v7.n10.2026

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

AGROESTAÇÃO: SISTEMA PARA ANÁLISE METEOROLÓGICA E MONITORAMENTO DO SOLO

AGROESTAÇÃO: SYSTEM FOR METEOROLOGICAL ANALYSIS AND SOIL MONITORING

AGROESTACIÓN: SISTEMA PARA EL ANÁLISIS METEOROLÓGICO Y MONITOREO DEL SUELO

Matheus Felipe Scalco[1], Aline Beatriz Treter Scalco[2], Jandrei Sartori Spancerski[3]

e7109086
https://doi.org/10.47820/recima21.v7i10.9086

PUBLICADO: 10/2026

RESUMO

A agricultura moderna depende cada vez mais de informações precisas sobre clima e solo para garantir produtividade, sustentabilidade e eficiência no manejo agrícola. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver e validar a AgroEstação, um sistema integrado para análise meteorológica e monitoramento do solo em tempo real. O sistema foi composto por sensores capazes de monitorar variáveis atmosféricas, como temperatura, umidade relativa do ar, pressão atmosférica, radiação solar, velocidade do vento e precipitação, além de atributos do solo, como umidade, temperatura, pH, condutividade elétrica e nutrientes. Os testes foram realizados em propriedades rurais da região Oeste do Paraná, comparando os dados obtidos pela AgroEstação com estações meteorológicas de referência e análises laboratoriais de solo. Os resultados demonstraram boa concordância entre as informações coletadas pelo sistema e os dados de referência, principalmente para temperatura e umidade, evidenciando a eficiência do protótipo em representar as condições reais de campo. Além disso, o monitoramento local permitiu identificar variações microclimáticas e espaciais importantes, reforçando a relevância da agricultura de precisão e do uso de tecnologias aplicadas ao manejo agrícola.

PALAVRAS-CHAVE: Agrometeorologia. Agricultura de precisão. Monitoramento do solo. Sensores ambientais.

ABSTRACT

Modern agriculture increasingly relies on accurate climate and soil information to ensure productivity, sustainability, and efficiency in agricultural management. In this context, this work aimed to develop and validate AgroEstação, an integrated system for meteorological analysis and real-time soil monitoring. The system consisted of sensors capable of monitoring atmospheric variables such as temperature, relative humidity, atmospheric pressure, solar radiation, wind speed, and precipitation, as well as soil attributes such as moisture, temperature, pH, electrical conductivity, and nutrients. Tests were conducted on rural properties in the western region of Paraná, comparing data obtained by AgroEstação with reference weather stations and laboratory soil analyses.

[1] Tecnólogo em Manutenção Industrial pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) e Graduando em Agronomia pelo Centro Universitário UDC Medianeira, Medianeira, Paraná, Brasil.
[2] Tecnóloga em Gestão Comercial pelo Centro Universitário UDC Medianeira e Tecnóloga em Gestão de Cooperativas pelo ISAE, Medianeira, Paraná, Brasil.
[3] Dr. Professor do Departamento Acadêmico de Computação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Engenheiro de Produção, Engenheiro de Computação, Mestre em Tecnologias Computacionais para o Agronegócio e Doutor em Ciências pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Área de Concentração de Engenharia da Computação. Medianeira, Paraná, Brasil.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

The results demonstrated good agreement between the information collected by the system and reference data, especially for temperature and humidity, highlighting the prototype's efficiency in representing real field conditions. Furthermore, local monitoring allowed the identification of important microclimatic and spatial variations, reinforcing the relevance of precision agriculture and technologies applied to agricultural management.

KEYWORDS: *Agrometeorology. Precision agriculture. Soil monitoring. Environmental sensors.*

RESUMEN
La agricultura moderna depende cada vez más de información precisa sobre el clima y el suelo para garantizar productividad, sostenibilidad y eficiencia en el manejo agrícola. En este contexto, el presente trabajo tuvo como objetivo desarrollar y validar AgroEstação, un sistema integrado para el análisis meteorológico y el monitoreo del suelo en tiempo real. El sistema estuvo compuesto por sensores capaces de monitorear variables atmosféricas, como temperatura, humedad relativa del aire, presión atmosférica, radiación solar, velocidad del viento y precipitación, además de atributos del suelo, como humedad, temperatura, pH, conductividad eléctrica y nutrientes. Las pruebas se realizaron en propiedades rurales de la región Oeste de Paraná, comparando los datos obtenidos por AgroEstação con estaciones meteorológicas de referencia y análisis de laboratorio del suelo. Los resultados demostraron una buena concordancia entre la información recopilada por el sistema y los datos de referencia, principalmente para temperatura y humedad, evidenciando la eficiencia del prototipo para representar las condiciones reales de campo. Además, el monitoreo local permitió identificar variaciones microclimáticas y espaciales importantes, reforzando la relevancia de la agricultura de precisión y del uso de tecnologías aplicadas al manejo agrícola.

PALABRAS CLAVE: *Agrometeorología. Agricultura de precisión. Monitoreo del suelo. Sensores ambientales.*

INTRODUÇÃO

Por muitos anos, o monitoramento climático dependeu de postos convencionais operados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), que registravam dados apenas três vezes ao dia, tornando as medições suscetíveis a erros e pouco representativas da realidade de cada propriedade (Oliveira, 2019). Como a agricultura é altamente sensível às variações climáticas e às condições do solo, a agrometeorologia tem papel fundamental ao subsidiar decisões desde o plantio até a colheita (Pereira; Angelocci; Sentelhas, 2002).

Entretanto, parte dos produtores ainda toma decisões com base em previsões meteorológicas elaboradas para áreas extensas, que nem sempre representam as particularidades de cada propriedade. Além disso, o acompanhamento das condições do solo ainda costuma ser realizado de maneira manual e pontual, oferecendo apenas uma visão momentânea da área analisada.

Essa limitação pode dificultar a identificação rápida de mudanças importantes e resultar em decisões tomadas com informações insuficientes ou desatualizadas.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Embora a literatura reconheça a importância dos dados agrometeorológicos para o planejamento agrícola, permanece o desafio de obter, reunir e disponibilizar informações meteorológicas e do solo que representem as condições específicas de cada propriedade ao longo do tempo. A disponibilidade de previsões para áreas extensas ou de medições pontuais do solo não resolve integralmente essa questão, pois essas fontes não permitem, de forma isolada, o acompanhamento contínuo e integrado das variações locais. Nesse contexto, também se mostra necessário avaliar soluções desse tipo em condições reais de uso, considerando as características da região em que serão aplicadas.

Essa lacuna evidencia a necessidade de aproximar a coleta de dados do ambiente onde a produção efetivamente acontece. A instalação de sensores diretamente na propriedade possibilita acompanhar as alterações climáticas e do solo ao longo do tempo, gerando informações mais compatíveis com a realidade local. Quando esses dados são reunidos e apresentados de maneira acessível, podem auxiliar o produtor no planejamento das atividades, no uso mais eficiente dos recursos e na redução de riscos e perdas produtivas (Embrapa Pecuária Sudeste, 2024).

A utilização de tecnologias digitais também facilita o acesso às informações coletadas, permitindo que o produtor acompanhe as condições da propriedade por meio de dispositivos móveis. Dessa maneira, o monitoramento deixa de depender exclusivamente de observações isoladas e passa a oferecer um histórico de dados capaz de apoiar comparações, identificar variações e contribuir para decisões mais precisas.

Diante disso, este trabalho teve como objetivo desenvolver, implementar e avaliar a AgroEstação, um sistema destinado à coleta integrada de dados meteorológicos e do solo, testado in loco na região Oeste do Paraná e com informações disponibilizadas por meio de aplicativo. A contribuição do sistema para a lacuna identificada consiste em possibilitar o acompanhamento contínuo e integrado das condições locais e em avaliar essa proposta no contexto real da região estudada, contribuindo para o avanço da agricultura de precisão.

1. REFERENCIAL TEÓRICO

A compreensão das condições que interferem na produção agrícola envolve a análise de diferentes fatores ambientais e tecnológicos.

Neste estudo, são abordados aspectos relacionados à agrometeorologia, ao monitoramento do solo e à agricultura de precisão, destacando a importância da obtenção e integração de dados para o acompanhamento das áreas produtivas.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Esses conceitos servem de base para o desenvolvimento e a aplicação de sistemas integrados de monitoramento, como a AgroEstação.

1.1. Agrometeorologia

A agrometeorologia estuda as relações entre as condições atmosféricas e a produção agropecuária, integrando conhecimentos da meteorologia e da climatologia à agricultura (Abreu, 2022). Variáveis como temperatura, precipitação, umidade relativa do ar e vento exercem influência direta sobre o desenvolvimento das culturas e o desempenho agrícola (INMET, 2020).

Nesse contexto, as estações meteorológicas constituem importantes ferramentas para o acompanhamento das condições climáticas, permitindo o registro de temperatura, umidade, radiação solar, velocidade do vento e precipitação. Nas estações automáticas, a coleta de dados é realizada de forma automatizada, possibilitando o registro contínuo dos elementos meteorológicos em intervalos programáveis e reduzindo a necessidade da presença diária de um observador (Pereira; Angelocci; Sentelhas, 2002).

Além disso, condições locais relacionadas ao ambiente de cultivo podem resultar em diferenças entre os dados observados diretamente na propriedade e aqueles registrados por estações de referência, reforçando a importância do monitoramento próximo às áreas produtivas.

1.2. Monitoramento do Solo

O solo constitui um dos principais recursos para a produção agrícola, fornecendo suporte, água e nutrientes necessários ao desenvolvimento das plantas. Sua fertilidade está relacionada à capacidade de disponibilizar nutrientes essenciais em quantidades adequadas às culturas (Novais et al., 2007). Além da fertilidade, atributos como umidade, temperatura, pH e condutividade elétrica fornecem informações relevantes sobre as condições do ambiente de cultivo.

A umidade do solo exerce influência direta sobre o desenvolvimento das plantas e sua capacidade de adaptação às condições ambientais (Gomes; Rossi, 2021). Por esse motivo, o acompanhamento contínuo dos atributos edáficos permite identificar alterações ao longo do ciclo produtivo e diferenças entre áreas agrícolas.

Com o avanço tecnológico, sensores integrados às ferramentas de agricultura de precisão passaram a possibilitar a coleta e o processamento contínuo de dados diretamente no campo. Essas informações auxiliam na identificação das variações do solo e das culturas, contribuindo para decisões mais precisas relacionadas ao manejo agrícola (Bernardi et al., 2014).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Para garantir a confiabilidade das informações obtidas, a calibração dos equipamentos e a comparação com métodos de referência constituem etapas importantes no desenvolvimento e validação desses sistemas.

1.3. Agricultura de Precisão e Sistemas Integrados de Monitoramento

A agricultura de precisão baseia-se no gerenciamento das áreas agrícolas considerando suas características e necessidades específicas, permitindo intervenções no local e no momento adequados (Manzatto; Freitas Junior; Peres, 2002). Essa abordagem considera a variabilidade espacial e temporal existente nas lavouras e utiliza informações obtidas no campo para apoiar o planejamento e o manejo.

A integração de sensores ambientais e de solo com tecnologias digitais amplia as possibilidades de monitoramento agrícola. Essas tecnologias permitem coletar e processar dados sobre as condições do solo e das culturas em tempo real, contribuindo para decisões mais precisas e para o controle eficiente da produção agrícola (Zhang, 2016).

Nesse cenário, a Internet das Coisas (IoT) amplia a integração tecnológica no meio rural, pois “observa-se a possibilidade de ampla difusão da comunicação entre sensores e dispositivos” (Kubota; Rosa, 2023, p. 126). A integração entre informações meteorológicas e atributos do solo favorece uma análise mais completa das condições da propriedade, uma vez que fatores climáticos, como precipitação e temperatura, estão relacionados à dinâmica hídrica e às condições do solo.

Dessa forma, a integração entre estações meteorológicas, sensores de solo e plataformas digitais constitui uma importante ferramenta para a agricultura de precisão e fundamenta o desenvolvimento de sistemas de monitoramento integrado, como a AgroEstação.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área e período do estudo

O estudo foi conduzido entre dezembro de 2025 e abril de 2026 em cinco propriedades rurais, denominadas A, B, C, D e E, localizadas na região Oeste do Paraná e referenciadas no município de Medianeira. As áreas avaliadas apresentam Latossolos Vermelhos de textura argilosa (Curcio; Gomes, 2021; Seidel et al., 2023).

O experimento compreendeu 99 dias de monitoramento, distribuídos em períodos não contínuos, com duração entre 8 e 37 dias nas diferentes propriedades. Inicialmente, foi estabelecido um período aproximado de 20 dias de monitoramento em cada local.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Entretanto, o número efetivo de dias com dados válidos variou entre as propriedades devido, principalmente, à instabilidade ou à ausência de sinal para transmissão dos dados. Essas condições ocasionaram interrupções no monitoramento e registros considerados inadequados, resultando em séries temporais com diferentes extensões.

2.2. Equipamentos e monitoramento

A AgroEstação foi composta por uma estação meteorológica automática FT0360 e um sensor multiparamétrico de solo 7 em 1, modelo CWT-Soil-dl-4g0, ambos com transmissão remota de dados por Wi-Fi ou rede móvel 4G.

A estação meteorológica FT0360 registrou temperatura do ar, umidade relativa do ar, pressão atmosférica, radiação solar, velocidade do vento e precipitação. O sensor multiparamétrico realizou leituras de temperatura e umidade do solo, pH, condutividade elétrica e teores estimados de nitrogênio, fósforo e potássio.

O sensor multiparamétrico realiza suas determinações por meio de sinais elétricos, fornecendo informações relacionadas às condições do solo e aos teores estimados de nutrientes. Durante o período experimental, observou-se maior ocorrência de registros e variações nas leituras associadas aos períodos de precipitação, possibilitando avaliar a resposta dos parâmetros do solo às alterações de umidade.

2.3. Dados meteorológicos de referência

Para avaliar os dados meteorológicos registrados pela estação FT0360, foram utilizados como referência os registros provenientes de estações meteorológicas do Sistema de Tecnologia e Monitoramento Ambiental do Paraná (SIMEPAR) e do Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), localizadas em Foz do Iguaçu, São Miguel do Iguaçu, Santa Helena, Cascavel e Toledo.

As estações de referência encontravam-se a distâncias entre 19,6 km e 75,3 km das propriedades monitoradas, sendo a estação de São Miguel do Iguaçu a mais próxima na maioria dos locais avaliados.

As séries temporais registradas pela AgroEstação foram comparadas com os dados das respectivas estações de referência. Em cada comparação, foram utilizados exclusivamente os registros coincidentes em data e horário, possibilitando avaliar o comportamento e a representatividade dos dados meteorológicos coletados nas propriedades.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

2.4. Padronização e tratamento dos dados meteorológicos

Os registros foram ajustados para o fuso horário da região America/Sao_Paulo e reamostrados em intervalos horários.

A velocidade do vento, originalmente expressa em quilômetros por hora, foi convertida para metros por segundo mediante divisão dos valores por 3,6. A radiação solar, originalmente expressa em quilojoules por metro quadrado, foi convertida para watts por metro quadrado mediante multiplicação por 1.000 e posterior divisão por 3.600.

Os valores acumulados de precipitação foram convertidos em valores incrementais por meio da diferença entre registros consecutivos. As diferenças negativas ocasionadas por reinicializações do sistema foram ajustadas para zero.

Após a padronização, foram considerados nas análises somente os dados válidos e temporalmente correspondentes entre a AgroEstação e as estações meteorológicas de referência. Registros ausentes ou considerados inadequados foram desconsiderados.

2.5. Coleta e análise laboratorial do solo

Em cada propriedade foi coletada uma amostra composta de solo, totalizando cinco amostras compostas, uma por propriedade. Cada amostra foi constituída por 20 subamostras coletadas em diferentes pontos da respectiva área experimental.

As subamostras foram retiradas na camada de 0–20 cm de profundidade com o auxílio de um trado holandês. Após a coleta, as 20 subamostras de cada propriedade foram homogeneizadas, formando uma única amostra composta representativa da área. Posteriormente, cada amostra foi acondicionada na embalagem disponibilizada pelo laboratório.

As cinco amostras compostas foram encaminhadas ao Lab + Agro, localizado no município de Serranópolis do Iguaçu, Paraná, para realização das análises laboratoriais. Os resultados individuais de cada propriedade foram utilizados como referência para interpretação e comparação com os dados registrados pelo sensor de solo, especialmente para o parâmetro pH.

2.6. Monitoramento e comparação dos dados do solo

Os dados registrados pelo sensor multiparamétrico foram interpretados considerando as características químicas determinadas laboratorialmente para o solo de cada propriedade.

O resultado laboratorial obtido a partir da amostra composta representou as condições do solo de cada propriedade no momento da coleta.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Os dados do sensor, por sua vez, constituíram séries temporais obtidas ao longo do período de monitoramento.

A comparação entre os resultados laboratoriais e os registros do sensor foi realizada individualmente para cada propriedade, considerando as respectivas características químicas do solo.

2.7. Análise estatística

Os dados foram organizados, processados e analisados por meio de rotinas desenvolvidas em Python, utilizando-se as bibliotecas Pandas, SciPy e Statsmodels.

Inicialmente, foram calculadas estatísticas descritivas para cada variável avaliada, incluindo média e desvio-padrão. A distribuição e a dispersão dos dados também foram examinadas por meio de histogramas e diagramas de caixa.

A normalidade dos dados foi avaliada pelo teste de Shapiro-Wilk, enquanto a homogeneidade das variâncias foi verificada pelo teste de Levene. Em todas as análises estatísticas foi adotado o nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$).

Quando atendidos os pressupostos de normalidade e homogeneidade das variâncias, foi aplicada a análise de variância. O modelo estatístico geral empregado pode ser representado por $Yij = \mu + Gi + \varepsilon ij$, em que Yij corresponde à j-ésima observação pertencente ao grupo i; μ representa a média geral; Gi representa o efeito do grupo avaliado; e εij corresponde ao erro aleatório associado à observação.

Quando a análise de variância indicou diferença significativa entre os grupos, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, adotando-se o nível de significância de 5%.

Nos casos em que os pressupostos de normalidade ou homogeneidade das variâncias não foram atendidos, foi empregado o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis. Quando aplicável, as comparações entre pares foram realizadas pelo teste de Wilcoxon.

Para avaliar o desempenho da estação meteorológica FT0360 em relação às estações meteorológicas de referência, foram utilizados os registros temporalmente correspondentes. As análises foram realizadas individualmente para cada variável meteorológica avaliada.

Foram calculados o viés, o erro absoluto médio, a raiz do erro quadrático médio, o coeficiente de correlação de Pearson e o coeficiente de determinação.

O viés correspondeu à diferença média entre os valores registrados pela AgroEstação e os valores da estação de referência. Valores positivos indicaram superestimação pela AgroEstação, enquanto valores negativos indicaram subestimação.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

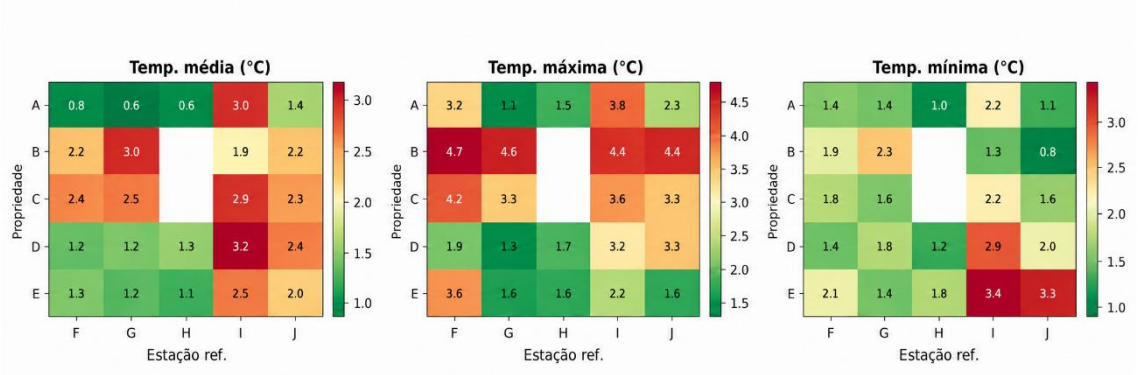
O erro absoluto médio correspondeu à média dos valores absolutos das diferenças entre os dados da AgroEstação e os dados de referência. A raiz do erro quadrático médio foi calculada a partir da raiz quadrada da média dos quadrados dessas diferenças.

O coeficiente de correlação de Pearson foi utilizado para avaliar a intensidade da associação linear entre os registros temporalmente correspondentes da AgroEstação e das estações de referência. O coeficiente de determinação foi utilizado para avaliar a proporção da variação dos dados explicada pela relação entre os conjuntos comparados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A AgroEstação apresentou desempenho satisfatório no monitoramento das variáveis meteorológicas, com elevada concordância para temperatura do ar e comportamento consistente para as demais variáveis; as diferenças observadas relacionaram-se principalmente a características locais, como altitude, relevo, cobertura do solo e distância às estações de referência.

Figura 1. RMSE da temperatura, por propriedade e estação de referência



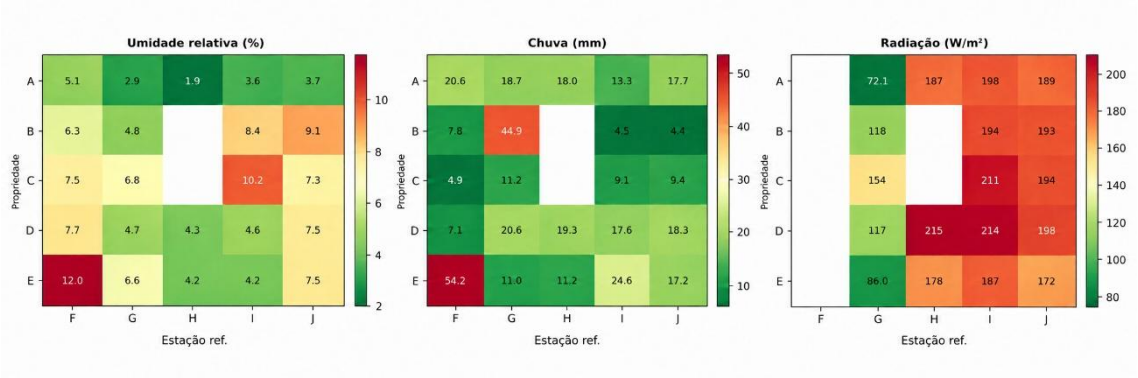
Fonte: Os autores, 2026.

Conforme a Figura 1, as temperaturas média, máxima e mínima apresentaram os menores erros, sobretudo nas comparações com São Miguel do Iguaçu e Santa Helena, enquanto as comparações com Cascavel resultaram em valores mais elevados de Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE – *Root Mean Square Error*).

A análise de correlação confirmou associação positiva e significativa entre a distância geográfica e o RMSE para temperatura média ($r = 0,54$; $p = 0,007$), temperatura máxima ($r = 0,44$; $p = 0,037$) e temperatura mínima ($r = 0,43$; $p = 0,040$).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 2. RMSE das variáveis relacionadas à umidade e à energia, por propriedade e estação de referência



Fonte: Os autores, 2026.

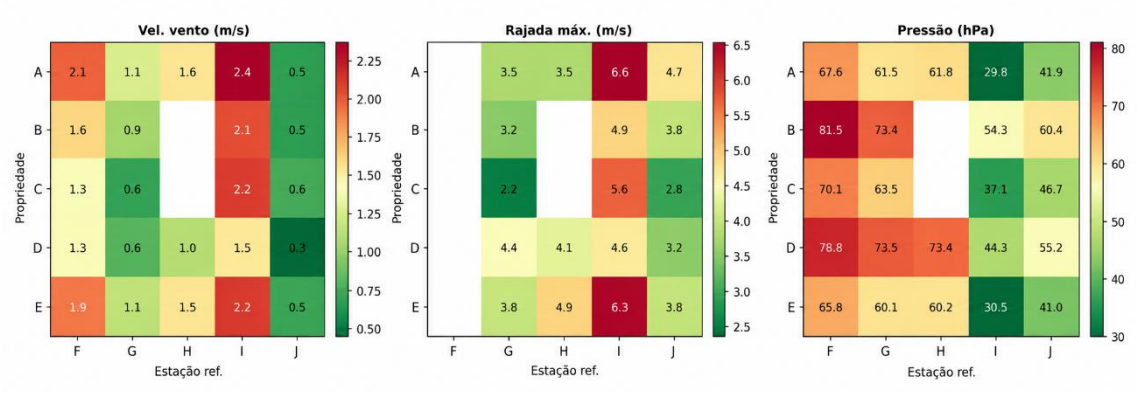
De acordo com a Figura 2, a umidade relativa apresentou comportamento intermediário, refletindo aspectos como relevo, cobertura vegetal e altura de instalação dos sensores.

A radiação solar e a precipitação apresentaram maior variabilidade espacial. A radiação solar das propriedades ficou, em média, entre 40 e 85 W/m² abaixo das referências, possivelmente em razão de diferenças no sensor, de sombreamento parcial ou do método de conversão utilizado pelo SIMEPAR, de kJ/m² para W/m². A precipitação, por sua vez, mostrou-se altamente local, característica típica de eventos convectivos.

A análise de correlação confirmou associação positiva e significativa entre a distância geográfica e o RMSE para radiação solar ($r = 0,77$; $p < 0,001$). Já a umidade relativa ($r = 0,27$) e a precipitação ($r = -0,09$) não mostraram efeito claro da distância.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 3. RMSE da velocidade média do vento, rajada máxima e pressão atmosférica, por propriedade e estação de referência



Fonte: Os autores, 2026.

Conforme a Figura 3, a velocidade média do vento e a rajada máxima também apresentaram comportamento intermediário, igualmente influenciado pelo relevo, pela cobertura vegetal e pela altura de instalação dos sensores. A pressão atmosférica apresentou os maiores erros, associados principalmente à diferença de altitude entre os locais, e não à distância horizontal.

Nas rajadas máximas de vento, as propriedades registraram valores entre 1,7 e 3,3 m/s menores que as referências. Essas diferenças foram atribuídas à menor altura de instalação dos anemômetros e ao perfil logarítmico da velocidade do vento em relação à altura.

Esse resultado reforça que as estações de referência, muitas vezes instaladas em áreas urbanas ou sobre edificações, nem sempre refletem a realidade do produtor rural. A AgroEstação, por outro lado, encontra-se posicionada em áreas abertas de lavoura e em altura padronizada.

A rajada máxima ($r = 0,42$) e a velocidade do vento ($r = 0,24$) não mostraram efeito claro da distância. Já a pressão atmosférica apresentou correlação negativa significativa ($r = -0,47$; $p = 0,025$), reforçando que essa variável é mais influenciada pela altitude do que pela distância horizontal.

Considerando conjuntamente os resultados apresentados, em 45 comparações realizadas (5 propriedades × 9 variáveis), a estação de São Miguel do Iguaçu obteve o menor RMSE com maior frequência (15 vezes, a 26,7 km em média das propriedades), seguida por Toledo (13 vezes, 64,3 km), Cascavel (8 vezes) e Santa Helena (6 vezes); Foz do Iguaçu

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

apresentou o pior desempenho relativo (3 vezes), possivelmente em razão das características do local de instalação e da frequência temporal das medições.

Dessa forma, a análise conjunta das variáveis demonstra que a proximidade geográfica, isoladamente, não determina o melhor desempenho das estações de referência, pois fatores relacionados ao local de instalação e às características de cada variável também influenciam os resultados.

3.1. Monitoramento do solo

No monitoramento do solo, a integração de dados de chuva, temperatura, umidade, pH, condutividade elétrica e macronutrientes (NPK) permitiu observar a influência do clima sobre a dinâmica do solo: eventos de chuva aumentaram a disponibilidade hídrica e a representatividade das leituras, enquanto períodos de estiagem trouxeram maior estabilidade às variáveis do solo.

Na propriedade A (08/dez/2025 a 08/jan/2026, cultura da soja), a umidade do solo respondeu rapidamente à chuva, com aumentos seguidos de redução gradual (infiltração, evaporação e consumo pela cultura); a temperatura do solo variou menos que a do ar, favorecida pelo fechamento das entrelinhas da cultura; o pH manteve-se estável, com pequenas oscilações associadas à chuva, enquanto a condutividade elétrica variou mais, indicando alterações na dinâmica iônica da solução do solo.

Em um evento de chuva analisado em detalhe, observou-se aumento imediato da umidade e retenção hídrica prolongada, coerente com a textura muito argilosa do solo (63,20% de argila), além de elevação da condutividade elétrica associada à mobilização de sais e nutrientes, evidenciando que a chuva altera tanto a disponibilidade de água quanto a dinâmica química do solo.

A comparação entre as propriedades B, C, D e E, em janelas curtas de coleta, evidenciou comportamento distinto entre elas, reforçando a variabilidade espacial dos atributos do solo e a importância do monitoramento local frente a dados regionais genéricos. Ao longo do experimento foram coletados mais de cem mil registros minuto a minuto; falhas pontuais em sensores e um pequeno atraso identificado na extração dos dados reforçam a necessidade de calibração e testes contínuos antes da disponibilização comercial do protótipo, em linha com o observado por Spancerski (2020) quanto à necessidade de tratamento, limpeza e normalização de dados de sensores para aumentar a confiabilidade das análises.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

3.2. Validação do sensor de pH

A validação do sensor de pH em relação às análises laboratoriais mostrou boa consistência geral, embora com diferenças pontuais atribuídas à comparação entre pH em $CaCl_2$ e pH em água, além da própria diferença metodológica: o sensor realiza medições contínuas e pontuais, influenciadas pela umidade do solo, enquanto a análise laboratorial representa o valor médio da área amostrada.

Os valores de pH apresentaram baixa variabilidade ao longo do período monitorado, indicando estabilidade química dos solos avaliados, mas a análise laboratorial mostrou-se mais estável que o sensor, o que evidencia a necessidade de calibração adicional do protótipo para essa variável.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo de desenvolver e implementar a AgroEstação foi atingido, resultando em um protótipo funcional capaz de coletar, transmitir e integrar dados meteorológicos e do solo. O sistema operou em cinco propriedades rurais da região Oeste do Paraná e gerou mais de cem mil registros ao longo de 99 dias de experimento, demonstrando capacidade de monitoramento contínuo em condições reais de campo.

O objetivo de avaliar experimentalmente o sistema também foi realizado, por meio da comparação dos dados meteorológicos com estações de referência e das leituras de pH do solo com análises laboratoriais. Os resultados indicaram maior concordância para a temperatura do ar e comportamento consistente para as demais variáveis meteorológicas. Também demonstraram que a distância geográfica, isoladamente, não determina a concordância entre as estações, uma vez que altitude, relevo, cobertura do solo, condições de instalação e características próprias de cada variável influenciaram as diferenças observadas.

Entretanto, a validação experimental foi atingida apenas parcialmente. A pressão atmosférica apresentou erros mais elevados, enquanto as leituras de pH demonstraram a necessidade de calibração adicional. Também foram identificadas falhas pontuais nos sensores e atraso na extração de parte dos dados. Essas limitações não impediram o funcionamento do protótipo, mas indicam que sua precisão e estabilidade ainda precisam ser aprimoradas.

Dessa forma, a AgroEstação pode ser classificada como um protótipo funcional submetido à avaliação experimental em campo, mas ainda não como um sistema integralmente

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

validado ou pronto para aplicação comercial. Para alcançar essa etapa, são necessários novos procedimentos de calibração, ampliação do período de monitoramento, repetição dos testes em diferentes condições de solo e clima e avaliação da estabilidade operacional do sistema.

Conclui-se que a AgroEstação apresenta potencial como ferramenta de apoio à agricultura de precisão, especialmente por integrar informações meteorológicas e do solo em uma única plataforma. Como continuidade do trabalho, recomenda-se aperfeiçoar os sensores, ampliar a validação experimental e, posteriormente, incorporar modelos preditivos e sistemas de apoio à decisão.

REFERÊNCIAS

ABREU, José Paulo de Melo e. **Agrometeorologia: aplicação da meteorologia para maximizar a produção agrícola.** 2. ed. Lisboa: Agrobook, 2022. 390 p. Disponível em: https://www.booki.pt/loja/prod/agrometeorologia-2-edicao/9789899101494/. Acesso em: 28 set. 2025.

BERNARDI, Alberto Carlos de Campos; NAIME, João de Mendonça; RESENDE, Álvaro Vilela de; BASSOI, Luís Henrique; INAMASU, Ricardo Yassushi (ed.). **Agricultura de precisão:** resultados de um novo olhar. Brasília, DF: Embrapa, 2014. 596 p. Disponível em: https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1002959. Acesso em: 1 ago. 2026.

CURCIO, Gustavo Ribas; GOMES, João Bosco Vasconcellos. **A estrutura em Latossolos Vermelhos derivados de rochas eruptivas na Bacia Hidrográfica Paraná III** – BHP III. Curitiba: Secretaria de Estado da Agricultura e do Abastecimento (SEAB), 2021. Acesso em: 8 maio 2026.

EMBRAPA PECUÁRIA SUDESTE. **Monitoramento do solo possibilita diagnóstico preciso, decisões estratégicas e manejo sustentável.** São Carlos, 4 dez. 2024. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/96181389/monitoramento-do-solo-possibilita-diagnostico-preciso-decisoes-estrategicas-e-manejo-sustentavel. Acesso em: 8 maio 2026.

GOMES, Tamara Maria; ROSSI, Fabrício. **Água e solo na agricultura sustentável.** Pirassununga: Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo, 2021. 56 p. DOI: https://doi.org/10.11606/9786587023168.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Sobre meteorologia.** Brasília, DF: INMET, [s.d.]. Disponível em: https://portal.inmet.gov.br/sobre-meteorologia. Acesso em: 7 maio 2026.

KUBOTA, Luis Claudio; ROSA, Mauricio Benedeti. **Internet das coisas e conectividade no campo.** In: VIEIRA FILHO, José Eustáquio Ribeiro; GASQUES, José Garcia (org.). Agropecuária brasileira: evolução, resiliência e oportunidades. Rio de Janeiro: Ipea, 2023. p. 125–151. DOI: https://doi.org/10.38116/9786556350530cap6.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

MANZATTO, Celso Vainer; FREITAS JUNIOR, Elias de; PERES, José Roberto Rodrigues (ed.). **Uso agrícola dos solos brasileiros.** Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002. 174 p. Disponível em: http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/328096. Acesso em: 1 jul. 2026.

NOVAIS, Roberto Ferreira de et al. (ed.). **Fertilidade do solo.** Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. 1017 p.

OLIVEIRA, Alicia Mayra Araújo de. P**rotótipo de mini-estação meteorológica utilizando plataforma Arduino.** 2019. 32 f. Monografia (Graduação) — Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Centro Multidisciplinar de Angicos, Angicos, RN, 2019.

PEREIRA, Antônio Roberto; ANGELOCCI, Luiz Roberto; SENTELHAS, Paulo Cesar. **Agrometeorologia:** fundamentos e aplicações práticas. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478 p.

SEIDEL, Edleusa Pereira et al. **Principais solos da mesorregião Oeste do Paraná:** abordagem para educadores do ensino fundamental e médio. Marechal Cândido Rondon: NEPAR/SBCS, 2023. 1 recurso online (PDF). ISBN 978-85-69146-09-4. Disponível em: https://sbcs-nepar.org.br/wp-content/uploads/2023/11/Cartilha-solos-oeste-PR-versao-final.pdf. Acesso em: 7 maio 2026.

SPANCERSKI, Jandrei Sartori. **Utilização de redes neurais artificiais para classificação de farinha de trigo em uma indústria de biscoitos e massas.** 2020. 50 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Computacionais para o Agronegócio) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2020. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/25456/1/redesneuraisfarinhatrigo.pdf. Acesso em: 9 maio 2026.

ZHANG, Qin (ed.). **Precision agriculture technology for crop farming.** Boca Raton: CRC Press, 2016.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.