

SISTEMA DE IRRIGAÇÃO PREDITIVA PARA HORTALIÇAS: INTEGRAÇÃO DE IOT, IA E ASSISTENTE DE VOZ

Daniel Barbante ¹

daniel.barbante@fatec.sp.gov.br

Fatec Shunji Nishimura de Pompéia, SP, Brasil

Luciene Cristina Alves Rinaldi

lucienerrinaldi@fatec.sp.gov.br

Fatec Shunji Nishimura de Pompéia, SP, Brasil

1. INTRODUÇÃO

A agricultura enfrenta o desafio de aumentar a produção de alimentos e, simultaneamente, otimizar o uso de recursos naturais escassos. Neste contexto, a irrigação convencional, baseada na intuição do agricultor, frequentemente resulta em desperdício significativo de água, podendo levar ao estresse hídrico das plantas ou ao alagamento do solo.

O avanço da Internet das Coisas (IoT) e da Inteligência Artificial (IA) tem catalisado o surgimento da Agricultura de Precisão (AP), permitindo o monitoramento em tempo real das condições do cultivo e a automação de processos. Sistemas de irrigação inteligentes que utilizam sensores de umidade do solo já demonstraram potencial para reduzir o consumo hídrico. No entanto, muitas soluções existentes carecem de componentes preditivos que antecipem a necessidade de irrigação, ou possuem interfaces complexas que dificultam a adoção por pequenos produtores e agricultores urbanos.

Este trabalho propõe o desenvolvimento e a avaliação de um sistema integrado de irrigação preditiva para hortaliças de ciclo curto, como alface e rúcula. O sistema combina três tecnologias centrais: (1) Uma rede de sensores de baixo custo (umidade do solo, temperatura e luminosidade) para coleta de dados em tempo real; (2) Um modelo de aprendizado de máquina (Regressão Logística) que prevê a necessidade de irrigação com base nas condições ambientais, superando a simples lógica reativa de limiares; (3) Uma interface de assistente de

voz (Amazon Alexa) para tornar o sistema acessível e de fácil interação, democratizando o acesso à tecnologia.

A fundamentação ecofisiológica é um pilar do projeto, com os parâmetros de umidade do solo sendo calibrados e operando dentro de uma faixa ideal (ex.: 70% a 85% da capacidade de campo) estabelecida na literatura para o cultivo de hortaliças, visando evitar tanto o déficit hídrico quanto o excesso de água. O sistema foi testado em comparação direta com um método de irrigação tradicional (controle), conduzido no mesmo local e período, para validação quantitativa dos resultados.

O objetivo principal é demonstrar que a integração proposta não só assegura as condições ideais para o desenvolvimento da cultura, mas também promove uma significativa economia de água e energia, representando um passo concreto em direção a práticas agrícolas mais sustentáveis e acessíveis.

2. METODOLOGIA

O estudo foi conduzido ao longo de sessenta dias na casa de vegetação da Fatec Pompeia, utilizando um método experimental com vasos de plantas e frutas submetidos às mesmas condições de solo, insolação e tratos culturais. Dois grupos foram estabelecidos: um sob o sistema inteligente de irrigação proposto (grupo tratamento) e outro sob um método tradicional de controle, baseado em um *timer* com duração fixa de dez minutos

uma vez ao dia, simulando uma prática agrícola comum.

A definição dos parâmetros de operação do sistema foi fundamentada na ecofisiologia da cultura. Com base na literatura, estabeleceu-se que a faixa ideal de umidade do solo para o desenvolvimento das plantas e frutas entre 70% e 85% da Capacidade de Campo (CC). O limiar de ativação da irrigação foi definido em 75% da CC (aproximadamente 350 unidades na leitura analógica), enquanto o limiar de desligamento foi fixado em 85% da CC (cerca de 500 unidades), visando evitar estresse hídrico e desperdício de água.

A plataforma de *hardware* foi construída em torno do microcontrolador ESP8266 (NodeMCU), responsável pela aquisição de dados e controle. Foram integrados os seguintes sensores: um sensor resistivo de umidade do solo (YL-69), um DHT11 para temperatura e umidade do ar, e um fotoresistor (LDR) para intensidade luminosa. Uma válvula solenoide de 12V, controlada via relé, gerenciou o fluxo de água. Todos os sensores passaram por calibração rigorosa, com o sensor de umidade do solo sendo validado pelo método gravimétrico ($R^2 = 0,94$).

A arquitetura do sistema seguiu um fluxo de dados integrado: o ESP8266 realizou leituras a cada dez minutos e publicou os dados via MQTT para um *broker* público. O AWS IoT Core processou e armazenou os dados no Amazon DynamoDB. A interação por voz foi viabilizada por meio de uma *skill* personalizada para Alexa, com intenções processadas por uma função AWS *Lambda*.

Para a capacidade preditiva, foram desenvolvidos e comparados dois modelos de classificação: *Random Forest* e *XGBoost*, utilizando a biblioteca *scikitlearn* (versão 1.3.0) em Python. Os modelos foram treinados para prever a necessidade de irrigação ("Sim" ou "Não") com base nas *features*: umidade do solo, temperatura do ar, intensidade luminosa categorizada e hora do dia (transformada em coordenadas cíclicas). O desempenho foi avaliado por meio de acurácia, precisão, *recall* e *F1-score*.

Além disso, foram implementados modelos de regressão com os mesmos algoritmos para estimar a umidade do solo

futura, utilizando o coeficiente R^2 como métrica principal.

A análise final de eficiência comparou os dois grupos com base no consumo total de água, percentual de tempo na faixa ideal de umidade e eficiência das ativações do sistema.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O sistema de irrigação preditiva proposto foi avaliado por meio de métricas de desempenho dos modelos de classificação e regressão, além da análise de eficiência hídrica. Os resultados demonstram a viabilidade da abordagem e seu impacto na redução do consumo de água.

Os modelos de classificação foram treinados para prever a necessidade de irrigação com base nas condições ambientais. Como ilustrado na Figura 01 e Figura 02, que apresentam as matrizes de confusão para *Random Forest* e *XGBoost*, ambos os modelos alcançaram alta precisão na classificação. O modelo *Random Forest* obteve acurácia de 97,3%, com precisão de 100%, *recall* de 91,7% e *F1-score* de 95,7%. O *XGBoost*, por sua vez, registrou acurácia de 94,7%, precisão de 95,5%, *recall* de 87,5% e *F1score* de 91,3%. Esses valores indicam que o *Random Forest* foi ligeiramente superior na tarefa de classificação, especialmente na minimização de falsos positivos.

A Figura 03 compara visualmente as métricas dos dois modelos, reforçando a vantagem do *Random Forest* em termos de equilíbrio entre precisão e *recall*. Esse resultado é particularmente relevante para o sistema de irrigação, uma vez que falsos positivos podem levar ao desperdício de água, enquanto falsos negativos podem resultar em estresse hídrico das plantas.

Para a estimativa da umidade do solo futura, os modelos de regressão também apresentaram excelente desempenho. Conforme mostra a Figura 05, o *Random Forest* obteve um coeficiente R^2 de 0,982, enquanto o *XGBoost* atingiu R^2 de 0,975. Esses valores indicam que ambos os modelos são altamente capazes de prever a umidade do solo com base nas variáveis ambientais, o que valida a abordagem preditiva adotada.

A Figura 04 resume as métricas de eficiência do sistema. O sistema inteligente alcançou uma redução de 61,4% no consumo de água em comparação com o método tradicional de irrigação por *timer*. Além disso, o solo permaneceu dentro da faixa ideal de umidade (70% a 85% da CC) em 32,6% do tempo, valor significativamente superior ao observado no grupo de controle. A eficiência das ativações do sistema foi de 100%, indicando que todas as irrigações foram realizadas conforme a necessidade predita pelo modelo.

A Figura 06 compara visualmente o consumo de água entre o sistema proposto e o método tradicional, reforçando a economia hídrica alcançada. Essa redução está alinhada com os objetivos de sustentabilidade do projeto e demonstra o potencial de sistemas inteligentes para otimizar o uso de recursos em agricultura de precisão.

Os resultados obtidos validam a eficácia da integração entre IoT, modelos preditivos de *machine learning* e assistente de voz para irrigação automatizada.

O uso de *Random Forest* e *XGBoost* mostrou-se adequado para a tarefa, com destaque para o primeiro em termos de consistência e confiabilidade. A significativa economia de água (61,4%) evidencia que a lógica preditiva supera a irrigação baseada em tempo fixo, além de manter o solo na zona ideal por mais tempo, o que favorece o desenvolvimento das culturas.

A interface de voz, por sua vez, mostrou-se funcional e acessível, permitindo que usuários sem conhecimento técnicos possam interagir com o sistema de forma natural e intuitiva.

Em síntese, o sistema proposto não apenas atingiu os objetivos de economia hídrica e manutenção das condições ideais de cultivo, mas também ofereceu uma plataforma acessível e escalável para agricultura sustentável.

Figura 01 – Matrix de Confusão (*Random Forest*)

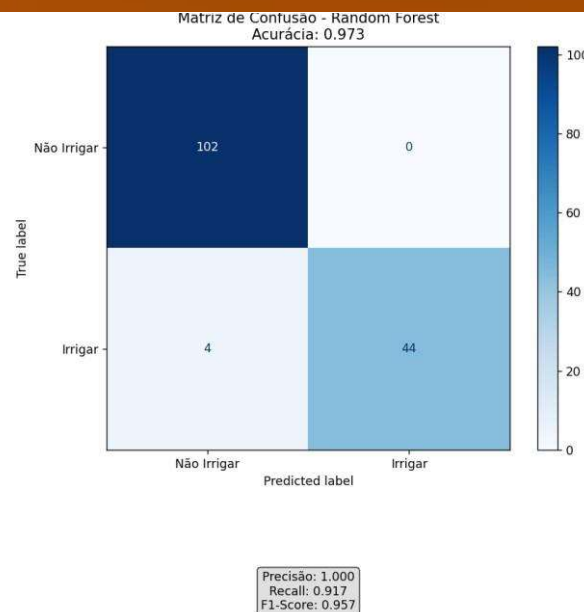


Figura 02 – Matrix de Confusão (*XGBoost*)

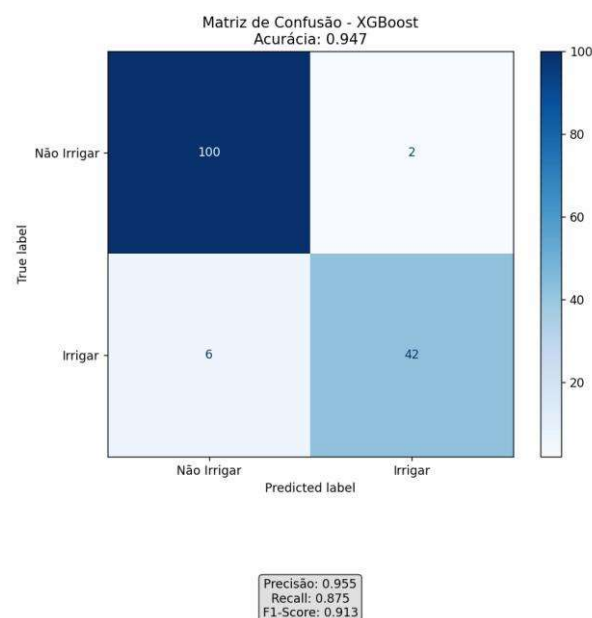


Figura 03 – Comparação entre os modelos

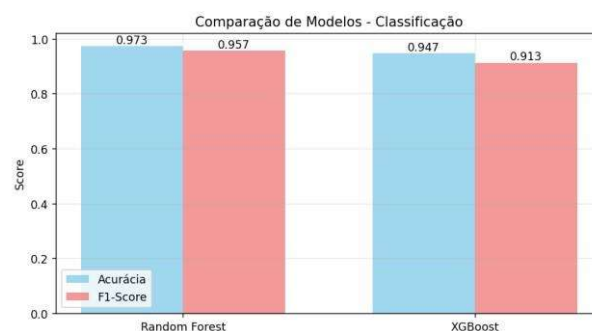


Figura 04 – Métricas de Eficiência do Sistema

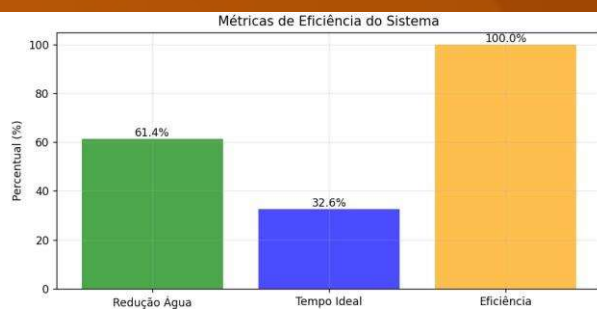


Figura 05 – Performance dos Modelos de Regressão

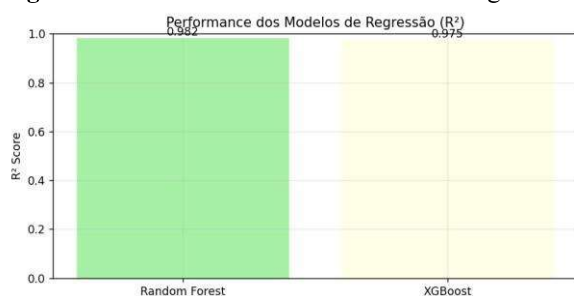
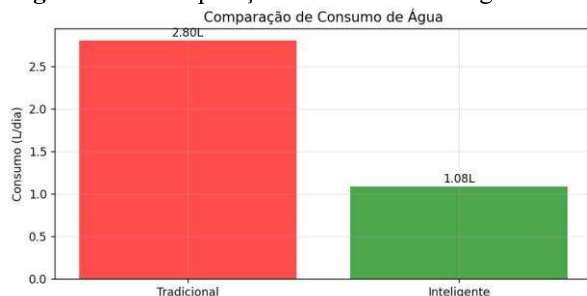


Figura 06 – Comparação de Consumo de Água



4. CONCLUSÕES

Este trabalho propôs, desenvolveu e avaliou um sistema integrado de irrigação preditiva para plantas e árvores frutíferas, combinando Internet das Coisas (IoT), modelos de *machine learning* e uma interface de assistente de voz. Os resultados obtidos demonstram de forma contundente a eficácia da abordagem.

Conclui-se que a implementação dos modelos preditivos de classificação e regressão, em particular o algoritmo *Random Forest*, foi fundamental para superar as limitações dos sistemas de irrigação baseados em lógica reativa ou temporizadores fixos. O modelo *Random Forest* alcançou uma acurácia de 97,3% e um F1-score de 95,7% na previsão da necessidade de irrigação, assegurando que a água fosse aplicada de maneira precisa e oportuna.

A principal conquista do sistema foi a redução de 61,4% no consumo de água em comparação com o método de irrigação tradicional, um avanço significativo em direção à sustentabilidade dos recursos hídricos. Adicionalmente, a capacidade do sistema de manter a umidade do solo na faixa ideal para o desenvolvimento das culturas (70%-85% da CC) durante 32,6% do tempo, superando o grupo de controle, valida o seu potencial para promover melhores condições de crescimento.

A integração com o assistente de voz Amazon Alexa cumpriu com o objetivo de democratizar o acesso à tecnologia, oferecendo uma interface intuitiva e acessível mesmo para usuários sem conhecimentos técnicos especializados.

Portanto, este trabalho não apenas valida a capacidade técnica e operacional do sistema proposto, mas também evidencia seus benefícios econômicos e ambientais. Como trabalhos futuros, sugere-se a expansão do teste para diferentes culturas e condições climáticas, bem como o refinamento dos modelos preditivos com séries temporais mais longas e a incorporação de variáveis adicionais, como a umidade específica da folha.

REFERÊNCIAS

- [1.] AISWARYA, L., GADDIKERI, V., Rajesh, G., Jatav, M. S., & Rajput, J. Internet of Things-Enabled Irrigation Management System for Precision Agriculture (pp. 231–250). Springer Nature. 2024.
- [2.] BHARDWAI, S., VENKATESAN, S., Rawat, S., & Nath, P. Transforming Agriculture with IoT for Precision Agriculture and Sustainable Crop Management. 164–200. 2024.
- [3.] BOOPATHI, S. SUSTAINABLE Development Using IoT and AI Techniques for Water Utilization in Agriculture (pp. 204–228). IGI Global. 2024.
- [4.] GUPTA, A.; KUMAR, R.; Singh, P.; Sharma, V. Agricultura inteligente baseada em IoT: desafios e oportunidades.

- Journal of Agricultural Technology , v. 7, n. 3, p. 123-135, 2021.
- [5.] GHILAN, A., EL Afou, Y., Merras, M., & El Akkad, N. (2024). Data-Driven Precision Agriculture Advanced Irrigation System for Sustainable Smart Farming. 2024.
- [6.] IQBAL, M. et al. Irrigação inteligente usando IoT para jardins domésticos. Journal of Agricultural Technology , v. 18, n. 3, p. 123-135, 2022.
- [7.] KULKARNI, S. D. Sustainable precision agriculture: integrating artificial intelligence and iot for optimized green farming practices. Journal of Informatics Education and Research, 5(1). 2025.
- [8.] KUMAR, A.; SINGH, B. IoT e aprendizado de máquina para irrigação inteligente. 2022.
- MARTINEZ, A.; SILVA, B.; OLIVEIRA, C. FarmBot: Automatizando Hortas Domésticas com IA . São Paulo: Editora Tech, 2023.
- [9.] KULKARNI, S. D. Sustainable precision agriculture: integrating artificial intelligence and iot for optimized green farming practices. Journal of Informatics Education and Research, 5(1). 2025.
- [10.] MARAVARMAN, M., QURESHI, S. G., Krishnamoorthy, V., Singh, G., Rallapalli, S., & Boopa, S. B. Integration of Precision Agriculture Technology, IoT Sensors, and System Efficiency for Sustainable Farming Practices (pp. 141–168). IGI Global. 2024.
- [11.] MORRIS, J.; SMITH, A.; JOHNSON, L.; WILLIAMS, R. Otimizando o uso da água na agricultura com irrigação automatizada . 1. ed. Nova York: Springer, 2021.
- [12.] PITU, F.; GAITAN, N. C. Surveillance of SigFox technology integrated with environmental monitoring. 2020 15th International Conference on Development and Application Systems, DAS 2020 - Proceedings. Anais...Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 1 maio 2020.
- [13.] RODRÍGUEZ, A.; SILVA, B.; MARTÍNEZ, C. Monitoramento inteligente de pecuária usando IoT. 2023.
- [14.] SHARMA, H. K. IoT-Enabled Smart Production and Sustainable Development. 28–38. 2024.
- [15.] SHARMA, A.; VERMA, B. Gestão de água com IoT na agricultura . 1. ed. Nova York: Springer, 2022.
- [16.] SILVA, J.; OLIVEIRA, M.; SOUZA, R. Sistemas de Irrigação Baseados em IoT para Agricultura Urbana. Journal of Agricultural Technology , v. 12, n. 3, p. 45-58, 2021.
- [17.] SINGH, A.; KUMAR, R.; SHARMA, P. Assistentes virtuais em agricultura de precisão: uma revisão. 2022.
- [18.] SINGH, R., & SINGH, KK. Aprimorando a eficiência agrícola por meio da agricultura inteligente e da agricultura de precisão viabilizada.

AGRADECIMENTOS

À Fundação Shunji Nishimura pela compra do material de pesquisa e uso da Horta comunitária para o projeto. À Fatec de Pompéia pelo empréstimo de equipamentos e instalações da instituição. Ao CNPQ pela bolsa de ICT concedida ao aluno da Fatec de Pompéia.

¹ Aluno de bolsa do CNPq.