SMART-SENSOR DE SOLO: UMA PLATAFORMA MULTISSENSOR PARA CARACTERIZAÇÃO DA VARIABILIDADE ESPACIAL DO SOLO

Eduardo Leonel Bottega[1]; Daniel Marçal de Queiroz[2]; André Luiz de Freitas Coelho[2]; Emanoel di Tarso dos Santos Sousa[3]; Marcelo Marques Costa[4]; Domingos Sárvio Magalhães Valente[2]; Zanandra Boff de Oliveira[1]; Ezequiel Saretta[1]

[1] Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Programa de Pós-Graduação em Agricultura de Precisão (PPGAP), Colégio Politécnico da Universidade Federal de Santa Maria (POLI/UFSM), Santa Maria, RS – eduardo.bottega@ufsm.br; zanandra.oliveira@ufsm.br; ezequiel.saretta@ufsm.br

[2]Universidade Federal de Viçosa (UFV), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PPGEA), Departamento de Engenharia Agrícola (DEA), Viçosa, MG – queiroz@ufv.br; andre.coelho@ufv.br; valente@ufv.br

[3]Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Departamento de Engenharia Agrícola (DEAGRI), Recife, PE – emanoel.sousa@ufrpe.br

[4]Universidade Federal de Jataí (UFJ), Instituto de Ciências Agrárias, Jataí, GO – marcelo_marques_costa@ufj.edu.br

Resumo

A caracterização da variabilidade espacial do solo é fundamental para a Agricultura de Precisão, pois permite identificar diferenças dentro das áreas cultivadas e subsidiar estratégias de amostragem, diagnóstico e manejo localizado. A condutividade elétrica aparente do solo (CEa) destaca-se como uma variável de aquisição rápida que permite obter mapas com elevada resolução espacial. Essa variável é influenciada por atributos físicos, químicos e hídricos do solo de interesse agronômico. Nesse contexto, a plataforma Smart-sensor de solo constitui uma plataforma multissensor de baixo custo desenvolvida para a aquisição georreferenciada de CEa, umidade e temperatura do solo. A CEa é determinada pelo método resistivo, utilizando quatro eletrodos em configuração de matriz Wenner, com espaçamento de 0,30 m, enquanto a umidade é obtida por método capacitivo e a temperatura por sensor Pt100. A plataforma incorpora mecanismo de automonitoramento do contato dos eletrodos com o solo, contribuindo para a confiabilidade da aquisição. Testes de bancada, realizados com 11 resistores e 15 leituras por condição, apresentaram coeficiente de variação entre 0,00 e 3,51% e erro absoluto médio percentual de até 6,69%. Na comparação com sensor de referência, não foram observadas diferenças significativas para três das condições avaliadas. Em campo, a plataforma foi avaliada em área de 8,6 ha, com 75 pontos georreferenciados, apresentando CEa entre 2,10 e 11,00 mS m^{-1} e correlação de 0,80 com o LandMapper® ERM-02. A CEa apresentou dependência espacial e correlação com a umidade e a temperatura do solo. Os resultados indicam que a plataforma Smart-sensor de solo apresenta potencial para caracterizar a variabilidade espacial do solo e gerar informações de apoio à amostragem e à delimitação de zonas de manejo.

Introdução

A produtividade agrícola dentro de um campo de produção não é uniforme, sendo parte das causas dessa variabilidade as diferenças nas características físicas, químicas e hídricas do solo que fazem com que cada região de uma lavoura apresente diferentes capacidades de armazenar água, disponibilizar

nutrientes e sustentar o desenvolvimento das plantas. Reconhecer essa variabilidade é fundamental para a Agricultura de Precisão (AP), que busca adequar o manejo às condições existentes em cada ambiente.

A condutividade elétrica aparente do solo (CEa) expressa a facilidade com que uma corrente elétrica se desloca pelo solo. O termo "aparente" indica que a resposta representa o volume de solo, um corpo heterogêneo formado por partículas sólidas, líquidas e gasosas, diferente da condutividade elétrica de um material homogêneo, como um metal (por exemplo). Outra diferença entre um metal e o solo é que a condutividade elétrica do metal é constante, e a condutividade elétrica aparente do solo é uma variável dinâmica que se modifica com o teor de água e a temperatura do solo. A CEa é influenciada, entre outros fatores, pelo teor de água, textura, matéria orgânica, salinidade e atributos químicos (Kitchen et al., 2003; Serrano et al., 2010).

Para a AP, uma vantagem decisiva da CEa é a rapidez de aquisição, associada ao baixo custo de obtenção e à possibilidade de obter alta densidade espacial de dados. Por isso, mapas de CEa podem ser usados para reconhecer padrões de variabilidade, orientar a localização de pontos de amostras de solo e apoiar a delimitação de zonas de manejo (Corwin; Lesch, 2003; Molin; Rabello, 2011).

A CEa, entretanto, não deve ser interpretada como um indicador direto de fertilidade, pois o seu maior valor está em indicar padrões espaciais que precisam ser investigados com informações complementares. A integração com análises de solo, produtividade, relevo e sensoriamento remoto permite transformar o mapa de condutividade elétrica aparente do solo em informação útil para a tomada de decisão. Como a umidade e a temperatura também influenciam a resposta elétrica, sua medição simultânea pode contribuir para a interpretação. Nesse contexto, a plataforma Smart-sensor de solo reúne, em uma única plataforma, medições de CEa, umidade e temperatura do solo, associadas às coordenadas geográficas do ponto mensurado. Esta nota técnica apresenta seu princípio de funcionamento, procedimento de uso, resultados de validação e recomendações para utilização na Agricultura de Precisão.

Plataforma smart-sensor

A plataforma Smart-sensor de solo integra sensores de condutividade elétrica aparente do solo, umidade e temperatura do solo, unidade eletrônica e aplicativo de aquisição. A CEa é obtida pelo método resistivo; o teor de água do solo, por circuito/sensor capacitivo e a temperatura por sensor do tipo termorresistente, constituído por um resistor que funciona medindo a variação da resistência elétrica da platina conforme a temperatura muda. Esse sensor apresenta resistência de 100 ohms (Ω) a 0 °C.

Os sensores e circuitos são integrados a um microcontrolador ESP32-S3, programado em C++ na plataforma Arduino IDE, que se comunica com um tablet Android por Bluetooth Low Energy (BLE) 5.0. O aplicativo registra as leituras juntamente com data, hora e posição geográfica, formando um banco de dados espacial. O sistema incorpora ainda um mecanismo de automonitoramento do sinal, capaz de verificar o contato entre os eletrodos e o solo durante a aquisição, reduzindo a possibilidade de registros inadequados (Luiz et al., 2026).

Na configuração utilizada, os quatro eletrodos metálicos, de boa condutividade elétrica, possuem espaçamento de 0,30 m e são dispostos segundo a matriz de Wenner. A resistividade é determinada a partir da corrente aplicada e da diferença de potencial medida entre os eletrodos internos. A CEa corresponde ao inverso da resistividade. Na Figura 1 é apresentada a descrição e a configuração estrutural da plataforma Smart-sensor de solo.

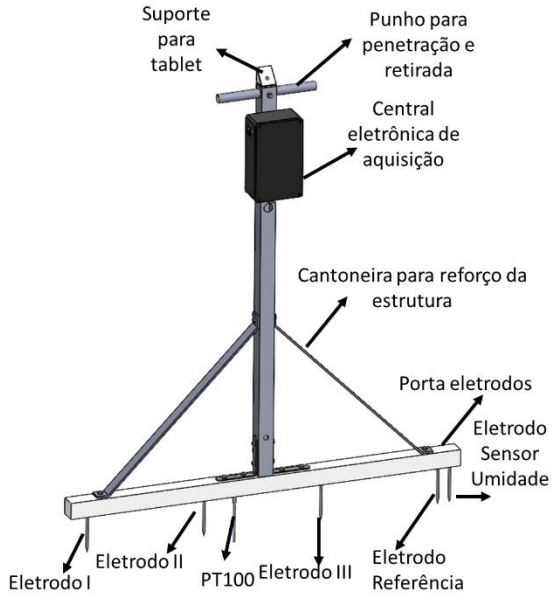


Figura 1. *Configuração estrutural da plataforma Smart-sensor de solo, destacando os eletrodos utilizados para a determinação da condutividade elétrica aparente do solo (CEa), o sensor de temperatura PT100 e os componentes do sistema de aquisição. Fonte: Adaptado de Bottega et al. (2024).*

A relação da matriz de Wenner pode ser expressa por $CEa = I/(2\pi a \Delta V)$, em que I é a corrente elétrica (A), *a* é o espaçamento entre eletrodos (m) e ΔV é a diferença de potencial (V). A distância entre eletrodos adotada no sensor (30 cm) está associada, aproximadamente, à profundidade da camada de solo cuja condutividade está sendo determinada (Corwin; Hendrickx, 2002; Luiz et al., 2026).

O sensor capacitivo de teor de água produz um sinal elétrico relacionado à condição hídrica do solo e deve ser calibrado experimentalmente para converter o sinal em teor de água, expresso como teor de água volumétrico (kg de água/m^3 de solo). O princípio explorado é que o aumento do teor de água altera as propriedades dielétricas do meio e, consequentemente, o sinal elétrico de saída. O PT100, usado para medir a temperatura do solo, também requer calibração para relacionar o sinal elétrico à temperatura. Como teor de água e temperatura influenciam a CEa, sua medição simultânea é importante para interpretar corretamente os mapas de condutividade elétrica aparente do solo (Sousa et al., 2023; Luiz et al., 2026).

Indicações de uso de plataforma smart-sensor

O sensor foi concebido para ter operação simples, devendo-se, inicialmente, verificar a alimentação, a conexão com o tablet e as condições dos sensores. Em seguida, os eletrodos devem ser inseridos no solo no ponto amostral, assegurando-se o contato adequado com o solo. O ponto deve ser nomeado pelo usuário, essa mesma denominação é usada pela plataforma durante as repetições que são automaticamente identificadas.

Inicia-se a leitura clicando no botão “MEDIR” na interface gráfica do aplicativo de coleta de dados (Figura 2A), após cada leitura realizada pelo sensor, deve-se conferir os valores de CEa, teor de água, temperatura e a indicação de contato dos eletrodos com o solo, em seguida, esses valores devem ser armazenados na memória do sensor. É recomendável que se faça cinco repetições de leitura de condutividade elétrica aparente do solo por ponto amostral. Para que isso seja realizado, é necessário mudar ligeiramente o sensor de posição em torno do ponto amostral. O aplicativo registra latitude, longitude, altitude, CEa, temperatura, teor de água, tensão associada à umidade, nível de bateria e condição de contato dos eletrodos.

Na Figura 2, é apresentada a interface gráfica do aplicativo de coleta de dados com a plataforma Smart-sensor de solo (A) e sua utilização durante a realização de medições em campo (B). Nos casos em que são realizadas repetições, os dados podem ser posteriormente processados para obtenção dos valores médios e medianos de CEa e dos valores médios de teor de água e temperatura. Registros que apresentem contato inadequado dos eletrodos devem ser identificados e tratados antes da realização da análise espacial.

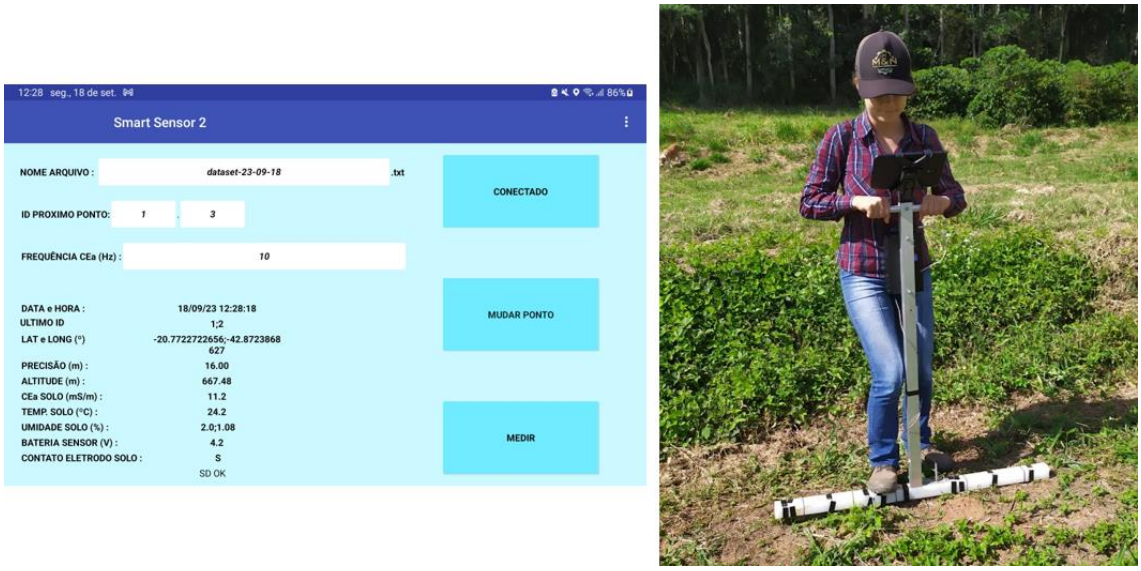


Figura 2. *Interface gráfica do aplicativo de coleta de dados com a plataforma Smart-sensor de solo e sua utilização durante a realização de medições em campo. Fonte: André Luiz Coelho*.

Validação da plataforma multissensor

Avaliação de bancada: Em condições controladas, o sistema foi testado com 11 resistores comerciais (4,7; 8; 10; 15; 47; 82; 150; 220; 330; 470 e 680 Ω), com 15 leituras por resistência. O coeficiente de variação das leituras permaneceu inferior a 4% em todas as condições, variando de 0,00 (zero) a 3,51%, indicando baixa dispersão das medições. O erro absoluto médio percentual máximo foi de 6,69%, observado para a resistência de 150 Ω.

Esses resultados fornecem evidência de repetibilidade e de desempenho consistente do circuito em condições controladas, é importante salientar que o teste com resistores não reproduz a heterogeneidade e o comportamento eletrolítico do solo, razão pela qual a validação de campo permanece indispensável (Luiz et al., 2026). Na tabela 1, é apresentado um resumo dos resultados experimentais de validação da plataforma Smart-sensor de solo e suas implicações para o uso.

Tabela 1. *Síntese dos resultados experimentais de validação da plataforma Smart-sensor de solo e suas implicações para o uso*

Etapa	Condição / procedimento	Principal evidência	Implicação para o uso
Bancada	11 resistores; 15 leituras por resistor	CV = 0,00–3,51%; MAE máximo = 6,69%	Baixa variabilidade das leituras em condição controlada
Comparação	Sistema inteligente × sensor de referência	Sem diferença significativa em 15; 220 e 470 Ω	Concordância elevada em parte das faixas avaliadas
Campo	Solo seco e úmido; 50 e 52 pontos efetivos	CEa espacialmente estruturada; efeitos de água e temperatura	A condição de aquisição deve ser considerada na interpretação

Avaliação em campo sob diferentes condições de umidade: A avaliação à campo foi conduzida no campo de futebol da Universidade Federal Rural do Pernambuco (UFRPE), em Recife, no estado de Pernambuco, em solo classificado como Argissolo Amarelo (EMBRAPA, 2001). Foram coletados dados em 50 pontos amostrais para solo seco, totalizando 3878 m^2 e 52 pontos amostrais para solo úmido, totalizando 4198 m^2. Em cada ponto foram realizadas cinco leituras com o sensor, em condições de solo seco e úmido. A CEa apresentou dependência espacial nas duas condições. Os resultados confirmam que a estrutura espacial da CEa pode ser identificada mesmo sob diferentes estados hídricos (Luiz et al., 2026).

A relação entre temperatura e o teor de água do solo com a CEa apresentou correlação de Pearson entre CEa e temperatura foi de r = −0,26 no solo seco e r = −0,60 no solo úmido. De acordo com Sheets e Hendrickx (1995), a CEa, em um dado ponto, aumenta com a temperatura do solo. Os resultados obtidos mostraram uma correlação negativa entre temperatura e condutividade elétrica. A possível explicação para isso, é que os dados de temperatura e CEa foram obtidos em diferentes pontos da área, pontos esses que apresentavam variabilidade de teor de água. Em pontos com maior teor de água, a CEa é mais elevada, e espera-se uma maior taxa de evaporação que pode resultar no efeito conhecido como resfriamento evaporativo, nesse caso do solo. A correlação de Pearson entre CEa e teor de água, foi de r = 0,29 e r = 0,32, para solo seco e solo úmido, respectivamente. Portanto, a umidade e a temperatura interferem na CEa e devem ser registradas durante o levantamento (Luiz et al., 2026), especialmente quando se pretende comparar medições em diferentes condições e tipos de solos.

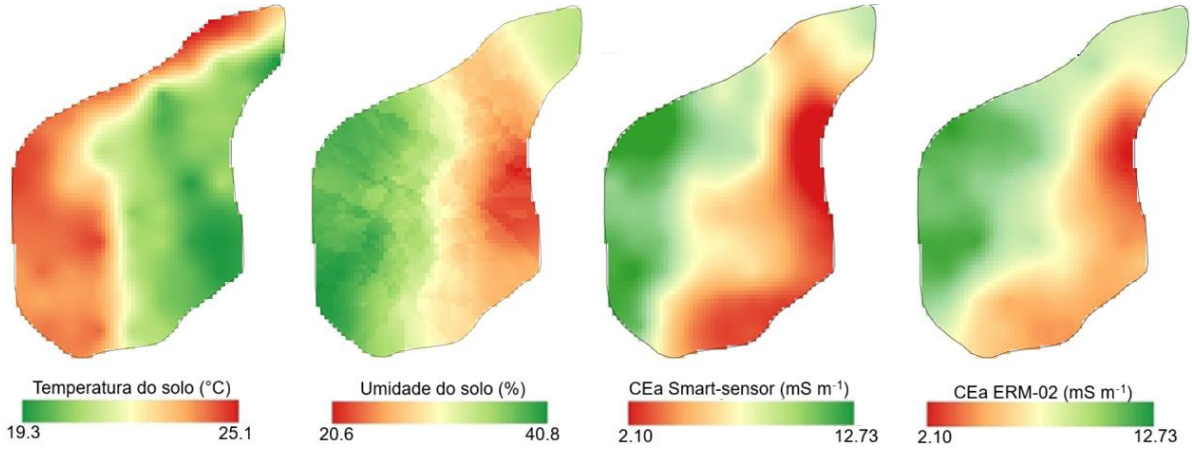
Para corrigir a CEa para uma temperatura padrão de 25º C, pode-se utilizar o fator de correção proposto por Sheets e Hendrickx (1995). A CEa deve ser multiplicada por f_T, dado por:

$$f_T = 0{,}4470 + 1{,}4034\, exp\left(-\frac{T}{26{,}815}\right)$$

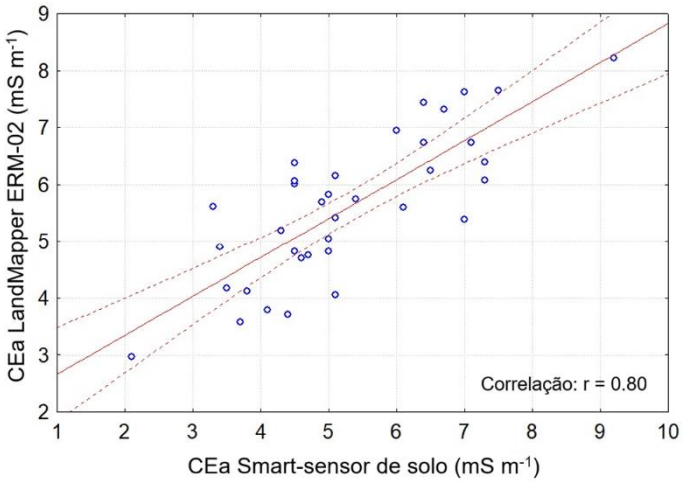
em que, T é a temperatura do solo, em ºC.

Avaliação em área agrícola: A plataforma foi avaliada também em uma área de 8,6 ha, destinada a produção de grãos em sistema de plantio direto, localizada no Campus da Universidade Federal de Santa Maria, em Cachoeira do Sul, RS. Na área foi estabelecida uma grade amostral composta por 75 pontos georreferenciados espaçados de forma uniforme em 35 m. Foram medidas CEa, teor de água e temperatura com a plataforma multissensor, além da CEa com o sensor comercial LandMapper® ERM-02 fabricado pela Landviser (Bottega et al., 2024). Em cada ponto amostral foram realizadas cinco leituras.

As três variáveis apresentaram variabilidade espacial. A CEa medida pela plataforma Smart-sensor de solo variou de 2,10 a 11,00 mS m^{-1}, com média de 5,51 mS m^{-1}. Já para as leituras efetuadas com o sensor comercial LandMapper ERM-02, foi observada variação de 2,93 a 12,73 mS m^{-1}, com média de 5,76 mS m^{-1}. Os mapas de CEa e umidade apresentaram comportamento espacial semelhante, enquanto a temperatura mostrou padrão oposto. A correlação entre as CEa dos dois equipamentos foi r = 0,80, indicando associação linear forte nas condições avaliadas. Na figura 3, são apresentados os mapas de temperatura e umidade do solo, CEa medida pelos dois sensores e gráfico de correlação entre os valores de CEa obtidos pelos diferentes sensores.



(A)



(B)

Figura 3. *Mapas temáticos representativos da variabilidade espacial da temperatura, umidade e CEa medida pela plataforma Smart-sensor de solo e pelo equipamento comercial LandMapper® ERM-02 (A) e gráfico de correlação entre valores de CEa medidos pelos dois sensores (B). Fonte: Adaptado de Bottega et al. (2024).*

Corroborando com os resultados obtidos por Luiz et al. (2026), os resultados apresentados na figura 3 reforçam que a consistência da CEa depende não apenas do desempenho eletrônico do sistema, mas também das condições ambientais durante a aquisição. Esses resultados demonstram que a plataforma foi capaz de representar padrões espaciais das variáveis avaliadas e apresentou comportamento consistente em comparação com o sensor comercial nas condições do experimento. Ao mesmo tempo, evidenciam porque o teor de água e a temperatura devem ser consideradas na interpretação da CEa. Na tabela 2 é apresentada uma síntese das possíveis aplicações, em AP, resultantes do mapeamento da CEa.

Tabela 2. *Mapeamento da CEa e possíveis aplicações em Agricultura de Precisão*

Informação obtida pelo mapeamento da CEa	Aplicação na Agricultura de Precisão
Áreas com comportamento semelhante	Identificar regiões da lavoura que apresentam padrões espaciais semelhantes de CEa e que podem constituir ambientes com características comuns.
Regiões para amostragem direcionada	Orientar a localização de pontos de amostragem de solo, concentrando a investigação em regiões que apresentam diferentes padrões de CEa.
Padrões associados à umidade do solo	Reconhecer regiões com maior ou menor resposta elétrica associada às condições hídricas, considerando que a umidade influencia diretamente a CEa.
Possíveis ambientes de produção	Apoiar a identificação de regiões espacialmente semelhantes que, após investigação complementar, podem contribuir para a definição de zonas de manejo.
Regiões que necessitam de investigação adicional	Indicar áreas que devem ser avaliadas conjuntamente com análises de solo, produtividade, relevo, sensoriamento remoto e histórico de manejo antes da tomada de decisão.

.

Do dado ao mapa

Após a mensuração da CEa em campo, quando necessário, a CEa pode ser corrigida em função da temperatura do solo antes da análise espacial e da comparação entre levantamentos. A presença de dependência espacial pode ser avaliada pelo ajuste de semivariogramas, seguida de interpolação por krigagem ordinária quando os dados e o modelo espacial forem adequados (Pereira et al., 2022). Nos estudos de Luiz et al. (2026) e Bottega et al. (2024), os modelos foram selecionados considerando o maior coeficiente de determinação (R^2) e a menor soma dos quadrados dos resíduos (SQR). Uma vez selecionado o modelo, é realizada a análise de validação cruzada para avaliar a precisão e a confiabilidade do modelo selecionado antes de usá-lo para gerar os mapas de variabilidade espacial.

No estudo de Luiz et al. (2026), a variação de temperatura superior a 10 °C levou à correção da CEa para a temperatura de referência de 25 °C, e essa correção alterou de forma relevante a distribuição das classes de CEa. Assim, levantamentos comparativos devem ser realizados sob condições térmicas e hídricas tão semelhantes quanto possível ou, quando apropriado, os dados devem ser corrigidos antes da interpretação espacial. O mapa de CEa deve ser tratado como um mapa de caracterização da variabilidade do solo, para posteriormente servir de base na delimitação de classes de CEa (alta, média ou baixa) e então realizar uma amostragem em cada classe, para verificar se realmente elas podem ser consideradas uniformes, antes que as classes possam ser transformadas em zonas de manejo. Portanto, o mapeamento da CEa orienta o diagnóstico, mas não substitui a caracterização física e química do solo. Um fluxo de trabalho de campo, sugerido para o mapeamento da CEa, é apresentado na Figura 4.



Figura 4. *Fluxo de trabalho para transformar as medições da plataforma Smart-sensor de solo em informação espacial de apoio à decisão. Fonte: Imagem gerada por I.A.*

Vantagens, limitações e recomendações

Entre as principais vantagens da plataforma Smart-sensor de solo destacam-se a aquisição rápida e georreferenciada dos dados, a possibilidade de obtenção de alta densidade espacial de dados, o baixo custo de aquisição, a medição integrada de CEa, umidade e temperatura do solo e o apoio à amostragem direcionada e à identificação de ambientes com características semelhantes. Por outro lado, as principais limitações estão relacionadas à dependência da qualidade do contato dos eletrodos com o solo, à necessidade de calibração dos sensores de umidade e temperatura e à influência simultânea de diferentes propriedades do solo sobre a CEa.

Diante dessas limitações, recomenda-se planejar previamente a malha de pontos amostrais de acordo com o objetivo do levantamento; manter condições de coleta comparáveis, especialmente quanto ao teor de água; registrar a temperatura em todos os pontos; verificar o contato dos eletrodos; revisar os dados antes de gerar os mapas; utilizar repetições para avaliar a consistência das leituras; e, quando necessário, corrigir a CEa para uma temperatura de referência. A interpretação deve integrar a CEa com análises de solo, produtividade, relevo, sensoriamento remoto e histórico de manejo.

A CEa reúne características particularmente úteis à AP sendo rápida de medir, baixo custo de aquisição e possuir relação com diferentes características do solo que influenciam o ambiente de produção. Por isso, constitui uma variável eficiente para caracterizar a variabilidade espacial, orientar o planejamento de amostragem e apoiar a definição de zonas de manejo, desde que interpretada conjuntamente com informações complementares.

A plataforma Smart-sensor de solo amplia esse potencial ao reunir CEa, teor de água e temperatura em uma única plataforma, com georreferenciamento e mecanismo de automonitoramento do contato dos eletrodos. Na avaliação realizada em Cachoeira do Sul, a CEa apresentou correlação de 0,80 com o equipamento comercial. De forma complementar, a avaliação publicada por Luiz et al. (2026), mostrou CV inferior a 4% em bancada, erro absoluto médio percentual máximo de 6,69% e capacidade de representar a dependência espacial da CEa em condições de solo seco e úmido. Esses resultados sustentam o potencial da plataforma para levantamentos de variabilidade espacial, mas também evidenciam a necessidade de controle da qualidade dos dados, padronização das condições de aquisição e consideração explícita dos efeitos da umidade e da temperatura.

Do mapa à decisão

O uso mais consistente da CEa ocorre quando o mapa é incorporado a um fluxo de diagnóstico. Primeiro, caracteriza-se a variabilidade; depois, investigam-se suas causas; em seguida, integram-se diferentes

fontes de informação e delimitam-se ambientes semelhantes. Somente após essa etapa devem ser definidas estratégias de manejo localizado. Assim, a plataforma Smart-sensor de solo pode ser utilizada como ferramenta de caracterização e apoio à tomada de decisão, especialmente em levantamentos destinados a compreender a heterogeneidade espacial e orientar a amostragem. O princípio é simples: medir a variabilidade, compreender suas causas, delimitar ambientes e então manejar de forma diferenciada, como apresentado na Figura 5.

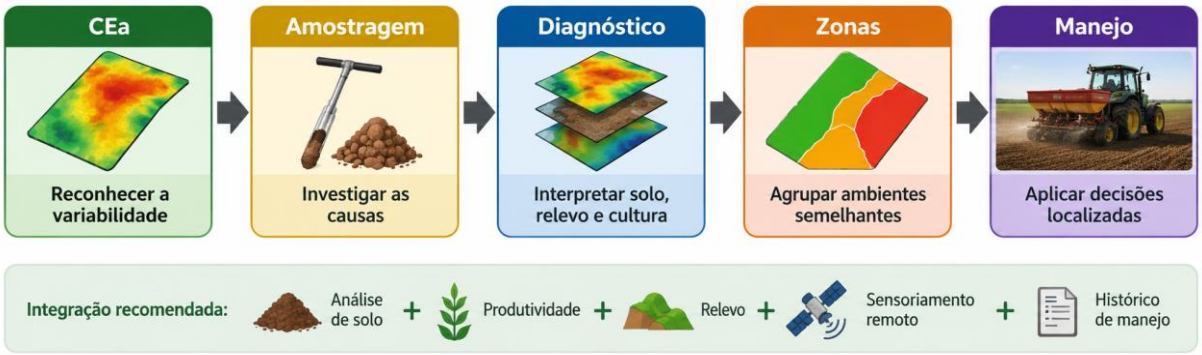


Figura 5. *Sequência recomendada para transformar o mapa de CEa em informação de apoio à tomada de decisão. Fonte: Imagem gerada por I.A.*

Considerações finais

Os resultados apresentados confirmam a adequação da CEa como variável de apoio à Agricultura de Precisão. A sua aquisição rápida e de baixo custo, associada à sensibilidade a diferentes atributos do solo, permitiu caracterizar a variabilidade espacial das áreas avaliadas e sustenta seu uso no planejamento de amostragem e na definição de zonas de manejo.

A plataforma Smart-sensor de solo demonstrou potencial como ferramenta de sensoriamento proximal para o levantamento georreferenciado da condutividade elétrica aparente do solo, permitindo a obtenção de dados espaciais de forma integrada com umidade e temperatura. Os resultados de validação indicam desempenho consistente nas condições avaliadas e gera valores consistentes com os obtidos por equipamento comercial de referência. Sua utilização pode direcionar a amostragem e subsidiar a delimitação de zonas de manejo, desde que os dados sejam interpretados em conjunto com outras informações da área.

Em síntese, a plataforma Smart-sensor de solo amplia as possibilidades de aquisição de dados do solo em campo, oferecendo uma alternativa prática para apoiar o diagnóstico e o planejamento de estratégias de AP.

Agradecimentos: Os autores do trabalho agradecem ao CNPq pelo apoio financeiro concedido para o desenvolvimento da plataforma Smart-sensor de solo.

Referências

BOTTEGA, E. L.; LOMBARDI, B. P.; COSTA, M. S.; QUEIROZ, D. M.; COELHO, A. L. F.; OLIVEIRA, Z. B. Use of a multisensor platform for characterizing soil spatial variability in precision agriculture. Ciência e Natura, Santa Maria, v. 46, spe. 3, e87030, 2024. DOI: 10.5902/2179460X87030.

CORWIN, D. L.; HENDRICKX, J. M. H. Electrical resistivity: Wenner array. In: SILVA, J. S. (ed.). Methods of Soil Analysis. Part 4: Physical Methods. Madison: SSSA, 2002. p. 1282-1287.

CORWIN, D. L.; LESCH, S. M. Application of soil electrical conductivity to precision agriculture: theory, principles, and guidelines. Agronomy Journal, v. 95, n. 3, p. 471-495, 2003. DOI: 10.2134/agronj2003.4550.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Zoneamento Agroecológico do Estado de Pernambuco (ZAPE). Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2001. Ativo cartográfico. Disponível em: https://geoinfo.dados.embrapa.br/catalogue/#/dataset/2993. Acesso em: 13 maio 2026.

KITCHEN, N. R.; DRUMMOND, S. T.; LUND, E. D.; SUDDUTH, K. A.; BUCHLEITER, G. W. Soil electrical conductivity and topography related to yield for three contrasting soil-crop systems. Agronomy Journal, v. 95, p. 483-495, 2003. DOI: 10.2134/agronj2003.0483.

LUIZ, M. E. G.; SOUSA, E. D. T. dos S.; SANTOS, B. R. da S.; NASCIMENTO, A. L.; SILVA NETO, M. A.; CUNHA JUNIOR, J. C.; ZANELLA, M. A.; COELHO, A. L. de F. Sistema inteligente para caracterização espacial do solo utilizando a condutividade elétrica aparente. Nativa, Cuiabá, v. 14, n. 3, e20992, 2026. DOI: 10.31413/nat.v14i3.20992.

MOLIN, J. P.; RABELLO, L. M. Estudos sobre a mensuração da condutividade elétrica do solo. Engenharia Agrícola, v. 31, n. 1, p. 90-101, 2011. DOI: 10.1590/S0100-69162011000100009.

PEREIRA, G. W.; VALENTE, D. S. M.; QUEIROZ, D. M.; COELHO, A. L. F.; COSTA, M. M.; GRIFT, T. Smart-Map: an open-source QGIS plugin for digital mapping using machine learning techniques and ordinary kriging. Agronomy, v. 12, n. 6, 1350, 2022. DOI: 10.3390/agronomy12061350.

SERRANO, J. M.; PEÇA, J. O.; MARQUES DA SILVA, J. R.; SHAHIDIAN, S. Mapping soil and pasture variability with an electromagnetic induction sensor. Computers and Electronics in Agriculture, v. 73, p. 7-16, 2010. DOI: 10.1016/j.compag.2010.03.008.

SHEETS, K.R.; HENDRICKX, J.M.H. Non-invasive soil water content measurement using electromagnetic induction. Water Resources Research, 31, 2401–2409, 1995. DOI: 10.1029/95WR01949.

SOUSA, E. D. T. dos S.; QUEIROZ, D. M. de; COELHO, A. L. de F.; VALENTE, D. S. M. Development of a portable intelligent system platform for soil mapping. Revista Ciência Agronômica, v. 54, e20217886, 2023. DOI: 10.5935/1806-6690.20230008.