



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

ISSN 1678-0892

Dezembro, 2003

Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 23

Diagnose Foliar da Soja em Sistema Plantio Direto Utilizando Técnicas de Agricultura de Precisão em Carambeí, PR

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

Rio de Janeiro, RJ
2003

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Solos

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

CEP: 22460-000

Fone: (21) 2274.4999

Fax: (21) 2274.5291

Home page: www.cnps.embrapa.br

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

Supervisor editorial: *Jacqueline Silva Rezende Mattos*

Revisor de texto: *André Luiz da Silva Lopes*

Normalização bibliográfica: *Cláudia Regina Delaia*

Editoração eletrônica: *Rafael Simões Bodas Fernandes*

Jacqueline Silva Rezende Mattos

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).

Diagnose foliar da soja em sistema plantio direto utilizando técnicas de agricultura de precisão em Carambeí, PR / Alberto Carlos de Campos Bernardi... [et al.]. - Rio de Janeiro : Embrapa Solos, 2003.

26 p. - (Embrapa Solos. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento; n. 23)

ISSN 1678-0892

1. Plantio Direto - Soja - Cultura. 2. Plantio Direto - Soja - Qualidade Nutricional. I. Bernardi, Alberto Carlos de Campos. II. Carmo, Ciriaca Arcângela F. de Santana do. III. Machado, Pedro Luiz O. de A. IV. Silva, Carlos Alberto. V. Valencia, Luiz Ivan O. VI. Meirelles, Margareth S. VII. Molin, José P. VIII. Embrapa Solos (Rio de Janeiro). IX. Série.

CDD (21.ed.) 631.4

© Embrapa 2003

Sumário

Introdução	9
Material e Métodos	12
Resultados e Discussão	15
Conclusões	23
Referências Bibliográficas	24

Diagnose Foliar da Soja em Sistema Plantio Direto Utilizando Técnicas de Agricultura de Precisão em Carambeí, PR

Alberto C. de Campos Bernardi ⁽¹⁾

Ciríaca A. F. de Santana do Carmo ⁽¹⁾

Pedro Luiz O. de A. Machado ⁽¹⁾

Carlos Alberto Silva ⁽²⁾

Luiz Ivan O. Valencia ⁽³⁾

Margareth S. Meirelles ⁽⁴⁾

José P. Molin ⁽⁵⁾

Resumo

A diagnose foliar foi desenvolvida para fornecer informações sobre o estado nutricional das plantas e servir de orientação para o manejo de nutrientes visando produtividades ótimas. As outras aplicações incluem também, a estimativa regional do estado nutricional. No entanto pouco se sabe ainda sobre a variação espacial do estado nutricional, particularmente no sistema de plantio direto. Em uma lavoura de soja, cultivada no sistema de plantio direto na região Sul do Brasil, avaliou-se a variabilidade espacial dos teores de nutrientes e o estado nutricional, para identificar as limitações à produção da cultura. Amostras de solo e folhas georeferenciadas foram coletadas em um talhão de 13 ha, em grades de amostragem de 40 por 40 m, e em grades menores de 20 por 20 m, 10 por 10 m,

⁽¹⁾ Pesquisador da Embrapa Solos. Rua Jardim Botânico, 1024. CEP: 22460-000, Rio de Janeiro, RJ.
E-mail: sac@cnps.embrapa.br

⁽²⁾ Dep. de Ciência do Solo – UFLA, Lavras, MG

⁽³⁾ Instituto de Geociências – UFRJ, Rio de Janeiro, RJ

⁽⁴⁾ Dep. Eng. Sistemas e Computação – UERJ / Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

⁽⁵⁾ Dep. Eng. Rural – ESALQ/USP, Piracicaba, SP

e 5 por 5 m. Os teores foliares de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn, Mo e Zn foram determinados. Foram utilizados e discutidos dois procedimentos para avaliação do estado nutricional: as faixas de suficiência e os índices DRIS. Avaliou-se a produção de grãos na época da colheita. Ajustou-se semivariogramas para todos os teores de nutrientes nas folhas. Os alcances dos semivariogramas indicaram que a grade amostragem de 20 por 20 m foi a mais adequada para representar a variabilidade espacial dos teores de nutrientes nas folhas de soja. Os métodos de avaliação do estado nutricional foram complementares e indicaram que o potássio foi o nutriente mais limitantes à produção de soja. São apresentados os mapas krigados dos teores de macro e micronutrientes e dos índices DRIS.

Palavras-chave: faixa de suficiência, sistema integrado de diagnose e recomendação (DRIS), semivariogramas, geoestatística.

Nutritional Status Evaluation of Soyabean Crop Growth on No-Till System by Precision Agriculture Tools in Campos Gerais Region, Paraná Estate, Brazil

Abstract

Plant analysis has been developed to provide information on the nutrient status of plants as a guide to nutrient management for optimal plant yield. Other use includes also the estimation of overall nutritional status of a region or site. Nevertheless little is known about the spatial variability of the plant nutritional status, particularly in a no-tillage system. In a no-till farm in southern Brazil, a soybean crop was sampled to evaluate the spatial variability of plant nutrient concentrations and nutritional status; and identify the constraints to soybean yield. Georeferenced soil and leaf samples were collected in a 13-ha area in a grid of 40 by 40 m; and then sub-sampled in grids of 20 m by 20 m; 10 m by 10 m; and 5 m by 5 m. Contents 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. Semivariograms for all nutrients in leaf were modeled. The ranges of the semivariograms indicated that a grid 20 by 20 m was appropriate to indicate spatial variability of plant nutrients. Both nutritional status methods were complementary on showing that K and P were the most limiting nutrients to soybean yield. Kriged maps of nutrients levels and DRIS index are shown.

Key words: sufficient ranges (SR) and the Diagnosis and Recommendation Integrated System (DRIS), semivariograms, geostatistic.

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, na região de Campos Gerais no Paraná, o advento da utilização das técnicas de agricultura de precisão tem ocasionado mudanças na forma de gerenciar o agronegócio pelos agricultores. O impulso a este novo conjunto de tecnologias foi iniciado com o aprimoramento das técnicas de posicionamento geográfico preciso através de informações obtidas por satélites. Com isso, iniciou-se um novo ciclo de gerenciamento de informações, que possibilita associar a variabilidade da produtividade das culturas com o estado nutricional das plantas. O uso dessa tecnologia configura-se, assim, em um grande avanço na particularização das condições do solo que afetam a nutrição e o rendimento das culturas, tornando possível identificar em que parte da lavoura, especificamente, deverão ser realizadas as intervenções e quais nutrientes estão sendo limitantes à produção. No entanto, como toda nova tecnologia, existem ainda vários entraves para serem superados.

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, pois segundo Prevot & Ollagnier (1956) existe uma relação entre o fornecimento de um nutriente pelo solo ou por um fertilizante e a concentração na folha, e uma relação entre essa concentração e a produção da cultura. Por isso, a análise de tecidos vegetais é uma técnica quantitativa que permite determinar os teores totais de um elemento ou de suas frações, na planta inteira ou em um de seus órgãos.

A análise foliar pode estar sujeita a algumas limitações tais como épocas de amostragem, interpretação, contaminação da amostra, deficiências e excessos de nutrientes. Apesar disso, é uma das melhores ferramentas disponíveis para avaliar o estado nutricional de plantas e para orientar programas de adubação, em conjunto com os resultados da análise de solo (Malavolta *et al.* 1997).

O princípio da diagnose foliar é comparar a concentração de nutrientes nas folhas com valores padrões correspondentes às variedades ou espécies de alta produtividade e com desenvolvimento vegetativo adequado (Dechen *et al.*, 1995).

Dentre as ferramentas disponíveis para a avaliação do estado nutricional das culturas, as faixas de suficiência têm sido amplamente utilizadas. Este método de interpretação se originou do nível crítico (Baldock & Schulte, 1996), o qual foi definido por Prevot & Ollagnier (1956) como sendo a porcentagem de um elemento, na folha, abaixo da qual sua aplicação na forma de fertilizante mineral tem alta probabilidade de aumentar a produção. O nível crítico de um nutriente também foi definido como a concentração necessária desse nutriente para a obtenção de crescimento, produção ou qualidade “ótimas”, assumindo-se que nenhum outro fator seja limitante ou “sub-ótimo” (Ulrich & Hills, 1967). O “ótimo” é definido como o teor de um nutriente no vegetal “necessário para se ter 90 ou 95% do crescimento, da produção, ou da qualidade máxima”, ou como a “concentração de nutrientes na qual o crescimento da planta começa a declinar”, ou ainda “o menor teor de um nutriente associado com a maior produção” (Tisdale *et al.*, 1985). Para Sumner (1979), o nível crítico é o teor de um nutriente na planta, amostrado em um determinado estágio de crescimento, no qual ocorre uma redução de 5 a 10% no rendimento. Geralmente, a definição mais utilizada é a de que nível crítico é aquele teor de nutriente associado a 90% da produção máxima. Dow & Roberts (1982) propuseram para o nível crítico não um ponto, mas uma faixa crítica de teores de um nutriente, acima da qual a planta é amplamente suprida e, abaixo dela, ocorre deficiência. Este método de avaliação do estado nutricional fornece índices dos nutrientes independentes, discretos e facilmente calculados (Baldock & Schulte, 1996). Peck (1979) publicou os primeiros padrões foliares para a cultura da soja. Na região Sul do Brasil, as faixas de teores para esta cultura foram estabelecidas por Sfredo *et al.* (1986).

Outro método de avaliação do estado nutricional é o Sistema Integrado de Diagnose e Recomendação (DRIS), desenvolvido a partir do método da Diagnose Fisiológica (Beaufils, 1957). Este tinha a finalidade de avaliar a influência de fatores externos sobre a produção da seringueira e evoluiu, originando o DRIS. Tal método baseia-se 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. Assume ainda que, para se obter altos rendimentos, deve-se manter um equilíbrio dos nutrientes (Walworth & Sumner, 1987). Para sua utilização, é necessário a implementação de valores de referência

considerados ideais para cada nutriente e também para as relações recíprocas entre eles, levando-se em conta seus desvios padrões. As referências serão originadas de uma população preestabelecida, separada da população base devido a seus atributos (de produção ou crescimento) superiores (Beaufils, 1973). O DRIS fornece um meio matemático de ordenar um grande número de relações entre nutrientes, na forma de índices, que podem ser facilmente interpretados. Inicialmente, as normas de referência precisam ser determinadas para todas as relações nutricionais, as quais, posteriormente, serão usadas para generalizar índices (Walworth & Sumner, 1987). Letzsch & Sumner (1983) relataram que, uma vez estabelecidas as normas, elas poderiam ser universalmente aplicadas, embora a precisão possa ser melhorada, limitando-se às regiões geograficamente semelhantes. Jones (1981) propôs três modificações na metodologia original para simplificar seu uso e interpretação. Os índices DRIS são contínuos, difíceis de calcular mas facilmente interpretados, fornecendo um balanço geral e um ranking das deficiências e dos excessos relativos (Baldock and Schulte, 1996).

Para a estimativa espacial ótima dos atributos de solo e de planta, é necessário desenvolver estratégias eficientes de amostragem 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 existirem alguns estudos mostrando a variabilidade espacial dos atributos de solo, ainda são poucos os 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.

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. Clark (1979), Burrough & McDonnell (1998), e Lamparelli *et al.* (2001) apresentaram e descrevem os métodos semivariograma e krigagem.

Este estudo teve como objetivo avaliar o estado nutricional da soja através do uso das metodologias das faixas de suficiência e do DRIS, e a variabilidade espacial dos teores de nutrientes nas folhas de soja cultivada em sistema plantio direto na Região dos Campos Gerais, PR, utilizando a geoestatística, para fornecer subsídio para o uso das técnicas de agricultura de precisão.

Material e Métodos

A área de estudo localiza-se na Fazenda Tabatinga, na região de Campos Gerais, no município de Carambeí, Paraná, nas coordenadas 24°51'45" S e 50°15'58"; e estando situada entre 615 e 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 é o Latossolo Vermelho, com teores de argila variando de 180 a 720 g kg⁻¹. Na Figura 1, é apresentada uma foto da área. O sistema de plantio direto vem sendo adotado nesta área desde 1988 e, de acordo com o seguinte esquema: cultivo de soja no verão, por duas safras consecutivas, em rotação com trigo e aveia preta no inverno; após estas safras, cultiva-se o milho no verão. Por ocasião do plantio, no ano de avaliação, foram utilizadas as doses de 62,5 kg ha⁻¹ de K₂O e 62,5 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (250 kg ha⁻¹ da formulação NPK 0-25-25). As sementes de soja foram inoculadas com *Bradyrhizobium* spp. Foram feitas também, na fase anterior à floração da cultura, pulverizações foliares com sulfato de manganês.

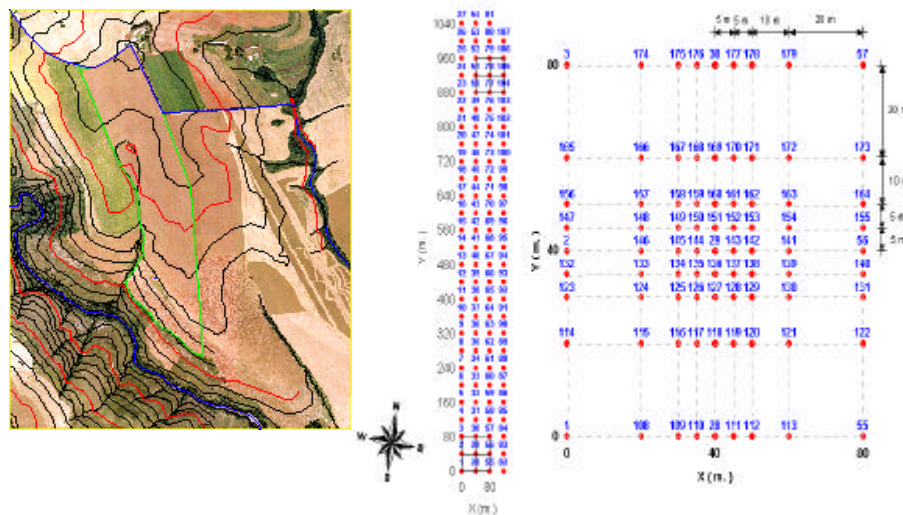


Fig. 1 - Ortofotografia da área de estudo (destacada em verde) e esquema das grades de amostragens adotado.

As amostragens de folhas foram realizadas no verão de 2000 (janeiro), início do florescimento da soja, sendo a malha de amostragem composta de uma grade maior com células de 40 x 40 m, num total de 107 pontos de amostragem cobrindo 13 ha. Observou-se duas áreas com diferenciação textural e nelas foram estabelecidas 2 novas malhas de amostragem mais densa, com subdivisões de 20 X 20 m ; 10 X 10 m e; 5 X 5 m, perfazendo, um total de 72 amostras cada. O esquema das malhas de amostragem adotado está apresentado na Figura 1. As coordenadas geográficas dos pontos amostrados foram obtidas através do uso de aparelho GPS Trimble® Geoexplorer 3C, com precisão de cerca de 2 metros.

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 os macronutrientes 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 do estado nutricional da soja foi realizada através do método DRIS, e o cálculo dos índices para os nutrientes avaliados, segundo procedimento de Jones (1981).

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 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 geoestatísticos do programa GSLIB (Deutsch & Journel, 1992). Os atributos de solo e planta foram estimados por krigagem ordinária em blocos de 10 x 10 m e os mapas de isolinhas foram feitos utilizando-se o programa Surfer 6.1 para Windows (Golden Software Co., EUA) (Figuras 2 e 3).

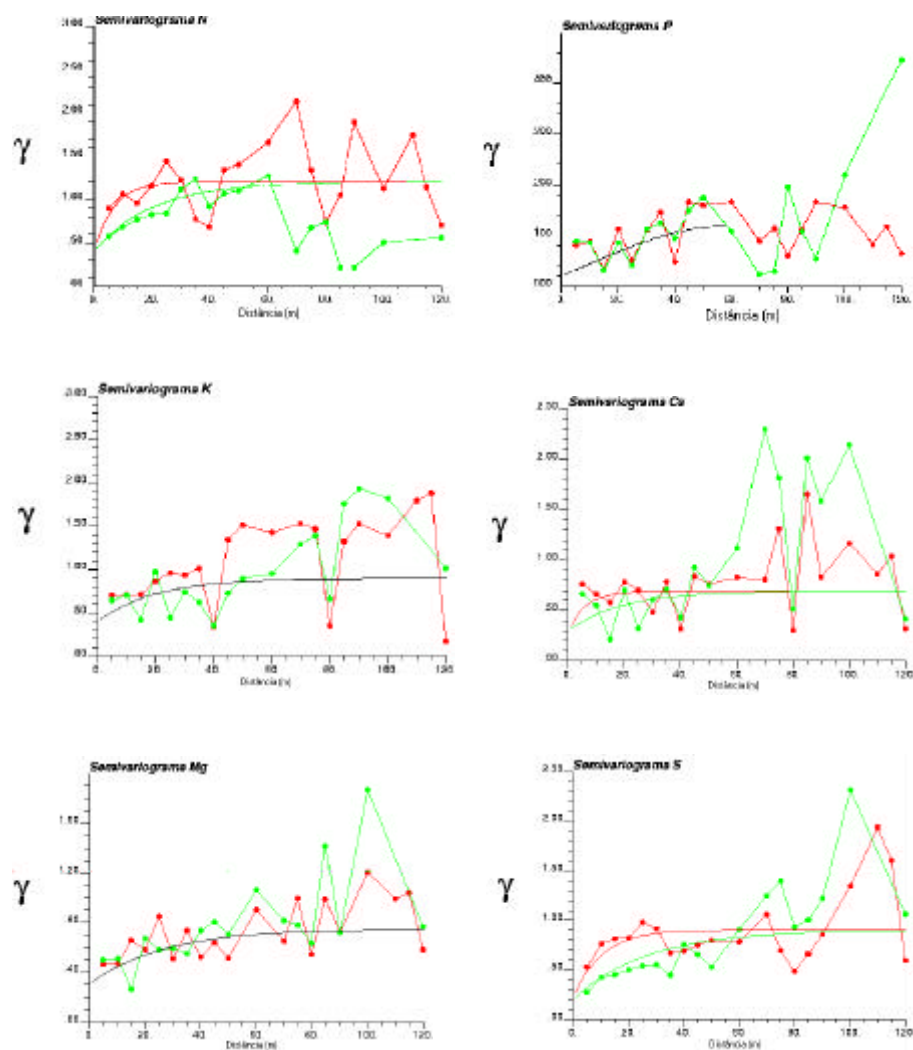


Fig. 2 - Semivariogramas da distribuição espacial dos teores dos macronutrientes nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre nas folhas de soja cultivada sob plantio direto na região de Campos Gerais, PR.

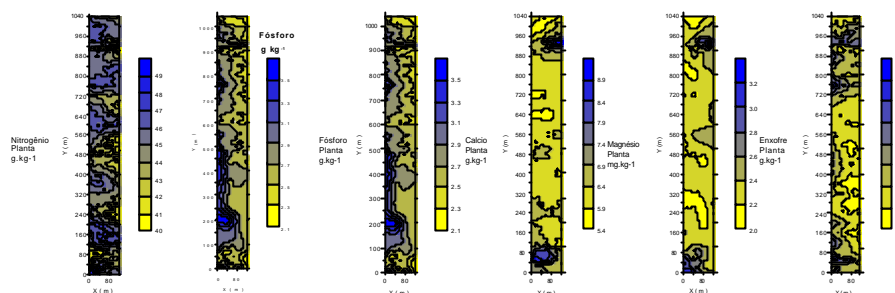


Fig. 3 - Mapas *krigados* de distribuição espacial dos teores dos macronutrientes nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre nas folhas de soja cultivada sob plantio direto na região de Campos Gerais, PR.

Resultados e Discussão

As médias, intervalos de confiança, desvio padrão e coeficientes de variação da produtividade de grãos de soja, teores de nutrientes analisados nas folhas e os índices DRIS encontram-se nas Tabelas 1 e 2, respectivamente.

Utilizou-se o conjunto de técnicas de geoestatística para estimar os valores regionalizados e espacializados dos resultados das análises de folhas, sendo esta abordagem fundamental para o estudo da variabilidade espacial destes valores.

Os semivariogramas para todos os teores de nutrientes nas folhas foram ajustados e os resultados da análise espacial e os parâmetros dos modelos ajustados estão nas Tabelas 3 e 4 para os teores de nutrientes e para os índices DRIS, respectivamente. Estes semivariogramas foram obtidos através da modelagem dos teores foliares de nutrientes, considerando as distâncias entre os pontos de observação. As variáveis N, Mg, S, B, Cu e Zn foram ajustadas a modelos exponenciais; já K e Fe foram ajustadas ao modelo esférico. O modelo pepita puro, ajustado para os teores de P, Ca e Mn nas folhas de soja, indica a presença de grande variabilidade em distâncias menores que 5 metros.

Tabela 1. Parâmetros estatísticos dos valores de produtividade e dos teores de nutrientes nas folhas de soja, cultivada sob plantio direto em Carambeí, PR.

Parâmetros	Prod	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
Estatísticos	kg ha ⁻¹	g kg ⁻¹						mg kg ⁻¹				
Média	3789,4	44,7	2,8	14,6	1,9	6,2	2,3	15,8	33,2	5,7	63,3	29,6
DP	646,9	2,7	0,4	3,2	0,3	0,5	0,2	1,8	3,8	0,6	13,5	4,3
Mediana	3899	44,72	2,78	14,74	1,83	6,21	2,31	15,4	33,29	5,64	60,6	29,1
Mínimo	2142	36,14	1,91	7,31	1,36	5	1,96	12,9	22,14	4,41	47,9	19,9
Máximo	5774	56,08	3,88	20,79	2,89	7,4	3,11	21,3	42,87	8,81	154	44,2
CV	17,1	6,1	14,9	21,7	16,9	7,3	8,7	11,1	11,5	10,7	21,4	14,6
Produtividade alta (> 4436 kg ha ⁻¹)												
Mínimo	4438	36,14	2,22	9,81	5,62	2,11	1,45	26,82	4,82	50,20	26,20	13,80
Média	4871	43,92	2,79	15,44	6,45	2,34	1,82	32,94	5,69	63,28	31,13	15,48
Máximo	5774	47,09	3,13	20,79	7,31	2,66	2,46	38,46	6,35	107,00	35,90	16,90
DP	453,3	3,20	0,27	3,24	0,47	0,16	0,28	3,80	0,44	14,77	2,87	0,97
Produtividade média (de 3142 a 4436 kg ha ⁻¹)												
Mínimo	3143	37,98	1,91	7,81	5,00	1,96	1,36	22,14	4,41	47,90	19,90	12,90
Média	3827	44,95	2,89	14,82	6,19	2,33	1,88	32,68	5,68	61,77	29,23	15,70
Máximo	4403	56,08	3,88	20,79	7,40	3,11	2,89	42,87	8,81	111,00	44,20	21,30
DP	394,4	2,06	0,28	0,98	0,32	0,17	0,26	2,70	0,77	6,56	4,95	1,64
Produtividade baixa (< 3142 kg ha ⁻¹)												
Mínimo	2142	40,71	2,27	7,31	5,39	1,99	1,70	29,46	5,19	50,80	24,80	13,90
Média	2854	44,16	2,69	13,32	6,27	2,36	1,94	35,84	5,66	70,14	30,43	16,61
Máximo	3125	48,56	3,25	18,04	7,23	2,82	2,33	42,87	6,64	154,00	38,80	20,90
DP	261,6	2,21	0,29	2,89	0,46	0,22	0,20	3,37	0,33	23,50	4,35	2,31

* Produtividade alta > média + DP; Produtividade média = média ± DP; Produtividade baixa < média – DP.

Tabela 2. Parâmetros estatísticos dos valores dos índices DRIS dos teores de nutrientes nas folhas de soja, cultivada sob plantio direto em Carambeí, PR.

Índice DRIS	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
Todas produtividades											
Média	-0,272	-0,815	-1,186	-0,237	-0,136	-0,168	0,112	0,024	0,650	0,273	0,323
DP	0,996	1,976	2,780	0,592	0,523	1,208	1,078	0,718	2,553	0,752	1,553
Mediana	-0,130	-0,540	-0,424	-0,227	-0,185	-0,184	0,275	-0,059	0,057	0,149	-0,038
Mínimo	-5,539	-8,799	-12,913	-1,789	-1,402	-3,706	-4,315	-0,857	-0,751	-1,196	-3,583
Máximo	1,549	2,027	2,006	1,027	1,171	2,065	2,994	5,409	21,021	2,373	6,296
CV	-365,9	-242,5	-234,5	-250,2	-386,0	-720,8	958,3	2969,3	393,1	275,0	480,3
Produtividade alta (> 4436 kg ha ⁻¹)											
Mínimo	-2,876	-4,564	-6,894	-0,669	-0,928	-1,88	-2,263	-0,673	-0,751	-0,568	-1,408
Média	-0,534	-0,909	-0,417	0,047	-0,082	-0,350	-0,066	-0,013	0,684	0,561	-0,093
Máximo	0,501	0,783	1,876	0,58	0,586	1,622	1,242	0,598	8,682	2,327	2,191
DP	0,977	1,359	2,431	0,397	0,503	0,917	0,988	0,409	2,560	0,738	1,064
Produtividade média (de 3142 a 4436 kg ha ⁻¹)											
Mínimo	-2,374	-8,799	-9,71	-1,789	-1,402	-3,706	-4,315	-0,857	-0,661	-1,816	-2,653
Média	-0,144	-0,540	-0,916	-0,256	-0,097	-0,172	0,025	0,077	0,373	0,193	0,282
Máximo	1,549	2,027	2,006	1,027	1,304	2,065	2,333	5,409	9,910	2,373	6,296
DP	0,841	1,952	2,465	0,609	0,551	1,322	1,017	0,816	1,488	0,808	1,502
Produtividade baixa (< 3142 kg ha ⁻¹)											
Mínimo	-5,539	-7,927	-12,913	-1,377	-1,096	-1,864	-3,702	-0,732	-0,624	-0,558	-3,583
Média	-0,704	-1,754	-2,793	-0,350	-0,214	0,147	0,502	-0,113	1,809	0,257	0,615
Máximo	0,803	1,301	1,482	0,743	0,765	1,401	2,994	1,225	21,021	1,43	4,229
DP	1,503	2,249	3,703	0,559	0,553	0,784	1,360	0,471	5,049	0,628	2,060

* Produtividade alta > média + DP; Produtividade média = média ± DP; Produtividade baixa < média – DP.

A escolha dos modelos do semivariograma deve ser criteriosa para que se evite a propagação indesejável de erros posteriores, que podem ocorrer quando o modelo da estrutura de variabilidade não é bem definido (Lamparelli *et al.*, 2001). Assim os modelos escolhidos foram avaliados com relação ao seu ajuste, que é uma média quadrática padronizada dos erros, ponderada pelo número de pares em cada lag e o inverso da distância do lag. Este ajuste é mais adequado que o coeficiente de determinação (R^2) e o quadrado médio do resíduo (QMR), para avaliar o modelo de ajuste escolhido, uma vez que considera as características do variograma empírico. O ajuste é feito para cada direção do semivariograma (X e Y) no caso de anisotropia, como foi observado para N, B e Cu. No caso de isotropia, para K, Mg, S, Fe e Zn, ajustou-se apenas um índice. Por isso, estes modelos diferem daqueles apresentados anteriormente por Bernardi *et al.* (2002), uma vez que, utilizando esta técnica, foi possível melhorar os ajustes.

Nas figuras 2, 4 e 6 são mostrados os modelos dos semivariogramas para os macro e micronutrientes e Índices DRIS. Nos semivariogramas típicos, observa-se que, à medida que o lag cresce, o semivariograma atinge o patamar (c) em um dado lag, chamado de alcance. A partir deste ponto, os valores amostrados tornam-se independentes, portanto as diferenças de valores de atributos a distâncias maiores que o alcance, possuem variância constante (Lamparelli *et al.*, 2001). Assim, toda a dependência espacial dos atributos avaliados estará restrita a distâncias menores que o alcance.

Na Tabela 3 também são apresentados os valores relativos ao alcance dos semivariogramas para atributos da diagnose foliar. Os valores médios, para as direções X e Y, foram de 60,5 e 42,7 m, respectivamente. 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 21 m. Os resultados sugerem a coleta de 14 amostras por hectare e que são muito próximos aos valores encontrados por Silva *et al.* (2002).

O número elevado de amostras a ser coletado por área pode inviabilizar a adoção da agricultura de precisão, por parte dos agricultores e técnicos, numa propriedade rural, considerando não só o trabalho com a coleta de amostras mas, principalmente, o custo da análise em laboratório. Estes resultados mostram a necessidade de se testar novas ferramentas como sensores em tempo real, para solo (ex. sensor para a condutividade elétrica) e planta (ex. sensor do teor de

clorofila e imagens espectrais), bem como novas rotinas automatizadas e de baixo custo de análises laboratoriais. A amostragem por grade também poderia ser utilizada numa gleba da propriedade rural e não, necessariamente, em todos os anos agrícolas, pois os resultados de atributos de solo e de planta, combinados com o mapa de colheita e com o conhecimento do histórico de desempenho da cultura na gleba, podem auxiliar no estabelecimento de zonas de manejo.

Além disto, como foi demonstrado neste trabalho e no anterior, de Silva *et al.* (2002), o diagnóstico do estado nutricional da cultura combinado com a avaliação da fertilidade do solo, após a identificação do nutriente limitante da produção, poder-se-ia fazer a análise do solo especificamente para este nutriente.

Tabela 3. Modelos de variogramas e coeficientes para os nutrientes nas folhas da soja em Carambeí, PR.

Nutriente	Modelo*	Alcance (m)		Efeito pepita	Contribuição	Patamar (C ₀ + C)	Ajuste	
		X	Y				X	Y
N	Exponencial	50,8	10,0	0,40	0,67	1,07	0,027	0,024
P	Pepita Puro	-	-	-	-	-	-	-
K	Esférico	65,7	65,7	0,58	0,42	1,00	-	0,004
Ca	Pepita Puro	-	-	-	-	-	-	-
Mg	Exponencial	61,2	61,2	0,39	0,36	0,75	-	0,009
S	Exponencial	47,7	47,7	0,25	0,59	0,84	-	0,004
B	Exponencial	47,5	9,7	0,29	0,64	0,93	0,011	0,039
Cu	Exponencial	76,5	12,3	0,41	0,43	0,84	0,036	0,021
Fe	Esférico	69,3	69,3	0,40	0,24	0,64	-	0,003
Mn	Pepita Puro	-	-	-	-	-	-	-
Zn	Exponencial	65,6	65,6	0,29	0,44	0,73	-	0,008

*Modelos ajustados usando o Variowin 2.2 (Pannatier, 1996).

Na Tabela 5 observa-se a distribuição da frequência de pontos amostrados nas faixas de interpretação dos teores foliares propostas por Sfredo *et al.* (1986), dentro dos três níveis de produtividade propostos. Verifica-se que Ca, B, Mn e Fe estão dentro da faixa de suficiência em, praticamente, todos os pontos amostrados. No entanto, N, P, K, Mg, S, Cu e Zn, em grande parte dos pontos amostrados encontram-se abaixo da faixa de suficiência. A avaliação do estado nutricional, pelo método da faixa de suficiência, indicou a seguinte ordem de limitação dentro de cada faixa de produtividade proposta:

- alta produtividade: Zn > Cu > Mg > S > K;
- média produtividade: Cu > K > S > Zn > Mg > P;
- baixa produtividade: K > Cu > Zn > Mg > S > P.

Tabela 4. Modelos de variogramas e coeficientes para os Índices DRIS nas folhas da soja em Carambeí, PR.

Índice DRIS	Modelo*	Alcance (m)	Efeito pepita C ₀	Contribuição C	Patamar (C ₀ + C)	Ajuste
N	Esférico	80,1	0,48	0,47	0,95	0,0036
P	Exponencial	15,3	0,50	0,22	0,72	0,0038
K	Esférico	43,2	0,58	0,46	1,03	0,0036
S	Esférico	34,2	2,16	0,64	2,80	0,0107
Zn	Esférico	59,3	1,02	0,65	1,67	0,0021

* Modelos ajustados usando o Variowin 2.2 (Pannatier, 1996).

O método de avaliação do estado nutricional utilizando o DRIS propõe que aqueles próximos a zero indicam que há equilíbrio nutricional. Índices inferiores e superiores a este valor indicam deficiência e excesso, respectivamente. A interpretação dos índices DRIS, considerando os três níveis de produtividade, encontram-se na Tabela 6.

Estabeleceu-se uma classificação para os índices DRIS dos nutrientes estudados: índices < -0,3 (tendência de deficiência); índices entre -0,3 e 0,3 (equilíbrio) e índices > 0,3 (tendência de excesso). Por esta metodologia, observa-se que, de um modo geral, os nutrientes que mais limitaram, em ordem decrescente dentro de cada faixa de produtividade proposta foram:

- alta produtividade: $P > S > K = N > Ca = B$;
- média produtividade: $K > S > P > Ca > Zn$;
- baixa produtividade: $K > P > Ca > N = Mg > Cu$.

Observa-se que houve uma concordância com os índices DRIS e as faixas de suficiência estabelecidas por Sfredo *et al.* (1986) para a mesma cultura e região. Os métodos de interpretação dos teores foliares das faixas de suficiência e do DRIS são duas abordagens diferentes e os resultados mostraram que, se utilizadas em conjunto, podem aumentar a precisão do diagnóstico.

Tabela 5. Porcentagem de ocorrência de teores de nutrientes nas faixas de suficiência em função das produtividades* nos pontos de amostragem.

	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
Interpretação	% de ocorrência										
	Produtividade alta (> 4436 kg ha ⁻¹)										
Deficiente	-	-	1,9	-	-	0,9	-	0,9	-	-	-
Baixo	0,9	1,9	5,6	-	9,3	8,4	-	10,3	0,9	-	11,2
Suficiente	10,3	9,3	3,7	-	1,9	1,9	11,2	-	10,3	11,2	-
Alto	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Muito alto	-	-	-	11,2	-	-	-	-	-	-	-
	Produtividade média (de 3142 a 4436 kg ha ⁻¹)										
Deficiente	-	-	21,5	-	-	7,5	-	10,3	-	-	-
Baixo	2,8	14,0	30,8	-	58,9	43,9	-	62,6	1,9	0,9	71,0
Suficiente	69,2	58,9	20,6	-	14,0	21,5	72,9	-	71,0	72,0	1,9
Alto	0,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Muito alto	-	-	-	72,9	-	-	-	-	-	-	-
	Produtividade baixa (< 3142 kg ha ⁻¹)										
Deficiente	-	-	6,5	-	-	-	-	-	-	-	-
Baixo	-	3,7	6,5	-	14,0	11,2	-	15,9	-	-	15,0
Suficiente	15,9	12,1	2,8	-	1,9	4,7	15,9	-	15,9	15,9	0,9
Alto	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Muito alto	-	-	-	15,9	-	-	-	-	-	-	-

* Produtividade alta > média + DP; Produtividade média = média ± DP; Produtividade baixa < média - DP.

Nas Figura 3, 5 e 7 são mostrados os mapas das estimativas *krigadas* para os teores de nutrientes nas folhas de soja e seus índices DRIS. A krigeagem é um método de estimativa um estimador linear com mínima variância para interpolação do atributo medido em posições não amostradas (Isaaks & Srivastava, 1989). Este estimador é uma combinação linear que é uma média móvel e leva em conta a estrutura de variabilidade encontrada, expressa pelo semivariograma e pela localização de valores conhecidos (Lamparelli *et al.*, 2001).

Considerando que o rendimento de soja e sua associação com os nutrientes, nas folhas, foram avaliados em uma só colheita, as análises serão realizadas em mais de uma safra, em colheitas subseqüentes. O objetivo será, então, considerar a variabilidade temporal, ao longo dos anos, permitindo, assim uma maior eficiência na determinação dos fatores limitantes da produtividade.

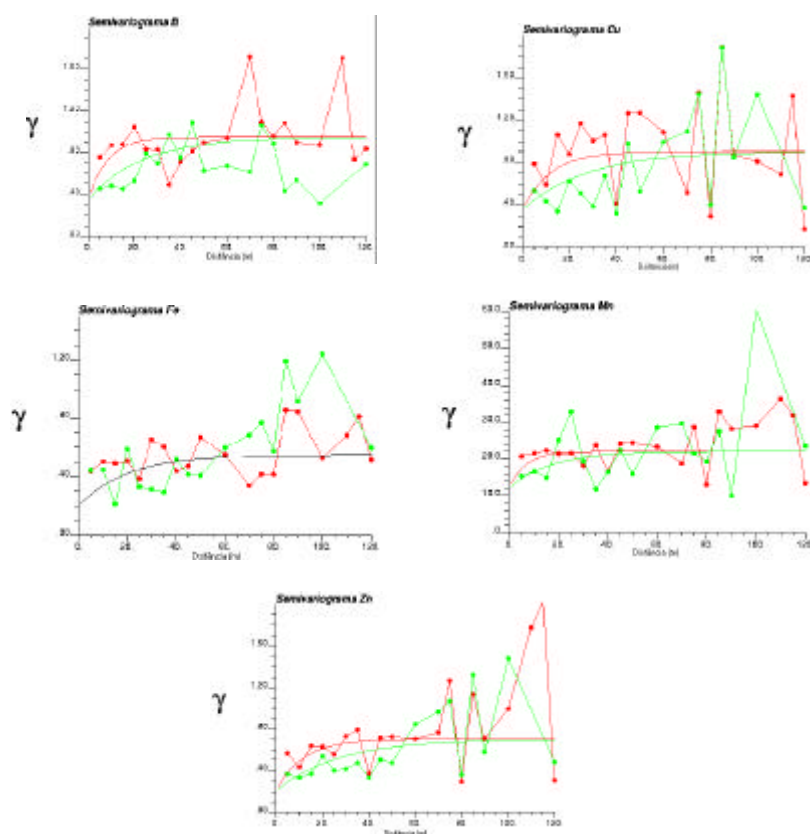


Fig. 4 - Semivariogramas da distribuição espacial dos teores dos micronutrientes boro, cobre, ferro, manganês e zinco nas folhas de soja cultivada sob plantio direto na região de Campos Gerais, PR.

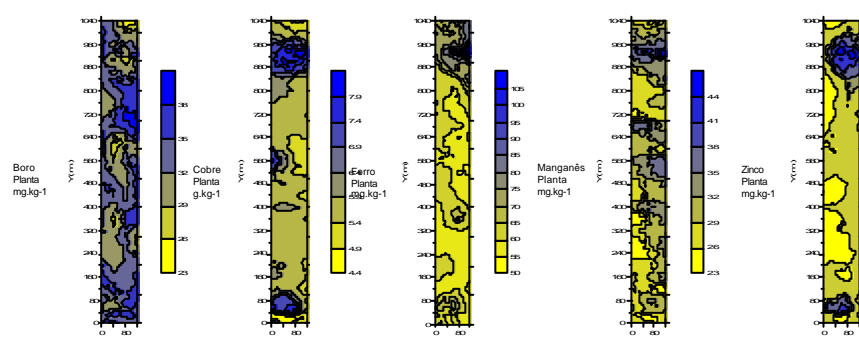


Fig. 5 - Mapas *krigados* de distribuição espacial dos teores dos micronutrientes boro, cobre, ferro, manganês e zinco nas folhas de soja cultivada sob plantio direto na região de Campos Gerais, PR.

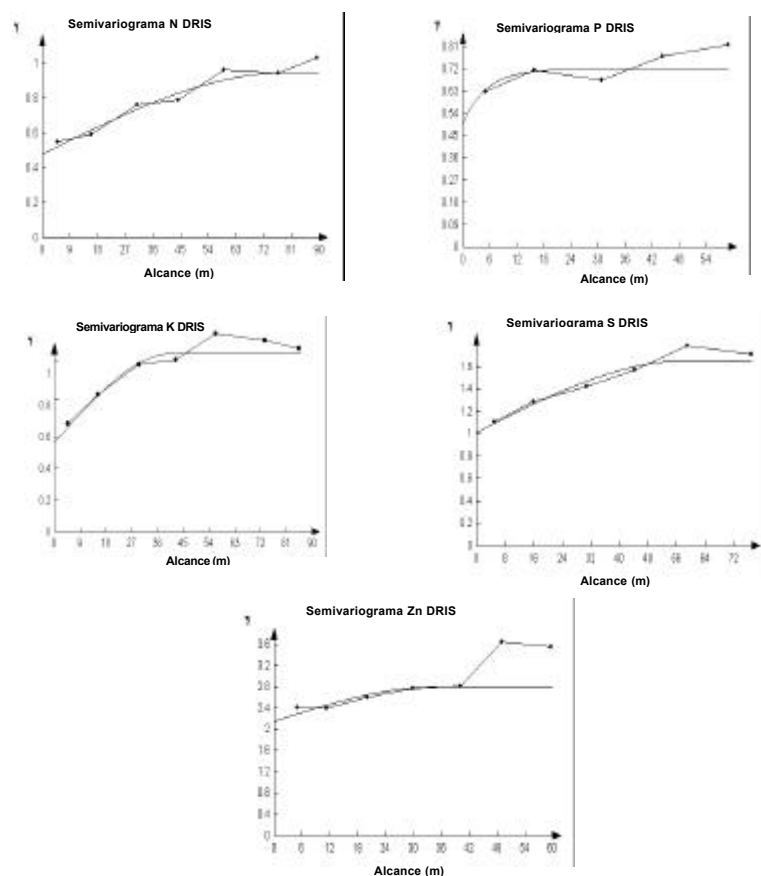


Fig. 6 - Semivariogramas da distribuição espacial dos índices DRIS de nitrogênio, fósforo, potássio, enxofre e zinco.

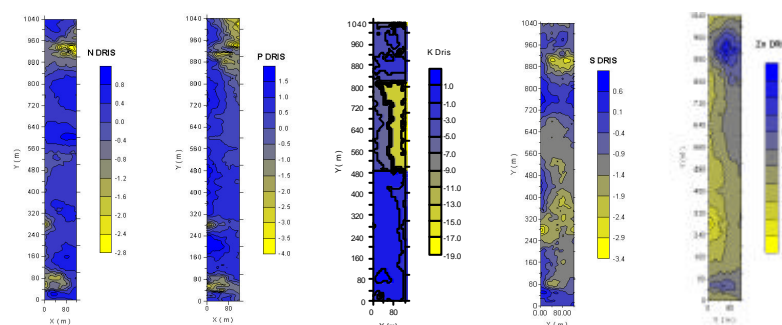


Fig. 7 - Mapas krigados de distribuição espacial dos índices DRIS para nitrogênio, fósforo, potássio, enxofre e zinco.

Conclusões

Dentro das condições que foi conduzido este trabalho, os resultados permitem concluir:

- o uso da geoestatística permitiu identificar a variabilidade espacial dos teores de nutrientes nas folhas de soja cultivada em sistema plantio direto.
- O conhecimento desta variabilidade espacial é a etapa inicial e imprescindível para subsidiar o planejamento e o manejo da área.
- Com base nos alcances dos semivariogramas, que a grade amostragem mais adequada para representar a variabilidade espacial dos teores de nutrientes nas folhas de soja foi de 20 por 20 m.
- Os métodos de avaliação do estado nutricional das faixas de suficiência e DRIS foram complementares, e indicaram que possivelmente o K foi o nutriente mais limitantes à produção de soja.

Agradecimentos

Ao Programa Prodetab (Proj No. 041-01/99), pelo financiamento, e à Fundação Giacometti pelo apoio na administração dos recursos. À Fundação ABC, através dos pesquisadores Volnei Pauletti e Leandro Gimenez pelo apoio técnico-científico. Ao proprietário da Fazenda Tabatinga, Sr. Geraldo Slob, pela permissão para a utilização da área no estudo, e ao Eng. Agrônomo José Carlos Sguario Jr. pelo apoio.

Às Assistentes de Operações Rojane Chapeta Peixoto Santos e Viviane Escaleira pelo preparo e condução das análises químicas em tecidos vegetais das amostras coletadas.

Referências Bibliográficas

BALDOCK, J. O.; SCHULTE, E. E. Plant analysis with standardized scores combines DRIS and sufficiency range approaches for corn. **Agronomy Journal**, Madison, v. 88, p. 448-456, 1996.

BEAUFILS, E. R. Pesquisa de uma exploração racional hévea após um diagnóstico fisiológico demorado sobre a análise mineral de diversas partes da planta. **Fertilité**, Paris, n.3, p.27-38, 1957.

BEAUFILS, E. R. Diagnosis and Recommendation Integrated System (DRIS); a general scheme for experimentation and calibration based on principles develop from research in plant nutrition. **Soil Science Bulletin**, Pretoria, v. 1, p.1-132, 1973.

BERNARDI, A. C. C.; CARMO, C. A. F. S.; MACHADO, P. L. O. A.; SILVA, C. A.; VALENCIA, L. I. O.; MEIRELLES, M. S. **Variabilidade espacial de teores de nutrientes em folhas de soja cultivada em sistema plantio direto como ferramentas para a agricultura de precisão**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002. 5 p. (Embrapa Solos. Comunicado Técnico, n. 17).

BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R. A. **Principles of geographical information systems**. New York: Oxford University Press, 1998. 333 p.

CLARK, I. **Practical geoestatistics**. London: Applied Science Publishers, 1979. 130 p.

DECHEN, A. R.; BATAGLIA, O. C.; SANTOS, W. R. Conceitos fundamentais da interpretação da análise de plantas. Fertilizantes: insumo básico para a agricultura e combate à fome. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 21. [Anais...] Petrolina, PE: [s.ed.], 1995. p. 87-113.

DEUTSCH, C. V.; JOURNEL, A. G. **GSLIB geostatistical software library and user's guide**. New York: Oxford University, 1992. 341 p.

DOW, A. I.; ROBERTS, A. I. Proposal: critical nutrient ranges for crop diagnosis. **Agronomy Journal**, Madison, v. 74, n. 2, p. 401-3, 1982.

FRANZEN, D. W.; PECK, T. R. Spatial variability of plant analysis calcium and magnesium levels before and after liming. **Communications 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 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 Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 28, n. 13/14, p. 1081-1091, 1997.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **Applied geostatistics**. New York: OxfordUniversity Press. 1989. 561 p.

JONES, C. A. Proposed modifications of the Diagnosis and Recommendation Integrated System (DRIS) for interpreting plant analyses **Communications Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 12, n. 8 p. 785-794, 1981.

LAMPARELLI, R. A. C.; ROCHA, J. V.; BORGHI, E. **Geoprocessamento e agricultura de precisão**. Guaíba: Agropecuária, 2001. 118 p.

LETZSCH, W. S.; SUMNER, M. E. Computer program for calculating DRIS índices. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**, v. 14, p.811-5, 1983.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2.ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319 p.

MCBRATNEY, A. B.; PRINGLE, M. J. Estimating average and proportional variograms of soil properties and their potential use in precision agriculture. **Precision Agriculture, LOCAL**, v. 1, n. 1, p. 125-152, 1999.

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.

MUNSON, R. D.; NELSON, W. L. Principles and practices in plant analysis. In: WESTERMAN, R. L.; BAIRD, J. V.; CHRISTENSEN, N. W.; FIXEN, P. E.; WHITNEY, D. A. (Ed.). **Soil testing and plant analysis**. Madison: SSSA. 1990. p. 359-387

PANNATIER, Y. **Variowin**: Software for Spatial data analysis in 2D. New York: Springer-Verlag, 1996. 91 p.

PECK, T. R. Plant analysis for production agriculture. In: SOIL PLANT ANALYST'S WORKSHOP, 7. Bridgeton, 1979. **Proceedings...** Bridgeton: [s.ed.], 1979. p. 1-45.

PREVOT, P.; OLLAGNIER, M. Methode d'utilisation du diagnostic foliarie. Plant Analysis and Fertilizer Problems. Paris: IHRO, 1956. p. 177-192.

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.; 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. 7 p. (Embrapa Solos. Comunicado Técnico, n. 10).

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

SUMNER, M. E. Interpretation of foliar analysis for diagnostic purposes. **Agronomy Journal**, Madison, v. 71, n. 2, p. 343-71, 1979.

TISDALE, S. L.; NELSON, W. L.; BEATON, J. D. **Soil fertility and fertilizers**. 4.ed. New York: Macmillan Publications., 1985. 754 p.

ULRICH, A.; HILLS, F. J. Principles and practices of plant analysis. In: Hardy, G. W., ed. **Soil testing and plant analysis**. Madison: American Society of Agronomy, 1967. p. 11-24. (SSSA Special Publications, 2).

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.