

# AGRICULTURA DE PRECISÃO

## Boletim Técnico 07

### Condutividade Elétrica Aparente do Solo

Ricardo Canal Filho<sup>1</sup>, Eudocio Rafael O. Silva<sup>2</sup>, Marcelo C. Fu Wei<sup>3</sup>,  
Luiz Gustavo G. Sterle<sup>4</sup>, José Paulo Molin<sup>5</sup>

Junho/2024

<sup>1</sup>Eng. Agrônomo, Doutorando em Eng. de Sistemas Agrícolas (USP-ESALQ);  
[ricardocanal@usp.br](mailto:ricardocanal@usp.br)

<sup>2</sup>Eng. Agrícola e Ambiental, Doutorando em Eng. de Sistemas Agrícolas (USP-ESALQ);  
[eudocio@usp.br](mailto:eudocio@usp.br)

<sup>3</sup>Eng. Agrônomo, Doutorando em Eng. de Sistemas Agrícolas (USP-ESALQ);  
[marcelochan@usp.br](mailto:marcelochan@usp.br)

<sup>4</sup>Eng. Agrônomo, Mestrando em Eng. de Sistemas Agrícolas (USP-ESALQ);  
[gustavosterle@usp.br](mailto:gustavosterle@usp.br)

<sup>5</sup>Professor e coordenador do Laboratório de Agricultura de Precisão (USP-ESALQ);  
[jpmolin@usp.br](mailto:jpmolin@usp.br)

A condutividade elétrica aparente do solo (CEa) é uma medida que expressa a capacidade de um solo conduzir corrente elétrica. Apesar do potencial desta técnica ainda não ser totalmente explorado pela agricultura, existem registros de seu uso na comunidade científica desde a década de 1950. A partir de 1990, o uso da CEa foi intensificado com o crescimento da Agricultura de Precisão (AP). Hoje, existe razoável conhecimento acumulado sobre seus benefícios e limitações, oferecendo inúmeras oportunidades de aplicação para que a agricultura seja economicamente, socialmente e ambiental-

mente sustentável. Este boletim técnico busca apresentar os conceitos, explorar os possíveis usos e promover a compreensão de como a CEa do solo pode ser uma aliada no entendimento da variabilidade espacial das lavouras e na implementação de práticas da AP.

#### Condutividade elétrica: Definição e relação com a agricultura

A condutividade elétrica (CE) é a capacidade que um material qualquer possui em conduzir corrente elétrica. Nos solos agrícolas e na geofísica, é uma ferramenta utilizada para avaliar a variabilidade do solo em termos de composição físico-química. Diferentes composições do solo levam a diferentes níveis de CE. Por exemplo, solos mais argilosos tendem a apresentar maior CE devido à sua maior retenção de água, a qual contém íons que conduzem a corrente elétrica.

Quando medida no campo, a CE é o resultado da interação dos inúmeros componentes do solo e do teor de água presente naquele exato momento, por isso, é denominada de CE "aparente".

Assim, a variação da CEa medida em campo, em alta resolução espacial, pode fornecer informações sobre a heterogeneidade do solo em uma determinada área, remetendo à variação da textura, umidade e conteúdo de sais presentes no solo. É importante ressaltar que a CEa não fornece uma medida direta da quantidade de nutrientes no solo, mas pode ser usada como um indicador da variabilidade espacial que pode afetar a distribuição e disponibilidade de nutrientes.

#### Técnicas de mensuração

A técnica de mensuração comum envolve o uso de sensores de CEa do solo, que podem funcionar por (1) indução eletromagnética ou por (2) contato direto. Esses sensores obtêm a resistividade elétrica do solo, que é a sua capacidade em oferecer resistência à passagem de corrente elétrica e que é inversamente relacionada com a CEa (Figura 1).

(1) A mensuração por *indução eletromagnética* ocorre com um par de bobinas suspensas sobre o solo. Enquanto uma bobina gera um campo



#### Quem somos?

O Laboratório de Agricultura de Precisão (LAP) pertence ao Departamento de Engenharia de Biosistemas da USP-ESALQ.

#### Quais os objetivos?

Oferecer infraestrutura e ambiente de trabalho para as atividades e projetos relacionados ao estudo da variabilidade espacial e temporal das lavouras e das tecnologias embarcadas nos veículos e máquinas agrícolas.

#### Onde estamos localizados?

O LAP está sediado no Departamento de Engenharia de Biosistemas da USP-ESALQ, em Piracicaba-SP.



eletromagnético, induzindo corrente na camada superficial do solo, a outra é excitada pela corrente gerada. Uma das desvantagens desse método é a sua sensibilidade à presença e proximidade de metais que interferem no campo magnético emitido pelo sensor, afetando a precisão e acurácia dos dados obtidos. Além disso, a temperatura ambiente também é um fator que impacta na medição, dificultando a aquisição a campo durante longas horas, uma vez que a temperatura pode variar muito ao longo do período de coleta dos dados.

(2) O método de *contato direto* ocorre com uso de um "sistema de sondagem elétrica", que consiste em eletrodos de corrente e potencial que são inseridos no solo. Uma corrente elétrica é aplicada através dos eletrodos de corrente, e os eletrodos de potencial medem a diferença de potencial (ddp) resultante. Nesse método, é necessário atentar-se à distância entre os eletrodos, pois essa distância define o raio de mensuração, por consequência *definindo a profundidade de solo em que a CEa será medida*. Esse método se difundiu na agricultura com a utilização de discos de corte funcionando como eletrodos para permitir a coleta de dados em movimento.

Pressupõe-se o contato elétrico entre os eletrodos (discos) e o solo, o que requer cuidado com a velocidade de operação e peso sobre os discos para o corte de resíduos da superfície do solo. As recomendações também indicam que quanto mais próxima da capacidade de campo estiver a umidade do solo, melhor será a resposta às variações da CEa.

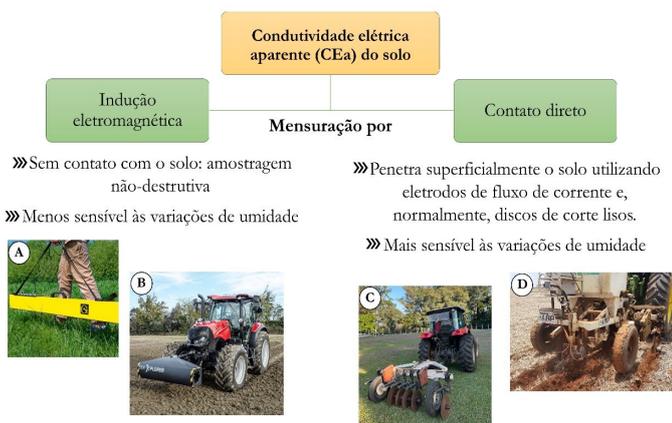


Figura 1. Técnicas de mensuração da condutividade elétrica aparente do solo (CEa). Exemplos de equipamentos baseados em indução eletromagnética: (a) EM38-4 (Geonics Ltd., Mississauga, ON, Canadá) e (b) Soil XPlorer (CNH Industrial, Londres, UK). Exemplos baseados em contato direto: (c) Veris EC Surveyor 3100 (Veris®, Veris Technologies, Salina, KS, EUA) e (d) Veris MSP com EC Surveyor 3150, modelo mais recente comercializado. Fontes: (a) Söderström et al. (2016); (b) AgXTend, CNH Parts & Services (2024); (c) e (d) Laboratório de Agricultura de Precisão (LAP/ESALQ/USP).

No Brasil, um dos primeiros sistemas utilizados para medir a CEa do solo foi o método de contato direto, em uma estrutura na qual seis discos de corte atuam como eletrodos. Dois discos são responsáveis por transmitir a corrente elétrica gerada e os outros dois pares medem a ddp após a passagem da corrente elétrica, gerando duas medidas de CEa do solo para as duas espessuras aproximadas, correspondentes às profundidades de 0-0,3 e 0-0,9 m (Figura 2). Para representar sua magnitude, a CEa é quantificada em termos de condutância por unidade de comprimento e no contexto da agricultura, em miliSiemens por metro ( $mS\ m^{-1}$ ).

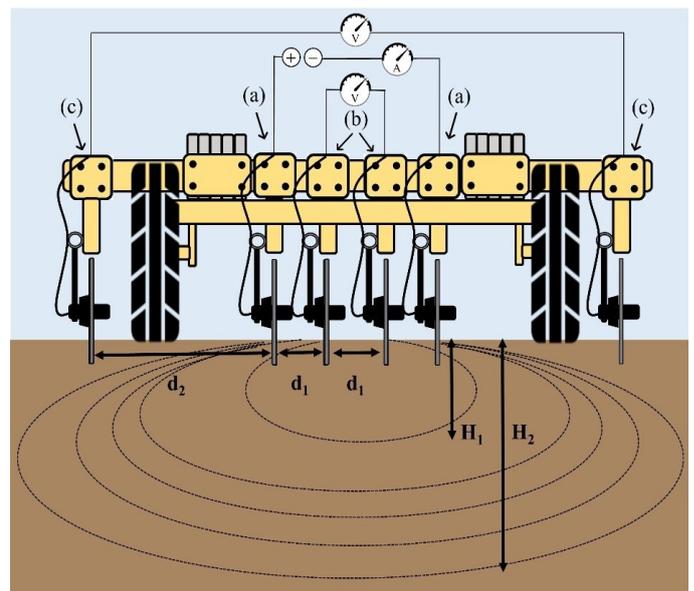


Figura 2. Sensor de condutividade elétrica do solo por contato, em que (a) indica o par de eletrodos que transmitem a corrente elétrica, A - amperagem; (b) indica o par de eletrodos que mede a diferença de potencial da corrente elétrica na espessura equivalente à profundidade  $H_1$ , V - voltagem; e (c) o par de eletrodos que mensura a CEa na espessura equivalente à profundidade  $H_2$ . Fonte: Laboratório de Agricultura de Precisão (LAP/ESALQ/USP).

### CEa em campo: espaçamento entre linhas de coleta

Um dos aspectos a serem considerados é o espaçamento entre passadas do equipamento para gerar um mapa de CEa representativo da lavoura. Normalmente, a frequência de coleta dos equipamentos disponíveis para mensuração da CEa varia entre 0,2 e 1,0 Hz. A recomendação técnica e mais encontrada em estudos científicos é de utilizar o espaçamento entre linhas de coleta entre 15,0 e 20,0 m. Combinado ao fator velocidade de deslocamento durante a coleta, o equipamento irá gerar, pelo menos, 200 pontos por ha.

### Outros aspectos a serem considerados

Ao realizar a coleta de dados de CEa, é essencial atentar-se a fatores frequentemente mencionados na literatura, como drenagem e relevo do solo. É importante considerar que, uma vez que a água é responsável por conduzir a corrente elétrica no solo, fatores relacionados ao seu comportamento podem interferir nos dados e, por consequência, requerem uma correta interpretação.

Sabe-se que a distribuição da água no solo é influenciada por fatores como textura, matéria orgânica, capacidade de troca catiônica (CTC), entre outros. Entretanto, uma lavoura com manchas de água confinada, por problemas de drenagem, por exemplo, expressará manchas de altos valores de CEa nesses locais, sem uma devida correspondência nos atributos de interesse. Neste contexto, a compactação do solo também causa elevação nos valores da CEa, devido à menor distância entre partículas. No entanto, experimentalmente tem se mostrado improvável isolar fatores em busca de relações tão complexas.

Em solos com relevo plano e pouca variabilidade textural, é provável que haja relativa uniformidade espacial nos dados de CEa. Entretanto, a identificação da ausência de variabilidade textural também é um resultado útil na gestão agrícola, uma camada de dados que auxilia na tomada de decisão (vide Figura 1 no [Boletim Técnico 04 - Mapas de Produtividade](#)).

### Aplicações na Agricultura de Precisão

O mapa da CEa de um dado talhão tem expressivo valor por conta da sua relação com a composição físico-química do solo, em que permite inferências principalmente sobre a textura, derivada da condição de umidade do solo (Figura 3). Nesse caso, o mapa da distribuição espacial da CEa refletiu com detalhes as variações texturais da área, sendo fundamental na tomada de decisão gerencial da lavoura. Também, e por conta disso, destaca-se a *vantagem da estabilidade temporal* dessa medida. [Em dado trabalho, realizado pelo LAP, a CEa de uma lavoura foi mapeada em dois anos consecutivos](#). Verificou-se que, além de altos valores de correlação com argila e umidade do solo, houve estabilidade temporal robusta comparando as medições dos dois anos.

Em síntese, isso significa que os valores de CEa podem variar a cada coleta em campo em função de maior ou menor teor de água no solo no momento da mensuração, *mas a estrutura espacial dos dados se mantém ao longo do tempo*. Isso porque, sendo afetada principalmente

pela umidade do solo em campo, a CEa terá uma estrutura espacial relacionada com a dinâmica da água no solo, governada principalmente por textura e relevo. Esses parâmetros se alteram numa escala de milhares de anos. Dessa forma, para aplicações em AP, *uma única coleta de CEa do solo em uma lavoura é suficiente para auxiliar nas decisões agrônômicas de gestão daquela área*.

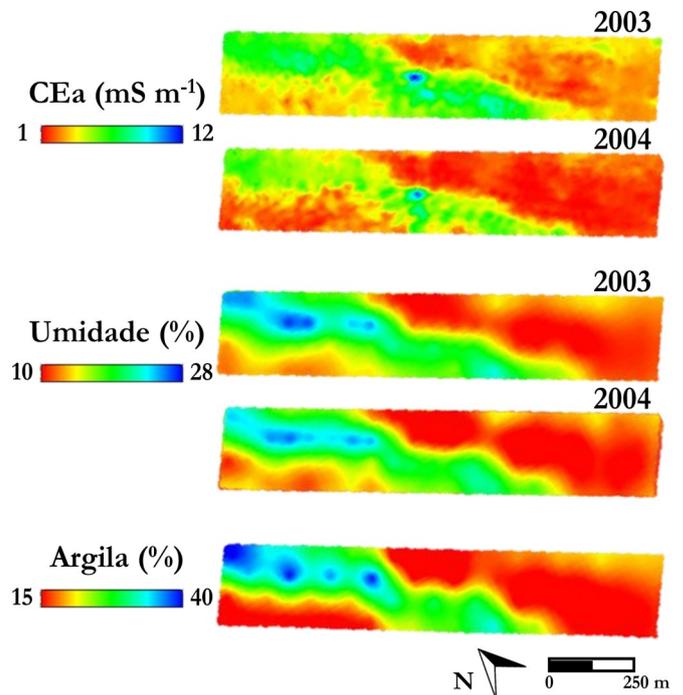


Figura 3. Mapas da condutividade elétrica aparente do solo (CEa), teor de umidade e de argila de uma área de 19 ha em Tibagi/PR, em dois anos subseqüentes. Observa-se repetição do padrão espacial para as três variáveis, o que indica a possibilidade de estimar uma a partir das outras. Ainda, verifica-se a forte estabilidade temporal da medida de CEa em campo (Fonte: Molin e Faulin, 2013).

Portanto, uma vez estabelecidos os sistemas de medição a campo, torna-se possível mapear a CEa em alta resolução espacial, identificando em escala fina a variabilidade existente nas lavouras. Assim, os mapas de CEa são uma camada base de informação acerca da variabilidade espacial do solo, podendo direcionar amostragens de solo, de plantas (vide [Boletim Técnico 02 - Amostragem Georreferenciada](#)), delineamento de experimentos em áreas com menor ou maior variabilidade, entre outros. Além disso, esses mapas permitem a criação de estratégias de gestão mais eficientes e específicas, adaptadas às condições reais do campo. A possibilidade de identificar diferentes zonas dentro da lavoura contribui na tomada de decisões, otimizando o uso de insumos e melhorando a produtividade (Figura 4).

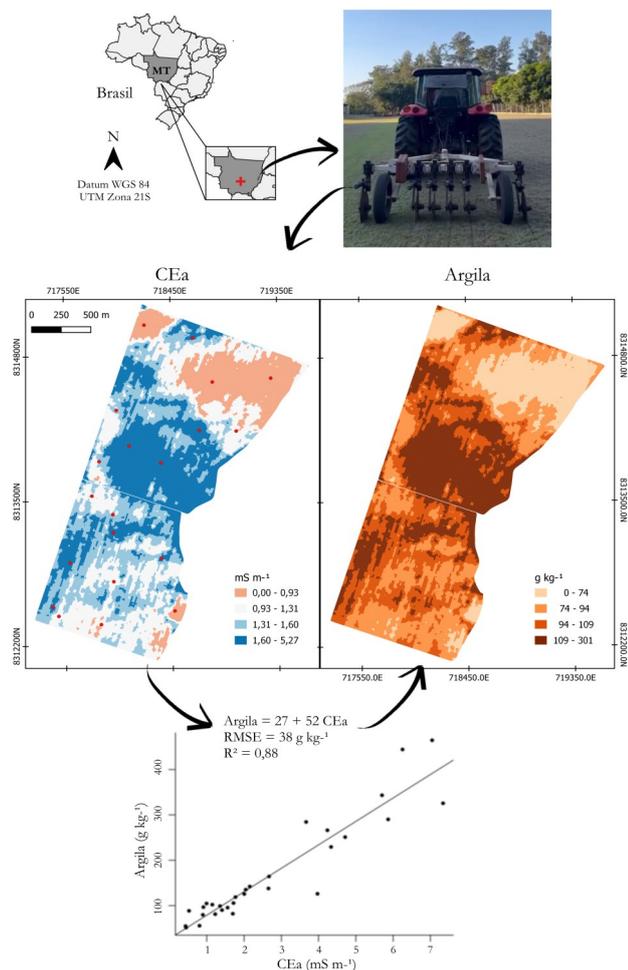


Figura 4. Caracterização da variabilidade espacial da CEa na profundidade de 0–0,3 m em área localizada em Campo Verde/MT, com dois talhões totalizando 350 ha. Foram coletadas amostras de solo guiadas pela variabilidade da CEa (pontos vermelhos) para análise da textura do solo em laboratório e análise de correlação entre ambas, onde comprovou-se a forte relação espacial ( $R^2 = 0,88$ ), o que permitiu a geração do mapa de argila na densidade espacial da CEa, de aproximadamente 250 pontos por ha.

Pela sua elevada estabilidade temporal, a CEa tem sido inserida como fator base em abordagens mais sofisticadas da AP (Figura 5), como a delimitação de Unidades de Gestão Diferenciada (UGDs), pois combina fatores essenciais: uma amostragem de alta densidade espacial, de baixa alteração ao longo dos anos, permitindo identificar zonas dentro da lavoura com diferentes potenciais produtivos.

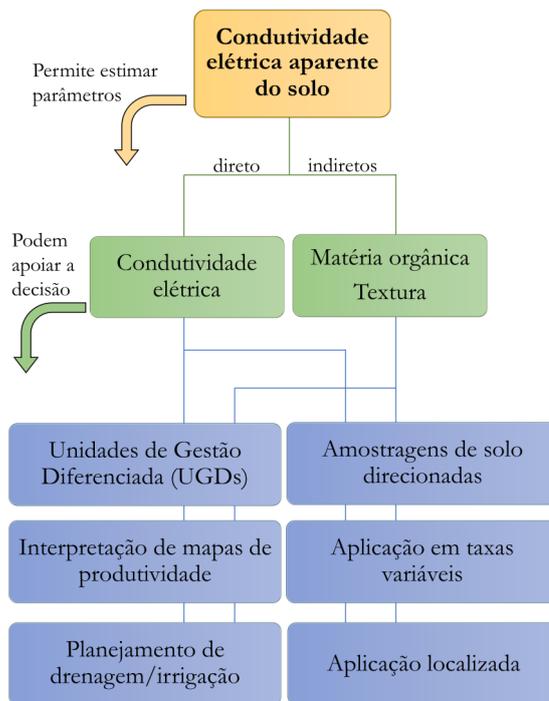


Figura 5. Aplicações da condutividade elétrica aparente do solo na agricultura.

Um exemplo disso é o [estudo publicado em 2021 pela equipe do LAP](#), que demonstra uma abordagem eficiente de Experimentação On-Farm (OFE). Isto é, testes dentro da propriedade para gerar recomendações personalizadas para cada lavoura. Utilizando mapas de CEa e de produtividade do milho, foram delimitadas UGDs do potencial produtivo da área. Posteriormente, essas UGDs serviram de base para testar e recomendar populações, otimizando o uso de insumos e maximizando o retorno obtido na atividade agrícola.

Por fim, é importante reafirmar que os valores da CEa do solo têm potencial para serem amplamente adotados no ambiente prático. Esta técnica demonstra eficácia ao proporcionar resultados confiáveis, dispensando a necessidade de reamostragens frequentes ao longo dos anos. Além disso, apresenta uma variedade de aplicações para otimizar a gestão da produção agrícola. O desafio reside em incorporá-la, assim como outras técnicas já consolidadas no meio científico, mas que carecem de maior adoção no campo, visando auxiliar os produtores na busca pela sustentabilidade econômica, produtiva e ambiental na agricultura.

Laboratório de Agricultura de Precisão  
Departamento de Engenharia de Biosistemas  
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”  
Universidade de São Paulo  
Av. Pádua Dias, 11 - CEP 13418-900  
Piracicaba - SP

Visite nosso site:  
[www.agriculturadeprecisao.org.br](http://www.agriculturadeprecisao.org.br)