

Predição de Volumes e Estimativa de Uniformidade de Irrigação (CUC/CUD) a partir de Índices Espectrais Sentinel-2

Daniel F. Afonso¹, Fabiola S. Fernandes Pereira², Glalco S. Costa³, Leandro C. Lemes³

¹Irigação sem fronteiras LTDA

²Universidade Federal de Uberlândia - UFU

³Universidade Federal do Triângulo Mineiro - UFTM

danielferreiraafonso@gmail.com, fabiola.pereira@ufu.br,

glalco.costa@uftm.edu.br, leandro.lemes@uftm.edu.br

Abstract. *This work investigates the use of spectral indices and bands derived from Sentinel-2 imagery to predict water volumes collected in irrigation uniformity tests, specifically Christiansen's Uniformity Coefficient (CUC) and Distribution Uniformity Coefficient (CUD). The methodology integrates remote sensing data with field measurements organized into radial spatial partitions. Results show that the proposed model achieves satisfactory predictive performance and is capable of accurately estimating irrigation uniformity metrics, highlighting the potential of remote sensing for operational irrigation monitoring.*

Resumo. *Este trabalho investiga o uso de índices espectrais e bandas derivadas de imagens Sentinel-2 para a predição de volumes de água coletados em ensaios de uniformidade de irrigação, especificamente os Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) e o Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD). A metodologia integra dados de sensoriamento remoto com medições de campo organizadas em partições radiais. Os resultados demonstram que o modelo apresenta bom desempenho preditivo e é capaz de estimar com precisão os coeficientes de uniformidade, evidenciando o potencial do sensoriamento remoto para monitoramento operacional da irrigação.*

1. Introdução

A avaliação da uniformidade de irrigação é fundamental para o manejo eficiente da água em sistemas agrícolas. Métodos tradicionais, como os coeficientes CUC e CUD, baseiam-se em medições de campo pontuais, sendo trabalhosos e limitados espacialmente [Green and Pattison 2022].

O sensoriamento remoto oferece uma alternativa promissora ao permitir a análise espacial contínua da resposta da vegetação e do solo [Boninsenha et al. 2024]. No entanto, ainda há lacunas na integração entre atributos espectrais e métricas clássicas de uniformidade.

Este trabalho propõe um modelo preditivo capaz de estimar volumes de água coletados em campo a partir de atributos espectrais Sentinel-2, permitindo a inferência indireta dos coeficientes CUC e CUD.

2. Metodologia

2.1. Área de Estudo e Contexto

A área analisada corresponde a uma região agrícola irrigada por sistema de pivô central, caracterizada por distribuição radial da lâmina de água. Esse tipo de sistema apresenta variabilidade espacial na aplicação hídrica, tornando necessária a avaliação da uniformidade por meio de coeficientes como CUC e CUD.

Nesse contexto, a possibilidade de estimar a distribuição de água a partir de dados espectrais representa um avanço significativo para o manejo da irrigação, permitindo análises mais frequentes e com maior cobertura espacial.

2.2. Coleta de Dados de Campo

Os volumes de água utilizados neste estudo foram coletados seguindo os protocolos metodológicos das análises de CUC e CUD, no qual os coletores são distribuídos ao longo de um raio do equipamento, a uma distância fixa entre um coletor e outro, neste caso, 3 metros.

Cada ponto de coleta forneceu o volume acumulado durante o ensaio, utilizado posteriormente para o cálculo dos coeficientes CUC e CUD. Para compatibilização com a resolução espacial dos dados orbitais, os valores observados foram agregados por faixas radiais, utilizando a média dos coletores pertencentes a cada anel.

2.3. Particionamento Espacial

A área irrigada foi subdividida em oito setores angulares e cento e vinte anéis concêntricos, formando unidades espaciais radiais utilizadas na integração entre dados espectrais e medições de campo. Cada unidade corresponde à interseção entre um setor e um anel, permitindo representar simultaneamente a posição angular e a distância ao centro do pivô.

Para cada unidade espacial foram extraídos os atributos espectrais médios das imagens Sentinel-2, estabelecendo correspondência direta entre os dados orbitais e os volumes observados em campo.

2.4. Dados de Sensoriamento Remoto

As imagens foram obtidas a partir da coleção Sentinel-2 Surface Reflectance disponível no Google Earth Engine. Foram selecionadas cenas com baixa cobertura de nuvens e datas coincidentes ou próximas à realização dos ensaios de campo, reduzindo possíveis discrepâncias temporais entre as observações espectrais e as medições de irrigação.

Para cada partição espacial foram calculadas médias dos índices NDVI, NDWI e das bandas B8, B11 e B12, que são reconhecidamente sensíveis à variação de biomassa e conteúdo hídrico [Boninsenha et al. 2024].

2.5. Construção do Alvo

Os volumes de água foram coletados ao longo do raio do sistema de irrigação, resultando em medições pontuais distribuídas radialmente. Para compatibilizar esses dados com as partições espaciais, os volumes foram agregados por anel radial, utilizando a média dos valores dentro de cada faixa.

Essa abordagem permite reduzir ruídos locais e estabelecer uma correspondência direta entre os dados de campo e as unidades espaciais utilizadas na modelagem.

2.6. Engenharia de Atributos

Além dos atributos espectrais originais, foram geradas transformações não lineares, incluindo termos quadráticos, interações e razões espectrais entre bandas. Essas transformações permitem capturar relações complexas entre resposta espectral e distribuição de água, que não seriam representadas adequadamente por modelos lineares simples.

2.7. Modelagem

O modelo foi implementado utilizando a biblioteca Scikit-Learn em Python. Como variáveis de entrada foram utilizados os índices espectrais, bandas originais e atributos derivados obtidos por transformações quadráticas, interações e razões espectrais.

A predição dos volumes foi realizada por meio do algoritmo Gradient Boosting Regressor, selecionado por sua capacidade de representar relações não lineares entre variáveis espectrais e a distribuição de água observada em campo.

Os dados foram divididos em conjuntos de treinamento e teste, permitindo avaliar a capacidade de generalização do modelo sobre amostras não utilizadas durante o treinamento [Hussain et al. 2026].

2.8. Avaliação

O coeficiente de determinação (R^2) foi utilizado para quantificar a proporção da variabilidade dos dados explicada pelo modelo. O erro quadrático médio (RMSE) foi empregado para avaliar a magnitude média dos erros de predição, enquanto o erro percentual absoluto médio (MAPE) foi utilizado para mensurar o erro relativo entre valores observados e estimados.

Além dessas métricas, os volumes preditos foram utilizados para calcular os coeficientes CUC e CUD, permitindo verificar se o modelo preserva adequadamente as características de uniformidade do sistema de irrigação.

3. Resultados

A Figura 1 apresenta a relação entre volumes observados e preditos.

O modelo apresentou os seguintes resultados:

- $R^2 = 0.286$
- RMSE = 5.300
- MAPE = 6.18

Embora o valor de R^2 indique capacidade explicativa moderada, os valores de RMSE e MAPE permaneceram relativamente baixos. Além disso, os coeficientes CUC e CUD calculados a partir das predições apresentaram diferenças inferiores a três pontos percentuais em relação aos valores observados, sugerindo que o modelo consegue reproduzir adequadamente o comportamento global da uniformidade de irrigação mesmo sem explicar integralmente a variabilidade local dos volumes.

A Figura 2 apresenta a variação dos volumes ao longo do raio.

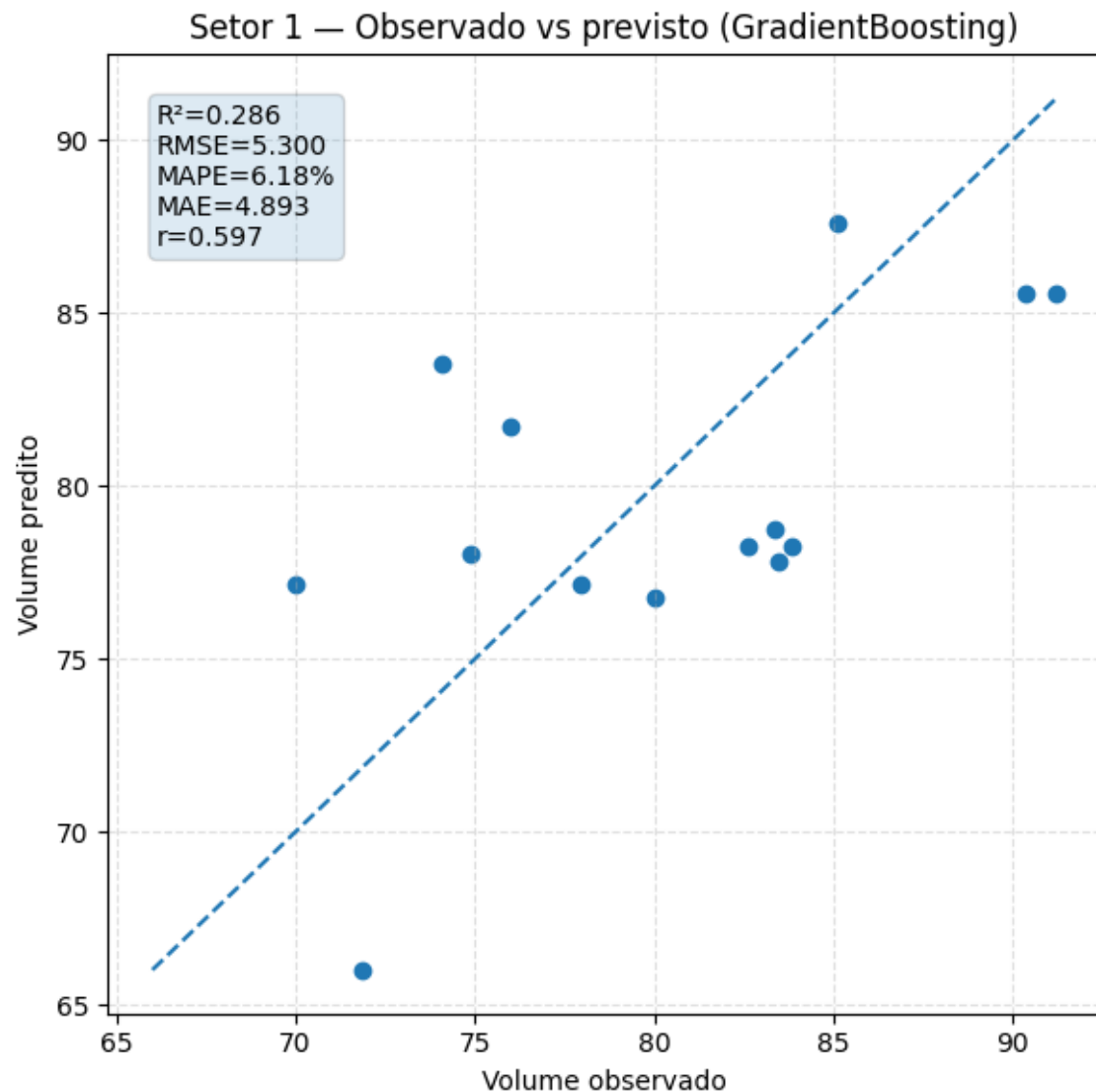


Figura 1. Volumes observados vs preditos.

3.1. Estimativa dos Coeficientes de Uniformidade

Os coeficientes obtidos foram:

- CUC observado: 93.31
- CUC predito: 95.19
- CUD observado: 89.60
- CUD predito: 92.29

A diferença entre valores observados e preditos foi inferior a 3 pontos percentuais, evidenciando que o modelo é capaz de reproduzir adequadamente a uniformidade do sistema.

3.2. Importância das Variáveis

A análise de importância das variáveis revelou forte contribuição das bandas SWIR, especialmente B12 e suas transformações, indicando alta sensibilidade à variação hídrica,

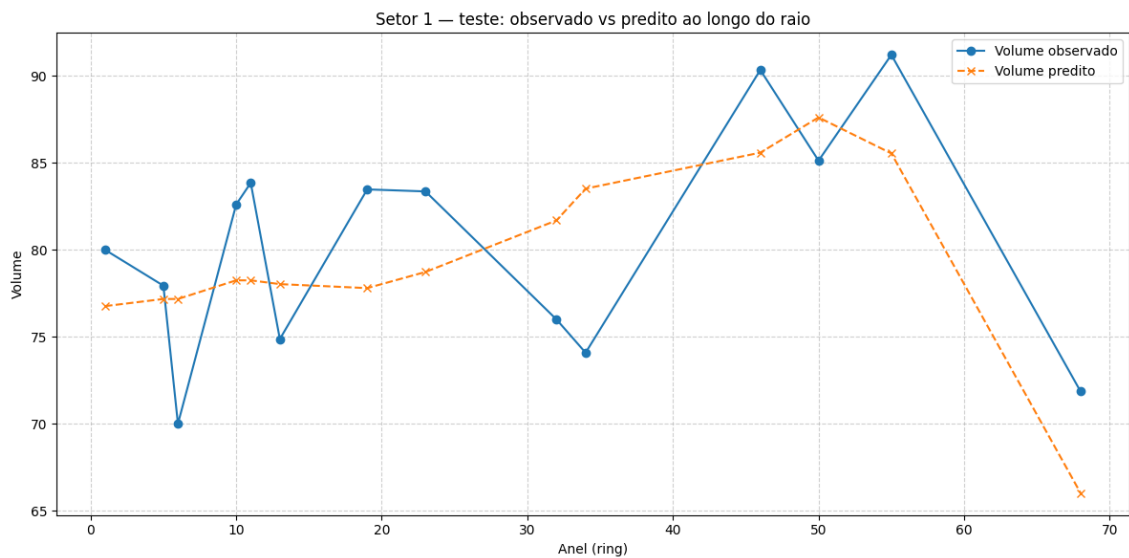


Figura 2. Perfis radial de volumes observados e preditos.

comportamento consistente com estudos baseados em sensoriamento remoto [Sozzi et al. 2026, Boninsenha et al. 2024].

4. Conclusão

Os resultados demonstram que atributos espectrais derivados de imagens Sentinel-2 podem ser utilizados para prever volumes de água em ensaios de uniformidade de irrigação.

Mesmo com valores moderados de R^2 , a baixa magnitude dos erros e a elevada precisão na estimativa de CUC e CUD indicam que o modelo é adequado para aplicações práticas.

A abordagem proposta reduz a dependência de medições intensivas em campo e apresenta potencial para monitoramento remoto da uniformidade de irrigação, conforme evidenciado na literatura recente [Sozzi et al. 2026, Hussain et al. 2026].

Referências

- Boninsenha, I., Mantovani, E. C., Rudnick, D. R., and Ribeiro, H. Q. (2024). Revealing irrigation uniformity with remote sensing: A comparative analysis of satellite-derived uniformity coefficient. In *Agricultural Water Management*. Elsevier.
- Green, D. and Pattison, I. (2022). Christiansen uniformity revisited: Re-thinking uniformity assessment in rainfall simulator studies. In *Catena*. Elsevier.
- Hussain, Z., Liu, J., Chauhdary, J. N., Md-Tahir, H., and Mokhtar, A. (2026). Predicting irrigation uniformity and droplet characteristics using machine learning algorithms for rotating spray plate sprinklers. In *Flow Measurement and Instrumentation*. Elsevier.
- Sozzi, M., Salmaso, F., Cogato, A., and Bortolini, L. (2026). Assessing vineyard irrigation uniformity and drip system malfunction by remote and ground sensing: Insights from sentinel-1, sentinel-2 and planet monitoring. In *Computers and Electronics in Agriculture*. Elsevier.