moisture were automatically recorded every hour. Daily arithmetic means of ECa and soil moisture were calculated, and graphs were generated as a function of the experimental days, including the relationship between soil moisture and ECa. Data processing and graph generation were performed using Python. The calibration curve of the moisture sensors showed a tendency for voltage to increase as soil moisture decreased. The R^2 values obtained for the two multisensors were 0.959 and 0.998. Before the first fertigation event, the ECa in Bed 1 was higher than in Bed 2; after fertilizer application, ECa in Bed 2 became higher. A trend of decreasing soil moisture was identified after fertigation events, which contributed to a reduction in ECa. On specific experimental days, such as days 17 and 28, soil moisture varied by only 0.24%, while ECa varied by 16.3%, a behavior likely associated with structural changes and pore redistribution in the soil during

wetting and drying cycles. Thus, the adapted version of the Soil Smart Sensor demonstrated the ability to accurately detect variations in apparent electrical conductivity and soil moisture under field conditions, highlighting its potential for monitoring and managing fertigation.

Keywords: Precision agriculture; Embedded system; Capacitive method.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. MATERIAL E MÉTODOS	14
2.1. Calibração do sensor de umidade do solo	16
2.2. Monitoramento da condutividade elétrica aparente e umidade do solo em canteiro de alface com manejo por fertirrigação.....	17
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	20
3.1. Calibração do sensor de umidade do solo	20
3.2. Monitoramento da condutividade elétrica aparente e umidade do solo em canteiro de alface com fertirrigação	21
4. CONCLUSÃO.....	24
REFERÊNCIAS	25

1. INTRODUÇÃO

Em escala global, o Brasil ocupa uma posição de destaque como produtor agrícola, resultado de intensos investimentos em programas de pesquisa e desenvolvimento. Tais iniciativas contemplam avanços com a incorporação de métodos e técnicas inovadoras de cultivo, como a utilização de sistemas de gestão com inteligência artificial, internet das coisas e sensores (MUSHI; SERUGENDO; BURGI, 2022). Nesse contexto, destaca-se a intensificação de práticas da agricultura de precisão, como utilização de sensores para fornecer dados a algoritmos desenvolvidos para automatizar a aplicação de insumos (QUEIROZ *et al.*, 2021).

A aplicação de fertilizantes é essencial para a produção agrícola e sua utilização de maneira eficiente e sustentável depende da combinação de diversos fatores. Isso inclui o manejo eficiente das áreas agrícolas reduzindo a degradação do solo decorrente do uso excessivo de insumos e a gestão adequada dos recursos hídricos (GARG; RUMJIT; ROY, 2024). A implementação de técnicas que contribuem para o planejamento de operações agrícolas de acordo com a variabilidade temporal das características do solo ou das plantas pode permitir a otimização dos insumos. Para entendimento de tais variabilidades, é preciso obter e analisar estes atributos, permitindo ajustar a dose de insumos de forma eficiente e em escala variável (TOMAZ *et al.*, 2022).

A fertirrigação é uma alternativa para aplicar insumos em cultivos agrícolas, reduzindo perdas por lixiviação ou volatilização dos fertilizantes. Fatores como a difusão de novas tecnologias, o aumento do custo da mão de obra e a necessidade de otimização de recursos agrícolas contribuem para a expansão da fertirrigação no Brasil, especialmente em sistemas de irrigação localizadas e por pivô central. Esse aumento intensifica a demanda por fertilizantes e equipamentos específicos para fertirrigação, fomentando o desenvolvimento de produtos adaptados às diferentes condições regionais e estimulando a geração de informações técnicas atualizadas (BORGES; COELHO; TRINDADE, 2009).

O manejo inadequado da fertirrigação pode resultar em problemas para a planta como a deficiência nutricional. Essa deficiência compromete processos fisiológicos e metabólicos essenciais, resultando em sintomas visíveis que variam conforme o nutriente em falta. A escassez de macronutrientes, como nitrogênio, fósforo, potássio e cálcio, pode levar ao amarelamento das folhas, necrose, crescimento reduzido e menor produção. Esses distúrbios aumentam a suscetibilidade ao desenvolvimento de pragas e doenças, afetando negativamente a qualidade e a produtividade das culturas (LIMA FILHO, 2020).

Já a aplicação excessiva de fertilizantes pode resultar na salinização do solo, comprometendo o desenvolvimento e a produtividade das culturas. As plantas sensíveis à salinidade sofrem redução do turgor, levando-as ao déficit hídrico causado pela osmose. Outros efeitos que a alta concentração de sais na solução do solo pode provocar nas plantas são desequilíbrios nutricionais, interferências no equilíbrio hormonal e intoxicação por íons, como, por exemplo, Al^{3+} , Mn^{2+} , NH_4^+ , Na^+ , Cl^- e B^{3+} . Esses fatores podem reduzir a plasticidade celular, diminuir a permeabilidade da membrana citoplasmática e afetar o processo de fotossíntese, devido à redução do conteúdo de clorofila nas plantas. Em relação ao solo, a alta concentração de sais pode levar à desestruturação do solo, reduzindo a condutividade hidráulica e dificultando o desenvolvimento do sistema radicular das plantas (ADEYEMO *et al.*, 2022; OMARA *et al.*, 2022).

Para evitar a falta ou o excesso de nutrientes no solo durante o manejo da fertirrigação, é essencial monitorar a aplicação e garantir que as doses sejam ajustadas de acordo com as características químicas e físicas do solo e a demanda nutricional da planta. Com a utilização de sensores é possível avaliar a presença de sais e detectar possíveis áreas de excesso e escassez. Com base nos dados obtidos, é possível ajustar as operações de fertirrigação, evitando os problemas que poderiam comprometer a qualidade da planta e do solo, preservando a produtividade e reduzindo impactos ambientais.

A condutividade elétrica aparente (CEa) é um parâmetro para avaliar a necessidade de fertirrigação da planta. Em sistemas hidropônicos, a CEa tem correlação direta com o crescimento, com a produção e com o teor de nitrogênio nas plantas de alface. Em níveis baixos de CEa, as plantas podem apresentar deficiências nutricionais, particularmente de nitrogênio e potássio, resultando em menor produção de matéria fresca e seca. Por outro lado, níveis elevados de CEa, associados ao uso de água salina ou soluções concentradas, elevam o estresse osmótico, comprometendo a absorção de água e nutrientes, resultando no decréscimo da massa fresca e seca de folhas, caule e raízes (GÓIS *et al.*, 2024; KAPPEL *et al.*, 2021). Esses efeitos evidenciam a importância do monitoramento e do ajuste da CEa na solução nutritiva para otimizar o crescimento e a qualidade das plantas cultivadas.

A CEa do solo é influenciada por atributos físicos e químicos, incluindo os teores de fósforo e potássio, capacidade de troca catiônica (CTC), pH, fósforo remanescente, teor de argila e matéria orgânica. Nesse contexto, destaca-se a correlação existente entre teores de nutrientes com a CEa do solo, como o potássio. Esse nutriente é essencial para o crescimento e desenvolvimento das plantas. Do ponto de vista físico, a CEa do solo depende da porosidade, da umidade, da estrutura do solo, da distribuição e formato das partículas, da anisotropia

estrutural e da temperatura. Dessa forma, a CEa é considerada um indicador tanto da fertilidade quanto das características físicas do solo (FRIEDMAN, 2005; GUARÇONI *et al.*, 2023; SILVA *et al.*, 2022).

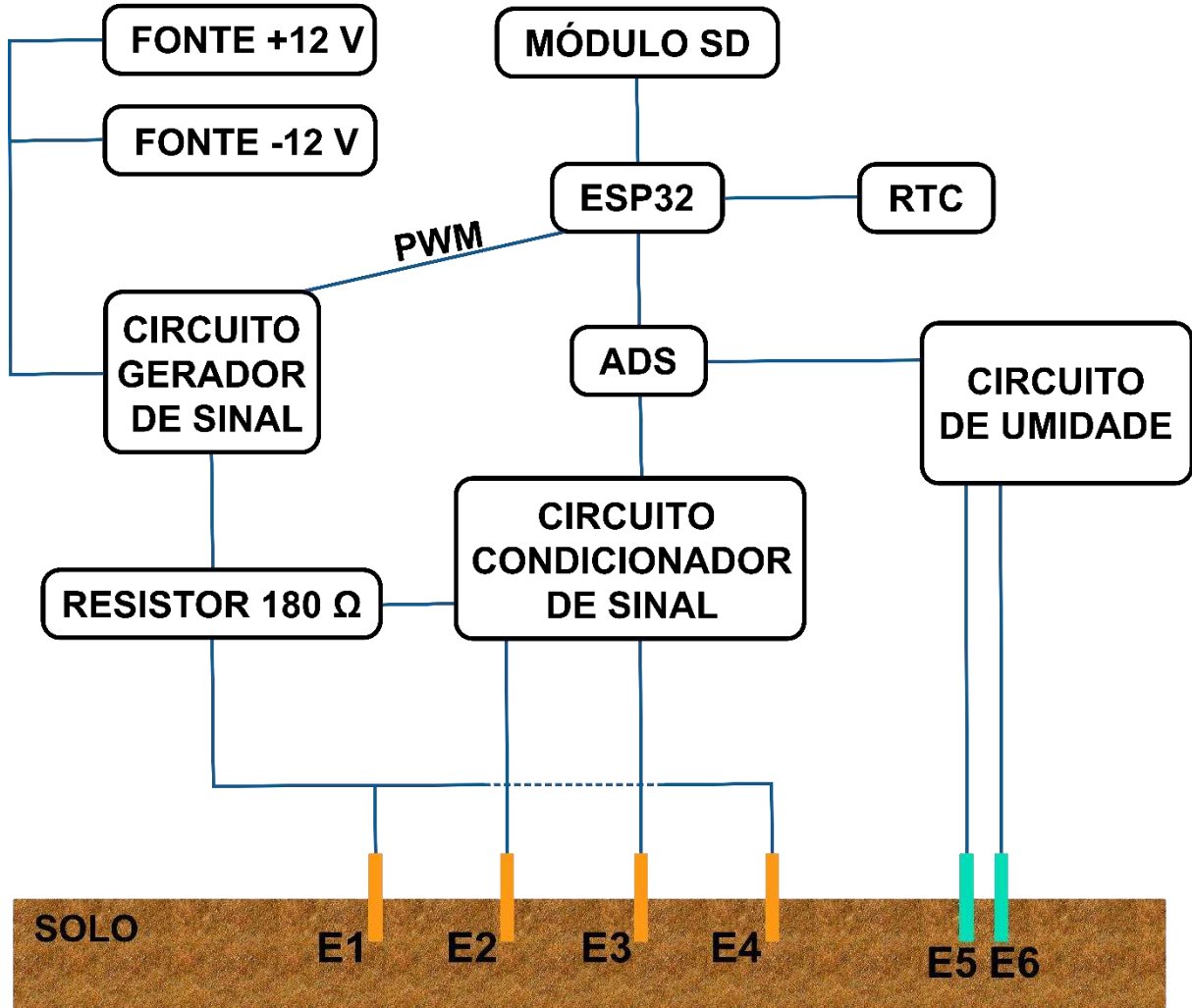
A pouca utilização de sensores de CEa para o manejo de fertirrigação, associada ao elevado custo dos dispositivos atualmente disponíveis no mercado, restringe a adoção de práticas mais precisas e eficientes na agricultura. Assim, objetivou-se com o presente trabalho utilizar a plataforma multisensor *Soil Smart Sensor* para monitorar a condutividade elétrica aparente e umidade do solo em canteiro de alface fertirrigado. Para isso, foi necessário adaptar o multisensor para atuar de forma estacionária e calibrar o sensor de umidade do solo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O multisensor utilizado para medições da CEa e umidade do solo foi desenvolvido a partir da plataforma portátil multisensor de baixo custo com operação via *tablet*, denominada *Soil Smart Sensor*, desenvolvido por Queiroz *et al.* (2016, 2017, 2020) e Sousa *et al.* (2021, 2023). O multisensor *Soil Smart Sensor* foi adaptado para operar de forma estacionária, passando por modificações no programa de computador e pela integração de um módulo de relógio de tempo real (RTC), com o intuito de realizar medições horárias da CEa e da umidade do solo. A adaptação do *Soil Smart Sensor* foi realizada no Laboratório de Mecanização Agrícola, vinculado ao Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (DEA/UFV), durante os meses de fevereiro e março de 2025. Posteriormente, o experimento foi conduzido na Área Experimental de Irrigação e Drenagem do DEA/UFV, com início dia 15 de abril de 2025 e duração de 34 dias.

No multisensor *Soil Smart Sensor*, a medição da CEa do solo foi realizada utilizando o método de resistividade, empregando quatro eletrodos dispostos em linha e igualmente espaçados, configurados em uma matriz de Wenner (Figura 1).

Figura 1 – Esquema do multisensor *Soil Smart Sensor* para medição da condutividade elétrica aparente e umidade do solo. PWM – *Pulse Width Modulation*; ADS – conversor analógico-digital ADS1015; RTC – módulo de relógio em tempo real; ESP32 – placa de desenvolvimento; E1, E2, E3 e E4 – eletrodos do sensor de condutividade elétrica aparente do solo; E5 e E6 – eletrodos do sensor de umidade



Fonte: Autores.

Os eletrodos utilizados no sistema foram modificados em relação ao utilizado por Sousa *et al.* (2023). Em substituição aos eletrodos de aço inoxidável com diâmetro de 6,35 mm e comprimento de 100 mm, adotaram-se barras de aço inoxidável com seção transversal retangular de 25,40 mm × 4,76 mm e comprimento de 200 mm. Manteve-se o espaçamento de 300 mm entre os eletrodos. O sensor de CEa gerou um sinal bipolar no solo, com frequência de 5 Hz e amplitude variando entre -9 e 9 V, por meio dos eletrodos E1 e E4 (Figura 1). Um resistor *shunt* de 180 ohms foi instalado em série com o eletrodo E1, permitindo medir a corrente elétrica do sinal emitido. O sinal gerado induziu um campo elétrico no solo, cujo potencial foi

medido pelos eletrodos intermediários E2 e E3 (Figura 1). Os sinais elétricos de corrente e potencial nos eletrodos intermediários foram condicionados e lidos pela ESP32 (*Espressif System*, China) com intermédio de um conversor analógico digital 12 bits ADS1015.

A CEa foi calculada no sensor por meio da Equação 1.

$$\sigma = \frac{i}{2\pi \cdot V \cdot a} \quad (1)$$

Em que: σ é a condutividade elétrica aparente do solo, em mS/m; i é a corrente do sinal emitido no solo, em A; V é a diferença de potencial nos eletrodos E2 e E3, em V; e a é o espaçamento entre eletrodos, em m.

O sensor de umidade do *Soil Smart Sensor* funcionou com base no princípio capacitivo. Para isso, um sinal elétrico pulsado foi aplicado ao solo através dos eletrodos E5 e E6 (Figura 1). Os eletrodos com diâmetro de 6,35 mm e comprimento de 100 mm, utilizados por Sousa *et al.* (2023), foram substituídos por barra em formato retangular 25,40 mm × 4,76 mm e comprimento 200 mm. O espaçamento de 30 mm entre os eletrodos foi mantido. O solo atuou como um capacitor em um circuito de filtro resistivo-capacitivo. Um circuito detector de pico de tensão elétrica foi responsável por gerar um sinal, cuja tensão está diretamente relacionada à umidade do solo na área compreendida entre os eletrodos E5 e E6. Um relé foi utilizado no circuito para evitar interferências entre os sinais utilizados para medir a CEa e a umidade do solo. Os dados medidos, associados à data e hora, foram salvos em cartão de memória.

2.1. Calibração do sensor de umidade do solo

Para o sensor de umidade de solo do *Soil Smart Sensor* foi necessário obter a curva de calibração para a determinação da umidade em função da tensão elétrica gerada pelo circuito. Para a construção da curva de calibração, foram utilizados dados de cinco medições realizadas com o solo em diferentes umidades. Em cada uma dessas leituras, foram coletadas três amostras de solo por canteiro para determinação da umidade gravimétrica, em % base seca (% b. s.), de acordo com o procedimento estabelecido pela NBR 6457/2016 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016). A tensão elétrica gerada pelo circuito para a respectiva umidade foi obtida dos dados salvos no cartão de memória do *Soil Smart Sensor*. Foi utilizado programa em *Python* para ajustar a curva de calibração, na forma logarítmica (Equação 2), e o coeficiente de determinação (R^2) para avaliar o ajuste da curva obtida.

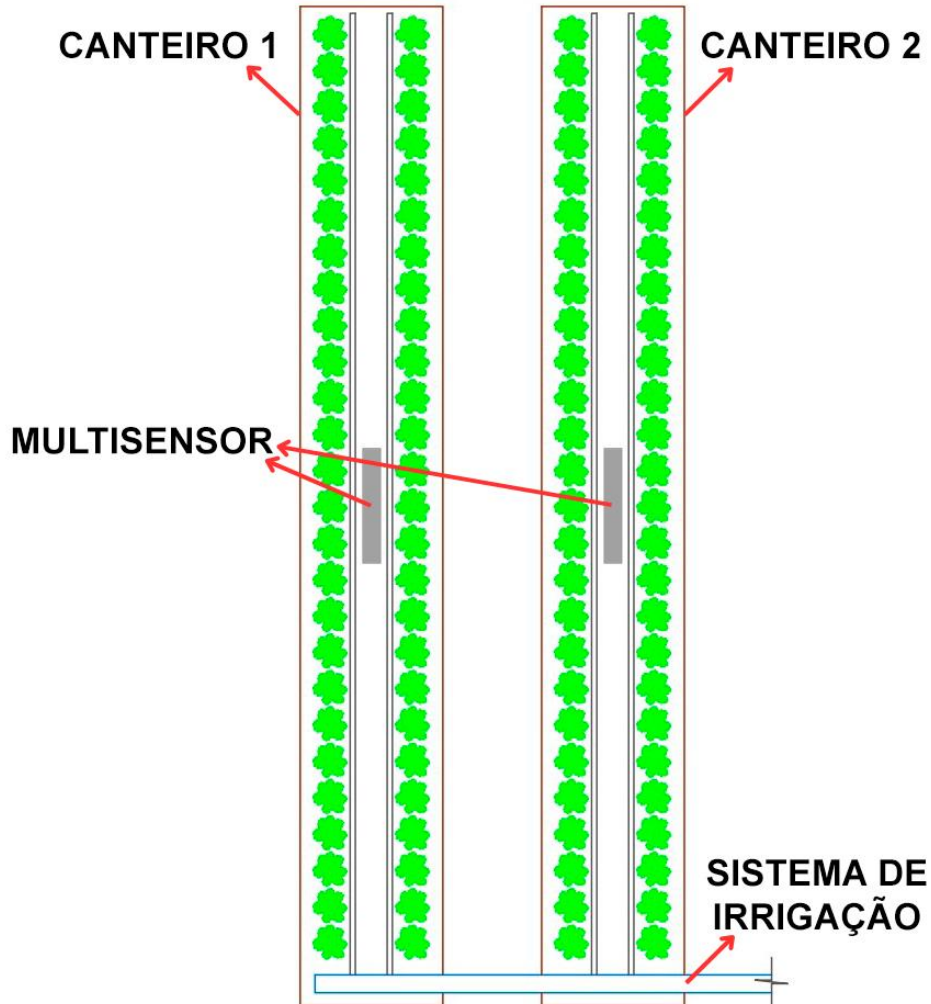
$$y = a \cdot \log(x) + b \quad (3)$$

Em que: y é a umidade gravimétrica, em % b.s.; x é a tensão elétrica, em V; a e b são as constantes.

2.2. Monitoramento da condutividade elétrica aparente e umidade do solo em canteiro de alface com manejo por fertirrigação

O cultivo de alface foi realizado em dois canteiros, cada um com 3,98 m². Foram adquiridas mudas de alface lisa em viveiro localizado no município de Coimbra-MG. O transplântio foi realizado de maneira manual, com espaçamento de 0,30 m entre plantas e 0,30 m entre linhas, totalizando 172 plantas. Em ambos os canteiros, instalou-se um multisensor *Soil Smart Sensor*, utilizado para a coleta dos dados experimentais de CEa e umidade do solo a partir da primeira semana após o transplântio. (Figura 2).

Figura 2 – Esquema da disposição do multisensor *Soil Smart Sensor* e do sistema de irrigação nos canteiros. Canteiro 1 – cultivo de alface com irrigação por gotejamento; Canteiro 2 – cultivo de alface com fertirrigação



Fonte: Autores.

O sistema de irrigação por gotejamento instalado na Área Experimental de Irrigação e Drenagem do DEA/UFV é composto por mangueiras com diâmetro de 16 mm, nas quais estão inseridos gotejadores com vazão de $1,32 \text{ L h}^{-1}$, dispostos com espaçamento de 0,30 m. No Canteiro 1, foi empregada apenas irrigação por gotejamento nos dias 5, 11 e 27 de experimento. No Canteiro 2, foi adotada fertirrigação, com aplicação de cloreto de potássio e ureia via sistema de irrigação por gotejamento nos dias 5 e 11 de experimento e adotada irrigação no dia 27 de experimento. A aplicação de fertilizante foi dividida em dois dias de experimento. Após a segunda fertirrigação, realizada no dia 11 de experimento, não foram realizadas novas irrigações com o objetivo de permitir o monitoramento da dinâmica de secagem do solo em

condições naturais por meio do *Soil Smart Sensor*. Entretanto, uma nova irrigação foi realizada no dia 27 de experimento, devido aos dados obtidos pelos tensiômetros instalados em cada canteiro, indicando um nível de umidade no solo abaixo do ideal que poderia comprometer o desenvolvimento da cultura da alface.

A quantidade de fertilizantes aplicada foi determinada com base nas recomendações de Ribeiro *et al.* (1999), correspondendo a 80,0 kg ha⁻¹ de cloreto de potássio e 160,0 kg ha⁻¹ de ureia. O tempo total destinado às duas fertirrigações realizadas no Canteiro 2 foi de 1 h, o mesmo período adotado para a irrigação do Canteiro 1, assegurando que ambos os canteiros recebessem volumes equivalentes de água.

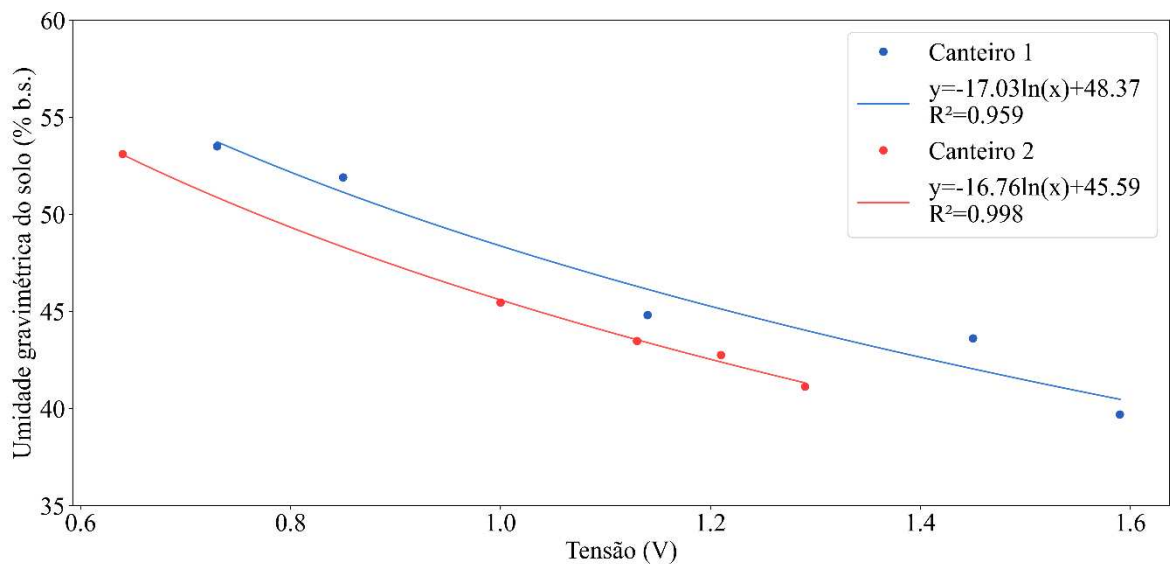
A CEa e a umidade do solo foram medidos, automaticamente, pelo *Soil Smart Sensor* a cada 1 h. Para fins de comparação, foi calculada a média aritmética diária dos dados de CEa e umidade do solo. Foram gerados gráficos dos dados em relação ao dia de experimento e da umidade em função da CEa. O processamento dos dados e a criação dos gráficos ocorreu por meio de programa desenvolvido em *Python*.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Calibração do sensor de umidade do solo

A curva de calibração dos sensores de umidade apresentou comportamento de aumento de tensão à medida que a umidade do solo diminuiu (Figura 3).

Figura 3 – Curvas e equações de calibração para o sensor de umidade do multisensor *Soil Smart Sensor* em cada canteiro. Canteiro 1 – cultivo de alface com irrigação por gotejamento; Canteiro 2 – cultivo de alface com fertirrigação



Fonte: Autores.

Embora apresentem comportamentos semelhantes, as equações de calibração obtidas neste estudo (Equações 3 e 4) diferem daquela proposta por Sousa *et al.* (2023) (Equação 5). Os coeficientes de determinação (R^2) para as curvas ajustadas aos dados do Canteiro 1, Canteiro 2 e do modelo de Sousa *et al.* (2023) foram de 0,959; 0,998 e 0,996, respectivamente, evidenciando que os modelos se ajustaram bem aos dados em todos os casos.

$$y = -17,03 \cdot \log(x) + 48,37 \quad (3)$$

$$y = -16,76 \cdot \log(x) + 45,59 \quad (4)$$

$$y = 6,397 \cdot 10^{-5}x^2 - 0,125x + 68,999 \quad (5)$$

Em que: y é a umidade gravimétrica, em % b. s.; e x é a tensão elétrica, em V.

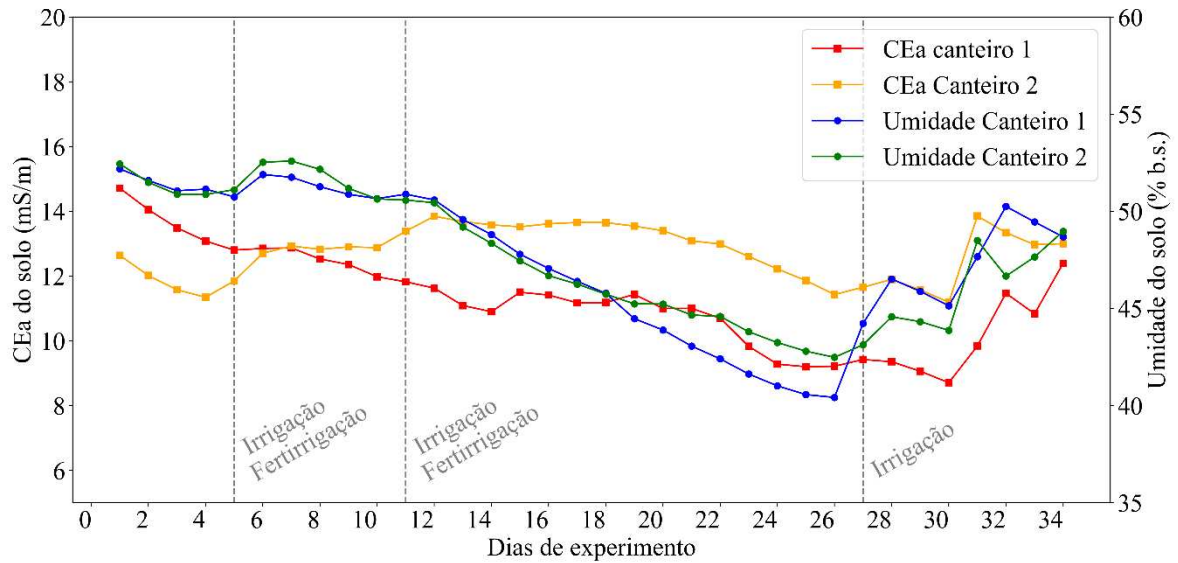
Essa diferença entre as equações obtidas neste trabalho e a proposta por Sousa *et al.* (2023) deve-se às mudanças significativas no multisensor *Soil Smart Sensor*, como troca do computador *BeagleBone Black* pela placa de desenvolvimento ESP32 e troca dos eletrodos cilíndricos por barra retangular. Além disso, o solo utilizado por Sousa *et al.* (2023) para calibração não é o mesmo.

Obtiveram-se equações de calibração diferentes para os sensores dispostos no Canteiro 1 e no Canteiro 2. Uma hipótese é a influência de características físicas e químicas do solo sobre a resposta dos sensores de umidade de solo capacitivo (RASHEED *et al.*, 2022). Já que a calibração foi realizada após a aplicação de fertilizante no Canteiro 2, a salinidade do solo pode ter influenciado na resposta do sensor. Outro fator é a variação de propriedades físicas do solo entre os dois pontos em que os sensores estão, como, por exemplo, estrutura e porosidade.

3.2. Monitoramento da condutividade elétrica aparente e umidade do solo em canteiro de alface com fertirrigação

No Canteiro 1, a CEa média do solo variou de 8,71 a 14,71 mS m⁻¹ e a umidade média do solo variou de 40,42 a 52,18 % b.s. O Canteiro 2 apresentou valores médios de 11,19 a 13,85 mS m⁻¹ para a CEa do solo e de 42,48 a 52,59 % b.s. para a umidade do solo (Figura 4). Antes da primeira fertirrigação, a CEa no Canteiro 1 era maior que a do Canteiro 2. Após as fertirrigações, observou-se aumento da CEa no Canteiro 2, que se tornou maior em relação à CEa do outro canteiro. Esse comportamento era esperado, visto que a adição de fertilizante causa aumento da CEa do solo, conforme relatado por Dias *et al.* (2006) e Medeiros *et al.* (2018).

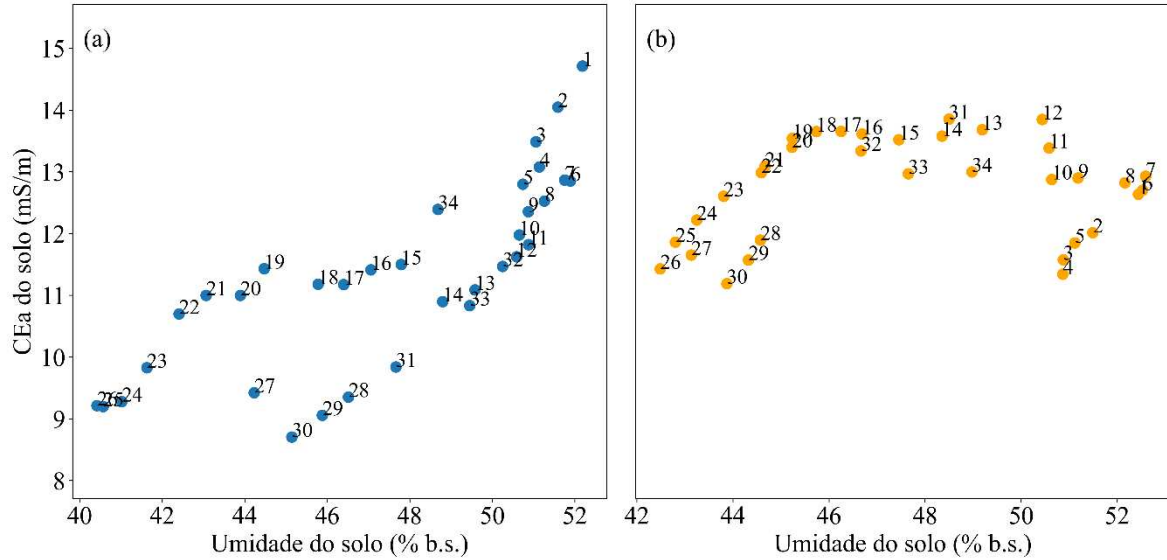
Figura 4 – Variação da condutividade elétrica aparente (CEa) e umidade do solo nos dois canteiros durante o cultivo da alface



Fonte: Autores.

Observou-se na Figura 4 uma tendência de queda da umidade do solo após as irrigações dos dias 5 e 11 de experimento no Canteiro 1. Este fato também foi observado após as fertirrigações dos dias 5 e 11 de experimento no Canteiro 2. Isso ocorreu devido à perda de água no solo por evaporação e devido à absorção realizada pelas raízes das plantas (LIMA *et al.*, 2025). Em razão da queda de umidade, observou-se uma tendência de diminuição da CEa do solo (Figura 5). Isso ocorreu porque a CEa foi influenciada pela umidade, conforme descrito por Sousa *et al.* 2023.

Figura 5 – Relação entre a umidade do solo e a condutividade elétrica aparente (CEa) do solo no (a) Canteiro 1 – cultivo de alface com irrigação por gotejamento – e no (b) Canteiro 2 – cultivo de alface com fertirrigação –, com indicação do dia de experimento em cada ponto



Fonte: Autores.

Embora alguns valores de umidade tenham se mantido próximos em diferentes situações, os valores de CEa do solo apresentaram variações. Como exemplo, os valores de umidade do solo obtidos nos dias 17 e 28 foram, respectivamente, 46,40 e 46,51 % b.s., enquanto os valores de CEa foram 11,17 e 9,35 mS m^{-1} , respectivamente. Esses valores correspondem a variações de 0,24 % para a umidade e 16,3 % para a CEa, respectivamente. Uma hipótese para esse comportamento é que o umedecimento e secagem do solo podem modificar a configuração estrutural e a distribuição dos poros, interferindo na CEa (WEBBER *et al.*, 2014). No Canteiro 2, foi observado um comportamento semelhante ao registrado no Canteiro 1. Apesar disso, a variação entre os valores máximos e mínimos da CEa foi diferente, sendo a variação no Canteiro 1 de 8,71 até 14,7 mS m^{-1} e, no Canteiro 2, de 11,2 até 13,8 mS m^{-1} .

4. CONCLUSÃO

A versão modificada do multisensor *Soil Smart Sensor* foi capaz de detectar variações de condutividade elétrica aparente (CEa) e umidade do solo em ambos os canteiros avaliados. No canteiro que recebeu fertirrigação, a amplitude dos dados de CEa em função da umidade foi inferior. Esses resultados evidenciam o potencial para utilização do *Soil Smart Sensor* no manejo da fertirrigação. Propõe-se, para trabalhos futuros, a replicação deste experimento em diferentes condições edafoclimáticas e com outras plantas cultivadas, a fim de avaliar a eficiência do sensor.

REFERÊNCIAS

- ADEYEMO, T.; KRAMER, I.; LEVY, G. J.; MAU, Y. Salinity and sodicity can cause hysteresis in soil hydraulic conductivity. **Geoderma**, v. 413, p. 115765, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457: **Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro, p. 14. 2016.
- BORGES, A. L.; COELHO, E. F.; TRINDADE, A. V. **Fertirrigação em fruteiras tropicais**. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical, 2009.
- DIAS, N. S. et al. Manejo da fertirrigação e controle da salinidade do solo sob ambiente protegido, utilizando-se extratores de solução do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.9, p.496-504, out./dez. 2005.
- FRIEDMAN, S. P. Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.46, n.1-3, p. 45-70, 2005
- GARG, S.; RUMJIT, N. P.; ROY, S. Smart agriculture and nanotechnology: Technology, challenges, and new perspective. **Advanced Agrochem**, v. 3, n. 2, p. 115-125, 2024.
- GÓIS, H. M. D. M. *et al.* Lettuce growing in different hydroponic systems and nutrient concentrations of the nutrient solution. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 28, n. 8, p. e279686, 2024.
- GUARÇONI, A.; DEGLI ESPOSTI, M. D.; CAETANO, L. C. S. Doses de nitrogênio e potássio para fertirrigação do morangueiro e sua influência em características químicas do solo. **Scientia Plena**, v. 19, n. 8, 2023.
- KAPPEL, Noémi et al. EC sensitivity of hydroponically-grown lettuce (*Lactuca sativa* L.) types in terms of nitrate accumulation. **Agriculture**, v. 11, n. 4, p. 315, 2021.
- LIMA, E. L. L.; CARDOSO, J. F.; SANTOS NETO S. M.; COSTA, I. R. C.; MELO, T. D. A. T.; COUTINHO, A. P. Análise de Sensibilidade da Umidade do Solo com Hydrus 1D no Município de Garanhuns-PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 18(04), 3209-3222, 2025.
- LIMA FILHO, O. F. Desordens nutricionais em plantas. Dourados: **Embrapa Agropecuária Oeste**, 2020. (Comunicado Técnico, 257). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1122027/1/COT-257-2020.pdf> Acesso em: 13 de jan. 2025.
- MEDEIROS, W. N.; VALENTE, D. S. M.; QUEIROZ, D. M.; PINTO, F. A. C.; ASSIS, I. R. Apparent soil electrical conductivity in two different soil types. **Revista Ciência Agronômica**, v. 49, n. 1, p. 43-52, 2018

MUSHI, G. E.; SERUGENDO, G. M.; BURGI, P. Y. Digital technology and services for sustainable agriculture in Tanzania: A literature review. **Sustainability**, v. 14, n. 4, p. 2415, 2022.

OMARA, A. E. *et al.* Collaborative impact of compost and beneficial rhizobacteria on soil properties, physiological attributes, and productivity of wheat subjected to deficit irrigation in salt affected soil. **Plants**, v. 11, n. 7, p. 877, 2022.

QUEIROZ, D. M. D.; COELHO, A. L. D. F.; VALENTE, D. S. M.; SCHUELLER, J. K. Sensors applied to Digital Agriculture: A review. **Revista Ciência Agronômica**, v. 51, 2021 (Paper Number e20207751)

QUEIROZ, D. M.; LEE, W. S.; SCHUELLER, J. K. Development of a portable soil sensor system using BeagleBone Black. In: **2016 ASABE Annual International Meeting**. St. Joseph: ASABE, 2016. (Paper Number 162447581).

QUEIROZ, D. M.; LEE, W. S.; SCHUELLER, J. K. SOUSA, E.D. T. S. Development and testing of a low-cost portable apparent soil electrical conductivity sensor using a Beaglebone Black. In: **2017 ASABE Annual International Meeting**. St. Joseph: ASABE, 2017. (Paper Number 1700062)

QUEIROZ, D. M.; SOUSA, E. D. T. S.; LEE, W. S.; SCHUELLER, J. K. Development and testing of a low-cost portable apparent soil electrical conductivity sensor using a BeagleBone Black. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 36, n. 3, p. 341-355, 2020.

RASHEED, M. W. *et al.* Soil moisture measuring techniques and factors affecting the moisture dynamics: A comprehensive review. **Sustainability**, v. 14, n. 18, p. 11538, 2022.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H. **5ª Aproximação - Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. 1. ed. SBCS, 1999. p. 108–110

SILVA, S. A.; SANTOS, R. O.; QUEIROZ, D. M.; LIMA, J. S. S.; PAJEHÚ, L. F.; MEDAUAR, C. C. Apparent soil electrical conductivity in the delineation of management zones for cocoa cultivation. **Information Processing in Agriculture**, v. 9, n. 3, p. 443-455, 2022.

SOUSA, E. D. T. S.; QUEIROZ, D. M.; COELHO, A.L.F.; VALENTE, D.S.M. Development of a portable multisensor platform for soil mapping. **Revista Ciência Agronômica**, v. 54, e20217886, 2023

SOUSA, E. D. T. S.; QUEIROZ, D. M.; COELHO, A.L.F.; VALENTE, D.S.M. Development of signal analysis algorithm for apparent soil electrical conductivity sensor. **Biosystems Engineering**, v. 211, p.183-191, 2021.

TOMAZ, A. *et al.* Insights into the spatial and temporal variability of soil attributes in irrigated farm fields and correlations with management practices: A multivariate statistical approach. **Water**, v. 14, n. 20, p. 3216, 2022.

WEBER, R. C.; GEHLING, W. Y. Y.; NÚÑEZ, W. P. Effect of wetting and drying paths on the resilient modulus of a compacted soil. In: **Unsaturated Soils: Research & Applications**. Taylor & Francis Group London, 2014. p. 777-782.