

Documentos

ISSN 1518-7179

Novembro, 2009

43

Condutividade elétrica do solo, tópicos e equipamentos



ISSN 1518-7179

Setembro, 2009

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Instrumentação Agropecuária
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

Documentos 43

Condutividade elétrica do solo, tópicos e equipamentos

Ladislau Marcelino Rabello

Embrapa Instrumentação Agropecuária
São Carlos, SP
2009

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Instrumentação Agropecuária

Rua XV de Novembro, 1452

Caixa Postal 741

CEP 13560-970 - São Carlos-SP

Fone: (16) 2107 2800

Fax: (16) 2107 2902

www.cnpdia.embrapa.br

E-mail: sac@cnpdia.embrapa.br

Comitê de Publicações da Unidade

Presidente: Dr. Luiz Henrique Capparelli Mattoso

Membros: Dra. Débora Marcondes Bastos Pereira Milori,

Dr. João de Mendonça Naime,

Dr. Washington Luiz de Barros Melo

Valéria de Fátima Cardoso

Membro Suplente: Dr. Paulo Sérgio de Paula Herrmann Junior

Supervisor editorial: Dr. Victor Bertucci Neto

Normalização bibliográfica: Valéria de Fátima Cardoso

Tratamento de ilustrações: Valentim Monzane

Capa: Ladislau Marcelino Rabello

Editoração eletrônica: Manoela Campos

1ª edição

1ª impressão (2009): tiragem 300

Todos os direitos reservados.

A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

CIP-Brasil. Catalogação-na-publicação.

Embrapa Instrumentação Agropecuária

R114c Rabello, Ladislau Marcelino
Condutividade elétrica do solo, tópicos e equipamentos. / Ladislau
Marcelino Rabello. São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2009.
19 p. (Embrapa Instrumentação Agropecuária. Documentos,
ISSN 1518-7179; 43).

1. Agricultura de precisão. 2. Condutividade elétrica. 3. Resistividade
elétrica. 4. VERIS. 5. EM38. 6. Solo Análise. 7. Indução eletromagnética.
8. Equipamento. I. Título. II. Série.

CDD 21 ED 631.3

© Embrapa 2009

Autor

Ladislau Marcelino Rabello
Engenharia Elétrica, Dr.,
Pesquisador, Embrapa Instrumentação Agropecuária,
C.P. 741, CEP 13560-970,
rabello@cnpdia.embrapa.br

Apresentação

A crescente demanda de produção de alimento devido ao aumento da população em contraste com a diminuição das terras agriculturáveis, leva aos pesquisadores a grande desafio de desenvolver tecnologias e conhecimento que possam fomentar a agricultura, de modo a suprir esta grande demanda.

Outros fatores também dificultam a produção, tal como o uso incorreto da água em sistemas de irrigação, o de defensivos e insumos agrícolas causando impactos indesejáveis ao meio ambiente e a degradação do solo devido ao preparo incorreto, entre outros.

Durante muitos anos as lavouras foram tratadas de modo homogêneo não levando em conta a variabilidade espacial. Na aplicação de insumos, estimava-se a necessidade de tratamento do solo, fazendo com que determinadas áreas produtivas dentro da mesma lavoura recebessem a mesma quantidade que uma área não produtiva. O mesmo acontecia para áreas irrigadas.

Começou-se então a observar que, mesmo dentro uma mesma lavoura, havia a necessidade de tratamento diferenciado de algumas áreas, para que no total a lavoura se torna ao menos homogênea.

Este método de dividir a lavoura em zonas de manejo ficou conhecido como Agricultura de Precisão.

O princípio dos estudos de Agricultura de Precisão em grandes áreas leva à coleta de um grande número de amostras para estudo das propriedades físicas e químicas da lavoura que são posteriormente levadas aos laboratórios e analisadas. Em seguida mapeia-se toda a região, com detalhamento das áreas segundo suas características próprias.

Em grandes áreas de plantio fica difícil dimensionar a quantidade de amostras para análise. Quanto maior o número de amostras melhor será o resultado das análises. Porém este grande número acarreta custos e tempo.

Com o advento de modernas tecnologias, tal como o GPS (sigla em inglês para Sistema de Posicionamento Global) tornou-se possível mapear as áreas com precisão adequada, em termos da localização da amostra e do dimensionamento das zonas de manejo.

Outras técnicas foram incorporadas para minimizar custo e tempo, mas uma das que mais se adaptaram, por ser um método rápido e barato de se fazer uma pré-avaliação das propriedades físicas e químicas da área de lavoura, foi a medida de condutividade elétrica do solo.

Esta é uma técnica já usada no início do século XX em geofísica para prospecção de petróleo e água, mas que veio a ser muito útil em agricultura de precisão.

Seu princípio baseia-se na propriedade do solo de variar a condução de corrente elétrica conforme suas propriedades físicas e químicas. Ao se fazer a medida de condutividade elétrica observa-se manchas de mesmas características que podem variar espacialmente em toda a área de análise.

De posse destes valores mapeados geograficamente dentro da área, é possível dividir as regiões em áreas de manejo e, então, proceder à coleta de algumas amostras para analisá-las segundo as suas propriedades e tomar decisões de como e quanto intervir com os insumos, defensivos e irrigação.

A agricultura de precisão tomou novo rumo com o uso do método de medida de condutividade elétrica diminuindo custo e tempo de análise para as devidas tomadas de decisões, sendo umas das contribuições da instrumentação agropecuária na busca de soluções para atender o aumento da demanda por alimentos.

Álvaro Macedo da Silva
Chefe Geral

Sumário

Introdução.....	9
Princípios Básicos de Medidas ECa	9
Fatores que Influenciam ECa	14
Aplicação da Medida de Eca em agricultura	14
Medidas da salinidade do solo	15
Medida de outras propriedades físico-químicas com condutividade elétrica	17
Equipamentos para medida de condutividade elétrica	18
Aplicação das medidas de condutividade elétrica em agricultura de precisão	19
Comentários finais	19
Referências	19

Condutividade Elétrica do solo, tópicos e equipamentos

Ladislau Marcelino Rabello

Introdução

Durante as últimas décadas, a agricultura global tem dado grande salto quanto ao item de produção, para suprir as necessidades da crescente população mundial. Porém sofre grande pressão para melhorar a qualidades das sementes e usarem menos pesticidas e sistema de irrigação.

Estima-se um número de 3 bilhões de pessoas no planeta para as próximas duas décadas. Em curto prazo os recursos naturais ainda serão disponíveis, mesmos que mal distribuídos principalmente aos menos ricos.

No esforço de alimentar a população mundial, as atividades agrícolas têm causado grandes impactos ao meio ambiente, tais como o uso abusivo de fertilizantes e pesticidas, degradação do solo e qualidade da água. Desde os anos noventa práticas errôneas na produção agrícola contribuíram para uma degradação de 38%, correspondendo a 1.5 bilhões de hectares em todo o planeta, estima-se, que desde desta década, 5,5 milhões de hectares são perdidos anualmente (WORLD RESOURCES INSTITUTE, 1998).

Em termos globais a agricultura irrigada torna-se uma essencial contribuição para produção total de alimentos. No mundo 15% das terras usadas para plantio são irrigadas, destes, 35% a 40% estão na produção de fibras e alimentos (RHOADES e LOVEDAY, 1990). Estima-se que de 10% a 15% da água para agricultura irrigada é utilizada de maneira errada, resultando em encharcamento e salinização (ALEXANDRATOS, 1995).

Fora um grande avanço em algum ponto tecnológico para o aumento da produção agrícola em larga escala, a agricultura sustentável atualmente é vista como o mais viável recurso para demanda de alimento para a população mundial. O conceito de agricultura sustentável seria um delicado balanço entre maximizar a produção e manter a estabilidade econômica enquanto minimizando a utilização dos recursos naturais finitos e diminuindo os impactos ambientais nocivos pela utilização de agroquímicos poluentes.

O grande desafio da agricultura sustentável é de manter a produtividade agrícola em consonância com o crescimento populacional, para isto a agricultura de precisão é uma importante ferramenta a ser utilizada.

Convencionalmente as plantações são tratadas de forma homogênea, ignorando as inerentes variações entre solo e da cultura. Desde os anos 70, com o trabalho de Nielson e colaboradores, já demonstravam uma variabilidade espacial das propriedades do solo (NIELSON et al., 1973).

Recentemente com a introdução de equipamentos de monitoramento de campo e do GPS, facilitaram o estudo e documentação da variabilidade espacial da cultura e das propriedades do solo em escala de campo.

A variabilidade espacial em culturas é o resultado de uma complexa interação de fatores, tais como, biológico (micróbios, vermes etc.), edáfico (salinidade, matéria orgânica, nutrientes, etc.), antrópico (atividades humanas, compactação do solo devido a máquinas agrícolas), topografia (relevo, elevação) e climático (umidade relativa, temperatura, etc.).

O manejo de uma cultura em sítio-específico objetiva a orientar o manejo do solo, pestes e na cultura de acordo com a sua variação espacial dentro do campo (LARSON e ROBERT, 1991).

Podemos definir o manejo em sítio-específico de uma cultura como o manejo em uma escala espacial menor considerando a variabilidade local com o objetivo de minimizar os custos de produção e fazer o uso eficiente de agroquímicos para evitar impactos ambientais nocivos.

A agricultura de precisão adotou rapidamente tecnologias eletrônicas e de informação para facilitar os estudos da cultura dentro de sua variabilidade espacial. Primeiro em meados dos anos 80 os equipamentos eram levados a campo, depois nos anos 90 surgem novas tecnologias como o GPS (sistema de posicionamento global) e de sistemas de informações geográficas (GIS) (VAN SCHILFGAARDE, 1999).

Atualmente a agricultura de precisão adota tecnologias mais sofisticadas de sistemas GPS, sistemas de monitoramento de campo e sistemas de aplicações a taxas variadas de produtos agroquímicos combinados e adaptadas com sistemas GIS e sensoriamento remoto (indução eletromagnética, fotografia aérea, imagens de satélites, etc.) ou então o uso de tecnologias de medidas rápidas de propriedades do solo, tal como resistividade elétrica e TDR (time domain reflectometry) (PLANT, 2001).

Para gerenciar a variabilidade dentro de uma cultura, devem ser especificadas regiões, georeferenciadas, que exibem comportamento semelhante em se tratando de uma característica específica, tal como, potencial de percolação, potencial de campo, etc. (VAN UFFELEN et al., 1997), estabelecendo em que medida e em que condições esses padrões espaciais são estáveis.

Mapas de colheitas fornecem informações dos processos físicos, químicos e biológicos sob certas condições climáticas, informando básicas condições de implementação do manejo em sítio-específico da cultura indicando onde aplicar os insumos ou correções necessárias, baseadas nos padrões espaciais de produtividade da cultura (LONG, 1998).

Porém os mapas de colheitas sozinhos, não são suficientes para fornecer informações para distinguir entre as diversas fontes de variabilidade e não dão orientações claras sobre a influência da variabilidade do clima, pragas, doenças e propriedades físico-químicas do solo dentro de uma cultura em um determinado ano.

Bullock e Bullock (2000), em seu trabalho demonstram a importância das medidas das variações das propriedades físicas e químicas do solo em agricultura de precisão. A medição da condutividade elétrica aparente do solo (EC_a) é uma tecnologia que se tornou uma ferramenta valiosa para identificar as características físico-químicas do solo que influenciam os padrões de rendimento das culturas e para estabelecer a variação espacial dessas propriedades do solo (CORWIN et al., 2003).

A agricultura de precisão não requer apenas a informação espacial para determinar onde e como aplicar uma ação, tal como, o momento de fertilizar, o momento de aplicar pesticidas

ou o momento de irrigação, mas também requer informações temporais para saber quando aplicar.

Neste documento abordaremos um pouco sobre a teoria básica da medida de condutividade elétrica, alguns tópicos sobre as técnicas de medida de condutividade elétrica aparente (indução eletromagnética, resistividade elétrica e reflectometria no domínio do tempo) e aplicações de EC_a em agricultura.

Princípios Básicos de Medidas de EC_a

Os primeiros estudos de medida de condutividade elétrica aparente começaram no início dos anos 1900, com os trabalhos de Archie (1942), conhecida como a lei empírica de Archie para rocha e solos arenosos saturados, descrito por:

$$EC_a = a \cdot w^m \quad (1)$$

Onde:

- a - constante empírica;
- w - condutividade elétrica do meio poroso (dS^{-1});
- a porosidade ($m^3 m^{-3}$); e
- m - o expoente de sedimentação.

A corrente elétrica pode caminhar pelo meio, no caso o solo, de três maneiras (RHOADES et al., 1999):

- 1 - a porção líquida, água ocupando os poros grandes;
- 2 - na mistura sólido-líquido via troca de cátions associados com os minerais de argila; e
- 3 - via sólida, contato direto das partículas do solo, umas com as outras.

Que pode ser modelada de acordo com a equação abaixo,

$$EC_a = \frac{\left(\frac{EC_{ws}}{EC_{ss}}\right)^2 EC_{ws} EC_{ss}}{EC_{ws} EC_{ss}} \left(EC_{sc} \right) \left(EC_{wc} \right) \quad (2)$$

Onde:

- w_s e w_c - são o conteúdo volumétrico de água no caminho solo + água ($cm^3 cm^{-3}$) e no caminho contínuo de água ($cm^3 cm^{-3}$), respectivamente;
- v_s e v_c - são o volume da superfície de condutância ($cm^3 cm^{-3}$) e a fase sólida endurecida do solo ($cm^3 cm^{-3}$) respectivamente;
- EC_{ws} e EC_{wc} - são a específica condutividade elétrica do caminho solo-água (dSm^{-1}) e do caminho só de líquido (dSm^{-1});
- EC_{sc} e EC_{ss} - são a condutividade elétrica da superfície de condutância (dSm^{-1}) e da fase sólida indurecida (dSm^{-1}) respectivamente.

Fatores que influenciam EC_a

A EC_a é influenciada por várias propriedades físicas e químicas do solo, tal como:

- 1- Salinidade do solo;
- 2- Porcentagem de saturação;

- 3- Densidade volumétrica,
- 4- Umidade.

Como também a quantidade de argila; a capacidade de troca de cátions e matéria orgânica. As medidas de EC_a devem ser analisadas levando em conta estes fatores.

Outro fator é a temperatura. A condutividade eletrolítica é incrementada a um taxa de aproximadamente de 1,9% por graus Celsius. É tomada como referência a temperatura de 25°C.

Aplicação da medida de EC_a em agricultura

Uma de suas primeiras aplicações foi a de medir a salinidade do solo. Solo salinidade se refere à presença de solutos inorgânicos dissolvidos na fase aquosa do solo, como exemplo: Na^+ , K^+ , Mg^{+2} , Ca^{+2} , Cl^- , HCO_3^- , NO_3^- , SO_4^{-2} e CO_3^{-2} .

Os efeitos da salinidade do solo são visíveis na redução do crescimento da planta; redução da produção e quebra da safra. A salinidade limita a captação da água pela planta reduzindo o potencial osmótico.

Medidas da salinidade do solo

Cinco métodos são empregados para a determinação da salinidade do solo em escala de campo:

- 1- Observação visual da cultura

É um método rápido e econômico, tenda a desvantagem que a salinidade é detectada após ter ocorrido danos na cultura;

- 2- Condutância elétrica do solo maior que o normal da umidade;

A solução de solo é colocada entre dois elétrodos, igualmente distanciados e de geometria conhecida (BOHN et al., 1979). Aplicando-se uma diferença de potencial constante entre os dois elétrodos a corrente é inversamente proporcional a resistência da solução de solo, representada na equação abaixo:

$$EC_t = \frac{k}{R_t} \quad (3)$$

EC_t condutividade elétrica da solução ($dS\ m^{-1}$);

K constante da célula,

R_t a resistência medida.

- 3- Medida da resistividade elétrica (ER)

O método de medida da resistividade elétrica consiste em injetar uma determinada intensidade de corrente elétrica na superfície do solo, através de dois elétrodos. Com a passagem da corrente elétrica no solo resulta numa diferença de potencial, que é medida por outros dois eletrodos nas vizinhanças dos elétrodos de corrente (Fig. 1). Este método foi desenvolvido por Schlumberger na França e por Wenner nos Estados Unidos nos anos 1900 (BURGER, 1992; TELFORD et al., 1990).

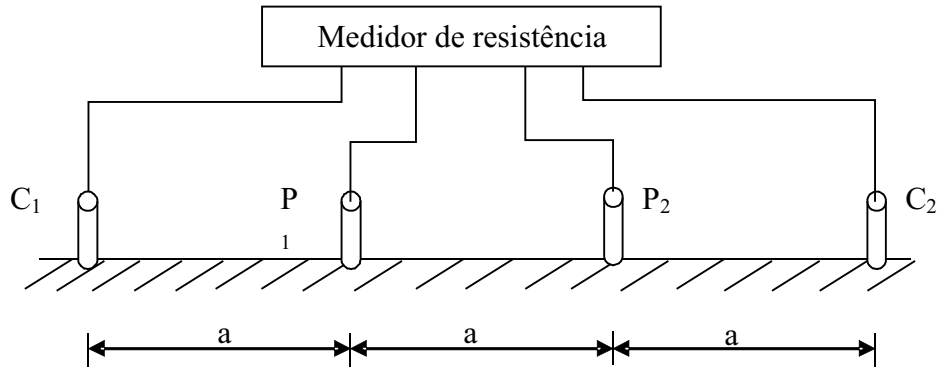


Fig. 1. esquema do método de medida de resistividade elétrica com o arranjo de 4 eletrodos: eletrodos de corrente C_1 e C_2 ; eletrodos de potencial P_1 e P_2 e a o espaçamento entre os eletrodos.

A profundidade da medida de resistividade elétrica é proporcional a distância entre os eletrodos (a). o volume medido na configuração da figura 2 é de πa^3 . Outros tipos de configurações podem ser visto nos trabalhos de Dobrin (1960), Telford et al. (1990) e Burger (1992).

4- Medida com indução eletromagnética

Uma bobina de transmissão induz um corrente de forma espiralada de sentido contrário no solo, a magnitude dessas espiras é proporcional a condutividade elétrica nas proximidades de cada espira. Cada espira de corrente gera um campo eletromagnético secundário que é proporcional ao valor da corrente fluindo dentro da espira.

Uma fração do campo eletromagnético induzido, secundário, é detectada por outra bobina receptora, que é amplificado e convertido em uma saída de tensão. Este sinal é proporcional a condutividade elétrica do solo na região onde se esta a medir.

Equipamentos de medida por indução eletromagnética estão disponíveis comercialmente. O modelo EM-38 de fabricação Geonics (Geonics Limited, Mississaug, Ontario, Canada) é o mais utilizado em medida de condutividade elétrica do solo para aplicações em agricultura (Fig. 2).



Fig. 2. Sistema de medida de condutividade elétrica do solo por indução eletromagnética, modelo EM-38 (Geonics Limited).

A profundidade de medida do EM-38, depende de sua configuração. Na configuração vertical atinge uma profundidade média de 1,5 m e na configuração horizontal, a profundidade varia de 0,75 a 1,0m (McNEILL, 1980, 1992; HENDRICKX e KACHANOSKI, 2002).

5- Reflectometria no domínio do tempo (TDR)

Esta técnica baseia-se na medição do tempo de propagação, ida e volta de um pulso de voltagem, através de uma sonda. O qual é função da constante dielétrica (ϵ) do meio que se esta fazendo a medição.

Pela medida da impedância da carga resistiva através da sonda (Z_L), a condutividade elétrica pode ser calculada por meio da equação 5 (GIESE e TIEMANN, 1975).

$$EC_a = \frac{\epsilon_0 c}{l} \frac{Z_0}{Z_L} \quad (5)$$

ϵ_0 permissividade do vácuo (8.854×10^{-12} F m⁻¹);

Z_0 impedância da sonda (Ω);

$$Z_L = Z_u \frac{2V_0}{V_f} - 1 \quad (1), \text{ onde } Z_u \text{ é a impedância característica do cabo do testados, } V_0 \text{ a}$$

Voltagem do pulso gerador e V_f a voltagem final refletida ao longo do tempo;

l comprimento da sonda.

Medida de outras propriedades físico-químicas com condutividade elétrica

A medida de condutividade elétrica é um produto de fatores tanto estáticos como dinâmicos que incluem a salinidade do solo, a mineralogia e argila, umidade, resistividade e temperatura (JOHNSON et al., 2003).

Vários estudos têm sido realizados com condutividade elétrica mostrando a especificidade e complexidade de uma região com a variação espacial da medida de condutividade elétrica em função de cada particular propriedade, influenciando a medida de condutividade elétrica na região em estudo. Corwin e Lesch em seu trabalho mostram quais tipos de medidas podem ser feitas com a técnica de condutividade elétrica (CORWIN e LESCH, 2005), as quais são discriminadas abaixo:

- medidas diretas das propriedades do solo, salinidade e nutrientes (No_3^-);
- umidade;
- textura (areia, argila, camadas de solo);
- densidade volumétrica (compactação);
- medidas indiretas das propriedades do solo, relacionadas com matérias orgânicas (carbono orgânico do solo, químicos orgânicos);
- capacidade de troca catiônica;
- lixiviação;
- estudos de mananciais de água subterrânea;
- classes de drenagem de solo;
- mapas de propriedades do solo.

Equipamentos para medida de condutividade elétrica

A medida de condutividade elétrica é particularmente adequada para estudo da variabilidade espacial de um campo das propriedades do solo, por ser uma medida rápida, fácil e confiável que integra dentro de suas medidas as influências de muitas propriedades do solo que contribuem na condutância elétrica do solo.

A condutividade elétrica serve como um meio de definir padrões espaciais que se mostram devido à variação da condutância elétrica, influenciadas pela salinidade, umidade, textura e resistividade.

Alguns equipamentos foram desenvolvidos para possibilitar a medida de condutividade elétrica do solo, proporcionando mapas das variações da condutividade elétrica na região de estudo (McNEILL, 1992; FREELAND et al., 2002).

Os equipamentos desenvolvidos utilizam as técnicas mencionadas atrás, tal como a medida de resistividade elétrica e de indução eletromagnética.

O equipamento utilizado para medida de resistividade elétrica consiste de seis eletrodos em contato com o solo, sendo dois eletrodos para injeção de corrente e dois para medida da diferença de potencial, medida entre os dois eletrodos de corrente. Cada medida é registrada de acordo com sua posição georeferenciada, através de um sistema de GPS, Figura 3 (CARTER et al., 1993; RHOADES, 1992,1993). Equipamentos comerciais também estão disponíveis, como o da Empresa Veris Technologies¹ Figura 3 b.

Mobile ER Equipment

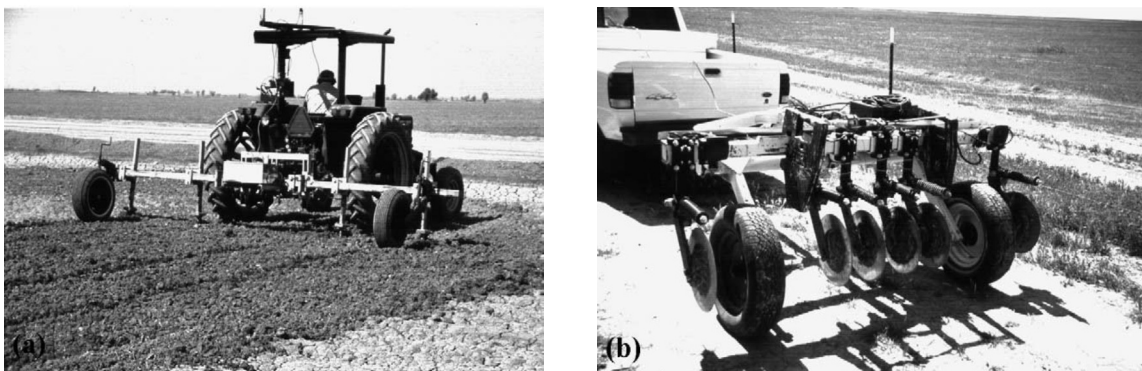


Fig. 3. Equipamentos desenvolvidos para medida de condutividade elétrica no solo: a) modelo experimental e b) modelo comercial Veris Technologies (CORWIN e LESCH, 2005).

Em medidas para quantificação da condutividade elétrica utilizando a metodologia de indução eletromagnética, o equipamento muito utilizado é o EM-38 de fabricação da empresa Geonics, já mencionada acima (Fig. 2).

Aplicação das medidas de condutividade elétrica em agricultura de precisão

Métodos eficientes e precisos de medidas para a determinação das variações das propriedades físicas e químicas do solo dentro de uma região são de extrema importância para a agricultura de precisão (BULLOCK e BULLOCK, 2000).

¹Veris Technologies, Salinas, Kansas, USA, www.veristech.com

A habilidade para delinear áreas georeferenciadas dentro de uma região que mostram semelhantes comportamentos em função da produtividade é muito difícil devido a diferentes e complexas combinações de fatores tais como, edáficos, biológicos e meteorológicos, que afetam a produtividade da cultura.

Eletro condutividade do solo é hoje uma das mais usadas para caracterizar as variabilidades de campo com aplicações em agricultura de precisão, por ser fácil e confiável (RHOADES et al., 1999a e 1999b; CORWIN e LESCH, 2003).

Utilizando mapas de condutividade elétrica para amostragem de solo, Jhonson e Corwin em seus estudos caracterizaram espacialmente a qualidade do solo, de acordo com suas propriedades físico-químicas. Neste trabalho foram amostrados quatro valores georeferenciados de condutividade elétrica com a correspondente amostra de solo e depois correlacionadas com as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (JHONSON et al., 2001; CORWIN et al., 2003a).

Os primeiros mapas de condutividade elétrica no Brasil foram montados por Inamasu e colaboradores (INAMASU et al., 2001). Neste trabalho eles estudaram a correlação das medidas de condutividade elétrica com a produtividade de uma plantação de milho.

O sistema de medida de condutividade elétrica usado foi o sistema comercial de fabricação Veris. A cultura de milho correspondia a uma área de 30 ha de irrigação por pivô-central de um campo experimental de propriedade da Embrapa Milho e Sorgo, situada na cidade de Sete Lagoas no estado de Minas Gerais.

Historicamente esta área já vem sendo utilizada pela Embrapa Milho e Sorgo já há vários anos sob cultivo de plantio direto.

Os mapas de condutividade elétrica, para profundidade de 30 cm e 90 cm, são ilustrados na Figura 4, na Figura 5 é ilustrado o mapa de produtividade desta área realizado com uma colheitadeira comercial adaptada para este fim.

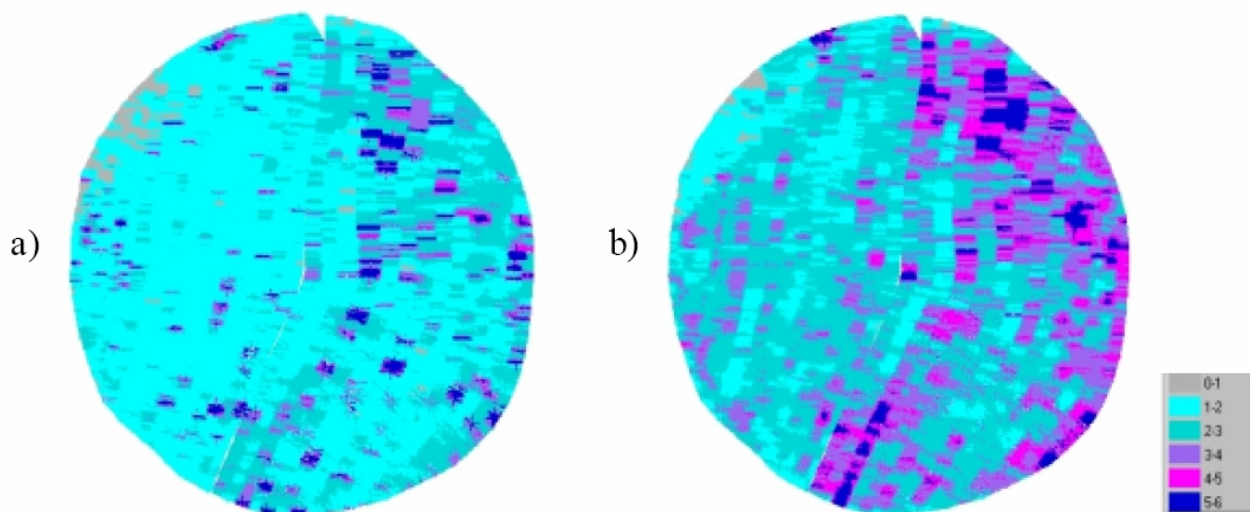


Fig. 4. Mapas de condutividade elétrica do solo, a) profundidade de 90 cm, b) profundidade de 30 cm.

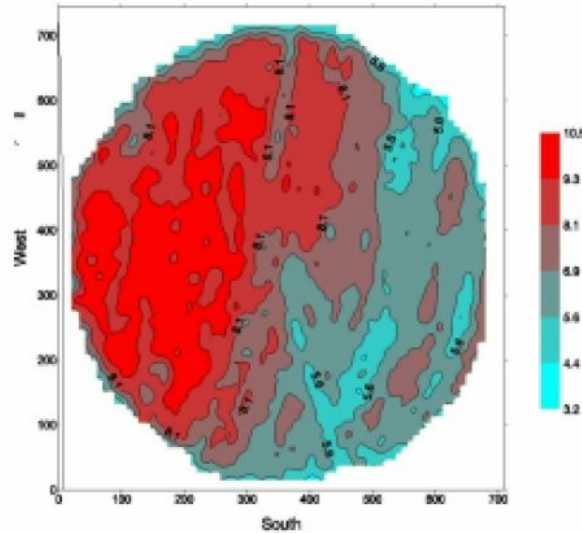


Fig. 5: Mapa de produtividade de milho (em vermelho as áreas mais produtivas e em azuis áreas menos produtivas).

Comentários finais

Muitos estudos ainda são necessários para a utilização do método de condutividade elétrica do solo em agricultura de precisão, mas ainda sim tem sido um método rápido e barato.

O fornecimento de dados que auxiliam a exploração da variabilidade é de grande importância. A análise qualitativa preliminar sobre os mapas de condutividade elétrica do solo sugere a divisão em subáreas mais homogêneas para um trabalho mais detalhado nessas subáreas, como o mapeamento da fertilidade do solo e de algumas propriedades do solo.

Explorar a correlação da homogeneidade da condutividade elétrica do solo na análise da fertilidade e ou de outros parâmetros do solo (umidade, salinidade, matéria orgânica, etc.) É um dos primeiros passos para orientar o que, quando e como aplicar determinada resposta no sentido de corrigir ou melhorar os dados de produtividade, aplicando em agricultura de precisão.

Referências

ALEXANDRATOS, N. (Ed.). **World Agriculture: Towards**. Chichester: Wiley, 1995. p. 2010.

ARCHIE, G. **The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics**. [S. l.: s. n.], 1942. (Transactions of AIME).

BOHN, H. L.; McNEAL, B. L.; O'CONNOR, G. A. **Soil Chemistry**. New York: Wiley, 1979.
BULLOCK, D. S.; BULLOCK, D. G. Economic optimality of input application rates in precision farming. **Prec. Agric.**, Dordrecht, v. 2, p. 71-101, 2000.

BURGER, H. R. **Exploration Geophysics of the Shallow Subsurface**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1992.

CARTER, L. M.; RHOADES, J. D.; CHESSON, J. H. **Mechanization of soil salinity assessment for mapping**. St. Joseph: ASAE, 1993. ASAE Winter Meetings, 12-17 December 1993, Chicago, IL., MI, USA. (ASAE Paper No. 931557).

CORWIN, D. L.; LESCH, S. M. Application of soil electrical conductivity to precision agriculture: theory, principles, and guidelines. **Agron. J.**, Madison, v. 95, n. 3, p. 455-471, 2003.

CORWIN, D. L.; KAFFKA, S. R.; HOPMANS, J. W.; MORI, Y.; LESCH, S. M.; OSTER, J. D. Assessment and field-scale mapping of soil quality properties of a saline-sodic soil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 114, n. 3-4, p. 231-259, 2003a.

CORWIN, D. L.; LESCH, S. M.; SHOUSE, P. J.; SOPPE, R.; AYARS, J. E. Identifying soil properties that influence cotton yield using soil sampling directed by apparent soil electrical conductivity. **Agron. J.**, Madison, v. 95, n. 2, p. 352-364, 2003b.

CORWIN, D. L.; LESCH, S. M. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. **Comput. Electron. Agric.**, New York, v. 46, p. 11-43, 2005.

DOBRIN, M. B. **Introduction to Geophysical Prospecting**. New York: McGraw-Hill, 1960.

FREELAND, R. S.; YODER, R. E.; AMMONS, J. T.; LEONARD, L. L. Mobilized surveying of soil conductivity using electromagnetic induction. **Appl. Eng. Agric.**, St Joseph, v. 18, n. 1, p. 121-126, 2002.

GIESE, K.; TIEMANN, R. Determination of the complex permittivity from thin-sample time domain reflectometry: improved analysis of the step response waveform. **Adv. Mol. Relax. Process.**, Amsterdam, v. 7, p. 45-49, 1975.

HENDRICKX, J. M. H.; KACHANOSKI, R. G. Solute content and concentration: indirect measurement of solute concentration: nonintrusive electromagnetic induction. In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. (Ed.). **Methods of soil Analysis: Part 4 Physical Methods**. Madison: Soil Science Society of America, 2002. p. 1297-1306. (Soil Sci. Soc. Am. Book Ser. 5).

INAMASU, R. Y.; FRANCA, G. E.; TORRE-NETO, A.; MANTOVANI, E. C.; CRUVINEL, P. E.; GOMIDE, R. L.; LUCHIARI JUNIOR, A.; RABELLO, L. M.; SOUZA, R. V. de. Condutividade elétrica do solo: primeiros mapas no Brasil. In: BALASTREIRE, L. A. **Avanços na agricultura de precisão no Brasil no período de 1999-2001**. Piracicaba: L. A. Balastreire, 2002. Cap. 2. p. 32-37.1 CD-ROM. Trabalho apresentado no III Simpósio sobre Agricultura de Precisão, Piracicaba, 2001.

JHONSON, C. K.; DORAN, J. W.; DUKE, H. R.; WEINHOLD, B. J.; ESKRIDGE, K. M.; SHANAHAN, J. F. Field-scale electrical conductivity mapping for delineating soil conditions. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, v. 65, p. 1829-1837, 2001.

JHONSON, C. K.; DORAN, J. W.; EGHBALL, B.; EIGENBERG, R. A.; WIENHOLD, B. J.; WOODBURY, B. L. **Status of soil electrical conductivity studies by central state researches**. St. Joseph: ASAE, 2003. Paper No. 032339, 2003 ASAE Annual International Meeting, 27-30 July 2003. Las Vegas, NV.

LARSON, W. E.; ROBERT, P. C. Farmming by soil. In: LAL, R.; PIERCE, F. J. (Ed.). **Soil Management for sustainability**. Ankeny: Soil and Water Conservation Society, 1991. p. 103-112.

LONG, D. S. Spatial autoregression modeling of site-specific wheat yield. **Geoderma**, Amsterdam, v. 85, p. 181-197, 1998.

McNEILL, J. D. **Rapid, Accurate Mapping of soil Salinity using electromagnetic ground conductivity meters**. Ontario: Geonics Limited, 1980. (Tech. Note, TN-18).

McNEILL, J. D. Rapid, Accurate Mapping of soil Salinity using electromagnetic ground conductivity meters. In: TOPP, G. C.; REYNOLDS, W. D.; GREEN, R. E. (Ed.). **Advances in Measurements of Soil Physical Properties: Bringing Theory into Practice**. Madison: ASA-CSSA-SSSA SSSA, 1992. p. 201-229. (Special Publication, No. 30).

NIELSON, D. R.; BIGGAR, J. W.; ERH, K. T. Spatial variability of field-measured soil-water properties. **Hilgardia**, Berkeley, v. 42, n. 7, p. 215-259, 1973.

PLANT, R. E. Site-specific management: the application of information technology to crop production. **Comput. Electron. Agric.**, New York, v. 30, p. 9-29, 2001.

RHOADES, J. D.; LOVEDAY, J. Salinity in irrigated agriculture. In: STEWART, B. A.; NIELSEN, D. R. (Ed.). **Irrigation of Agricultural Crops**. Madison: Soil Science Society of America, 1990. p. 1089-1142. (Agron. Monogr., No. 30).

RHOADES, J. D. Instrumental field methods of salinity appraisal. In: TOPP, G. C.; REYNOLDS, W. D.; GREEN, R. E. (Ed.). **Advances in Measurement of Soil Physical Properties: Bring Theory into Practice**. Madison: Soil Science Society of America, 1992. p. 231-248. (SSSA Special Publications, No. 30).

RHOADES, J. D. Electrical conductivity methods for measuring and mapping soil salinity. In: SPARKS, D. L. (Ed.). **Advances in Agronomy**. San Diego: Academic Press, 1993. v. 49. p. 201-251.

RHOADES, J. D.; CORWIN, D. L.; LESCH, S. M. Geospatial measurements of soil electrical conductivity to assess soil salinity and diffuse salt loading from irrigation. In: CORWIN, D. L.; LOAGUE, K.; ELLSWORTH, T. R. (Ed.). **Assessment of Non-point Source Pollution in the Vadose Zone**. Washington, DC: American Geophysical Union, 1999a. p. 197-215. (Geophysical Monograph, 108).

RHOADES, J. D.; CHANDUVI, F.; LESCH, S. **Soil salinity assessment: methods and interpretation of electrical conductivity measurements**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1999b. p. 1-150. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 57).

TELFORD, W. M.; GLEDART, L. P.; SHERIFF, R. E. **Applied Geophysical**. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

VAN SCHILFGAARDE, J. Is precision agriculture sustainable? **Am. J. Altern. Agric.**, Greenbelt, v. 14, p. 43-46, 1999.

VAN UFFELEN, C. G. R.; VERHAGEN, J.; BOUMA, J. Comparison of simulated crop yield patterns for site-specific management. **Agric. Syst.**, Essex, v. 54, p. 207-222, 1997.

WORLD RESOURCES INSTITUTE. **1998-99 World Resources: A Guide to the Global Environment**. New York: Oxford University Press, 1998.



Embrapa Instrumentação Agropecuária

**Ministério da
Agricultura, Pecuária
e Abastecimento**

