



Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Centro Nacional de Pesquisa de Solos
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

ISSN 1678-0884

Novembro, 2003

Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 18

Técnicas de Agricultura de Precisão no Diagnóstico de uma Cultura de Soja sob Plantio Direto em Carambeí, PR

Pedro Luiz O. de A. Machado
Carlos Alberto Silva
Alberto C. de Campos Bernardi
Ciríaca A. F. de Santana do Carmo
Luiz Ivan O. Valencia
Margareth S. Meirelles
José P. Molin
Volnei Pauletti
Leandro M. Gimenez

Rio de Janeiro, RJ
2003

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Solos

Rua Jardim Botânico, 1024 Jardim Botânico. Rio de Janeiro, RJ

Fone: (21) 2274.4999

Fax: (21) 2274.5291

Home page: www.cnps.embrapa.br

E-mail (sac): sac@embrapa.br

Supervisor editorial: *Jacqueline Silva Rezende Mattos*

Revisor de texto: *André Luiz da Silva Lopes*

Normalização bibliográfica: *Cláudia Regina Delaia*

Tratamento de ilustrações: *Rafael Simões Bodas Fernandes*

Edição eletrônica: *Rafael Simões Bodas Fernandes*

1ª edição

1ª impressão (2003): 300 exemplares

Todos os direitos reservados.

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

Técnicas de agricultura de precisão no diagnóstico de uma cultura de soja sob plantio direto em Carambeí, PR / Pedro Luiz Oliveira de Almeida Machado... [et al.]. - Rio de Janeiro : Embrapa Solos, 2003.
1 cd rom - (Embrapa Solos. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento; n. 18)

ISSN 1678-0884

1. Agricultura de Precisão. 2. Agricultura de Precisão – Soja. 3. Agricultura de Precisão – Brasil – Paraná – Carambeí. I. Machado, Pedro Luiz Oliveira de Almeida. II. Silva, Carlos Alberto. III. Bernardi, Alberto Carlos de Campos. IV. Carmo, Ciriaca Arcângela Ferreira de Santana do. V. Valencia, Luiz Ivan O. VI. Meirelles, Margareth Simões. VII. Molin, José P. VIII. Pauletti, Volnei. IX. Gimenez, Leandro M. X. Embrapa Solos (Rio de Janeiro). XI. Série.

CDD (21.ed.) 631.4

© Embrapa 2003

Sumário

Resumo	5
Abstract	7
Introdução	9
Definição de Agricultura de Precisão	9
Zonas de Manejo	10
Impacto da Agricultura de Precisão	10
Variabilidade Espacial e Temporal	11
Caracterização da Área de Estudo	13
Malha de Amostragem e Avaliações Realizadas	15
Resultados	16
Espacialização de Diagnose Foliar e Teores no Solo	16
Mapas das Recomendações de Adubação	23
Divisão em Zonas de Manejo	24
Conclusões	25
Referências Bibliográficas	27

Técnicas de Agricultura de Precisão no Diagnóstico de uma Cultura de Soja sob Plantio Direto em Carambeí, PR

Pedro Luiz O. de A. Machado¹

Carlos Alberto Silva²

Alberto C. de Campos Bernardi¹

Ciríaca A. F. de Santana do Carmo¹

Luiz Ivan O. Valencia³

Margareth S. Meirelles¹

José P. Molin⁴

Volnei Pauletti⁵

Leandro M. Gimenez⁵

Resumo

Áreas agrícolas bastante extensas são gerenciadas de forma homogênea e recebem adubação de uma única dose. O conceito da aplicação de fertilizantes a taxas variáveis tem sido considerado no Brasil devido a preocupações com a qualidade ambiental e margens estreitas de lucratividade do empreendimento rural. Além disto, pouco se sabe sobre a variabilidade espacial da concentração de nutrientes nas plantas, especialmente num sistema de plantio direto de grãos. As concentrações de nutrientes nas plantas refletem suas reais disponibilidades no solo. Os objetivos deste estudo foram avaliar espacialmente algumas propriedades químicas (pH, Ca, Mg, K, saturação de bases, P e carbono orgânico) de um solo sob sistema de plantio direto a três profundidades (0-5, 5-10 e 10-20cm), visando estimar a necessidade de calagem para a soja e a aplicação a taxa variável

¹ Pesquisador Embrapa Solos, R. Jardim Botânico, 1024. CEP: 22460-000, Rio de Janeiro, RJ. E-mail: pedro@cnps.embrapa.br, alberto@cnps.embrapa.br, ciriaca@cnps.embrapa.br, maggie@cnps.embrapa.br

² Dep. de Ciência do Solo – UFLA, Lavras, MG. E-mail: csilva@ufla.br

³ Instituto de Geociências – UFRJ, Rio de Janeiro, RJ. E-mail: liov@acd.ufrj.br

⁴ Dep. Eng. Rural – ESALQ/USP, Piracicaba, SP. E-mail: jpmolin@carpa.ciagri.usp.br

⁵ Fundação ABC, Castro, PR. E-mail: vpauletti@fundacaoabc.org.br, mecaniza@fundacaoabc.org.br

de fertilizante fosfatado e potássico. Além disto, foram amostradas duas épocas de soja para avaliar a variabilidade espacial da concentração de nutrientes na soja e para identificar as limitações nutricionais para a produtividade da soja. A área se localizava na Fazenda Tabatinga, Carambeí, Estado do Paraná, e o tipo de solo era um Latossolo Vermelho. Amostras georreferenciadas de solo e folha foram coletadas numa área 13 hectares por meio de uma grade maior de 40 por 40m e grades menores de 20m x 20m; 10m x 10m; e 5m x 5m. Métodos geoestatísticos e krigagem foram adotados para as estimativas. Os alcances indicaram que um gride de 20m x 20m era apropriado para identificar a variabilidade espacial dos nutrientes na planta. Assim, na segunda época uma área de 6 hectares foi amostrada por meio de grade de 20 x 20m. Concentrações de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn, Mo e Zn foram determinadas nos tecidos vegetais da soja. Foram adotados dois procedimentos de avaliação do estado nutricional: nível de suficiência (NS) e sistema de diagnose e recomendação integradas (DRIS). A produtividade da soja foi monitorada na colheita. Ambos os métodos de avaliação do estado nutricional foram complementares em demonstrar que K e P foram os nutrientes que mais limitaram a produtividade da soja. Exceto para teores de potássio e carbono orgânico do solo, os variogramas dos dados apresentaram que a estrutura espacial das propriedades do solo avaliadas foram caracterizadas pelo modelo esférico em todas as profundidades. De modo geral, os variogramas apresentavam um patamar e o efeito pepita foi pequeno. Os mapas com as estimativas krigadas para pH, Ca, Mg e saturação de bases (V%) mostram três manchas com variação de igual intensidade. Com base na variabilidade espacial dos parâmetros de acidez do solo, a quantidade de calcário a ser aplicada variou de 0,5 a 5,8t ha⁻¹ e a calagem poderia ser exequível em duas zonas de manejo recebendo de 1,5 a 3,0t ha⁻¹ e 3,0 a 4,5t ha⁻¹. O mapa das estimativas krigadas da necessidade de fósforo também demonstra duas zonas de manejo distintas. Uma área poderia receber 40-60kg ha⁻¹ e outra poderia receber 80kg ha⁻¹. O mapa da estimativa krigada da necessidade de potássio, todavia, não está em harmonia com o mapa da estimativa krigada dos teores de potássio.

Palavras chaves: propriedade química, solo tropical, variação espacial, plantio direto, variabilidade espacial da soja, análise de planta, nível de suficiência e DRIS.

Precision Agriculture Techniques in the Evaluation of a Soybean Crop under No-tillage in Carambeí, State of Paraná

Abstract

Agricultural fields are managed as homogeneous areas and are fertilized with a single rate. The concept of varying fertilizer rates has been raised in Brazil due to concerns about environmental quality and narrow profits margins. Also, little is known about the spatial variability of the plant nutrient concentration, specially in a no-tillage system. The nutrient concentrations in plants reflect its real availability in the soil. The objectives of this study were to spatially evaluate selected soil chemical properties (pH, Ca, Mg, K, base saturation, P and organic carbon) of a single field under no-tillage system at three depths (0-5, 5-10 and 10-20cm), in the context of soybean liming requirements and variable-rate fertilizer (P_2O_5 and K_2O) application for phosphorus and potassium. Additionally, two growing seasons of soybean were sampled to evaluate the spatial variability of plant nutrient concentrations and to identify the constraints to soybean yield. The field was located in Carambeí, southern Brazil and the soil type was a Rhodic Ferralsol. Georeferenced soil and leaf samples were collected in a 13-ha area in a grid of 40 by 40m, and sub-sampled in grids of 20m by 20m; 10m by 10m; and 5m by 5m. Geostatistical methods and kriging were applied to the estimates. The ranges indicated that a grid of 20 by 20m was appropriate to indicate spatial variability of plant nutrients. At the second growing season a 6-ha area was sampled with a grid of 20 by 20m. Concentrations of N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn, Mo and Zn were determined in soybean leaves. Two approaches of nutritional status evaluation were used and discussed: sufficient ranges (SR) and the Diagnosis and Recommendation Integrated System (DRIS). Grain yield was evaluated at the

harvest time. Both nutritional status methods (DRIS and SR) were complementary on showing that K and P were the most limiting nutrients to soybean yield. Apart from soil K and soil organic carbon, the sample variograms of the data show that the spatial structure of the soil properties evaluated are characterized by the spherical model at all depths. In general, the variograms were bounded and the nugget effect variances were small. The maps of the kriged estimates for soil pH, Ca, Mg, and base saturation (%V) show three patches with common variation. The amount of lime to be applied based on the spatial variability of the soil acidity parameters ranged between 0.5 and 5.8t ha⁻¹ and liming at variable rates would be feasible in two management zones receiving 1.5 to 3.0t ha⁻¹ and 3.0 to 4.5t ha⁻¹. The map of estimated P fertilizer requirement shows two distinct zones. The rate of 40-60kg P₂O₅ ha⁻¹ could be applied to one zone and the other could receive 80kg P₂O₅ ha⁻¹. The map of K-fertilizer requirement, however, did not match with the map of the estimated soil K.

Keywords: soil, chemical property, spatial variation, tropical soil, no-tillage, soybean spatial variability, plant analysis, sufficient range, DRIS.

Introdução

A busca por novas tecnologias que possibilitem aumento de produtividade com o menor impacto sobre o meio ambiente tem, como um dos principais exemplos, a adoção do sistema de plantio direto. Mais recentemente, em Carambeí na região de Campos Gerais, este conceito foi reforçado pela possibilidade de utilização das técnicas de agricultura de precisão pelos agricultores. No entanto, como toda nova tecnologia, existem ainda vários entraves a serem superados.

Definição de Agricultura de Precisão

Segundo Pierce & Novak (1999), a agricultura de precisão é a aplicação de tecnologias e princípios para manejar a variabilidade espaço-temporal associada a diferentes aspectos da produção agropecuária com o propósito de melhorar o desempenho da cultura ou do animal paralelamente à qualidade ambiental. Os mesmos autores enfatizam que o sucesso em agricultura de precisão está diretamente relacionado com quão bem ela vem sendo utilizada para identificar, gerenciar e avaliar o contínuo espaço-temporal na produção agropecuária. Fazendo uma breve abordagem na História da Civilização, os sistemas de produção agrícola se beneficiaram da incorporação dos avanços tecnológicos originalmente desenvolvidos por outras indústrias. A era industrial trouxe a mecanização e os fertilizantes sintéticos para a agricultura. A era tecnológica ofereceu a engenharia genética e a automação. Finalmente, a era da informação nos traz o potencial para a integração dos avanços tecnológicos na agricultura de precisão (Whelan *et al.*, 2003). Importante mencionar que a abordagem envolvida na agricultura de precisão não é novidade. Há registros de mapas de colheita de trigo e aveia realizados em Rothamsted, Grã-Bretanha, em 1924 (Johnston *et al.*, 1998) e de mapa da variabilidade de pH do solo no Estado de Illinois, EUA, em 1929 (Stombaugh & Shearer, 2000). Entretanto, com o aumento da área de produção e intensificação do sistema de produção (ex. rotação de culturas, controle fitossanitário e adubação diferenciada para cada cultura) tornou-se muito mais difícil considerar a variabilidade numa gleba sem um desenvolvimento revolucionário nas tecnologias (Stafford, 2000).

Zonas de Manejo

Zona de manejo é definida como uma parte de uma gleba que expressa um arranjo homogêneo dos fatores limitantes da produção pelos quais uma determinada taxa de um insumo específico é apropriado (Doerge, 2000). Destarte, as zonas de manejo numa gleba podem ser diferentes para diferentes insumos e a delimitação das zonas de manejo para um determinado insumo envolve apenas os fatores que influem diretamente a eficiência daquele insumo em atingir seu objetivo (Zhang *et al.*, 2002). Trata-se de uma estratégia de ação intermediária entre o procedimento convencional altamente generalizado, que divide glebas numa propriedade embasado nas recomendações de amostragem do solo usuais (ex. topografia, vegetação e manejo) e o procedimento de diagnóstico e remediação em tempo real na lavoura, que ainda carece de maiores estudos, desenvolvimento de equipamentos e avaliação de custos. O estabelecimento das zonas de manejo considera os procedimentos convencionais incorporando informações obtidas pelo mapa de colheita, amostragem em grade de solo e, se possível, de planta e conhecimento do produtor. Abaixo estão listadas algumas características locais que devem auxiliar no estabelecimento das zonas de manejo segundo Doerge (2000):

- Característica quantitativa estável: topografia, carbono orgânico do solo, pH, mapas de levantamento de solos de alta intensidade (escala 1:2.000 ou, no máximo, 1:5.000) e propriedades hidrológicas;
- Característica quantitativa dinâmica: mapa de colheita, distribuição e intensidade de infestação de plantas daninhas e aparência da cultura;
- Característica qualitativa estável: cor do solo, teor de nutriente pouco móvel no solo (ex. fósforo), padrões de infestação de pragas e doenças, profundidade do solo e aspecto da drenagem do solo;
- Característica intuitiva ou histórica: conhecimento do produtor, histórico de manejo na área, culturas passadas e rotações de culturas.

Impacto da Agricultura de Precisão

Zhang *et al.* (2002) descrevem duas áreas onde se espera que a agricultura de precisão terá impacto:

- Lucratividade: a agricultura de precisão permite intenso acompanhamento e sintonia do sistema de produção agrícola. Os produtores podem fazer análises econômicas baseadas na variabilidade da produtividade da cultura

numa gleba para obter uma estimativa precisa do risco envolvido. No exemplo oferecido por Zhang *et al.* (2002), um produtor poderia verificar que, em 70% das vezes, 75% da cevada cultivada na gleba resultaria numa produtividade de 3.8 toneladas por hectare. Sabendo dos custos de insumos envolvidos na produção, os produtores podem calcular também o retorno monetário sobre os custos para cada hectare. Todavia, como exposto por Lowenberg-DeBoer (2000), a análise econômica da agricultura de precisão tem sido problemática por ser uma tecnologia de informação. Embora a agricultura de precisão envolva tecnologia mecânica, o manejo sítio-específico é mais precisamente considerado como um sistema de manejo da informação (SMI). Análises usuais de custo-benefício e investimento dificilmente captam todo o impacto de um investimento em tecnologia da informação, tal como se observa em agricultura de precisão, pois a lucratividade de um SMI aperfeiçoado e intensamente utilizado provém de uma tomada de decisão gerencial aperfeiçoada em todo o sistema de produção e não apenas a partir de melhorias em eficiências facilmente observáveis num ponto específico da propriedade rural (Olson, 2002).

- Meio ambiente: rígidas leis ambientais já estão em vigor na Dinamarca, Alemanha, Austrália, Grã-Bretanha e EUA. Estas leis vêm obrigando agricultores a reduzir significativamente o uso de agroquímicos (ex. adubos nitrogenados). Como a agricultura de precisão pode oferecer meios para a aplicação mais criteriosa e objetiva, registrando todos os tratamentos no campo em escalas métricas, pode-se assim auxiliar na implementação destas leis. Entretanto, muito ainda precisa ser feito para se medir sistematicamente e quantitativamente os benefícios ambientais da agricultura de precisão.

Variabilidade Espacial e Temporal

Zhang *et al.* (2002) elencam os seis fatores de variabilidade que afetam a produção agrícola:

- Variabilidade da produção: distribuição histórica e atual da produtividade.
- Variabilidade do campo: altitude, declive, aspecto da paisagem, terraço, proximidade à bordadura e a rios e lagos.
- Variabilidade do solo: fertilidade do solo (N, P, K, Ca, Mg, C, Fe, Mn, Zn e Cu), fertilidade do solo resultante da aplicação de adubos orgânicos (ex. adubo verde, esterco etc.), propriedades físicas do solo (textura, densidade,

teor de umidade e condutividade elétrica), propriedades químicas (pH, carbono orgânico, CTC) e profundidade do solo.

- Variabilidade da cultura: densidade de plantio, altura da planta, estresse nutricional, estresse hídrico, propriedades biofísicas da planta (ex. índice de área foliar e biomassa), conteúdo de clorofila na folha e qualidade do grão.
- Variabilidade em fatores anômalos: infestação de plantas daninhas, ataque de pragas, presença de nematóides, geadas e granizo.
- Variabilidade no manejo: taxa de semeadura, rotação de culturas, aplicação de fertilizantes e pesticidas.

Segundo Zhang *et al.* (2002), a variável mais estudada atualmente é o nível de nitrogênio no solo.

A análise quantitativa do solo usando a Geoestatística tem sido o método mais comumente utilizado para determinar a distribuição espacial da disponibilidade de nutrientes para as plantas na lavoura (McBratney & Pringle, 1999; Mulla & McBratney, 2000), pois fornece informação indireta sobre a disponibilidade deles no solo. Já a análise de tecidos vegetais é uma medida direta, pois os resultados correspondem à quantidade de nutriente absorvida pelas plantas (Munson & Nelson, 1990). Desta forma, o teor de nutrientes nos tecidos vegetais reflete sua real disponibilidade no solo. Dentre as ferramentas disponíveis para a avaliação do estado nutricional das culturas, as faixas de suficiência têm sido amplamente utilizadas. Para a cultura da soja na região Sul do Brasil, as faixas de teores foram estabelecidas por Sfredo *et al.* (1986). Outro método de avaliação é o DRIS (Sistema Integrado de Diagnose e Recomendação), que tem se revelado bastante promissor na identificação dos fatores nutricionais limitantes da produtividade. Este método se baseia no estabelecimento de relações de equilíbrio entre pares de nutrientes e na comparação dessas relações com aquelas consideradas adequadas, ou seja, população de alta produtividade. Este método assume que para se obter altos rendimentos, deve-se manter um equilíbrio dos nutrientes (Walworth & Sumner, 1987).

Para a estimativa espacial ótima dos atributos do solo e planta, é necessário desenvolver estratégias de amostragem eficientes baseadas na geoestatística. McBratney & Pringle (1999) mostraram que a geoestatística foi essencial para descrever e quantificar a variabilidade espacial de fatores limitantes da alta

produtividade. Apesar de já haver alguns estudos mostrando a variabilidade espacial dos atributos de solo, ainda existem poucos resultados sobre esta variabilidade para a diagnose foliar, especialmente no sistema de plantio direto. Os estudos de Franzen & Peck (1995a, 1995b, 1997) relacionaram os teores de Ca, Mg, P e K em folhas de milho com os teores no solo. Os autores concluíram que a análise de plantas foi útil no mapeamento de áreas nas quais a análise de solo não foi eficaz para explicar a resposta das plantas à aplicação de nutrientes. As sub-regiões de uma área podem ser delimitadas através de uma combinação de fatores limitantes relativamente constantes e homogêneas. O estabelecimento de zonas de manejo requer o conhecimento da variabilidade espacial dos fatores que interferem na produção da cultura (Doerge, 2000).

Através do alcance do semivariograma a geoestatística pode contribuir para o estabelecimento da malha de amostragem. O alcance é um dos parâmetros do modelo de semivariograma e indica a distância até onde o atributo apresenta continuidade espacial. Ele depende da direção e da escala espacial da área de estudo. De fato, a extensão da célula de amostragem de atributos de solo é definida, de acordo com Mulla & McBratney (2000), como sendo 0,25 a 0,5 do valor de alcance do atributo sob análise.

A proposta deste estudo foi agrupar as principais informações obtidas até o presente momento numa lavoura de soja de alta produção sob plantio direto em Carambeí, região de Campos Gerais, na qual foram realizadas uma sugestão de recomendação espacializada de adubação e calagem e uma proposta de estabelecimento de zona de manejo, utilizando-se as técnicas de Agricultura de Precisão, o estabelecimento do número de pontos de amostragem, a avaliação da fertilidade do solo e estado nutricional das plantas.

Caracterização da Área de Estudo

A área de estudo localiza-se na Fazenda Tabatinga, na região de Campos Gerais, no município de Carambeí, Paraná (24°51'45" S e 50°15'58" W 615 a 870 m de altitude). O clima é subtropical com média de 1.560 mm anuais de chuva e temperatura anual média de 17,6°C.

O tipo de solo predominante na área experimental, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 1999), é o Latossolo Vermelho distroférico, com teores de argila variando de 180 a 720g kg⁻¹. Na Figura 1 é apresentada uma foto da área de estudo.

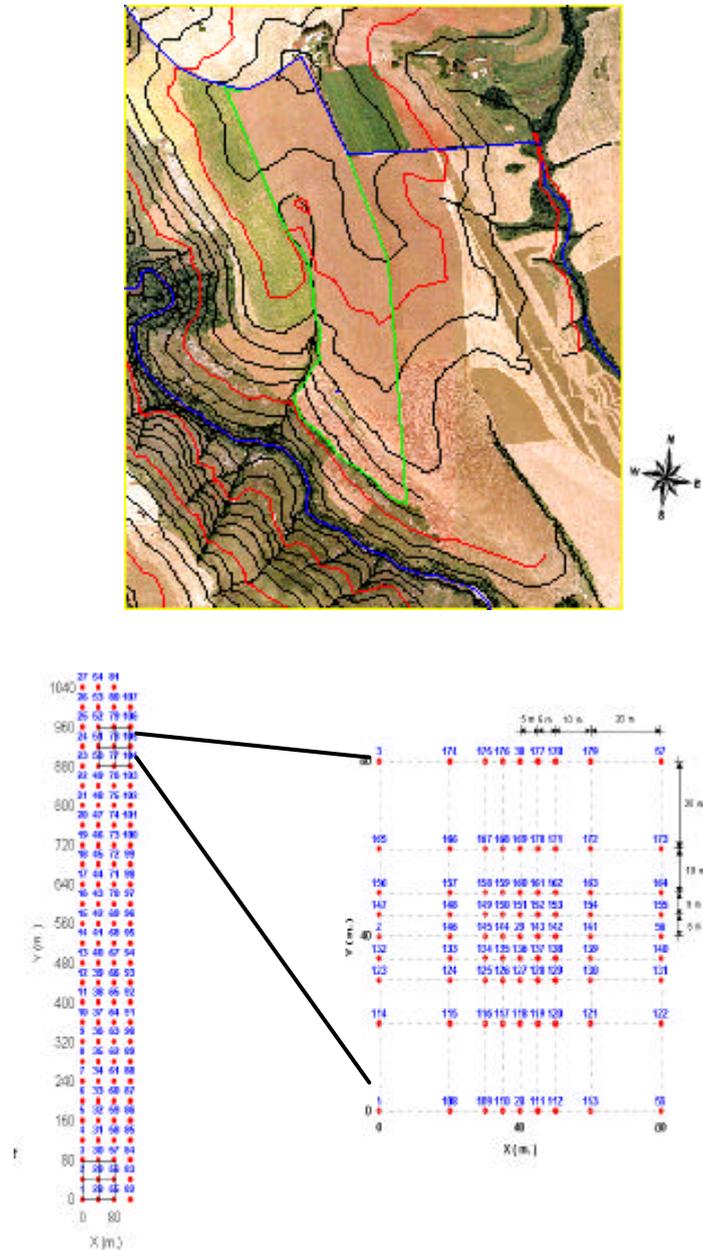


Fig. 1. Ortofotografia da área de estudo (destacada em verde) e esquema das malhas de amostragens adotadas.

O sistema de plantio direto vem sendo adotado nesta área desde 1988 e o esquema de cultivo adotado é soja no verão por 2 safras consecutivas, em rotação com trigo e aveia preta no inverno. Após as 2 safras de soja, cultiva-se o milho no verão. Por ocasião do plantio no ano de avaliação, foram utilizadas as doses de 62,5kg ha de K_2O , e 62,5kg ha de P_2O_5 (250kg ha da formulação NPK 0-25-25). As sementes de soja foram inoculadas com *Bradyrhizobium* spp. Foi feita também, na fase anterior à floração da cultura, pulverizações foliares com sulfato de manganês.

Malha de Amostragem e Avaliações Realizadas

As amostragens de solo e folhas foram realizadas no verão de 2000 (janeiro), início do florescimento da soja. A malha de amostragem foi composta de uma grade maior com células de 40 x 40m, num total de 107 pontos de amostragem cobrindo 13ha. Observou-se duas áreas com diferenciação textural e nestas estabeleceu-se 2 novas malhas de amostragem mais densas, com subdivisões de 20 X 20m ; 10 X 10m e; 5 X 5m, perfazendo, assim, um total de 72 amostras cada. O esquema das malhas de amostragem adotado está apresentadas na Figura 1. As coordenadas geográficas dos pontos amostrados foram obtidas através do uso de aparelho GPS Trimble® Geoplotter 3C com precisão de cerca de 2 metros. As amostras de solo foram coletadas em três profundidades: 0-5, 5-10 e 10-20cm abrindo-se trincheiras em cada ponto de amostragem. Após coleta, as amostras de solo foram secas ao ar, peneiradas (malha de 2mm) e analisadas de acordo com Silva *et al.* (1998), para a determinação do pH em água, teores trocáveis de K, Ca, Mg, e Al; teores disponíveis de P (em Mehlich-1 e resina), Cu, Fe, Mn e Zn (em DTPA), sulfato, carbono orgânico e argila. Indiretamente, foram calculados, através do uso dos atributos químicos anteriores, a saturação por bases e a capacidade de troca de cátions (CTC) a pH 7,0. Para a diagnose foliar, foram amostradas as folhas mais novas, totalmente expandidas, quando mais de 50% das plantas estavam no florescimento. Foram coletadas folhas de 30 plantas em volta de cada ponto de amostragem. Analisou-se N, P, K, Ca, Mg, S, e os micronutrientes B, Cu, Fe, Mn, Mo e Zn de acordo com a metodologia de Silva (1999). A avaliação da produtividade da soja para posterior elaboração de mapa de colheita foi realizada com uma colheitadeira equipada com Sistema Massey Ferguson Fieldstar. A avaliação do estado nutricional da soja foi realizada através do método DRIS, e o cálculo dos índices DRIS para os nutrientes avaliados segundo procedimento de Jones (1981).

A análise geostatística consistiu da construção de semivariogramas experimentais nas direções X e Y e o ajuste de modelos de continuidade espacial gaussiana, esférica e exponencial. Os dados foram analisados utilizando-se métodos geostatísticos do programa GSLIB (Deutsch & Journel, 1992). Os atributos de solo e planta foram estimados por krigagem ordinária em blocos de 10 x 10m e os mapas de isolinhas foram feitos utilizando-se o programa Surfer 6.1 para Windows (Golden Software Co., EUA) (Figuras 2, 3 e 4).

Resultados

Espacialização da Diagnose Foliar e Teores no Solo

Na Tabela 1 são apresentados os resultados relativos à média, intervalo e coeficiente de variação dos atributos do solo para as três profundidades amostradas. Observa-se que a camada superficial de 0-5cm é a que apresenta a maior fertilidade. Esses resultados mostram uma forte e esperada estratificação vertical, devido à adoção do sistema de plantio direto na área por vários anos. Os motivos destes gradientes verticais de fertilidade são a aplicação a lanço de fertilizantes e de calcário, e a manutenção dos restos culturais na superfície do solo (Wiethölter, 2000). Somente para os valores dos coeficientes de variação (CV) de cálcio, potássio, fósforo (Mehlich), manganês e cobre há um aumento com o aumento da profundidade de solo. Nas Figuras 2 e 3 são apresentados os mapas das estimativas *krigadas* para os teores de P e K no solo, capacidade de troca catiônica (CTC) e saturação por bases (V%) nas 3 profundidades amostradas.

As médias, intervalos e coeficiente de variação dos nutrientes analisados nas folhas de soja estão na Tabela 2. Com base nas faixas de suficiência proposta por Sfredo *et al.* (1986), observou-se que para os nutrientes K e S, 73 e 72% dos pontos de observação estavam abaixo da faixa de suficiência, entre 17 e 25g kg⁻¹ e 2,1 e 4,0g kg⁻¹, respectivamente. Para os nutrientes Mg e Zn, mais de 80% dos pontos de observação também estavam abaixo das faixas de suficiência de 2,6 a 10,0g kg⁻¹ e 21 a 50mg kg⁻¹. Já para o nutriente P, os teores foliares indicavam que 79% estavam dentro da faixa de suficiência de 2,6 a 5,0g kg⁻¹. A Figura 4 ilustra os mapas das estimativas *krigadas* para os teores dos nutrientes N, P e K nas folhas de soja.

Tabela 1. Média, intervalo e coeficiente de variação (CV) dos atributos de solo avaliados em três profundidades de solo cultivado com soja de plantio direto.

Atributo	Média			Intervalo ¹			CV ²		
	Profundidade (cm)								
	0-5	5-10	10-20	0-5	5-10	10-20	0-5	5-10	10-20
pH água	5,8	5,4	5,3	5,0-6,7	4,7-6,4	4,6-6,7	6	6	7
C org (g kg ⁻¹)	28,2	22,4	20,2	11,9-38,2	7,9-27,9	7,9-27,9	24	22	20
Argila (g kg ⁻¹)	489	516	555	180-700	160-700	180-720	31	28	26
CTC pH7 (cmol _c dm ⁻³)	14,0	12,5	11,0	7,9-17,5	6,8-16,3	5,8-15,4	17	18	21
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	5,0	3,3	2,5	2,4-7,0	1,5-5,8	0,8-5,5	18	25	39
Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	3,1	1,8	1,4	1,3-5,0	0,6-3,9	0,5-3,6	23	32	-
K ⁺ (mg dm ⁻³)	160	87	66	8-468	12-390	20-390	42	57	60
Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,0	0,1	0,2	0,0-0,2	0,0-0,9	0,0-1,4	442	138	-
V (%)	61	44	38	31-89	20-78	13-80	16	24	-
P resina (mg dm ⁻³)	125	58	24	8-418	8-262	5-143	71	69	70
P Mehlich-1 (mg dm ⁻³)	28	15	7	6-99	1-60	1-38	59	65	79
S-SO ₄ ²⁻ (mg dm ⁻³)	1,1	0,9	1,2	0,0-8,8	0,0-8,4	0,0-4,1	92	85	63
Fe ²⁺ (mg dm ⁻³)	30	30	27	12-66	12-66	12-42	30	38	22
Mn ²⁺ (mg dm ⁻³)	5,9	3,1	1,9	2,6-12,1	0,9-6,5	0,4-6,2	23	33	41
Cu ²⁺ (mg dm ⁻³)	1,9	2,1	2,4	0,5-7,9	0,4-7,3	0,1-7,6	65	53	126
Zn ²⁺ (mg dm ⁻³)	1,8	1,2	0,8	0,6-8,7	0,1-10,8	0,1-10,1	65	109	33

Fonte: Silva *et al.* (2002).

¹ O intervalo apresentado refere-se aos valores mínimo e máximo de cada atributo.

² Parâmetro calculado a partir da divisão do desvio padrão pela média e multiplicação desse fator por 100.

Tabela 2. Média, intervalo, coeficiente de variação (CV) e alcance dos semivariogramas dos teores de nutrientes nas folhas de soja cultivada sob plantio direto.

Atributo	Média	Intervalo	CV %	Alcance (m)	
	g kg ⁻¹			Direção X	Direção Y
N				60	20
P	2,7	1,91 - 3,93	15	60	60
K	17,9	7,3 - 30,9	30	60	60
Ca	7,1	5,0 - 11,0	16	60	30
Mg	2,5	2,0 - 4,0	14	80	80
S	2,0	1,4 - 2,9	16	80	30
	mg kg⁻¹				
B	33,0	3,2 - 50,8	14	70	25
Cu	6,5	4,2 - 10,7	21	80	35
Fe	70,8	47,5 - 154,0	24	60	60
Mn	31,5	19,9 - 55,9	19	50	20
Zn	20,1	12,9 - 36,3	27	80	35
Alcance médio (m)				67	43

Fonte: Bernardi *et al.* (2002)

Tabela 3: Alcance dos semivariogramas calculados para atributos de Latossolo Vermelho Escuro cultivado com soja sob plantio direto.

Atributo	Alcance (m)					
	0-5 cm		5-10 cm		10-20 cm	
	Direção x*	Direção y	Direção x	Direção y	Direção x	Direção y
Argila	85	85	70	45	55	55
C org	80	80	75	75	80	80
CTC pH 7,0	75	55	60	60	80	65
PH água	80	80	80	80	10	60
V (%)	55	55	10	60	10	55
Ca²⁺	60	60	10	60	**	-
Mg²⁺	60	60	40	40	-	-
K⁺	70	70	50	50	40	40
P Mehlich-1	50	50	-	-	20	20
P resina	75	30	25	25	35	35
S-SO₄²⁻	60	60	70	15	40	40
Cu DTPA	60	20	75	75	80	80
Fe DTPA	65	20	65	25	38	38
Mn DTPA	50	20	40	40	-	-
Zn DTPA	-	-	-	-	-	-
Alcance médio(m)	64,3	50,3	48,2	52,1	44,4	41,2

Fonte: Silva *et al.* (2002) e Machado *et al.* (2002).

* Direções especificadas no diagrama de amostragem de solo apresentado na Figura 1.

** A ausência de alcance implica em falta de estrutura de variabilidade do atributo de solo analisado em uma dada profundidade de solo, ou seja, em efeito pepita puro.

A interpretação dos índices DRIS propõe que índices próximos a zero indicam que há equilíbrio nutricional. Índices menores e maiores que este valor indicam deficiência e excesso, respectivamente. A Figura 5 mostra os mapas das estimativas *krigadas* para os índices DRIS dos nutrientes P, K, S e Zn. De acordo com esta metodologia, a ordem decrescente dos nutrientes mais limitantes para a alta produtividade da cultura da soja foram: $K > P > S > Zn > Ca = Mg$. Observa-se que houve uma concordância com os índices DRIS e as faixas de suficiência estabelecidas por *Sfredo et al.* (1986) para a cultura da soja. Os métodos de interpretação dos teores foliares das faixas de suficiência e do DRIS são 2 abordagens diferentes e os resultados mostraram que se utilizadas em conjunto podem aumentar bastante a precisão do diagnóstico.

Nas Tabelas 2 e 3 são apresentados os valores relativos ao alcance dos semivariogramas para atributos da diagnose foliar e de fertilidade do solo,

respectivamente. Os valores médios para as direções X e Y foram, respectivamente, 52 e 48m para as 3 profundidades de solo, e 67 a 43m para planta. De acordo com a metodologia proposta por Mulla & McBratney (2000), a célula de amostragem de solo pode ser definida como sendo 0,5 do valor do alcance do semivariograma. Assim, os valores para a célula de amostragem seriam de 30 X 23m.

Estas informações indicam que o número de amostras para se representar a variabilidade dos atributos de solo avaliados varia em função do atributo, da profundidade de solo e da direção no terreno amostrado. Os resultados sugerem a coleta de 14 amostras por hectare. Este número elevado de amostras a ser coletado por área, pode inviabilizar a adoção, por parte dos agricultores e técnicos, da agricultura de precisão numa propriedade rural, considerando a laboriosidade da coleta de amostras e, principalmente, o custo da análise em laboratório. Embora existam alternativas promissoras como sensores em tempo real para campo (ex. sensor para a condutividade elétrica do solo), amostradores mecânicos de solo combinados com novas rotinas automatizadas e de baixo custo de análises laboratoriais, a amostragem por grade poderia ser utilizada numa gleba da propriedade rural e não necessariamente em todos os anos agrícolas, pois os resultados de atributos de solo e planta, combinados com o mapa de colheita e o conhecimento do histórico de desempenho da cultura na gleba, podem auxiliar no estabelecimento de zonas de manejo. Além disto, como foi demonstrado, o diagnóstico do estado nutricional da cultura combinado com a avaliação da fertilidade do solo na qual, após a identificação do nutriente limitante da produção, a análise do solo poderia ser feita especificamente para este nutriente limitante da produtividade. Esta grade densa também se justifica para áreas na qual não se tem nenhum conhecimento destas variabilidades espaciais. Deve-se considerar que se trata de um estudo pioneiro e exploratório, no qual se justifica tal abordagem com elevado número de amostras. A partir destas informações levantadas e divulgadas, caberia, num próximo passo, o ajuste à realidade do produtor na melhor relação custo vs. benefício.

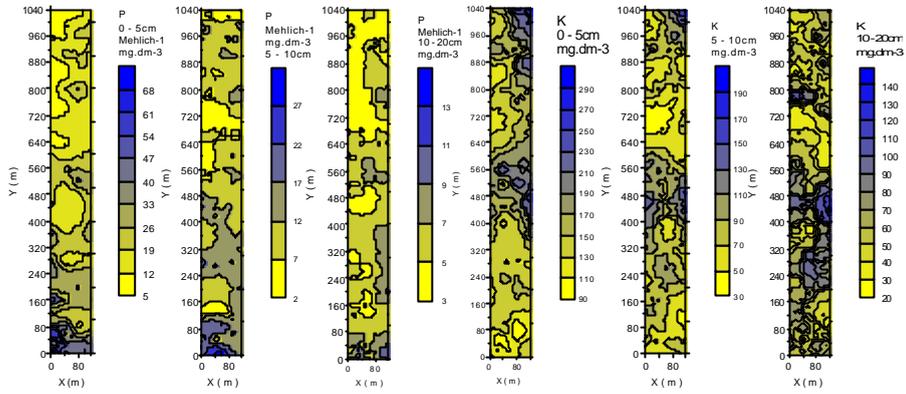


Fig. 2. Mapas *krigados* de distribuição espacial de fósforo e potássio nas 3 profundidades amostradas no solo cultivado com soja em sistema de plantio direto em Carambé, PR.

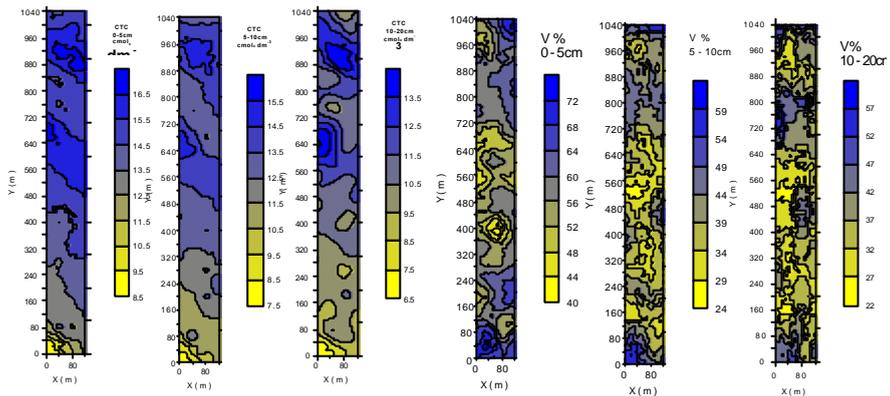


Fig. 3. Mapas *krigados* de distribuição espacial da capacidade de troca catiônica – CTC e da saturação por bases (V%) nas 3 profundidades amostradas no solo cultivado com soja em sistema de plantio direto em Carambé, PR.

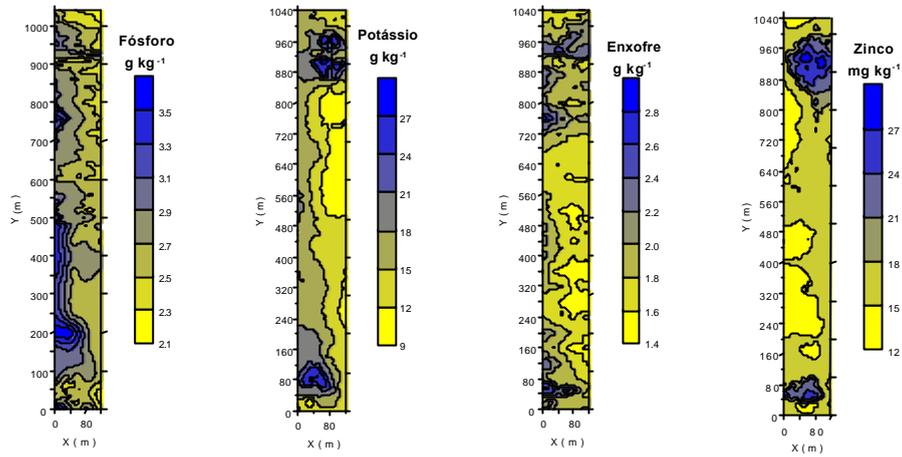


Fig. 4. Mapas *krigados* de distribuição espacial dos teores de fósforo, potássio, enxofre e zinco nas folhas de soja cultivada sob plantio direto em Carambeí, PR.

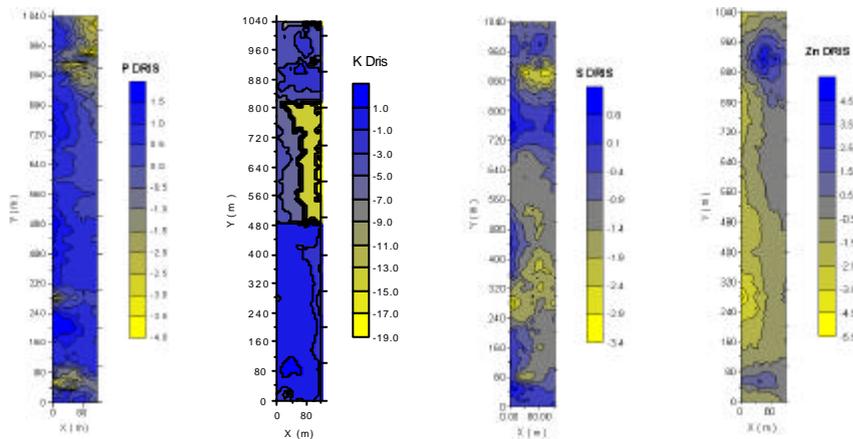
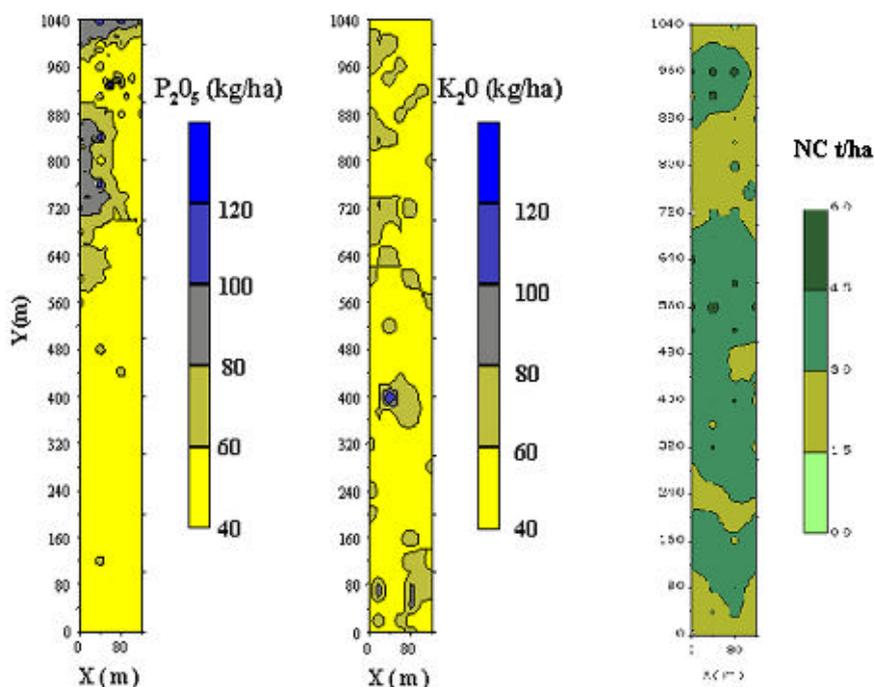


Fig. 5. Mapas *krigados* de distribuição espacial dos índices DRIS para nitrogênio, fósforo e potássio nas folhas de soja cultivada sob plantio direto em Carambeí, PR.

Mapas das Recomendações de Adubação

A partir da malha de pontos amostrados, procurou-se estabelecer informações para serem utilizadas no manejo da cultura no campo. Desta forma, o mapa com as doses de fósforo, potássio e calcário para aplicação em taxas variáveis é apresentado na Figura 6. A espacialização da necessidade de calagem foi feita considerando-se quatro faixas de doses de calcário. Porém, na prática, somente seria possível aplicar as doses de calcário nas faixas de 1,5 a 3,0 e 3,0 a 4,5t ha⁻¹, tendo em vista que as outras doses de calcário são pontuais. O mapa de recomendação para adubação com fósforo pode ser dividido em 2 faixas de aplicação, nas quais seriam aplicados de 40 a 60kg ha⁻¹ de P₂O₅, e na outra 80kg ha⁻¹ de P₂O₅. O mapa de necessidade de fertilizantes potássicos não está de acordo com o mapa da disponibilidade de K no solo, pois o mapa do cálculo da necessidade de K foi feito considerando a camada até 20cm de profundidade, onde seria aplicado 60kg K₂O ha⁻¹.



Fonte: Silva et al. (2001) e Machado et al. (2002).

Fig. 6. Mapa *krigado* de distribuição espacial da necessidade de adubação de P₂O₅, K₂O e calagem para a soja em sistema de plantio direto em Carambeí, PR.

Divisão em zonas de manejo

Baseado no conceito de zonas de manejo, ou seja agrupamento áreas com conjuntos de fatores limitantes, Valencia *et al.* (2001) estabeleceram na área em estudo, zonas com teores de argila homogêneos, usando a análise de conglomerados *k-means*. A Figura 7 mostra os mapas de colheita, de teor de argila e dois contendo divisão da área em 2 e 3 zonas contrastantes quanto à textura do solo. Observa-se que o mapa de colheita pode ser dividido em duas zonas na altura de 560m (direção Y) e que coincide com as zonas divididas pelo teor de argila (A e B). Nesta safra de soja (200-2001) a produtividade foi menor na área mais argilosa. Todavia, vistoriando a área semanas antes (*scouting*), pôde-se constatar que o crescimento das plantas na área mais argilosa era bem maior. Devido ao cultivo de variedade sensível ao acamamento, as plantas cresceram em demasia e, com o acamamento, ficaram predispostas ao ataque de fungos do solo. Isto resultou em menor produtividade, mas que não foi devido a atributos de fertilidade do solo. Para o estabelecimento mais criterioso de zonas de manejo é recomendável fazê-lo utilizando-se uma série de mapas de colheita (3-5 anos agrícolas). A partir do conhecimento destas zonas de manejo, poderão ser tomadas as decisões sobre intervenções diferenciadas na área. A adoção de três zonas de manejo (A, B e C na Figura 7) dependerá de melhor avaliação do desempenho da cultura quanto à produtividade e identificação de algum atributo do solo que poderia justificar maior detalhamento da área.

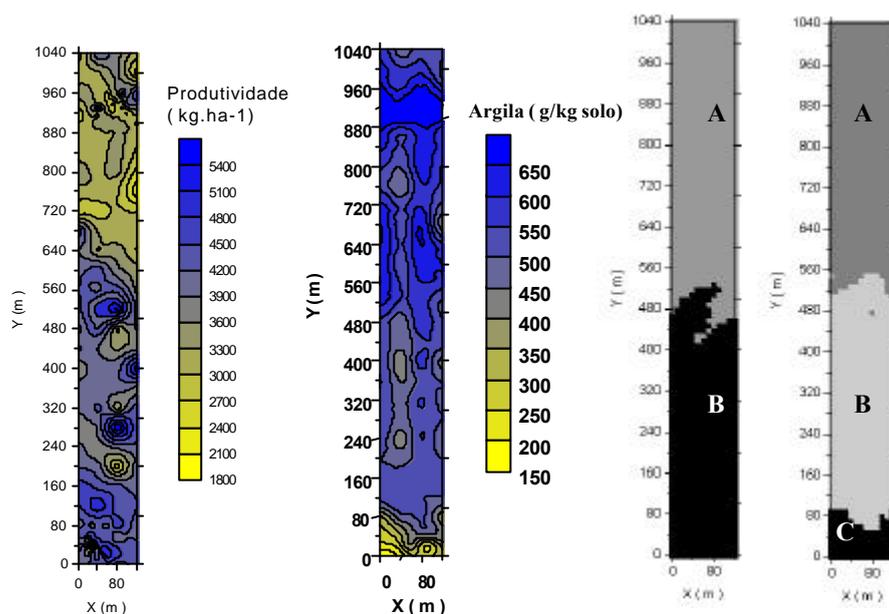


Fig. 7. Mapas *krigados* de produtividade ($t\ ha^{-1}$), distribuição espacial de argila ($g\ kg^{-1}$ solo) e separação da área em zonas de manejo pela análise de conglomerados do teor de argila do solo (A e B ou A, B e C). Fonte: adaptado de Valencia *et al.* (2001).

Conclusões

- Nas condições do presente estudo, a amostragem de solo e planta por grade em combinação com o mapa de colheita da soja sob plantio direto possibilitaram o estabelecimento de zonas de manejo;
- O esquema de amostragem de solo e o uso de técnicas de geoestatística possibilitaram espacializar a necessidade de calagem e de adubação de P e K oferecendo uma sugestão de adubação a taxas variáveis;
- Apesar da laboriosidade do procedimento (amostragem por grade) e prováveis custos elevados para análises laboratoriais de solo, os resultados indicam que a avaliação pormenorizada de atributos de solo e planta possibilitam melhorar o manejo da lavoura demarcando, para trabalhos futuros, desenvolver procedimentos mais ágeis e fácil lida para o manejo sítio-específico de uma gleba.

Agradecimentos

Ao proprietário da Fazenda Tabatinga, sr. Geraldo Slob, por ceder a área para os estudos. Ao Eng. Agr. José Carlos Sguario (Agro-Elf) pelo apoio na execução dos trabalhos. À Fundação Giacometti (Brasília, DF) pela administração do projeto. Ao PRODETAB (Proj. N° 041-01/99) e à FAPERJ (Proc. N° E-26/171.528/00-APQ1) pelo apoio financeiro parcial ao projeto.

Referências Bibliográficas

- BERNARDI, A. C. C.; MACHADO, P. L. O. A.; CARMO, C. A. S. F.; SILVA, C. A.; VALENCIA, I. L. O.; BETTINI, C.; MEIRELLES, M. S.; MOLIN, J. P. Georeferenced soybean yield and nutritional status evaluation under no till system in Southern Brazil. In: CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 6. **Proceedings...** Minneapolis: SSSA/ASA/CSSA, 2002. No prelo
- DEUTSCH, C. V.; JOURNEL, A G. **GSLIB geostatistical software library and user's guide**. New York: Oxford University Press, 1992. 340p.
- DOERGE, T. A. Management zones concepts. Site-specific management guidelines, Potash & Phosphate Institute, n.2, p.1-4, 2000. Publicação Seriada.
- FRANZEN, D. W.; PECK, T. R. Spatial variability of plant analysis calcium and magnesium levels before and after liming. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.26, n.13-14, p.2263-2277, 1995a.
- FRANZEN, D. W.; PECK, T. R. Spatial variability of plant analysis phosphorus levels. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 26, n.17-18, p.2929-2940, 1995b.
- FRANZEN, D. W.; PECK, T. R. Spatial variability of plant analysis potassium levels. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.28, n.13-14, p.1081-1091, 1997.
- JONES, C. A. Proposed modifications of the diagnosis and recommendation integrated system (DRIS) for interpreting plant analyses. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.12, p.785-794, 1981.
- JOHNSTON, A.E.; BARRACLOUGH, P.B.; POULTON, P.R.; DAWSON, C.J. Assessment of some spatially variable soil factors limiting crop yields. Proceedings N° 419The International Fertiliser Society, York, Great Britain. 48p. 1998. Publicação Seriada.
- LOWENBERG-DeBOER, J.. Economic analysis of precision farming. In: BORÉM, A.; GIÚDICE, M. P.; QUEIROZ, D. M.; MANTOVANI, E. C.; FERREIRA, L. R.; VALLE, F. X. R.; GOMIDE, R. L. **Agricultura de precisão**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2000. p.147-180.
- McBRATNEY, A. B.; PRINGLE, M. J. Estimating average and proportional variograms of soil properties and their potential use in precision agriculture. **Precision Agriculture**, Dordrecht, Holanda, v.1, n.1, p.125-152, 1999.

MUNSON, R. D.; NELSON, W. L. Principles and practices in plant analysis. In: WESTERMAN, R. L. (ed.). **Soil testing and plant analysis**. 3.ed. Madison: Soil Science Society of America, 1990. p. 359-387

MACHADO, P. L. O. A.; BERNARDI, A. C. C.; SILVA, C. A.; VALENCIA, I. L. O.; BETTINI, C.; TOMÉ JR, J. B. Variability of fertility parameters of a typical hapludox and estimation of liming and fertilizer requirements for soybean. In: CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 6. Minneapolis, 14-17 Jul. 2002. **Proceedings...** Minneapolis: SSSA/ASA/CSSA, 2002. no prelo

MULLA D. J.; MCBRATNEY, A. B. Soil spatial variability. In: SUMNER, M. E. **Handbook of soil science**. Boca Raton : CRC Press, 2000. A 321-352.

OLSON, K. D. An economic assessment of the whole-farm impact of precision agriculture. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 6. Minneapolis, 14-17 Jul. 2002. **Proceedings....** Minneapolis: SSSA/ASA/CSSA, 2002. p.63

PIERCE, F.J.; NOVAK, P. **Aspects of precision agriculture**. Advances in Agronomy, New York, v. 67, p. 1-85, 1999.

SFREDO, G. J.; LANTMANN, A. F.; CAMPO, R. J.; BORKERT, C. M. **Soja, nutrição mineral, adubação e calagem**. Londrina: EMBRAPA-CNPSo. 1986. 21 p. (EMBRAPA-CNPSo, Documentos, 64).

SILVA, C. A., BERNARDI, A. C. C., VALENCIA, L. I. O., MACHADO, P. L. O. A. Variabilidade de atributos de acidez do solo e espacialização da necessidade de calagem de área de soja sob plantio direto. In: SIMPÓSIO SOBRE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 3. 2001 **Anais...** Piracicaba, SP: ESALQ-USP, 2001. p.1-8, cd-rom.

SILVA, C.A.; MACHADO, P.L.O.A.; BERNARDI, A.C.C.; CARMO, C.A.F.S.; VALENCIA, L.I.O.; ANDRADE, A.G.; PENELLO, M.S. Amostragem de solo em área de soja sob plantio direto: uso de técnicas de agricultura de precisão. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002. 7p. (Embrapa Solos. Comunicado Técnico, nº 10).

SILVA, F. C. (Org.) **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia. 1999. 370 p.

SILVA, F. C.; EIRA, P. A.; BARRETO, W. O.; PÉREZ, D. V.; SILVA, C. A. **Manual de métodos de análises químicas para avaliação da fertilidade do solo**. Rio de Janeiro: Embrapa/CNPS, 1998. 56 p. (Embrapa-CNPS. Documentos, 3).

STAFFORD, J. V. Implementing precision agriculture in the 21st century. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v. 76, p. 267-275, 2000.

STOMBAUGH, T.S., SHEARER, S.A. Equipment technologies for precision agriculture. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 55, n. 1p. 6-11, 2000.

VALENCIA, L. I. O.; MEIRELLES, M. S.; FUKS, S. D. Métodos geoestatísticos para análise e avaliação de riscos em Agricultura de Precisão. In: WORKSHOP BRASILEIRO DE GEOINFORMÁTICA, 3. Rio de Janeiro, RJ, 2001. Geoinfo 2001. **Anais...** Rio de Janeiro, RJ: Sociedade Brasileira de Computação, 2001. p.147-152.

WALWORTH, J. L., SUMNER, M.E. The Diagnosis and recommendation integrated system (DRIS). **Advances in Soil Science**, New York, v. 6, p.149-88, 1987.

WHELAN, B.M., MCBRATNEY, A.B., BOYDELL, B.C. 2002. **The impact of precision agriculture**. Disponível em: <http://www.usyd.edu.au/su/agric/acpa/pag.htm>. Acessado em: 18 de fevereiro de 2003.

WIETHÖLTER, S. Manejo da fertilidade do solo no sistema plantio direto: experiência nos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. In: REUNIAO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRICAÇÃO DE PLANTAS, 25.; REUNIAO BRASILEIRA SOBRE MICORRIZAS, 8.; SIMPOSIO BRASILEIRO DE MICROBIOLOGIA DO SOLO, 6.; REUNIAO BRASILEIRA DE BIOLOGIA DO SOLO, 3., 2000. Santa Maria, RS. **Fertbio 2000: biodinâmica do solo**. Santa Maria, RS: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Microbiologia, 2000. 35 p.; 1 CD ROM.

ZHANG, N., WANG, M., WANG, N. Precision agriculture – a worldwide overview. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 36, p. 113-132, 2002.