

REVISÃO DE LITERATURA

TECNOLOGIAS PARA LEVANTAMENTO DA
VARIABILIDADE DOS ATRIBUTOS DO SOLO PARA
UM PROGRAMA DE AGRICULTURA DE PRECISÃO

*Léo Adriano Chig*¹

*Eduardo Guimarães Couto*²

*Ricardo Santos Silva Amorim*³

RESUMO

Na atual conjuntura econômica do setor agrícola no Brasil, observa-se uma série de transformações que vem tornando a atividade cada vez mais competitiva e exigindo do produtor maior nível de especialização, capacidade de gerenciamento e profissionalismo. Através dessas transformações, busca-se aumentar as potencialidades e, ao mesmo tempo, diminuir custos de produção. Para isso, tem-se gerado novas tecnologias disponibilizadas pela agricultura de precisão, o que representa um leque de opções que permite o acesso a informações diferenciadas e, até pouco tempo atrás, inimagináveis. Essas informações vêm tornando possíveis as observações nas áreas agrícolas, de forma inovadora, através de mapas. Entretanto, existem incertezas das reais utilidades práticas dessas tecnologias. Objetivou-se com este trabalho realizar uma abordagem da evolução e estado da arte das tecnologias para levantamento da variabilidade dos atributos do solo, visando atender as necessidades para implantação da técnica de aplicação de insumos no solo em taxa variável (agricultura de precisão), sem a pretensão de esgotar o tema nem cobrir todas as suas variações. A utilização de sensores num programa de agricultura de precisão possibilita reduzir os custos com amostragem do solo e aumentar expressivamente a densidade

- 1 Eng.º Agrônomo, Doutor em Agricultura Tropical, DSER/FAMEV/UFMT, Av. Fernando Corrêa, s/n, Boa Esperança, Cuiabá (MT), CEP 78.060-900. Fone (65) 3615-8616. E-mail: leochig@gmail.com
- 2 Eng.º Agrônomo, Prof. Dr. Associado de Ciência do Solo, DSER/FAMEV/UFMT, Av. Fernando Corrêa, s/n, Boa Esperança, Cuiabá (MT), CEP 78.060-900. E-mail: couto@cpd.ufmt.br.
- 3 Eng.º Agrônomo, Prof. Dr. Adjunto II do DSER/FAMEV/UFMT, Av. Fernando Corrêa, s/n, Boa Esperança, Cuiabá (MT), CEP 78.060-900. E-mail: rsamorim@ufmt.br

de pontos de informações, que pode aumentar a qualidade dos mapas de isovalores dos atributos do solo necessários para gerar os mapas de recomendação da aplicação de insumos no solo em taxa variável. Contudo, antes da utilização indiscriminada destes sensores para condições edáficas de clima tropical, é fundamental o desenvolvimento de estudos que visem à calibração e validação destes sensores para essa nova condição, uma vez que os mesmos foram desenvolvidos e calibrados para solos de clima temperado.

PALAVRAS-CHAVE

Geoestatística, sensores, variabilidade especial

TECHNOLOGIES FOR RISING OF THE VARIABILITY OF THE ATTRIBUTES OF THE SOIL FOR A PROGRAM OF PRECISION FARMING

ABSTRACT

In the current economical conjuncture of the agricultural section in Brazil, a series of transformations is observed, that is turning the activity more and more competitive and demanding from the producer larger specialization level, administration capacity and professionalism. Through these transformations they are looked for to increase the potentialities and at the same time to reduce production costs. For this, she has if generated new technologies made available by the agriculture of precision, what represents various options that it allows the access to differentiated information and, even little time behind, unimaginable. That information are turning possible the observations in the agricultural areas in an innovative way through maps. However, uncertainties of the real usefulness exist practice of these technologies. It was aimed at with this work to accomplish an approach of the evolution and state of the art of the technologies for rising of the variability of the attributes of the soil seeking to assist the needs for implantation of the technique of application of inputs in the soil in variable tax (Precision Farming), without the pretension of to drain the theme nor to cover all their variations. The use of sensor in a program of precision farming makes possible to reduce the costs with sampling of the soil, to increase expressive the density of points of information that can increase the quality of the maps of isovalores

of the attributes of the necessary soil to generate the maps of recommendation of the application of inputs in the soil in variable tax. However before the indiscriminate use of these sensor ones for conditions edaphic of tropical climate, it is fundamental the development of studies that you/they seek to the calibration and validation of these sensor ones for that new condition, once the same ones were developed and gaged for soils of temperate climate.

KEYWORDS

geostatistic, sensors, spatial variability

Introdução

A elaboração e análise de mapas de atributos de solos na agricultura de precisão (AP) constituem uma ferramenta extremamente importante para o gerenciamento detalhado da produção agrícola, no auxílio da tomada de decisões relativas à aplicação de insumos nas lavouras, de modo a minimizar os custos da produção agrícola e possibilitar melhores condições para um ótimo desenvolvimento da cultura.

Um dos principais desafios para a implantação da agricultura de precisão está na busca de metodologias que permitam obter um maior número de informações a baixo custo e que possibilite produzir mapas de atributos do solo de comprovada acurácia. Uma tecnologia bastante promissora é a utilização de instrumentos equipados com sensores que permitam determinar alguns atributos do solo de fácil obtenção e de baixo custo, como por exemplo, o pH, a condutividade elétrica aparente do solo (CE_{as}) e a produtividade agrícola que possam ser correlacionados com outros atributos do solo mais dispendiosos.

Estudos recentes têm mostrado que o mapeamento da CE_{as} , do pH e da medida espectral (na faixa do infravermelho próximo e do visível) do solo, com auxílio de sensores associados a sistemas de posicionamento global (GPS), é uma ferramenta simples e seus resultados têm apresentado boas correlações com

alguns atributos do solo, tais como: argila e areia, matéria orgânica, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e pH. Além da simplicidade, rapidez e boa precisão, esses sistemas têm uma capacidade de aquisição de dados numa elevada densidade, o que favorece uma melhoria significativa na acurácia dos mapas e, por conseguinte, um incremento nos benefícios da adoção da aplicação de insumos em taxa variável (agricultura de precisão).

Nos últimos anos a produção científica na área da agricultura de precisão vem crescendo consideravelmente, e porque há muito a ser desbravado nessa área, principalmente na questão da qualidade dos mapas, objetiva-se com este trabalho realizar uma abordagem da evolução e estado da arte das tecnologias para levantamento da variabilidade dos atributos do solo visando atender as necessidades para implantação da técnica de aplicação de insumos no solo em taxa variável (agricultura de precisão), sem a pretensão de esgotar o tema nem cobrir todas as suas variações.

Material e métodos

Este estudo constitui-se de uma revisão da literatura especializada, realizada entre março de 2005 a março de 2010, no qual realizou-se uma consulta a livros e periódicos presentes na Biblioteca da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT) e por artigos científicos selecionados através de busca no banco de dados da CAPES, SCIELO, SCORPUS entre outros.

Buscou-se abordar a evolução e estado da arte das tecnologias para levantamento da variabilidade dos atributos do solo, visando atender as necessidades para implantação da técnica de aplicação de insumos no solo em taxa variável (agricultura de precisão), sem a pretensão de esgotar o tema nem cobrir todas as suas variações.

Tecnologias disponíveis e aplicações conhecidas

Mapas de isovalores

Os mapas de isovalores é uma das maneiras mais utilizadas para representar a variabilidade espacial dos atributos do solo em uma área (BURGESS e WEBSTER, 1980a, b). Segundo Corá e Beraldo (2006), há três tipos de mapas de isovalores dentro do conceito de agricultura de precisão (AP), sendo eles:

1) **mapas de condição:** nesses mapas pode-se observar a distribuição espacial dos parâmetros avaliados em uma determinada área, antes de qualquer intervenção;

2) **mapas de recomendação ou prescrição:** estes são derivados de um ou mais mapas de condição e contêm informações sobre as quantidades necessárias de insumos e/ou práticas agrícolas que cada local específico da área deverá receber (manejo específico), respeitando a variabilidade dos atributos avaliados (mapas de condição), base para a tecnologia da aplicação em doses variáveis;

Uma preocupação muito importante é que os mapas de recomendação sejam de alta precisão para que seja possível a aplicação do manejo específico, adequadamente. Os fatores que afetam a precisão dos mapas são: a escolha do método de interpolação dos dados, a intensidade e o esquema de amostragem, em razão de influenciarem na estimativa dos valores dos atributos do solo em locais não amostrados.

3) **mapas de desempenho:** este permite avaliar como a área se apresenta após o manejo específico, caracterizando-se também como mapa de condição para um próximo ciclo no contexto da agricultura de precisão (FRAISSE, 2003; CORÁ e BERBALDO, 2006).

Montanari et al. (2005) mencionam também os mapas de otimização de amostragem, por possibilitarem um melhor entendimento do padrão de distribuição espacial, permitindo definir diferentes zonas de manejo. Estes mapas, segundo McBratney e Webster (1983), podem ser de grande utilidade no planeja-

mento experimental, além de serem úteis como ferramenta nos programas de agricultura de precisão, uma vez que o número de amostras a serem coletadas representa um elevado custo para esses programas.

Os mapas dos atributos do solo (mapas de condição) são elaborados a partir de valores pontuais dos atributos de solo, segundo uma malha de amostragem de solo no campo. Em geral, é confeccionado um mapa para cada um dos atributos avaliados (CAMPOS, 1996; KUHAR, 1997). Métodos matemáticos, como a krigagem, inverso do quadrado da distância, polinômios, multiquadráticos, triangulação, entre outros, são utilizados para interpolar os valores nas áreas entre os pontos amostrados, criando mapas dos níveis de nutrientes no solo, a partir da variabilidade espacial (VIEIRA, 2000).

O mapeamento da fertilidade do solo é de grande importância para se obtenção de um suporte quantitativo no balanço nutricional do solo (WHITE e ZASOSKI, 1999). Mapas de fertilidade são usados em agricultura de precisão fundamentalmente para determinação dos mapas finais de aplicação de fertilizantes à taxa variável (mapas de recomendação).

Esquemas de amostragem do solo

Tradicionalmente os agricultores têm feito a amostragem do solo de uma dada área uniformizando as sub-amostras em uma única, sendo esta utilizada para representar as características de fertilidade da área, assumida como uniforme (CAPELLI, 1999; TRANGMAR et al., 1985). Esse tipo de amostragem baseia-se na “estatística clássica”, segundo Gonçalves (2004), considera a independência das observações. O que corresponde a assumir que a variabilidade em torno da média é aleatória e independente da posição espacial dos valores amostrais. Esta pressuposição de uniformidade dos campos tem sido substituída por análises geoestatísticas, as quais consideram as correlações entre observações vizinhas, uma vez que as propriedades do solo variam de local para local dentro dessa mesma área (WIEDA e BORGELT, 1993; GONÇALVES, 2004).

Quando consideramos as características da variabilidade espacial das propriedades físico-química do solo, por causa do elevado custo das análises de laboratório, alguns agricultores têm coletado amostra composta para cada 5 ou 10 ha, e normalmente, segundo Sadler et al. (1998), adotando o esquema amostral de malha fixa para a coleta dessas amostras.

Anderson-Cook et al. (1999) afirmam que, para diminuir ainda mais os custos, alguns agricultores têm coletado apenas algumas amostras simples (seis a oito, geralmente com pequeno volume), sendo estas analisadas individualmente. Dessa forma, pode-se inferir que os mapas de condição gerados podem não caracterizar a real variabilidade da fertilidade do solo, pois cada ponto de amostragem representará as concentrações localizadas de nutrientes, podendo ser extremamente variáveis em distâncias menores que 1 m.

Para contemplar as variações a curtas distâncias no solo, uma vez que na agricultura de precisão não se procura a fertilidade média, as malhas fixas de amostragem deveriam ser menores, tornando-se, porém, inviável economicamente (se a distância entre pontos fosse de 1 m, seriam analisadas individualmente 10.000 amostras em 1 ha) (RAUN et al., 1998). A questão econômica, entretanto, não é o único problema neste caso. A redução no espaçamento das malhas fixas de amostragem pode gerar padrões cíclicos (tendências) de diferentes magnitudes, os quais, muitas vezes, afetam marcadamente a forma do semivariograma (modelo simples para o semivariograma pode não ser adequado), além de aumentar a ocorrência de “outliers”, especialmente no plantio direto (MALLARINO, 1996). Para Mulla e McBratney (2000). Esses “outliers” podem afetar significativamente a forma do semivariograma, diminuindo o alcance mesmo na presença de elevada dependência espacial.

As variações a curtas distâncias podem ser atenuadas com o uso da técnica conhecida como “bulking” (agrupamento), que consiste na retirada de muitas amostras simples de pequeno volume e obtenção de médias locais, ou formação de amostras compostas a partir destas “amostras simples” (BURROUGH, 1991;

MULLA e McBRATNEY, 2000). A unidade amostral pode ser considerada como “bulking”, por apresentar a vantagem de ser dimensionado para representar a fertilidade efetivamente explorada por uma planta ou por um grupo de plantas (fertilidade local média), além de representar as mesovariações que são as variações representativas a curtas distâncias na composição do solo (GARÇONI M. et al., 2006). Para Cahn et al. (1994) os esquemas de amostragem precisam ser flexíveis para caracterizarem, acuradamente, a dependência espacial de várias características do solo. Nesse caso, provavelmente, o esquema de amostragem mais flexível seja a coleta de 3 amostras simples para formarem uma de amostra composta em áreas de 1 m^2 , distribuídas ao longo do campo de cultivo. A área sugerida pelo autor é muito próxima da área selecionada para o indivíduo solo ($1,228 \text{ m}^2$), o que reforça, mais uma vez, sua aplicabilidade prática na agricultura de precisão.

Vários estudos foram realizados dentro de 16 áreas de 1,5 a 2,3 ha em Iowa – USA com diferentes histórias de manejo de adubação ao longo do tempo, com objetivo de examinar a variabilidade espacial dos atributos do solo. Nesses estudos foi detectado que a distância de um ponto ao outro não deve ser inferior a 66 m e superior a 100 m (WOLLENHAUPT et al., 1994; FRANZEN e PECK, 1995; PIERCE et al., 1995; CHANG et al., 1999). Porém, cabe salientar que esses estudos não foram conduzidos em talhões com amostragens em grandes distâncias, mas em malha fixa de 25 m, não havendo nenhuma indicação de aplicação de adubo em quaisquer dos locais estudados.

Clay et al. (1999) analisaram a relação custo/benefício para os diferentes níveis de amostragem, sugerindo que para uma malha de 90 m o lucro líquido seria maior que o obtido por uma amostra média para aplicação uniforme, enquanto que numa malha de 60 m implicaria prejuízo, em função do aumento do custo da amostragem elevar-se exponencialmente com a redução do espaçamento. Além disso, segundo os autores, os esquemas de amostragem devem ser considerados separadamente das estratégias de adubação, uma vez que o custo do equipamento para aplicação localizada pode ser substancialmente maior do que o

de taxa fixa, o que pode fazer com que o retorno com a aplicação localizada, seja menor para alguns tratamentos.

Segundo Mattoso e Garcia (2005), uma peculiaridade que surge na análise econômica da AP é que ela é fundamentalmente uma tecnologia de informação. Informação, na agricultura moderna, é um insumo de produção tal como o é o fertilizante, a semente ou o inseticida, portanto da mesma forma que esses insumos, a informação também tem um custo de aquisição. Em termos econômicos, entretanto, a informação só é válida se decisões são tomadas com base nessas informações e estas redundam em acréscimo no lucro das empresas.

A agricultura de precisão, por seu grau de complexidade, exige investimentos expressivos de recursos materiais e humanos, e necessita de tempo para consolidação. Esses investimentos, eventualmente, poderão apresentar benefícios de curto prazo, porém, os resultados só se manifestarão a longo prazo (BORGELT et al., 1994; DeBOER, 1996). Por isso é preciso pesquisar, quantificar e analisar a variabilidade espacial dos atributos do solo e da produtividade de diversas culturas, para determinar as melhores técnicas de seu manejo em diversos lugares e tipos de solo (BORGET et al., 1994) para que se atinja o principal objetivo da AP, que é manejar o solo de forma localizada, otimizando o uso da área e, conseqüentemente, maximizando os lucros agrícolas e minimizando o impacto da atividade agrícola sobre o meio ambiente (CERRI, 2005).

Utilização de sensores

A caracterização da variabilidade do solo é um dos principais entraves para uma adesão, por parte dos agricultores, da técnica de agricultura de precisão. Sem o conhecimento da variabilidade dos atributos do solo e a aquisição de mapas dos atributos do solo precisos e exatos, a aplicação de insumos em taxa variável nas lavouras torna-se inapropriada. No entanto, para o conhecimento dessa variabilidade de forma confiável, torna-se necessário coletar um elevado número de pontos amostrados. Esse fato, associado ao elevado custo e morosidade dos méto-

dos tradicionais de amostragem do solo e determinação dos seus atributos, tem sido uma das principais causas da baixa adoção desta tecnologia na agricultura brasileira, especificamente no Estado de Mato Grosso.

Desta forma, o grande desafio para a implantação da agricultura de precisão está na busca de metodologias que permitam obter mapas de atributos do solo de comprovada acurácia, obtendo-se um maior número de informações possíveis a um baixo custo e menor número de análises físico-química do solo em laboratório. Uma alternativa consiste na aquisição de atributos do solo de fácil obtenção e de baixo custo, como por exemplo, pH, cor, resistência à penetração, condutividade elétrica do solo e produtividade, que possam ser correlacionados com outros atributos do solo, mais dispendiosos.

As pesquisas e indústrias têm dedicado consideráveis esforços visando o desenvolvimento de instrumentos equipados com sensores que permitam determinar com maior precisão os atributos do solo.

Em campo um modo rápido, simples, preciso e barato para caracterizar as diferenças dos atributos dos solos é por meio do mapeamento da condutividade elétrica do solo (CE_{as}) (DOERGE, 1999), pH (*Veris Technologies*, 2005), de medidas das respostas espectral (na faixa do infravermelho próximo e visível) do solo e do conteúdo de umidade do solo a campo com auxílio de sensores associados a sistemas de posicionamento global (GPS). Além de ser uma ferramenta simples, os resultados obtidos têm apresentado boas correlações com alguns atributos do solo, tais como: fração granulométrica do solo (argila e areia), fósforo, matéria orgânica, potássio, cálcio, magnésio e pH; os quais são de fundamental importância para gerar as recomendações de fertilização e/ou correção do solo em taxa variável (agricultura de precisão). Associada à simplicidade, rapidez e boa precisão, esses sistemas também têm uma capacidade de aquisição de dados numa elevada densidade, podendo chegar a uma densidade de informações de 2.024 pontos ha^{-1} , favorecendo significativa melhora na acurácia dos mapas e, conseqüentemente, um incre-

mento nos benefícios da adoção da aplicação de insumos em taxa variável (ADAMCHUK et al., 2004).

Sensores para determinação da condutividade elétrica aparente do solo *in situ*

Estudos com o uso da condutividade elétrica aparente do solo (CE_{as}) têm apontado seu potencial para a mensuração de conteúdo de argila, conteúdo de água, capacidade de troca catiônica e teores de cálcio e magnésio trocáveis, profundidade de camada de impedimento, teor de matéria orgânica, teor de sais da solução do solo, textura do solo, além de outras propriedades (LUND et al., 1999a; LUND et al. 2001; McBRIDE et al., 1990; KACHANOSKI et al., 1988; CLARK et al., 2000).

A CE_{as} pode ser medida por contato, fazendo passar uma corrente elétrica em eletrodos isolados, ou indiretamente, com o uso de corrente induzida por um campo magnético, sem contato com o solo. Para ambos os casos há equipamentos comerciais que foram testados e mostraram resultados semelhantes (FRITZ et al., 1998; SUDDTH et al., 1998; BUCHLEITER e FARAHANI, 2002). HARTSOCK et al. (2000) trabalharam com um sensor de condutividade elétrica por contato, disponível no mercado, e observaram variabilidade temporal relacionada à condutividade elétrica, chegando a uma conclusão da importância deste atributo, pois a mesma pode ser útil para determinar a produção agrícola, já que esta se relaciona a fatores que afetam a produtividade de solo.

Lund et al. (1999b) apresentaram um equipamento comercializado com o nome Véris, para ser utilizado no levantamento da CE_{as} a campo. Este equipamento mede a CE_{as} , pela técnica do caminhamento elétrico contínuo, nas profundidades de 0 – 0,30 m e 0 – 0,90 m. Este equipamento, associado ao sistema DGPS, permite a obtenção das informações georreferenciadas com elevada precisão.

Fabricantes e outros setores diretamente ligados à comercialização destes equipamentos nos EUA (solos temperados) afirmam que a CE_{as} pode ser indicativa de porosidade, teor de **água, nível de salinidade, capacidade de troca catiônica, pro-**

fundidade do solo e temperatura. Entretanto, uma vez que é uma medida que englobará todas estas variáveis, pode ser difícil distinguir qual delas é a mais importante. Em solos tropicais, altamente intemperizados, é necessário testar esse método antes que se possa concluir sobre o seu real valor (VIEIRA, 2003).

No entanto, a determinação da CE obtida com sensores de campo é diferente da determinação da salinidade do solo, obtida com a pasta de saturação ou com extratos aquosos de solo (RHOADES, 1996; EMPRAPA, 1997), pois a medição é obtida *in-situ* em condições de campo, permitindo medidas diretas e instantâneas, e fornecendo, inclusive, resultados semelhantes aos obtidos em laboratório.

Sensores para determinação do pH do solo *in-situ*

O pH do solo vem sendo muito bem documentado há muito tempo (como pode ser visto em VOLKWEISS e LUDSWICK, 1976; JACKSON, 1967; ADAMS, 1984; ULRICH e SUMNER, 1991; VELOSO et al., 1992; BLACK, 1993; MENGEL, 1997), o que de certa forma podemos dizer que, com o conhecimento do valor de pH do solo, é possível fazer previsões sobre a fertilidade do solo, advindo daí a importância do índice pH (TOMÉ Jr., 1997).

Portanto, para se determinar o pH do solo, segundo Erickson (2004), a *Veris Technologies* desenvolveu um sensor Móvel de Plataforma (MSP), conhecido como de *Soil pH Manager*. Este equipamento utiliza um sistema de sensores automatizados que mostra variabilidade de pH como é realmente, ou seja, é um equipamento adaptado tecnologicamente para automatizar um laboratório para ser usado a campo.

Esse equipamento, que possui um sistema coletor de solo para determinar o pH, foi desenvolvido e testado recentemente (ADAMCHUCK et al., 1999). O sistema determina o pH de uma amostra de solo naturalmente úmida, em média de 10 em 10 s, sucessivamente. Isto corresponde a uma nova leitura de pH do solo a cada 14 m, a uma velocidade de 5 km h⁻¹. Porém, en-

quanto se aumenta a densidade de coleta de leituras de pH do solo, aumenta-se o nível de erro ($SE = 0,38$ pH) (ADAMCHUCK e MORGAN, 1999; ADAMCHUCK, 2000) se comparado com análises de laboratório padrão ($0,10$ pH) (BROUDER, 1999). É óbvio que ainda há necessidade de justificar economicamente os mapas automatizados de pH de solo.

Véris Technologies (2005), analisando dados de pH obtidos a campo nos EUA com *Véris pH Manager*, observou que produz medidas de até 95% de precisão em relação às análises de laboratório. A principal vantagem desse equipamento é a obtenção de uma maior quantidade de amostras de uma área grande em período, em menor tempo.

Como a maioria das propriedades do solo, o pH possui elevada dependência espacialmente, ou seja, o pH do solo medido em qualquer local é “correlacionado” ao pH de um ponto circunvizinho (ADAMCHUCK et al., 2004). Contudo, segundo a *Véris Technologies* (2005), mesmo tendo vários pesquisadores documentado a variabilidade espacial do pH do solo, ainda não se conseguiu documentar como ela era realmente até o momento, o que foi possível com esse equipamento.

ADAMCHUCK et al. (2004), utilizando equipamento da *Véris Technologies*, verificaram uma redução dos custos com calcário em lavouras de soja e algodão, da ordem de $U\$6 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, quando comparou a aplicação de calcário baseado em mapas obtidos a partir de dados de pH pelo método automatizado (sensor de contato) com aquele realizado de forma convencional (01 amostra ha^{-1} coletada e analisada em laboratório).

Sensores para determinação da refletância do solo *in-situ* na faixa do infravermelho próximo e visível

Recentemente uma nova linha de sensores baseados na técnica da espectroscopia do infravermelho próximo (NIR) e visível (VIS) vem sendo utilizados para fazer a caracterização da variabilidade do solo. A medida espectral do NIR e do VIS apresentam resultados promissores para a estimativa dos valores de alguns

atributos do solo, tais como, o pH, os teores de matéria orgânica, o carbono, o fósforo, o potássio, o cálcio e o magnésio do solo, tendo em vista que as medidas do NIR e VIS apresentam coeficiente de correlação elevados, variando de 0,71 a 0,95, com os atributos supracitados (MOUAZEN et al., 2005; MOUAZEN et al., 2007).

Os sensores NIR e VIS foram desenvolvidos para obterem medidas da resposta espectral do solo *in-situ* na faixa do espectro eletromagnético do infravermelho próximo e visível (720-1100 nm), respectivamente. Estudos em laboratório têm demonstrado a efetividade das análises quantitativas dos sensores NIR em relação aos atributos do solo (EHSANI et al., 1999; REEVES et al., 1999; CHANG et al., 2001; FYSTRO, 2002; SHEPHERD e WALSH, 2002; VISCARRA ROSSEL et al., 2006). Por essa razão alguns pesquisadores propuseram testar espectrofotômetros para obtenção de medidas de refletância *in-situ* (SHONK et al., 1991; SUDDUTH and HUMMEL, 1993a,b).

Shonk et al. (1991) desenvolveram um sensor de refletância infravermelho para coleta de informações sobre matéria orgânica do solo (MOS) em tempo real *in situ*. Este sensor utiliza a refletância para medir em tempo real o teor de matéria orgânica no solo por ser um sensor robusto, pode resistir a todas as condições ambientais geralmente encontradas em operações de campo. Os referidos autores realizaram testes com esse sensor em várias toposequências no meio Oeste dos Estados Unidos, nos quais obtiveram boa precisão do mesmo para determinação da matéria orgânica, obtiveram elevados valores de correlações entre valores de MOS obtidos com o sensor e com método tradicional (análise de laboratório).

Shonk et al. (1991) verificaram ainda que esse sensor apresentou melhor precisão para solos que possuem teores de matéria orgânica variando de 1 a 6%. Os autores, contudo, ressaltam a necessidade de calibração do sensor para cada local e, quando calibrados, pode-se obter correlações superiores a 85% entre os valores de MOS obtidos com o sensor e pelo método tradicional.

Sudduth e Hummel, 1991, utilizando as técnicas de refletância abordadas por Krishnan et al. (1980) e Worner (1989), de-

envolveram um sensor portátil e robusto que utiliza a refletância do infravermelho próximo (NIR) para determinação da MOS e da umidade do solo. Este sensor foi desenvolvido e testado por engenheiros de Serviço de Pesquisa agrícola em Ilinois - USDA (SUDDUTH e HUMMEL, 1993a,b,c) para diferentes tipos de solo e teor de umidade. Nesses testes em campo, o sensor mostrou-se eficiente para determinação indireta da matéria orgânica e umidade do solo, apresentando elevados valores de correlação ($r=0,94$) e baixo erro padrão (0,40%) quando comparado os valores obtidos pelo sensor e pelo método tradicional.

Considerações finais

A disponibilidade de sensores que possibilitem o levantamento da variabilidade espacial dos atributos do solo *in situ* de maneira precisa, vem crescendo e sugere uma nova realidade para a agricultura dos próximos anos. A utilização desses sensores num programa de agricultura de precisão possibilita reduzir os custos com amostragem do solo, aumentar expressivamente a densidade de pontos de informações, que por sua vez pode aumentar a qualidade dos mapas de isovalores dos atributos do solo, necessários para gerar os mapas de recomendação da aplicação de insumos no solo em taxa variável.

Deve-se levar em consideração, todavia, que esses sensores foram desenvolvidos e calibrados em condições edáficas de regiões temperadas, ou seja, a faixa de detecção dos mesmos foram ajustados e calibrados para condições edáficas bastante diferentes das condições brasileiras. Dessa forma, antes da utilização indiscriminada desses sensores para condições edáficas de clima tropical, é fundamental o desenvolvimento de estudos que visem à calibração e validação desses sensores para posterior utilização dos mesmos para o mapeamento dos atributos no solo com elevada acurácia e baixo custo. Desse modo poderá solucionar um dos grandes entraves à adoção da agricultura de precisão: elevado custo de amostragem do solo para atender as necessidades dessa tecnologia.

Referências

ADAMCHUK , V.I.; MORGAN, M.T.; LOWENBERG- ADAMCHUK, V.I. and MORGAN, M.T. *Evaluation of automated soil pH mapping*. ASAE Paper No.99-1100. In: Presented at the 1999 ASAE/CSAE-SGCR Annual International Meeting (Toronto, Ontario, Canada). 1999.

ADAMCHUK, V.I. *Automated Mapping of Soil pH, Potassium and Mechanical Impedance for Site-Specific Management*. Ph.D. *Thesis* (Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA). 2000.

ADAMCHUK, V.I., MORGAN, M.T. and ESS, D.R. *An automated sampling system for measuring soil pH*. Transactions of the ASAE 42(4), 885–891. 1999.

ADAMS, F. *Soil acidity and liming* (2nd ed.). Agron. Monogr. n.12. ASA, Madison, WI. 1984.

ANDERSON-COOK, C.M.; ALLEY, M.M.; NOBLE, R. & KHOSLA, R. Phosphorus and potassium fertilizer recommendation variability for two mid-atlantic coastal plain fields. *Soil Science Society of American Journal*, 63:1740-1747, 1999.

BLACK, C.A. *Soil fertility evaluation and control*. Lewis Publishers, Boca Raton, FL. 1993.

BORGELT, S.C.; SEARCY, S.W.; STOUT, B.A. & MULLA, D.J. *Spatially variable liming rates: a method for determination*. Transactions of the ASAE, St. Joseph, v. 37, n.5, p.1499-1507. 1994.

BROUDER, S.M. *Applying site-specific tools in soil fertility research and developing management information for variable rate technologies*. In: Presented at the 1999 Information Agriculture Conference (Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA). 1999.

BUCHLEITER, G.W. e FARAHANI, H. *Comparison of electrical conductivity measurements from two different sensing technologies*. St. Joseph: ASAE, 2002. 9 p. (Paper 021056).

BURGERSS, T.M. & WEBSTER, R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I. The semivariogram and punctual kriging. *Journal of Soil Science*, v.31, p.315-331. 1980 a.

BURGERSS, T.M. & WEBSTER, R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. II. Block kriging. *Journal of Soil Science*, v.31, p.333-341. 1980b.

BURROUGH, P. A. Sampling designs for quantifying map unit composition. In: MUSBACH, M.J. & WILDING, L.P., eds. Spatial variabilities of soil and landforms. *Soil Science Society of American Journal*, 1991. p.89-125. (SSSA Special Publication)

CAHN, M.D.; HUMMEL, J.W. & BROUER, B.H. Spatial analysis of soil fertility for site-specific crop management. *Soil Science Society of American Journal*, 58:1240-1248, 1994.

CAMPOS, S.P. *Planejamento do uso do solo através do sistema de informações geográficas IDRISI*. 1996. 124f. Dissertação... (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1996.

CAPELLI, N.L. *Agricultura de precisão – Novas tecnologias para o processo produtivo*. LIE/DMAQAG/ FEAGRI/UNICAMP, 1999. Disponível na Internet. <http://www.bases.cnptia.embrapa.br/cria/gip/gipap/capelli.doc> em 15 Out. 1999.

CERRI C C; BERNOUX M; CERRI C E P; FELLER C. Carbon cycling and sequestration opportunities in South America: the case of Brazil. *Soil Use and Management*, 20, 248–254. 2004.

CERRI, D.G.P. *Agricultura de Precisão em cana-de-açúcar: Instrumentação de uma colhedora, mapeamento da produtividade e de atributos do solo*. *Dissertação...* (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas; SP. 2005.173p.

CHANG, C.W.; LAIRD, D.A.; MAUSBACH, M.J.; HURBURGH, C.R. Near infrared reflectance spectroscopy—principal components regression analysis of soil properties. *Soil Science Society of American Journal*, 65, 480–490. 2001.

CLARK, R.L.; CHEN, F.; KISSEL, D.E.; ADKINS, W. Mapping soil hardpans with the penetrometer and electrical conductivity. INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 5., 2000, Minneapolis. *Proceedings...* Minneapolis: P.C. Robert, 2000. 1 CD-ROM.

CLAY, D.E.; CARLSON, C.G.; CHANG, J.; CLAY, S.A.; MALO, D. D. Systematic evaluation of precision farming soil sampling requirements. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4, 1998, St. Paul. *Proceedings...* Madison: American Society of Agronomy, 1999. art A, p.253-65.

CORÁ, J.E. & BERALDO, J.M.G. Spatial variability of soil properties before and after lime and phosphorus fertilizer application at variable rates in sugarcane. *Eng. Agríc.*, May/Aug. 2006, vol.26, no.2, p.374-387. ISSN 0100-6916.

DeBOER, J.L. *Economics of precision farming payoff in the future*. Purdue University, 1996. 6p.

DEBOER, J.M. A Model for Agro-Economic Analysis of Soil pH Mapping. *Precision Agriculture*, 5, p.111-129. 2004.

DOERGE, T.A. *Soil Electrical Conductivity Mapping*. Crop Insights. 9(19):1-4. 1999.

EHSANIMR, M.R. ; UPADHYAYA, S.K.; SLAUGHTER, D; SHAFII, S.; PELLETIERM. A. NIR technique for rapid determination of soil mineral nitrogen. *Precision Agriculture*, 1(2), 219-236.1999.

EMBRAPA. *Manual de métodos de análise de solos*/Centro Nacional de pesquisa de solos, 2. ed., rev. atual, Rio de Janeiro, 1997. 212p. (EMBRAPA-CNPS, Documento; 1).

ERICKSON, B. *Field Experience Validates On-The-Go Soil pH Sensor*. Purdue Top Farmer Crop Workshop Newsletter, December 2004. 4p.

FRAISSE, C. *Agricultura de Precisão: tecnologia ao alcance de todos*. Disponível em: <www.agriculturadeprecisao.com.br> Acesso em 22 de junho de 2003.

FRANZEN, D.W. & PECK, T.R. Sampling for site-specific application, In: *Site-Specific Management, for Agricultural Systems*, P. C. Robert, R. H. Rust, and W. E. Larson Eds. , ASA-CSSA-SSSA, Inc., Madison, WI, 1995, p.535-551.

FRITZ, R.M.; MAIO, D.D.; SCHUMACHER, T.E; CLAY, D.E.; CARLSON, C.G; ELLSBURY, M.M.; DALSTED, K.J. Field comparison of two

soil electrical conductivity measurement systems. INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4., 1998, St. Paul. *Proceedings...* St. Paul: P.C. Robert, 1998. 1 CD-ROM.

FYSTRO, G. The prediction of C and N content and their potential mineralization in heterogeneous soil samples using Vis-NIR spectroscopy and comparative methods. *Plant and Soil* 246, 139–149. 2002.

GONÇALVES, A.C.A. Uso da geoestatística para o manejo da água na agricultura irrigada. In: *Os (Des) caminhos do uso da água na agricultura brasileira/Org.* Eduardo Guimarães Couto, Jesus Franco Bueno, Cuiabá, MT: UFMT, SBCS, 2004. p.1-40.

GUARÇONI, M. A.; ALVAREZ, V.V.H.; NOVAIS, R.F., CANTARUTTI, R.B.; LEITE, H.G. & FREIRE, F.M. Definição da dimensão do indivíduo solo e determinação do número de amostras Simples necessário à sua representação. *R. Bras. Ci. Solo*, 30:943-954, 2006.

HARTSOCK, N.J.; MUELLER, T.G.; THOMAS, G.W.; BARNHISEL, R.I. and WELLS, K.L. *Soil electrical conductivity variability, In Proceedings of the Fifth International Conference of Precision Agriculture [CD-ROM];* ASA, CSSA, and SSSA: Madison, Wisconsin. 2000.

JACKSON, M.L. Aluminum bonding in soils: A unifying principle in soil science. *Proceedings...* Soil Science Society of America, Madison, 27(1): 1-9, 1963.

KACHANOSKI, R.G.; GREGORICH, E.G.; WESENBECK, I.J. Van. Estimating spatial variations of soil water content using noncontacting electromagnetic inductive methods. *Canadian Journal of Soil Science*, Toronto, v.68.

KRAVCHENKO, A. N.; HARRIGAN, T. M.; BAILEY, B. B. Soil electrical conductivity as a covariate to improve the efficiency of field experiments. *American Society of Agricultural Engineers*, vol. 48(4): 1353–1357. 2005. ISSN 0001–2351

KRISHNAN, P.; ALEXANDER, J.D.; BUTLER, B.J. and HUMMEL, J.W. 1980. Reflectance technique for predicting soil organic matter. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44:1282-85.

KUHAR, J.E. *The precision-farming guide for agriculturists*. Moline, 1997. 117 p.

LUND, E.D.; CHRISTY, C.D. & DRUMMOND, P.E. *Practical applications of soil electrical conductivity mapping*. 2nd European Conference on Precision Agriculture, Odense, July 1999b.

LUND, E.D.; COLIN, P.E.; CHRISTY, D. & DRUMMOND, P.E. Applying soil conductivity technology to Precision Agriculture. In: ROBERT, P. C., RUST, R. H., LARSON, W. E. (eds.) *Proceedings of the Fourth International Conference on Precision Agriculture*. ASA-CSSA-SSSA, Madison, p.1089–1100. 1999a.

LUND, E.D.; WOLCOTT, M.C.; HANSON, G.P.; GALLOWAY, J.N.; COWLING, E.B.; ERISMAN, J.W.; WISNIEWSKI, J. & JORDAN, C. Applying nitrogen site-specifically using soil electrical conductivity maps and precision agriculture technology. Optimizing nitrogen management in food and energy production and environmental protection. *Proceedings...*(2nd International Nitrogen Conference on Science and Policy), Potomac, MD, USA, 14-18 October 2001. The Scientific World. p. 767-776; 2001. Disponível in: <<http://www.thescientificworld.com>>. Acesso em: 29 de set de 2005.

MALLARINO, A.P. Spatial variability patterns of phosphorus and potassium in no-tilled for two sampling scales. *Soil Science Society of American Journal*, 60:1473-1481, 1996.

MATTOSO, M.J. & GARCIA, J.C. *Economia da Agricultura de Precisão*. Artigo apresentado, para debate, por ocasião do XVII Seminário Internacional de Economia. 2005. 10p. Disponível in: <<http://www.ufv.br/der/noticias/mattoso.pdf>>. Acesso em: 25 de março de 2006.

McBRATNEY, A.B. & WEBSTER, R. How many observations are needed for regional estimation of soil properties? *Soil Science*, Baltimore, v.135, n.3, p.177-183, 1983.

McBRIDE, R.A.; GORDON, A.M.; SHRIVE, S.C. Estimating forest soil quality from terrain measurements of apparent electrical conductivity. *Soil Science Society of American Journal*, Madison, v.54, p.290-293, 1990.

McGrath, D.E.; Ellingson, J.P. and Leedahl. A.O. 1990. *Variable appli-*

cation rates based on soil organic matter. ASAE Paper 90-1598. ASAE, St. Joseph MI.

MENGEL, D.B. Basic concepts of soil acidity and liming. In: *Proceedings of the 27th North Central Extension-Industry Soil Fertility Conference*, Vol. 13 (Potash and Phosphate Institute, Brookings, South Dakota, USA), p. 1-13. 1997.

MONTANARI, R.; JÚNIOR, J.M.; PEREIRA, G.T. & SOUZA, E.Z.M. de. Forma da paisagem como critério para otimização amostral de latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.40, n.1, p.69- 77, 2005.

MOUAZEN, A.M., De BAERDEMAEKER, J., RAMON, H., Towards development of on-the-go soil moisture content sensor using a fibre-type NIR spectrophotometer. *Soil Till. Res.* 80, 171-183. 2005.

MOUAZEN, A.M., MALEKI, M.R., De BAERDEMAEKER, J., RAMON, H., On-the-go measurement of some selected soil properties using a VIS-NIR sensor. *Soil Till. Res.* 93, 13-27. 2007.

MULLA, D. J. & McBRATNEY, A. B. Soil spatial variability. In: SUMNER, M.E., ed. *Handbook of Soil Science*. New York, CRC Press, 2000. p.321-352.

PIERCE, F.J.; WARNCKE, D.D. & EVERETT, M.W. *Yield and nutrient variability in glacial soils of Michigan*, in Site-Specific Management for Agricultural Systems, P. C. Robert, R. H. Rust, and W. E. Larson Eds., ASA-CSSA-SSSA, Inc., Madison, WI, 1995, pp. 133-151.

RAUN, W.R.; SOLIE, J.B.; JOHNSON, G.V.; STONE, M.L.; WHITNEY, R.W.; LEES, H.L.; SEMBIRING, H. & PHILLIPS, S.B. Microvariability in soil test, plant nutrient, and yield parameters in bermudagrass. *Soil Science Society of American Journal*, 62:683-690, 1998.

REEVES, J.B. III., McCARTY, G.W., and MEISENGER, J.J. Near infrared reflectance spectroscopy for the analysis of agricultural soils. *J. Near Infrared Spectrosc.* 7:179-193. 1999.

RHOADES, J.D. Salinity: electrical conductivity and total dissolved solids. In: Sparks, D. L. (Ed.) *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods.* *Soil Society of America*, Madison, pp. 417-435. 1996. (Soil Sci.

Am. Book Ser. No. 5.).

SADLER, J.E.; BUSSCHER, W.J.; BAVER, P.J. & KARLEN, D.L. Spatial scale requirements for precision farming: A case study in the South Eastern USA. *Agron. J.* 90:191- 197, 1998.

SHEPHERD, K.D. and WALSH, M.G. 'Development of reflectance spectral libraries for characterization of soil properties', *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66, 988–998. 2002.

SHONK, J. L.; GAULTNEY, L. D.; SCHULZE, D. G. and VAN SCOYOC, G.E. Spectroscopic sensing of soil organic matter content. *Trans ASAE.* 34:1978–1984. 1991.

SOUSSANA, J.F.; LOISEAU, P.; VUICHARD, N.; CESCHIA, E.; BALESDENT, J.; CHEVALLIER, T.; ARROUAYS, D. Carbon cycling and sequestration opportunities in temperate grasslands. *Soil Use and Management*, 20, 219–230. 2004.

SUDDUTH, K.A.; KITCHEN, N.R.; DRUMMOND, S.T. Soil conductivity sensing on claypan soils: comparison of electromagnetic induction and direct methods. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4., 1998, Minneapolis. *Proceedings...* Minneapolis: Ed. P.C. Robert, 1998. p.979-90.

SUDDUTH, K.A., HUMMEL, J.W. Portable near infrared spectrophotometer for rapid soil analysis. *Trans. ASAE* 36 (1), 187–195. 1993a.

SUDDUTH, K.A., HUMMEL, J.W., Soil organic matter, CEC, and moisture sensing with a portable NIR spectrophotometer *Trans. ASAE* 36 (6), 1571–1582. 1993b.

TOMÉ Jr., J.B. *Manual para interpretação de análise de solo*. Guaíba-RS: Agropecuária, 1997. 247p.

TRANGMAR, B.B.; YOST, R.S. & UEHARA, G.A. Application of geostatistics to spacial studies of soil studies of soil propertis. *Advences in Agronomy*, Academic Press, 38:45-94, 1985.

ULRICH, B. and SUMNER, M.E. (ed.). *Soil acidity*. Springer-Verlag, New York, NY. 1991.

VELOSO, C.A.C.; BORGES, A.L.; MUNIS, A.S. e VEIGAS, I.A. de J.M. efeito de diferentes materiais no pH do solo. *Scientia Agrícola*, Piracicaba-SP, 49(1): 123-128. 1992.

VÉRIS TECHNOLOGIES. *Veris Mobile Sensor Platform features the Soil pH Manager*: 601 N. Broadway Salina KS 67401. 2p. 2005. Disponível em in: <www.veristech.com> Acesso em: 30 de Mai. de 2005.

VIEIRA, S.R. Automação de Amostragem: Novas Tecnologias e Equipamentos para Avaliação Física. In: XXIX Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. Julho de 2003. Ribeirão Preto-SP. *Anais...* CD-ROM: cbcsp007.pdf.

VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: *Tópicos em ciências do solo*. Publicação da Sociedade Brasileira de Ciências do solo, v.1/Editor: Freitas, José Roberto de, Viçosa, 2000. p.1-54. ISSN 1519-3934.

VISCARRA ROSSEL, R.A.; WALVOORT, D.J.J.; MCBRATNEY, A.B.; JANIK, L.J.; SKJEMSTAD, J.O. Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. *Geoderma* 131, 59–75. 2006.

VOLKWEISS, S.J. e LUDWICK, A.E. *O melhoramento do solo pela calagem*. Porto Alegre: UFRGS, 1976. 30p (Boletim Técnico, 1).

WHITE, J.G. e ZASOSKI, R.J. Mapping soil micronutrients. *Field Crops Research*, Amsterdam, v.60, p.11-26, 1999.

WIEDA, B. & BORGELT, S. T. *Geostatistical analysis of plant nutrients from sample nested grids*. St Joseph, ASAE Paper MCR93 131, 14p. 1993.

WOLLENHAUPT, N.C.; WOLKOWSKI, R.P. & CLAYTON, M.K. "Mapping soil test phosphorus and potassium for variable-rate fertilizer application," *J. Prod. Agric.* vol.7, pp.441-448. 1994.

WORNER, CR. *Design and construction of a portable spectrophotometer for realtime analysis of soil reflectance properties*. M.S. thesis. University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana IL. 1989.