CALIBRAÇÃO E AVALIAÇÃO DE SENSORES DE UMIDADE DE BAIXO CUSTO PARA MONITORAMENTO DE SISTEMAS DE BIORRETENÇÃO

Jallisson Silva Vieira [1]& Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral [2]

RESUMO – O monitoramento da umidade do solo é fundamental para compreender o funcionamento hidrológico de jardins de chuva, porém o elevado custo dos sensores comerciais ainda limita sua aplicação em sistemas de monitoramento contínuo. Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo calibrar e avaliar o desempenho de sensores capacitivos de baixo custo para aplicação em jardins de chuva. Foram avaliados os sensores SEN0193 e S12 por meio de ensaios laboratoriais realizados com solo coletado em um jardim de chuva implantado no Campus Benfica da Universidade de Pernambuco. As curvas de calibração foram obtidas a partir da relação entre as leituras dos sensores e os teores de umidade gravimétrica determinados pelo método da estufa. O desempenho foi avaliado utilizando coeficiente de determinação (R^2), erro quadrático médio (RMSE), coeficiente de variação e análise dos resíduos. Os resultados indicaram que ambos os sensores foram capazes de representar a variação da umidade do solo. O SEN0193 apresentou melhor desempenho, com R^2 entre 0,81 e 0,96 e RMSE entre 4% e 8%, enquanto o S12 apresentou R^2 entre 0,91 e 0,98, porém RMSE entre 22% e 37%. Conclui-se que o SEN0193 constitui uma alternativa viável para o monitoramento de baixo custo da umidade em biorretenções.

ABSTRACT– Soil moisture monitoring is essential for understanding the hydrological behavior of rain gardens; however, the high cost of commercial sensors limits their use in continuous monitoring systems. This study aimed to calibrate and evaluate the performance of low-cost capacitive sensors for application in rain gardens. The SEN0193 and S12 sensors were tested in laboratory experiments using soil collected from a rain garden located at the Benfica Campus of the University of Pernambuco, Brazil. Calibration curves were obtained from the relationship between sensor readings and gravimetric soil moisture content determined by the oven-drying method. Sensor performance was evaluated using the coefficient of determination (R^2), root mean square error (RMSE), coefficient of variation, and residual analysis. Both sensors were able to represent soil moisture variations. The SEN0193 showed the best performance, with R^2 values ranging from 0.81 to 0.96 and RMSE values between 4% and 8%, while the S12 presented R^2 values between 0.91 and 0.98 but RMSE values between 22% and 37%. The results indicate that the SEN0193 is a feasible low-cost alternative for soil moisture monitoring in bioretention systems.

Palavras-Chave – Jardins de chuva; Sensores capacitivos; Umidade do solo.

INTRODUÇÃO

As Soluções Baseadas na Natureza (SbN) têm sido reconhecidas como alternativas eficazes para enfrentar problemas relacionados à drenagem urbana e à adaptação climática das cidades. Essas

[1]) Afiliação: Universidade de Pernambuco, R. Benfica, 455, Madalena, Recife-PE, (87) 99956-1317, jallisson.svieira@upe.br. [2]) Universidade de Pernambuco, R. Benfica, 455, Madalena, Recife-PE, (81) 99987-8260, jaime.cabral@poli.br.

soluções utilizam processos naturais para fornecer benefícios ambientais, sociais e econômicos, promovendo simultaneamente a mitigação de impactos hidrológicos e a melhoria da qualidade ambiental urbana (Mendes; Pina, 2023). No âmbito da gestão de águas pluviais, destaca-se a infraestrutura verde, composta por dispositivos como pavimentos permeáveis, telhados verdes e jardins de chuva, que buscam reproduzir processos hidrológicos naturais por meio da retenção, infiltração e evapotranspiração das águas pluviais (Fletcher *et al.*, 2015; Nordman *et al.*, 2018; Blagojevic *et al.*, 2023).

Apesar dos avanços relacionados à avaliação hidráulica e ambiental dos jardins de chuva, o monitoramento dos processos internos responsáveis pelo seu funcionamento ainda representa uma importante lacuna científica. Variáveis como teor de umidade do solo, armazenamento hídrico, grau de saturação, nível do lençol freático suspenso e tempo de drenagem exercem influência direta sobre o desempenho hidrológico desses sistemas. Entretanto, a obtenção dessas informações depende frequentemente da utilização de sensores especializados e sistemas de aquisição de dados de elevado custo, o que limita sua adoção em estudos de longo prazo e em projetos implantados em países em desenvolvimento (Brown; Hunt, 2011b; Winston; Dorsey; Hunt, 2016; Cording; Winston; Hunt, 2017).

Segundo Cording, Winston e Hunt (2017), embora a instrumentação de sistemas de biorretenção seja fundamental para compreender seus mecanismos de funcionamento e aprimorar seu dimensionamento, a literatura ainda apresenta limitações relacionadas à padronização de metodologias de monitoramento e à disponibilidade de tecnologias economicamente acessíveis.

Nesse cenário, sensores capacitivos de umidade de baixo custo têm despertado crescente interesse em aplicações ambientais devido ao seu reduzido custo de aquisição, baixo consumo energético e facilidade de integração com plataformas abertas de monitoramento. Embora esses dispositivos sejam amplamente empregados em aplicações agrícolas e em sistemas de automação, seu desempenho pode variar significativamente em função das propriedades físicas, químicas e mineralógicas do solo, tornando indispensável a realização de calibrações específicas para cada condição de aplicação (Bogena *et al.*, 2017; Vereecken *et al.*, 2014; Soulis *et al.*, 2015).

Apesar do avanço recente das tecnologias de monitoramento de baixo custo, ainda são escassos os estudos que avaliam a utilização e a calibração de sensores capacitivos aplicados especificamente a jardins de chuva e sistemas de biorretenção, sobretudo em condições tropicais. Essa lacuna limita a expansão de redes de monitoramento de baixo custo capazes de fornecer informações contínuas sobre a dinâmica da água no solo e sobre o desempenho hidrológico desses dispositivos. Dessa forma, torna-

se necessária a avaliação da precisão, repetibilidade e aplicabilidade desses sensores em condições representativas dos sistemas de biorretenção implantados em ambientes urbanos.

Diante desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo calibrar e avaliar o desempenho de sensores capacitivos de umidade de baixo custo para aplicação no monitoramento de jardins de chuva implantados no Campus Benfica da Universidade de Pernambuco, contribuindo para o desenvolvimento de metodologias acessíveis de instrumentação voltadas ao monitoramento hidrológico de Soluções Baseadas na Natureza.

METODOLOGIA

Com a finalidade de observar o comportamento da alteração de umidade no solo do entorno de um dos jardins de chuva deste trabalho foram testados dois tipos de sensores capacitivos de umidade: o modelo SEN0193 versão 1.2, e o modelo S12.

Calibração do Sensor SEN0193

A calibração foi realizada em laboratório com oito sensores capacitivos de umidade SEN0193, versão 1.2, com base no método gravimétrico, conforme demostrado por Abdelmoneim *et al.*, (2025), adotado como referência para a determinação do teor de água no solo. O procedimento experimental teve como objetivo estabelecer relações empíricas entre as leituras analógicas dos sensores (valores de *analogRead*) e os teores de umidade gravimétrica controlados, permitindo a posterior estimativa da umidade real do solo a partir dos sinais obtidos pelos sensores.

O circuito eletrônico do sensor converte a capacitância em um sinal elétrico analógico, que é lido pelo microcontrolador (Arduino). Esse sinal é posteriormente calibrado em laboratório para estabelecer a relação entre a leitura analógica (valores de 0 a 1023 no caso do conversor A/D de 10 bits do Arduino) e a umidade real do solo (DFROBOT, 2025).

Para a calibração, coletou-se uma amostra de solo no fundo do jardim J3 (caracterizada conforme subseção 4.2), ainda durante a sua escavação. A amostra foi seca em estufa a 105 °C por 24 horas, homogeneizada e posteriormente dividida em seis amostras. Inicialmente, os sensores foram calibrados conforme o procedimento recomendado pelo fabricante, realizando-se leituras com os sensores expostos ao ar (seco) e submersos em água (saturação), obtendo-se assim as leituras analógicas (*analogRead*) limites de saturação e não saturação. As leituras analógicas foram feitas com o hardware Arduino MEGA 2560 e o software Arduino IDE (versão 2.3.6). O código em Arduino

(C++) pode ser visualizado na íntegra no Apêndice A para o sensor SEN0193 e no Apêndice B para o sensor S12.

Cada sensor foi inserido individualmente nas amostras de solo preparadas com os diferentes teores de umidade controlados de 0%, 5%, 10%, 20%, 30% e 40% e registradas as leituras analógicas correspondentes. A obtenção desses teores foi realizada por meio da adição de massas conhecidas de água destilada ao solo seco, considerando a densidade da água igual a 1 g/cm³. Após a adição, o solo foi cuidadosamente misturado até completa homogeneização, de modo a garantir a distribuição uniforme da água em toda a amostra.

O teor de umidade gravimétrica (GWC) foi calculado segundo a Equação 1:

$$GWC(\%) = \frac{m_w - m_d}{m_d} 100 \quad (1)$$

Onde GWC = teor de umidade (%); m_w = massa do solo úmido (g); m_d = massa do solo seco (g).

As curvas de calibração foram construídas individualmente para cada sensor, relacionando os valores de leitura analógica (variável independente) aos teores de umidade gravimétrica controlados (variável dependente).

Inicialmente, os dados experimentais foram organizados em planilhas eletrônicas no Microsoft Excel (versão 2105), onde foram realizadas a tabulação das leituras, a construção dos gráficos de dispersão e o ajuste preliminar das curvas de regressão. Foram testados modelos lineares e não lineares, sendo selecionadas as funções que apresentaram melhor adequação aos dados observados, com base na análise visual e no coeficiente de determinação (R^2).

Com o objetivo de avaliar a distribuição estatística das leituras dos sensores em relação aos teores de umidade gravimétrica, aplicou-se o teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov (KS) com correção de Lilliefors, uma vez que os parâmetros da distribuição normal foram estimados a partir da própria amostra (Lilliefors, 1987).

O desempenho dos modelos de regressão foi inicialmente avaliado pelo coeficiente de determinação (R^2), calculado conforme a Equação 2 (Abdelmoneim *et al.*, 2025):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2} \quad (2)$$

Em que y_i = são os valores de umidade gravimétrica; $\hat{y}_i$ = valores estimados pela regressão; $\bar{y}$ = média dos valores medidos; n é o número total de observações.

O erro quadrático médio (*Root Mean Squared Error* - RMSE), mostrado na Equação 3, foi utilizado para indicar, de forma direta, o quanto as estimativas de umidade obtidas pelos sensores se afastam, em média, dos valores reais determinados pelo método gravimétrico (Willmott; Matsuura, 2005).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (3)$$

Onde y_i = são os valores de umidade gravimétrica; $\hat{y}_i$ = valores estimados pela regressão; n é o número total de observações.

O coeficiente de variação (CV) (Equação 4) foi empregado para avaliar a consistência das leituras, indicando o quanto os valores medidos variam em torno de sua média para um mesmo nível de umidade.

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} 100 \quad (4)$$

Onde σ = desvio padrão das leituras analógicas e $\bar{x}$ = média dos valores lidos.

O cálculo do RMSE, do coeficiente de variação (CV) e o teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov foram realizados no software R, utilizando-se a interface RStudio (versão 2025.05.1+513).

Sensor S12

O módulo sensor HD 38 possui quatro pinos, dois para a alimentação e dois para diferentes modos de saída (analógico e digital). Ao usar o pino de saída digital, a saída será apenas 1 ou 0, com o processo de conversão sendo feito lendo o valor digital usando o comando *digitalRead* (número do pino). Neste trabalho também foram feitas as leituras analógicas com esse sensor.

Para a calibração do sensor S12, coletou-se uma amostra de solo no fundo do jardim J3 (caracterizada conforme subseção 4.2), ainda durante a sua escavação. A amostra foi seca em estufa

a 105 °C por 24 horas, homogeneizada e dividida, inicialmente, em sete amostras de teor de umidade controlado de 0%, 10%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100%.

Os passos seguintes da metodologia de calibração do sensor S12 seguiu a mesma metodologia de calibração do SEN0193.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da calibração demonstraram que ambos os sensores capacitivos apresentaram resposta consistente às variações do teor de umidade do solo, embora com diferenças significativas quanto à precisão e à aplicabilidade para monitoramento hidrológico de jardins de chuva.

Para o sensor SEN0193, os modelos de regressão polinomial de segunda ordem apresentaram coeficientes de determinação (R^2) variando entre 0,81 e 0,96 nas três réplicas experimentais. Esses valores indicam que mais de 80% da variabilidade da umidade gravimétrica do solo foi explicada pelas leituras analógicas dos sensores, evidenciando uma relação consistente entre o sinal elétrico e o conteúdo de água presente no solo. Além disso, os testes de Kolmogorov-Smirnov com correção de Lilliefors não rejeitaram a hipótese de normalidade dos resíduos em nenhuma das combinações sensor-réplica, indicando adequação estatística dos modelos ajustados.

Os resultados também mostraram boa repetibilidade experimental. Apesar da variabilidade natural observada entre sensores individuais, os valores de R^2 permaneceram elevados em todas as réplicas, sugerindo que as diferenças encontradas estão mais relacionadas às características construtivas dos componentes eletrônicos e às condições locais de contato solo-sensor do que a limitações do método de calibração. Esse comportamento é particularmente importante para aplicações em monitoramento ambiental, nas quais a confiabilidade temporal das leituras é um requisito fundamental.

A análise dos erros de predição reforçou o bom desempenho do SEN0193. Os valores de erro quadrático médio (RMSE) variaram aproximadamente entre 4% e 8% de umidade gravimétrica, indicando capacidade satisfatória de estimar quantitativamente o teor de água do solo. Os menores erros foram observados em sensores específicos, com RMSE próximo de 4%, enquanto os maiores valores permaneceram inferiores a 9%. Embora esses erros possam limitar aplicações que exijam elevada precisão laboratorial, os resultados são adequados para monitoramento hidrológico de campo, especialmente em estudos voltados à identificação de tendências temporais de umedecimento e secagem.

A avaliação do coeficiente de variação (CV) mostrou que o desempenho do SEN0193 depende da faixa de umidade analisada. Em condições de solo seco e próximo à saturação, os valores de CV permaneceram baixos, geralmente inferiores a 3%, indicando elevada repetibilidade das leituras. Por outro lado, nas faixas intermediárias de umidade foram observados picos de variabilidade, com alguns sensores apresentando valores próximos de 20%. Esse comportamento está associado ao próprio princípio de funcionamento dos sensores capacitivos, cuja resposta dielétrica apresenta maior sensibilidade nessa faixa de umidade. Dessa forma, os maiores valores de CV não necessariamente representam falhas do sensor, mas refletem uma maior capacidade de detectar pequenas variações do conteúdo de água.

O sensor S12 apresentou comportamento distinto. As curvas de calibração foram adequadamente representadas por modelos exponenciais decrescentes, com coeficientes de determinação elevados em ambas as réplicas experimentais, variando aproximadamente entre 0,91 e 0,98. Os testes de normalidade dos resíduos também indicaram adequação estatística dos modelos ajustados, demonstrando que o sensor apresenta comportamento sistemático e repetível ao longo das medições.

Entretanto, a análise individual dos coeficientes de determinação poderia conduzir a interpretações equivocadas sobre a qualidade das estimativas. Apesar dos elevados valores de R^2, os erros absolutos observados foram significativamente superiores aos encontrados para o SEN0193. Os valores de RMSE variaram entre aproximadamente 22% e 37% de umidade gravimétrica, revelando limitações importantes na capacidade de estimativa quantitativa do teor de água do solo.

Essa divergência entre elevados valores de R^2 e altos valores de RMSE indica que o sensor consegue representar adequadamente a tendência geral de variação da umidade, mas apresenta baixa precisão na determinação dos valores absolutos. O problema torna-se mais evidente em condições próximas à saturação, nas quais a resposta elétrica tende a estabilizar-se, reduzindo a sensibilidade do equipamento. Esse comportamento também foi observado durante a análise dos resíduos e das curvas de regressão, que evidenciaram perda gradual da capacidade discriminatória do sensor nos maiores teores de umidade.

Por outro lado, o S12 apresentou boa repetibilidade entre as réplicas experimentais. As diferenças de RMSE entre repetições foram inferiores a 1,2 ponto percentual para todos os sensores avaliados, enquanto os coeficientes de variação permaneceram predominantemente abaixo de 5% ao longo da maior parte da faixa de umidade analisada. Esses resultados indicam que os erros observados

estão associados principalmente às limitações intrínsecas do sensor e não a problemas de estabilidade ou ruído aleatório do sistema de medição.

A comparação entre os dois sensores demonstra que ambos apresentam potencial para aplicações em monitoramento hidrológico, porém com finalidades distintas. O SEN0193 apresentou melhor desempenho global, combinando elevados coeficientes de determinação, baixos erros de predição e boa repetibilidade experimental. Já o S12 apresentou elevada consistência e boa capacidade de reproduzir tendências de variação da umidade, mas com erros absolutos consideravelmente maiores.

Sob a perspectiva do monitoramento de sistemas de biorretenção, os resultados indicam que o SEN0193 é mais adequado para aplicações que demandem estimativas quantitativas do teor de umidade do solo. O S12, por sua vez, pode ser empregado em aplicações qualitativas ou para identificação de ciclos de molhamento e secagem, desde que suas limitações em condições de elevada umidade sejam consideradas. Em ambos os casos, os resultados evidenciam a importância da calibração específica para o solo local antes da instalação definitiva dos sensores em campo, uma vez que diferenças relativamente pequenas nas características do meio poroso podem influenciar significativamente a resposta dos equipamentos.

CONCLUSÕES

A calibração dos sensores capacitivos de umidade SEN0193 e S12 permitiu avaliar sua aplicabilidade para o monitoramento da dinâmica de água em sistemas de biorretenção, fornecendo subsídios para o desenvolvimento de estratégias de instrumentação de baixo custo em jardins de chuva. Os resultados demonstraram que ambos os sensores apresentaram resposta consistente às variações do teor de umidade do solo, evidenciando potencial para utilização em aplicações de monitoramento hidrológico.

O sensor SEN0193 apresentou o melhor desempenho global entre os dispositivos avaliados. Os modelos de calibração ajustados apresentaram coeficientes de determinação elevados (R^2 entre aproximadamente 0,81 e 0,96), associados a baixos valores de erro quadrático médio, predominantemente entre 4% e 8% de umidade gravimétrica. Além disso, os resultados evidenciaram boa repetibilidade entre as réplicas experimentais e adequada aderência dos resíduos às premissas estatísticas dos modelos de regressão, indicando confiabilidade para estimativas quantitativas da umidade do solo.

Por sua vez, o sensor S12 apresentou coeficientes de determinação igualmente elevados (R^2 entre aproximadamente 0,91 e 0,98), demonstrando capacidade de representar a tendência geral de variação da umidade. Entretanto, os valores de RMSE observados, variando entre aproximadamente 22% e 37%, evidenciaram limitações quanto à precisão das estimativas absolutas, sobretudo em condições próximas à saturação do solo. Apesar dessas restrições, a elevada repetibilidade observada entre as réplicas sugere que o sensor pode ser empregado para o acompanhamento qualitativo de ciclos de molhamento e secagem em zonas não saturadas.

A comparação entre os sensores demonstrou que elevados coeficientes de determinação não implicam necessariamente elevada precisão preditiva, reforçando a importância da utilização conjunta de métricas como RMSE, coeficiente de variação e análise dos resíduos na avaliação do desempenho de sensores de umidade. Os resultados também mostraram a necessidade de calibração específica para o solo local antes da instalação dos sensores em campo, uma vez que as características do meio poroso influenciam diretamente a resposta elétrica dos dispositivos capacitivos.

Conclui-se que o sensor SEN0193 constitui uma alternativa tecnicamente viável e economicamente acessível para o monitoramento contínuo da umidade em biorretenções. Como perspectiva futura, recomenda-se a instalação dos sensores calibrados em condições reais de operação, visando avaliar seu desempenho sob ciclos naturais de precipitação, infiltração e drenagem característicos de sistemas de biorretenção.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco pela bolsa de fomento de mestrado do primeiro autor.

REFERÊNCIAS

ABDELMONEIM, Ahmed A; KALAANY, ChristaM.; KHADRA, Roula; DERARDJA, Bilal; DRAGONETTI, Giovanna. (2025) *"Calibration of Low-Cost Capacitive Soil Moisture Sensors for Irrigation Management Applications"*. Sensors 2025, Vol. 25, Page 343, v. 25, n. 2, p. 343. Disponível em: https://www.mdpi.com/1424-8220/25/2/343/htm.

BLAGOJEVIC, B.; VASILEVSKA, L.; ANĐELKOVIĆ, D.; BOGOJEVIĆ, A.; LOUSADA, S. (2023). "*A Framework for Assessing Nature-Based Urban Stormwater Management Solutions: A Preliminary Spatial Analysis Approach Applied to Southeast Serbia"*. WATER, v. 15, n. 20.

BOGENA, H. R.; HUISMAN, J. A.; SCHILLING, B.; WEUTHEN, A.; VEREECKEN, H. (2017). Effective Calibration of Low-Cost Soil Water Content Sensors. Sensors, 17(1), 208. https://doi.org/10.3390/s17010208

BROWN, R. A; HUNT, W. F. (2011). *"Underdrain Configuration to Enhance Bioretention Exfiltration to Reduce Pollutant Loads"*. Journal of Environmental Engineering, v. 137, n. 11. DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000437.

CORDING, Amanda; HURLEY, Stephanie; WHITNEY, David. (2017). *"Monitoring Methods and Designs for Evaluating Bioretention Performance"*. Journal of Environmental Engineering, v. 143, n. 12. DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001276.

DAVIS, Allen P.; HUNT, William F.; TRAVER, Robert G.; CLAR, Michael. (2008). *"Bioretention Technology: Overview of Current Practice and Future Needs"*. Journal of Environmental Engineering, v. 135, n. 3. DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2009)135:3(109).

DFROBOT, Capacitive Soil Moisture Sensor SKU SEN0193. Manual. (2025). Disponível em: https://wiki.dfrobot.com/Capacitive_Soil_Moisture_Sensor_SKU_SEN0193#More%20Documentation. Acesso em: 30 jul. 2025.

FLETCHER, Tim D.; SHUSTER, William; HUNT, Willian F.; ASHLEY, Richard; BUTLER, David; ARTHUR, Scott; TROWSDALE, Sam; BARRAUD, Sylvie; SEMADENI-DAVIES, Annette; BERTRAND-KRAJEWSKI, Jean-Luc; MIKKELSEN, Peter Steen; RIVARD, Gilles; UHL, Mathias; DAGENAIS, Danielle; VIKLANDER, Maria. (2015). *"SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage"*. Urban Water Journal, v. 12, n. 7, p. 525–542, DOI: https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/1573062X.2014.916314.

LILLIEFORS, H. W. (1967). "*On the Kolmogorov-Smirnov test for normality with mean and variance unknown"*. Journal of the American Statistical Association, v. 62, n. 318, p. 399-402.

MENDES, Maria Estela Ribeiro; PINA, Silvia Aparecida Mikami Gonçalves. (2023). "*Soluções Baseadas na Natureza para Gestão de Águas Urbanas: aplicação de Jardins Filtrantes, Jardins de Chuva e Biovaletas"*. Revista Foco, v. 16, n. 3, p. 1–44, 2023. DOI: https://doi.org/10.54751/revistafoco.v16n3-097.

NORDMAN, Erik E; ISELY, Elaine; ISELY, Paul; DENNING, Rod. (2018). Benefit-cost analysis of stormwater green infrastructure practices for Grand Rapids, Michigan, USA. Journal of Cleaner Production, v. 200, p. 501–510. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652618321413. Acesso em: 15 jul. 2025.

VEREECKEN, H.; HUISMAN, J. A.; BOGENA, H. (2014). *"On the spatio-temporal dynamics of soil moisture at the field scale"*. Journal of Hydrology, v. 516, p. 76–96. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.11.061.

WILLMOTT, C. J.; MATSUURA, K. (2005). *"Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance"*. Climate Research, v. 30, n. 1, p. 79-82.

WINSTON, Ryan J.; DORSEY, Jay D.; HUNT, William F. (2016). *"Quantifying volume reduction and peak flow mitigation for three bioretention cells in clay soils in northeast Ohio".* Science of the Total Environment, v. 553, p. 83-95.