

Agricultura de Precisão para o Manejo da Fertilidade do Solo em Sistema Plantio Direto

Pedro Luiz O. de A. Machado
Alberto C. de Campos Bernardi
Carlos Alberto Silva



3.00379

Agricultura de precisão para o
2004 LV-2008.00379



37953-2

brapa

**Agricultura de precisão
para o manejo da fertilidade
do solo em sistema
plantio direto**

República Federativa do Brasil
Luiz Inácio Lula da Silva
Presidente

Ministério da Agricultura e do Abastecimento
Roberto Rodrigues
Ministro

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa)

Conselho de Administração

Luis Carlos Guedes Pinto
Presidente

Clayton Campanhola
Vice-Presidente

Alexandre Kalil Pires
Ernesto Paterniani
Hélio Tollini
Marcelo Barbosa Saintive
Membros

Diretoria-Executiva da Embrapa

Clayton Campanhola
Presidente

Mariza Marilena Tanajura Luz Barbosa
Herbert Cavalcante de Lima
Gustavo Kauark Chianca
Diretores executivos

Embrapa Solos

Celso Vainer Manzatto
Chefe Geral

Aluísio Granato de Andrade
Chefe-Adjunto de Pesquisa & Desenvolvimento

David Dias Moreira Filho
Chefe-Adjunto de Apoio Técnico/Administração

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

**Agricultura de precisão
para o manejo da fertilidade
do solo em sistema
plantio direto**

Editores

Pedro Luiz Oliveira de Almeida Machado
Alberto Carlos de Campos Bernardi
Carlos Alberto Silva

Rio de Janeiro, RJ
2004

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Solos

Rua Jardim Botânico, 1.024
22460-000 Rio de Janeiro, RJ
Tel: (21) 2274-4999
Fax: (21) 2274-5291
E-mail: sac@cnps.embrapa.br
Site: <http://www.cnps.embrapa.br>

Capa

Eduardo G. de Godoy

Fotos da Capa

Pedro Machado

Editoração Eletrônica

Ito e Wellington Lopes

Normalização bibliográfica

Maria da Penha Delaia

1ª edição

1ª impressão (2004): tiragem 500 exemplares

Embrapa	
Unidade:	Ai - Seale
Valor aquisição:
Data aquisição:
N.º N. Fiscal/Fatura:
Fornecedor:
N.º OCS:
Origem:	João
N.º Registro:	00379/08 ex 2

Embrapa Solos
Catalogação-na-publicação (CIP)

Machado, Pedro Luiz Oliveira de Almeida

Agricultura de precisão para o manejo da fertilidade do solo em sistema plantio direto / Pedro Luiz Oliveira de Almeida Machado, Alberto Carlos de Campos Bernardi, Carlos Alberto Silva (Ed.). - Rio de Janeiro : Embrapa Solos, 2004.

209p.

ISBN 85-85864-13-3

1. Mapeamento da produtividade 2. Geoestatística 3. DRIS 4. Adubação a taxas variáveis 5. Estoque de carbono 5. Inteligência artificial. I. Bernardi, Alberto Carlos de Campos. II. Silva, Carlos Alberto. III. Título. IV. Embrapa Solos (Rio de Janeiro).

CDD (21.ed.) 631.4

Copyright © 2004. Embrapa

Instituições Parceiras

- Embrapa Florestas
- Embrapa Meio Ambiente
- Embrapa Pecuária Sudeste
 - Fundação ABC
- Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ/USP)
 - Universidade Federal de Lavras (UFLA)
- Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)
 - Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

Autores

Aderaldo de Souza Silva

Embrapa Meio Ambiente
Rodovia SP 340 - Km 127,5 - Caixa Postal 69 - Cep 13820-000 - Jaguariúna-SP
aderaldo@cnpma.embrapa.br

Alberto Carlos de Campos Bernardi

Embrapa Pecuária Sudeste
Rod.Washington Luiz, Km 234 - Faz. Canchim Cx.P.339 - CEP 13560-970 - São Carlos-SP
alberto@cnpse.embrapa.br

Aluísio Granato de Andrade

Embrapa Solos
Rua Jardim Botânico, 1.024 - CEP 22460-000 - Rio de Janeiro-RJ
aluísio@cnps.embrapa.br

Ariovaldo Luchiari Junior

Embrapa Meio Ambiente
Rodovia SP 340 - Km 127,5 - Caixa Postal 69 - Cep 13820-000 - Jaguariúna-SP
luchiari@cnpma.embrapa.br

Beáta Eموke Madari

Embrapa Solos
Rua Jardim Botânico, 1024 - CEP 22460-000 - Rio de Janeiro-RJ
beata@cnps.embrapa.br

Carlos Alberto Silva

Universidade Federal de Lavras - Departamento de Ciência do Solo
Cx. Postal 3037 - CEP 37200-000 - Lavras-MG
csilva@ufla.br

Celso Valner Manzatto

Embrapa Solos
Rua Jardim Botânico, 1.024 - CEP 22460-000 - Rio de Janeiro-RJ
manzatto@cnps.embrapa.br

Ciríaca Arcangela Ferreira de Santana do Carmo

Embrapa Solos
Rua Jardim Botânico 1024 - CEP 22460-000 - Rio de Janeiro-RJ
ciriaca@cnps.embrapa.br

Cláudio César de Almeida Buschinelli

Embrapa Meio Ambiente
Rodovia SP 340 - Km 127,5 - Caixa Postal 69 - CEP 13820-000 - Jaguariúna-SP
buschi@cnpma.embrapa.br

Cláudio Bettini

Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Inst. de Geociências
Avenida Brig. Trompowski, s/n, Bloco F, Ilha do Fundão - Cidade Universitária - CEP 21941-590 - Rio de Janeiro-RJ
bettini@acd.ufrj.br

Fábio Braga Nunes Coelho

Universidade Federal do Rio de Janeiro – Núcleo de Computação Eletrônica
Av. Trompowski, s/n - C.P. 2324, Ilha do Fundão - CEP 20001-970 - Rio de Janeiro-RJ
fabio@on.br

Itamar Antonio Bognola

Embrapa Florestas
Estrada da Ribeira, S/N - Km 111- Caixa Postal, 319 - CEP 83411-000 - Colombo-PR
iabog@cnpf.embrapa.br

James S. Shepers

USDA-ARS
Keim Hall, East Campus - University of Nebraska
Lincoln, NE - USA 68583-0934
jshanahan1@unl.edu

John F. Shanahan

USDA-ARS
Keim Hall, East Campus - University of Nebraska
Lincoln, NE - USA 68583-0934
jshanahan1@unl.edu

José Paulo Molin

Departamento de Engenharia Rural - ESALQ/USP
Av. Pádua Dias, 11 - CEP 13418-900- Piracicaba-SP
jpmolin@esalq.usp.br

José Ruy Porto de Carvalho

Embrapa Informática Agropecuária
Av. André Tosello, 209 - Barão Geraldo - Caixa Postal 6041 - CEP 13083-886 - Campinas-SP
jrui@cnpia.embrapa.br

Leandro M. Gimenez

Fundação ABC
Rodovia PR 151, Km 288 CEP 84166-990 Castro-PR
mecaniza@fundacaoabc.org.br

Lucieta G. Martorano

Embrapa Solos
Rua Jardim Botânico, 1.024-CEP 22460-000 - Rio de Janeiro-RJ
luty@cnps.embrapa.br

Luis Iván Ortiz Valencia

Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Inst. de Geociências, Avenida Brig. Trompowski,
s/n, Bloco F, Ilha do Fundão - Cidade Universitária - CEP 21941-590 - Rio de Janeiro-RJ
liov@acd.ufrj.br

Luiz Carlos Hermes

Embrapa Meio Ambiente
Rodovia SP 340 - Km 127,5 - Caixa Postal 69 - Cep 13820-000 - Jaguariúna-SP
hermes@cnpma.embrapa.br

Margareth Simões Penello Meirelles

Embrapa Solos

Rua Jardim Botânico, 1.024 - CEP 22460-000 - Rio de Janeiro-RJ

margaret@cnps.embrapa.br

Marlon Moreira

Universidade do Estado do Rio de Janeiro – Departamento de Engenharia de Sistemas e Computação – Programa de Pós-Graduação - Geomática

Rua São Francisco Xavier, 524 - 5028 D - Maracanã - Rio de Janeiro

marlon@eng.uerj.br

Pedro Jorge Fasolo

Embrapa Florestas

Estrada da Ribeira, S/N, Km 11 - Caixa Postal, 319, CEP 83411-000 - Colombo-PR

pedrofasolo@zipmail.com.br

Pedro Luiz Oliveira de Almeida Machado

Embrapa Solos

Rua Jardim Botânico, 1.024 - CEP 22460-000 - Rio de Janeiro-RJ

pedro@cnps.embrapa.br

Silvio Barge Bhering

Embrapa Solos

Rua Jardim Botânico, 1024 - CEP 22460-000 - Rio de Janeiro-RJ

silvio@cnps.embrapa.br

Volnei Pauletti

Fundação ABC

Rodovia PR 151, Km 288 - CEP 84166-990 - Castro-PR

vpaoletti@fundacaoabc.org.br

Sumário

Apresentação	13
Prefácio	17
Capítulo 1	Agricultura de precisão e meio ambiente	19
Capítulo 2	Geoestatística aplicada à Agricultura de Precisão	37
Capítulo 3	Solos, Clima e Vegetação da Região de Campos Gerais	57
Capítulo 4	Mapeamento da Produtividade	77
Capítulo 5	Estudo de Caso em Agricultura de Precisão: Manejo de Lavoura de Soja na Região de Campos Gerais, PR	93
Capítulo 6	Variabilidade de Atributos de Fertilidade e Espacialização da Recomendação de Adubação e Calagem para a Soja	115
Capítulo 7	Avaliação Espacializada do Estado Nutricional da Soja	131
Capítulo 8	Aplicação de Fertilizantes a Taxas Variáveis	153
Capítulo 9	Espacialização do Estoque de Carbono do Solo em Lavoura de Soja	165
Capítulo 10	Uso de Inteligência Artificial em Agricultura de Precisão: Redes Bayesianas e Redes Neurais	175
Capítulo 11	Agricultura de Precisão: Visão de uma Instituição de Pesquisa Aplicada	197

Apresentação

Este livro representa a consolidação do trabalho de pesquisa intitulado "Métodos de Amostragem Georreferenciada e Ajuste da Adubação da Soja sob Rotação de Culturas em Plantio Direto Utilizando Técnicas de Agricultura de Precisão", coordenado pelo pesquisador Dr. Pedro Luiz Oliveira de Almeida Machado, da Embrapa Solos, no período de janeiro de 2000 a dezembro de 2002. O referido trabalho foi premiado com a terceira colocação na categoria Criatividade, pelo Sistema de Avaliação e Premiação por Resultados da Embrapa - SAPRE (Novembro 2000). Os trabalhos foram conduzidos na Fazenda Tabatinga ($24^{\circ}51'45''$ S e $50^{\circ}15'58''$; 870 m acima do nível do mar), município de Carambeí, região dos Campos Gerais, estado do Paraná (Figura 1).

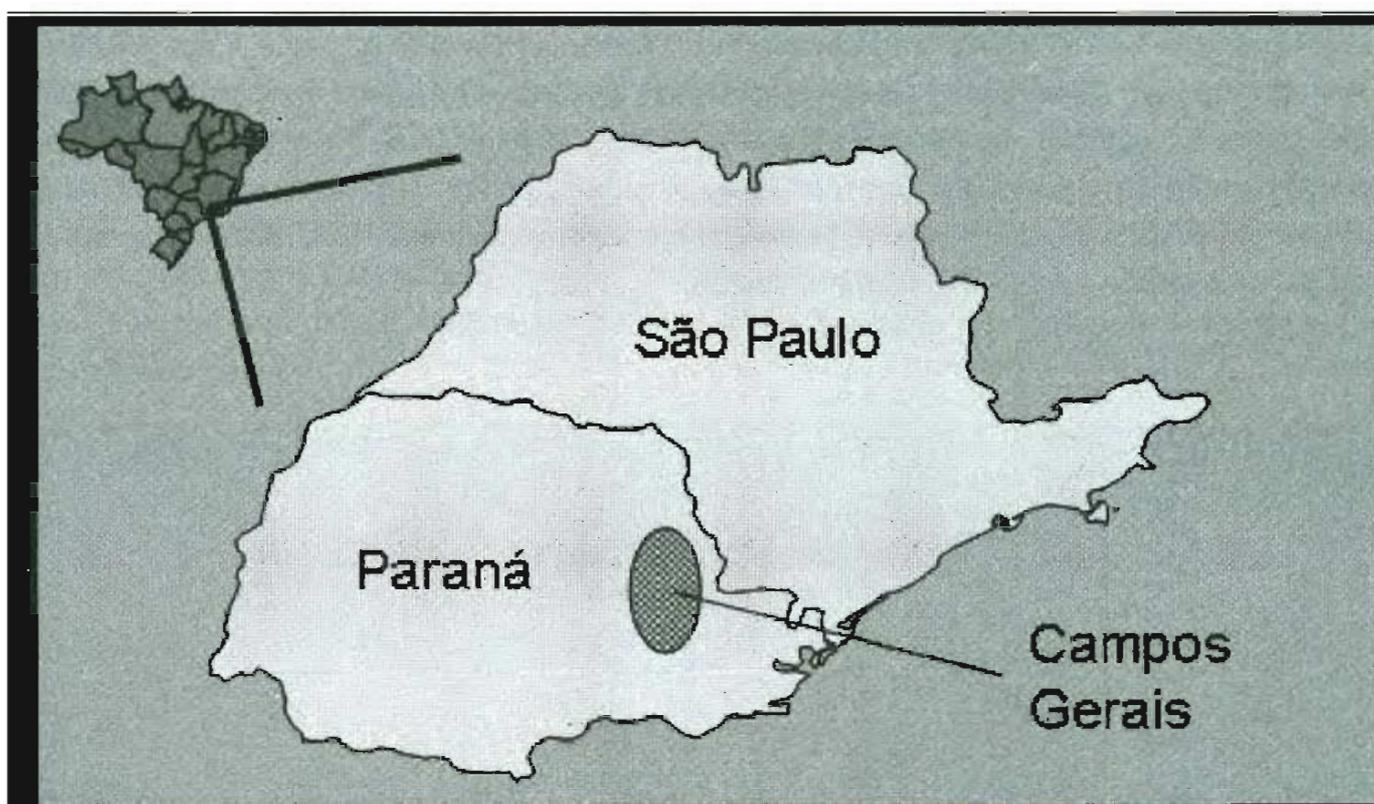


Figura 1. Localização esquemática da região dos Campos Gerais, estado do Paraná.

Os primeiros quatro capítulos apresentam aspectos gerais relevantes da agricultura de precisão, quanto à sua contribuição para a otimização da produtividade agrícola com simultâneo monitoramento do impacto ambiental (capítulo 1), quanto à importância da geoestatística na avaliação da variabilidade espacial das medidas de propriedades do solo e estado nutricional das plantas (capítulo 2), quanto à grande contribuição que o conhecimento da geografia física regional, no caso, da região dos Campos Gerais, estado do Paraná, para melhor compreender as variações mais localizadas, em escala de talhão, de uma propriedade agrícola (capítulo 3) e quanto ao monitoramento da produtividade das culturas (capítulo 4), considerada como uma das mais importantes ferramentas para auxiliar na definição das zonas de manejo de um siste-

ma de produção agrícola. Em seguida, é apresentado um estudo de caso, ou seja, como foi feita a avaliação das variáveis de solo e planta para a identificação dos fatores condicionantes da heterogeneidade da produção de soja num talhão de 13 hectares da Fazenda Tabatinga, Carambeí, PR (capítulos 5, 6 e 7). O capítulo 8 explica como foi feita a intervenção na área avaliando-se a aplicação de adubo potássico a taxas variáveis em parcelas de 1.000 metros de distância no talhão. No capítulo 9, num contexto ambiental, especificamente em relação ao carbono do solo sob plantio direto e contribuição para a mitigação da mudança climática global, é apresentado como o estoque de carbono do solo (em toneladas por hectare) varia numa área de 13 hectares. Este capítulo oferece uma evidência de que as técnicas de agricultura de precisão podem ser úteis também para avaliar a contribuição do sistema de produção em plantio direto para o meio ambiente. O capítulo 10 demonstra a aplicação de novas ferramentas como as Redes Neurais e Redes Bayesianas, utilizando dados de solo e planta obtidos ao longo da execução dos trabalhos. Estas novas ferramentas apresentam forte potencial para a simulação da produção de grãos numa propriedade agrícola e merece estudo mais detalhado. Finalmente, no capítulo 11, há um relato sobre como a agricultura de precisão vem sendo conduzida pela Fundação ABC, uma instituição privada de pesquisa e extensão agropecuárias, com descrição de um histórico institucional que condicionou a adoção das técnicas de agricultura de precisão na região dos Campos Gerais.



Figura 2. Primeiras visitas na Fazenda Tabatinga, Carambeí, PR, em dezembro de 1999. Da esquerda para direita: Prof. José P. Molin (ESALQ/USP), Sr. Paulo Gallo (Técnico Agrícola - Fundação ABC) e o Eng. Agr. Geraldo Slob (Proprietário da Fazenda Tabatinga). Foto: Pedro Machado.

O trabalho de pesquisa foi executado em parceria com o Departamento de Engenharia Rural da ESALQ/USP (Piracicaba, SP) e com a Fundação ABC para a Assistência e Divulgação Técnica Agropecuária (Castro, PR). A execução dos trabalhos seria impossível sem a colaboração do produtor e Engenheiro Agrônomo, Sr. Geraldo Slob, proprietário da Fazenda Tabatinga em Carambeí, PR, local onde os estudos de campo foram conduzidos (Figura 2). Nosso muito obrigado a José Carlos Sguario Jr. (ZS Agrícola Planejamento e Assistência Técnica) e José Carlos Moro (ABC Levantamentos Topográficos Ltda.).

Agradecemos também ao apoio financeiro do Projeto de Apoio ao Desenvolvimento de Tecnologia Agropecuária para o Brasil (PRODETAB Projeto N° 041-01/99), coordenado pela Embrapa através da Coordenadoria de Cooperação Internacional (CCI) e ao auxílio da Fundação Carlos Chagas de Apoio à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ - Proj. Nr. E-26/171.528/00-APQ1). O projeto recebeu apoio administrativo da Fundação de Apoio a Recursos Genéticos e Biotecnologia Dalmo Catauli Giacometti, Brasília, DF. Nosso especial agradecimento ao Programa Labex-EUA, área de Agricultura de Precisão.

Seria impossível enumerar todas as instituições e pessoas que colaboraram para o sucesso deste projeto e para a compilação deste livro. Agradecemos, portanto, a todos que de alguma forma colaboraram para o êxito deste trabalho e nos auxiliaram na obtenção dos resultados aqui apresentados.

Celso Vainer Manzatto
Chefe Geral, Embrapa Solos

Prefácio

A área agrícola do Brasil entre 1990 e 2003 expandiu 24,3%, com crescimento de 125% da produtividade. Na safra de 2002/2003, o agronegócio brasileiro, em razão do recorde de produção de grãos e de bons resultados em outras atividades agrícolas, foi responsável por 25% do PIB nacional, 37% dos empregos gerados, 44% das exportações brasileiras e US\$22 bilhões de *superavit* na balança comercial. Com esses números, consolida-se o papel determinante do agronegócio brasileiro na geração de riqueza e desenvolvimento nacional, conferindo ao Brasil a condição de grande potência agrícola. Nesse cenário, a soja se destaca, uma vez que, em exportações, no ano de 2004, essa cultura gerou uma receita cambial de cerca de 10 bilhões de dólares. Além de ser o segundo produtor mundial de soja, os níveis de produtividade da cultura no Brasil (cerca de 2400 kg/ha) equivalem aos maiores concorrentes (ex. Estados Unidos). A área de soja plantada na safra 2003/2004 foi de cerca de 22 milhões de hectares na qual foram colhidas cerca de 50 milhões de toneladas. Existe a perspectiva de, a partir de 2010, a produção brasileira de soja superar a norte-americana, com uma produção de 76 milhões de toneladas, ante 73 milhões de toneladas dos EUA. Esse nível de eficiência da cadeia produtiva da soja exige um gerenciamento constante e eficiente dos fatores de produção, sob pena de os custos serem aumentados e os lucros reduzidos. Além disso, a falta de planejamento agrícola e o uso e manejo inadequados do solo, em muitos casos, têm levado ao agravamento dos impactos ambientais da atividade agrícola, provocando desmatamento, erosão do solo e poluição de águas. Essa degradação pode levar à perda de diversidade biológica, acelerar as mudanças climáticas e alterar os ciclos hidrológicos. Assim, no Brasil, o planejamento do uso da terra associado à adoção de práticas conservacionistas, como o sistema plantio direto, e as técnicas de agricultura de precisão (AP), são essenciais para se produzir alimentos, fibras e energia de modo sustentável .

Acredita-se que o conceito de agricultura de precisão tenha surgido juntamente com o advento dos experimentos de uniformidade (*uniformity trials*), instalados em Rothamsted, Grã-Bretanha, em 1925, e com os estudos de acidez do solo na Universidade de Illinois, EUA, em 1929. Entretanto, o desenvolvimento mais marcante da agricultura de precisão no cultivo de grãos tem ocorrido nos últimos anos e coincide com o aparecimento e aplicação de tecnologias variadas, como microcomputadores com maior capacidade de processamento de dados, aparelhos GPS (do inglês: *Global Positioning System*), monitoramento da produtividade de grãos, geoestatística e bancos de dados georeferenciados. As técnicas de manejo utilizadas por agricultores que adotam o ferramental de agricultura de precisão podem ser classificadas como aquelas que se baseiam no uso de mapas ou de sensores. As técnicas baseadas em mapas implicam que a informação utilizada para as interferências numa área seja obtida anteriormente à interferência ou manejo, utilizando-se ferramentas, tais como a grade de amostragem de solo ou monitores de produtividade. A informação é, assim, integrada para criar um mapa de taxas de aplicação de um determinado insumo para um talhão. As técnicas baseadas em

sensores são aquelas em que esses instrumentos são acoplados a implementos (ex. adubadeiras para aplicação a taxas variáveis), medem propriedades ou características do solo em tempo real e as taxas de aplicação de insumos ajustadas conforme necessidade em cada parte do talhão. O estudo de caso apresentado neste livro se caracteriza pelo uso da técnica baseada em mapas de colheita e de suas associações com fatores de produção, os quais, no presente estudo, são características e propriedades georreferenciadas de solo e planta. É importante ressaltar que não será apenas o emprego de uma tecnologia isolada que irá solucionar os problemas. Dependendo do problema e do perfil do usuário da tecnologia, a solução para o problema constatado na lavoura, em pequena ou grande escala, pode requerer diferentes ferramentas. Daí o importante papel da pesquisa em procurar avaliar e integrar diferentes ferramentas disponíveis e desenvolvidas individualmente em um conjunto acessível a cada perfil sócio-econômico do agricultor, inclusive a agricultura familiar. É com base na sistematização e adaptação das tecnologias geradas pela pesquisa que os diferentes problemas associados ao manejo das lavouras poderão ser adequadamente solucionados.

A agricultura de precisão, certamente, não está limitada ao uso de tecnologias e equipamentos de ponta pelos produtores de países desenvolvidos. O maior desafio está justamente na quantificação e integração das variações espaço-temporais da produtividade das culturas, variáveis essas associadas ao solo e à planta, e condicionadas pelos mais de 54 fatores determinantes do crescimento e desenvolvimento das culturas. Acreditamos que o ferramental de agricultura de precisão deva ser testado e adaptado para os diferentes agentes e atores que compõem a cadeia produtiva da soja, tanto os que agregam mais quanto os que agregam menos tecnologia. Baseando-se nesse princípio de democratização do conhecimento gerado pela pesquisa brasileira, acreditamos que os resultados apresentados venham a contribuir tanto para os nossos agricultores como para aqueles de outros países em desenvolvimento. Assim, esta publicação representa um esforço de instituições de pesquisa, ensino e extensão rural que têm desenvolvido ações no sentido de tornar a agricultura brasileira cada vez mais eficiente, competitiva e sustentável. Os resultados aqui apresentados refletem o esforço da equipe envolvida neste projeto, em sistematizar e gerar informações associadas ao uso de ferramental de agricultura de precisão no manejo da fertilidade do solo sob sistema plantio direto de soja, na Região de Campos Gerais, Paraná.

A Embrapa, Fundação ABC, ESALQ/USP, UFLA, UERJ e UFRJ esperam, assim, continuarem contribuindo na busca de tecnologias que visem diminuir custos, aumentar a produtividade das culturas com simultânea preservação dos recursos naturais, de modo que esses benefícios resultem em maior competitividade do agricultor brasileiro no mercado da soja cada vez mais exigente.



Agricultura de precisão e meio ambiente

Ariovaldo Luchiar Junior

Aderaldo de Souza Silva

Cláudio César de Almeida Buschinelli

Luiz Carlos Hermes

José Ruy Porto Carvalho

John Shanahan

James S. Schepers

Resumo

Os recentes desenvolvimentos e adoção dos conceitos para práticas de manejo em sítios específicos ou agricultura de precisão, tem implicado em mudanças estruturais nos processos de geração e de tomada de decisão quanto ao uso das tecnologias agrícolas, geoespaciais e da informação para fins agrícolas. Esse avanço ou inovação tecnológica por ter incluído em sua concepção o uso mais racional de insumos, a possibilidade de preservar e rastrear a qualidade dos produtos agrícolas mostrando possibilidades reais de ganhos econômicos e benefícios ambientais.

Tais fatos e macro-tendências têm atraído o interesse de formuladores de políticas públicas de pesquisa, de ensino, de desenvolvimento econômico e social, de regulamentação e gestão ambiental, no sentido de que os componentes tecnológicos sejam organizados de forma a atender interesses multissetoriais.

Como muito tem sido relatado em relação ao manejo de insumos e seus efeitos na produtividade das culturas e índices econômicos, o propósito maior desta apresentação é o de relatar a evolução das ações de pesquisa e desenvolvimento em manejo de nitrogênio em culturas anuais realizadas no ARS-EMBRAPA-LABEX para mitigar e recuperar a qualidade das águas subterrâneas e superficiais com teores de nitrato acima dos níveis recomendados de potabilidade. Também serão apresentados os resultados obtidos pela aplicação do conceito de zonas homogêneas e de procedimentos de análise geoespaciais para delinear áreas para o manejo mais eficiente de insumos em sítios e para orientar o desenvolvimento de práticas de manejo mitigadoras de possíveis riscos ambientais em fruticultura irrigada no nordeste brasileiro.

Uso e Manejo de Nitrogênio e Qualidade da Água no Cinturão de Milho dos Estados Unidos

Os produtores agrícolas da Região do Cinturão do Milho dos Estados Unidos aplicam anualmente

quantidades significativas de fertilizantes nitrogenados para obter os altos índices de produtividade tipicamente alcançados na região. Predominantemente, a aplicação do fertilizante nitrogenado é feita nas formas líquida ou gasosa, em dosagens uniformes aplicadas em pré-plantio ou cobertura nos estádios iniciais do desenvolvimento da cultura devido ao tempo e custos envolvidos nesta prática de manejo. Entretanto, devido à variabilidade espacial que naturalmente ocorre nos solos da região, nem todas as áreas do terreno requerem as mesmas quantidades deste elemento, resultando em algumas áreas que recebem nitrogênio em níveis acima e outras áreas abaixo dos requeridos para a cultura, levando a reduções na eficiência de uso agrônômico do N (EUAN) e também em perdas do elemento para a atmosfera ou para fora da zona de absorção radicular. Raun & Johnson (1999) estimam que a EUAN mundial para os sistemas de produção de cereais seja de 33%, sendo que a resultante perda de 67% representa um prejuízo anual de US\$ 15.9 bilhões, quando convertida em custo dos fertilizantes. Adicionalmente, as perdas de N resultam em contaminação ambiental pelo nitrato perdido por erosão ou por lixiviação, tornando-o o agente mais comum de contaminação das águas superficiais e subterrâneas do Cinturão de Milho (CAST, 1999). No estado de Nebraska, estudos mostram que, em algumas áreas, as águas do Rio Platte e do Aquífero Ogallala têm apresentado níveis de nitrato acima dos limites de potabilidade (10 ppm) estabelecido pela Agência de Proteção Ambiental Americana (EPA).

O principal fator que contribui para o decréscimo da EUAN e para a contaminação ambiental por nitrato é a tradicional prática de manejo de se aplicar grandes quantidades do fertilizante nitrogenado em pré-plantio, normalmente no outono (setembro-outubro), ou seja, numa época anterior ao período no qual a cultura possa utilizar este elemento de forma efetiva. O fertilizante nitrogenado fica armazenado no solo por longo período de tempo (5-6 meses) e o solo passa por fases de congelamento no inverno (dezembro a março) e de descongelamento na primavera (abril a maio), colocando o nitrogênio nele armazenado numa condição de alto risco de contaminação ao ambiente (Raun & Johnson, 1999). Estes autores ainda mostram que os resultados obtidos em pesquisas prévias indicam que a EUAN pode ser muito incrementada, desde que a aplicação em pré-plantio seja minimizada ou mesmo eliminada e que seja dada maior ênfase à aplicação parcelada do elemento em cobertura em quantidades requeridas nos diferentes estádios de crescimento do milho. Tais fatos levaram os pesquisadores da Unidade de Conservação de Solo e Água do Serviço de Pesquisa Agrícola do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA-ARS-SWCRU) a adotarem estratégias de manejo baseada no uso de informações da planta e do solo para manejo de N focalizado no incremento dos índices de produtividade da cultura e na recuperação da qualidade das águas contaminadas por nitratos.

Estratégias baseadas na planta.

Medidas do teor de clorofila

Trabalhos prévios de Blackmer & Schepers (1994), Blackmer et al. (1993) e Blackmer & Schepers (1995), usando o medidor de clorofila Minolta SPAD 502 para monitorar no tempo e no espaço o

nível de N nas folhas do milho e fazer as aplicações de N conforme requerido em função dos teores presentes no dossel vegetativo e estágio de desenvolvimento, mostraram que a aplicação de N baseada neste método apresentava um avanço sobre o método tradicional baseado em medidas do conteúdo de N no solo. Estes trabalhos mostraram outros fatos que contribuiriam para o aumento da EAUN, como por exemplo, que uma vez detectado o nível de estresse pelo medidor de clorofila e imediatamente aplicando o N em taxas variadas por fertirrigação, índices equivalentes de produtividade poderiam ser obtidos com quantidades menores de nitrogênio do que os requeridos pela análise de solo. Estresses de N e queda dos índices de produtividade das parcelas experimentais foram obtidos sempre que as leituras do conteúdo de clorofila estavam abaixo do valor de 95% das leituras obtidas em faixas de referência que obtiveram níveis adequados ou em excesso de N no plantio. Os autores sugeriram a denominação de “índice de suficiência” para o valor de 95% e que este parâmetro seria razoável para determinar o momento e a quantidade de N a ser aplicado em plantas deficientes deste elemento. Subseqüentemente, Varvel et al. (1997) confirmaram estes fatos num estudo feito em parcelas experimentais no qual o N era aplicado quantas vezes fosse requerido em função dos valores medidos entre os estádios V8 (crescimento vegetativo) e R2 (reprodutivo-embonecamento). Outros fatos demonstrados foram: 1) o medidor de clorofila mostrou ser um instrumento adequado para ser usado em estudos experimentais que visem monitorar e manter os teores adequados de N requerido pela cultura do milho e; 2) as quantidades de N aplicadas usando-se este procedimento foram menores que as requeridas utilizando-se a aplicação em pré-plantio (Varvel et al., 1997). Estes fatos mostram ser realista a possibilidade de se minimizar ou reduzir a aplicação uniforme de N em pré-plantio e de se partir para uma abordagem mais eficaz, com estudos realizados em áreas de produção, envolvendo a avaliação e monitoramento dos teores e aplicação parcelada do N requerido nas frequências necessárias para atingir níveis produtivos satisfatórios (Schepers et al., 1992; Raun & Johnson, 1999). Esta abordagem deveria reduzir as perdas potenciais de N para o ambiente e ao mesmo tempo reduziria as preocupações dos produtores em relação ao momento de aplicação de N devido às constantes mudanças das condições climáticas predominantes no meio-oeste americano. Entretanto, enquanto as pesquisas em parcelas experimentais produziram resultados favoráveis e animadores em relação ao manejo de N, a extrapolação destes conceitos para uma escala maior, como um campo de produção irrigado por pivô central, revelou as dificuldades em se coletar dados com o medidor de clorofila e em quantidades suficientes para caracterizar as variabilidades espacial e temporal presentes no campo cultivado (Schepers et al 1992). Estes fatos evidenciaram claramente a necessidade de tecnologias que possibilitassem a mesma qualidade e precisão das medidas obtidas com o medidor de clorofila, mas numa área maior (produção comercial).

Uso de Sensores Remotos

Diante destas circunstâncias o sensoriamento remoto – processo de se obter informações de objetos alvos de plataformas remotas como sensores de terra, i.e., montados em tratores ou outros veículos; aeroplanos, ou satélites – é uma opção para se avaliar o nível de N num campo cultivado (Moran et al., 1997; National Research Council, 1997) visto que esta técnica

já havia sido empregada por outros cientistas para caracterizar a variabilidade espacial de áreas cultivadas (Bhatti et al., 1991; Atkinson et al., 1992). Ademais, havia evidências suficientes suportando a meta de longo prazo desta linha de pesquisa, que está direcionada para o desenvolvimento de formas práticas para a determinação do conteúdo de clorofila.

Plantas com elevados níveis de N normalmente possuem elevados níveis de clorofila (Inada, 1965; Al-Abbas et al., 1974; Wolfe et al., 1988) e altas taxas de fotossíntese (Sinclair & Horie, 1989). A clorofila presente nas folhas de plantas cultivadas apresenta dois picos de absorção: um no azul (ao redor de 450 nm), outro no vermelho (ao redor de 670 nm) e um de reflexão no verde (ao redor de 550 nm) do espectro da radiação solar. O medidor de clorofila Minolta SPAD 502 mede a luz transmitida no vermelho (650 nm) e no infra vermelho próximo (940nm) do espectro de luz para estimar o conteúdo de clorofila da folha (Blackmer et al., 1994). A relação positiva entre os níveis de verde e o conteúdo de N nas folhas indica ser possível acessar o nível de N através de medidas remotas da reflectância do dossel vegetativo (Walburg et al., 1982; Hinzman et al., 1986; Dwyer et al., 1991) ou das folhas (McMurtrey et al., 1994).

Entretanto, existem ainda dificuldades técnicas em relação ao uso de imagens aéreas obtidas por satélites ou avião para acessar o nível de N, particularmente em condições de cobertura incompleta do solo pela cultura. Por exemplo, Shanahan et al (2001) periodicamente coletaram imagens aéreas, durante a maior parte do ciclo da cultura do milho, utilizando um sistema de câmeras digitais que possibilitava a leitura em quatro bandas: azul, verde, vermelho e infra-vermelho. A partir dos dados de reflectância obtidos nas bandas verde e infra-vermelho foi construído um índice de vegetação de diferença normalizada na faixa do verde (GNDVI- Green Normalized Difference Vegetation Index) que se mostrou muito robusto para acessar a variabilidade do conteúdo de N no dossel vegetativo antes e depois do pendoamento. Outros pesquisadores tentaram remover o efeito do solo utilizando manipulações matemáticas dos dados obtidos em diferentes faixas do espectro e construíram novos índices, como por exemplo, o índice de vegetação ajustado do solo (SAVI), mas com um sucesso limitado (Huete, 1988; Rondeaux et. al, 1996). De tudo isso pode-se concluir que o uso de imagens aéreas para avaliar a distribuição espacial de N em culturas comerciais tem um potencial limitado em condições de cobertura incompleta do solo, mas se mostra promissor para uso em condições de cobertura completa do solo.

Considerando os problemas técnicos e operacionais envolvidos com a foto aérea, como qualidade, resolução, custo e tempo de processamento da imagem e a confiabilidade em se obter o produto a tempo hábil de se tomar decisões de manejo, Blackmer et al. (1995), Francis et al. (2000) e Luchiari Junior et al (2000) mostram que o uso de sensores para medidas em tempo real do conteúdo de N é uma alternativa promissora. Outra vantagem importante do uso de sensores de tempo real sobre as imagens aéreas, é a de que o sensor pode ser posicionado de forma a minimizar o efeito de exposição do solo. Tais fatos encorajaram o grupo a desenvolver sensores simples, para uso em plantações comerciais, para sensoriar remotamente o

nível de N e ao mesmo tempo aplicar localizadamente o fertilizante nitrogenado para suprir as quantidades de N requeridas pela cultura.

Dados coletados com estes sensores durante o período de crescimento em 2000, em parcelas experimentais, foram animadores. Resultados de reflectância mostraram que o comprimento de onda na faixa de 550 nm (verde) foi o mais sensível para acessar variações no conteúdo de clorofila das folhas, que por sua vez é associado ao conteúdo de N. E, ademais, que as leituras obtidas com os sensores foram altamente correlacionadas com medidas de clorofila efetuadas nas plantas. Tais fatos indicam que o sensor, por detectar variações no conteúdo de clorofila, é também capaz de detectar variações de N, quando as leituras do sensor expressas como índice de vegetação tiveram uma alta correlação ($R^2=0.89$) com as medidas dos teores de clorofila na folha. Para testar estas premissas numa escala maior, num campo cultivado com milho, e também para avaliar suas capacidades de mapeamento os sensores foram montados num trator de rodado alto, equipado com GPS para medidas em tempo real e georreferenciadas.

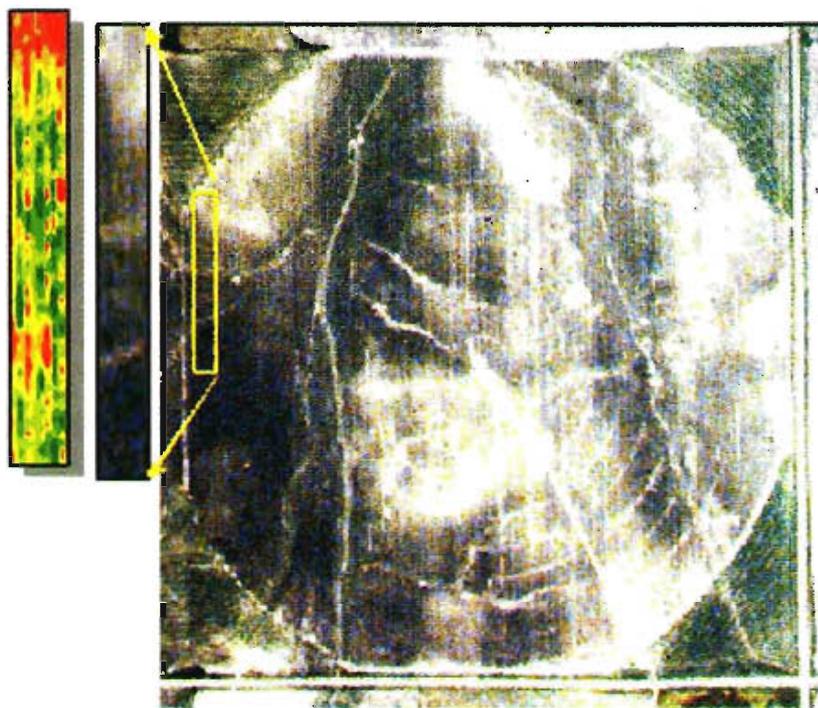


Figura 1. Leituras georeferenciadas do sensor de clorofila numa área de produção comercial de milho (verde altos, amarelo médios e vermelho baixos teores) nos EUA.

Os resultados apresentados na Figura 1 mostraram as capacidades dos sensores em detectar e mapear variações no conteúdo de N, indicando que os mesmos poderiam ser utilizados para o mapeamento de deficiências e subseqüentemente no direcionamento da aplicação localizada do fertilizante nitrogenado numa só operação. A principal vantagem do uso destes sensores é de que os mesmos foram desenvolvidos para trabalharem sob condições de nebulosidade associado ao fato de que mostraram ser robustos para o uso em operações de cam-

po. Entretanto, esforços de pesquisa ainda estão em andamento para o desenvolvimento de algoritmos que traduzam as leituras desses sensores em decisões práticas de manejo para a aplicação localizada e em tempo real de N.

Zonas Homogêneas de Manejo

Outra abordagem para se avaliar a necessidade de se manejar insumos é baseada no solo. A prática da agricultura de precisão foi primeiramente iniciada com o propósito de manejo de nutrientes, fundamentado unicamente num esquema de amostragem de solo em malha. Como este era um procedimento que teve muitos resultados de sucesso quando usado em parcelas experimentais, avaliou-se que o mesmo seria muito promissor também quando utilizado em grandes áreas. Acreditava-se que este procedimento seria capaz de identificar todas as causas das variabilidades dos rendimentos de um campo cultivado. Uma malha de 1 ha por amostra foi definida para a maioria das aplicações e a partir dessas amostragens os mapas de fertilidade e de recomendações eram construídos. Entretanto, a maioria dos agricultores ficou desapontada, porque a variabilidade nos rendimentos de seus campos de produção não desapareceu (Schepers et al. 2000). Estudos geoestatísticos a esse respeito, mostraram que os mapas resultantes apresentavam distorções devido ao local de coleta da amostra (centro ou intersecção da malha) e ao tamanho da malha de amostragem (Schepers et al 2000) do que devido ao método de interpolação empregado, kriging ou potência do inverso da distância (Varvel et al., 1999). Adicionalmente, outro problema que emergiu foi referente aos custos envolvidos nos esquemas das amostragens e das análises de solo e que começou a ser questionado pelos agricultores, quanto à sua viabilidade prática e econômica. Destes questionamentos novas direções começaram a ser buscadas. Varvel et al. 1999 mostrou que a imagem aérea de um solo nu apresentava um mesmo padrão de distribuição de matéria orgânica e de nutrientes do que os mapas resultantes de um esquema intensivo de amostragem em malha fina. A partir deste estudo, um grande número de produtores e provedores de serviço começaram a considerar o uso de imagem aérea para orientar os locais de amostragens e diminuir custos de coletas e análises. Novas abordagens, como zonas homogêneas de manejo mostraram-se promissoras para indicar os locais nos quais as amostragens deveriam ser feitas. Luchiari Junior et al. (2000), conceituam zonas de manejo como sendo áreas do terreno de iguais produção potencial, eficiência do uso de insumos e risco de impacto ambiental.

Aplicação do Conceito de Zonas de Manejo nos EUA

Luchiari Junior et al. (2000) e Shanahan et al (2000) utilizaram mapas de colheita, mapas de condutividade elétrica do solo, mapas de classificação de solos, imagens do solo e de plantas para delinear zonas homogêneas de manejo e para direcionar as amostragens de solo em duas situações: em Nebraska, para o manejo de N e no Colorado, para analisar o efeito de diferentes densidades de plantio em função das características do terreno e seus efeitos nos rendimentos do milho. Aqui serão apresentados os procedimentos utilizados em Nebraska.

Uma foto aérea da área de estudo foi tirada na primavera de 1999, quando o solo estava descoberto. Uma câmara fotográfica equipada com um filme colorido de 35mm (Kodak Ektachrome) foi montada numa aeronave e quando esta atingiu a altitude aproximada de 2130 m a foto foi tirada. Antes da aquisição da imagem, cinco alvos (placas de madeira de 1.2 x 2.4m pintadas de branco) foram colocadas no centro e no perímetro da área. As coordenadas geográficas destes alvos foram obtidas com um GPS diferencial e usadas para o geo-referenciamento da imagem. Uma versão impressa da imagem geo-referenciada foi mostrada ao produtor. A ele foi solicitado que desenhasse na imagem os contornos das áreas de baixa, média e alta produção do terreno. Este procedimento foi denominado como zonas de manejo estabelecidas pelo produtor. Em seguida, a foto foi escaneada, importada para um sistema de informação geográfica-SIG (ERDAS, Atlanta, GA), georreferenciada e processada em valores de reflectância para o azul, verde e vermelho. Os valores de reflectância foram processados e interpretados digitalmente para gerar três zonas de manejo, as quais foram denominadas zonas geradas pelo computador. Com base na interpretação destes dois procedimentos, foi estabelecido um esquema de amostragem geo-referenciada para caracterizar as propriedades químicas do solo em diferentes pontos das três zonas. Em cada ponto uma amostra composta para a camada de 0-20 cm foi obtida. Estabeleceu-se um círculo de 20 m de diâmetro, dividido em 4 partes, nas quais foram coletadas cinco amostras na profundidade de 0-20 cm. Um total de 48 pontos foram amostrados e analisados quanto aos seguintes parâmetros: pH, matéria orgânica, nitrato e fósforo.

A condutividade elétrica do solo (0-90cm) foi mapeada usando-se um sensor de indução magnética do solo (EM 38, Geonics Ltd, Ontário, Canadá), conectado a um DGPS, montado numa pequena carreta não-metálica a 36 cm da superfície do solo, movendo-se a 6 km/h em faixas contínuas espaçadas em 20 m de intervalo. As medidas geo-referenciadas de condutividade elétrica do solo e de elevação do terreno foram coletadas em intervalos de um segundo.

Mapas de colheita ou produtividade foram obtidos em 1997, 1998, 1999, 2000 e 2001 com uma colhedora de 12 linhas John Deere 9600, equipada com o monitor de colheita Green Star. Dados de produtividade, umidade dos grãos e coordenadas geográficas foram registrados a cada segundo. Os dados de produtividade foram processados e mapeados com o programa Farm HMS (Red Hen System, Fort Collins, CO).

Os mapas de condutividade elétrica, altitude do terreno, reflectância do solo e produtividade de grãos foram obtidos usando-se o método de interpolação do inverso do quadrado da distância com malhas de 15 m.

Análise de correlação simples foi usada para determinar a associação da produtividade com vários atributos do terreno. O método de regressão múltipla usando-se o "stepwise" para seleção de variáveis foi usado para determinar a importância dos atributos do terreno nos índices de produtividade.

A área estudada exibiu uma variabilidade considerável na cor do solo e na topografia (Figura. 2). As áreas mais escuras (menos reflectivas) são solos com maiores teores de matéria orgânica que estão localizados nas partes mais baixas do terreno, enquanto as áreas mais claras são solos com menores teores de matéria orgânica, dissecados pela erosão e localizados nas partes mais elevadas do terreno. Na Tabela 1 são mostrados os valores dos principais indicadores de solo associados a produtividade potencial. É possível ver claramente que a amostragem direcionada possibilitou caracterizar distintamente as zonas de manejo. Solos mais escuros, localizados na parte mais baixa do terreno, apresentaram um maior grau de fertilidade do que os solos mais claros localizados nas partes altas do terreno. Os altos teores de nitrato e de fósforo nas baixadas foram devidos ao acúmulo destes elementos provenientes das partes mais altas, transportados por processos de erosão e lixiviação. Os níveis de nitrato estavam acima dos requerimentos da cultura e já apresentam risco de contaminação da água subterrânea. Ficou então evidenciada a necessidade de se intervir no manejo deste elemento.



Figura 2. Foto Aérea de Solo Descoberto.

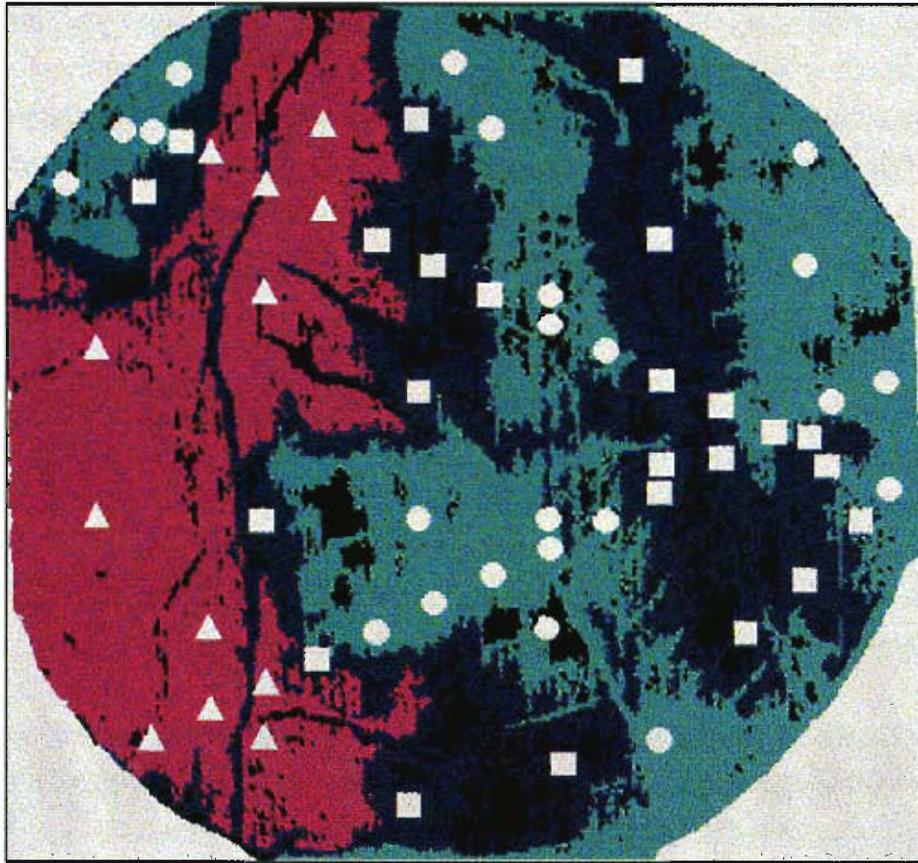


Figura 3. Zonas Homogêneas de Manejo

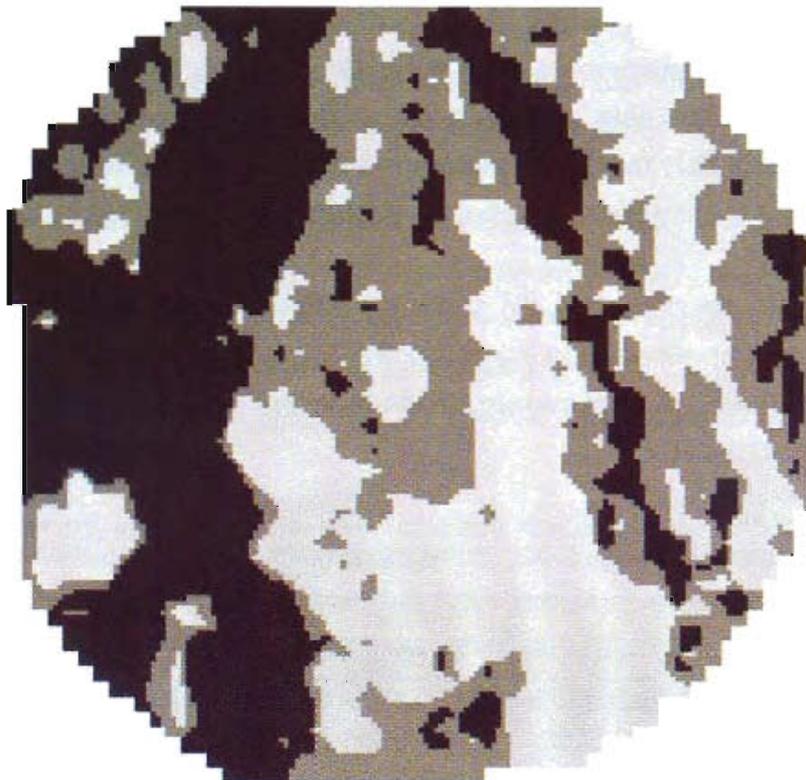


Figura 4. Mapa de Condutividade Elétrica do Solo.

O Mapa de condutividade elétrica do solo (CE) (Figura 4) revelou padrões similares aos mapas de reflectância e de zonas de manejo (Figura. 2,3). Valores menores de CE foram encontrados nos solos escuros das baixadas, enquanto que valores maiores, foram encontrados nas partes mais elevadas do terreno, onde os processos erosivos têm sido mais severos. Como o subsolo das áreas erodidas continha calcário, houve uma influencia direta nos valores de EC e pH resultando nos altos valores mostrados na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades químicas* dos solos das três zonas de manejo

		EC _{1:1}	pH	OM	NO ₃ -N	NH ₄ -N	P
Zona	N	(ds m ⁻¹)		%		Kg/ha	
Azul	18	0.42	7.37	0.94	7.7	6.0	13.2
Púrpura	19	0.28	6.48	1.31	10.2	8.3	27.5
Cyan	10	0.24	6.17	1.68	17.0	2.9	68.9

*CE: Condutividade elétrica do extrato solo/água (relação 1:1); MO: matéria orgânica.

Os padrões dos mapas de colheita mostraram variabilidade espacial e temporal. Exceto para os anos de 1999-2000, os demais mostraram um padrão de distribuição espacial dos índices de produtividade muito similares aos das zonas de manejo delineadas.

Na Tabela 2 são mostrados os efeitos do tempo das propriedades do solo na produtividade do milho. A análise de regressão múltipla mostrou que, em média, os atributos altitude, cor do solo, inclinação e EC explicaram aproximadamente 60% da variabilidade da produtividade da cultura. Além disto, os efeitos destes atributos foram variáveis ano a ano. Analisando a estabilidade temporal das produtividades relativas de cada zona de manejo ficou evidenciado que, em 80%, os padrões eram consistentes, ou seja, zonas de alta produtividade apresentavam baixa produtividade de um ano em cada cinco. Tais fatos evidenciaram a importância de se considerar a variabilidade temporal e não somente a variabilidade espacial quando se deseja tomar decisões de manejo.

Considerando também que decisões de manejo ineficazes são obtidas quando somente as informações do solo são analisadas, a combinação de parâmetros de solo e planta é um caminho lógico a ser seguido. Esta abordagem foi iniciada em 2001 e encontra-se em desenvolvimento no USDA-ARS-SWCRU.

Tabela 2. Associação entre a variação espacial das propriedades do terreno e variação na produtividade de grão determinada pela análise de regressão.

Variável	Anos					Média
	1997	1998	1999	2000	2001	
Cor do Solo	<0.0001	<0.0001	0.0975	0.0995	<0.0001	<0.0001
Elevação	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
EM 38	0.0057	<0.0001	<0.0001	0.0003	<0.0001	0.0120
Declive	0.2162	<0.0001	0.0255	0.0019	<0.0001	0.1960
Múltiplo R2	0.7110	0.4600	0.0940	0.0911	0.4117	0.6010

Aplicação do Conceito de Zonas de Manejo no Brasil

Luchiari Junior et al. (2002) aplicaram o conceito de zonas homogêneas de manejo em solos tropicais de cerrados, cultivados com culturas anuais em plantio direto. Entretanto, estudos desta natureza ainda estão muito focalizados em culturas anuais e necessitam ser desenvolvidos e refinados para culturas perenes, principalmente em condições tropicais.

O Vale do São Francisco é a principal região produtora de mangas e uvas finas de mesa do país. Atualmente, a região produz 85% e 95%, respectivamente, de todas as mangas e uvas finas de mesa exportadas do país. Apesar da importância econômica que a manga e a uva representam nos mercados nacional e internacional, essas culturas não atingiram ainda os níveis de exportação que reflitam seus verdadeiros potenciais. São culturas que necessitam de ajustes nos sistemas de produção, com o objetivo de atender aos requisitos de qualidade no seu sentido amplo (produto e meio ambiente) visando a sua competitividade nos mercados.

Um dos principais problemas existentes é o manejo de nutrientes e água. Silva (1997) estudando as características físico-químicas dos solos de um projeto de irrigação no vale do sub-médio do São Francisco, depois de 10 anos de sua fase de implantação, constatou aumentos nos teores de fósforo de 116,8%, resultante da aplicação excessiva de fertilizantes em quantidades superiores às recomendadas. Relatório da Embrapa (1999), referente aos estudos feitos em várias áreas de produção comercial de uva irrigada, por gotejamento e microaspersão, mostra que num intervalo de dois anos (1999-2001) houve uma diminuição significativa dos teores de cálcio, magnésio, potássio e fósforo na camada superficial (0-20cm) do solo. E que, apesar desta diminuição, os teores destes nutrientes ainda são altos, ou seja, bem acima dos recomendados. Em consequência, a CTC do solo também foi diminuída por ser a soma dos cátions $Ca + Mg + K + (H + Al)$.

Para que novas tecnologias e medidas corretivas, que permitam a melhoria destes sistemas de produção, sejam desenvolvidas é preciso que os estudos sejam conduzidos nas áreas de produção. Neste particular, a agricultura de precisão tem o potencial de contribuir com avanços tecnológicos para que os produtos frutícolas sejam produzidos com o uso de tecnologia "limpa", passíveis de serem certificados, sem comprometer ou colocar em risco o meio ambiente e a saúde do homem

Daí o objetivo deste trabalho foi a aplicação do conceito de zonas homogêneas e de procedimentos de análise georreferenciada para delinear áreas para o manejo mais eficiente de insumos em sítios específicos e para orientar o desenvolvimento de práticas de manejo mitigadoras de possíveis riscos de contaminação do solo e da água num sistema de produção de fruticultura irrigada no nordeste brasileiro.

Os solos da região são oriundos de rochas cristalinas, predominantemente rasos, pouco permeáveis, sujeitos à erosão e de razoável fertilidade natural.

Na propriedade, existem três tipos de solo, sendo que na área em estudo o solo é classificado como Podzólico Vermelho Amarelo eutrófico, cuja característica principal é uma forte diferença textural entre a camada superior e inferior, que ocasiona problemas de drenagem a cerca de 40cm de profundidade. A profundidade é moderada e freqüentemente limitada à cerca de um metro pela presença de piçarra ou de camadas de rocha. A drenagem é moderada havendo, em geral, problemas de salinização secundária no caso de irrigação mal conduzida. São solos geralmente sem pedregosidade, ocorrendo em relevo suave com textura franco-arenosa/argilosa e de permeabilidade moderada.

Solos foram coletados utilizando o seguinte procedimento: Cada amostra georreferenciada representava o centro de um talhão de produção (1-2 hectares). Em cada talhão 10 pontos foram coletados por hectare (0-20cm na intersecção dos bulbos de molhamento) por caminhamento em linha e, posteriormente, misturados formando uma amostra composta. Estas amostras foram em seguida encaminhadas para análise em laboratório credenciado (Instituto Agronômico de Campinas). Os talhões foram irrigados por dois métodos: gotejamento e microaspersão, com os fertilizantes aplicados via água de irrigação. Os valores de produtividade foram obtidos dos registros da propriedade e seus valores georeferenciados no centro da área de um talhão.

Na Figura. 5, são mostrados os mapas das variações do pH, teor de matéria orgânica, cálcio, níquel e sódio do solo. Estes mapas foram obtidos pela interpolação dos valores obtidos, empregando-se o método do inverso do quadrado da distância. Foi utilizado o programa Surfer 8.0 (Golden Software, Golden, CO, EUA).

Ao observamos o mapa de pH, vemos que somente no canto inferior direito os valores estão inferiores aos recomendados pela cultura (Figura 5). Quanto aos teores de matéria orgânica, existem algumas áreas bem definidas do terreno que apresentam valores abaixo de 1.2%, considerado crítico para os solos predominantes na propriedade (Figura 5). Quanto aos valores de cálcio, os mesmos estão bem acima dos teores críticos para a cultura da uva e os de sódio abaixo do nível de apresentar problemas devido a salinidade (Figura 6). Entretanto, o padrão de distribuição destes dois elementos na área de estudo é muito semelhante, evidenciando áreas de alta concentração (acima de de 50 para o Ca e de 12 para o Na) e indicando que nestes bolsões possa haver maiores riscos de impacto, como risco potencial de salinização e de contaminação por metais pesados como o níquel (Figura. 6). Outro ponto a se considerar é de que nestes bolsões a irrigação é feita por gotejamento e a cultura apresenta os menores índices de produtividade. Havendo, portanto, uma indicação de que o método de irrigação utilizado está influenciando a concentração de elementos. Como no gotejamento o volume do bulbo molhado é menor do que o da microaspersão, os nutrientes e metais pesados, como o níquel, presentes no adubo tendem a se concentrar mais.

Os procedimentos para delinear zonas de manejo aqui utilizados diferem dos utilizados nos Estados Unidos quanto a escala de trabalho. Os parâmetros aqui estudados não foram amostrados em malha fina ou direcionados por uma foto aérea do terreno.

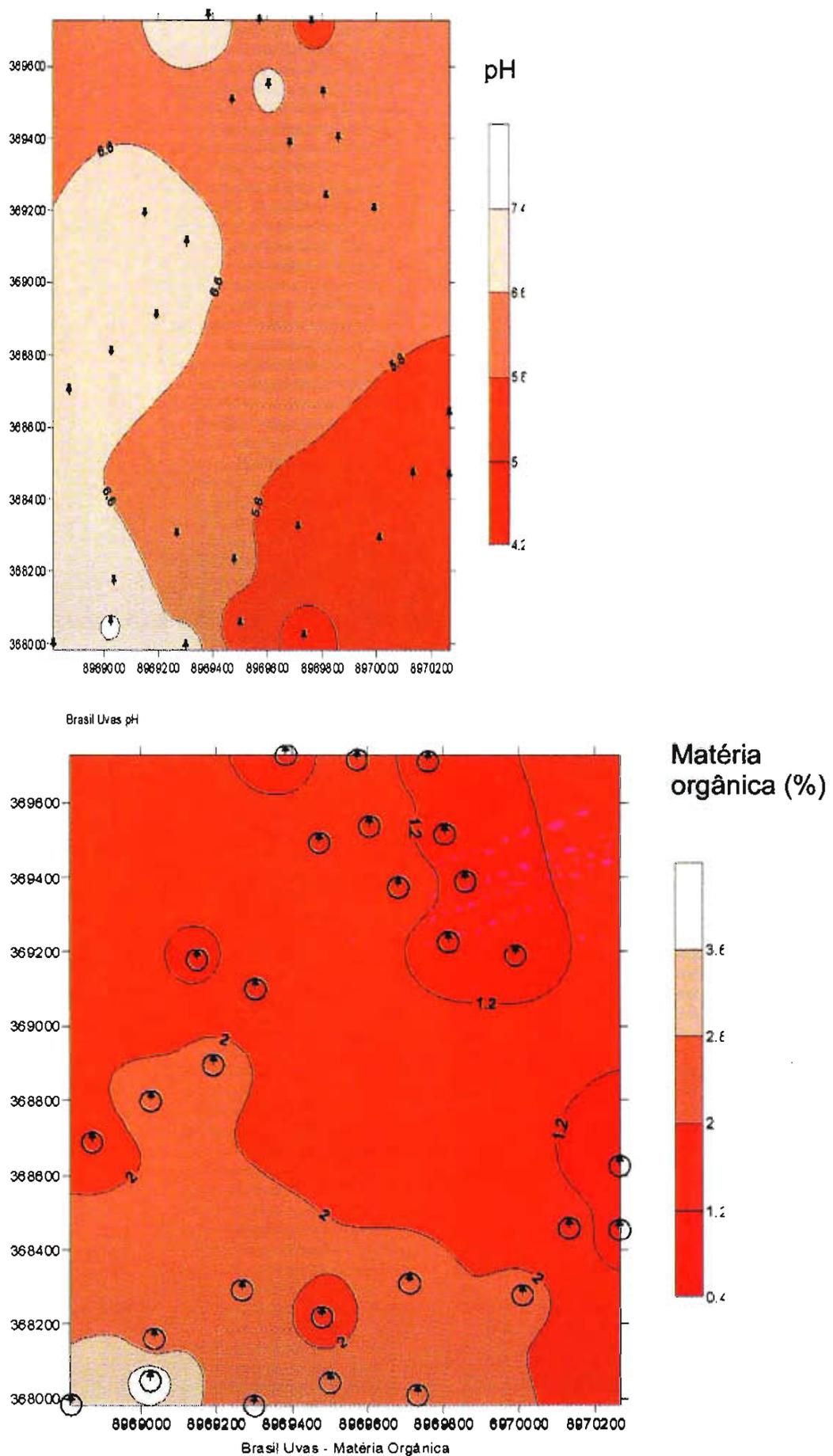


Figura 5. Mapas de variação de pH e matéria orgânica em solo sob videira.

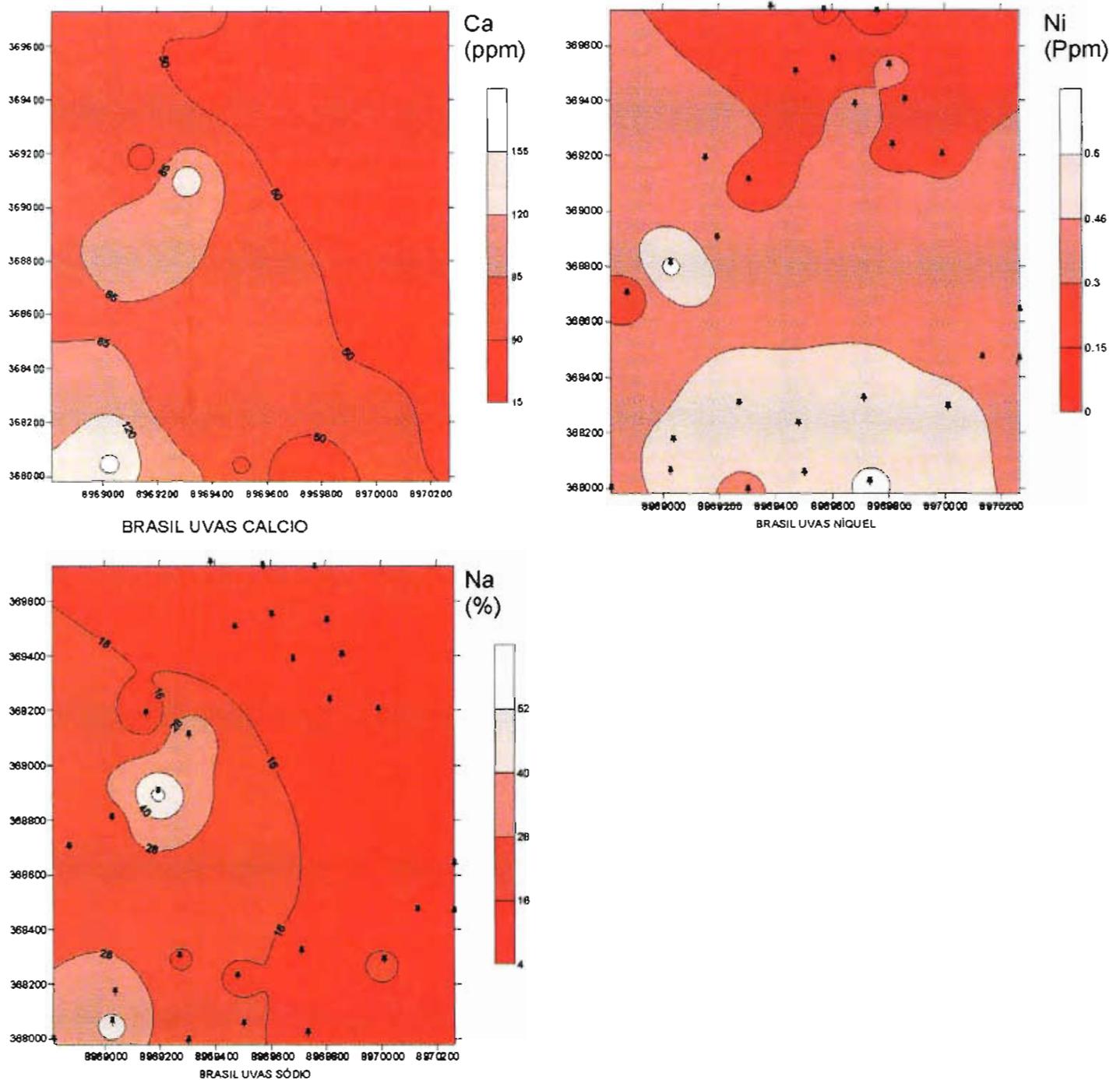


Figura 6. Mapas de variação de cálcio (Ca), níquel (Ni) e sódio (Na) em solo sob videira.

Este estudo revelou que foi possível estabelecer zonas de risco potencial de contaminação de solo e água e alguns aspectos relevantes para o direcionamento de futuros estudos relativos ao manejo de água, solo e planta para minimizar o risco de contaminação ambiental.

Referências Bibliográficas

AL-ABBAS, A. H.; BARR, R.; HALL, J. D.; CRANE, F. L.; BAUMAGARDNER, M. F. Spectra of normal and nutrient-deficient maize leaves. *Agronomy Journal*, Madison, v. 66, p. 16-20, 1974.

- ATKINSON, P. M.; WEBSTER, R.; CURRAN, P. J. Cokriging with ground -based radiometry. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 41, p. 45-60, 1992.
- BARET, F.; GUYOT, G.; MAJOR, D. J. TSAVI: a vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI and APAR estimation. In: CANADIAN SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING, IGARRS'90, 12., 1989, Vancouver. **Proceedings...** 1989. v. 3, p. 1355-1358.
- BHATTI, A. U.; MULLA, D. J.; FRAZIER, B. E. Estimation of soil properties and wheat yields on complex eroded hills using geostatistics and Thematic Mapper images. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 37, p. 181-191, 1991.
- BLACKMER, T. M.; SCHEPERS, J. S. Techniques for monitoring crop nitrogen status in corn. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 25, n. 9-10, p. 1791-1800, 1994d.
- BLACKMER, T. M. ; SCHEPERS, J.S. Use of a chlorophyll meter to monitor N status and schedule fertigation for corn. **Journal of Production Agriculture**, Madison, v. 8, p. 56-60, 1995.
- BLACKMER, T. M.; SCHEPERS, J. S.; VIGIL, M. F. Chlorophyll meter readings in corn as affected by plant spacing. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 24, n. 17-18, p.2507-2516, 1993.
- CAST. **Gulf of Mexico hypoxia: land and sea interactions**. Ames, IA: Council for Agricultural Science and Technology, 1999. (CAST. Task Force Report, 134).
- DWYER, L. M.; TOLLENAAR, M.; HOUWING, L. A nondestructive method to monitor leaf greenness in corn. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v. 71, p. 505-509, 1991.
- EMBRAPA MEIO AMBIENTE. **Qualidade ambiental em fruticultura irrigada no nordeste brasileiro: Ecofrutas**. Jaguariúna, 1999b (Projeto 11.0.99.239).
- FRANCIS, D. D; SCHLEMMER, M. S.; SCHPERS, J. S.; SHANAHAN, J. F.; LUCHIARI JÚNIOR, A. Use of crop canopy reflectance sensor to assess chlorophyll content. **Agronomy Abstracts**, Madison, v. 92, p. 277, 2000.
- HINZMAN, L.D.; BAUER, M. E.; DAUGHTRY, C. S. T. Effects of nitrogen fertilization on growth and reflectance characteristics of winter wheat. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 19, p. 47-61, 1986.
- HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 25, p. 295-309, 1988.

INADA, K. Studies for a method for determining the deepness of green color and chlorophyll content of intact crop leaves and its practical application. 2. Photoelectric characters of chlorophyll meter and correlation between the reading and chlorophyll content in leaves. **Proceedings of Crop Science Society of Japan**, v. 33, p. 301-308, 1965.

LUCHIARI JUNIOR., A.; SHANAHAN, J.; LIEBIG, M.; SCHLEMMER, M.; SCHEPERS, J.; FRANCIS, D.; . PAYTON, S.. Strategies for establishing management zones for site specific nutrient management. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 5., 2000, **Proceedings ...** Madison: ASA: CSSA: SSSA, 2000. 1 CD-ROM.

LUCHIARI JÚNIOR. A.; SHANAHAN, J. ; SCHEPERS, J.; FRANCIS, D.; SCLEMMER, M.; INAMASU, R.; FRANÇA, G.; MANTOVANI E.; GOMIDE, R. Crop and soil based approaches for site specific nutrient management. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 24., 2002, Florianópolis. **Anals...** Sete Lagoas: ABMS: Embrapa Milho e Sorgo; Florianópolis: Epagri, 2002. CD-ROM.

McMURTREY, J. E., III; CHAPPELLE, E. W.; KIM, M. S.; MEISINGER, J. J.; CORP, L. A. Distinguishing nitrogen fertilization levels in field corn (*Zea mays*, L.) with actively induced fluorescence and passive reflectance measurements. **Remote Sensing of Environment**, v. 47, p. 36-44, 1994.

MORAN, M. S.; INOUE, Y.; BARNES, E. M. Opportunities and limitatlons for image-based remote sensing in precision crop management. **Remote Sensing of Environment**, v. 61, p. 319, 1997.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL Precision agriculture in the 21st century: geospatial and information technologies in crop management. 1997. Disponível: <http://books.nap.edu/books/0309058937>. Acesso em: 17 nov. 2004.

RAUN, W. R.; JOHNSON, G.V. Improving nitrogen use efficiency for cereal production. **Agronomy Journal**, Madison, v. 91, p. 357-363, 1999.

RONDEAUX, G.; STEVEN, M.; BARET, F. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 55, p. 95-107, 1996.

SCHEPERS, J. S.; FRANCIS, D. D.; VIGIL, M.; BELOW.F. E. Comparison of corn leaf nitrogen and chlorophyll meter readings. **Communicatlons in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 23, n. 17-20, p. 2173-2187, 1992.

SCHEPERS, J. S.; SHANAHAN, J. F.; LUCHIARI JÚNIOR, A. Precision agriculture as a tool for sustainability. In: BALAZS, E.; GALANTE, E.; LYNCH, J.M.; SHEPERS, J. S.;

SCHEPERS, J.S. New diagnostic tools for tissue testing. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 25, n. 7-8, 817-826, 1994.

SHANAHAN, J.F.; SCHEPERS, J. S.; FRANCIS, D. D.; VARVEL, G. E. ; WILHELM, W. W.; TRINGE, J. M.; SCHLEMMER, M. S.; MAJOR, D. J. Use of remote sensing imagery to estimate corn grain yield. **Agronomy Journal**, Madison, v. 93, p. 583-589, 2001.

SILVA, A. de S. **impacto ambiental del uso de los recursos suelo y agua en áreas agrícolas bajo riego: Estudio aplicado a zonas áridas brasileñas y españolas**. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Superior de Ingenieros Agronomos, Departamento de Edafología, 1997. 217 p. (Tesis de Doctorado).

SINCLAIR, T.R.; HORIE, T. Leaf nitrogen, photosynthesis, and crop radiation use efficiency: a review. **Crop Science**, Madison, v. 29, p. 90-98, 1989.

VARVEL, G. E.; SCHEPERS, J. S.; FRANCIS, D. D. Ability for in-season correction of nitrogen deficiency in corn using chlorophyll meters. **Soil Science Society of America Journal**. Madison, v. 59, p. 1233-1239, 1997.

VARVEL, G. E.; SCHLEMMER, M. R.; SCHEPERS, J. S. Relationship between spectral data from aerial image and soil organic matter and phosphorus levels. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 1, p. 291-300, 1999.

WALBURG, G.; BAUER, M. E.; DAUGHTRY, C. S. T. ; HOUSLEY, T. L. Effects of nitrogen nutrition on the growth, yield, and reflectance characteristics of corn canopies. **Agronomy Journal**, Madison, v. 74, p. 677-683, 1982.

WOLFE, D. W.; HENDERSON, D. W.; HSIAO, T. C.; ALVINO, A. Interactive water and nitrogen effects on senescence of maize. II. Photosynthetic decline and longevity of individual leaves. **Agronomy Journal**, Madison, v. 80, p. 865-870, 1988.



Geoestatística aplicada à Agricultura de Precisão

Luis Iván Ortiz Valencia

Margareth Simões Penello Meirelles

Cláudio Bettini

Resumo

A Agricultura de Precisão (AP) tem como principal elemento na sua abordagem a análise de informação de atributos do solo e planta. Um enfoque da AP no manejo da fertilidade do solo e nutrição de plantas é fundamentado na amostragem do solo e planta e na análise de laboratório. Esta informação precisa ser estimada espacialmente para toda a área de estudo. Métodos geoestatísticos fornecem ferramentas para a análise espacial de atributos que possuem distribuição espacial contínua numa região. A componente principal da Geoestatística é o semivariograma, que caracteriza o padrão de continuidade espacial de um atributo. *Krigagem* é um conjunto de métodos de interpoladores espaciais lineares ponderados. Este capítulo revisa os principais conceitos geoestatísticos, e são ilustrados por meio dos dados do projeto de pesquisa em AP conduzido numa propriedade agrícola em Carambei, Paraná.

Introdução

Um enfoque da AP é fundamentado na amostragem do solo e na análise de laboratório. Amostras do solo são coletadas em posições definidas por uma grade de amostragem e georreferenciadas por um sensor de **Sistema de Posicionamento Global (GPS)**. Posteriormente, as análises de laboratório das amostras do solo fornecem informação sobre propriedades químicas e físicas relativas a cada posição amostrada. O volume de dados chega a ser considerável, pois são vários os atributos do solo analisados e as grades de amostragem podem considerar várias dezenas de pontos em toda a área de estudo. Estes dados são integrados e analisados espacialmente usando as ferramentas de um **Sistema de Informação Geográfica (SIG)** (Burrough & McDonnell, 1998).

Uma das ferramentas de análise espacial de um SIG é a **Geoestatística**. Esta ferramenta disponibiliza métodos univariantes e multivariantes de interpolação e simulação espacial baseados em modelos de continuidade espacial. A geoestatística tem gerado inúmeras aplicações e estudos sobre a distribuição espacial de propriedades do solo, e principalmente, em aplicações da Agricultura de Precisão.

O objetivo deste capítulo é apresentar os conceitos básicos da Geoestatística, e apresentar estes, através de resultados da experiência dos autores com dados de Agricultura de Precisão.

Geoestatística

Georges Matheron é considerado o pai da Geoestatística por seus trabalhos nas bases teóricas de um método de interpolação espacial denominado de *krigagem*, na década dos 60s (Matheron, 1962). Este nome deriva do engenheiro sul-africano D. Krige, pioneiro em aplicar o método empiricamente em predições de reservas minerais na década dos 50s. Em 1968, Matheron fundou o *Centre de Géostatistique et de Morphologie Mathématique* em Fontainebleau, na França.

A Geoestatística é um conjunto de métodos estatísticos apropriados para analisar um atributo de um fenômeno que tem distribuição contínua sobre uma área geográfica. Um problema comum em ciências é obter estimativas de um atributo para toda uma área ou um volume, usando a informação de uma amostra espacial (Dubois, *et al.*, 1998). Dois enfoques para resolver este problema na Geoestatística são: a interpolação espacial ou *krigagem*, e outro, a simulação estocástica espacial (Cressie, 1993; Goovaerts, 1997; Deutsch & Journel, 1998). O primeiro enfoque prioriza a estimação local de um atributo, enquanto que o segundo, a caracterização da incerteza de um atributo em toda uma área através da geração de realizações independentes.

A modelagem da continuidade espacial para caracterizar espacialmente um atributo, também surgiu em outras áreas como a hidrologia (Gómez-Hernandez & Wen, 1998), a meteorologia (Monestiez *et al.*, 2001), a epidemiologia (Fortes *et al.*, 2004) e o sensoriamento remoto (Atkinson & Lewis, 2000).

Nos anos 80s, surgiu uma corrente de aplicações de métodos estatísticos e matemáticos na Ciências do Solo, denominada de **Pedometria** (McBratney *et al.* 2000). Dentre estes métodos, a **Geoestatística** influenciou como um método para quantificar a variabilidade espacial de atributos químicos e físicos do solo (Goovaerts, 1999).

Uma análise geoestatística deve começar com um **desenho amostral espacial** (Brus & De Gruijter, 1997; Mallarino & Wittry, 2004). O desenho deve incorporar as seguintes informações: os atributos que serão analisados, a extensão e limites da área de estudo, a data da amostragem, o número de amostras, a grade de amostragem e o tipo de amostragem espacial. Devemos considerar que um desenho amostral deficiente ou mal planejado pode comprometer todo um projeto.

Após a amostragem e as análises de laboratório, devemos realizar uma **análise exploratória** dos dados. Ela compreende a aplicação de métodos da estatística descritiva e inferencial,

corresponde à análise exploratória não-espacial. Algumas questões interessantes são: conhecer como os atributos estão distribuídos, o tipo de correlação existente entre atributos, verificar a existência de dados inconsistentes e de erros.

As duas etapas subseqüentes da análise geoestatística são a estimação e a modelagem da variabilidade espacial e interpolação espacial de um atributo sobre a área de estudo que serão os temas que vamos apresentar neste capítulo.

A análise dos dados é facilitada se usamos programas estatísticos e de SIG interligados. Uma opção é usar o S-PLUS (Venables & Ripley, 1994) ou o R (Venables & Smith, 2004) e o ArcView GIS. O S-PLUS possui os módulos: S+SPATIALSTATS (Kaluzny *et al.*, 1996) e o S-PLUS for ArcView GIS (Insightful Inc, 1998).

O programa clássico da geoestatística é *Geostatistical Software Library*, GSLIB, (Deutsch & Journel, 1998). Este programa possui rotinas, executadas em DOS, para a análise da variabilidade espacial, *krigagem* e simulação espacial. O GSLIB precisa de programas para visualizar os gráficos, GSVIEW (Ghostgum Software, 2002) e programas para criar mapas como, por exemplo, o SURFER (Golden Software, 2004) .

O VARIOWIN (Pannatier, 1996) é um programa para a estimação e modelagem de semivariogramas. Possui um módulo para construir superfícies de varlogramas e ajuste semi-automático de modelos de semivariogramas. O VESPER (Minasny, 2002) é um programa para a análise geoestatística de dados de agricultura de precisão da Universidade de Sidney, Austrália.

O Modelo Geoestatístico

Consideremos um fenômeno definido em uma região geográfica D . Em geral, D é um subconjunto do espaço (tri) bidimensional cartesiano. Em cada posição $s \in D$, uma característica do fenômeno toma certo valor. Por exemplo, se D é um subconjunto do plano, teremos uma superfície contínua. Esta superfície define uma **realização** ou uma **regionalização** do fenômeno.

Uma regionalização é modelada por uma **função aleatória**. Uma função aleatória é definida por um conjunto de variáveis aleatórias locais, denotada por $\{Z(s) : s \in D\}$. Denotamos n posições espaciais como $\{s_1, \dots, s_n\}$ e uma amostra espacial de um atributo como $\{z(s_1), \dots, z(s_n)\}$. Esta amostra espacial é uma observação incompleta de uma realização da função aleatória $\{Z(s) : s \in D\}$.

Muitos fenômenos naturais têm um duplo desenvolvimento no espaço: parcialmente estruturado e parcialmente aleatório. Uma decomposição comum do modelo espacial considera a somatória de uma componente sistemática e outra aleatória (Cressie, 1993). O modelo espacial é decomposto como:

$$Z(s) = \mu(s) + \delta(s) \quad s \in D$$

$\mu(s) = E [Z(s)]$ é a **função média** de Z. Em geral, depende da posição espacial s.

$\delta(.)$ é uma função aleatória com média zero, denominada de **processo do erro**.

Hipóteses de estacionariedade

Na maioria das aplicações da estatística, os dados são obtidos através de um desenho amostral que garante que a amostra seja representativa da população. Os dados são modelados como sendo independentes e pertencendo à mesma distribuição de probabilidade (Montgomery & Runger, 2003). Na dimensão espacial, uma amostra corresponde a uma única observação do fenômeno. Isto é, não existe replicação nos dados ou a amostra contém apenas um elemento. Esta limitação é superada considerando uma hipótese de estacionariedade no modelo espacial. Existem várias definições de estacionariedade (Cressie, 1993; Goovearts, 1997). Vamos considerar as duas definições mais comuns: a **estacionariedade de segunda ordem** e a **estacionariedade intrínseca**. A hipótese de **estacionariedade intrínseca** estabelece que:

$$1) E [Z(s)] = \mu \quad s \in D$$

$$2) \gamma(h) = \frac{1}{2} E [(Z(s) - Z(s+h))^2] \quad s, s+h \in D$$

A primeira condição estabelece a função média constante em todo D. A segunda condição estabelece a existência da função **semivariograma**. Definida como o valor esperado do quadrado da diferença de função aleatória, definida em duas posições espaciais. Neste caso, o semivariograma não depende das posições s e s+h. Depende unicamente do vetor h, isto é, do seu módulo e direção. Esta propriedade é denominada de **Invariância para translações** e é o princípio para gerar replicações espaciais. A hipótese de **estacionariedade de segunda ordem** satisfaz:

$$1) E [Z(s)] = \mu \quad s \in D$$

$$2) C(h) = E [(Z(s) - \mu)(Z(s+h) - \mu)] \quad s, s+h \in D$$

Esta hipótese estabelece a existência da função **covariância** munida da propriedade de invariância para translações. Toda função aleatória que satisfaz esta propriedade também é estacionária intrínseca, mas o inverso não verdadeiro. Portanto, o semivariograma pode existir em situações onde a função covariância não existe (Ortiz Valencia, 1999). A estacionariedade é uma propriedade do modelo espacial, e não é dos dados. Portanto, não podemos testá-la

matematicamente a partir dos dados da amostra (Myers, 1989). Na prática, assumimos como válida a hipótese de estacionariedade após a análise exploratória dos dados. Esta decisão depende da escala de observação do fenômeno. Uma discussão mais detalhada sobre este tema pode ser encontrada em Webster (2000).

Por outro lado, dados espaciais raramente são modelados como variáveis estatisticamente independentes. Dados espaciais são correlacionados. Este fato limita a aplicação da maioria dos métodos clássicos da estatística.

O padrão de correlação espacial pode ser complexo, mas a determinação de uma grade de amostragem ótima consiga capturar o padrão de continuidade minimizando o número de amostras é um problema importante na AP e em muitas áreas.

Continuidade espacial

Em geral, os fenômenos são parcialmente estruturados devido ao fato de seguirem leis naturais que conferem continuidade espacial a algumas de suas características. O solo é o resultado da ação e interação de vários fatores: material de origem, clima, topografia, biota e tempo. Em particular, o fator antrópico exerce grande influência em solos dedicados à agricultura ao modificar as propriedades do solo, principalmente, os níveis de fertilidade.

A continuidade espacial expressa a forma como um atributo de um fenômeno varia com a distância e a direção. Muitos fenômenos naturais apresentam atributos cujos dados espaciais tendem a ser similares ou dissimilares, quanto mais próximos em posição se encontram. Podemos quantificar a associação e a variabilidade espacial de um atributo. A associação espacial pode ser quantificada por funções de autocorrelação espacial, por exemplo, a função covariância ou correlação (Goovaerts, 1997). Entretanto, na Geoestatística deu-se preferência à modelagem da variabilidade espacial.

Algumas propriedades importantes são:

- 1) $\gamma(0) = 0$
- 2) $\gamma(h) = \gamma(-h)$
- 3) $\gamma(h) = C(0) - C(h)$
- 4) $C(0)$ é a variância de função aleatória.
- 5) O semivariograma é uma função condicionalmente negativa definida. Esta propriedade é definida como:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j \gamma(s_i - s_j) \leq 0$$

para qualquer arranjo finito de posições $\{s_1, \dots, s_n\} \subset D$ e números reais $\{\lambda_i, i = 1, \dots, n\}$ sob a condição $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 0$

Esta propriedade garante a existência e unicidade da solução do sistema de equações da *krigagem* e de variâncias sempre positivas.

Parâmetros de um semivariograma

O semivariograma é caracterizado por três parâmetros: o patamar, o efeito pepita e o alcance. Estes parâmetros são ilustrados na figura 1.

1) Patamar

O semivariograma tende a aumentar conforme aumenta com a distância. Quando o semivariograma tende a estabilizar-se a uma constante, este limite é denominado de patamar. O semivariograma pode se aproximar de forma assintótica ou atingir o patamar numa determinada distância. O patamar pode variar com a direção. Denotado como $C(0)$.

2) Efeito Pepita

A variância do modelo é decomposta como $C(0) = C_0 + C_1$ onde C_0 representa o **efeito pepita** definido como a descontinuidade do semivariograma na origem. Este parâmetro é usado para explicar duas fontes de variação: (1) Variação do atributo para distâncias menores que a considerada na grade de amostragem e (2) Erros de medição. C_1 é denominado de **contribuição** e corresponde a variação modelada pelo semivariograma. Uma medida que expressa a magnitude relativa do efeito pepita é:

$$\frac{C_0}{C(0)} \times 100$$

3) Alcance

O alcance determina a região espacial até onde a variável é autocorrelacionada. Em geral, pode variar com a direção. Denotado por **a**.

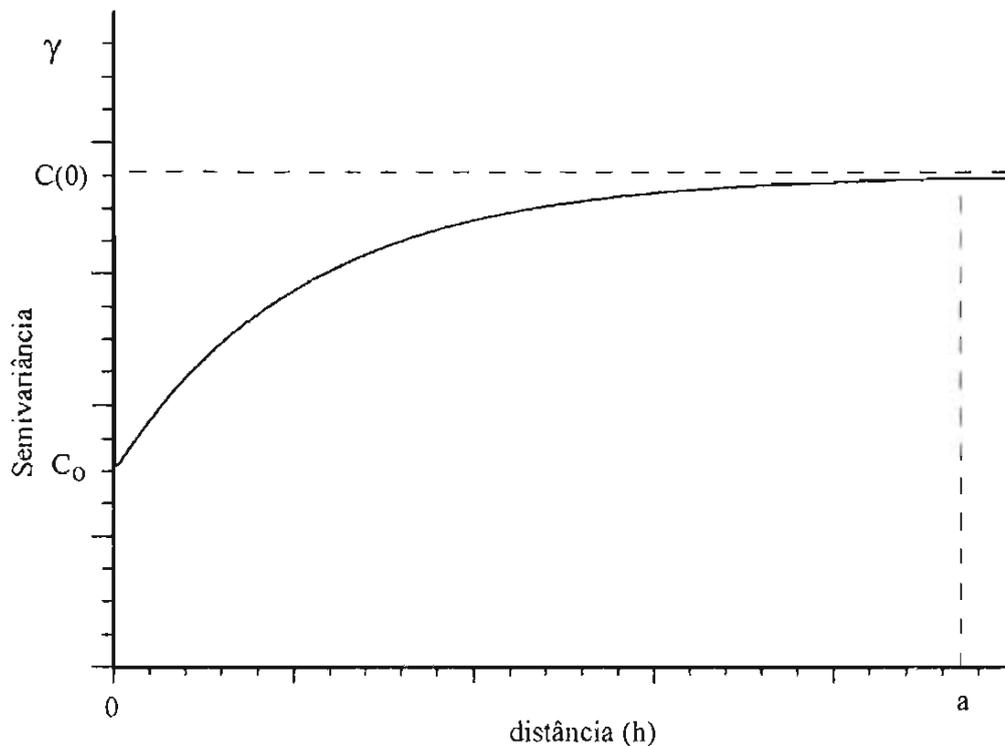


Figura 1. O semivariograma e seus parâmetros.

Anisotropia

Muitos atributos de fenômenos naturais apresentam um padrão de maior continuidade espacial em certas direções que em outras. Este padrão de continuidade espacial é conhecido como **anisotrópico**. Quando o padrão de continuidade espacial é o mesmo para todas as direções, este é denominado de **isotrópico** ou invariante para rotações. Dois tipos de anisotropia são:

1) Anisotropia Geométrica

Consideramos um padrão de anisotropia geométrica quando o alcance do semivariograma varia com a direção, enquanto o patamar permanece constante.

2) Anisotropia Zonal

Outro tipo de anisotropia é aquele quando o patamar varia com a direção, enquanto o alcance permanece constante.

A determinação da presença e do tipo de anisotropia exigem o cálculo de vários semivariogramas direcionais, isto é, os semivariogramas devem ser calculados para determinados ângulos em relação ao eixo das ordenadas, usualmente, denominado de azimute.

Estimação da variabilidade espacial

Usualmente, esta fase é a mais laboriosa da análise geoestatística e deve ser realizada após da análise exploratória. A estimação da variabilidade espacial envolve duas etapas: (1) A cons-

trução de semivariogramas experimentais, (2) A modelagem do semivariograma experimental. Neste tópico trataremos da primeira etapa e a segunda etapa será tratada nos tópicos seguintes. O semivariograma experimental consiste de um conjunto finito de estimativas da variabilidade espacial para distâncias e direções determinadas de forma estratégica. A determinação de um semivariograma experimental é um processo iterativo. Este processo consiste em ir variando um conjunto de parâmetros, de tal forma, que os pontos estimados tenham um padrão de um semivariograma conhecido. Na figura 2, dois semivariogramas empíricos são apresentados.

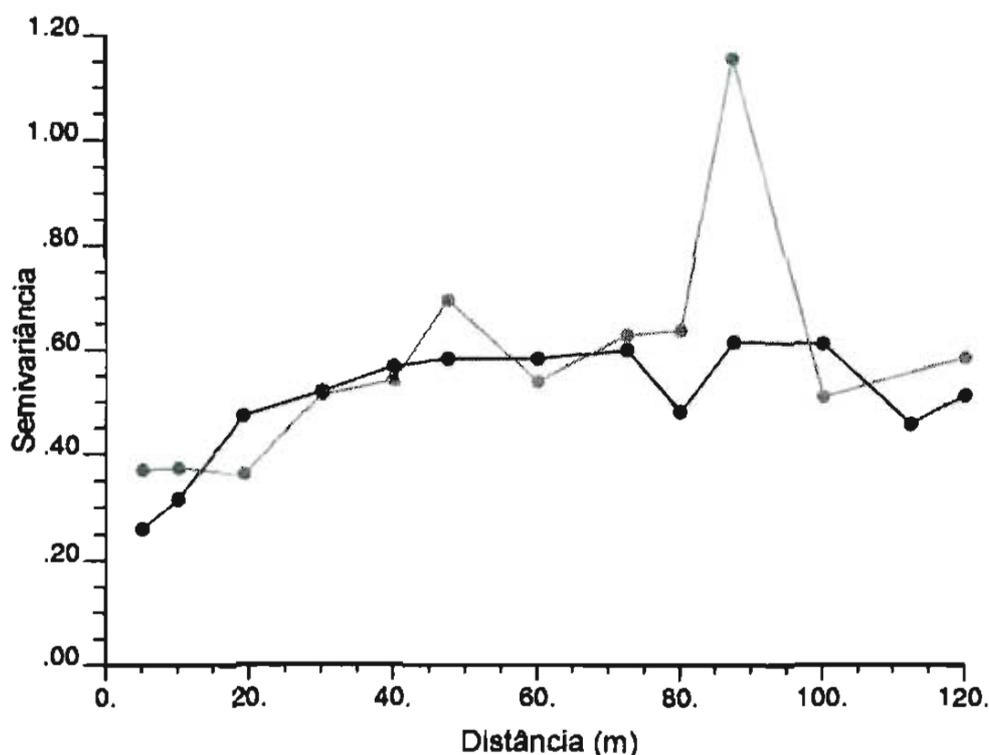


Figura 2. Semivariogramas experimentais.

Neste processo é importante considerar os seguintes elementos: validade da hipótese de estacionariedade, configuração espacial das posições dos dados e a presença de anisotropia. De acordo com a configuração espacial das posições dos dados, temos dois casos:

- 1) **Os dados estão localizados numa grade regular.** Neste caso, usamos o estimador clássico do semivariograma, dado, segundo Cressie (1993), pela expressão:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2|N(h)|} \sum_{N(h)} (Z(s_i) - Z(s_j))^2$$

onde $N(h) = \{(s_i, s_j) : |s_i - s_j| = h; i, j = 1, \dots, n\}$ é o conjunto de pares de dados separados uma distância h , e $|N(h)|$ é o número de pares de $N(h)$.

Os parâmetros considerados são: a distância a estimar o semivariograma, chamado também de *interdistância* ou *lag*, o número de *lags*, e as direções.

Neste caso, encontramos conjuntos de pares afastados exatamente uma distância determinada. Na figura 3, temos sete pontos afastados por uma unidade. Para o mesmo conjunto de pontos, formamos conjuntos de pares para três diferentes *lags*. Conforme aumenta a magnitude do *lag*, o número de pares tende a diminuir. Desta forma, as estimativas do semivariograma para as menores distâncias são as melhores, e aquelas para maiores distâncias tendem a ser as mais erráticas.

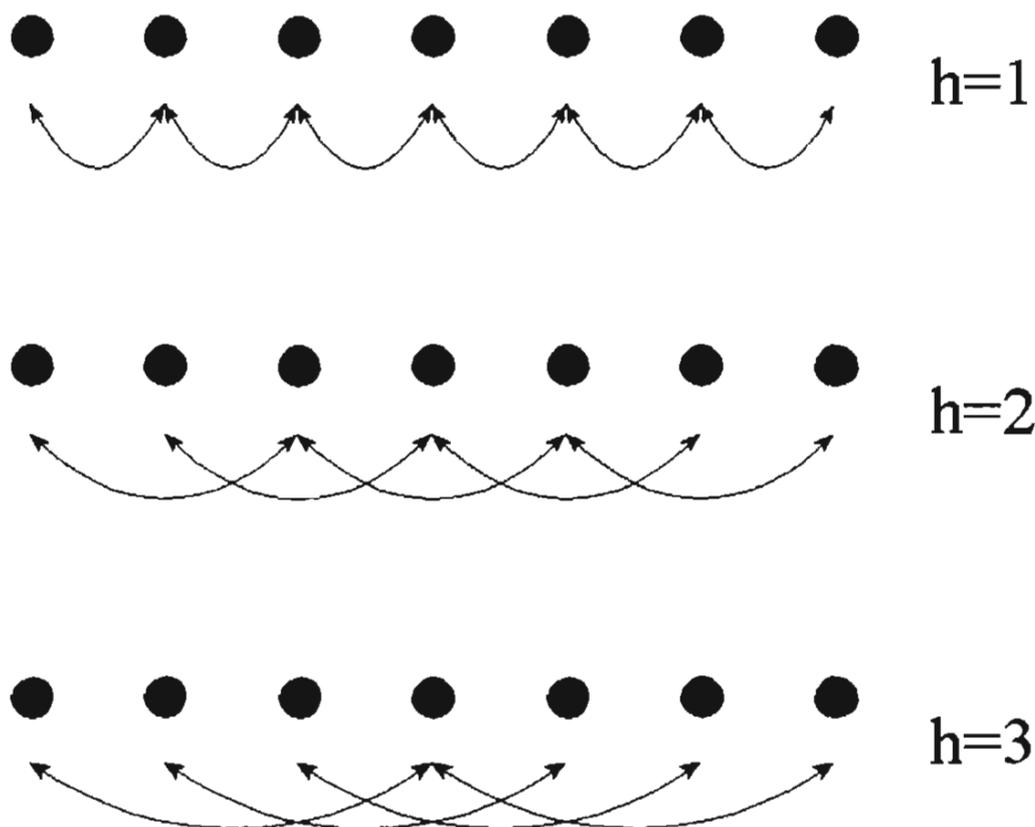


Figura 3. Comparação do número de lags para várias distâncias.

- 2) **Os dados estão localizados numa grade irregular.** Quando os dados se distribuem irregularmente sobre a área de estudo, devemos considerar regiões de tolerância para a busca de pares de dados para um determinado *lag*. Os parâmetros a definir são: o tamanho do lag, o número de lags e as direções. Definimos também as tolerâncias no *lag*, usualmente igual ou menor da metade do comprimento do *lag*. A tolerância na direção pode variar entre 0 e 22.5 graus. A tolerância na banda, a qual limita a extensão da região de tolerância para distâncias maiores. Quanto maior a tolerância, o semivariograma tende a ser mais suavizado. Estes parâmetros são ilustrados na figura 4.

Se existir anisotropia no plano, as direções de maior e menor continuidade espacial podem ser determinadas a partir de semivariogramas nas direções 0, 45, 90 e 135 graus. Outra opção é o cálculo de uma superfície do semivariograma experimental (Pannatier, 1996). No caso de isotropia, devemos considerar um semivariograma onidirecional, fazendo a tolerância na direção igual a 90 graus.

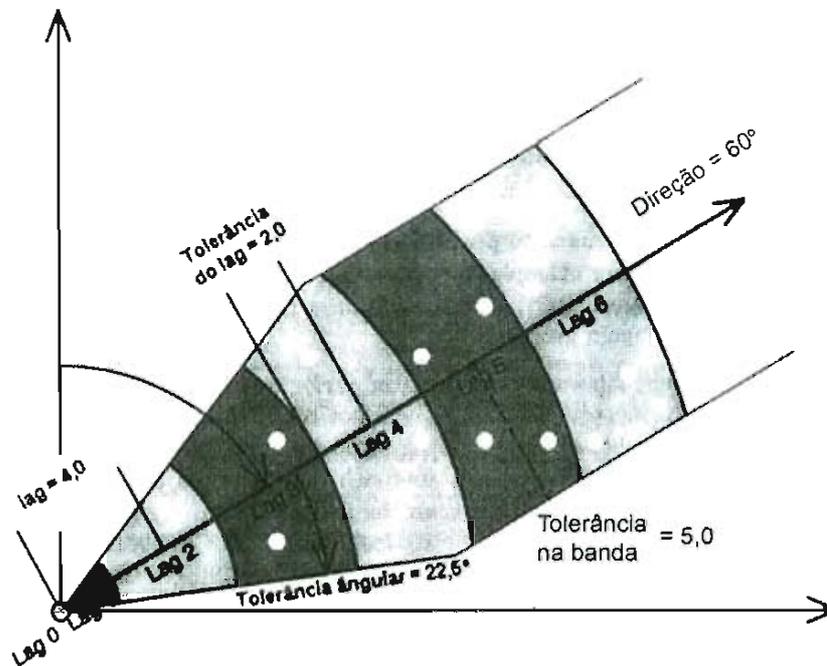


Figura 4. Definição de região de tolerância. Adaptado de Deutsch & Journel (1998).

Modelos de semivariograma

Um modelo de semivariograma é uma função que determina a variabilidade espacial para qualquer distância e direção. Unicamente uma função condicionalmente negativa definida pode ser considerada como modelo de semivariograma. Modelos de semivariograma que possuem patamar são denominados de Modelos de Transição. Definimos os três modelos mais comuns:

1) Modelo Gaussiano

O modelo gaussiano tem comportamento parabólico perto da origem e aproxima-se ao patamar de forma assintótica. Para um $h \in \mathfrak{R}^+$:

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & h = 0 \\ C_0 + C \left[1 - \exp\left(-\frac{3h^2}{A^2}\right) \right] & h > 0 \end{cases}$$

A contribuição é representada por C e o alcance prático por A . O alcance prático corresponde à distância onde o valor do semivariograma é 95% do patamar. O modelo gaussiano é válido no espaço Euclidiano d -dimensional, $d \in \mathbb{N}$.

2) Modelo Esférico

O modelo esférico tem comportamento linear perto da origem e atinge o patamar a uma distância igual ao alcance, denotado por A . A contribuição é denotada por C . Este modelo é válido no espaço Euclidiano d -dimensional, $d = 1, 2, 3$. Para um

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & h = 0 \\ C_0 + C \left[\frac{3h}{2A} - \frac{1}{2} \frac{h^3}{A^3} \right] & 0 < h \leq A \\ C + C_0 & h > A \end{cases}$$

3) Modelo Exponencial

Caracteriza-se por ter um comportamento linear perto da origem. O alcance prático, denotado por A , no qual o valor do semivariograma é igual a 95% do patamar. Para um $h \in \mathbb{R}^+$

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & h = 0 \\ C_0 + C \left[1 - \exp\left(-\frac{3h}{A}\right) \right] & h > 0 \end{cases} \quad h \in \mathbb{R}^+$$

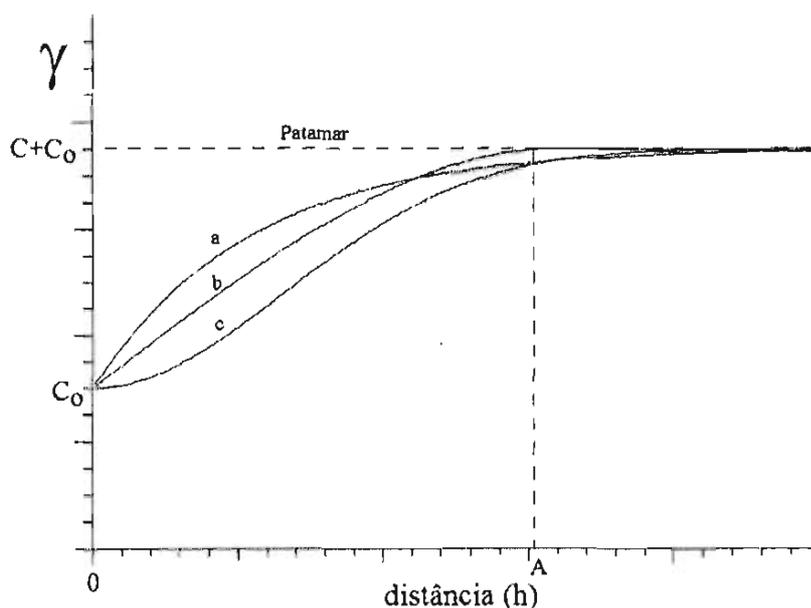


Figura 5. Comparação dos modelos de semivariogramas: Exponencial (a), Esférico (b) e Gaussiano (c).

Na figura 5, os três modelos com os mesmos valores para o patamar, efeito pepita e alcance são mostrados. Perto da origem, o modelo Gaussiano apresenta menor variabilidade espacial, seguido do modelo Esférico e, por último, o modelo Exponencial. Os três modelos se estabilizam no patamar para distâncias maiores que o alcance.

O modelo **efeito pepita puro** é definido por:

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & h = 0 \\ C_0 & h \neq 0 \end{cases}$$

Este modelo de semivariograma é descontínuo na origem e permanece constante para outros valores. Indica a ausência de dependência espacial.

Os modelos de semivariograma descritos anteriormente são suficientes na maioria dos casos para modelar um semivariograma experimental. Usualmente, um modelo efeito pepita e um modelo de transição são usados para modelar a variabilidade espacial para todas as direções. Em certos casos, o atributo pode apresentar um padrão de variabilidade espacial periódico ou de aumento contínuo sem atingir um patamar na área de estudo. Estes padrões são caracterizados usando os modelos: Efeito Buraco e Potência, respectivamente (Goovaerts, 1997; Ortiz Valencia, 1999). Ainda é possível usar mais de um modelo de transição quando precisamos melhorar o ajuste devido à presença de duas ou mais estruturas. Este tipo de modelo é chamado de semivariograma imbricado (Journel & Huijbregts, 1978).

Ajuste dos parâmetros de um modelo de semivariograma

Um modelo de semivariograma é a informação essencial para efetuar a *Krigagem*. O processo de ajuste de um modelo de semivariograma consiste em escolher o número de estruturas (modelos de semivariogramas), os tipos de modelos e a determinação dos parâmetros: efeito pepita, alcance e patamar de cada estrutura. Geralmente, considerando o efeito pepita, até duas estruturas é recomendável. Alguns fatores que devem ser considerados no processo de ajuste dos parâmetros são:

- 1) As estimativas do semivariograma não são independentes;
- 2) As estimativas do semivariograma perto da origem são as mais importantes para a *krigagem*, e também, estimadas com maior confiabilidade que as estimativas para as maiores distâncias.

Um método de ajuste que não considere estes fatores pode ser eficiente em ajustar os parâmetros, mas pode ser tendencioso ao estimar as estruturas de variabilidade. Três critérios podem ser usados neste processo:

- 1) Critérios baseados em mínimos quadrados (Cressie, 1993). Estes métodos não supõem uma distribuição de probabilidade. Podem classificar-se em: mínimos quadrados ordinários, mínimos quadrados generalizados e mínimos quadrados ponderados. Dois programas que usam este método são: o Variowin e o S+Spatialstats;
- 2) Critérios baseados na função de verossimilhança. Estes métodos modelam o atributo usando uma distribuição de probabilidade, por exemplo, uma função aleatória Normal. Atualmente, este enfoque tem crescido rapidamente. Muitos algoritmos deste enfoque estão disponíveis no programa R;
- 3) Critério por inspeção visual (Isaaks & Srivastava, 1989). O método visual baseia-se no fato de que a solução do sistema de equações da *krigagem* é única se usamos um modelo de semivariograma, sem considerar o grau de ajuste. Este método destaca que o ajuste deve acompanhar-se do conhecimento físico do fenômeno, e do bom senso na determinação de aproximações. Este método prevaleceu no início da Geoestatística, mas não oferece uma estatística da bondade do ajuste.

Interpolação espacial: Krigagem

A interpolação espacial é o processo de predição de uma variável em posições não amostradas, usando a informação de uma amostra. Entre os vários tipos de interpoladores espaciais, a *Krigagem* se caracteriza em usar a continuidade espacial do atributo. O preditor da *krigagem* é uma função dos dados com as seguintes características (Goovaerts, 1997):

É uma função linear ponderada dos dados, $\{Z(s_1), \dots, Z(s_n)\}$ e das ponderações desconhecidas $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ e $Z(s_0)$ é a variável a estimar.

$$p(Z, s_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(s_i)$$

- 2) É não tendencioso e minimiza o erro esperado da predição:

$$\sigma^2(s_0) = E \left[(Z(s_0) - p(Z, s_0))^2 \right]$$

- 3) Não precisa que o atributo seja modelado por lei de probabilidade, em particular de uma distribuição Gaussiana.

A *Krigagem Ordinária* é um dos métodos mais usados e simples na Geoestatística (Cressie, 1993). A suposição é a da estacionariedade intrínseca. As equações da *Krigagem Ordinária* para estimar $Z(s_0)$, usando o vetor de dados $Z = (Z(s_1), \dots, Z(s_n))^t$, são:

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j \gamma(\mathbf{s}_i - \mathbf{s}_j) + m = \gamma(\mathbf{s}_o - \mathbf{s}_i) \quad i = 1, \dots, n \quad \text{sob a condição:}$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$$

onde m é o multiplicador de Lagrange. Considerando a notação matricial:

$$\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_n \end{bmatrix} \quad \gamma = \begin{bmatrix} \gamma(\mathbf{s}_o - \mathbf{s}_1) \\ \vdots \\ \gamma(\mathbf{s}_o - \mathbf{s}_n) \end{bmatrix} \quad \Gamma = \begin{bmatrix} \gamma(\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_1) & \cdots & \gamma(\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_n) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma(\mathbf{s}_n - \mathbf{s}_1) & \cdots & \gamma(\mathbf{s}_n - \mathbf{s}_n) \end{bmatrix} \quad \mathbf{J} = \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}$$

As soluções para o preditor da *krigagem* e a variância da *krigagem* para estimar $Z(\mathbf{s}_o)$ são:

$$p_{\text{KO}}(Z, \mathbf{s}_o) = \left(\gamma + \mathbf{J} \frac{(1 - \mathbf{J}^t \Gamma^{-1} \gamma)}{\mathbf{J}^t \Gamma^{-1} \mathbf{J}} \right)^t \Gamma^{-1} \mathbf{Z}$$

$$\sigma_{\text{KO}}^2(\mathbf{s}_o) = \gamma^t \Gamma^{-1} \gamma - \frac{(\mathbf{J}^t \Gamma^{-1} \gamma - 1)^2}{(\mathbf{J}^t \Gamma^{-1} \mathbf{J})}$$

Definida uma grade de interpolação, o algoritmo da *krigagem* considera unicamente os dados que estão dentro de uma vizinhança de um ponto da grade. A forma e extensão da vizinhança são obtidas do modelo de semivariograma. Assim, unicamente são considerados na interpolação de um ponto da grade aqueles dados onde o atributo ainda apresenta continuidade espacial. Se a modelagem da continuidade espacial não detectou um padrão espacial, isto é, temos um modelo efeito pepita puro, então, o preditor de *krigagem* corresponde a uma média móvel.

A variância da *Krigagem* não depende do valor dos dados, depende do número de pontos, suas posições e do modelo de semivariograma. Esta é uma medida relativa da informação usada para estimar um ponto. Se o ponto da grade de interpolação coincidir com um ponto amostrado, a variância da *krigagem* é zero e tende a aumentar à medida que o ponto da grade não tiver dados próximos. Não deve ser usado como uma medida do erro da predição de $Z(\mathbf{s}_o)$. Podemos construir mapas da variância da *krigagem* para identificar zonas onde a estimativa espacial é pouco confiável.

Uma forma de avaliar a qualidade da *krigagem* é através da Validação Cruzada (Deutsch & Journel, 1998). Este método retira um dado de cada vez e o reestima usando o resto dos

dados através da *krigagem*, usando o modelo ajustado de semivariograma. Desta forma podemos calcular os resíduos. Para ter um bom ajuste, os resíduos devem ser não correlacionados, ter média próxima ao zero e desvio padrão pequeno.

Outros métodos de predição espacial na Geoestatística são *Krigagem* Simples, Indicadora, Universal e *Cokrigagem* (Cressie, 1993; Goovaerts, 1997).

Uma aplicação na Agricultura de Precisão

Neste tópico, os conceitos geoestatísticos são ilustrados numa aplicação de AP. Os dados usados nesta aplicação foram obtidos de uma amostragem do solo e planta realizada em fevereiro do ano 2000 na Fazenda Tabatinga, Carambei, Paraná (Ver Capítulo 5). Foram coletadas amostras do solo nas profundidades 0 - 5, 5 - 10 e 10 - 20 cm e tecido foliar próximos aos pontos de coleta de amostras de solo, numa grade de amostragem composta por 251 pontos (107 pontos na grade maior e duas grades menores com 72 pontos). Estas grades estão ilustradas na figura 6.

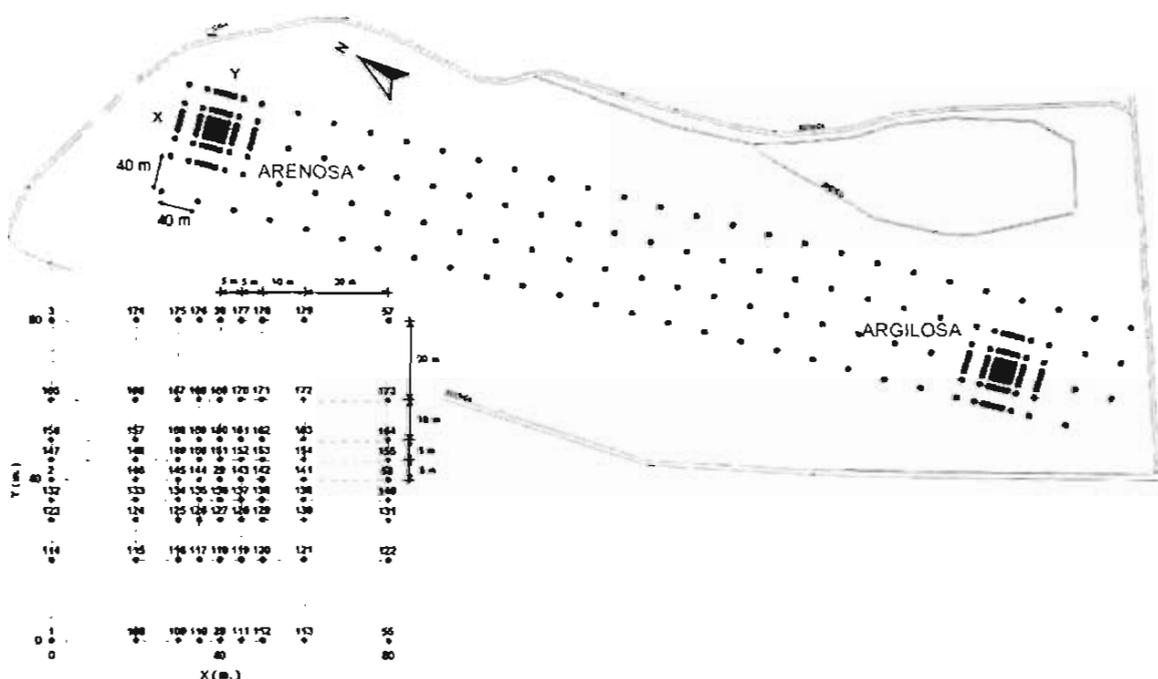


Figura 6. Área de estudo e grades de amostragem maior e menor.

A análise exploratória dos atributos do solo e planta mostrou diferentes tipos de histogramas, a maioria deles assimétricos, e outros poucos, simétricos e bimodais. Três exemplos são mostrados na figura 7: Boro no tecido foliar da soja e fósforo e o carbono no solo na profundidade 0 - 5 cm. Estes três casos apresentaram problemas para a estimação do semivariograma. O primeiro caso por ter um dado *outlier* e os outros dois por serem histogramas assimétricos.

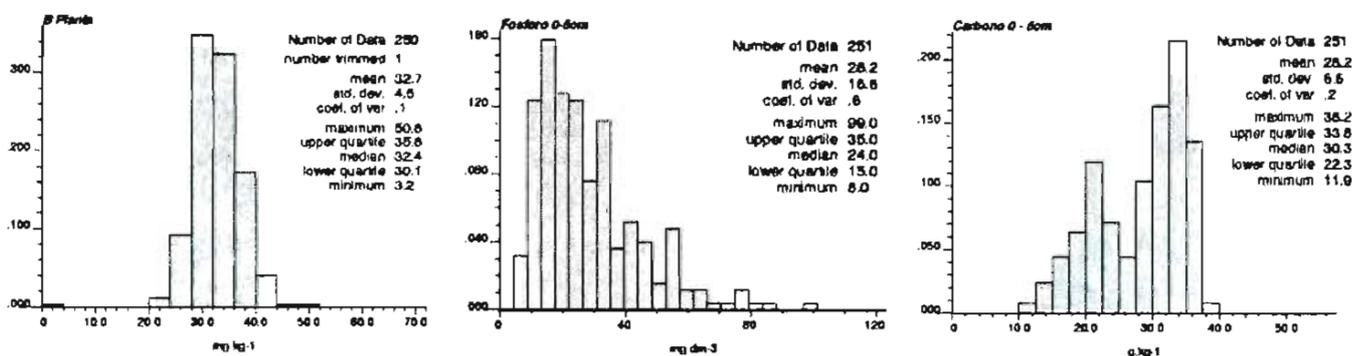
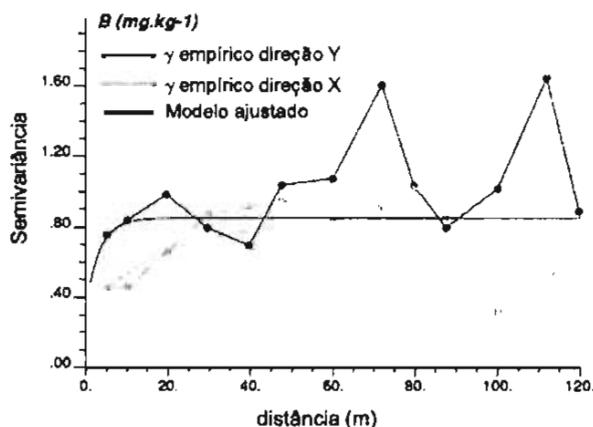


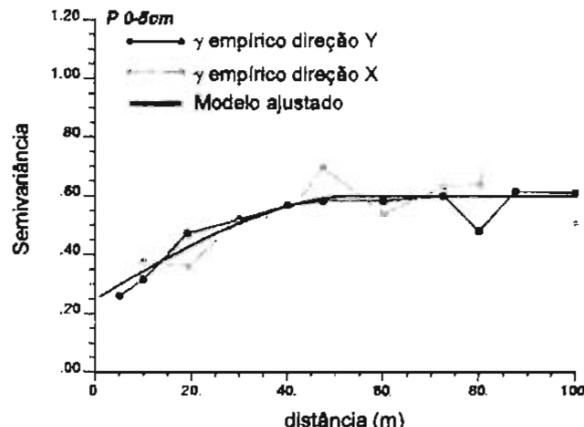
Figura 7. Histogramas do teor de boro no tecido foliar da soja e fósforo e carbono do solo (profundidade 0-5 cm).



B planta

(mg.kg-1)

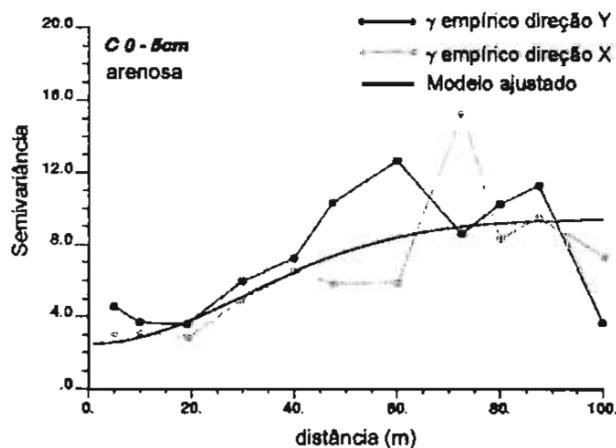
Modelo	Exponencial
Alcance (X,Y)	(70,25)
Efeito Pepita	0.35
Contribuição	0.60
Patamar	0.95



P 0 - 5cm

(Mehlich-1, mg.dm-3)

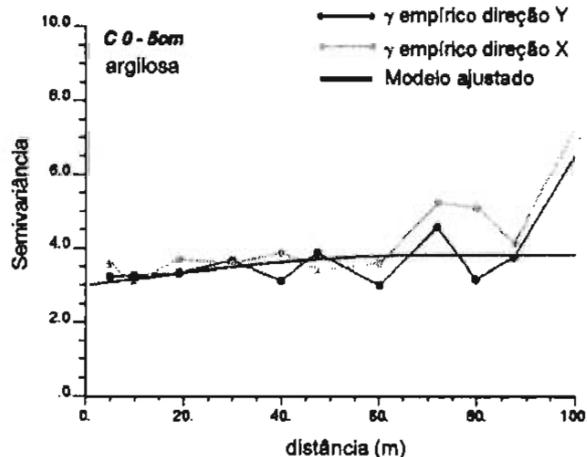
Modelo	Esférico
Alcance	55m
Efeito Pepita	0.25
Contribuição	0.35
Patamar	0.60



C 0 - 5cm

(g.kg-1)

Modelo	Gaussiano
Alcance	75m
Efeito Pepita	2.50
Contribuição	6.90
Patamar	9.40



C 0 - 5cm

(g.kg-1)

Modelo	Esférico
Alcance	70m
Efeito Pepita	3.00
Contribuição	0.80
Patamar	3.80

Figura 8. Semivariogramas experimentais para boro no tecido foliar da soja, fósforo e carbono no solo na profundidade 0-5 cm.

No caso do boro, foi eliminado o dado *outlier*. Para o fósforo modelou-se o semivariograma para os valores transformados usando o *Normal Score* (Deutsch & Journel, 1998). O histograma do carbono revela a presença de duas populações: uma na zona argilosa e outra na arenosa e foi modelado o semivariograma em cada área. Na figura 8, são demonstrados os semivariogramas empíricos, nas direções dos eixos X e Y, para os três atributos e os modelos ajustados. O boro apresentou anisotropia geométrica com alcances 70 e 25 metros, nas direções dos eixos X e Y, respectivamente. O fósforo e o carbono tiveram um padrão isotrópico, sendo que o carbono teve padrões de continuidade espacial diferente em cada área.

Estes três atributos foram interpolados usando a *krigagem* ordinária numa grade de 10 por 10 metros. Foram usados os módulos do GSLIB e os mapas foram gerados usando o SURFER. Os mapas interpolados são apresentados na figura 9. Mapas interpolados dos atributos do solo podem ser integrados e analisados em programas SIG. Através de operações entre mapas novas informações podem ser obtidas. Por exemplo, o mapa para corrigir a acidez ou a deficiência de um nutriente no solo.

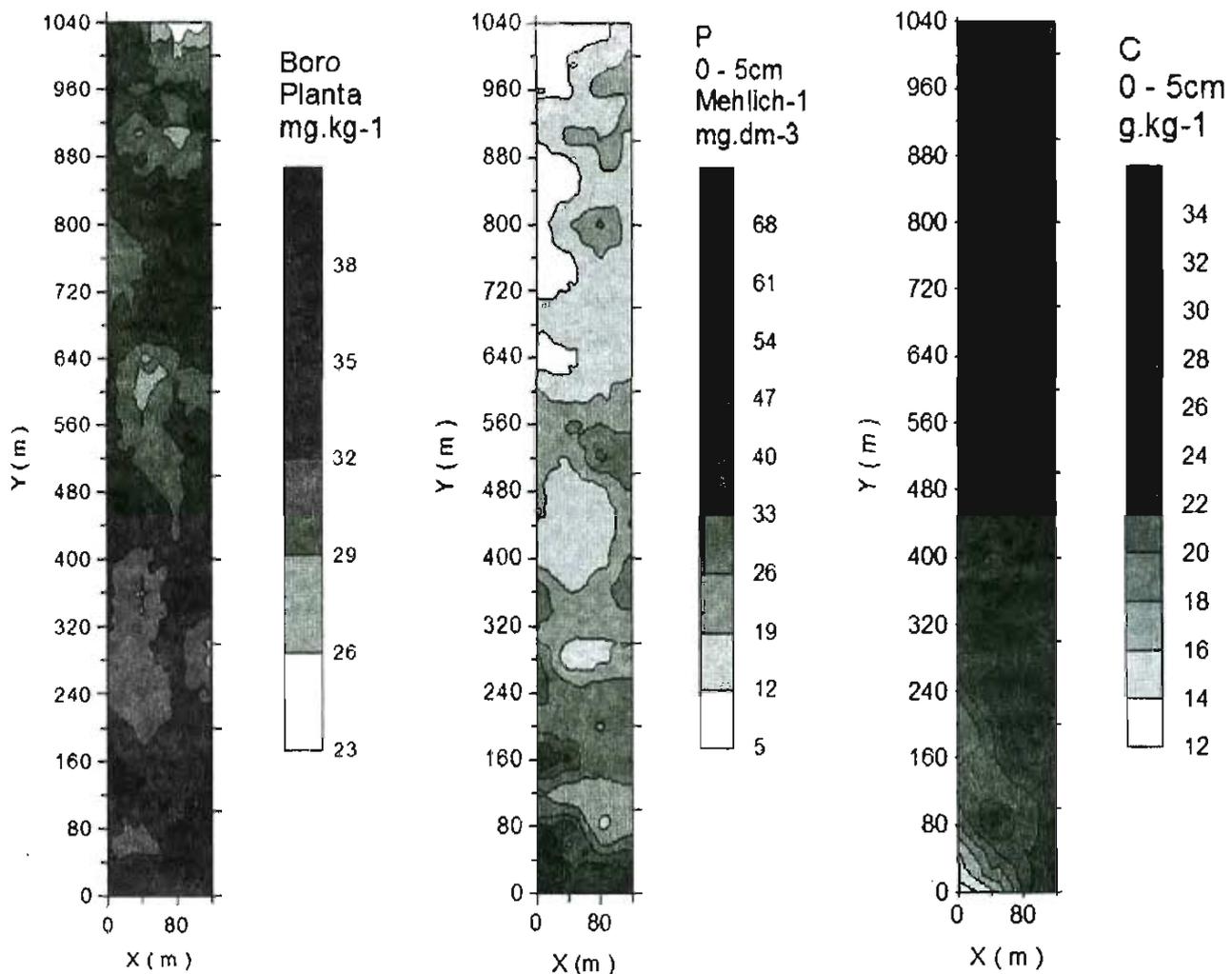


Figura 9. Mapas de *krigagem* ordinária para o boro no tecido foliar da soja e fósforo e carbono no solo na profundidade 0-5 cm.

Conclusões

A Geoestatística é uma ferramenta importante para a análise de dados no âmbito da Agricultura de Precisão. Pode ser usada no planejamento e o desenho de amostragens do solo e planta, na análise da continuidade espacial de atributos do solo e planta e na obtenção de grades interpoladas através da *krigagem*.

A análise exploratória dos dados foi uma fase crítica, dado que a maioria dos atributos precisou de transformações nos dados para poder estimar os semivariogramas. Os atributos do solo e planta apresentaram diferentes tipos de padrões de continuidade espacial. A grade de amostragem foi eficiente ao permitir a captura de padrões de anisotropia e variabilidade espacial para pequenas distâncias. A *Krigagem* dos atributos do solo e planta permitiu a geração de mapas das suas distribuições espaciais.

Atualmente, não há um programa geoestatístico completo e amigável para a Agricultura de Precisão, o que, sem dúvida, seria muito bem-vindo para o geoestatístico e para os profissionais ligados à agricultura.

Referências Bibliográficas

ATKINSON, P. M.; LEWIS, P. Geostatistical classification for remote sensing: an introduction. **Computers and Geosciences**, Amsterdam, v. 26, p. 361-371, 2000.

BRUS, D.; DE GRUIJTER, J. Random sampling or geostatistical modeling? Choosing between design-based and model-based sampling strategies for soil (with discussion). **Geoderma**, Amsterdam, v. 80, p 1-59, 1997.

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

CRESSIE, N. A. **Statistics for spatial data**. Rev. Ed. New York: John Wiley & Sons, 1993. 928 p.

DEUTSCH, C. V.; JOURNEL, A. G. **GSLIB: geostatistical software library and guide user's**. 2. ed. New York: Oxford University Press. 1998. 369 p.

DUBOIS, G.; MALCZEWSKI, J.; DE CORT, M. Spatial interpolation comparison 97. **Journal of Geographic Information and Decision Analysis**, Melbourne, v. 2, p. 1-203. 1998. Special Issue.

FORTES, B. P.; VALENCIA, L. I.; RIBEIRO, S. V.; MEDRONHO, R. A. Modelagem geoestatística da infecção por *Ascaris lumbricoides*. **Cadernos de Saúde Pública**, Rio de Janeiro, v. 20, p. 727-734. 2004.

GOLDEN SOFTWARE INC. **Surfer Mapping System**. Ver. 8.05. 2004. CD-ROM

GÓMEZ-HERNANDEZ, J. J.; WEN, X. H. To be or not to be multi-Gaussian? A reflection on stochastic hydrogeology. **Advances In Water Resources**, Amsterdam, v. 21. p. 47-61. 1998.

GOOVAERTS, P. **Geostatistics for natural resources evaluation**. New York: Oxford University Press, 1997. 483 p.

GOOVAERTS, P. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives. **Geoderma**, Amsterdam, v. 89, p. 1-45. 1999.

GHOSTGUM SOFTWARE PTY LTD. **GSview for Windows**. Ver.4.3. 2002. CD-ROM.

ISAAKS, E.; SRIVASTAVA, R. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. 561 p.

INSIGHTFUL INC. **S-PLUS for ArcView GIS: User's Guide**. Seattle, Washington. 1998.107p.

JOURNEL, A. G.; HUIJBREGTS, CH. J. **Mining geostatistics**. London: Academic Press, 1978. 600 p.

KALUZNY, S.; VEGA, S.; CARDOSO, T.; SHELLY, A. **S+SPATIALSTATS: user's manual for Windows and Unix** MathSoft, Inc. New York: Springer-Verlag. 1996. 327 p.

MALLARINO, A. P.; WITTRY, D. Efficiency of grid and zone soil sampling approaches for site-specific assessment of phosphorus, potassium, pH and organic matter. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v. 5, p.131-144. 2004.

MATHERON, G. **Traité de géostatistique appliquée**. Paris: Technip, 1962. 333 p.

MCBRATNEY, A.; ODEH, I.; BISHOP, T.; DUNBAR, M.; SHATAR, T. An overview of pedometric techniques for use in soil survey. **Geoderma**. Amsterdam, v. 97, p. 293-324. 2000.

MINASNY, B., MCBRATNEY, A. B.; WHELAN, B. M. **VESPER version 1.5**. Sydney: Australian Centre for Precision Agriculture: The University of Sydney, 2002. 43 p.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER; G. C. **Applied statistics and probability for engineers 3**. ed. New York: John Wiley & Sons, 2003. 706 p.

MONESTIEZ, P., COURAULT, D., ALLARD, D. RUGET, F. Spatial interpolation of air temperature using environmental context: application to a crop model. **Environmental and Ecological Statistics**, Dordrecht, v. 8, p. 297-309. 2001.

MYERS, D. E. To be or not to be...stationary? That Is the question. **Mathematical Geology**. Dodrecht, v. 21, p. 347-362. 1989.

ORTIZ VALENCIA, L. I. **O paradigma da krigagem Indicatriz e problema espaço-temporal na geoestatística**. Rio de Janeiro. UFRJ, 1999. 215 p. Dissertação (Mestrado) UFRJ, Instituto de Matemática

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

PANNATIER, Y. **Varlowin: software for spatial data analysis in 2D**. New York: Springer Verlag, 1996. 91 p.

VENABLES W.; RIPLEY B. **Modern applied statistics with S-PLUS**. New York: Springer Verlag. 1994, 495 p.

VENABLES, W.; SMITH, D. **An Introduction to R**. Disponível em: <<http://www.r-project.org>>. Acesso em: 17 de nov. 2004.

WEBSTER, R. Is soil variation random? **Geoderma**, Amsterdam, v. 97, p.149-163, 2000.



Solos, Clima e Vegetação da Região de Campos Gerais

Itamar Antonio Bognola

Pedro Jorge Fasolo

Silvio Barge Bhering

Lucieta G. Martorano

Introdução

O estudo dos componentes do meio físico (substrato rochoso, relevo, solo e clima) se faz necessário para a elaboração de cartas básicas que orientem o ordenamento territorial e subsidiem a formulação das aptidões do meio abiótico para atividades agrossilvipastoris e para a gestão ambiental dos recursos naturais. Assim, os sistemas de manejo tradicionais, com o ineficiente tratamento de variabilidade de fatores que afetam a produção (fertilidade, umidade, controle fitossanitário etc.), pela média de extensas áreas, podem dar lugar a estratégias econômica e ecologicamente mais equilibradas, com tratamento da variabilidade pelo manejo sítio específico. Os novos recursos para se realizar esse conceito inovador de agricultura começam a ser disponibilizados no mercado brasileiro, o que demanda uma ação rápida para adaptação e a correta recomendação de uso da tecnologia (Mantovani & Gomide, 2000).

Desta forma, a identificação das classes de solos, como no presente escopo deste capítulo, são essenciais ao ordenamento territorial para indicação de usos mais adequados deste recurso natural, bem como, as informações das características morfológicas, físicas e químicas sobre os solos, auxiliarem na manipulação e integração dos dados em SIG.

O Meio Físico da Região dos Campos Gerais

Geologia

A Região dos Campos Gerais, em sua quase totalidade, está situada nos Primeiro e Segundo Planaltos Paranaense (Fig.1) onde predominam rochas graníticas porfíricas relacionadas ao Proterozóico/Paleozóico, rochas do Grupo Açungüi do Proterozóico Superior e rochas do Grupo Campos Gerais, das Formações Furnas e Ponta Grossa.

Depósitos fluviais inconsolidados, referidos ao Holoceno, são encontrados também nas amplas várzeas dos rios Iapó e Pitangüi, constituídos por sedimentos areno-siltico-argilosos. Acumulações orgânicas com espessuras que variam de poucos centímetros a um metro ou mais

de espessura são encontradas sobre estes depósitos, dando origem a solos de natureza orgânica (ORGANOSSOLOS) ou minerais (GLEISSOLOS MELÂNICOS). Cabe registrar ainda a ocorrência de numerosos diques de diabásio, microdiorito e diorito pórfiro, os quais mantêm direções que se situam entre N40° e N60°W, por toda a Região dos Campos Gerais.

Fisiografia

A porção sudeste da Região dos Campos Gerais mostra uma topografia claramente distinta do restante da área em estudo. Caracteriza-se, basicamente, por apresentar um relevo mais acidentado, com cristas e espigões alongados, alinhados segundo direções preferenciais (NE-SW), condicionados pela presença de diques de diabásio e de microdiorito. Segundo Fuck (1967) é comum a inversão da posição dos espigões, alinhando-se na direção NW-SE, principalmente nas faixas de afloramentos de dolomitos. Ainda de acordo com Fuck (1967), os interflúvios são estreitos e alongados, sempre condicionados às direções estruturais, sendo os vales estreitos e profundos, com vertentes côncavas, fortemente inclinadas, com os cursos d'água predominantemente subseqüentes ou adaptados a falhas e diaclases.

Nesta porção sudeste predominam os relevos forte ondulado, ondulado e montanhoso. A área restante, caracteriza-se pela ocorrência predominante de uma sucessão de baixas colinas, de formas suavizadas, com largas planícies aluviais de relevo plano ou praticamente plano. As colinas tendem a ter o topo amplo, com declividade não superior a 3%, enquanto as vertentes, em centenas de metros, são normalmente convexas, com declividade raramente ultrapassando de 10%, o que permite o tráfego de qualquer tipo de máquina, com alto rendimento. Nas partes altas e bem drenadas predominam solos das classes LATOSSOLO BRUNO e LATOSSOLO VERMELHO, enquanto que nos vales ocorrem ORGANOSSOLOS e GLEISSOLOS. Uma pequena porção da área, a oeste, com predomínio de solos arenosos desenvolvidos a partir de arenitos da Formação Furnas já se encontra nos domínios do Segundo Planalto Paranaense.

Vegetação

A vegetação nativa da região de Campos Gerais é representada pelos campos subtropicais úmidos e pela floresta subtropical perenifólia. Segundo Maack (1968), os campos limpos ou estepes de gramíneas baixas, são formas de relictos de um antigo clima semi-árido pleistocênico. E que as matas somente se desenvolveram durante um clima constantemente mais úmido, no término do pleistoceno, a partir das matas de galeria, dos capões de nascentes e das matas de encostas das escarpas. O avanço da mata foi impedido pelas queimadas anuais dos campos e que, com o desaparecimento cada vez mais acentuado da mata, surgiram em seu lugar inicialmente, a tigüera, em seguida a capoeira e por fim o campo sujo (Maack, 1968). Com



Figura 1. Aspectos da Paisagem Regional (1º Plano: 1º Planalto Paranaense; 2º Plano: 2º Planalto Paranaense), na Região dos Campos Gerais, PR.

referência à mata de araucária, Maack (1968) destaca entre as espécies de maior porte, as seguintes: imbuia (*Ocotea porosa*), diversas canelas dos gêneros *Nectandra*, *Ocotea* e *Persea*; além da caviúna (*Dalgeria miscolobium*), do monjoleiro (*Anadenanthera colubrina*), do cedro (*Cedrela fissilis*), da guabiroba (*Campomanesia xanthocarpa*) e do pinheiro bravo (*Podocarpus lambertii*). Como espécies de menor porte, são citadas: o tapexingui (*Croton sp*), o fumo bravo (*Solanum verbascifolium*), a aroeira vermelha (*Schinus terebinthifolius*) e o pau cigarra (*Senna multijuga*).

Clima

Considerando que as condições climáticas são avaliadas com base na análise das variáveis meteorológicas, tomou-se por base os dados disponíveis, gerados no município de Castro pela Fundação ABC e os do Instituto Nacional de meteorologia-INMET para representar a região em estudo. Como a série e o local dos pontos de coleta são diferentes, procurou-se fazer uma análise comparativa entre as localidades, em termos de dados médios, visando avaliar, em ordem de grandeza, as chuvas mensais na área de estudo. A partir dos totais médios mensais de chuva (Fig. 2), pode-se observar um comportamento semelhante dos locais.

Na Fig.3, foram comparados o mesmo período de dados para os dois locais de coleta, verificando-se que os valores foram bem próximos, em ordem de grandeza, isto significando que existe certa semelhança quanto à influência dos eventos pluviométricos.

Objetivando indicar os valores mensais e anuais extremos, utilizou-se a maior série de dados, correspondente ao período de 1961 a 2000. Tais informações visam subsidiar o planejamento agrícola, com a indicação dos meses e anos em que ocorreram a maior e menor oferta pluviométrica na área. Assim sendo, na Fig. 4, os dados evidenciam que os maiores totais médios ocorreram em janeiro, chegando a atingir os 476,1mm de chuva (1990), quando a média não ultrapassava os 204mm. No trimestre menos chuvoso, que corresponde ao inverno do Hemisfério Sul, os valores médios variaram de 80,3 a 121,8mm, sendo agosto o mês de menor oferta pluviométrica. No entanto, nesse mês, em 1973, choveu 261,1mm e em 1983, a contribuição de água das chuvas para as culturas de inverno foi insignificante (0,8mm).

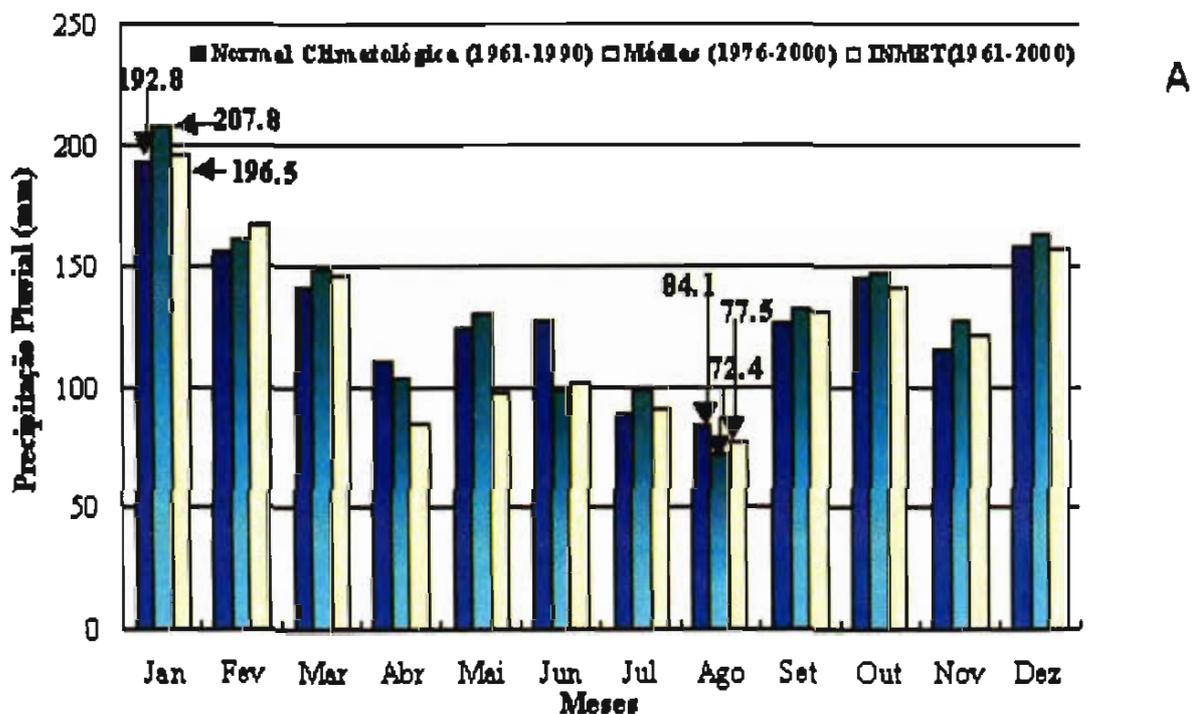


Figura 2. Totais pluviométricos médios em dois locais de coletas, em Castro-PR.

Quanto à média anual dos 40 anos, o total foi de 1.587,1mm, com extremos atingindo os 2.716,5 e 968,5mm pluviométricos. Comparando os dados analisados da série de 40 anos com os apresentados por Godoy et al. (1976), constatou-se que a precipitação média encontra-se dentro da faixa de 1.400 a 1.600mm anuais. Com relação aos aspectos térmicos, verificou-se que a média anual varia de 16 a 18°C, sendo julho o mês mais frio, com temperatura média mensal inferior a 18°C e fevereiro o mais quente, com média mensal superior a 22°C. A média anual das temperaturas máximas oscila de 23 a 25°C e a das mínimas, de 11 a 13°C. No

que se refere à ocorrência de geadas, estas são um tanto freqüentes. Segundo Maack (1968), a distribuição anual das geadas noturnas esperadas numa série de anos (1 decênio), para o município de Castro, é de 12 ocorrências/ano, com maior incidência nos meses de julho a agosto (49,5%) e, menor, em maio, junho e setembro (48,7%).

A partir desses dados, constatou-se que o município de Castro encontra-se sob a influência do tipo climático Cfb de Köppen, que enquadra-se na faixa mesotermal onde a temperatura média do mês mais frio varia entre 18 e -3°C , denominado de temperado úmido, com verões frescos, geadas severas demasiadamente freqüentes e sem estação seca. Muito embora o balanço hídrico, segundo Thornthwaite & Matter (1955), com 125mm de retenção de água no solo, acuse, para a região, um excedente hídrico anual da ordem de 500 a 800mm, deve-se considerar que, em anos atípicos, quando há má distribuição pluviométrica, espera-se uma certa deficiência hídrica – entendida como a falta de água no solo necessária para manter a vegetação verde turgente, principalmente nos solos de textura mais arenosa.

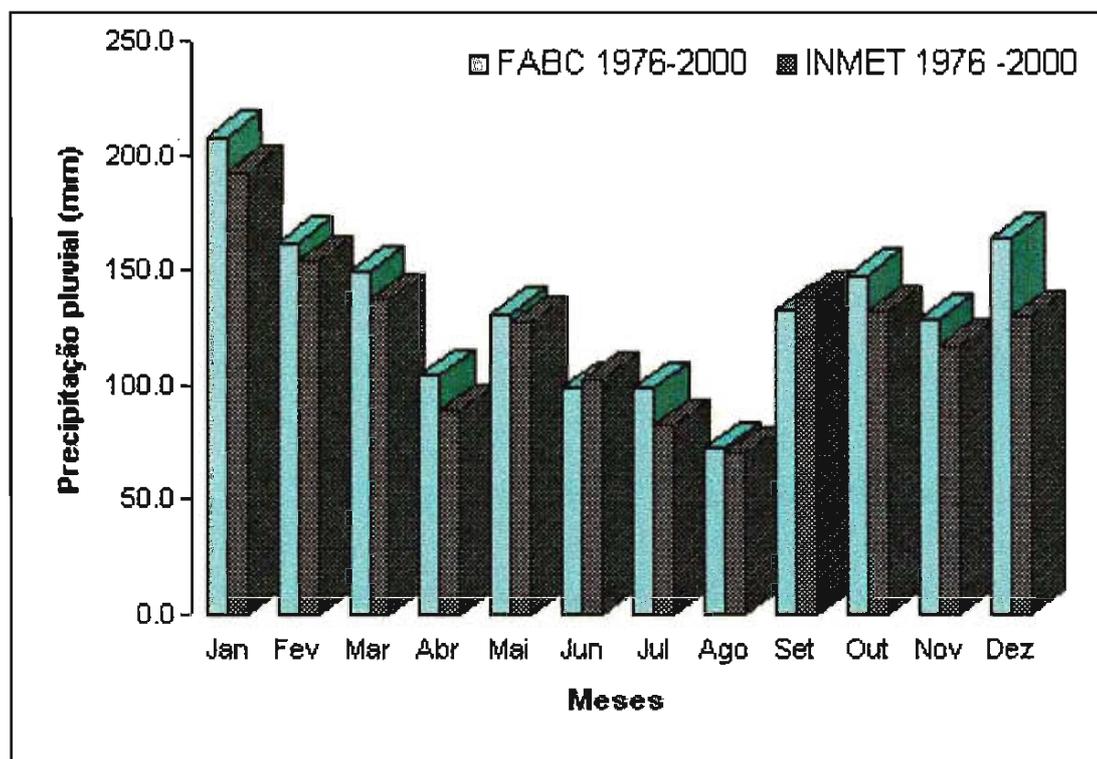


Figura 3. Valores médios mensais, nas duas localidades de coleta de dados, correspondentes ao período de 1976 a 2000, no município de Castro, PR.

Por meio das Cartas Climáticas Básicas do Estado do Paraná (Godoy et al., 1976), pode-se fazer as seguintes considerações para a área em apreço:

- Verifica-se um comportamento uniforme em relação à distribuição dos totais pluviométricos, uma vez que a altura média da precipitação anual varia de 1.400 a 1.600 mm;

- As chuvas são bem distribuídas durante o ano e, embora não se registre nenhum período de estiagem, vê-se que a precipitação no trimestre menos chuvoso (junho, julho e agosto) é sensivelmente menor em comparação com o trimestre mais chuvoso (dezembro, janeiro e fevereiro), variando de 250 a 350 mm e de 450 a 550mm, respectivamente;

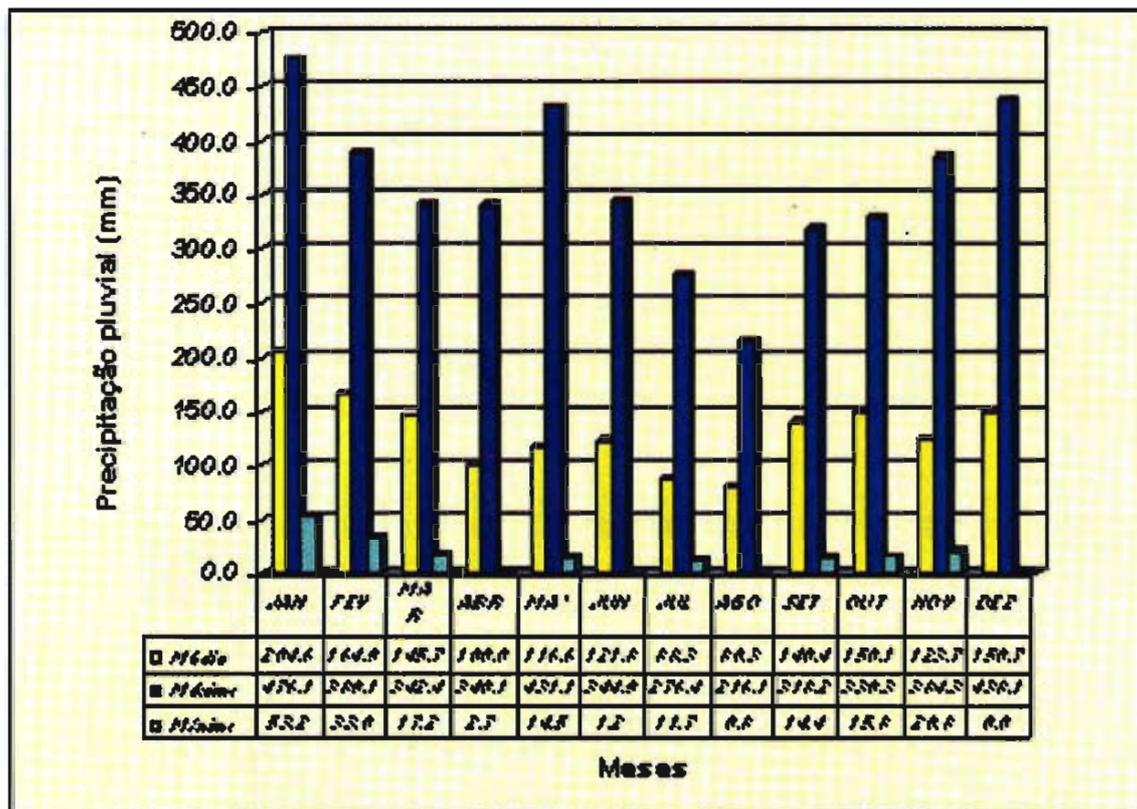


Figura 4. Valores médios mensais e extremos, estação do INMET (1961-2000), do município de Castro, PR.

Principais Solos da Região dos Campos Gerais

As classes de solos deste levantamento foram estabelecidas segundo os critérios preconizados por Embrapa (1999).

Latossolos

São solos constituídos por material mineral, com horizonte B latossólico imediatamente abaixo do horizonte A. Por ocuparem cerca de 30% do território paranaense e por serem utilizados em larga escala, estes solos podem ser considerados como os mais importantes do Estado. Este elevado aproveitamento resulta, fundamentalmente, das ótimas propriedades físicas, aliadas às condições de relevo bastante favoráveis (Fig.5). Na Tabela 1, é apresentada a distribuição dos solos na região dos Campos Gerais por meio dos municípios de Castro, Carambel, Tibagi e Piraí do Sul. Observa-se que os Latossolos, como observado para todo o estado do Paraná, também predominam nos Campos Gerais ocupando 817,6 km², ou seja, 59,1% da área total ocupada pelos quatro municípios.

Os Latossolos são solos muito evoluídos, em função de enérgicas transformações sofridas pelo material de origem. Em conseqüência, predominam na sua constituição os óxidos de ferro e de alumínio e, minerais de argila do grupo da caulinita (1:1). São normalmente muito profundos (> 2 m), friáveis ou muito friáveis, muito porosos e acentuadamente ou fortemente drenados, com seqüência de horizontes A-Bw-C pouco diferenciados, sendo o horizonte subsuperficial do tipo latossólico. Constituem feições marcantes destes solos: a distribuição de argila relativamente uniforme ao longo do perfil; os baixos teores de silte e da relação silte/argila; a baixa capacidade de troca de cátions e o alto grau de floculação das argilas, responsável pela pouca mobilidade destas e pela alta estabilidade dos agregados do solo. Esta estabilidade, juntamente com a alta porosidade, a boa permeabilidade e o relevo suave ondulado, conferem a estes solos uma eleva-

Tabela 1. Distribuição das principais classes de solos nos municípios de Castro, Carambei, Tibagi e Pirai do Sul.

Classe de Solo *	Município com dominância da classe de solo e área (Km ²)	Área de ocorrência no município onde domina (%)	Área Total da Classe de Solo nos Quatro Municípios (Km ²)	Porcentagem do Total da Classe de Solo nos Quatro Municípios (%)
Cambissolos Háplicos	Tibagi 1136,78	38,01	2264,49	29,80
Cambissolos Húmicos	Carambei 60,30	9,36	276,13	3,63
Neossolos Litólicos (normalmente associados com Cambissolos e Afloramentos Rochosos)	Tibagi 812,80	27,17	1492,39	19,64
Latossolos Vermelhos	Pirai do Sul 315,98	24,69	1203,38	15,84
Nitossolos Háplicos (normalmente associados com Cambissolos)	Castro 678,93	25,39	872,64	11,48
Organossolo (normalmente associados com Gleissolo)	Castro 404,85	15,14	543,71	7,16
Latossolo Bruno	Castro 368,21	13,77	373,82	4,92
Latossolo Vermelho-Amarelo	Carambei 133,43	20,71	365,33	4,81
Argissolos Vermelho-Amarelos	Carambei 94,13	14,61	188,09	2,48

da resistência à erosão. Na área em estudo foram identificadas três modalidades de Latossolos: Latossolos Brunos, Latossolos Vermelhos e Latossolos Vermelho-Amarelos.

Latossolos Brunos

Compreende solos minerais não hidromórficos, com matiz mais amarelo que 2,5YR na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B (Fig.6). Por ocorrerem em altitudes quase sempre superiores a 1.000 m, o que condiciona a prevalência de um clima frio e úmido, possuem um horizonte A espesso (30 cm ou mais em condições naturais), escuro (valor e cromas 7-3,5) e com elevados teores de matéria orgânica, entre 3 e 5%. Mesmo no horizonte BA, que comumente ocorre entre 30 e 80 centímetros, os teores de matéria orgânica mantêm-se acima de 2%. Por vezes o horizonte superficial não satisfaz os requisitos de cor para A proeminente ou húmico, que são os dois tipos de A predominantes, assumindo um caráter "cripto-húmico" (Carvalho, 1982; Camargo et al., 1987). Já o horizonte B pode ser todo ele de coloração brunada ou, mais comumente, de cor brunada com predomínio do matiz 5,0YR nos primeiros 50 cm, e o restante, inclusive o horizonte C, mais avermelhado. Ocorrem em relevo plano e suave ondulado, ocupando na paisagem as superfícies mais estáveis, situadas quase sempre nos divisores de água. São formados a partir tanto do saprolito resultante da alteração de rochas referidas ao Paleozóico e pertencentes ao Grupo de Castro (granitos, argilitos e andesitos entre outras), quanto de rochas do Pré-Cambriano representadas por granitos subalcalinos e alcalinos, migmatitos e sienitos.

Potencialidades e restrições

Em condições naturais estes solos apresentam uma severa deficiência química, expressa por valores muito baixos da soma de bases trocáveis e da saturação por bases, pelos elevados teores de alumínio trocável ao longo do perfil e pelos índices de pH, em geral próximos ou inferiores a 5,0. A baixa fertilidade natural, no entanto, é o único fator capaz de restringir o uso agrícola destes solos. Porém, o emprego de corretivos e fertilizantes ao longo dos anos, além de ter corrigido a acidez e elevado os níveis de nutrientes a um patamar adequado, determinou uma certa uniformidade no potencial produtivo dos solos desta classe.

Com relação aos aspectos físicos, estes foram muito influenciados pelo uso e manejo dos solos quando ainda prevalecia na região o uso da aração e gradagem para o preparo do solo. A formação de uma camada compactada logo abaixo da camada arável era a principal evidência das alterações sofridas pelo solo, resultando em diminuição da porosidade total e conseqüente aumento da densidade e da perda de água por escoamento superficial.

Latossolos Vermelhos

Compreende solos minerais não hidromórficos, com matiz 2,5YR ou mais vermelho na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B (Embrapa, 1999) (Fig.7).



Figura 5. Aspectos de Paisagem de Ocorrência de Latossolos, no Município de Castro

Na área, os solos pertencentes a esta classe são todos distróficos em subsuperfície, visto apresentarem-se fortemente dessaturados no horizonte B, principalmente a partir dos 60 ou 80 cm superficiais, conforme descrições das unidades a seguir. Ocorrem, de um modo geral, em relevo suave ondulado, ocupando na paisagem as superfícies mais antigas, situadas quase sempre nos divisores de água. São desenvolvidos tanto de rochas sedimentares de granulação fina referidas ao Permiano, mais especificamente à Formação Ponta Grossa, quanto de rochas do Pré-Cambriano representadas por granitos subalcalinos e alcalinos, e provavelmente por migmatitos e sienitos. As características morfológicas mais comumente observadas, considerando-se os horizontes A e Bw são, respectivamente, as seguintes: cor bruno avermelhado escuro (5YR 3/3) e vermelho-escuro (2,5YR 3,5/6); textura franco argilo-arenoso ou franco argiloso e franco argiloso ou argila; estrutura fraca granular ou fraca, pequena, blocos subangulares e forte, muito pequena, granular com aspecto de maciça, porosa ou fraca média grande blocos subangulares; consistência ligeiramente dura, friável, ligeiramente plástica a plástica, pegajosa e ligeiramente dura, muito friável, plástica, pegajosa.

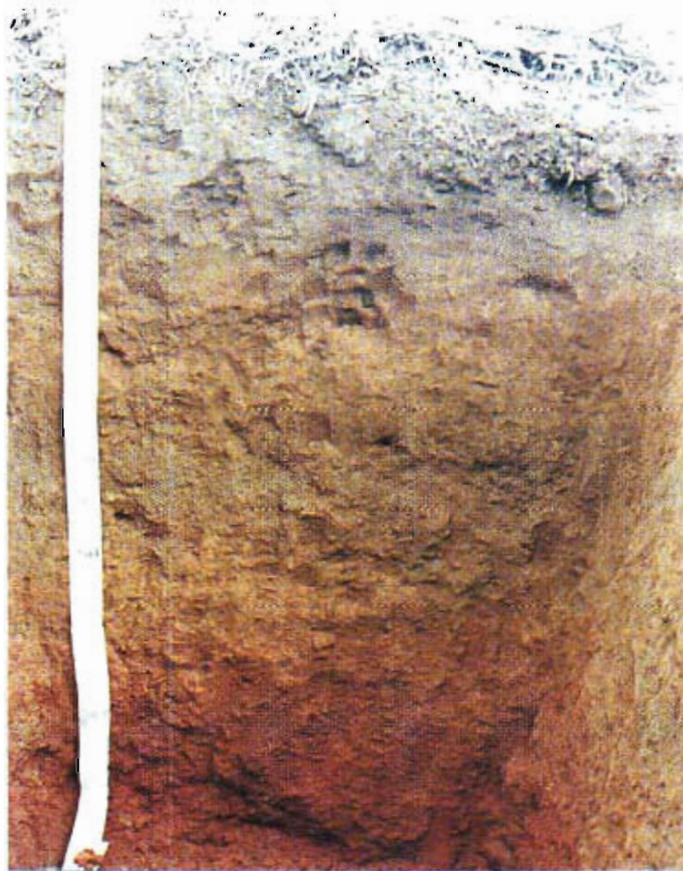


Figura 6. Perfil de Latossolo Bruno, no Município de Castro, PR.



Figura 7. Perfil de Latossolo Vermelho no Município de Castro, PR.

Potencialidades e restrições ao uso agrícola

O único fator que poderia restringir o uso agrícola dos solos desta classe é a baixa fertilidade natural. Porém, também devido ao emprego de corretivos e fertilizantes ao longo dos anos além de corrigir a acidez e elevar os níveis de nutrientes a um patamar adequado, determinou uma certa uniformidade no potencial produtivo destes solos. Quanto aos aspectos físicos, estes também foram muito influenciados pelo uso e manejo dos solos quando ainda prevalecia a aração e gradagem para o preparo do solo. A formação de uma camada arável, ainda hoje observada em alguns locais, constitui-se na principal evidência dessas alterações, resultando em diminuição da porosidade total e conseqüente aumento da densidade, da perda de água por escorrimento superficial e dos danos causados pela erosão. A pulverização excessiva da camada superficial, com a destruição da estrutura original do solo, também pode ter contribuído para o aparecimento de solos parcialmente truncados, com a perda de grande parte do horizonte superficial (fase erodida). Este quadro, no entanto, mudou completamente com o advento do uso do plantio direto, contribuindo para a manutenção ou mesmo para o aumento dos níveis de matéria orgânica e tornando a erosão tolerável, mesmo nas encostas com declividade em torno de 10%. A principal preocupação que se deve ter é com a ocorrência de déficit hídrico que, dependendo da época e da duração, pode comprometer seriamente a produtividade da lavoura. Os Latossolos Vermelhos são os mais abrangentes dentro da classe dos Latossolos (15,8%) nos quatro municípios considerados, dos quais Pirai do Sul possui a maior área (315,9 km²) com esta classe de solo (Tabela 1).

Latossolos Vermelho-Amarelos

Esta classe de Latossolo caracteriza-se por apresentar, na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B, matiz 5YR ou mais vermelho e mais amarelo que 2,5YR.

Na área em estudo a classe é representada apenas por solos de textura média (15 a 35% de argila, no horizonte B), sendo esta a principal diferença em relação aos Latossolos Brunos. São derivados de arenitos pertencentes à Formação Furnas, do Devoniano, e ocorrem quase sempre em relevo suave ondulado.

Estão sob a influencia de um clima ameno, com chuvas bem distribuídas ao longo do ano, e têm como cobertura vegetal nativa, predomínio dos campos subtropicais. De um modo geral, os Latossolos Vermelho-Amarelos de textura média são muito profundos ($A+B > 200$ cm), porosos, muito friáveis e acentuadamente drenados. As características morfológicas mais comumente observadas são: estrutura fraca pequena e média granular e grãos simples nos horizontes superficiais e muito pequena granular ou fraca grande blocos subangulares com aspecto de maciça porosa no B; consistência muito friável, não plástica e não pegajosa no horizonte A e muito friável, ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa em profundidade.

Potencialidades e restrições ao uso agrícola

Há cerca de 20 anos, estes solos encontravam-se quase que totalmente utilizados com pastagem natural, de baixa qualidade, com algumas áreas florestadas com *pinus*. A utilização mais intensiva era barrada ou pelo alto custo de produção, visto necessitarem de grande investimento em fertilizantes e corretivos, nem sempre compensados pela remuneração dos produtos, ou pelo rápido aparecimento de sulcos e voçorocas nas lavouras, devido à forte suscetibilidade à erosão.

Atualmente, em função do elevado índice pluviométrico ocorrente na região, aliado à facilidade de aquisição e ao preço do calcário, estes solos estão sendo muito utilizados na produção de grãos (ex. soja, aveia, trigo e milho). Com a introdução do sistema de plantio direto, são mínimos os danos causados pela erosão. Para aqueles solos com características transicionais para Neossolo Quartzarênico, em função da acentuada deficiência química e da baixa capacidade de retenção de nutrientes e de armazenamento de água, o uso menos intensivo, ou com pastagem nativa ou com o plantio de *pinus*, talvez seja o mais indicado. Embora o *pinus* apresente um desenvolvimento sensivelmente menor nesses solos em relação aos Latossolos de textura argilosa (CARVALHO et al., 1999), esta ainda é uma boa opção de uso.

Cambissolos

Estes solos são constituídos por material mineral, com horizonte B incipiente imediatamente abaixo do horizonte A ou de horizonte hístico com espessura inferior a 40 cm, e desde que não satisfaçam os requisitos para serem enquadrados nas classes Vertissolos, Chernossolos, Plintossolos e Gleissolos (Embrapa, 1999). São, em geral, pouco profundos (50-100 cm), moderadamente a bem drenados, com seqüência de horizontes A, B_i, C, com transições claras entre os horizontes e apresentam um certo grau de evolução, porém, não o suficiente para meteorizar completamente minerais primários de mais fácil intemperização, como feldspatos, micas, hornblenda e outros (Fig.8). Na área em estudo foram identificadas duas modalidades de Cambissolos bem distintas, uma de textura argilosa, predominante no Primeiro Planalto e relacionada a litologias do Grupo Castro e do Grupo Açungüi. A outra, de textura média, é encontrada derivada de materiais relacionados a rochas de composição e natureza bastante variáveis, no Segundo Planalto e originada de material proveniente da decomposição do arenito Furnas, do Devoniano. Tanto na modalidade argilosa quanto na de textura média a cor do horizonte A é escura, com valor e croma igual ou inferior a 3. A textura, na primeira, é predominantemente argilosa ao longo do perfil, enquanto na modalidade de textura média é franco arenosa ou franco argilo-arenosa na superfície e franco argilo-arenosa em profundidade. Estes solos ocupam 33,4% da área total dos municípios considerados na Tabela 1.

Neossolos Litólicos

Compreende solos pouco evoluídos, sem horizonte B diagnóstico, com seqüência de horizontes A-R, A-C-R, A-C, O-R ou H-C. Das quatro modalidades (subordens) de Neossolos, na área em estudo predomina a dos NEOSSOLOS LITÓLICOS (Fig.9) ou seja, solos com horizonte A assente diretamente sobre a rocha ou sobre um horizonte C ou Cr e, que apresentam um contato



Figura 8. Perfil de Cambissolo Háplico na Região dos Campos Gerais, PR



Figura 9. Perfil de Neossolo Litólico Húmico na Região dos Campos Gerais, PR.

lítico dentro de 50 cm da superfície do solo. Admite um horizonte B, em início de formação com espessura não superior a 10 cm (Embrapa, 1999). São formados a partir de diferentes materiais de origem, compreendendo granitos, arcósios, riolitos, siltitos e arenitos, entre outros.

As características morfológicas destes solos restringem-se praticamente às do horizonte A, o qual varia, em média, de 15 a 40 cm de espessura, sendo que a cor, textura, estrutura e consistência dependem do tipo de material que deu origem ao solo. São também bastante heterogêneos no que se refere aos atributos físicos, químicos e mineralógicos. De um modo geral, no Primeiro Planalto predominam solos com textura média ou argilosa e, no Segundo Planalto, quando derivados do arenito de Furnas, a textura é arenosa ou média leve, compreendendo as classes texturais: areia, areia franca e franco arenosa. Os altos teores em matéria orgânica, como nos solos com A húmico, têm influência marcante na cor, na consistência e estrutura. É comum a ocorrência de proporção significativa de fragmentos de rocha, pedras e cascalhos no corpo do solo ou à superfície dos mesmos.

Potencialidades e restrições ao uso agrícola

Nos casos em que o horizonte A está assente diretamente sobre a rocha dura, a penetração das raízes fica bastante dificultada ou mesmo impedida. O mesmo ocorre com a água de percolação que, após saturar o horizonte A tende a escorrer superficialmente na forma de enxurrada, causando danos enormes e proporcionais a declividade do terreno. Nas áreas menos declivosas e onde os solos apresentam um horizonte C brando entre o A e o R, as restrições ao uso tornam-se mais amenas, possibilitando, em determinados trechos, o seu aproveitamento com pastagem ou florestamento. A maior parte da área, no entanto, não reúne condições de uso, ou estas são restritas em função das fortes limitações impostas pela suscetibilidade à erosão hídrica, fertilidade, mecanização e deficiência hídrica.

Organossolos

São solos hidromórficos, essencialmente orgânicos, pouco evoluídos e provenientes de depósitos de restos vegetais em grau variável de decomposição, acumulados em ambientes mal ou muito mal drenados (Fig.10). Considera-se como material orgânico aquele constituído por compostos orgânicos, com proporção variavelmente maior ou menor de material mineral, desde que satisfaça os requisitos: Conter 12% ou mais de carbono orgânico (expresso em peso) se a fração mineral tiver 60% ou mais de argila; Conter 8% ou mais de carbono orgânico se a fração mineral não tiver argila e; Apresentar proporções intermediárias de carbono orgânico para teores intermediários de argila.

Em qualquer dos casos, o conteúdo de constituintes orgânicos impõe preponderância de suas propriedades sobre os constituintes minerais. Estes solos se desenvolveram sob condições de permanente encharcamento, com lençol freático à superfície, ou próximo dela, durante a maior parte do ano, a menos que tenham sido artificialmente drenados. Constam, basicamente, de um horizonte hístico (horizonte H) sobre camadas orgânicas com grau variável de decomposição, satisfazendo os requisitos mínimos de espessura (40 cm) e teor de carbono, já especificados. Estas camadas orgânicas, por sua vez, estão assentes em substrato mineral de textura variável.

No que se refere à espessura, pode-se considerá-la tanto de forma contínua como cumulativa, dentro de 80 cm contados a partir da superfície. Presentemente, existem casos, inclusive, em que estes solos encontram-se recobertos por deposição pouco espessa de material mineral. Em geral, são fortemente ácidos, com alta capacidade de troca de cátions, alta saturação com alumínio trocável e baixa saturação por bases.

Ocorrem predominantemente nas partes mais baixas das várzeas, em cotas altimétricas muito próximas às dos rios. Sua profundidade varia até 100 cm ou mais, predominando os casos em que a espessura da camada orgânica situa-se em torno dos 50 cm. São solos com bom potencial para culturas anuais, desde que adequadamente drenados e convenientemente manejados. Quando sob cultivo, após a retirada do excesso d'água pela drenagem, estes solos tendem a diminuir de volume, causando um rebaixamento superficial bastante acentuado. Este rebaixamento é devido, também, à ação dos microrganismos responsáveis pela decomposição dos compostos orgânicos.

Cuidados especiais devem ser tomados no que diz respeito ao manejo da água, uso de máquinas pesadas (baixa capacidade de suporte) risco de fogo e perigo de dessecamento irreversível, com a conseqüente formação de torrões. Dos quatro municípios presentes na Tabela 1, Castro é o que possui a maior área de Organossolo (368,2 km²).



Figura 10. Paisagem de Ocorrência de Organossolo no Município de Castro, PR.

Nitossolos

Compreende solos constituídos por material mineral, que apresentam horizonte B nítico (reluzente) com argila de atividade baixa, imediatamente abaixo do horizonte A ou dentro dos primeiros 50 cm do horizonte B (Embrapa, 1999). O horizonte B nítico é de textura argilosa ou muito argilosa, estrutura em blocos subangulares, angulares ou prismática moderada ou forte, com superfície dos agregados reluzente, relacionada a cerosidade e/ou superfície de com-

pressão. Caracterizam-se portanto, por apresentar horizonte B bem expresso em termos de estrutura e cerosidade, mas com pequena ou inexpressiva relação textural B/A.

Solos pertencentes a esta classe, em trabalhos anteriores a 1999, eram designados de Terra Roxa Estruturada, Terra Bruna Estruturada e Terra Roxa (Bruna) Estruturada Similar. A classe não engloba solos com incremento no teor de argila requerido para horizontes menos acentuada que aqueles, com transição do A para o B clara ou gradual e entre subhorizontes do B difusa. São profundos, bem drenados e de coloração variando de vermelho a brunada. Na área em estudo prevalece a variedade (subordem) Nitossolo Háplico, ou seja, outros Nitossolos que não se enquadram na definição de Nitossolo Vermelho (antiga Terra Roxa Estruturada). Os solos em questão ocorrem associados a Cambissolos Háplicos, constituindo a unidade de mapeamento NXd. Os dois componentes da associação são distróficos, com saturação por bases baixa e teores de alumínio trocável um tanto elevados.

Potencialidades e restrições ao uso agrícola

O principal componente da associação (Nitossolo Háplico) reúne melhores condições de uso do que o componente secundário, visto que apresenta características intermediárias com solos da classe Latossolo, o que pressupõe maior profundidade e melhores condições físicas. Ademais, ocorre predominantemente em relevo ondulado (8 a 20% de declive). O outro, além da menor profundidade ocupa as áreas mais declivosas do relevo regional, estando portanto mais sujeitos a ação da erosão. Os Nitossolos Háplicos ocupam 11,4% da área total dos quatro municípios avaliados, dos quais Castro possui a maior área com 678,9 km² (Tabela 1).

Argissolos

Os solos com B textural (Bt) normalmente são solos problemáticos do ponto de vista de manejo, por apresentarem no perfil, descontinuidade do padrão textural, o que afeta diretamente as características que governam a redistribuição interna da água no solo. Como fator agravante, estes solos ocorrem em classes de relevo que favorecem o deflúvio, portanto mais sujeitos aos fenômenos erosivos.

Os Argissolos Vermelho-Amarelos predominam os caracteres álico e distrófico, perfazendo um total aproximado de 70% da área ocupada pela classe, mas apenas 2,48% da área total dos quatro municípios avaliados, tratando-se da classe de solo com a menor abrangência (Tabela 1). Este fato antevê limitações em graus elevados pois, associados ao relevo em que ocorrem, torna difícil um manejo adequado da fertilidade tais como, a aplicação e a incorporação de calcário, além das adubações fertilizantes. O caráter álico está presente principalmente nas unidades que ocorrem nas regiões de ocorrência do arenito.

Os maiores problemas quanto ao uso dos Argissolos, residem na sua suscetibilidade à erosão. As classes de relevo em que normalmente ocorrem, por si só já favorecem o processo erosivo, principalmente quando se deixa o solo exposto por longos períodos de tempo, após preparo primário dos mesmos. A suscetibilidade à erosão se deve principalmente ao horizonte A mais

arenoso, e do gradiente textural em profundidade. Os graus de impedimento à mecanização nas unidades de Argissolos são muito variáveis de uma situação para outra. Esta variação depende fundamentalmente da classe de relevo de ocorrência da unidade.

Mapa de Solos da Fazenda Tabatinga – Local do Estudo de Caso

Na Figura 11 pode-se observar o levantamento detalhado (escala 1:12500) dos solos da Fazenda Tabatinga, Carambeí, PR, onde foram conduzidos os estudos descritos nos capítulos 5 a 10. Observa-se que há predominância de Latossolo Vermelho.

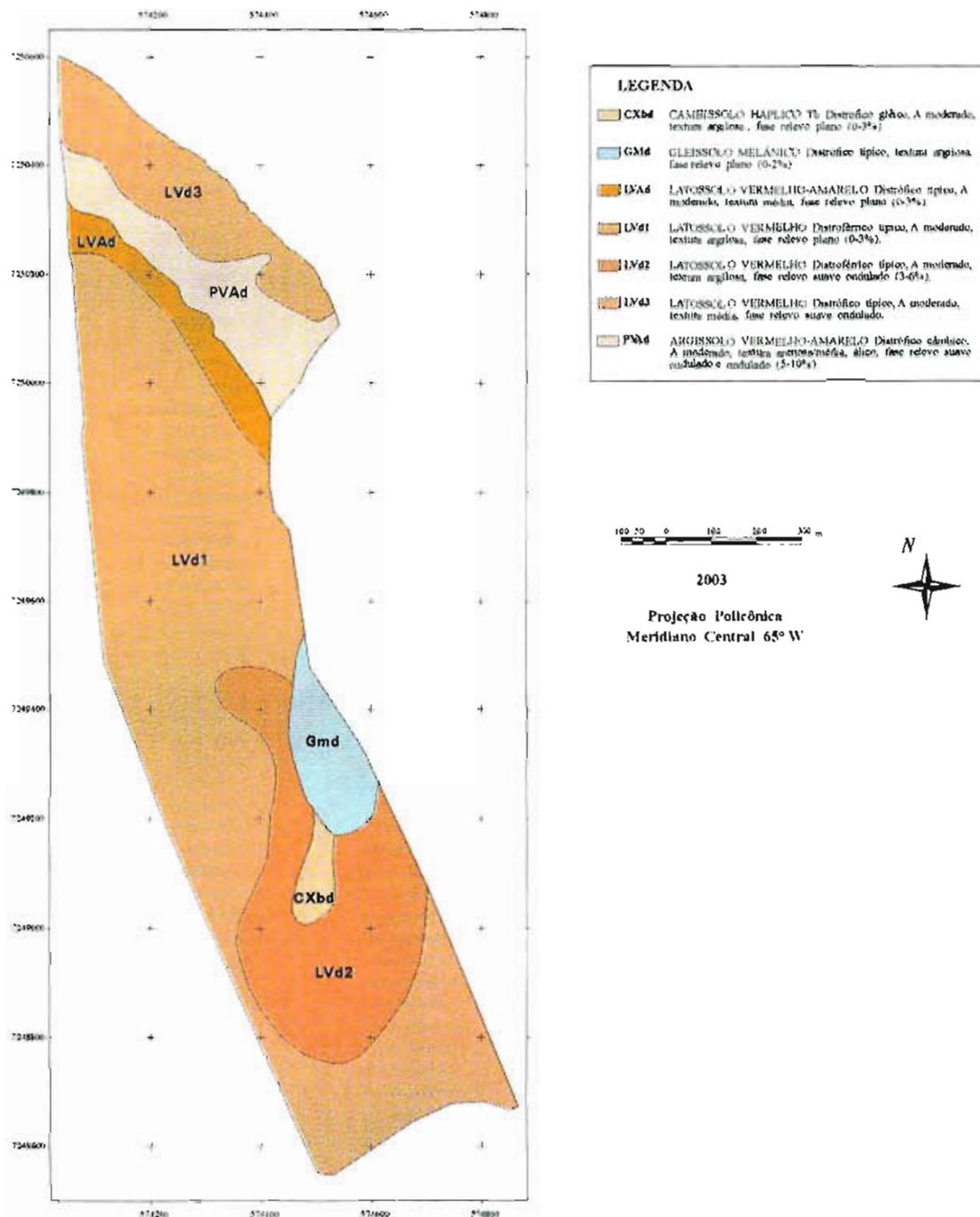


Figura 11. Levantamento detalhado dos solos da Fazenda Tabatinga, Carambeí, PR.

Considerações Finais

Neste século, a agricultura passou por inúmeras modificações. Novas alternativas foram oferecidas e algumas implementadas. Alguns exemplos são a mecanização, a utilização de sementes híbridas e a intensificação do uso de insumos agrícolas. Agora, surge o manejo específico das áreas de produção – a chamada “agricultura de precisão: AP” –, com técnicas que oferecem grande potencial para o tratamento diferenciado de menores unidades de produção (Prochnow, 2000).

Apesar do Conselho Nacional de Pesquisa dos EUA, num relatório de 1997, concluir que os levantamentos de solo em uso atendem muito pouco aos dados de solo necessários para uma agricultura de precisão, sendo que os dados de solo de um levantamento não estão num nível de detalhamento apropriado para uma atividade em agricultura de precisão (National Research Council, 1997), Gimenez (Ver Capítulo 9), por outro lado, observou contribuição bem sucedida da pedologia e classificação de solos, em escala de propriedade agrícola em Campos Gerais, no estabelecimento de zonas de manejo. Foi constatada a variação da produtividade das culturas na propriedade em função da classe de solo onde houve cultivo. Neste contexto, a pedologia e a classificação de solos é componente importante para se iniciar agricultura de precisão para o manejo da fertilidade do solo e da nutrição das plantas.

Referências Bibliográficas

CAMARGO, M.N.; KLAMT, E.; KAUFFMAN, J.H. Sistema brasileiro de classificação de solos. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.12, n.1, p.11-33, 1987.

CARVALHO, A. P. Conceituação de Latossolo Bruno. In: EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação dos Solos. **Conceituação sumária de algumas classes de solos recém reconhecidas nos levantamentos e estudos de correlação do SNLCS**. Rio de Janeiro, 1982. p.16-18. (EMBRAPA-SNLCS. Circular Técnica, 1).

CARVALHO, A. P. Efeitos de características do solo sobre a capacidade produtiva de *Pinus taeda*. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n.39, p. 51-66, 1999.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa Produção de Informação, 1999. 412 p.

FUCK, R. A. **Geologia da folha de Abapã**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná. Instituto de Geologia, 1967. 34 p. (Boletim da Universidade Federal do Paraná, 25).

GODOY, H.; CORREA, A. R.; SANTOS, D. Clima do Paraná. In: IAPAR. **Manual agropecuário para o Paraná**. Londrina, 1976. 387 p.

MAACK, R. **Geografia física do Estado do Paraná**. Curitiba: Banco de Desenvolvimento do Paraná: Universidade Federal do Paraná, 1968. 350 p.

MANTOVANI, E.C; GOMIDE, R. L. Agricultura de precisão. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 2, p.16-18, 2000.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL **Precision agriculture in the 21st century: geospatial and information technologies in crop management**. 1997. Disponível: <<http://books.nap.edu/books/0309058937/>>. Acesso em: 17 nov. 2004.

PROCHNOW, L. I. Considerações gerais sobre manejo específico das áreas de produção. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n.2, p.21-24, 2000.

THORNTON, C. W.; MATTER, J. R. **The water balance**. Centerton, N.J.: Drexel Institute of Technology, 1955. 104p. (Publications in climatology, v.8, n.1).



Mapeamento da Produtividade

Leandro M. Gimenez

José P. Molin

Resumo

O mapeamento da produtividade compreende a aquisição de informações sobre a produtividade das lavouras através de sensores e sistemas de posicionamento. A informação obtida é a representação, na forma de um mapa, do resultado de todas as tecnologias utilizadas para a produção, sendo uma amostragem destrutiva, feita após o término do ciclo da cultura monitorada. Na aquisição da informação, ocorrem erros freqüentes que devem ser evitados ou eliminados. Uma série de inovações tecnológicas vêm sendo incorporadas nos monitores de colheita tornando estes equipamentos mais precisos e confiáveis. Em um talhão onde foi realizado o mapeamento da produtividade de três safras de soja e uma de milho foi possível verificar que ocorreu tendência de regiões com produtividades altas, baixas e instáveis. Os coeficientes de variação da produtividade sempre inferior a 15%, obtidos em cada safra demonstraram que a variabilidade espacial foi baixa. Através da união das informações foi possível observar a variabilidade temporal e espacial da produtividade. Para exemplificar o potencial de uso da informação dos mapas de colheita foi proposta uma adubação potássica visando a reposição do nutriente conforme a exportação média pela cultura da soja nas três safras monitoradas.

Introdução

A prática de medidas de gerenciamento das lavouras considerando a sua variabilidade intrínseca, genericamente denominada de agricultura de precisão compõe um ciclo de tarefas. Porém, todo o processo deve ter um ponto de partida. Muitos pesquisadores e mesmo usuários estabelecem que o mapa de produtividade de um talhão é a informação mais completa para a visualização da variabilidade espacial da lavoura. Várias outras ferramentas têm sido propostas para se identificar essa variabilidade e as fotografias aéreas, as imagens de satélite, a videografia e a condutividade elétrica do solo têm sido testadas.

Existem diferentes formas de se abordar a medição do fluxo de sólidos para a condição estática. No entanto, essa mesma medição em campo e em condições dinâmicas é um desafio recente. No final dos anos 80 surgiram as primeiras tentativas de se medir o fluxo de grãos em colhedoras de cereais e a partir deles passaram a ser disponibilizados vários produtos no mercado mundial dedicados à geração de dados para a obtenção de mapas de produtividade.

Esses dados apresentam limitações e erros, sendo sempre necessário um tratamento preliminar antes de transformá-los em um mapa que vá servir para análise e tomada de decisão. Tais erros são intrínsecos ao processo de geração dos dados e às limitações dos sistemas. No entanto, não devem ser motivo para descrédito à informação, mas sim para seu aperfeiçoamento. Além disso, a colheita representa uma amostragem destrutiva e, sob a ótica da intervenção durante o ciclo, tardia. É uma informação que não serve ao agricultor que queira diagnosticar algum problema para saná-lo ou controlá-lo ainda durante o ciclo da cultura. A produtividade também apresenta variabilidade temporal e seu comportamento espacial, via de regra, dificilmente se repete com as diferentes culturas. Todavia, os mapas de produtividade contêm informações imprescindíveis e insubstituíveis sob a ótica da variabilidade espacial.

O mapeamento da produtividade é considerado por muitos pesquisadores como sendo uma parte essencial da agricultura de precisão (Makepeace, 1996). Thylén et al. (1997) consideraram que o mapa de produtividade é um dos métodos mais corretos para estimar a heterogeneidade de uma lavoura. Um mapa de produtividade evidencia regiões com alta e baixa produtividade, mas não explica a causa de tal variação, que pode ser devido a doenças, a deficiências, a desequilíbrios químicos ou estresse hídrico e se a causa específica não é determinada, nenhuma resposta ao gerenciamento pode ser obtida (Lark & Stafford, 1997).

Monitores de produtividade

Considerável esforço tem sido dedicado pela pesquisa e pela indústria visando ao desenvolvimento de sensores de fluxo de grãos para utilização como monitores de produtividade. O fato de ter havido maior desenvolvimento na área de monitoramento de grãos em detrimento de outras culturas é perfeitamente compreensível. As extensas áreas de grãos e sua conseqüente importância econômica, além do fato das máquinas envolvidas na colheita de cereais acompanharem um padrão, de certa forma facilitaram a generalização de algumas soluções já disponíveis no mercado.

A geração dos mapas de produtividade exige uma certa sofisticação para a obtenção dos dados essenciais. Assumindo-se que um mapa de produtividade é um conjunto de muitos pontos, para a obtenção de mapas é necessário definir-se a quantidade de grãos colhidos em cada ponto, a área que o ponto representa, a posição do ponto e a umidade com que o grão está sendo colhido naquele mesmo ponto.

A quantidade de grãos colhidos é medida por um sensor de fluxo de massa, normalmente instalado no elevador de grãos limpos da colhedora. Comercialmente são utilizados alguns dos diferentes princípios disponíveis para se fazer a medição do fluxo de grãos. O primeiro sistema disponibilizado para o mercado em final de 1991 na Europa, utilizava um emissor de raios gama colocado na cabeceira do elevador de grãos limpos da máquina. A massa de grãos passando bloqueia parte dessa emissão. Oposto ao emissor é montado um detector que mede

o nível de raios gama ainda existente naquela região. A diferença entre o que foi emitido e o que foi recebido é a quantidade bloqueada e que vai permitir o cálculo da vazão de grãos. Esse tipo de sensor tem limitação de legislações de alguns países que fiscalizam e até proíbem o uso de elementos radiativos em certas aplicações e ambientes.

Outro método utiliza uma placa de impacto posicionada na cabeceira superior do elevador de grãos limpos da colhedora. Dessa forma, a força centrífuga provocada nos grãos pelo elevador, gera um impacto proporcional à massa de grãos que está passando. Para medir essa força existem dois princípios comercialmente em uso. Um potenciômetro mede o deslocamento da placa ou uma célula de carga mede a força de impacto ou o torque aplicado à placa. Esse sistema é muito sensível à velocidade do elevador. Quanto maior a velocidade, maior é a força com que os grãos são impulsionados. Para isso os sistemas comerciais utilizam um sensor auxiliar para monitorar a rotação de uma das rodas denteadas da corrente do elevador.

Uma variação do princípio de placa de impacto é a utilização de um obstáculo parcial do fluxo de grãos na forma de uma ou duas chapas estreitas e fixadas na forma de vigas em balanço e um sensor de torque medindo a deformação dessas chapas, comumente denominado de sensor tipo torquímetro, todos posicionados na cabeceira do elevador.

Há também um sistema que mede o volume de grãos nas taliscas do elevador da colhedora. Para tanto utiliza-se um emissor de luz infravermelha, cujo raio é cortado sempre que passarem ou as taliscas vazias ou as taliscas mais grãos. As taliscas vazias, ou seja, o elevador sem grãos, correspondem à tara do sistema. O sistema mede o tempo de corte de luz gerando o dado de volume e com a informação da densidade dos grãos dada pelo usuário, calcula a massa de grãos que está passando e, portanto, a vazão. Esse método é bastante sensível à variação na densidade dos grãos. O fabricante disponibiliza um medidor para que o usuário monitore freqüentemente a densidade dos grãos e atualize esse valor no sistema. Outro fator que afeta o valor lido é a declividade do terreno, especialmente a inclinação lateral da máquina. Com o acréscimo no ângulo de inclinação a acomodação dos grãos sobre as taliscas vai gerar um corte de luz maior exigindo, assim, um ajuste. O equipamento dispõe de um sensor de inclinação que é instalado na parte inferior da colhedora. Esse sensor mede o ângulo de inclinação da máquina e informa ao sistema que utiliza essa informação para corrigir a leitura do tempo de corte da luz infravermelha.

Qualidade da informação

Os fabricantes dos monitores de produtividade, em geral, atribuem uma acurácia na ordem de 2 a 3% na totalização dos grãos colhidos. Num trabalho de acurácia de monitor de produtividade, Grisso et al. (1999) acompanharam colhedoras equipadas com monitor de produtividade trabalhando a diferentes taxas de alimentação. A faixa de erro observada foi da ordem de 2%. Kormann et al. (1998) realizaram ensaios com sensores de fluxo volumétrico em condição

controlada de laboratório obtendo erros em um intervalo de 6,85% a mais e 7,02% a menos que o peso real com dados pontuais e não de totalização.

Alguns autores têm se preocupado com variações em medidas de fluxo de grãos devido à declividade do terreno (Baerdemaeker et al., 1985; Sanaei & Yule, 1996, Grisso et al., 1999). As mudanças significativas nas leituras de produtividade registradas devido à declividade e a outros fatores de uma série de ensaios realizados com colhedora, fizeram com que Sanaei & Yule (1996) sugerissem o desenvolvimento de bancada de ensaio para investigar completamente estes problemas.

Trabalhos recentes têm apontado os erros referentes à totalização de massa de uma determinada área, não contemplando a acurácia pontual do sensor (Grisso et al., 1999). Para se saber a confiabilidade dos resultados dos mapas de produtividade gerados, equipamentos e metodologias de ensaio têm sido propostos (Arslan & Colvin, 1998; Kormann et al., 1998; Burks et al., 2001).

Na bancada de ensaio construída por Arslan & Colvin (1998) a capacidade de alimentação do sistema girou em torno de $5 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$. Concluíram que a duração dos ensaios influencia na calibração do monitor, sendo que tempos menores que 20 s não possibilitavam calibração adequada. Ensaios desenvolvidos com a maior duração possível e com estreita variação da taxa de fluxo pareceu ser o melhor modo para alcançar melhores resultados experimentais.

A coleta automática permite que uma grande quantidade de dados seja obtida com custo relativamente baixo. Os mapas de produtividade são elaborados a partir de dados coletados automaticamente e existe um considerável número de erros sistemáticos introduzidos, dos quais apenas alguns são eliminados por rotinas e programas computacionais disponíveis (Moore, 1998). Os dados brutos devem ser cuidadosamente analisados antes da elaboração de um mapa de produtividade (Missotten et al., 1996).

Thylén et al. (1997) identificaram diversos erros em mapas de produtividade e os classificaram como relacionados às características físicas da colhedora, do sistema de medição da produtividade, relacionados a variações dentro do talhão, ao operador e, ainda, devido ao procedimento de obtenção do mapa. Moore (1998), trabalhando com dados de seis anos consecutivos de mapeamento de produtividade, identificou erros de suavização, calibração de volume, largura incorreta da plataforma e tempo de enchimento da colhedora. Blackmore & Marshall (1996) listaram várias fontes de erros em mapas de produtividade e incluíram aqueles oriundos da retilha de grãos e das perdas de colheita. Da mesma forma, Menegatti & Molin (2003) desenvolveram uma metodologia para identificar e caracterizar erros em mapas de produtividade, aplicando-a em diferentes monitores de produtividade comerciais. Nos dados analisados, foram encontrados erros de posicionamento, pontos com produtividade nula ou extrema, ausência de medida de umidade dos grãos, largura de plataforma incorretamente registrada

pelo operador, dados inconsistentes durante o intervalo referente ao tempo de enchimento e de esvaziamento da colhedora nos inícios e finais de passadas e, também, dados discrepantes. Todos esses erros foram devidamente caracterizados e forneceram bases para a formulação de uma rotina de filtragem de dados brutos.

O tempo de enchimento da colhedora é representado pela distância necessária para que o sistema de monitoramento da produtividade fique sensível às variações naturais da produtividade, após o início de gravação dos dados (Moore, 1998). O autor considerou o monitor sensível às variações naturais, quando o valor de produtividade atingiu 90% da produtividade máxima local.

Todos os monitores de produtividade geram pontos que, quando dispostos de maneira ordenada e baseados em suas coordenadas, formam o mapa de produtividade. Para combinar e comparar diferentes informações coletadas sobre a mesma área, todos os dados devem ser interpolados numa grade uniforme (Haneklaus et al. 2000). Em agricultura de precisão, alguns dos métodos mais utilizados para interpolação de dados são basicamente os algoritmos de interpolação denominados inverso da distância a uma determinada potência e krigagem (ver capítulo 2).

Os mapas necessitam de ajustes após a geração dos dados em campo (Blackmore & Moore, 1999; Jurschik et al., 1999). Uma das primeiras propostas de redução de erros em mapas de produtividade foi sugerida por Blackmore & Marshall (1996) e denominada *Potential Mapping*. A técnica desenvolvida propunha que os monitores de produtividade gravassem massa colhida ao invés de massa por área. Os dados seriam então inseridos num sistema de informação geográfica (SIG) para a definição da área que representaria cada ponto, sendo que a produtividade seria derivada no próprio SIG. Esta técnica eliminaria erros de medição de área e de largura de plataforma, uma vez que a área seria calculada após a colheita. Estes foram considerados, pelos autores, como os principais erros num mapa de produtividade. Posteriormente, o *Potential Mapping* foi abandonado por ter sido identificada significativa quantidade de erros nas regiões das bordas dos talhões (Blackmore & Moore, 1999).

Blackmore & Rands, citados por Blackmore & Moore (1999) desenvolveram um conjunto de regras em linguagem "C" para a filtragem de dados brutos provenientes de um monitor específico de mercado. O programa verificava os arquivos em busca de dados corrompidos e os eliminava do arquivo original. Num arquivo tipo texto eram inseridos os valores máximos e mínimos para que o programa tivesse parâmetros para a remoção de produtividades extremas. A rotina identificava pontos fora dos talhões e os classificava como errôneos e pontos com pequenos erros de posicionamento eram reposicionados, tendo por base a rota da colhedora e a identidade do ponto. Outro fator considerado no desenvolvimento do filtro era a distância máxima entre pontos. A remoção do tempo de enchimento era feita removendo-se os primeiros 12 pontos de cada início de passada; também eram removidos pontos gravados nos arre-

mates da colheita do talhão. Concluiu-se que a aplicação do filtro poderia elevar significativamente a qualidade do mapa de produtividade.

Jurschik et al. (1999) trabalharam com mapas de produtividade, obtidos num talhão de 37 hectares, durante as colheitas de trigo, nos anos de 1995 e 1996, buscando correlações entre os mapas produzidos em diferentes anos, para ratificar as práticas de agricultura de precisão baseadas em mapas de produtividade. Para a interpretação e análise de correlação dos mapas, identificaram a necessidade de filtragem de dados brutos. De modo bastante simples utilizaram, separadamente, três filtros, que classificavam como discrepantes os dados fora dos limites: média \pm 1,64 desvios padrão (90% dos dados); média \pm 2 desvios padrão (95% dos dados); média \pm 3 desvios padrão (99% dos dados). Considerou-se que a exclusão de valores fora dos limites foi favorável ao aumento da correlação, mas que, por esse método, a exclusão de pontos reais foi prejudicial e deteriorou a análise de correlação. Uma das conclusões do estudo foi que a utilização do limite média \pm 2 desvios padrões foi favorável à análise de correlação quando aplicada aos dados completos, incluindo áreas de manobra e que, se forem analisados dados coletados fora das áreas de manobra e de cabeceiras, o limite de média \pm 3 desvios padrões seria satisfatório.

Trabalhando com dados de mapas gerados na região dos Campos Gerais do Paraná, Gimenez & Molin (2000) propuseram um algoritmo de filtragem de dados brutos que avaliava cada ponto do arquivo produzido durante a colheita, com relação a um desvio da média e também quanto ao desvio com um ponto coletado 15 posições atrás, buscando-se eliminar pontos coletados durante o tempo de enchimento. Analisou-se, ainda, a distância entre pontos consecutivos com eliminação de pontos reprovados em qualquer um dos testes. O algoritmo eliminou de 22 a 41% dos pontos de dois mapas de produtividade. Os autores concluíram que a aplicação do algoritmo é simples, mas que cuidados devem ser tomados na definição dos parâmetros a serem utilizados.

Haneklaus et al. (2000) elaboraram recomendações para a produção de mapas de produtividade com boa qualidade de dados, propondo a extração de dados problemáticos como uma das etapas obrigatórias. Considerou-se natural a variação da umidade dos grãos de trigo dentro da faixa de 14 a 28%, sendo eliminados pontos fora desse intervalo. Foram eliminadas as produtividades muito altas e muito baixas, tendo como parâmetros de definição pontos vizinhos destacados nos mapas de produtividade. Para a eliminação dos pontos, aqueles mais destacados foram manualmente descartados. Também foram eliminados pontos localizados fora do talhão, considerados erro de localização. O processo foi considerado bastante demorado e a aplicação de todas as etapas depende dos custos e da acurácia requerida. De forma semelhante, um processo de filtragem para as características de cada erro presente em um mapa de produtividade foi desenvolvido por Menegatti & Molin (2004) e foi aplicado a seis conjuntos de dados obtidos de seis diferentes monitores de produtividade comerciais. A análise geoestatística dos conjuntos de dados mostrou que a aplicação do filtro melhorou a qualidade da informação final.

Informações auxiliares

O conhecimento adquirido com as informações fornecidas a partir de práticas de agricultura de precisão permite aos produtores um melhor suporte na tomada de decisões, resultando em potenciais benefícios ambientais, economia de insumos e lucros. Além disso, podem ser extraídas outras informações, por exemplo, do monitor de produtividade, com utilidade no gerenciamento de operações agrícolas como a colheita. Nos dados de produtividade coletados pelos monitores ainda podem ser extraídas informações adicionais relacionadas a tempos e movimentos da máquina no campo e também dados de altimetria. Normalmente, com os equipamentos disponíveis no mercado e com as configurações usuais, são obtidos de 250 a 1500 pontos por hectare, dependendo da configuração relacionada à frequência de coleta de dados. Isso significa que cada ponto representa a produção de uma área que pode variar de algo entre 7 e 40 m².

Informações acerca da capacidade operacional são de grande importância no gerenciamento de sistemas agrícolas mecanizados, auxiliando nas decisões a serem tomadas pela administração, visando a sua otimização. A habilidade de uma máquina para desempenhar eficientemente sua função, trabalhando em um ambiente qualquer, é um critério importante que afeta decisões sobre o seu gerenciamento (Taylor et al., 2002). Com relação a isso, Mialhe (1974) designa a capacidade operacional de máquinas e implementos agrícolas como a quantidade de trabalho que são capazes de executar em um espaço de tempo, constituindo-se em uma medida da intensidade do trabalho desenvolvido na execução das operações. Salienta-se que o estudo das mesmas visa racionalizar o emprego das máquinas, implementos e ferramentas na sua execução. Para isso, é necessário não apenas o estudo analítico dessas operações, a fim de determinar “o que fazer” e “quando fazer”, mas também a criteriosa seleção de métodos além da escolha de espécimes mais adequados a cada situação.

A informação de desempenho das colhedoras é muito importante, por se tratarem de máquinas cada vez maiores e mais onerosas, tornando-se necessário que elas sejam eficientemente utilizadas. Assim, métodos precisos de monitorar seu desempenho auxiliam o usuário a selecionar corretamente a sua capacidade, bem como o equipamento requerido para o transporte dos grãos.

Segundo Strickland et al. (2002), no passado os estudos de desempenho de máquinas a campo era realizado através de cronômetros, pranchetas e mecanismos de gravação. Estes métodos consumiam muito tempo e necessitavam de uma pessoa ou uma equipe de pessoas em campo para apontamentos. O advento dos monitores de colheita para fins de obtenção de mapas de produtividade possibilitou a coleta de dados mais completos e em maior quantidade. De acordo com Grisso et al. (2000), com a incorporação de um receptor de GPS conectado ao monitor e os dados sendo georreferenciados, estes podem também ter um papel importante

na operação e gerenciamento de máquinas agrícolas. Os dados adquiridos durante a colheita fornecem informações relativas a características operacionais da colhedora como velocidade, modelos de tráfego, produtividade e tempo de descarga, bem como influências do relevo e características do operador sobre a capacidade de campo da colhedora.

Um trabalho exploratório nesse sentido foi desenvolvido com dados coletados em mapas de produtividade obtidos na região dos Campos Gerais do Paraná e permitiu sistematizar dados e calcular as diferenças de tempo entre diferentes posições em cada talhão durante a operação de colheita. Foi construído o respectivo mapa e a partir dele foram obtidos os mapas de eficiência de campo, capacidade de campo efetiva e capacidade de processamento das colhedoras. O trabalho demonstrou a importância e utilização que essas informações podem adquirir em sistemas gerenciais do complexo mecanizado agrícola existente em qualquer propriedade (Molin et al., 2004).

Outro aspecto relacionado a informações auxiliares advindas de monitores de produtividade diz respeito à obtenção de mapas altimétricos, que para ser obtida por meio da engenharia convencional, é trabalhosa e dispendiosa. Clark (1996), em levantamentos altimétricos realizados de modo cinemático com receptor GPS, obteve um número suficiente de dados, de forma rápida e que garantiu detalhamento necessário para manejo de áreas agrícolas. O método mostrou-se altamente viável para obtenção de mapas altimétricos para a agricultura de Precisão. Yao & Clark (2000) sugerem a realização de passadas múltiplas em uma mesma área para a obtenção de mapas com maior acurácia, sendo o número ideal acima de 5, para diluição do erro. Johansen (2001) analisaram a qualidade de mapas altimétricos obtidos com um receptor GPS com correção de sinal em tempo real. Os mapas apresentaram correlação de 82% em relação aos dados obtidos de forma convencional.

Monitoramento da colheita da Fazenda Tabatinga, Carambeí, PR.

O monitoramento da colheita ou os mapas de produtividade das culturas foram, juntamente com a visita à área e discussão com o produtor em setembro de 1999, as primeiras ações componentes da abordagem descrita no capítulo 4.

Os mapas de produtividade foram obtidos utilizando-se uma colhedora AGCO, modelo MF34[®], equipada com monitor de colheita denominado de sistema Fieldstar[®]. O sensor de fluxo de grãos utiliza duas chapas fixadas na forma de vigas em balanço ou sensor tipo torquimetro. O conjunto é parte integrante da colhedora e também continha um computador de bordo que tem a função de monitorar a máquina. O sistema utilizava um receptor de GPS Racal modelo Land Star MK 4 – G12 L (Racal[®]), com sinal diferencial em tempo real via satélite, também Racal.

A partir do percurso da colhedora no campo e coletando um dado a cada 2 segundos, geraram-se mapas de pontos como o do exemplo apresentado na Figura 1. Dessa forma foram

obtidos mapas de produtividade de soja nas safras 1999/2000, 2000/2001 e 2002/2003 e de milho na safra 2001/2002.

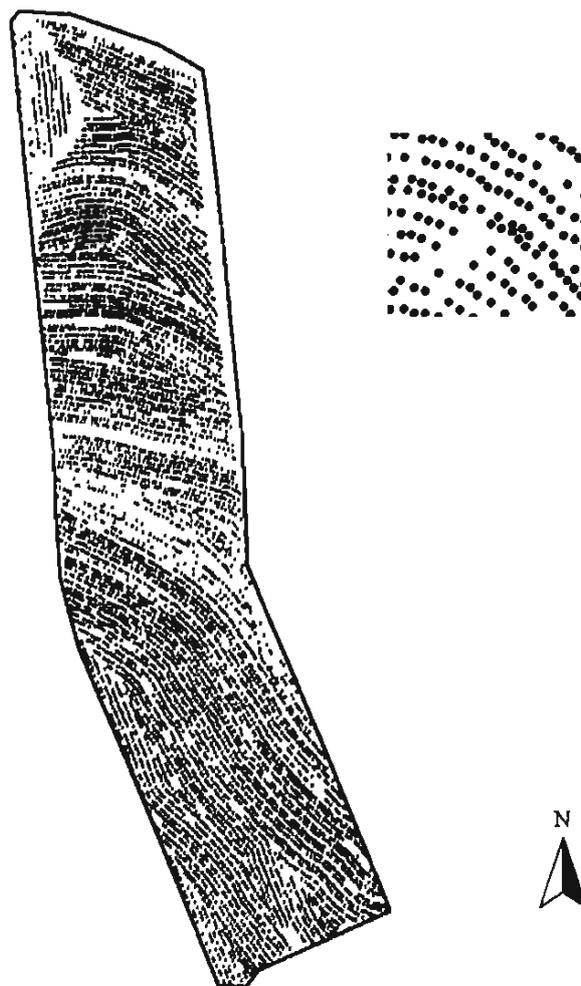


Figura 1. Representação das linhas de pontos referentes ao percurso da colhedora; cada ponto representa a coleta de um dado de produtividade geo-referenciada.

Após a coleta dos dados estes foram processados de modo a eliminar os erros, de acordo com Gimenez & Molin (2000), sendo em seguida realizada a interpolação utilizando o interpolador “inverso da distância elevado ao quadrado” para a geração de uma superfície composta por células de 10 X 10m. Estes mapas, referentes a cada colheita, são apresentados na Figura 2 e alguns dados estatísticos referentes a essas colheitas são apresentados na Tabela 1.

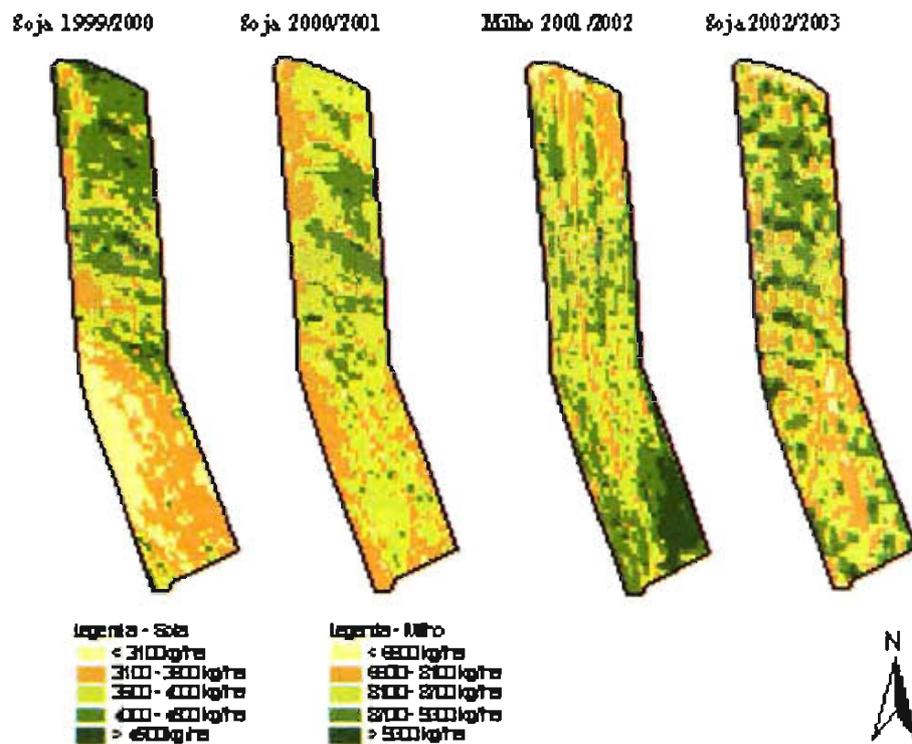


Figura 2. Mapas de colheita de quatro ciclos na área experimental entre 1999 e 2003, incluindo três safras de soja e uma de milho.

No primeiro ciclo (soja 1999/2000) nota-se que as maiores produtividades se encontram na região norte do talhão, onde a altitude é menor e a textura do solo mais arenosa. A produtividade média foi de 3634kg/ha sendo o coeficiente de variação dos dados de produtividade de 15%. Também é interessante notar erros presentes nos mapas devido à operação inadequada do equipamento. Na região noroeste do talhão existem porções com produção bastante baixa ao lado de partes com alta produção, o que pode ser atribuído a um percurso inadequado da máquina no talhão ocasionando a coleta de informações em regiões que já haviam sido colhidas.

Fato semelhante ocorreu no ano seguinte (soja 2000/2001), sendo que foram realizadas passadas da máquina de modo irregular e em sentido pouco recomendado para a coleta de informações neste talhão. O percurso adotado no sentido leste-oeste tornou bastante elevado o número de manobras tendo como conseqüência a coleta inadequada de informações próximo aos limites do talhão, principalmente na região oeste. De qualquer modo, a tendência de menores produções na região sul mais argilosa (ver capítulo 5), e maiores produções nas regiões onde a textura do solo é mais arenosa, se manteve e a produtividade média foi de 3725kg/ha, pouco superior ao ano anterior.

O mapa de produtividade do milho, referente ao ciclo 2001/2002, apresenta comportamento diferente dos mapas de soja. Produções mais baixas foram obtidas para as regiões com solo de textura mais arenosa, sendo as maiores produtividades obtidas na área mais argilosa e mais alta. A produtividade média foi de 8556kg/ha, havendo regiões com produção inferior a 6300kg/ha e outras com produção superior a 9300kg/ha.

O mapa de produtividade da soja na safra 2002/2003 apresentou melhor qualidade da informação e foi possível distinguir uma série de manchas que não se manifestaram nos mapas das safras anteriores. A região de baixa produtividade, que aparece na bordadura, ao norte (mais arenosa; ver capítulo 5), está bem delimitada, assim como o efeito dos terraços em nível existentes no talhão; estes influenciando positivamente a produção. Manteve-se a tendência de maiores produções nas áreas mais arenosas, sendo que a ocorrência de regiões de baixa produtividade foram bem delimitadas na área mais ao sul (mais argilosa).

Na Figura 3 são apresentados o mapa de rendimento relativo médio da produtividade da soja e o mapa das tendências da produtividade. Estes mapas foram obtidos por meio da normalização dos mapas de produtividade das três safras de soja e a união destes mapas em um mesmo plano de informações e posterior cálculo da média dos rendimentos normalizados para cada uma das células, conforme metodologia utilizada por Molin (2002). Por meio deste mapa é possível visualizar melhor a tendência da produtividade da soja, embora não seja possível verificar a estabilidade da produção. Assim, não é possível saber se uma determinada porção do talhão que apresenta média de produtividade alta, mantém esta produção ao longo dos anos ou se esta média ocorreu porque houve um ano excepcionalmente bom, ou tenha ocorrido um erro na coleta de informações.

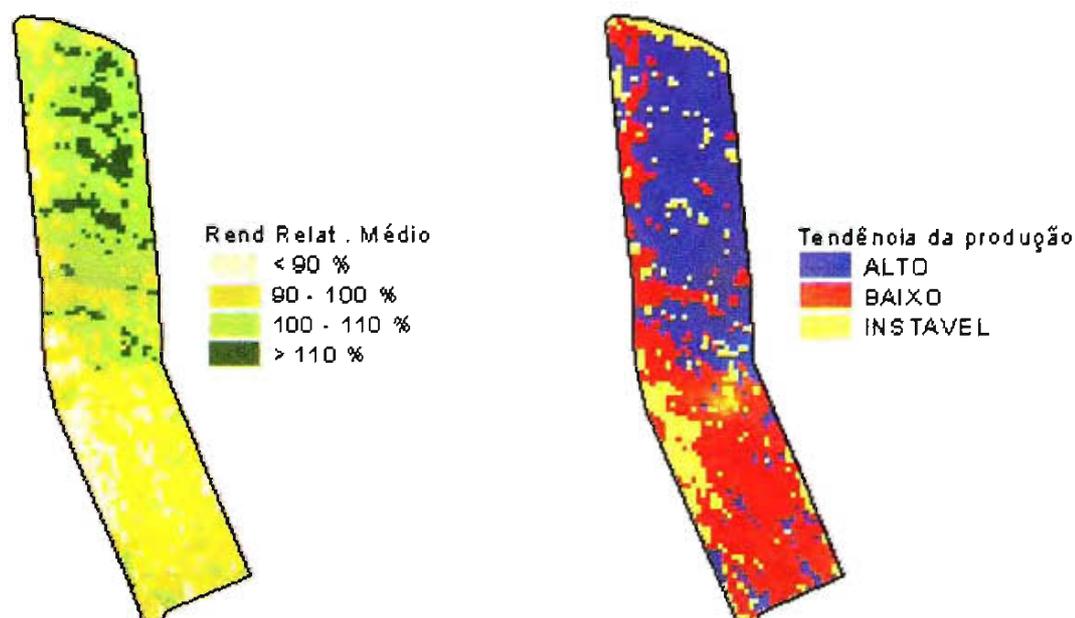


Figura 3. Mapa de rendimento relativo médio dos diferentes ciclos da cultura da soja ao longo do período de monitoramento (esquerda) e mapa da tendência da produção a partir dos três ciclos da cultura da soja monitorados (direita).

No mapa da tendência da produção a partir dos três ciclos de soja monitorados, além dos rendimentos relativos médios foram calculados também os coeficientes de variação para a produtividade. Nos locais onde o coeficiente de variação foi inferior a 15%, considerou-se que a produtividade era estável, ou seja, que ela não variou muito ao longo dos anos de monitoramento. Acima de 15% de coeficiente de variação considerou-se como regiões instáveis e a cor utilizada no mapa é o amarelo. As regiões com comportamento estável e produtividade acima da média e abaixo da média receberam as cores azul e vermelho, respectivamente. Para este talhão, as áreas consideradas instáveis, de cor amarela, ocuparam 7,2 ha enquanto as áreas estáveis representaram 21,2ha. A maior parte das áreas consideradas como instáveis estão próximas a regiões que apresentam produtividade abaixo da média.

Uma análise quantitativa da produtividade pode ser realizada com base na Tabela 1. Nota-se que a produtividade média da soja variou de 3634kg/ha até 3845kg/ha, elevando-se ao longo das safras, principalmente no caso da safra seguinte à de milho. A amplitude representa a diferença entre as produtividades médias do quartil superior (norte; mais arenoso) e do quartil inferior (sul; mais argiloso). Por meio da amplitude e do coeficiente de variação é possível inferir sobre a variabilidade na produtividade. Dentre as safras de soja a maior variabilidade ocorreu em 1999/2000 e a menor em 2000/2001.

Tabela 1. Análise quantitativa da produção na área de estudo.

	Soja 1999/2000	Soja 2000/2001	Milho 2001/2002	Soja 2002/2003
Média (kg/ha)	3634	3725	8556	3845
Mediana (kg/ha)	3712	3746	8582	3837
Desvio Padrão (kg/ha)	559	283	686	460
Quartil Superior (kg/ha)	4082	3912	8906	4115
Quartil Inferior (kg/ha)	3205	3551	8273	3569
Amplitude (kg/ha)	877	361	633	546
C.V. (%)	15	8	8	12

As informações obtidas por meio do mapeamento da produtividade podem ser utilizadas para uma série de análises e interferências na área. Através de uma coleção de mapas de produtividade é possível identificar como a variabilidade ocorre em termos de distribuição espacial, temporal e em termos quantitativos. Deste modo um dos usos deste tipo de informação é o de realizar o fornecimento de nutrientes de acordo com a exportação pelas culturas. Na Figura 4 são apresentados os mapas de exportação média de potássio (K) pela cultura da soja ao longo dos três ciclos e do milho, de somente um ciclo.

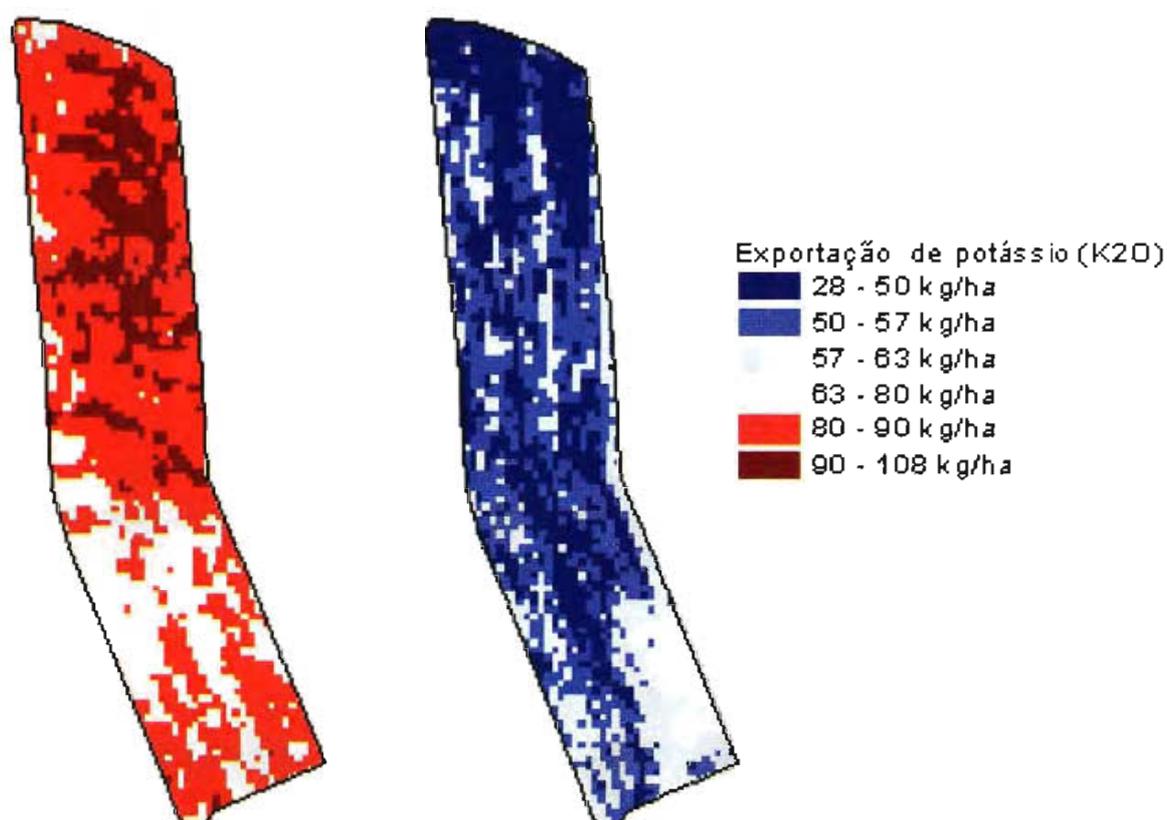


Figura 4. Mapas de exportação de potássio pela soja, como média de três ciclos (esquerda) e por um ciclo de milho (direita).

Havendo os teores adequados no solo, a aplicação de fertilizante potássico poderia ser realizada de acordo com a exportação pela cultura. Apesar de ocorrer comportamento distinto na variabilidade espacial da produção de soja e milho, as quantidades de potássio exportado não são compensadas, ou seja, na região mais ao norte (mais arenosa) ocorre exportação maior de potássio. Como as aplicações são realizadas tradicionalmente através da média dos teores de nutrientes para todo o talhão, ocorre uma aplicação de doses inferiores à exportação na região norte e superiores na região ao sul (mais argilosa). Este problema pode ser diagnosticado e, a partir da informação contida nos mapas de colheita, contribuir para as recomendações de aplicações em taxas variadas.

Considerações finais

O levantamento da variabilidade na produção das culturas pode ser entendido como uma etapa fundamental no gerenciamento da produção por meio de técnicas de agricultura de precisão. Embora existam inúmeras possibilidades para se tratar as áreas produtivas de acordo com as suas necessidades, somente através do conhecimento da variabilidade da produção é possível determinar se as práticas utilizadas são eficazes para elevar a produção ou reduzir os custos sem redução da mesma.

Com a disponibilidade no mercado de colhedoras de alta capacidade e tecnologia, onde grande parte das funções é coordenada através de sistemas compostos por centrais de processamento e uma série de sensores, o monitoramento da produtividade passa a ser, a princípio, um opcional comum e

em médio prazo um componente como os outros, sendo a sua precisão, exatidão e operacionalidade melhoradas continuamente. O desenvolvimento de sistemas de posicionamento geográfico cada vez mais aperfeiçoados e sua rápida aceitação pelos mais variados tipos de usuários fará com que esta tecnologia seja efetivamente disseminada no ambiente agrícola, com custos aceitáveis, permitindo a elaboração de mapas dos mais variados temas, além dos de produtividade.

A grande expectativa e desafio para os próximos anos são de que os usuários dos equipamentos façam bom proveito das informações que podem ser coletadas com relativa simplicidade. Sabe-se hoje que grande parte das propriedades agrícolas do país ainda não conta com uma administração efetiva das suas atividades rotineiras. Teremos, portanto, que incentivar o aprendizado nesta área, fornecendo incentivos para que os gestores do processo de produção passem a utilizar volumes maiores de informação em seu processo de tomada de decisões, aumentando, dessa forma, sua competitividade em um mercado a cada dia mais restrito.

Neste sentido, devem ser incentivadas e monitoradas as ações da iniciativa privada. A simples produção de equipamentos que permitam coletar e processar volumes enormes de dados não terá serventia se não for acompanhada de algum suporte ao usuário. Os fornecedores de equipamentos e principalmente os prestadores de serviço devem prover os usuários com informações que lhes permitam averiguar os benefícios dos produtos que estão adquirindo. Sem a participação dos gestores, fornecedores e prestadores de serviços a agricultura de precisão como ferramenta de gestão não terá sucesso no Brasil, uma vez que os produtores, via de regra, não têm condição de estabelecer este sistema de gestão por conta própria.

Referências Bibliográficas

ARSLAN, S.; COLVIN, T.S. Laboratory test stand for combine grain yield monitors. **Applied Engineering in Agriculture**. St. Joseph: SAE, v.14, n.4, p.369-71. 1998.

BAERDEMAEKER, J.DE; DELCROIX, R.; LINDEMANS, P. Monitoring the grain flow on combines. In: **AGRI-MARIATION**, 1., 1985, Chicago. **Proceedings...** Chicago: Scholl of Engineering, 1985. p.329-338.

BLACKMORE, S.; MOORE, M. Remedial correction of yield map data. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v.1, n.1,p. 51-66, 1999.

BLACKMORE, B. S.; MARSHALL, C. J. Yield mapping; errors and algorithms. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE**, 3., 1996, Minneapolis. **Proceedings...** Madison: ASA: CSSA: SSSA, 1996. p. 403-415.

BURKS, T. F.; FULTON, J. P.; SHEARER, S. A.; SOBOLIK, C. J. **Influence of dynamically varying inflow rates on clean grain elevator yield monitor accuracy**. St. Joseph: ASAE, 2001. 14 p.

CLARK, R. L. A comparison rapid GPS techniques for topographic mapping. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 3., 1996, Minneapolis. **Proceedings...** Madison: ASA: CSSA: SSSA, 1996. p. 651-662.

GIMENEZ, L. M., MOLIN, J. P. Desenvolvimento de um algoritmo para redução de erros em mapas de rendimento obtidos em agricultura de precisão. In: INFOAGRO 2000, 2000, Ponta Grossa. **Anais...** Ponta Grossa: UEPG, 2000. CD-ROM.

GRISSE, R. D., JASA, P. J., SCHOROEDER, M. A., WILCOX, J.C. **Yield monitor accuracy: Successful Farming Magazine, case study.** St. Joseph: ASAE, 1999, 11 p.

GRISSE, R. D.; JASA, P. J.; ROLOFSON, D. **Field efficiency determination from spatial data.** St. Joseph: ASAE, 2000. 11 p.

HANEKLAUS, S.; LILIENTHAL, H.; SCHNUG, E.; PANTEN, K.; HAVERECH, E. Routines for efficient yield mapping. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 5., 2000, Bloomington. **Proceedings...** Madison: ASA: CSSA: SSSA, 2000. CD-ROM.

JOHANSEN, D. P., Selecting a DGPS for making topography maps. 2001. Disponível em: <<http://www.ppi-far.org/ssmg/>>. Acesso em: 24 out. 2001.

JURSCHIK, P. K.; GIEBEL, A.; WENDROTH, O. Processing of point data from combine harvesters for precision farming. In: STAFFORD, J. **Precision agriculture '99.** Sheffield: Sheffield Academic Press, 1999. p.297-307.

KORMANN, G.; DEMMEL, M.; AUERNHAMMER, H. **Testing stand for yield measurement systems in combine harvesters.** St. Joseph: ASAE, 1998. 11 p.

LARK, R.M.; STAFFORD, J.V. Exploratory analysis of yield maps of combine crops. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 1, 1997, Warwick. **Proceedings...** Oxford: BIOS Scientific, 1997. p. 887-894.

MAKEPEACE, R. J. Benefits and limitations of precision farming. In: THE BRIGHTON CONFERENCE ON PESTS AND DISEASES, 1., 1996, Brighton. **Proceedings...** Brighton: Blackwell, 1996. p. 1235-1242.

MENEGATTI, L. A. A.; MOLIN, J. P. Metodologia para identificação e caracterização de erros em mapas de produtividade. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 2, p. 367-374, 2003.

MENEGATTI, L. A. A.; MOLIN, J. P. Remoção de erros em mapas de produtividade via filtragem de dados brutos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 8, n. 1, p. 126-134, 2004.

MIALHE, L. G. **Manual de Mecanização Agrícola**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 1974. 301 p.

MISSOTTEN, B.; STRUBBE, D. DE BAERDEMAEKER, J. Accuracies of grain and straw yield maps. **Agricultural Engineering**, St. Joseph, v. 9, p.23-26, 1996.

MOLIN, J.P. Definição de unidades de manejo a partir de mapas de produtividade. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 22, n.1, p.83-92, 2002.

MOLIN, J. P.; MILAN, M.; NESSRALLAB, M. G. T.; CASTRO, C. N. de; GIMENEZ, L.M. Determinação de parâmetros de desempenho de colheita mecanizada utilizando dados georeferenciados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 3., 2004, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: ESALQ-USP, 2004. CD-ROM.

MOORE, M. **An Investigation into the accuracy of yield maps and their subsequent use in crop management**. Warwick, 1998. 379 p. Doctorate Thesis, Silsoe College, Cranfield University.

SANAEI, A.; YULE, I. J. **Yield measurement reliability on combine harvesters**. St. Joseph: ASAE, 1996. 14 p.

STRICKLAND, R. M.; ESS, D. R.; PARSONS, S. D.; CRISLER, M. T. Extracting machine performance information from site-specific grain yield data to enhance crop production management practices. Disponível em: <<http://mollisol.agry.purdue.edu/ssmc/newsletters/july2001f.htm>>. Acesso em: 15 abril 2002.

TAYLOR, R. K.; SCHROCK, M. D.; STAGGENBORG, S. A. Extracting machinery management information from GPS data. In: ASAE ANNUAL MEETING, 2002, Chicago, **Proceedings...** Chicago: ASAE, 2002. CD-ROM.

THYLÉN, L.; JURSCHIK, P.; MURPHY, D. L. P. Improving the quality of yield data, In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 1., 1997, Warwick. **Proceedings...** Oxford: BIOS Scientific, 1997. p. 743-750.

YAO, H. B.; CLARK, R. L.. Development of topographic maps for precision farming with medium accuracy GPS receiver. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v. 16, n.6, p. 629-636, 2000.



Estudo de Caso em Agricultura de Precisão: Manejo de Lavoura de Soja na Região de Campos Gerais, PR

Pedro Luiz O. de A. Machado

Alberto C. de Campos Bernardi

Carlos Alberto Silva

Ciriaca A. F. de Santana do Carmo

Margareth S. P. Meirelles

Celso V. Manzatto

Resumo

Este capítulo tem por objetivo apresentar detalhadamente a forma de abordagem adotada na avaliação das propriedades de solo e planta para o manejo sítio específico da fertilidade e adubação do solo em sistema plantio direto de grãos. O estudo de caso foi conduzido numa área da Fazenda Tabatinga, em Carambei, Paraná. Primeiramente há uma apresentação das características de fertilidade do solo em sistema plantio direto de grãos e da relevância econômica em se testar técnicas de agricultura de precisão para o manejo da fertilidade e adubação do solo. As características da área de estudo (ex. solo, clima, histórico de uso) são descritas juntamente com as malha ou grades de amostragem adotadas. Além do modo como foram feitas as coletas de amostras de solo e de tecido vegetal da soja, são descritos os métodos laboratoriais de análise adotados. Finalmente, há descrição sobre como foram feitos os tratamentos geostatísticos dos resultados obtidos.

Introdução

Nos últimos anos, as técnicas de preparo conservacionista (incluindo o sistema plantio direto) e de emprego de ferramenta de Agricultura de Precisão (AP) no manejo das lavouras têm se destacado com grande potencial para a melhoria do manejo de solos brasileiros, aumento da produtividade das culturas com redução do custo de produção, tudo isso aliado ao menor impacto da atividade agrícola sobre o meio ambiente.

Estes dois conjuntos de tecnologias podem alterar significativamente o uso de fertilizantes nas propriedades ao permitirem seu uso racional e otimizado.

Os produtores de grãos que adotam o sistema plantio direto (SPD), normalmente, pela sua maior familiarização com diversos sistemas de rotação de culturas, práticas

conservacionistas do solo e manejos integrados de pragas e doenças, têm sido considerados como grandes interessados na adoção e aplicação de técnicas de Agricultura de Precisão.

Isso tem sido observado, recentemente, na região de Campos Gerais no Paraná, onde o advento da utilização do conjunto de técnicas de Agricultura de Precisão tem resultado em mudanças na forma de gerenciar o agronegócio pelos agricultores que utilizam o sistema plantio direto (ver Capítulo 11). O impulso ao uso desse novo conjunto de tecnologias foi iniciado com o aprimoramento das técnicas de posicionamento geográfico preciso por meio de informações obtidas por satélites. Com isso, iniciou-se um novo ciclo de gerenciamento de informações, que possibilita associar a variabilidade espacial da produtividade das culturas aos parâmetros de solo planta e clima que a condicionam.

O uso dessas tecnologias 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 abordagem, há ainda várias demandas de pesquisa a serem atendidas.

Sistema Plantio Direto - SPD

SPD e o ambiente

O sistema plantio direto (SPD) representa a mais significativa alteração no manejo de solos da história moderna da agricultura. No Brasil, a área sob SPD já soma cerca de 20 milhões de hectares, com um terço localizado na região dos Cerrados e com grande perspectiva de que a adoção desse sistema de cultivo se estenda para outras regiões agrícolas do país. Com essa técnica, é possível produzir alimentos com um mínimo risco de perda tolerável de solo por erosão. O SPD é a forma de manejo conservacionista que envolve um conjunto de técnicas integradas que visam otimizar a expressão do potencial genético de produção das culturas com simultânea melhoria das condições ambientais (água-solo-clima).

O SPD está fundamentado em três requisitos mínimos: revolvimento do solo restrito ao sulco de plantio ou à cova, aumento da biodiversidade pela rotação de culturas, e a cobertura permanente do solo com culturas específicas para formação de palhada. Estes requisitos são associados, ainda, ao manejo integrado de pragas, doenças e plantas invasoras (Salton *et al.*, 1998; Plataforma Plantio Direto, 2001; Freitas, 2002).

No SPD, em relação ao sistema sob aração e gradagem, há uma redução da perda de solo, água e nutrientes por erosão devido ao aumento da cobertura vegetal e de maior preservação

de restos culturais na superfície do solo, com conseqüente melhoria da agregação do solo. Por isso, em ecossistemas contendo solos ácidos, o SPD vem sendo considerado como a alternativa mais adequada e eficaz para se aumentar a sustentabilidade dos recursos naturais e para se utilizar o solo de modo eficiente, em contraponto ao modelo usual de exploração agrícola, baseado em sucessão de culturas comerciais envolvendo operações de aração e gradagens leves sucessivas ou apenas uso de grade aradora.

Em termos técnicos, plantio direto é definido como a semeadura de culturas sem preparo do solo e com a presença de cobertura morta ou palha, constituída de restos vegetais originados da cultura anterior conduzida especificamente para produzir palha e, às vezes, também para grãos (Salton *et al.*, 1998). Já o Sistema Plantio Direto (SPD) é a forma de manejo conservacionista que envolve todas as técnicas recomendadas para aumentar a produtividade das culturas com simultânea conservação ou melhoria do meio ambiente. Segundo Salton *et al.* (1998), o sistema fundamenta-se na ausência de revolvimento do solo, na sua cobertura permanente e na rotação de culturas. Podemos acrescentar também o manejo integrado de pragas e doenças.

Por suas reconhecidas características comprovadas amplamente pela pesquisa, o SPD é considerado como uma importante ação ambiental brasileira em atendimento às recomendações da conferência da Organização das Nações Unidas (Eco-92) e da Agenda 21 brasileira, em harmonia com o acordado no Protocolo Verde (Plataforma Plantio Direto, 2001).

A ausência do revolvimento do solo pela aração ou gradagem, a rotação de culturas e a permanente cobertura do solo com plantas ou restos culturais melhoram a condição estrutural do solo (Freitas *et al.*, 1998; Madari *et al.*, 2004). Também são observadas alterações benéficas nas características físicas, químicas e biológicas do solo, tais como retenção de umidade, oscilação térmica, distribuição do fósforo e matéria orgânica, teor de nitrogênio e distribuição de alguns organismos do solo (Muzilli, 1983; Wiethölter, 2000; Machado & Silva, 2001).

Adoção do SPD

O SPD foi inicialmente introduzido nos Estados Unidos e atualmente está sendo largamente utilizado na América do Sul (especialmente no Brasil), Austrália e em menores extensões na Europa (Bradford & Peterson, 2000).

Aproximadamente 37% das terras agricultáveis nos Estados Unidos da América (EUA) estão sendo manejadas com sistemas conservacionistas, que incluem o plantio direto e o cultivo mínimo (Lal *et al.*, 1999). O Brasil com aproximadamente 25 milhões de hectares, ocupa o segundo lugar entre os países do mundo em área cultivada no SPD, estando atrás apenas dos Estados Unidos (23,7 milhões ha). No entanto, esse valor pode aumentar significativamente, pois representa aproximadamente 25% da área cultivada com culturas temporárias. Na Argen-

tina essa porcentagem é de 37% e no Paraguai de 52% (Derpsh & Benites, 2003). Importante destacar que, diferente do Brasil, nos EUA o plantio direto não envolve necessariamente a rotação de culturas com plantas de cobertura. Há uma sucessão de culturas comerciais (soja, milho, trigo) intercaladas por pousio no inverno.

Segundo a FEBRAPDP (2003), o estado do Paraná, com área territorial de 199.362 km², possui atualmente a maior área de SPD (4,96 milhões de ha), seguido da região do Cerrado (4,9 milhões de ha). Em média, 80% dos agricultores da região dos Campos Gerais adotam o sistema plantio direto, que tem proporcionado as maiores produtividades de grãos (Sá, 1993). O estado do Paraná é responsável por 25% da produção nacional de grãos (Castro Filho *et al.*, 1991), entre esses a soja, que no ano de 1996 movimentou no Brasil cerca de 4,8 bilhões de reais (Anuário..., 1998). A região de Campos Gerais apresenta altas produtividades de soja, sendo que os rendimentos de soja nessa parte do Estado são elevados, com médias de produtividade variando entre 2.100 e 3.600 kg.ha⁻¹.

Fertilidade do solo em SPD

O SPD promove alterações no comportamento do solo, por caracterizar-se pelo revolvimento do solo apenas na linha de semeadura, e eliminar as ações mecânicas que promovem a homogeneização do solo em profundidade (Machado & Silva, 2001). Com a distribuição de fertilizantes, corretivos e palhada na superfície do solo e a ação das plantas acumulando nutrientes na biomassa aérea, ocorre um acúmulo de nutrientes, especialmente P e K, na camada superficial do solo, nos primeiros 10 cm, diminuindo significativamente em profundidade a disponibilidade de nutrientes e o armazenamento de matéria orgânica (Muzilli, 1983; Castro Filho *et al.*, 1998; Machado & Freitas, 2004).

Ao contrário dos sistemas de preparo convencional, que envolvem a aração e gradagem do solo na camada de solo de 0 a 20 cm, o solo sob plantio direto possui uma estratificação química e física distinta, tendendo à observada em solos sob vegetação natural (Machado & Gerzabek, 1993). Com o tempo, há uma tendência de aumento da eficiência de uso dos adubos aplicados, e da disponibilidade de nutrientes, pela ação de microorganismos (N), diminuição da fixação de fósforo pela argila do solo, e movimentação de cátions no perfil do solo (Ca, Mg).

Além dessa estratificação em profundidade (estratificação vertical), o sistema de plantio direto, por envolver rotação de culturas que condicionam diferentes espaçamentos entre fileiras e quantidades variadas de fertilizantes aplicados em linha, acarreta também uma estratificação superficial (estratificação horizontal), o que resulta em variações de teores de nutrientes, principalmente os de fósforo e potássio.

Em regiões mais frias do Brasil, é comum haver um aumento expressivo nos teores de matéria orgânica nas camadas superficiais do solo, principalmente nas áreas onde o SPD já está consolidado (mais de 5 anos). Nesses casos, esse acréscimo no estoque de matéria orgânica pode ser expresso por uma melhoria no grau de fertilidade, já que é comum nessas áreas de SPD um aumento na capacidade de o solo reter cátions, na quantidade de água armazenada no solo, na disponibilidade de nutrientes do solo, uma diminuição na atividade do alumínio tóxico e a possibilidade de haver crescimento adequado das culturas em níveis de saturação por bases menores do que os preconizados para os solos sob constante revolvimento. Todas essas mudanças podem resultar em uso mais eficiente de fertilizantes e corretivos agrícolas para as culturas, o que se traduz em um ambiente mais preservado e em menor custo de produção (Lopes *et al.*, 2004).

Agricultura de Precisão

Algumas definições

O termo Agricultura de Precisão vem sendo utilizado no Brasil para designar o sistema de produção adotado por agricultores em outros países denominado de *Precision Agriculture*, *Precision Farming*, *Site-Specific Crop Management* (Manzatto *et al.*, 1999). Assim, a Agricultura de Precisão ou manejo sítio-específico é o manejo de lavouras agrícolas ou pecuárias em uma escala espacial menor que aquela normalmente adotada para toda a lavoura (Plant, 2001).

A Agricultura de Precisão engloba o uso de tecnologias atuais para o manejo de solo, insumos e plantas, tendo como base as variações espaciais e temporais de fatores que afetam a produtividade das culturas. Essa nova filosofia de se fazer agricultura emprega tecnologias ligadas ao sensoriamento remoto, sistema de informações geográficas (GIS) e o sistema de posicionamento global (GPS) (Embrapa, 1997).

A Agricultura de Precisão vem sendo freqüentemente apontada como uma tecnologia (Daberkow & McBride, 2003; Coelho, 2003), mas Blackmore (2002) considera a Agricultura de Precisão como um modo de pensar ou abordar o sistema de produção. Tschiedel & Ferreira (2002) apresentaram uma revisão bibliográfica demonstrando que a Agricultura de Precisão pode ser considerada como um amplo conceito, englobando tecnologias e novos conhecimentos de informática, eletrônica, geoprocessamento, sistemas de bancos de dados e de tomada de decisão. Este conceito incorpora um grande número de conhecimentos científicos novos e alta tecnologia, apresentando ao produtor novos termos, conceitos, equipamentos e tecnologias.

Princípios

A Agricultura de Precisão tem por princípio básico o manejo da variabilidade dos solos e das culturas no espaço e no tempo (Coelho, 2003). Por isso, a implementação de técnicas de

Agricultura de Precisão tem por meta o manejo dos diferentes fatores de produção, de modo georreferenciado, otimizando o uso de insumos, aumentando a renda dos agricultores e mantendo a qualidade do ambiente (Deere, 1999). Desse modo, pode ser definida como o manejo da variabilidade dos fatores de produção agrícola visando aumentar o benefício econômico e reduzir o impacto no meio ambiente (Blackmore, 2002).

Segundo Cambardella & Karlen (1999) a Agricultura de Precisão contém três componentes primários: o sistema de posicionamento global (GPS) que fornece a posição onde o equipamento está localizado, mecanismos para controle de aplicação de nutrientes, defensivos agrícolas, água ou outros insumos em tempo real, e um banco de dados que fornece a informação necessária para desenvolver as relações causa efeito e as respostas à aplicação de insumos a várias condições especificamente localizadas.

Neste sentido, inovações tecnológicas têm surgido para possibilitar novas formas de medição das diferentes variáveis e numerosos equipamentos vêm sendo desenvolvidos para avaliar a extensão da variabilidade de determinada propriedade ou característica de solo ou da cultura. Entretanto, em sistemas agrícolas de baixo insumo, princípios da AP podem ser identificados sem, contudo, haver grande investimento financeiro. A título de exemplo, na colheita do chá (*Camelia sinensis*), uma pessoa era designada para a colheita em um determinado talhão. Ao término da colheita, cada saco era pesado e identificado por talhão. Dessa maneira, foi possível aos agricultores monitorarem a produtividade de cada talhão e, após constatação de talhão com produtividade baixa, tentava-se identificar as causas para a baixa produtividade. Trata-se de um monitoramento rudimentar, mas também considerado como uma agricultura de precisão de baixo nível tecnológico comparado a uma propriedade onde a lavoura de chá era mapeada, utilizando-se sistema de posicionamento global diferencial em tempo real, com subsequente modelagem da lavoura utilizando-se programa ArcInfo (Emmot, 2004).



Figura 1. Colhedora de soja com sistema de monitoramento de colheita para posterior elaboração de mapa de produtividade da cultura.

Também no Brasil, desde 1980, com o avanço da eletrônica, dos meios de comunicação e de programas computacionais, sensores e microprocessadores portáteis contendo programas integradores e comunicação via satélite de dados georeferenciados, foram desenvolvidas novas aplicações em AP e, assim, foi possível, em 1998-99, encontrar no mercado equipamentos como colhedoras (Figura 1) aptas para uso em agricultura de precisão (Mantovani, 2000; Coelho, 2003).

Aspecto financeiro

Do ponto de vista financeiro, McGraw (1994), por meio de estudos de simulação, observou que, em 48 de 50 áreas de plantio de milho testadas, os ganhos oriundos do manejo georeferenciado da fertilidade do solo podem variar de 4,94 a 98,8 dólares por hectare.

Um dos fortes motivos para a adoção das técnicas de Agricultura de Precisão no manejo da fertilidade do solo e da nutrição das plantas reside nos altos custos de produção devido aos fertilizantes. Estudos conduzidos no estado de Mato Grosso do Sul e Mato Grosso pela Embrapa Agropecuária Oeste, constataram que o item fertilizantes foi o que mais onerou o custo de produção da soja (variando de 15,9% em Dourados a 35% do custo total em Sorriso), milho da 1ª safra (27,4 em Dourados a 34% do custo total em Primavera do Leste) e milho da 2ª safra (23,5% em Sorriso a 27% do custo total em Dourados) e, para o trigo, o custo com fertilizantes foi o segundo que mais onerou correspondendo a 22,2% do custo total da produção em Dourados.

Proposta de Trabalho

Pelo exposto, foi proposta uma abordagem baseada no uso de técnicas de Agricultura de Precisão, por meio da Geoinformática, Sistemas de Informações Geográficas e da Análise por Geoestatística, agregadas a um estudo da fertilidade do solo e nutrição das plantas nas condições sócio-econômicas da região de Campos Gerais, PR .

A expectativa foi de que a abordagem utilizada poderia representar uma evolução nos métodos de gerenciamento da terra, podendo proporcionar incrementos reais nos índices de produtividade, racionalização no uso de insumos e preservação dos recursos naturais.

Muitos consideram a Agricultura de Precisão como um procedimento de aquisição de equipamentos de alta tecnologia (ex. colheitadeiras com indicador de produtividade geo-referenciada, sistema de posicionamento global - GPS). Na verdade ela deve ser um instrumento e não uma resposta para os problemas, estando no cerne do procedimento o uso e a análise adequados da informação obtida (Heuvel, 1996).

Vale ressaltar que os agricultores de plantio direto são considerados bem capacitados tecnicamente, devido ao número de tecnologias que eles adotam para o manejo do solo e das culturas. A busca por novas tecnologias que possibilitem aumento de produtividade harmonizado com a preservação ambiental é um dos componentes do perfil do agricultor usuário do plantio direto.

A abordagem atual utilizada nas lavouras da região prioriza a exploração agrícola em grandes áreas que têm tratamento homogêneo, tanto na fase de caracterização de possíveis limitações quanto na etapa de aplicação de insumos. Isto resulta no conceito da necessidade média para a aplicação dos fertilizantes, defensivos e água, sem que se considere a necessidade desses fatores em cada parte do talhão. Assim, é comum que, por exemplo, a mesma formulação ou quantidade do fertilizante seja utilizada para toda a área, atendendo apenas as necessidades médias e não considerando, dessa forma, as necessidades específicas de cada parte do campo. O mesmo acontece para os demais insumos, causando como resultado uma lavoura com produtividade não otimizada (Capelli, 1999).

Muitas vezes, os produtores de soja têm optado, na busca por maiores produtividades, pelo uso de tecnologia que agrega novos equipamentos e procedimentos ainda não validados para as condições locais. Isso se dá em função de haver uma crença de que os problemas de desuniformização de produtividade possam ser resolvidos pelo uso de informação de alto conteúdo tecnológico. Em alguns casos, o simples levantamento da história da fertilidade da área pode ter mais relevância, porém, insuficiente para resolver os problemas complexos normalmente observados em lavouras de alta produtividade. É prática rotineira entre os agricultores tratar glebas de suas propriedades, na etapa de amostragem de solo, como um único espaço, tendo em vista o envio aos laboratórios de uma única amostra de solo composta para a área visada. De fato, esta é a recomendação técnica ainda vigente. Com essa perspectiva, as informações levantadas pela análise de solo assumem um valor médio para toda a gleba, sendo a recomendação de fertilizantes e outros insumos baseada nessa média. Uma novidade para a solução desse tipo de problema seria deixar de considerar uma propriedade agrícola como uma área única para separá-la em sub-áreas que são manejadas individualmente quanto à quantidade e qualidade dos insumos a receber. Essa estratégia visa estabelecer nessas sub-áreas uma condição ideal de produção, permitindo rendimentos máximos. Daí o aumento na procura por técnicas de Agricultura de Precisão pelos agricultores de Campos Gerais, PR. Todavia, o surgimento de novas tecnologias trazem consigo numerosos questionamentos sobre como conseguir maior eficiência e eficácia no seu uso. Registros sobre as vantagens ou benefícios da Agricultura de Precisão são ainda limitados, especialmente no Brasil. Os benefícios são derivados do entendimento das relações entre diversas variáveis da produção. Embora se tenha conhecimento da variabilidade da produção agrícola, através dos mapas de colheita, a informação que os agricultores anseiam é a avaliação da tecnologia ao nível de campo.

Uma maneira de equacionar esse problema, como será visto nos capítulos seguintes foi a avaliação da variabilidade espacial de parâmetros da fertilidade do solo e do estado nutricional por meio de métodos geoestatísticos (Krige, 1951; Cressie, 1993; Deutsch & Journel, 1998).

Nessa abordagem, avalia-se primeiramente a variabilidade dos parâmetros e, em seguida, após a aplicação de procedimentos de interpolação, acessa-se as densidades de amostragens.

Diversos métodos sistemáticos de amostragem do solo têm sido desenvolvidos para melhor avaliar a fertilidade do solo (Assmus *et al.*, 1985; Wollenhaupt *et al.*, 1994). Haneklaus *et al.* (1997), avaliando a textura do solo, o teor de MOS e nutrientes disponíveis em solos do Norte da Europa constataram, após estudos de variabilidade espacial, que o número representativo de amostras de solos era 4 amostras por hectare para textura do solo e de 11 amostras por hectare para a MOS e nutrientes. A amostragem conduzida por este "grid" resultou, segundo os autores, em operações trabalhosas e de custos elevados. A conclusão que se chega é a de que a obtenção de amostragem ótima, em especial a que se adapte à realidade social do agricultor brasileiro, requer a realização de pesquisas baseadas em ferramentas como a geoestatística.

Além disso, em áreas onde a produtividade atingiu patamares elevados, fica muito difícil proporcionar novos aumentos significativos. Este caso, observado na região de Campos Gerais, PR, mostrou a necessidade de se desenvolver um procedimento ágil e eficaz de abordagem de nivelamento de desempenho das culturas com base na produtividade (ex. mapa de colheita), que possibilite uma avaliação do estado nutricional das plantas acoplada à capacidade de fornecimento de nutrientes pelo solo. Essa abordagem deve permitir, de modo sistemático e retro-alimentável, que sejam identificadas as deficiências e otimizadas as recomendações de adubação para atingir o potencial ótimo de produtividade da cultura, sendo mais aconselhável usar os mapas de produtividade e de estado nutricional da soja como critérios de distinção de talhões, ao invés de se proceder uma análise ultra-detalhada da disponibilidade de nutrientes no solo no sentido de explicar os rendimentos obtidos.

A análise do solo 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), e essa tecnologia ainda auxilia na recomendação de adubos e corretivos no Brasil (Cantarella *et al.*, 1995).

Já a amostragem de plantas, embora dependa do momento da coleta para a determinação de níveis críticos e a análise de tecidos vegetais envolva o uso de ácidos fortes, os resultados obtidos a partir delas é mais universal que os provenientes da análise de solo (Jones & Case, 1990). Uma análise de solo pode conter erros devido a interações não explicadas pelos métodos, grau de umidade do solo, interações entre nutrientes e características físicas do solo (Moraghan & Mascagni, 1991), enquanto que a análise de tecidos reflete todas as interações

em solo que determinam a absorção atual de um nutriente pela cultura e, assim, não é tão afetada pelas incertezas que caracterizam a análise do solo (Munson & Nelson, 1990).

Franzen & Peck (1997) constataram a utilidade de mapa de nutrição de potássio para milho (*Zea mays* L.) correlacionando com o teor no solo. Importante mencionar que a adoção de procedimentos mais criteriosos de avaliação da fertilidade do solo para fins de adubação é mister, principalmente dentro de um contexto de preservação ambiental.

Atualmente, as adubações são realizadas por meio da aplicação de doses únicas em terrenos que sabidamente apresentam grandes variações de disponibilidade de nutrientes, e isso aumenta os riscos ambientais de aplicação de adubos em áreas com alta disponibilidade de nutriente (ex. contaminação de lençol freático com nitrato), ou subestima as quantidades de adubos necessárias em áreas com teores baixos de nutrientes.

Uma outra demanda que foi detectada na região em estudo se relaciona à disponibilização aos agricultores de soja de procedimento para se proceder a coleta e a análise de solo em áreas sob semeadura direta.

O procedimento tradicional de amostragem do solo de uma dada área tem como característica a coleta de 10 a 20 sub-amostras por hectare, que, após homogeneização das mesmas num recipiente, separa-se uma amostra composta que passa a representar as características de fertilidade daquela área, assumida como uniforme (Machado *et al.*, 1998).

Entretanto, tal procedimento pode apresentar problemas devido à variabilidade espacial de nutrientes no solo. Souza *et al.* (1998) realizaram estudos de variabilidade de fósforo, potássio e matéria orgânica em função de sistemas de manejo (preparo convencional, plantio direto, escarificação e pastagem) em Podzólico Vermelho-Amarelo, Latossolo Roxo e Latossolo Vermelho Escuro. Os autores observaram que as maiores variabilidades foram encontradas para fósforo e potássio, sendo observado nas áreas sob plantio direto os maiores coeficientes de variações.

Salet *et al.* (1997) constataram, num Latossolo Roxo de Passo Fundo, RS, sob plantio direto há mais de sete anos, que, devido à variabilidade horizontal do fósforo e potássio, o número mínimo de sub-amostras coletadas pelo trado, necessárias para uma variação de 10% em relação à média, era de 34 e 170 amostras por hectare, respectivamente. Como não há revolvimento do solo na maior parte da área da lavoura, a amostragem do solo convencional para fins de recomendação de adubação tem resultado em problemas de respostas das culturas à fertilização do solo sob plantio direto. Esta situação se torna bastante crítica tanto nos primeiros anos da adoção do sistema de plantio direto, como em sistemas já consolidados, onde se constatam variações de produtividade em áreas consideradas "homogêneas", do ponto de vista da avaliação convencional da fertilidade do solo. Portanto, todos esses aspectos

devem ser levados em conta no sentido de se viabilizar para os agricultores um guia de procedimento na amostragem e análise do solo.

Diante de todas as considerações expostas, as ações de pesquisa propostas tiveram como objetivo testar as técnicas de Agricultura de Precisão em área de soja sob sistema plantio direto, no sentido de oferecer uma crítica aos procedimentos que compõem a abordagem ainda incipiente no Brasil para o manejo da fertilidade do solo e nutrição de plantas.

O projeto utilizou uma nova forma de abordar o problema de variabilidade espacial de nutrientes no solo: a produtividade e o estado nutricional das cultura assumem papel central na distinção de ambientes e na descrição da ordem de nutrientes no solo limitantes à soja. Com essa abordagem, a análise de disponibilidade de nutrientes no solo pode ser orientada e racionalizada e também deve haver um aumento da renda dos agricultores pela otimização no uso de insumos.

Características da Área de Estudo

A área de estudo se localizava na Fazenda Tabatinga, de propriedade do Sr. Geraldo Slob, na região de Campos Gerais, no município de Carambeí, Paraná (24°51'45" S e 50°15'58"; 615 a 870 m de altitude). Para a realização do estudo, foi selecionado um talhão de 13 ha dentro de uma propriedade típica da região, ou seja, possuía níveis elevados de produtividade de milho e soja em sistema plantio direto com rotação de culturas. Na Figura 2 é apresentada uma foto da área de estudo.

O clima da região é subtropical com média de 1.560 mm anuais de chuva e temperatura anual média de 17,6°C. O tipo de solo predominante, 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 720 g kg⁻¹. Maiores detalhes sobre o clima e solos da região podem ser obtidos no capítulo 3.

O sistema plantio direto vinha sendo adotado nesta área desde 1988 e o esquema de cultivo utilizado é o cultivo de 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 62,5 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. Foi feita também, na fase anterior à floração da cultura, pulverizações foliares com sulfato de manganês.



Figura 2. Ortofoto da área de estudo com destaque para a primeira grade de amostragem (janeiro 2000) de 13 hectares na Fazenda Tabatinga em Carambeí, PR.

Malha de amostragem

As amostras foram coletadas em grade em três épocas: (1) Janeiro de 2000, no florescimento da soja; (2) Novembro de 2000, antes da semeadura da soja e; (3) Novembro 2001, também antes da semeadura da soja. A amostragem em janeiro de 2000 foi conduzida para se testar a hipótese de que, coletando-se o material de solo na mesma época de amostragem dos tecidos vegetais (Figura 3) seria possível, se constatada a limitação de algum nutriente nas plantas de determinado ponto de amostragem georreferenciado, as amostras de solos coletadas nesse

mesmo ponto também deveriam apresentar deficiência do nutriente limitante à produção de soja. Entretanto, a hipótese não se confirmou e, mesmo que fosse confirmada, o procedimento de amostragem do solo e planta na época do florescimento da cultura teria pouca aceitação pelos produtores. Os resultados de fertilidade do solo apresentados no capítulo 6 foram, todavia, obtidos pela amostragem de janeiro de 2000.



Figura 3. Coleta de amostras de planta (soja) com destaque para a estaca de amostragem onde se coletou amostras de solo.

A grade de amostragem de janeiro de 2000 foi composta de uma grade maior com células de 40 x 40 m, num total de 107 pontos de amostragem cobrindo 13 ha. Observaram-se duas áreas com diferenciação textural e nestas estabeleceu-se 2 novas malhas de amostragem

mais densas, com subdivisões de 20 X 20 m ; 10 X 10 m e; 5 X 5 m, perfazendo, assim, um total de 72 amostras cada. O esquema das malhas de amostragem adotado está apresentado na Figura 4. As coordenadas geográficas dos pontos amostrados foram obtidas através do uso de aparelho GPS Trimble® Geoexplorer 3C com precisão de cerca de 2 metros.

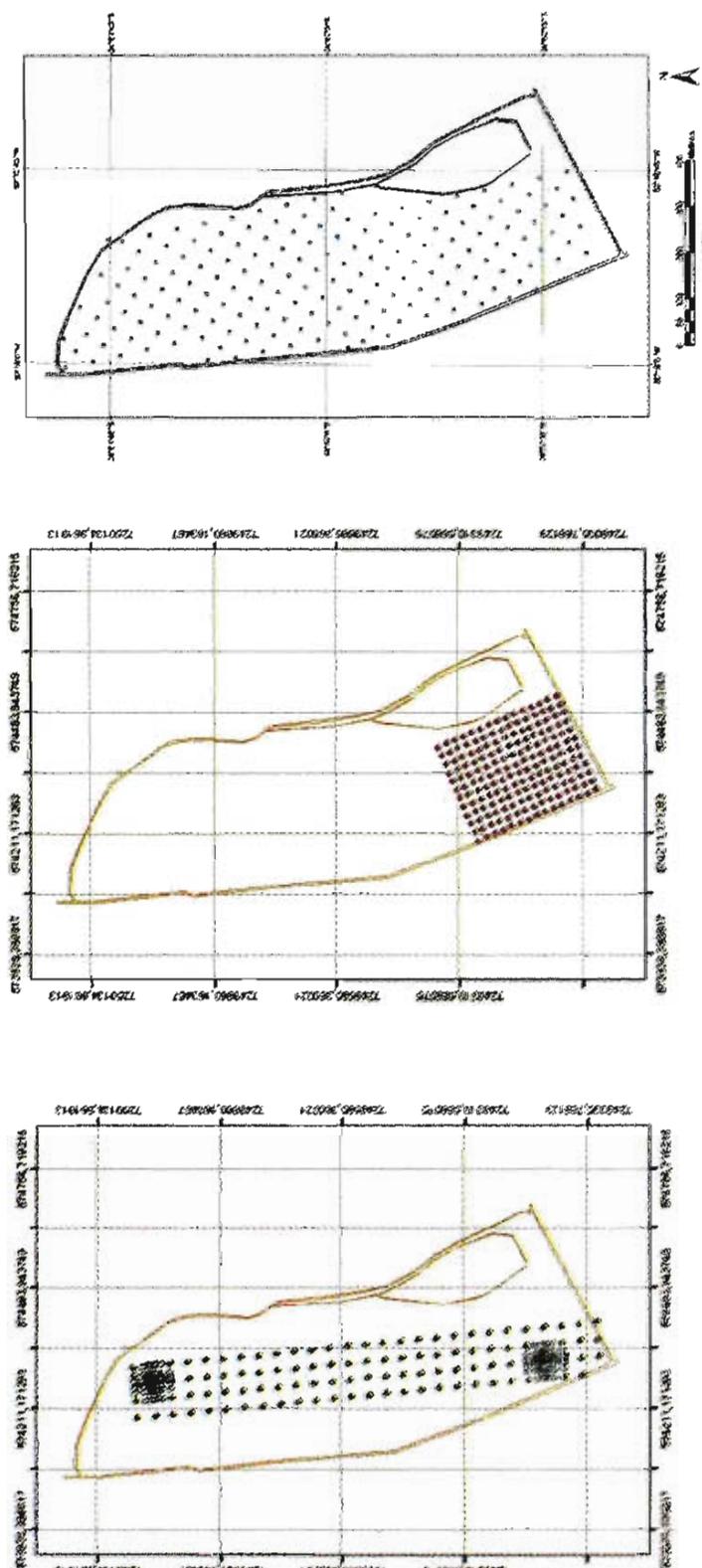


Figura 4. Esquema das grades de amostragem utilizadas no 1°, 2° e 3° ano do estudo.

Amostragem de solo e avaliação da fertilidade do solo

As amostras de solo foram coletadas em três profundidades: 0-5, 5-10 e 10-20 cm abrindo-se trincheiras em cada ponto de amostragem. Após coleta, as amostras de solo foram secas ao ar, peneiradas (malha de 2 mm) 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. Os resultados detalhados destas avaliações são apresentados no Capítulo 6.

Amostragem de folhas e avaliação do estado nutricional

As amostragens de folhas foram realizadas no início do florescimento da soja seguindo as recomendações de Carmo *et al.* (1998). 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 Carmo *et al.* (2000). A avaliação do estado nutricional da soja foi realizada através do método DRIS, e o cálculo dos índices para os nutrientes avaliados. No capítulo 7 encontram-se os resultados obtidos nestas avaliações.

Mapas de produção

A avaliação da produtividade da soja, para posterior elaboração de mapa de colheita, foi realizada com uma colheitadeira equipada com Sistema Massey Ferguson Fieldstar. No Capítulo 4 há uma ampla e detalhada abordagem sobre o tema, inclusive com os exemplos obtidos nesta área de estudo.

Análise geostatística

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, 1998). 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). O Capítulo 2 traz um detalhamento sobre os aspectos do emprego técnica.

Referências Bibliográficas

ANUÁRIO ESTATÍSTICO DO BRASIL. Rio de Janeiro: IBGE, v. 57, 1998.

ASSMUS, R. A., FIXEN, P. E.; EVENSON, P. D. Detection of soil phosphorus spatial variability through the use of semivariograms and strip sampling, **Journal of Fertilizer Issues**, Dordrecht, v.2, n.1, p:136-143, 1985.

BLACKMORE, S. Precision farming: a dynamic process. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 6., 2002. Minneapolis. **Proceedings...** Madison: ASA: CSSA: SSSA, 2002. p. 84-104.

BRADFORD, J. M.; PETERSON, G. A.. Conservation tillage. In: SUMNER, M. E. (Ed.) **Handbook of soil science**. Boca Raton: CRC Press, 2000. p. 247-270.

CAMBARDELLA, C. A.; KARLEN, D. L. Spatial analysis of soil fertility parameters. **Precision Agriculture**, Dordrecht, v.1, n.1, p. 5-14, 1999.

CANTARELLA, H., RAIJ, B. van, QUAGGIO, J. A. Situação da análise do solo e planta no Brasil. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 21. Petrolina, 1994. **Anais do simpósio: fertilizantes: insumo básico para agricultura e combate a fome**. Petrolina: Embrapa Semi-árido: SBCS. 1995. p. 9-33

CAPELLI, N. L. **Agricultura de precisão: novas tecnologias para o processo produtivo**. LIE: DMAQAG: FEAGRI: UNICAMP, 1999. Disponível em: < <http://www.bases.cnptia.embrapa.br/cria/gip/gipap/capelli.doc> >. Acesso em: 15 Out. 2000.

CARMO, C. A. F. de S.; ARAÚJO, W. S. de; BERNARDI, A. C. de C.; SALDANHA, M. F. C. **Métodos de análise de tecidos vegetais utilizados na Embrapa Solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2000. 41p. (Embrapa Solos. Circular Técnica, 6).

CARMO, C. A. F. de S. do; NOGUEIRA, A. R. de A.; OLIVEIRA, A. S. de; ALMEIDA, D. G. de; FERNANDES, F. D.; PITTA, G. V. E.; CARLOS, G. M.; OLIVEIRA, H. de; MAMÃO, J. B.; ARMELIN, M. J. A.; SALDANHA, M. F. C.; MYAZAWA, M.; SCRAMIM, S.; BARRETO, W. de O.; RUFINI, Y. A. Tecidos vegetais. In: NOGUEIRA, A. R. de A.; MACHADO, P. L. O. de A.; CARMO, C. A. F. de S. do; FERREIRA, J. R. (Ed.) **Manual de laboratórios: solo, água, nutrição vegetal, nutrição animal e alimentos**. 1. Coleta, acondicionamento e preparo de amostras. São Carlos: EMBRAPA - CPPSE, 1998. p. 32-42.

CASTRO FILHO, C.; HENKLAIN, J.; VIEIRA, M. J.; CASÃO JUNIOR, R. Tillage systems and soil and water conservation in southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 24, n.2,

p. 221-236, 1991.

CASTRO FILHO, C., MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A. L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo Roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n.4, p. 527-538, 1998.

COELHO, A. M. Agricultura de precisão: Manejo da variabilidade espacial e temporal dos solos e das culturas. **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa, v. 3, p. 249-290. 2003.

CRESSIE, N. Geostatistics: a tool for environmental modelers. In: GOODCHILD, M. F.; B. O.; PARKS, B. O.; STEYAERT, L. T. (Ed). **Environmental modeling with GIS**. New York: Oxford University Press, 1993. p. 414-421.

DABERKOW, S.G.; McBRIDE, W.D. Farm and operator characteristics affecting awareness and adoption of precision agriculture technologies in the US. *Precision Agriculture*, Dordrecht, v. 4, p. 163-177. 2003

DEERE, J. **The precision-farming guide for agriculturists**. Moline: John Deere Publishing, 1999. 118 p.

DERPSCH, R.; BENITES, J. R. Situation of conservation agriculture in the world. In: WORLD CONGRESS ON CONSERVATION AGRICULTURE = CONGRESSO MUNDIAL SOBRE AGRICULTURA CONSERVACIONISTA, 2., 2003, Foz do Iguaçu. Producing in harmony with nature: **[Proceedings ...]** = Produzindo em harmonia com a natureza: **[Anais ...]**. Ponta Grossa: Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha, 2003. v.1, p. 67-73.

DEUTSCH, C. V.; JOURNEL, A. G. **GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide**. New York: Oxford University Press, 1998. 369 p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa em Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília, DF: Embrapa Produção de Informação, 1999. 412 p.

EMBRAPA. Tecnologia em mecanização no Brasil: Equipamentos e sistemas para o futuro. In: SEMINÁRIO TEMÁTICO PARA PROSPECÇÃO DE DEMANDAS EM PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM MECANIZAÇÃO AGRÍCOLA NO BRASIL, 1997, Sete Lagoas. **[Anais...]**. Disponível em: <<http://www.bases.cnptia.embrapa.br/cria/gip/gipap/seminario.doc>>. Acesso em: 03 maio 2000.

EMMOT, A. **Tea area survey**. 2002. Disponível em: <<http://www.locate-it-systems.com/gismis1.htm>>. Acesso em: 17 nov. 2004.

FEBRAPDP. Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha. 2003. Disponível em: <<http://www.febrapdp.org.br/>>. Acesso em: 08 maio 2003.

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.

FREITAS, P. L. Harmonia com a natureza. **Agroanalysis**, Rio de Janeiro, p. 12-17, fev. 2002

FREITAS, P. L.; BLANCANEUX, P.; MOREAU, M. Caractérisation structurale de sols des Cerrados Brésiliens (Savanes) sous différents modes d'utilisation agricole. **Etude et Gestion des Sols**, Paris, v. 5, n. 2, p. 93-105, 1998.

HANEKLAUS, S.; RUEHLING, I.; SCHROEDER, D.; SCHNUG, E. Studies on the variability of soil and crop fertility parameters and yields in different landscapes of Northern Germany. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 1., 1997, Warwick. **Proceedings...** Oxford: BIOS Scientific, 1997. p.785-792

HEUVEL, R. M. V. The promise of precision agriculture. **Journal of Soil Water Conservation**, Ankeny, v. 51, n.1, p.38-40, 1996.

JONES JR., J. B.; CASE, V. W. Sampling, handling, and analysing plant tissue samples. In: WESTERMAN (Ed.) **Soil testing and plant analysis**, 3. ed. Madison: Soil Science Society of America, 1990. p.384-427. (SSSA. Book Series, 3).

KRIGE, D. G. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersraild. **Johanesburg Chemistry Metallurgy Mining Society South African**, Johanesburg, v. 52, n.6, p.119-139, 1951.

LAL, R.; FOLLET, R. F.; KIMBLE, J. M.; COLE, V. R. Managing U.S. cropland to sequester carbon in soil. **Journal of Soil Water Conservation**, Ankeny, v. 54, p. 374-381, 1999.

LOPES, A. S.; WIETHÖLTER, S.; GUILHERME, L. R. G.; SILVA, C. A. **Sistema plantio direto: bases para o manejo da fertilidade do solo**. São Paulo: ANDA. 2004. 115 p.

MACHADO, P. L. O. de A.; SILVA, C. A. Soil management under no tillage systems in the tropics with special reference to Brazil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 61, n.1-2, p.119-130, 2001.

MACHADO, P.L.O. de A.; FREITAS, P. L. No-till farming in Brazil and its impact on food security and environmental quality. In: LAL, R.; HOBBS, P. R.; UPHOFF, N.; HANSEN, D. O. (Ed.)

Sustainable agriculture and the international rice-wheat system. New York: Marcell Dekker, 2004. p. 291-310.

MACHADO, P. L. O. de A.; FABRÍCIO, A. C.; PRIMAVESI, A. C.; ROSSO, C. de; FERREIRA, C. J. A.; PRATES, H. T.; FERRAZ, M. R.; ARMELIN, M. J. A.; MIYAZAWA, M.; PRIMAVESI, O.; MENDES, P.J.; FERRACINI, V. L. Solos. In: NOGUEIRA, A. R. de A.; MACHADO, P. L. O. de A.; CARMO, C. A. F. de S. do; FERREIRA, J. R. (Ed.) **Manual de laboratórios: solo, água, nutrição vegetal, nutrição animal e alimentos.** 1. Coleta, acondicionamento e preparo de amostras. São Carlos: EMBRAPA - CPPSE, 1998. p.7-23

MACHADO, P. L. O. A.; GERZABEK, M. H. Tillage and crop rotation interactions on humic substances of a Typic Haplorthox from Southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 26, n.2, p.227-236, 1993.

MADARI, B.; MACHADO, P. L. O. A.; TORRES, E.; ANDRADE, A. G.; ORTIZ VALENCIA, L. I. No tillage and crop rotation effects on soil aggregation and organic carbon in a Rhodic Ferralsol from southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, 2004. No prelo.

MANTOVANI, E. C. Agricultura de precisão e sua organização no Brasil. In: BORÉM, A.; GIÚDICE, M. P.; QUEIROZ, D. M.; MANTOVANI, E. C.; FERREIRA, L.R.; VALLE, F. X. R.; GOMIDE, R. L. (Ed.) **Agricultura de precisão.** Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2000. p.77-92.

MANZATTO, C. V.; BHERING, S. B.; SIMÕES, M. **Agricultura de precisão: propostas e ações da Embrapa solos.** 1999. Disponível em: < <http://www.cnps.embrapa.br/search/pesqs/proj01/proj01.html>>. Acesso em: 03 maio 2000.

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.

McGRAW, T. Soil test level variability in Southern Minnesota. **Better Crops with Plant Food**, Norcross, v.78, n.4, p. 24-25, 1994.

MORAGHAN, J. T.; MASCAGNI JR., H. J. Environmental and soil factors affecting micronutrient deficiencies and toxicities. In: MORTVEDT, J. J. (Ed.) **Micronutrients in agriculture.** 2. ed.. Madison: Soil Science Society of America, 1991. p. 371-425. (SSSA Book Series, 4).

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

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. (SSSA. Book Series, 3).

MUZILLI, O. Influencia do sistema de plantio direto, comparado ao convencional, sobre a fertilidade da camada arável do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.7, p. 95-102, 1983.

PLANT, R. E. Site-specific management: the application of information technology to crop production. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 30, n.1, p. 9-29. 2001.

PLATAFORMA PLANTIO DIRETO. **Introdução e histórico**. 2001. Disponível em: <<http://www.embrapa.br/plantiodireto/>>. Acesso em: 30 maio 2003.

SÁ, J. C. M. **Manejo da fertilidade do solo no plantio direto**. Castro: Fundação ABC, 1993. 96 p.

SALET, R. L., AGHINONI, I., KOCHMANN, R. A., KRAY, C. H.; CONTE, E. Como fazer uma amostragem de solo no sistema de plantio direto? In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DO SISTEMA DE PLANTIO DIRETO, 2., 1997, Passo Fundo. **Anais...** Passo Fundo: Embrapa Trigo, 1997. p. 205-207.

SALTON, J. C.; HERNANI, L. C.; FONTES, C. Z. **Sistema plantio direto**. O produtor pergunta, a Embrapa responde. Brasília, DF: EMBRAPA - SPI; Dourados: EMBRAPA - CPAO, 1998. 248 p.

SILVA, F. C. da; EIRA, P.A. da; BARRETO, W. de 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).

SOUZA, L. da S.; COGO, N. P.; VIEIRA, S. R. Variabilidade de fósforo, potássio e matéria orgânica no solo em relação a sistema de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, n.1, p.77-86, 1998.

TSCHIEDEL, M.; FERREIRA, M. F. Introdução à agricultura de precisão: conceitos e vantagens. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.32, n.1, p.159-163, 2002.

WIETHÖLTER, S. Manejo da fertilidade do solo no sistema plantio direto: experiência nos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 25.; REUNIÃO BRASILEIRA SOBRE MICORRIZAS, 8.; SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MICROBIOLOGIA DO SOLO, 6.; REUNIÃO BRASILEIRA DE BIOLOGIA DO SOLO, 3., 2000. Santa Maria. **Fertbio 2000**: biodinâmica do solo. Santa Maria:

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Microbiologia, 2000. CD-ROM.

WOLLENHAUPT, N.C.; WOLKOWSKI, R. P.; CLAYTON, M. K. Mapping soil test phosphorus and potassium for variable-rate fertilizer application. **Journal of Production Agriculture**, Madison. v.7. p. 441-448. 1994.



Variabilidade de Atributos de Fertilidade e Espacialização da Recomendação de Adubação e Calagem para a Soja

Pedro Luiz O. de A. Machado

Carlos Alberto Silva

Alberto C. de Campos Bernardi

Ciríaca A. F. de Santana do Carmo

Luiz I. Ortiz Valencia

Margareth S. P. Meirelles

José P. Molin

Volnei Pauletti

Leandro M. Gimenez

Resumo

No Brasil, as áreas agrícolas são gerenciadas de forma homogênea, e as doses e tipos de fertilizantes e corretivos são definidas de modo uniforme para áreas que podem variar de 10-50 hectares. A aplicação de fertilizantes e corretivos a taxas variáveis tem sido considerado no país devido a preocupações com a qualidade ambiental e com as margens estreitas de lucratividade do empreendimento rural. Além disso, pouco se sabe sobre a variabilidade espacial da disponibilidade de nutrientes para as plantas, especialmente no sistema plantio direto, que já é adotado em cerca de 20 milhões de hectares. Assim, foram realizadas avaliações espaciais de algumas propriedades químicas (pH, Ca, Mg, K, saturação por bases, P e carbono orgânico) de um solo sob sistema plantio direto em três profundidades (0-5, 5-10 e 10-20 cm) de solo, visando estimar a necessidade de calagem para a soja e a aplicação a taxa variável de fertilizantes fosfatado e potássico. Métodos geoestatísticos e de krigagem foram adotados para essas estimativas. Os alcances dos semivariogramas obtidos para os atributos de solo indicam que um gride de 20 x 20 m é apropriado para identificar a variabilidade espacial da disponibilidade de nutrientes para a soja. A produtividade da soja foi monitorada por meio de mapa de produtividade. 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 5,8 t ha⁻¹ e a calagem poderia ser exequível em duas zonas de manejo, que receberiam de 1,5 a 3,0 t ha⁻¹ e de 3,0 a 4,5 t ha⁻¹. O mapa das estimativas krigadas da necessidade de fósforo também demonstra duas zonas de manejo distintas. Seria aconselhável aplicar e uma dessas áreas de 40-60 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e outra poderia receber 80 kg ha⁻¹ de P₂O₅.

Introdução

No Brasil, predominam os solos de reduzida fertilidade, com baixos teores de cátions trocáveis e elevado grau de acidez. Sob essas condições de cultivo, se a correção da fertilidade do solo não for realizada de modo adequado, aumentam-se os riscos de obtenção de baixas produtividades e de diminuição do lucro do agricultor. A busca por novas tecnologias que possibilitem aumentar a produtividade com melhoria da qualidade do solo e com menor impacto sobre o meio ambiente tem, como um dos principais exemplos, a adoção em diferentes regiões do país do sistema plantio direto. A adoção desse sistema de plantio proporciona ganhos importantes em termos de melhoria da fertilidade do solo, uma vez que é comum em áreas de SPD o aumento nos estoques de matéria orgânica. Mais recentemente, na região de Campos Gerais, estado do Paraná, este conceito foi reforçado pela possibilidade de utilização das técnicas de agricultura de precisão (AP) pelos agricultores. No entanto, como toda nova abordagem, existem ainda vários entraves a serem superados. Um desses entraves está ligado ao uso do ferramental de agricultura de precisão no manejo da fertilidade do solo.

O uso de técnicas de AP com a finalidade de se mapear e manejar a variabilidade de atributos de fertilidade do solo introduz um fato novo nas lavouras, na medida em que se deixa de considerar determinadas áreas agrícolas como uniformes para dividi-las em pequenos talhões ou zonas de manejo, que, por possuírem características próprias e serem determinantes sobre os índices de produtividade obtidos, passam a ser analisados individualmente quanto ao tipo e quantidade de fertilizante a receber (Saraiva, 2000). Em relação à soja, que é uma cultura que exporta grandes quantidades de nutrientes das áreas de plantio, a recomendação georeferenciada de adubos e corretivos assume importância pelo fato de as produtividades nos talhões serem niveladas pelo potencial produtivo de cada parte do terreno e pelo fato de esse tipo de manejo poder representar uma redução no custo da adubação, que atinge valores na faixa de 25 a 35% do custo total de produção da soja.

Para que o uso de ferramental de agricultura de precisão seja plenamente justificado, é preciso que ocorra nas áreas manejadas alta variabilidade nos índices de colheita e na disponibilidade de nutrientes no solo. Essas são as condições prevalentes na região de Campos Gerais, uma vez que é comum nesse local a produtividade da soja variar de 0,5 a 4 t ha⁻¹, e os atributos de fertilidade dos solos apresentarem alta variabilidade. Assim, há espaço para que as técnicas de AP sejam usadas na região e isso se justifica ainda mais por se tratar de região com produtores que agregam bastante tecnologia, obtêm altas produtividades com custos de produção elevados, e manejam o solo aplicando doses uniformes de corretivos e adubos nos talhões. Há ainda a possibilidade de redução do custo da adubação, de melhoria nos índices de produtividade e de menor risco de poluição do ambiente.

Agricultura de Precisão

A agricultura de precisão preconiza a aplicação de tecnologias e princípios para manejar a variabilidade espaço-temporal associada a diferentes aspectos da produção agropecuária com o propósito de aumentar o rendimento das culturas paralelamente à qualidade ambiental (Pierce & Novak, 1999). Segundo esses autores, o sucesso na uso de técnicas de AP está diretamente relacionado com o emprego desse ferramental para identificar, gerenciar e avaliar a variabilidade espaço-temporal dos diferentes fatores de produção. Em termos históricos, os sistemas de produção agrícola, ao longo do tempo, se beneficiaram da incorporação dos avanços tecnológicos originalmente desenvolvidos por outros setores. 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 permite integrar e aplicar na agricultura de precisão os diferentes avanços tecnológicos alcançados nas áreas de eletrônica, geografia, informática, engenharia mecânica, engenharia mecatrônica, etc. (Whelan et al., 2002).

É importante mencionar que a abordagem envolvida na agricultura de precisão não é recente. 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 especialmente na computação, georreferenciação e geomática (Stafford, 2000).

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

O estudo da variabilidade espacial de propriedades do solo tem grande importância para aumentar a eficiência de uso de fertilizantes e outros insumos nas lavouras. A variabilidade das características do solo está relacionada com suas características intrínsecas, ou seja, com os fatores de formação do solo, e com o efeito do manejo do solo (Dobermann & George, 1994).

Segundo Zhang et al. (2002), são seis 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), mudanças nos atributos de fertilidade do solo resultantes 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.

De acordo com Zhang et al. (2002), a variável mais estudada atualmente é a ligada à disponibilidade de nitrogênio no solo para as culturas.

Diversos estudos sobre características químicas e físicas do solo demonstram a variabilidade ou dependência espacial destas características (Schlindwein & Anghinoni, 2000; Oliveira et al., 1999; Souza et al., 1998; Albuquerque et al., 1996). A variabilidade de nutrientes no solo ocorre horizontalmente e em profundidade. Segundo Chitolina et al. (1999), uma das razões para a variabilidade horizontal é a forma de adubação e da planta, ao passo que variações no sentido vertical são devidas às características dos elementos, do sistema de manejo e do sistema solo-planta-atmosfera. O sistema de plantio direto ilustra bem esse fenômeno de variabilidade de propriedades em profundidade de solo. Ao avaliar a fertilidade em solos sob plantio direto e convencional, Hikishima et al. (1996), observaram maior estratificação de nutrientes no plantio direto, sendo verificado também que o fósforo variou mais verticalmente do que o potássio, possivelmente devido a menor mobilidade em perfil do primeiro elemento (Chitolina et al., 1999).

No geral, as variabilidades mencionadas são condicionados pelo tipo de manejo do solo (Chitolina et al., 1999). Em revisão realizada com base em índices de coeficientes de variação, Saraiva (1989) relata que, em propriedades de solo pouco influenciadas pelo manejo, como argila ou P total, a variação entre pontos amostrados é de 10%; para teores de matéria orgânica, CTC e N-total é da ordem de 25%, ao passo que para P e K disponíveis e Ca e Mg trocáveis atingem valores da ordem de 35 a 50%. Segundo Barreto et al. (1974) e Chitolina (1982), o pH e a matéria orgânica são as propriedades de solo de menor variabilidade.

Espacialização dos atributos do 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 dos nutrientes no solo.

Para se otimizar a estimativa espacial dos atributos do solo, é necessário desenvolver estratégias de amostragem eficientes baseadas na geoestatística (ver capítulo 2). Segundo McBratney & Pringle (1999), o uso de princípios geoestatística foi essencial para descrever e quantificar a variabilidade espacial de fatores limitantes a obtenção de alta produtividade.

Por meio da análise do alcance do semivariograma, o uso de conceitos de geoestatística pode contribuir para o estabelecimento da malha de amostragem. O alcance é um dos parâmetros do modelo de semivariograma que indica a distância até onde o atributo apresenta continuidade espacial. Ele depende da direção e da escala espacial da área em 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.

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 0-5 cm 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.

Os valores relativos ao alcance dos semivariogramas para atributos de fertilidade do solo são apresentados na Tabela 2. O alcance representa o limite da dependência espacial da grandeza medida, indicando o ponto (em metros) até onde há dependência espacial e a partir daí observa-se independência (maiores detalhes ver capítulo 2). Por apresentarem alcance, os dados são altamente correlacionados no espaço e, assim, nas Figuras 1 e 2 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 variações observadas nos mapas das estimativas *krigadas* de P e K coincidem pouco com os mapas das estimativas *krigadas* de %V. Isto se deve provavelmente às adubações mais freqüentes de P e K que a calagem nos últimos 13 anos.

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 _{pH 7} (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

¹ O intervalo apresentado se refere 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. Alcance dos semivariogramas calculados para atributos de Latossolo Vermelho 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	80	80	75	75	80	80
CTC ^{org} _{pH 7.0}	75	55	60	60	80	65
PH _{água}	80	80	80	80	10	60
V(%)	55	55	10	60	10	55
Ca ²⁺	60	60	10	60	-**	-
Mg ²⁺	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-SO ₄ ²⁻	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

* 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.

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

Segundo McBratney & Webster (1983) uma das principais utilizações dos semivariogramas é na determinação do número ideal de amostras para a estimativa das características químicas do solo.

Schindwein & Anghinoni (2000) encontraram maior variabilidade horizontal para fósforo e potássio do que para pH em água, índice SMP e matéria orgânica. Os autores atribuíram esse comportamento ao sistema de distribuição de fósforo e potássio, realizado em linha no sistema plantio direto, enquanto que o calcário é distribuído a lanço, de maneira uniforme sobre o solo, diminuindo a sua variabilidade.

Os valores médios para as direções X e Y foram, respectivamente, 52 e 48 m para as 3 profundidades de solo. 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 26 X 24 m.

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-se 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 produtividade e o conhecimento do histórico de desempenho da cultura na gleba, podem auxiliar no estabelecimento de zonas de manejo. Além disto, a avaliação da fertilidade do solo combinada com o diagnóstico do estado nutricional da cultura, no qual, após a identificação do nutriente limitante da produção, poderia ser feita especificamente para o 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.

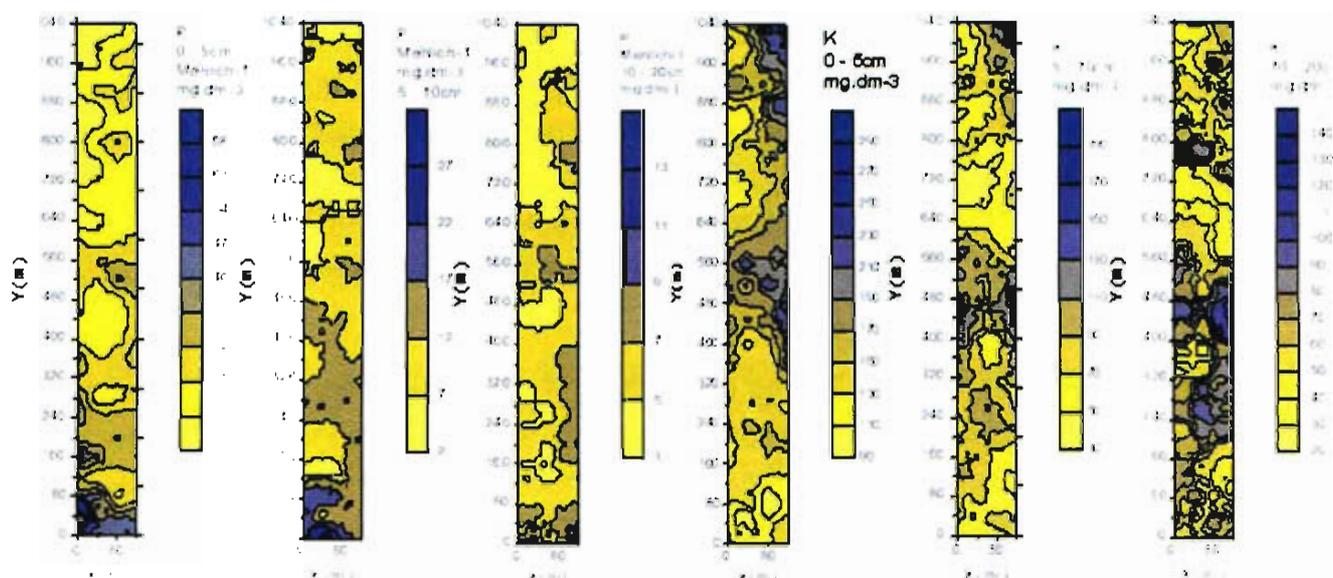


Figura 1. Mapas *krigados* de distribuição espacial de fósforo e potássio nas 3 profundidades amostradas no solo cultivado com soja em sistema de plantio direto na região de Campos Gerais, PR.

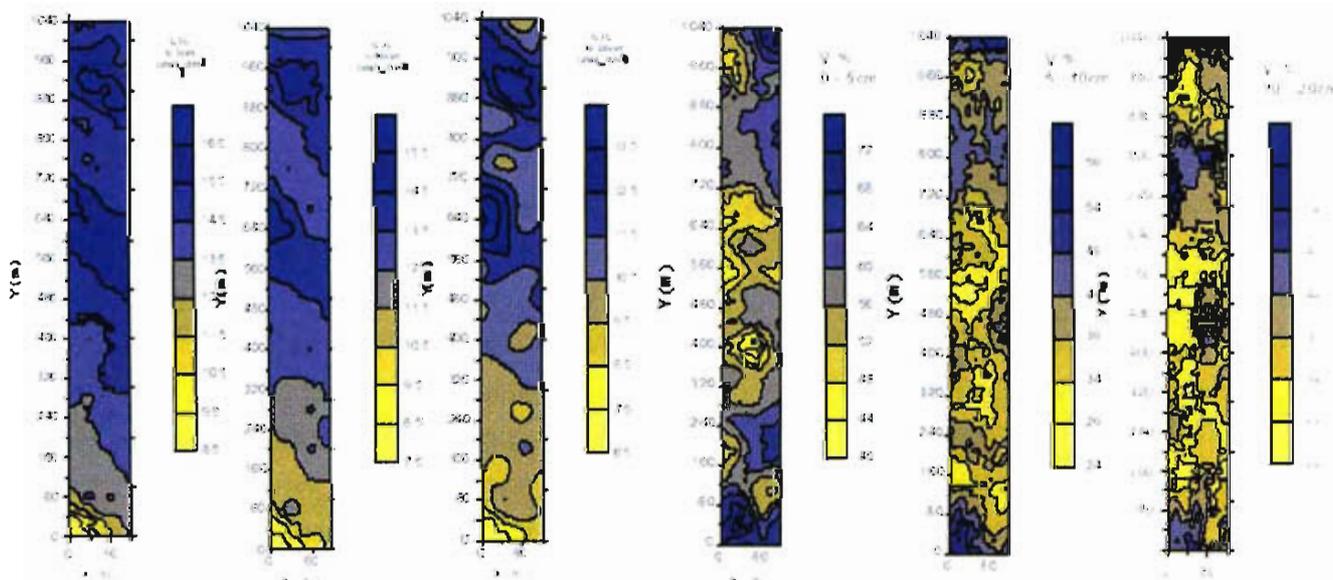


Figura 2. Mapas *krigados* de distribuição espacial da capacidade de troca catiônica – CTC e da saturação por bases (V%) nas 3 profundidades amostradas no solo cultivado com soja em sistema de plantio direto na região de Campos Gerais, PR.

Mapas das recomendações de adubação e calagem

A partir da malha de pontos amostrados, procurou-se estabelecer informações para serem utilizadas no manejo da cultura no campo. Desse modo, o mapa com as doses de fósforo (P_2O_5), potássio (K_2O) e calcário para aplicação em taxas variáveis é apresentado na Figura 3. 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 4,5 t 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 60 $kg\ ha^{-1}$ de P_2O_5 , e na outra 80 $kg\ ha^{-1}$ de P_2O_5 . 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 20 cm de profundidade, onde seria aplicado 60 $kg\ K_2O\ ha^{-1}$. Essa ausência de correlação entre a disponibilidade de K no solo com as doses espacializadas desse mesmo nutriente pode ser explicada pelo fato de os teores de K^+ na maioria da área estar acima do nível considerado crítico para a soja, ou seja, serem superiores a 80 $mg\ dm^{-3}$ de K^+ , principalmente se considerar a camada de solo de 0-5 cm.

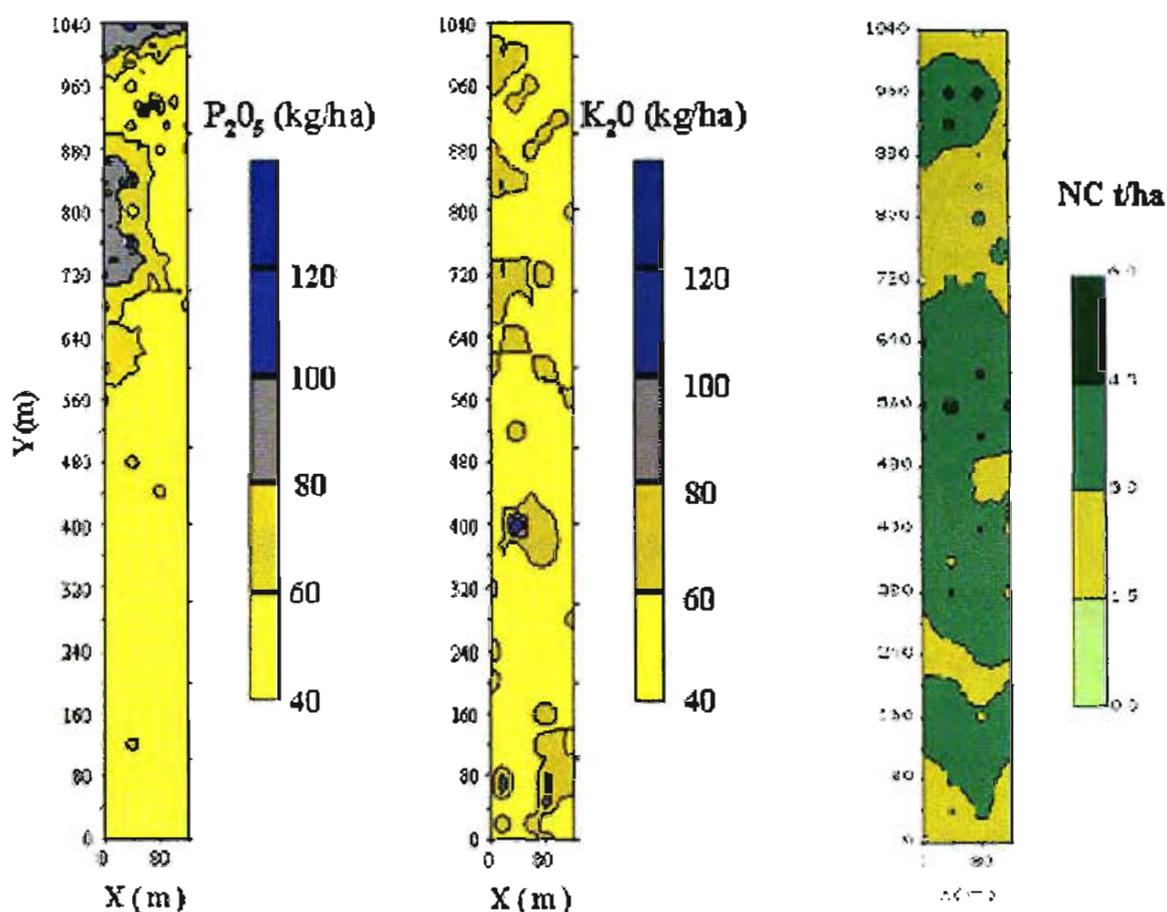


Figura 3. Mapa krigado de distribuição espacial da necessidade de adubação de P_2O_5 , K_2O e calagem para a soja em sistema de plantio direto na região de Campos Gerais, PR: Fonte: Silva et al. (2001) e Machado et al. (2002).

Estabelecimento de zonas de manejo da fertilidade do solo

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 pode ser diferente 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 produtividade (ver detalhes no capítulo 4), amostragem em grade de solo e, se possível, de planta e conhecimento do produtor. Fleming et al. (2000) correlacionaram parâmetros de solo com produção utilizando as zonas de manejo.

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 1:2000 ou, no máximo, 1:5000) e propriedades hidrológicas;
- Característica quantitativa dinâmica: mapa de produtividade, 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.

Baseado no conceito de zonas de manejo, ou seja, agrupamento de áreas com conjuntos de fatores limitantes, Ortiz Valencia et al. (2001) estabeleceram na área em estudo, zonas com teores de argila homogêneos, usando a análise de conglomerados *k-means*. A Figura 4 mostra os mapas de produtividade, 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 produtividade pode ser dividido em duas zonas na altura de 560 m (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 4) 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.

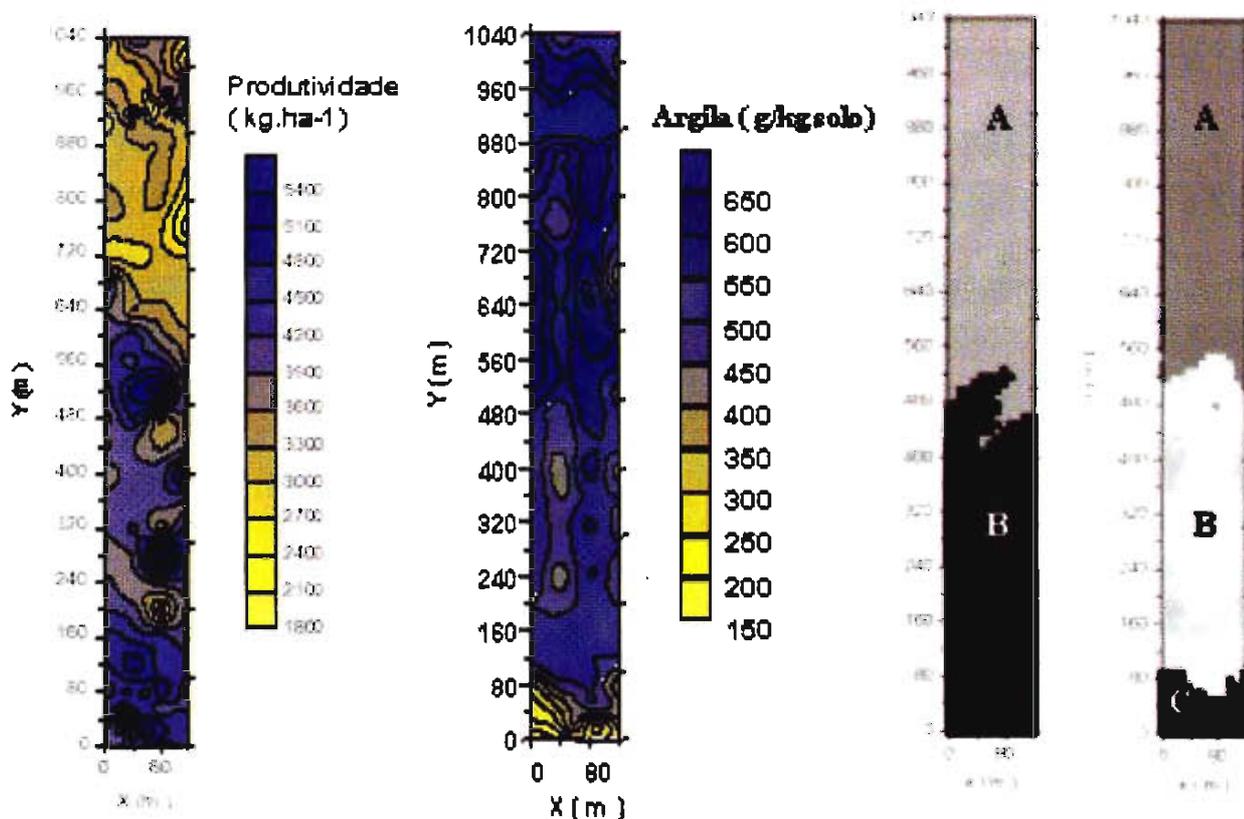


Figura 4. Mapas krigados de produtividade ($t\ ha^{-1}$), distribuição espacial de argila ($g\ kg^{-1}\ solo$) e separação da área em zonas de manejo pela análise de conglomerados do teor de argila do solo (A e B ou A, B e C). Fonte: adaptado de Ortiz Valencia et al. (2001).

Conclusões

- A amostragem de solo e planta por grade em combinação com o uso de mapa de produtividade possibilitaram o estabelecimento de zonas de manejo da fertilidade do solo e a definição com maior precisão de doses de calcário e fertilizantes para a soja sob SPD.
- A amostragem georeferenciada de solo e o uso de técnicas de geoestatística possibilitaram determinar com maior precisão a densidade de amostras a serem feitas por área no sentido de representar com maior acurácia o estado nutricional da soja e a variabilidade de atributos de fertilidade do solo.

- Os benefícios da correção da acidez do solo para a soja podem ser maiores se se considerar no cálculo da necessidade de calagem a variabilidade dos atributos de acidez do solo.
- Apesar da laboriosidade do procedimento (amostragem por grade) e prováveis custos elevados para análises laboratoriais de solo, os resultados indicam que a avaliação detalhada de atributos de solo e planta possibilitam melhorar o manejo da fertilidade do solo em lavoura de soja, sendo uma demanda recorrente de pesquisa o uso de técnicas e equipamentos que permitam em tempo real monitorar as variáveis listadas em tempo real, como é o caso do uso de sensores (ex. sensor móvel para condutividade elétrica do solo)

Referências Bibliográficas

ALBUQUERQUE, J. A.; REINERT, D. J.; FIORIN, J. E. Variabilidade de solo e planta em Podzólico Vermelho-Amarelo. *Revista Brasileira de Ciência de Solo*, Viçosa, v. 20. n. 1, p. 151-157, 1996.

CHITOLINA, J. C. Contribuição de alguns fatores nos resultados da análise química de terra e seus efeitos nas recomendações de adubação e calagem. Piracicaba: ESALQ, 1982. 200 p. Tese de Doutorado.

CHITOLINA, J. C.; PRATA, F.; SILVA, F. C. da; MURAOKA, T.; VITTI, A. C. Amostragem, acondicionamento e preparo de amostras de solo para análise de fertilidade. In: SILVA, F.C. da, (Org.). *Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes*. Brasília, DF: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia; Rio de Janeiro: Embrapa Solos; Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 1999. p.13-48

DOBERMANN, A.; GEORGE, T. Field-scale soil fertility variability in acid tropical soils. In: *WORLD CONGRESS OF SOIL SCIENCE*, 15., 1994, Acapulco. Transactions... Mexico, DF: International Society of Soil Science: Mexican Society of Soil Science, 1994. v. 5, p.610-627.

DOERGE, T. A. Management zones concepts: site-specific management guidelines. *Potash & Phosphate Institute*, Norcross, n.2, p.1-4, 2000.

FLEMING, K. L.; WESTFALL, D. G.; BAUSCH, W. C. Evaluating management zone technology and grid soil sampling for variable rate nitrogen application. In: *INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE*, 5., 2000, Bloomington. Proceedings... Madison: ASA: CSSA: SSSA, 2000. CD-ROM

HIKISHIMA, M.; PRATA, F.; SANTOS FILHO, A.; MOTTA, A. C. V. Avaliação da fertilidade do solo em plantio direto, convencional e reflorestamento de um Latossolo. In: *EVENTO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA*, 4., 1996, Curitiba. Anais... Curitiba: UFPR, 1996. p.196

JOHNSTON, A. E.; BARRACLOUGH, P. B.; POULTON, P. R.; DAWSON, C. J. Assessment of some spatially variable soil factors limiting crop yields. York, UK: International Fertilizer Society, 1998. 48 p. (IFS. Proceedings, 419).

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: UFV, 2000. p.147-180.

MACHADO, P. L. O. A.; BERNARDI, A. C. C.; SILVA, C. A.; ORTIZ VALENCIA, I. L.; BETTINI, C.; TOMÉ JUNIOR, J. B. Variability of fertility parameters of a typic hapludox and estimation of liming and fertilizer requirements for soybean. In: CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 6., Minneapolis, 2002. Proceedings... Madison: ASA: CSSA: SSSA, 2002. p.263-274.

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

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.

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.

OLIVEIRA, J. J.; CHAVES, L. H. G.; QUEIROZ, J. E.; LUNA, J. G. Variabilidade espacial de propriedades químicas em um solo salino-sódico. Revista Brasileira de Ciência de Solo, Viçosa, v. 23, n.4, p.783-789, 1999.

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

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

SARAIVA, A. M.; CUGNASCA, C. E.; HIRAKAWA, A. R. Aplicação em taxa variável de fertilizantes e sementes. 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: UFV, 2000. p. 109-145.

SARAIVA, O. F. Amostragem do solo para avaliação de sua fertilidade. Coronel Pacheco: Embrapa - CNPGL, 1989. 12 p. (Embrapa - CNPGL. Documentos, 38).

SCHLINDWEIN, J. A.; ANGHINONI, I. Variabilidade espacial de atributos de fertilidade e amostragem de solo no sistema plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência de Solo*, Viçosa, v. 24, n.1, p. 85-91, 2000.

SILVA, C. A., BERNARDI, A. C. C., ORTIZ VALENCIA, L. I.; 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: ESALQ-USP, 2001. CD-ROM.

SILVA, C. A.; MACHADO, P. L. O. de A.; BERNARDI, A. C. de C.; CARMO, C. A. F. de S. do; ORTIZ VALENCIA, L. I.; ANDRADE, A. G. de; MEIRELLES, 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. 8 p. (Embrapa Solos. Comunicado Técnico, 10).

SILVA, F. C. da; EIRA, P. A.; BARRETO, W. de 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).

SILVA, V. R.; REICHERT, J. M.; STORCK, L.; FEIJÓ, S. Variabilidade espacial das características químicas do solo e produtividade de milho em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico. *Revista Brasileira de Ciência de Solo*, Viçosa, v. 27, n. 6, p. 1013-1020, 2003.

SOUZA, L. S.; COGO, N. P.; VIEIRA, S. R. Variabilidade de fósforo, potássio e matéria orgânica no solo em relação a sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Ciência de Solo*, v. 22, n.1, p.77-86, 1998.

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. 1, p. 6-11, 2000.

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

WHELAN, B. M.; McBRATNEY, A. B., BOYDELL, B. C. The impact of precision agriculture. 2002. Disponível em: <<http://www.usyd.edu.au/su/agric/acpa/pag.htm>>. Acesso em: 18 fev. 2003.

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



Avaliação Espacializada do Estado Nutricional da Soja

Alberto C. de Campos Bernardi

Ciríaca A. F. de Santana do Carmo

Pedro Luiz O. de A. Machado

Carlos Alberto Silva

Luiz I. Ortiz Valencia

Margareth S. P. Meirelles

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. 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.

Avaliação do Estado Nutricional

O conjunto de técnicas denominadas de “agricultura de precisão” tem sido utilizadas no manejo dos sistemas agrícolas. Este conjunto se baseia no detalhamento da informação, obtida através da integração de variáveis georreferenciadas de solo, planta e clima (Stewart & McBratney, 2000; Plant, 2001). 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 (Ver Capítulo 6, 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 Prevoit & 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).

Faixas de suficiência

Dentre as ferramentas disponíveis para a avaliação do estado nutricional das culturas, as faixas de suficiência têm sido amplamente utilizadas. Este método de interpretação originou-se do nível crítico (Baldock & Schulte, 1996), o qual foi definido por Prevoit & 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, 1990). 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).

Os resultados da Tabela 1 mostram a variação dos teores de nutrientes nas folhas de soja em função de 3 faixas de produtividade.

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 Estatísticos	Prod	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	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	16,9
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.

Na Tabela 2 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: $K > Cu > Zn > Mg > S > P$.

DRIS (Sistema Integrado de Diagnose e Recomendação)

Outro método de avaliação do estado nutricional é o DRIS (Sistema Integrado de Diagnose e Recomendação), desenvolvido a partir do método da Diagnose Fisiológica (Beaufils, 1957). Este tinha, por finalidade, 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, a 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 pré-estabelecida, 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). Letsch & 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 & Schulte, 1996).

Tabela 2. Porcentagem de ocorrência de teores de nutrientes nas faixas de suficiência em função das produtividades* nos pontos de amostragem.

Interpretação	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	% 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.

Tabela 3. Parâmetros estatísticos dos valores dos índices DRIS dos teores de nutrientes nas folhas de soja, cultivada sob plantio direto em Carambei, 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	-3,58
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.

Na Tabela 3 são apresentados os Índices DRIS dos teores de nutrientes nas folhas de soja calculados com base na metodologia proposta por Jones (1981). Os Índices DRIS são apresentados em função de 3 faixas de produtividade estabelecidas.

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-se os três níveis de produtividade, encontram-se na Tabela 4.

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: $K > P > Ca > N = Mg > Cu$.

Dependência Espacial dos Parâmetros da Avaliação do Estado Nutricional

Para avaliar a dependência espacial dos atributos de solo e de planta, é necessário desenvolver estratégias eficientes de amostragem baseadas na geoestatística. A geoestatística é a ferramenta estatística utilizada para estudar a variabilidade espacial, possibilitando a interpretação dos resultados com base na estrutura da variabilidade natural e a dependência espacial dos parâmetros avaliados, sempre dentro do intervalo de amostragem (Ver Capítulo 2). McBratney & Pringle (1999) demonstraram 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.

A ferramenta para avaliar a dependência espacial é o semivariograma. A construção do semivariograma foi discutida por Clark (1979), Isaaks & Srivastava (1989), Burrough & McDonnell

Tabela 4. Porcentagem de ocorrência dos índices DRIS em função das produtividades* nos pontos de amostragem.

Índice DRIS	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	% de ocorrência										
Produtividade alta (> 4436 kg ha⁻¹)											
< -0,3	4,7	8,4	4,7	3,7	2,8	5,6	3,7	2,8	1,9	0,9	4,7
-0,3 a 0,3	5,6	1,9	1,9	5,6	4,7	2,8	3,7	5,6	6,5	3,7	4,7
> 0,3	0,9	0,9	0,9	1,9	3,7	2,8	3,7	2,8	2,8	6,5	1,9
Produtividade média (de 3142 a 4436 kg ha⁻¹)											
< -0,3	29,0	34,6	36,4	31,8	29,0	35,5	20,6	25,2	16,8	23,4	30,8
-0,3 a 0,3	23,4	14,0	8,4	26,2	27,1	11,2	19,6	25,2	30,8	16,8	11,2
> 0,3	20,6	24,3	28,0	15,0	16,8	26,2	32,7	22,4	25,2	32,7	30,8
Produtividade baixa (< 3142 kg ha⁻¹)											
< -0,3	8,4	12,1	13,1	10,3	8,4	2,8	1,9	7,5	0,9	3,7	5,6
-0,3 a 0,3	3,7	0,0	0,0	3,7	4,7	5,6	3,7	5,6	5,6	5,6	1,9
> 0,3	3,7	3,7	2,8	1,9	2,8	7,5	10,3	2,8	9,3	6,5	8,4

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

(1998), e Lamparelli *et al.* (2001) sendo que os parâmetros básicos que devem ser estabelecidos são alcance, patamar, efeito pepita e o modelo da equação (Ver Capítulo2).

Assim, de acordo com estes autores, o alcance (a) ou *range* é a distância em que a variância dos dados se torna constante e aleatória com as distâncias entre as amostras, a partir daí não há mais dependência espacial. Patamar (C_0+C_1) ou *sill* é o valor máximo da semivariância em que a curva estabiliza sobre um valor constante. O efeito pepita (C_0) ou *nugget* é a porção da variância aleatória e não explicada pela amostragem, e representa o componente da variação ao acaso. O quarto parâmetro é o modelo de equação que foi ajustado aos dados no semivariograma.

Semivariogramas

A partir dos resultados das amostragens de folhas realizados na área de estudo, 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 (Clark, 1979; Isaaks & Srivastava, 1989; Burrough & McDonnell, 1998; e Lamparelli *et al.*, 2001).

Os semivariogramas para todos os teores de nutrientes nas folhas e os índices DRIS foram ajustados, e os resultados da análise espacial e os parâmetros dos modelos ajustados estão nas Tabelas 5 e 6.

Os semivariogramas foram obtidos através da modelagem dos teores foliares de nutrientes, considerando-se 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 5). O patamar é atingido quando a variância dos dados se torna constante com as distâncias entre as amostras e esse parâmetro, permitindo determinar-se o ponto em que há dependência espacial e a partir daí observa-se independência. Este ponto, portanto é o alcance, ou seja o limite da dependência espacial da grandeza medida.

Para o estabelecimento dos semivariogramas dos índices DRIS foram modelados apenas os índices dos nutrientes N, P, K, S e Zn, uma vez que estes foram indicados com provável desbalanceamento. O modelo esférico foi ajustado para todas as variáveis com exceção do índice DRIS para P, ao qual ajustou-se o modelo exponencial.

Importante destacar que a escolha dos modelos do semivariograma deve ser criteriosa, para se evitar a propagação indesejável de erros posteriores, que podem ocorrer quando o modelo da estrutura de variabilidade não é bem definido (Lamparelli *et al.*, 2001).

Tabela 5. Modelos de semivariogramas e coeficientes para os nutrientes nas folhas da soja em Carambei, PR.

Nutriente	Modelo*	Alcance (m)		Efeito pepita C_0	Contribuição C	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).

Tabela 6: 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).

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) pois, utilizando-se esta técnica foi possível melhorar os ajustes.

O semivariograma é um gráfico que relaciona a semivariância de uma variável qualquer com uma distância (*h*; Ver capítulo 2). Nas figuras 1, 2 e 3 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 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.

Estabelecimento da grade de amostragem

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 0,5 do valor de alcance do atributo sob análise.

Na Tabela 5 também são apresentados os valores relativos ao alcance dos semivariogramas

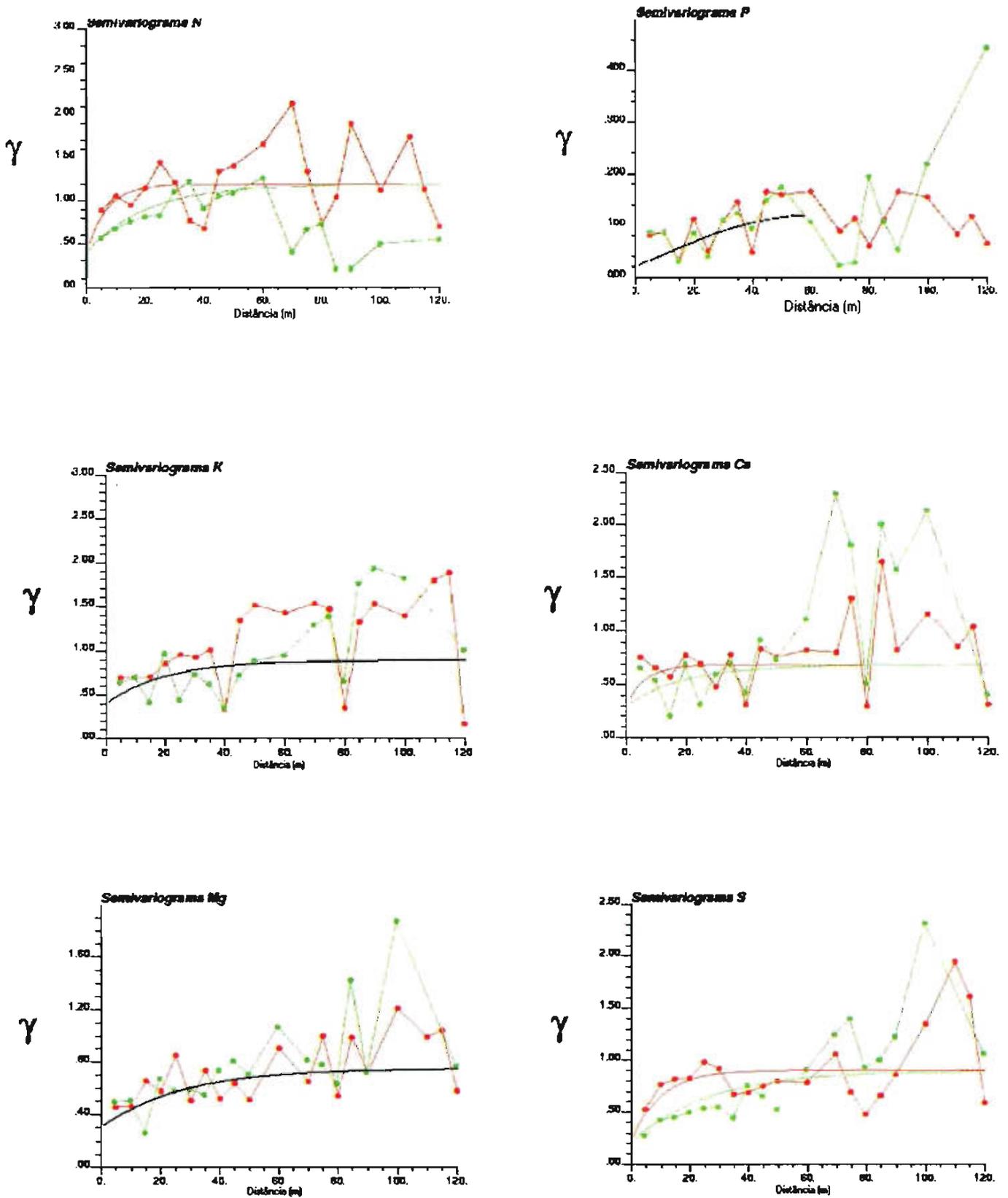


Figura 1: Semivariogramas da distribuição espacial dos teores dos macronutrientes nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre nas folhas de soja cultivada sob plantio direto na região de Campos Gerais, PR.

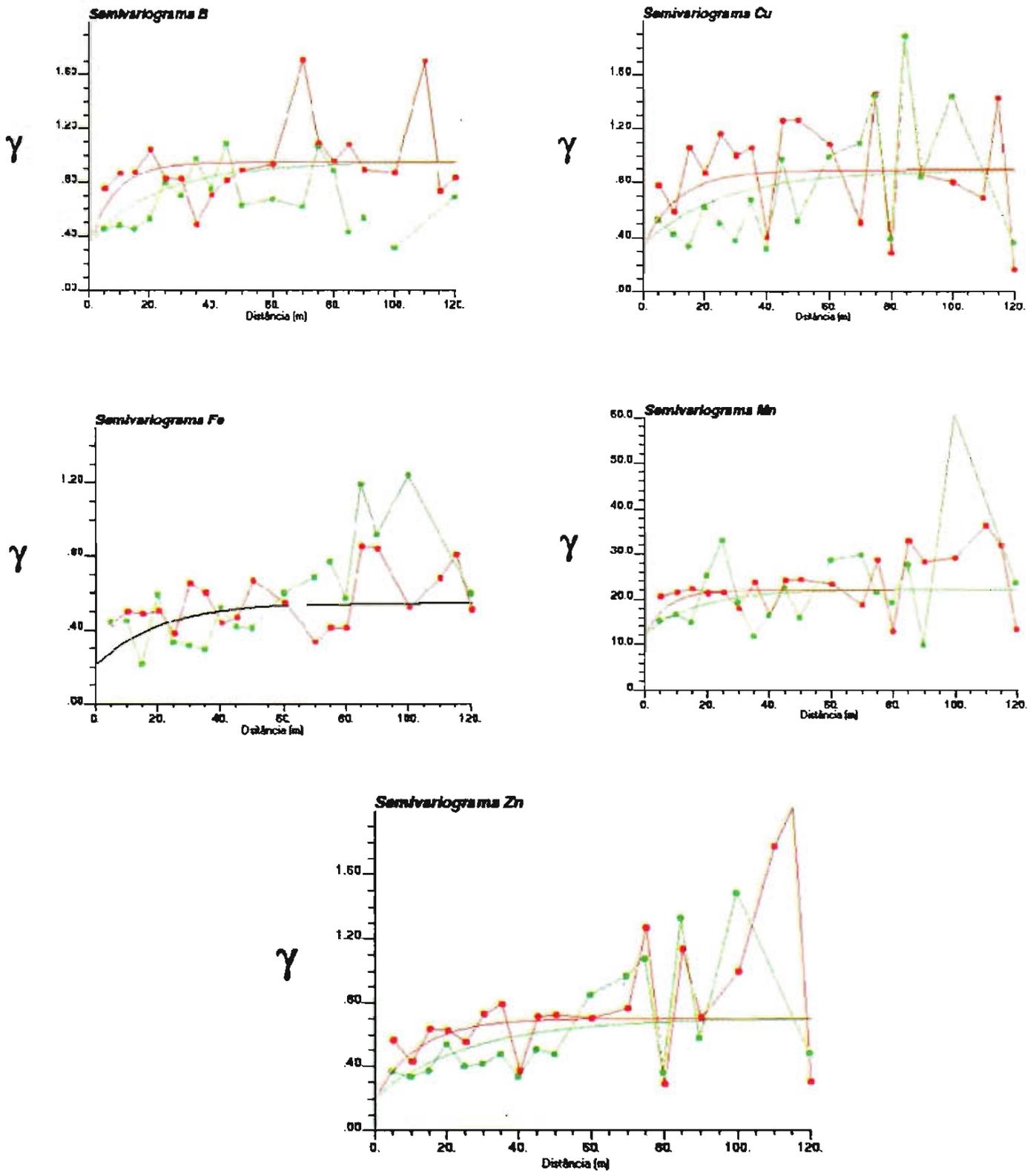


Figura 2: Semivariogramas da distribuição espacial dos teores dos micronutrientes boro, cobre, ferro, manganês e zinco nas folhas de soja cultivada sob plantio direto na região de Campos Gerais, PR.

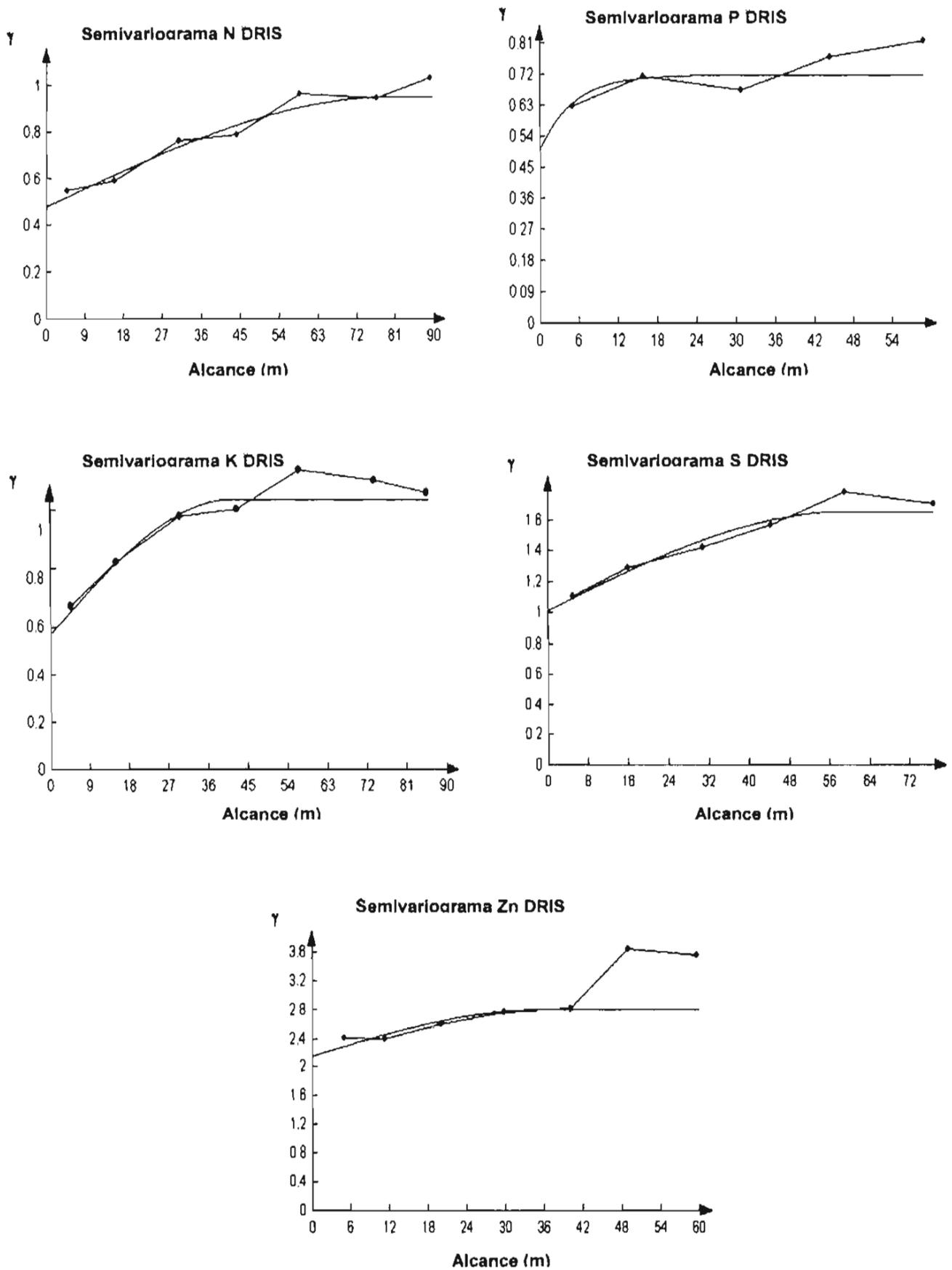


Figura 3: Semivariogramas da distribuição espacial dos Índices DRIS de nitrogênio, fósforo, potássio, enxofre e zinco.

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), os valores para a célula de amostragem seriam de 34 X 22 m. Os resultados sugerem a coleta de 14 amostras por hectare e são muito próximos aos valores encontrados por Silva *et al.* (2002).

Krigagem

Após a seleção do semivariograma da variável em estudo e havendo dependência espacial, podem-se interpolar valores em qualquer posição na área estudada, sem tendência e com variância mínima (Ver capítulo 2).

Nas Figura 4, 5 e 6 são mostrados os mapas das estimativas *krigadas* para os teores de nutrientes nas folhas de soja e seus índices DRIS. A *krigagem* é um método de estimação 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).

Considerações Finais

Os resultados da avaliação do estado nutricional mostraram 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.

A metodologia proposta para o estabelecimento da grade de amostragem acarreta na coleta de elevado número de amostras por área. Isso pode inviabilizar a adoção da agricultura de precisão, por parte dos agricultores e técnicos, numa propriedade rural, considerando-se não só o trabalho com a coleta de amostras mas, principalmente, o custo da análise em laboratório.

Estes resultados indicam 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

Figura 4. 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.

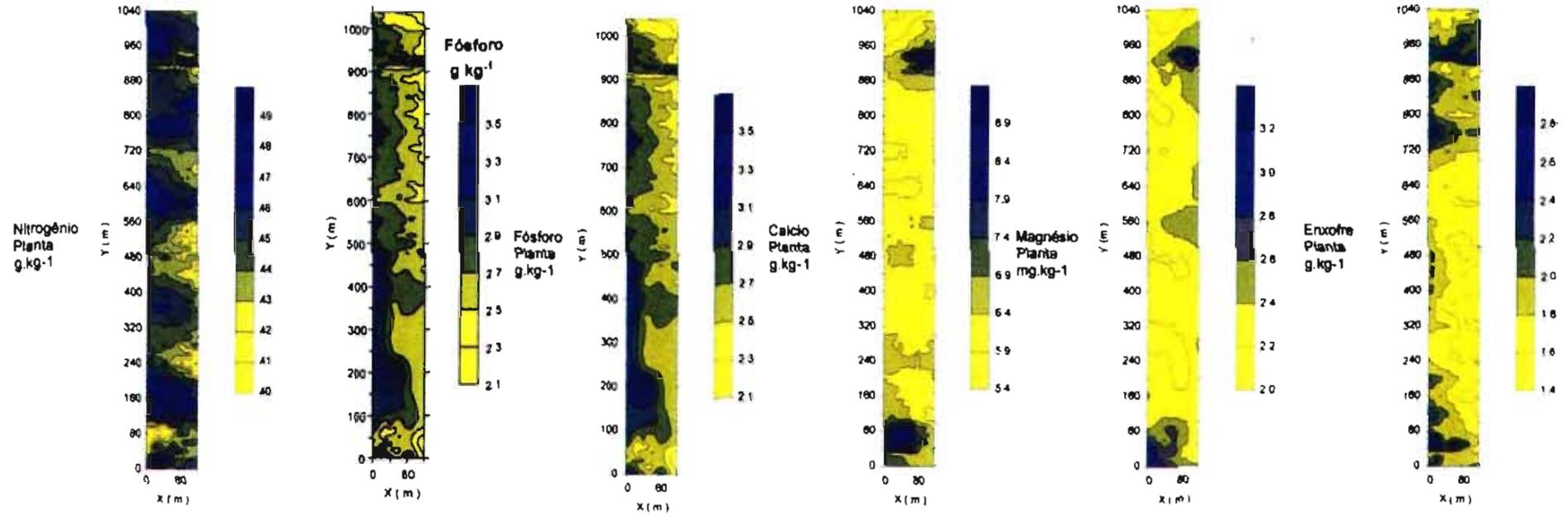


Figura 5. Mapas krigados de distribuição espacial dos teores dos micronutrientes boro, cobre, ferro, manganês e zinco nas folhas de soja cultivada sob plantio direto na região de Campos Gerais, PR.

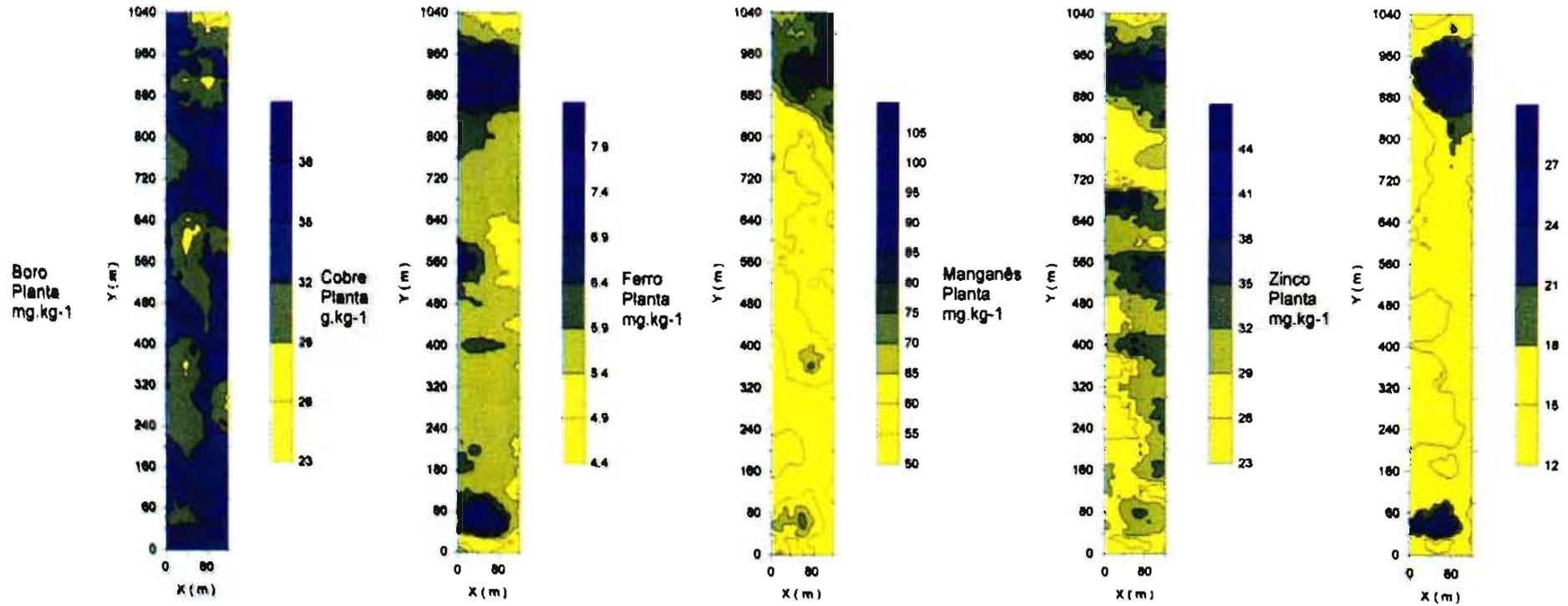
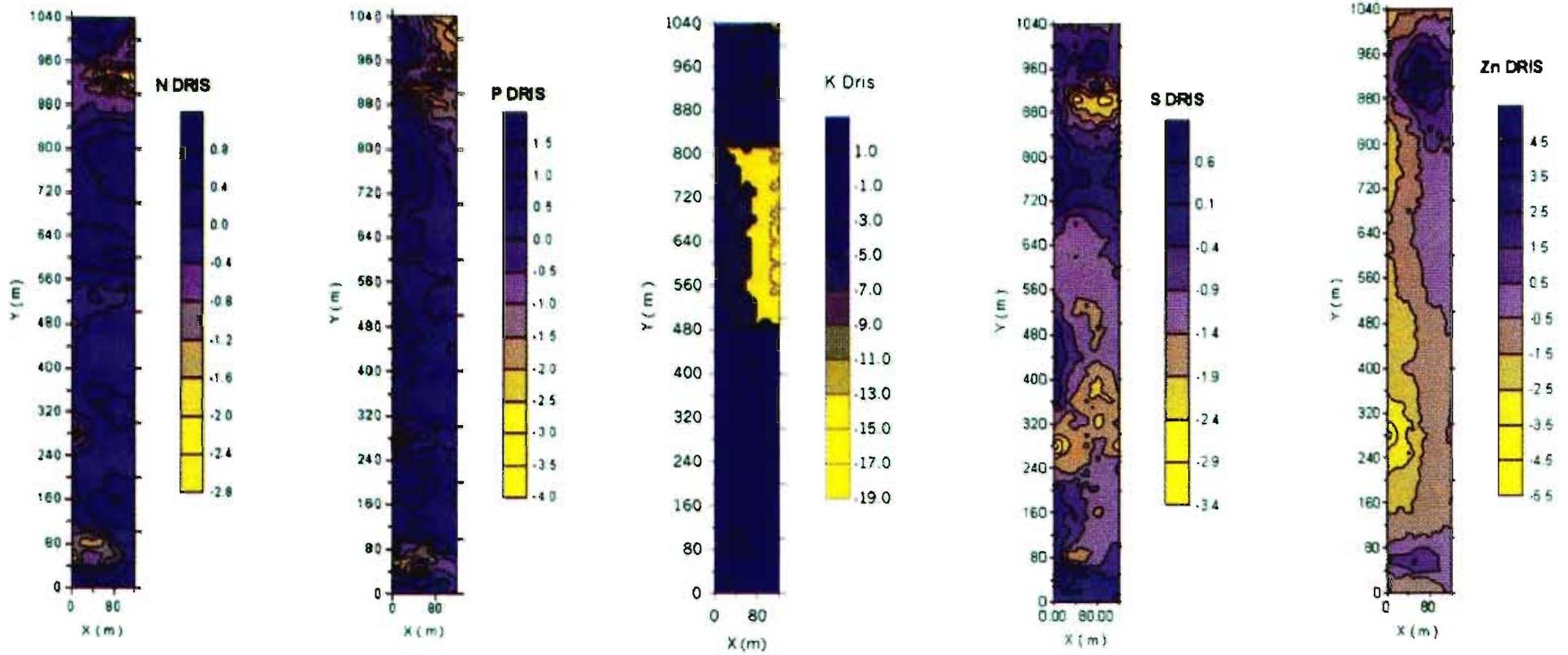


Figura 6. Mapas krigados de distribuição espacial dos índices DRIS para nitrogênio, fósforo, potássio, enxofre e zinco.



histórico de desempenho da cultura na gleba, podem auxiliar no estabelecimento de zonas de manejo.

Além disto, como foi demonstrado neste trabalho e no capítulo 6, o diagnóstico do estado nutricional da cultura combinado com a avaliação da fertilidade do solo, após a identificação do nutriente limitante da produção, poderia se fazer a análise do solo especificamente para este nutriente.

Conclusões

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

- 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 metros.
- 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 limitante à produção de soja.

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. de C.; CARMO, C. A. F. de S.; MACHADO, P. L. O. de A.; SILVA, C. A.; ORTIZ VALENCIA, L. I.; 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). Disponível em: <http://www.cnps.embrapa.br/solosbr/pdfs/comtec17_2002_variab_espacial_ap.pdf>. Acesso em: 12 ago 2004

BERNARDI, A.C. de C.; CARMO, C. A. F. de S.; MACHADO, P.L.O. de A.; SILVA, C. A.; ORTIZ VALENCIA, L.I.; MEIRELLES, M. S.; MOLIN, J. P. Avaliação do estado nutricional de uma cultura de soja sob plantio direto: utilização técnicas de agricultura de precisão na região de Campos Gerais, PR. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2003. 26 p. (Embrapa Solos. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento; n. 23).

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

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

DECHEN, A. R.; BATAGLIA, O. C.; SANTOS, W. R. Conceitos fundamentais da interpretação da análise de plantas. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 21., 1994. Petrolina. Anais do simpósio: fertilizantes: insumo básico para agricultura e combate à fome. Petrolina: EMBRAPA-CPATSA: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1995. p. 87-113.

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

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

JONES, C. A. Proposed modifications of the Diagnosis and Recommendation Integrated System (DRIS) for interpreting plant analysis Communications in 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 indices. Communications in Soil Science and Plant Analysis, v. 14, p.811-815, 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, Dordrecht, 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. p. 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., 1979, Bridgeton. Proceedings.... Bridgeton: [s.ed.], 1979. p. 1-45.

PLANT, R. E. Site-specific management: the application of information technology to crop production. Computers and Electronics in Agriculture, Amsterdam, v. 30, p. 9-29, 2001.

PREVOT, P.; OLLAGNIER, M. Methode d'utilisation du diagnostic foliaire: 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. de A.; BERNARDI, A. C. de C.; CARMO, C. A. F. de S. do;

ORTIZ VALENCIA, L. I.; ANDRADE, A. G. de; MEIRELLES, 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. da. (Org.). Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. Brasília, DF: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia; Rio de Janeiro: Embrapa Solos; Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 1999. 370 p.

STEWART, C. M.; MCBRATNEY, A. B. Development of a methodology for the variable-rate application of fertilizer in irrigated cotton fields. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 5., 2000, Bloomington. Proceedings... Madison: ASA: CSSA: SSSA, 2000. CD-ROM.

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, 1985. 754 p.

ULRICH, A.; HILLS, F. J. Principles and practices of plant analysis. In: WESTERMAN, R.L.; BAIRD, J.V.; CHRISTENSEN, N.W.; FIXEN, P.E.; WHITNEY, D.A. Soil testing and plant analysis. 3.ed. Wisconsin: Soil Science Society of America, 1990. 784p. (SSSA. Book Series n.3)

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.



Aplicação de Fertilizantes a Taxas Variáveis

Alberto C. de Campos Bernardi

Leandro M. Gimenez

Pedro Luiz O. de A. Machado

Carlos Alberto Silva

Resumo

A aplicação de fertilizantes a taxas variáveis tem potencial para otimizar o uso de fertilizantes e minimizar os impactos negativos da atividade agrícola no ambiente. Apesar desta prática já estar sendo utilizada comercialmente pelos produtores, ainda faltam estudos comprovando os seus efeitos positivos. De modo geral, os benefícios são observados em culturas de maior valor econômico em função dos custos de amostragem do solo para elaboração dos mapas de recomendação. Neste capítulo são apresentados os resultados da aplicação de taxas variáveis de fertilizante potássico no rendimento da cultura da soja com base em mapas de rendimento.

Introdução

Durante a década de 90, com o desenvolvimento e popularização das técnicas de GPS (do inglês *Global Positioning System* ou sistema de posicionamento global), SIG (Sistema de Informação Geográfica) e monitoramento da produtividade das culturas, foi possível quantificar a variabilidade espacial dos fatores de produção e, portanto, da produtividade das culturas. A etapa seguinte foi interferir ou manejar estas diferenças que estavam sendo quantificadas para a aplicação localizada dos insumos agrícolas, de acordo com a necessidade específica local (Searcy, 1995; Balastreire *et al.*, 1997).

O uso dessa abordagem possibilitou ao produtor manejar ou variar as taxas de aplicação de fertilizantes num talhão, de acordo com as diferenças de produtividade da cultura ou dos parâmetros de fertilidade ao longo das paisagens. Esta prática ficou conhecida como taxa variável de aplicação de fertilizantes ou, em inglês, VRF - *variable-rate fertilization* (Larson & Robert, 1991). Segundo Manzatto *et al.* (1999), esta é a principal vantagem do uso da Agricultura de Precisão, ou seja a possibilidade de aplicar os insumos no local correto, no momento adequado, nas quantidades necessárias à produção agrícola, para áreas cada vez menores e mais homogêneas, tanto quanto a tecnologia e os custos envolvidos o permitam.

Aspectos ambientais da aplicação de fertilizantes a taxas variáveis

Diferentemente da aplicação uniforme de fertilizantes e corretivos, que podem resultar em áreas com aplicações abaixo ou acima da dose necessária, a aplicação com taxas variáveis possibilita a adequada produtividade e eficiência do uso de nutrientes com simultânea redução do potencial para poluição ambiental (Robert, 1993; Mulla *et al.*, 1992; Bongiovanni & Lowenberg-Deboer, 2004; Mulla & Schepers, 1997; Wollenhaupt *et al.*, 1994).

Larson *et al.* (1997) avaliaram o potencial dos benefícios ambientais da agricultura de precisão na prática da adubação. Observaram que há poucas informações de campo disponíveis e demonstraram que em uma área com variação textural de média a argilosa, as médias de N lixiviado foram de 29 kg ha⁻¹ utilizando as técnicas de agricultura de precisão, enquanto que utilizando a aplicação convencional observou-se 60 kg ha⁻¹ de N lixiviado.

Bongiovanni & Lowenberg-Deboer (2004), em uma extensa revisão de literatura, confirmaram que as técnicas de agricultura de precisão podem contribuir para manutenção da sustentabilidade da agricultura através da aplicação de fertilizantes apenas nos locais onde e quando há necessidade. Os benefícios da agricultura de precisão vem desta aplicação em pontos exatos e reduzindo as perdas por aplicações excessivas de fertilizantes. A principal deficiência detectada pelos autores foi o escasso número de trabalhos que realmente mediram o impacto ambiental ou utilizaram sensores, sendo que a maioria estimou os benefícios ambientais indiretamente, ou seja medindo a redução do uso de insumos.

Aplicação de fertilizantes a taxas variáveis e a produção de grãos

Aumentos da produção ou reduções no uso de fertilizantes associados à prática das taxas variáveis de aplicação de nitrogênio, fósforo, potássio foram relatadas para sorgo irrigado (Yang *et al.*, 1999).

Em trigo e aveia as taxas variáveis de P, K e N não resultaram em aumentos significativos de produtividade (Carr *et al.*, 1991) ou em diminuição dos custos (Wibawa *et al.*, 1993) quando comparadas às taxas uniformes de aplicação.

Mallarino *et al.* (1999) observaram que as taxas variáveis de P algumas vezes auxiliaram a reduzir o total de P aplicado, mas raramente resultaram em maiores produtividades de milho ou soja, mesmo em áreas com baixos teores de P no solo. Lowenberg-Deboer & Aghib (1999) observaram que as taxas variáveis de P e K auxiliaram para melhorar a distribuição dos fertilizantes no campo, porém não proporcionaram balanço econômico positivo no trigo, milho e soja.

Os resultados conflitantes com aplicação a taxas variáveis observados nos resultados descritos na literatura podem ser devido a fatores como a discrepância entre as recomendações regionais de fertilizantes e as necessidades para esta nova abordagem, ausência de medição de outros

fatores limitantes à produtividade como umidade do solo e estresse hídrico ou estratégias de amostragem inadequadas (Carr *et al.*, 1991; Mallarino *et al.*, 1999; Pierce & Warncke, 2000).

Aspectos econômicos da aplicação de fertilizantes a taxas variáveis

Os primeiros estudos com a aplicação de taxas variáveis de fertilizantes mostraram o potencial para melhorar a lucratividade, especialmente quando utilizados em áreas com contraste na textura e baixos teores de P e K no solo (Wollenhaupt & Buchholz, 1993). Com a quantificação da variabilidade espacial e temporal dos teores de N no solo, passou-se a considerar esta técnica como uma importante ferramenta para melhorar o manejo do N e diminuir os impactos ambientais do seu uso (Cahn *et al.*, 1994).

O desenvolvimento do mapa de recomendações de adubação e correção provavelmente seria a etapa mais importante para a aplicação de corretivos e fertilizantes a taxas variáveis (Sawyer, 1994). E é também a ferramenta mais utilizada comercialmente para a aplicação da técnica das taxas variáveis de aplicação, especialmente para fertilizantes fosfatados e potássicos. Entretanto, as malhas de amostragem para gerarem informações para os mapas de aplicação de N são menos comuns comercialmente, em função do custo requerido para as amostragens que são mais freqüentes.

Com o uso do conhecimento dos produtores é possível também dividir e identificar diferentes unidades de manejo. Flemming *et al.* (2000) compararam as unidades de manejo estabelecidas pelos produtores com mapas baseados nos tipos de solos e topografia. Concluíram que o critério subjetivo foi eficaz para identificar as diferentes unidades, mas para elaborar os mapas de recomendação para a aplicação das taxas variáveis são necessárias técnicas com maior acurácia.

Avaliando as taxas variáveis de aplicação de fertilizantes, Swinton & Lowenberg-DeBoer (1998), concluíram que esta prática foi economicamente viável para culturas de alto retorno econômico, sendo que o contrário também foi observado, ou seja, não foi viável para culturas de baixo valor. O principal fator para estes resultados econômicos foi o alto custo da amostragem em relação ao lucro proporcionado pela cultura.

Situação atual e perspectivas da aplicação de fertilizantes a taxas variáveis

No início do uso desta técnica, nos EUA os produtores chegaram a utilizar malhas de amostragem coletando uma ou mais amostras por hectare, para a elaboração dos mapas. Os trabalhos de pesquisa têm mostrado algumas limitações técnicas e econômicas desta técnica, uma vez que há a necessidade de manter o número de amostras próximo do número mínimo, porém fornecendo a adequada acurácia (Fleming *et al.*, 2000).

Isso levou à situação observada atualmente, em algumas regiões dos EUA, nas quais a adoção das taxas variáveis de aplicação de fertilizantes tem tido seu ritmo reduzido em função do

custo dos métodos para mapeamento das necessidades de fertilizantes, cuja tecnologia atual é baseada na amostragem intensiva do solo e análise químicas destas amostras (Engelu *et al.*, 1999). A aplicação desta abordagem será útil quando a relação benefício/custo entre amostragem do solo e análises químicas e o preço do produto agrícola forem adequadas.

Aplicação de fertilizante potássico a taxas variáveis na área de estudo

Feltos os diagnósticos (Capítulos 6 e 7), propôs-se uma abordagem que permitisse interferir na área de estudo por meio da aplicação de fertilizantes a taxas variáveis e verificar, pela produtividade da soja, se os procedimentos de diagnóstico e interferência adotados foram satisfatórios.

Metodologia utilizada

A aplicação do fertilizante foi realizada em faixas no sentido longitudinal do talhão (1.000 metros) e seguindo os rastros deixados pelo pulverizador, em 3 doses, havendo ainda uma faixa testemunha, sem fertilizante (Figura 1). A operação foi realizada utilizando-se um distribuidor de fertilizantes com mecanismo distribuidor do tipo pendular em duas passadas com largura útil de 9 metros (Figura 2). Foram utilizadas 4 doses: testemunha, 40, 80 e 120 kg ha⁻¹ de K₂O, aplicadas na forma de cloreto de potássio (KCl) ao longo de todo o talhão com três repetições.

A colheita foi realizada com uma colhedora MF 34, equipada com monitor de colheita e GPS sem correção diferencial. Foram colhidas faixas da largura da plataforma, que receberam o fertilizante de duas passadas consecutivas respeitando-se assim a sobreposição entre passadas do distribuidor (Figura 3). Na colheita foi possível determinar o rendimento para cada faixa como é mostrado na Figura 4.

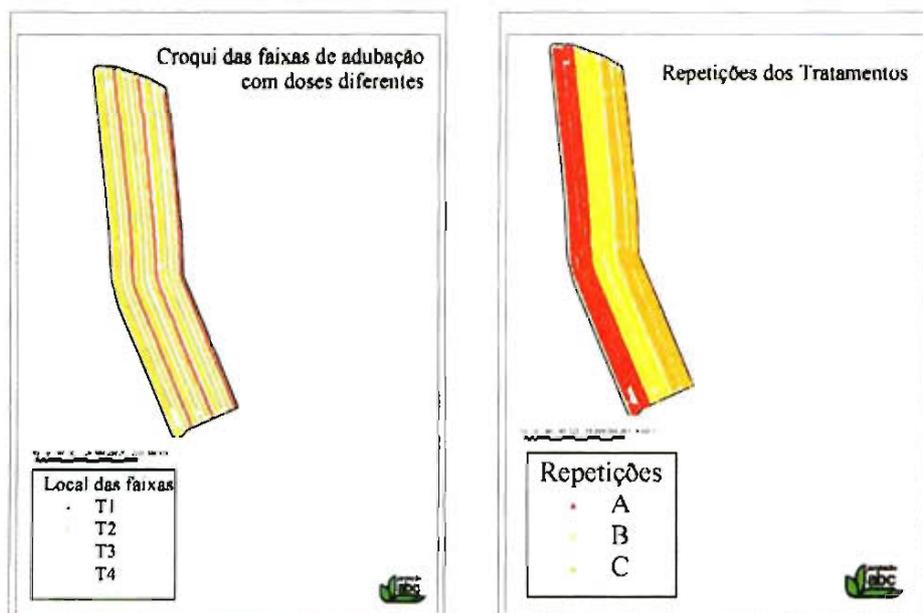


Figura 1. Esquema de locação das faixas com tratamentos e repetições dos tratamentos.



Figura 2. Adubação a lanço com potássio na área em estudo com distribuidor de fertilizantes com mecanismo distribuidor do tipo pendular. Carambel, PR.



Figura 3. Aspecto da área na época da colheita da soja (safra 2002/2003) nas faixas de adubação. Carambel, PR.

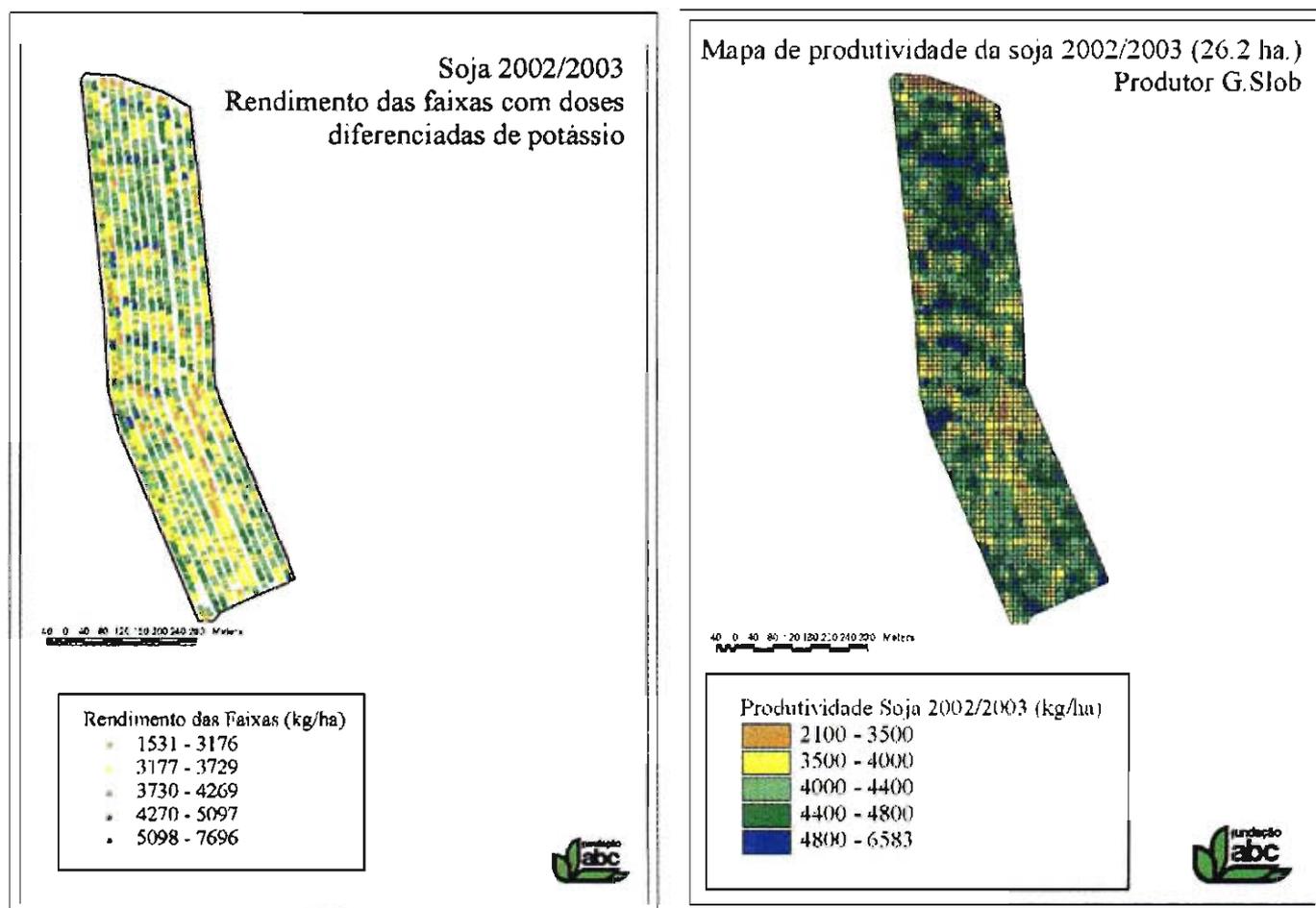


Figura 4. Dados de rendimentos das faixas de soja na safra 2002/2003.

Resultados obtidos com a aplicação de fertilizantes em taxas variáveis

O rendimento médio do talhão para a safra avaliada foi de 3838 kg ha⁻¹. A partir dos dados coletados e armazenados em ambiente SIG (sistema de informações geográficas), selecionou-se os pontos de colheita localizados em cada uma das faixas e tratamentos e, então, realizou-se o cálculo do rendimento. Na tabela 1 são apresentados os dados de rendimento para as faixas. Os resultados mostraram que não houve resposta à aplicação de fertilizante potássico nas doses testadas.

Tabela 1: Rendimento da soja em função das doses de fertilizante potássico utilizadas.

Repetições	Tratamentos (kg ha ⁻¹ de K ₂ O)				Média
	testemunha	40	80	120	
A	3863	3816	3780	3900	3832
B	3739	3907	3856	3857	3873
C	3831	3863	3826	3822	3837
Média	3811	3862	3821	3860	3838

Os resultados de produtividade apresentados na Figura 5, para os níveis de adubação potássica em função da distância ao longo talhão, indicam que há valores de rendimento abaixo da média geral (3.838 kg ha⁻¹) no início do talhão e acima da média na outra extremidade. Esta variação espacial dos resultados é, como observado nos capítulos 5 e 6, devido à diferença textural observada ao longo deste talhão em estudo.

Ebelhar et al. (2000) conduziram um estudo em duas localidades no estado de Illinois, EUA, avaliando as taxas de aplicação variável de fertilizantes nas culturas do milho e soja. As áreas de produção foram divididas em células de 0,18 hectare e em dez destas foram avaliadas as doses de potássio. Foi constatado que com o aumento nas doses de K, houve aumento dos teores do nutriente nas plantas, porém tiveram pequeno impacto sobre a produção de grãos. Concluíram que, outros fatores além dos teores de K no solo deveriam influenciar na resposta ao nutriente Ebelhar et al., 2000).

Do mesmo modo como ocorreu na intervenção feita na área em estudo, a avaliação apenas dos fertilizantes, como sendo o único fator limitante à produção, não tem explicado as variações observadas na produção de grãos (Mulla & Schepers, 1997; Everett & Pierce, 1996; Braum et al., 1998; Solohub et al., 1996). Para avaliar e implementar adequadamente as práticas de agricultura de precisão visando a aplicação de fertilizantes a taxas variáveis, são necessárias mais informações sobre os outros fatores que afetam a produção de grãos.

Uma alternativa para o produtor seria a utilização de uma adubação visando a reposição do nutriente exportado. Desse modo, considerando que 1 tonelada de soja exporta 18,7 kg de K (Bernardi et al., 2002), ou 22,5 kg de K₂O, e adotando-se o rendimento médio do talhão de 3,8 toneladas por ha, então, a adubação recomendada seria de aproximadamente 86 kg ha⁻¹ de K₂O. No entanto, a adubação do produtor nessa safra seria de 80 kg ha⁻¹ de K₂O em toda a área e, portanto, haveria um pequeno déficit entre a exportação e a reposição em termos médios.

Desse modo uma sugestão de aplicação de potássio em taxa variada para este talhão poderia ser realizada a partir do histórico dos mapas de rendimento. Na Figura 6 é apresentada uma possibilidade de adubação potássica ao longo do talhão, respeitando o histórico de rendimento e portanto de exportação de potássio. Considerando os dados de rendimento médios de três anos e a exportação de potássio, deveriam ser aplicados na área estudada 84 kg K₂O ha⁻¹ em média, havendo locais que receberiam de 77 a 91 kg K₂O ha⁻¹.

Considerações finais

Os resultados obtidos são ainda parciais e merecem análise mais aprofundada para chegarmos à novas conclusões. Outro detalhe é a respeito dos efeitos da adubação potássica poder ocorrer após duas safras que, por motivos de tempo de execução do projeto, não foi possível

avaliar. Finalmente, há necessidade de uma avaliação econômica da nova abordagem em relação aos procedimentos usuais de amostragem do solo e recomendação de adubação para o cultivo da soja em sistema plantio direto com rotação de culturas.

Variação do rendimento em função da dose e do local

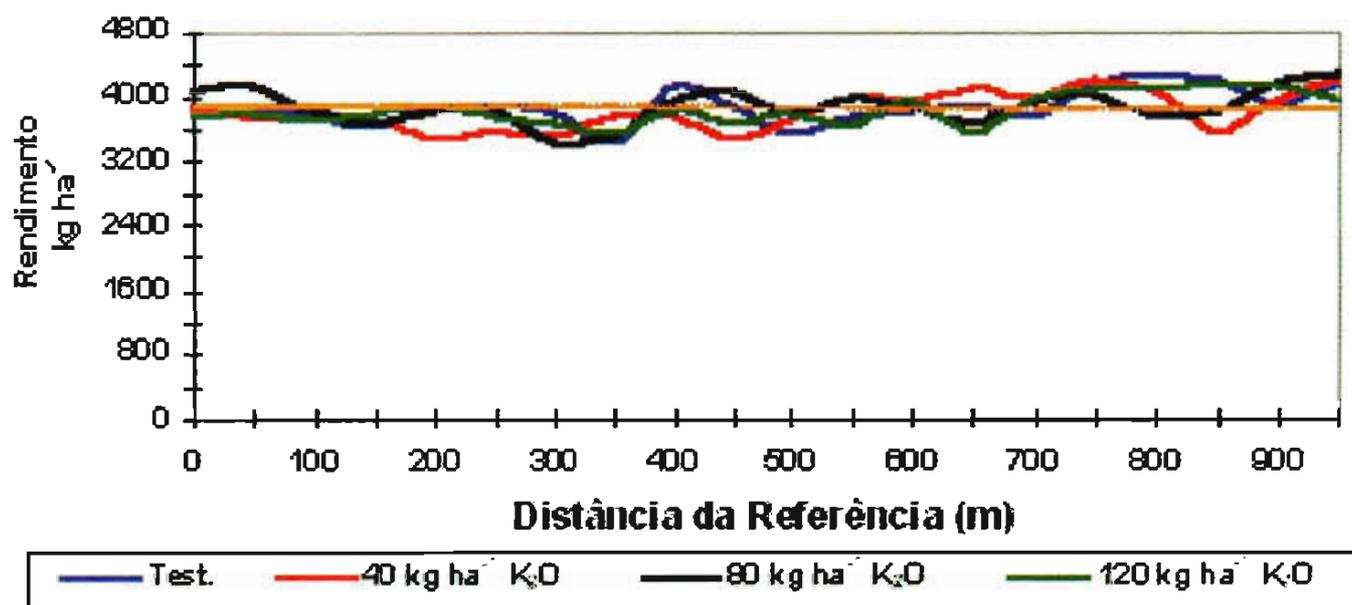


Figura 5. Variação do rendimento da soja em função do local e das doses de potássio.

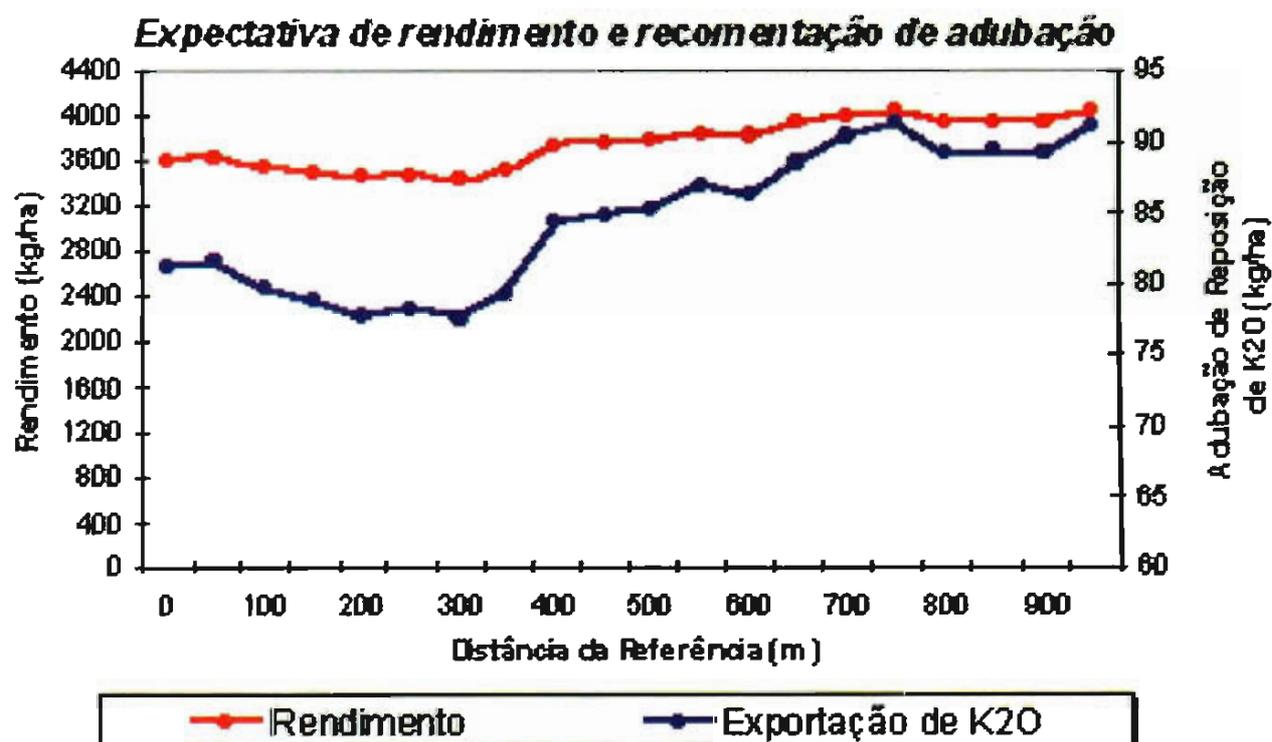


Figura 6. Variação do rendimento e da exportação de potássio pela soja com base em mapas de rendimento.

Referência Bibliográfica

BALASTREIRE, L.A.; ELIAS, A.I.; AMARAL, J.R. Agricultura de precisão: Mapeamento da produtividade da cultura de milho. *Revista de Engenharia Rural*, Piracicaba, v. 8, p. 97-111, 1997.

BERNARDI, A.C.C.; MACHADO, P.L.O.A.; SILCA, C.A. Fertilidade do solo e demanda por nutrientes no Brasil. In: MANZATTO, C.M.; FREITAS JÚNIOR, E.; PERES, J.R.R. *Uso agrícola dos solos brasileiros*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 2002. p. 61-77.

BONGIOVANNI, R.; LOWENBERG-DEBOER, J. Precision Agriculture and Sustainability. *Precision Agriculture*, Dordrecht, v. 5, n. 3, p. 359-387, 2004.

BRAUM, S.M.; HINDS, P.; MALTZER, G.L.; BELL, J.; MULLA, D.; ROBERT, P.C. Terrain attributes and soil nitrogen: spatial effects on corn yield responses to nitrogen fertilization for northern, glaciated landscape In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE. 4., Minneapolis, 1998. *Proceedings...* Madison: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, 1998. p.195-201.

CAHN, M.D., HUMMEL, J.W.; BROUER, B.H. Spatial analysis of soil fertility for site-specific crop management. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 58, n. 6, p.1240-1248, 1994.

CARR, P.M.; CARLSON, G.R.; JACOBSEN, J.S.; NIELSEN, G.A.; SKOGLEY, E.O. Farming soils, not fields: a strategy for increasing fertilizer profitability. *Journal of Production Agriculture*, Madison, v. 4, p. 57-61, 1991.

EBELHAR, S.A.; WYCISKALLA, T.D.; VARSA, E.C.; CHONG, S.K.; INDORANTE, S.J.; MCCAULEY, W.M.; ROBERT, P.C.; RUST, R.H.; LARSON, W.E. Evaluating the influence of variably applied potassium on yield variations in two Southern Illinois farm fields. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 5., 2000, Bloomington. *Proceedings...* Madison: ASA: CSSA: SSSA, 2000. CD-ROM.

ENGELU, R.E.; LONG, D.S.; CARLSON, G.R. Method for precision nitrogen management in spring wheat: I Fundamental relationships. *Precision Agriculture*, Dordrecht, v. 1, n. 2, p. 327-338, 1999.

EVERETT, M.W.; PIERCE, F.J. Variability of corn yield and soil profile nitrates in relations to site-specific N management. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 3., 1996, Minneapolis. *Proceedings...* Madison: ASA: CSSA: SSSA, 1996. p. 43-53.

FLEMING K. L. ; WESTFALL, D. G.; WIENS, D. W.; BRODAHL, M. C. Evaluating farmer defined management zone maps for variable rate fertilizer application. *Precision Agriculture*, Dordrecht, v. 2, n. 2, p. 201-215, 2000.

LARSON, W., LAMB, J., KHAKURAL, B., FERGUSON, R. AND REHM, G. Potential of site-specific management for nonpoint environmental protection. In: PIERCE, F.; SADLER, E. *The state of site-specific management for agriculture*. Madison: ASA, CSSA, SSSA, 1997. p. 337-367.

LARSON, W.E.; ROBERT, P.C. Farming by soil. In: LAL, R.; PIERCE, F.J. *Soil management for sustainability*. Ankeny: Soil Water Conservation Society, 1991. p. 103-112.

LOWENBERG-DEBOER, J.; AGHIB, A. Average returns and risk characteristics of site specific P and K mangement: Eastern corn belt on-farm trial results. *Journal of Production Agriculture*, Madison, v. 12, p. 276-282, 1999.

MALLARINO, A.P.; WITTRY, D.J., DOUSA, D.; HINZ, P.N. Variable-rate phosphorus fertilization: on-farm research methods and evaluation for corn and soybean. In: *INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4.*, Minneapolis, 1998. *Proceedings...* Madison: ASA: CSSA: SSSA, 1999. p. 687-696.

MANZATTO, C.V.; BHERING, S.B.; SIMÕES, M. *Agricultura de precisão: propostas e ações da Embrapa solos*. EMBRAPA Solos, 1999. Disponível em< <http://www.cnps.embrapa.br/search/pesqs/proj01/proj01.html>>. Acesso em: 03 mai. 2000.

MULLA, D.J.; SCHEPERS, J.S. Key processes and properties for site-specific soil and crop management. In: PIERCE, F.J., SADLER, E.J. (eds.). *The state of site-specific management for agriculture*. Madison: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, 1997. p. 1-18.

MULLA, D.J.; BHATTI, A.U.; HAMMOND, M.W.; BENSON, J.A. A comparison of winter wheat yield and quality under uniform versus spatially variable fertilizer management. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, Amsterdam, v. 38, n. 3, p. 301-311, 1992.

PIERCE, F.J.; WARNCKE, D.D. Soil and crop response to variable-rate liming for two Michigan fields. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 64, n. 4, p. 774-780, 2000

ROBERT, P.C. Characterization of soil conditions at the field level for soil specific management. *Geoderma*, Amsterdam, v. 60, n. 1, p. 57-72, 1993.

SAWYER, J. E. Concepts of variable rate technology with consideration for fertilizer application. *Journal of Production Agriculture*, Madison, v. 7, p. 195-201, 1994 .

SEARCY, S.W. Engineering systems for site specific management: opportunities and limitations. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 2., 1994, Minneapolis. Proceedings... Madison: ASA: CSSA: SSSA, 1995. p. 603-647.

SOLOHUB, M.P; VAN KESSEL, C.; PENNOCK, D.J. 1996. The feasibility of variable rate N fertilization in Saskatchewan. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 3., 1996, Minneapolis. Proceedings... Madison: ASA: CSSA: SSSA, 1996. p. 65-73.

SWINTON, S.M.; LOWENBERG-DEBOER, J. Evaluating the profitability of site-specific farming. Journal of Production Agriculture, Madison, v. 11, p. 439-446, 1998.

WIBAWA, W.D.; DLUDLU, D.L., SWENSON, L.J.; HOPKINS, D.G.; DAHNKE, W.C. Variable fertilizer application based on yeild goal, soil fertility, and soil map unit. Journal of Production Agriculture, Madison, v. 6, p. 255-261, 1993.

WOLLENHAUPT, N. C., WOLKOWSKI, R. P.; CLAYTON, M. K. Mapping soil test phosphorus and potassium for variable-rate fertilizer application. Journal of Production Agriculture, Madison, v. 7, p. 441-448, 1994.

WOLLENHAUPT, N.C., BUCHHOLZ. D.D. Profitability of farming by soils. In ROBERT, P.C. (ed.) Soil specific crop management. In: WORKSHOP ON RESEARCH AND DEVELOPMENT ISSUES. Minneapolis, 1992. Proceedings.... St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1993. p. 199-211.

YANG, C.; ANDERSON, G.L.; KING JR., J.H.; CHANDLER, E.K. Comparison of uniform and variable rate fertilization strategies using grid soil sampling, variable rate technology, and yield monitoring. In INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4., Minneapolis, 1998. Proceedings... Madison: ASA: CSSA: SSSA, 1999. p. 675-686.



Espacialização do Estoque de Carbono do Solo em Lavoura de Soja

Pedro Luiz O. de A. Machado

Alberto C. de Campos Bernardi

Beáta E. Madari

Luiz I. Ortiz Valencia

Aluisio G. de Andrade

Margareth S. P. Meirelles

Carlos Alberto Silva

Resumo

As ferramentas da agricultura de precisão podem ser úteis também para avaliação da contribuição ambiental de determinado sistema de produção. Assim, avaliar a contribuição do sistema plantio direto na mitigação da mudança climática global, por meio do acúmulo de carbono orgânico no solo, seria uma delas. O objetivo deste capítulo foi quantificar a variação espacial do estoque de carbono em diferentes profundidades do solo numa lavoura de 13 hectares, em Carambeí, PR, sob plantio direto de grãos. Amostrou-se em grade de 40 x 40 m para a determinação do teor de carbono, densidade do solo e concentração de argila. Dentro da mesma área estabeleceram-se duas grades menores em duas zonas de textura contrastante (arenosa e argilosa) para amostrar o solo a cada 20 x 20, 10 x 10 e 5 x 5 m. Os resultados foram analisados com o ferramento de geoestatística construindo-se semivariogramas para, por meio de interpolação de krigeagem, mapear as estimativas das variações do estoque de carbono e da concentração de argila. O estoque de carbono do solo foi de $12,6 \pm 2,9$, $12,7 \pm 2,5$ e $23,7 \pm 5,6$ Mg ha⁻¹ nas profundidades 0-5, 5-10 e 10-20 cm, respectivamente. Os mapas das estimativas krigeadas indicaram que a variação no estoque de carbono coincidiu com a variação da concentração de argila do solo. Nas condições do presente estudo, para representar a variabilidade espacial do estoque de carbono, os pontos de amostragem devem estar espaçados um do outro em, pelo menos, 100 metros.

Introdução

O aumento de gás carbônico (CO₂) na atmosfera e conseqüente mudança climática global tem atraído a atenção para o acúmulo de carbono no solo como uma estratégia de mitigação e, neste contexto, para o efeito do uso e manejo (ex. sistema plantio direto) nos estoques de carbono do solo. O Brasil é um dos países signatários do Protocolo de Quioto que trata

da redução de emissão de gases de efeito estufa (GEE – ex. dióxido de carbono CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O). Atualmente, embora a redução de emissões pelo Brasil não seja compulsória, sempre se discute a possibilidade do sistema plantio direto ser considerado como contribuinte eficaz para a mitigação das mudanças climáticas. O sistema plantio direto não é elegível para projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) para o período de 2008 a 2012 (Machado, 2002), mas há grandes possibilidades para após 2012. Por outro lado, o Brasil pode ser incluído, num futuro breve, no grupo dos países com obrigações de redução de emissões e os solos sob sistema plantio direto podem contribuir para o país cumprir as metas de reduções de emissões pelo acúmulo de carbono no solo.

A maioria dos trabalhos sobre estoque de carbono de solos sob diferentes usos e manejos é conduzida em parcelas experimentais ou em pequenas áreas aparentemente representativas de ambientes similares numa escala maior (Freixo *et al.*, 2002; Sisti *et al.*, 2004; Madari *et al.*, 2004). Entretanto, conforme observado por Bergstrom *et al.* (2001a) em Chernossolos canadenses, os resultados obtidos em parcelas experimentais não podem ser arbitrariamente extrapolados para escalas maiores. Segundo Bergstrom *et al.* (2001b), os estoques de carbono do solo variam com a topografia da paisagem. Assim, os efeitos do manejo do solo devem ser avaliados em escalas maiores como as observadas de fato nas lavouras de propriedades agrícolas. No Brasil, há muito poucos trabalhos sobre esse importante tema. Assim, o objetivo deste estudo foi avaliar a variabilidade espacial do estoque de carbono (em Mg ha^{-1}) de um Latossolo Vermelho distrófico típico epieutrófico, sob sistema plantio direto de grãos, numa gleba (13 hectares) de uma propriedade agrícola.

A geoestatística é um conjunto de técnicas que estima valores regionalizados e espacializados de atributos ou características de uma determinada área a ser estudada (Lamparelli *et al.*, 2001). Segundo os autores, a ferramenta básica da geoestatística é o método de interpolação denominado krigeagem (do inglês *kriging*), cujo produto é um mapa da área segundo um atributo, com estimativas não viciadas (não enviesadas) e de mínima variância. A krigeagem deverá ser a ferramenta mais utilizada para a interpolação e mapeamento em agricultura de precisão (Oliver & Frogbrook, 1998).

Para que o método de interpolação de krigeagem seja válido, ou seja, que seja realmente representativo da variação espacial daquele atributo na área, é necessário definir alguns parâmetros, os quais podem ser encontrados durante a modelagem da estrutura da variabilidade existente, interpretada através do semi-variograma ou apenas variograma (Lamparelli *et al.*, 2001). A análise quantitativa do solo usando geoestatística tem sido o método mais comumente utilizado para determinar a distribuição espacial de nutrientes para as plantas na lavoura (ex. McBratney & Pringle, 1999; Mulla & McBratney, 2000), pois fornece informação indireta sobre a disponibilidade deles no solo. 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.

O presente capítulo visa apresentar a contribuição do sistema plantio direto de grãos na mitigação da mudança climática global por meio da quantificação da variação espacial do estoque de carbono sob diferentes profundidades do solo numa propriedade rural em Carambeí, Paraná.

Material e Métodos

A amostragem do solo foi realizada em janeiro de 2000, início do florescimento da soja, conforme descrito no capítulo 5.

Para a determinação da densidade do solo coletaram-se amostras nas camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm, por meio de anéis de Kopecky (4 cm de diâmetro x 4 cm de profundidade), inserindo-se o anel no solo e retirando-se o material de solo exatamente necessário para preencher o interior do anel.

Após a etapa de coleta, as amostras de solo foram transportadas para o Laboratório de Análise de Solo e Planta (LASP) da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ.

As amostras de solos para a determinação de carbono total foram secas ao ar e peneiradas (Terra Fina Seca ao Ar -TFSA), conforme proposto por Embrapa (1997). O carbono orgânico das amostras foi medido utilizando o método Walkley-Black modificado (oxidação sulfocrômica via úmida com aquecimento adicional por 5 minutos com o uso de 'dedo frio'; Embrapa, 1997). A densidade do solo foi determinada pelo método do anel (de Kopecky) volumétrico secando-se as amostras a 105 °C (Embrapa, 1997). O estoque de carbono foi calculado pela fórmula:

$$\text{Estoque C} = (C \times d \times E)/10$$

Onde:

Estoque C = estoque de carbono do solo (Mg ha⁻¹);

C = teor de carbono do solo (g kg⁻¹ solo);

d = densidade do solo (g cm⁻³) e

E = espessura da camada do solo (cm).

Devido à laboriosidade da coleta de amostras na lavoura, 5% dos pontos foram perdidos e, para a execução do estudo, foram estimados usando a média dos pontos circunvizinhos.

A análise geoestatística consistiu na construção do semivariograma experimental omnidirecional e no ajuste de um modelo de semivariograma. Os atributos de solo para estoque de carbono foram estimados por krigeagem ordinária em uma grade com células de 40 x 40 m e o mapa de isolinha foi gerado usando o programa Surfer 8 para Windows (Golden Software Co., Golden, EUA). Para as concentrações de argila estimou-se por krigeagem ordinária em uma grade com células de 10 x 10 m e gerou-se, em seguida, o mapa de isolinha. Os dados foram analisados utilizando-se métodos geoestatísticos do programa GSLIB (Statios LCC, São Francisco, EUA) conforme sugerido por Deutsch & Journel (1998). Os ajustes dos variogramas foram obtidos pelo programa Variowin 2.2 (Universidade de Lausanne, Lausanne, Suíça; Pannatier, 1996) pelo procedimento padronizado do quadrado médio ponderado, sendo padronizado pela variância dos dados e ponderados pelo número de pares em cada distância ("lag") e o inverso da distância média do lag. Quanto mais próximos de zero são os valores, melhores são os ajustes.

Resultados e Discussão

A média do estoque de carbono foi de $12,6 \pm 2,9$, $12,7 \pm 2,5$ e $23,7 \pm 5,6$ Mg ha⁻¹ na profundidade 0-5, 5-10 e 10-20 cm, respectivamente. Silva *et al.* (2002) apresentaram as concentrações médias de carbono orgânico (em g C kg⁻¹ solo) desta mesma área de estudo constatando teores similares para as duas profundidades mais superficiais (28 e 22 g C kg⁻¹ solo para as profundidades de 0-5 e 5-10 cm, respectivamente). Em solos sob sistema plantio direto de grãos conduzido por mais de 5 anos, normalmente observa-se brusca diminuição com a profundidade nas concentrações e estoques de carbono orgânico do solo nas profundidades de 0-5 a 5-10 cm havendo pouca alteração em profundidades maiores (Machado & Silva, 2002). No presente estudo, ao contrário, o contraste nos estoques de carbono orgânico entre as duas camadas mais superficiais foi pouco evidente (estoque de carbono 0,8% maior na profundidade de 5-10 cm em relação a 0-5 cm). Isto se deve provavelmente ao alto e contínuo aporte de carbono orgânico proveniente de restos culturais e de plantas de cobertura por vários anos agrícolas.

Na Tabela 1 são apresentados os modelos de variogramas e parâmetros dos modelos para os estoques de carbono e concentração de argila nas diferentes profundidades e, no caso da argila, também nas duas zonas de amostragem (grade menor A em solo mais arenoso e grade menor B em solo mais argiloso). Os modelos de variogramas exponencial e esférico foram os que melhor se ajustaram aos estoques de carbono nas profundidades avaliadas (ajuste = 0,0091, 0,0017 e 0,0022 nas profundidades de 0-5, 5-10 e 10-20 cm, respectivamente; Tabela 1). Maiores detalhes sobre as características dos modelos de variogramas podem ser encontrados em Vieira (2000) e Lamparelli *et al.* (2001).

Todos os variogramas para as variáveis estudadas nas diferentes profundidades atingem um patamar (Tabela 1). Os variogramas do estoque de carbono nas profundidades de 0-5, 5-10 e 10-20 cm têm alcances similares de 135, 148 e 125 m, respectivamente. Estes valores são bem maiores que os observados por Silva *et al.* (2002) para a concentração de carbono orgânico (em g C kg⁻¹ solo). Os autores relataram alcances de 80, 75 e 80 m para as profundidades de 0-5, 5-10 e 10-20 cm, respectivamente. Alcances maiores observados para estoque de carbono no presente estudo poderiam ser explicados pela modelagem considerando-se 107 pontos amostrados para a análise de estoque de carbono orgânico, que envolve também a medição da densidade do solo, diferentes dos 251 pontos amostrados por Silva *et al.* (2002) para a análise da concentração de carbono orgânico apenas.

Os alcances dos variogramas da concentração de argila para as três profundidades na zona mais argilosa da gleba (Zona B) também foram similares aos do estoque de carbono. Os alcances dos variogramas da concentração de argila na zona mais arenosa (Zona A) apresentaram valores menores que as observadas para a Zona B e também uma tendência à diminuição em profundidade (91, 82 e 66 m para 0-5, 5-10 e 10-20 cm, respectivamente; Tabela 1). Aparentemente os alcances dos variogramas diminuem para a mesma variável com a diminuição da sua concentração no solo.

Todos os variogramas mostram que as variáveis (estoque de carbono e concentração de argila nas diferentes profundidades) apresentam forte correlação no espaço e indicam que uma grade de amostragem de 100 m seria adequada para a interpolação do estoque de carbono (nas três profundidades) e concentração de argila nas três profundidades da Zona B e de 60 m para a interpolação da concentração de argila nas três profundidades da Zona A.

Tabela 1. Estoque de carbono (Mg C ha⁻¹) e concentração de argila (g argila kg⁻¹ solo) em diferentes camadas de um Latossolo Vermelho distrófico típico epieutrófico (Carambei, PR) e respectivos modelos de semivariogramas e respectivos parâmetros.

Varável	Modelo	Alcance (metros)	C ₀ ¹	C ²	Patamar ³	Ajuste do variograma
Carbono (Mg ha ⁻¹ ; 0-5 cm)	Exponencial	135	5	1	6	0,0091
Carbono (Mg ha ⁻¹ ; 5-10 cm)	Esférico ⁴	148	1	4	4	0,0017
Carbono (Mg ha ⁻¹ ; 10-20 cm)	Esférico	125	4	12	16	0,0022
Argila (g kg ⁻¹ ; 0-5 cm) Zona A	Gaussiano	91	839	13439	14278	0,0054
Argila (g kg ⁻¹ ; 0-5 cm) Zona B	Gaussiano	114	528	3068	3596	0,0110
Argila (g kg ⁻¹ ; 5-10 cm) Zona A	Gaussiano	82	1080	11280	12360	0,0110
Argila (g kg ⁻¹ ; 5-10 cm) Zona B	Gaussiano	117	120	4000	4120	0,0454
Argila (g kg ⁻¹ ; 10-20 cm) Zona A	Gaussiano	66	280	12040	12320	0,0083
Argila (g kg ⁻¹ ; 10-20 cm) Zona B	Gaussiano	117	210	770	980	0,0440

¹Efeito pepita; ²Contribuição; ³Patamar (C₀ + C); ⁴Variograma ajustado nos resíduos entre um polinômio de ordem 2 e as variáveis; Zona A: grade de amostragem menor na área mais arenosa da gleba e; Zona B: grade de amostragem menor na área mais argilosa da gleba.

As estimativas krigeadas do estoque de carbono e da concentração de argila foram mapeadas de modo que os padrões das variações pudessem ser analisados (Figuras 2 e 3). A análise exploratória mostrou, para todas as profundidades, uma tendência espacial com gradiente positivo do estoque de carbono no sentido do eixo Y, tendendo a aumentar para a zona mais argilosa da gleba (Figuras 2 e 3). Feller & Beare (1997), numa ampla revisão sobre o controle físico da dinâmica da matéria orgânica do solo nos trópicos, observaram tanto para solos cultivados como para solos sob florestas, ambos cauliniticos, que há uma correlação positiva entre a concentração de carbono orgânico do solo e a quantidade de argila tanto na forma de matéria orgânica particulada (resíduos orgânicos > 50 ou 20 mm) assim como na forma de matéria orgânica associada às partículas de silte e argila.

Em razão da forte variação nos estoques de C observada, é bastante provável que os procedimentos usuais de coleta de amostras de solos, que recomendam 15 sub-amostragens para compor uma amostra composta numa gleba aparentemente homogênea, não venham a ser adequados para a quantificação de estoques de carbono do solo, visando a obtenção de certificados de redução de emissões para projetos MDL. Ao mesmo tempo, a execução da amostragem em grade numa gleba tem forte limitação pela laboriosidade da coleta e custo das análises em laboratório. O custo das determinações analíticas em laboratório das amostras coletadas para este estudo (13 hectares) foi de R\$2.555,00 (ou US\$946.00) sem considerar demais custos envolvidos na amostragem em grade (ex. serviço de terceiros para a coleta, acondicionamento e transporte das amostras). Smith (2004) também constatou que o custo para se provar as mudanças nos estoques de carbono do solo de modo exato e preciso pode exceder os benefícios advindos do carbono seqüestrado. No presente estudo, para se ter uma verdadeira representatividade da variação espacial do estoque de carbono no solo, os pontos de amostragem na grade devem estar espaçados um do outro em, pelo menos, 100 m. Constatou-se, então, a necessidade de desenvolvimento de instrumentos portáteis de campo numa relação custo:benefício favorável, para a medição contínua e em tempo real do estoque de carbono do solo em escala de propriedade rural. A espectroscopia infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) nas regiões próxima e média da radiação eletromagnética, oferecem alto potencial nesta direção (Mimmo et al., 2002; Madari et al., 2004).

Conclusões

Os dados do estoque de carbono e da concentração de argila do solo são fortemente correlacionados no espaço, e a técnica geoestatística detectou com sucesso esta variação podendo oferecer mapas das estimativas krigeadas da variação dos estoques de carbono e da concentração de argila no solo.

A variação no estoque de carbono na área de estudo seguiu a variação na concentração de argila do solo.

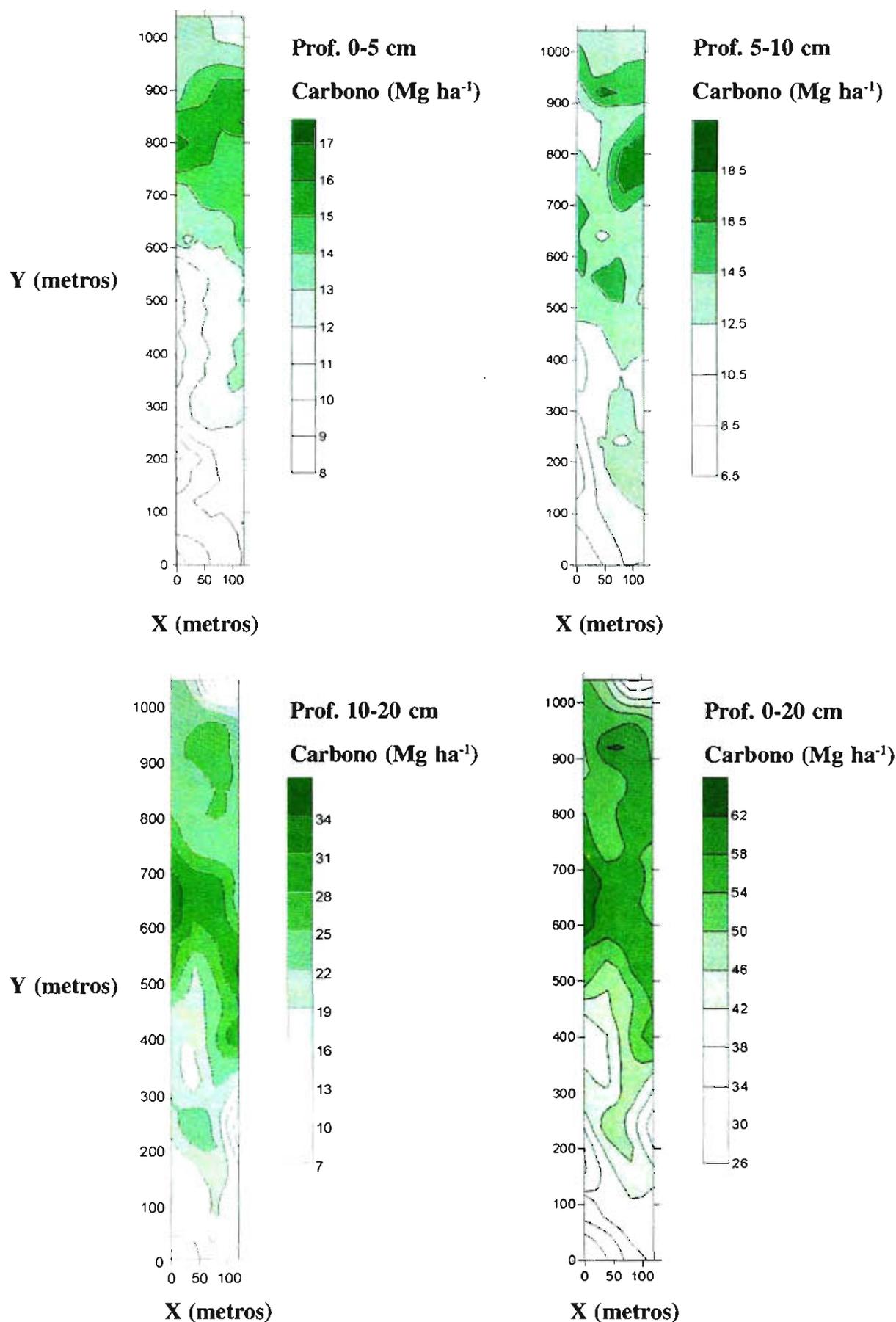


Figura 1. Mapas interpolados por krigeagem ordinária do estoque de carbono orgânico de Latossolo Vermelho distrófico típico epieutrófico, nas profundidades 0-5, 5-10, 10-20 e 0-20 cm.

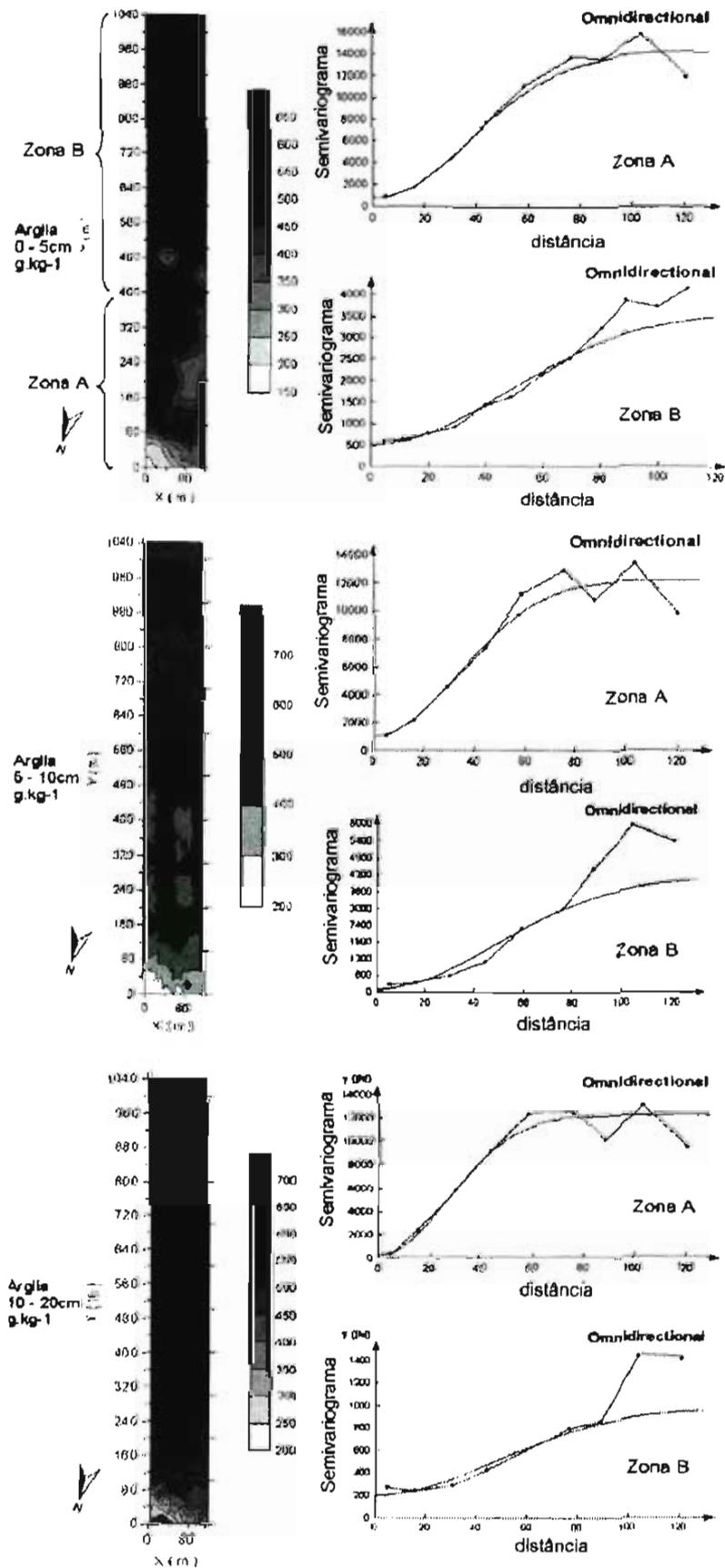


Figura 2. Mapa interpolado por krigagem ordinária, semivariograma experimental (linha em traços) e modelo ajustado (linha contínua) do teor de argila de Latossolo Vermelho distrófico típico epiutrófico, nas profundidades 0-5, 5-10 e 10-20cm.

Referências Bibliográficas

- BERGSTROM, D. W.; MONREAL, C. M.; JACQUES, E. St. Influence of tillage practice on carbon sequestration is scale-dependent. **Canadian Journal of Soil Science**, Edmonton, v. 81, p. 63-70, 2001a.
- BERGSTROM, D. W.; MONREAL, C. M.; JACQUES, E. St. Spatial dependence of soil organic carbon mass and its relationship to soil series and topography. **Canadian Journal of Soil Science**, Edmonton, v. 81, p. 53-62, 2001b.
- DEUTSCH, C. V.; JOURNEL, A. G. **GSLIB geostatistical software library and user's guide**. New York: Oxford University Press, 1992. 341 p.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: Embrapa-CNPQ, 1997. 212 p.
- FELLER, C.; BEARE, M. H. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. **Geoderma**, Amsterdam, v. 79, p. 69-116, 1997.
- FREIXO, A. A.; MACHADO, P. L. O. A.; GUIMARÃES, C. M.; SILVA, C. A.; FADIGAS, F. S. Estoque de carbono e nitrogênio e distribuição de frações orgânicas de Latossolo do Cerrado sob diferentes sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 425-434, 2002.
- LAMPARELLI, R. A. C.; ROCHA, J. V.; BORGHI, E. **Geoprocessamento e agricultura de precisão – fundamentos e aplicações**. Agropecuária: Guaíba, RS, 2001. 118 p.
- MACHADO, P. L. O. A. **Mecanismo de desenvolvimento Ilmpo (MDL): funcionamento, pontos críticos e possibilidades para alguns sistemas agrícolas no Brasil**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002. 28 p. (Embrapa Solos. Documentos, 41).
- MACHADO, P. L. O. A.; SILVA, C. A. Soil management under no-tillage in the tropics with special reference to Brazil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 61, p. 119-130, 2002.
- MADARI, B. E.; REEVES, J. B. III; COELHO, M. R.; DE-POLLI, H.; MACHADO, P.L.O.A.; OLIVEIRA, R.P.; SOUZA, L.F.; COELHO, R.M.; PINTO, P.S.; BENITES, V.M.; SANTOS, F.S.; BERNARDI, A.C.C.; MCCARTY, G.W. Quantitative soil carbon analysis by use of mid- and near-infrared spectroscopy. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF ENVIRONMENTAL GEOCHEMISTRY IN TROPICAL COUNTRIES, 4.; Búzios, RJ. **Book of abstracts...**: Niterói: Universidade Federal Fluminense, 2004. p. 14-16.

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

MIMMO, T., REEVES, J. B., McCARTHY, G. W., GALLETTI, G. Determination of biological measures by mid-infrared diffuse reflectance spectroscopy in soils with landscape. **Soil Science**, Baltimore, v. 167, p. 281-287, 2002.

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

OLIVER, M. A.; FROGBROOK, Z. L. **Sampling to estimate soil nutrients for precision agriculture**. New York: The International Fertilizer Society, 1998. 36 p. (Proceedings, 417).

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

SILVA, C. A.; MACHADO, P. L. O. A.; BERNARDI, A. C. C.; CARMO, C. A. F. S. do; VALENCIA, L. I. O.; ANDRADE, A. G.; MEIRELLES, 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. 8 p. (Embrapa Solos. Comunicado Técnico, 10).

SISTI, C.P.J.; SANTOS, H,P.; KOHHANN, R.; ALVES, B.J.R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R.M. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 76, p. 39-58. 2004.

SMITH, P. Monitoring and verification of soil carbon changes under the Article 3.4 of the Kyoto Protocol. **Soil Use and Management**, Wallingford, v.20, p. 264-270. 2004.

VIEIRA, S. R. Geoestatística aplicada à agricultura de precisão. 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: Universidade Federal de Viçosa, 2000. p. 93-108.



Uso de Inteligência Artificial em Agricultura de Precisão: Redes Bayesianas e Neurais

Margareth S. P. Meirelles

Marlon Moreira

Fábio B. N. Coelho

Resumo

O presente capítulo discorre sobre a aplicação das técnicas de Inteligência Computacional, mais especificamente as Redes Bayesianas e as Redes Neurais, como ferramenta de Análise Espacial em projetos de agricultura de precisão para o manejo da fertilidade do solo e nutrição de plantas. Estas técnicas avançadas podem subsidiar a interpretação dos dados, a integração temática e a simulação da produtividade em função das diversas variáveis de solo e dos teores de nutrientes na planta. Propõe-se a utilização destas técnicas como uma forma de auxiliar a combinação dos inúmeros dados de solo e planta que um projeto de agricultura de precisão do gênero pode produzir. A questão é: como interpretar todos os dados espacializados? O que fazer com os diferentes mapas com estimativas *krigadas* de variáveis de solo e planta? Que métodos de análise utilizar para obter conclusões úteis para a interpretação integrada do mapa de produtividade de uma cultura com as variáveis de solo e planta? Compreender esta relação é um aspecto fundamental e indispensável para direcionar o manejo otimizado do solo e planta, e auxiliar nas medidas preventivas ou de recuperação da produtividade de uma cultura. Estas técnicas, normalmente utilizadas para outras aplicações distintas da agricultura de precisão, poderão, considerando-se suas características e formalismos matemáticos, ser aplicadas em projetos desta natureza. A principal vantagem é permitir um ambiente de manipulação simultânea das variáveis georreferenciadas de solo e planta, juntamente com a produtividade da cultura, o que é extremamente laborioso por métodos usuais

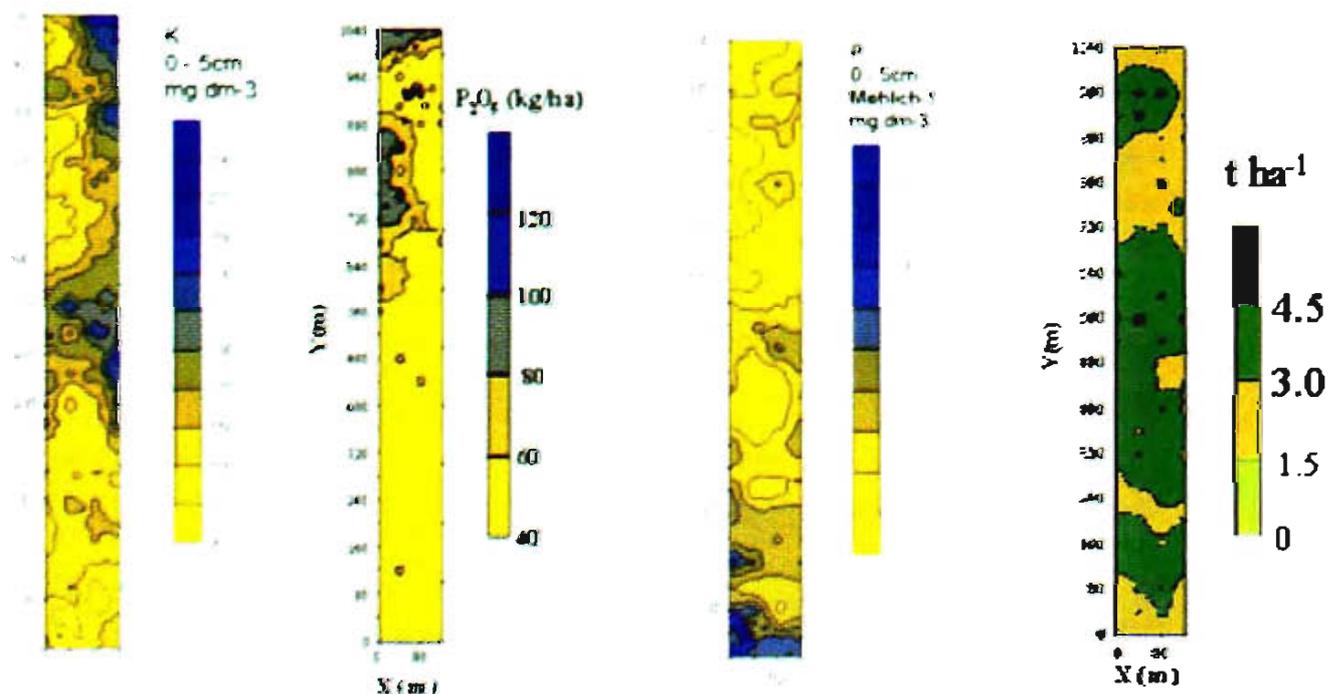
Introdução

Os altos custos de produção de grãos (ex. soja, trigo e milho) devido aos fertilizantes vêm exigindo critérios cada vez mais aperfeiçoados para o manejo da fertilidade do solo, combinado com um diagnóstico mais pormenorizado do estado nutricional das plantas, visando produtividades adequadas.

A Geomática utiliza ferramentas computacionais e matemáticas para tratar informações espaciais, ou seja, informações cuja localização no espaço é um fator preponderante. A

Análise Espacial é uma das áreas da Geomática que proporciona uma espécie de "caixa de ferramenta" normalmente disponível nos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) para o tratamento espacial. Por que não explorar este potencial para subsidiar os estudos de Agricultura de Precisão já que estamos tratando especificamente da espacialização e integração de dados cuja característica principal é possuir variabilidade espacial? Uma ferramenta disponível bastante conhecida e que o capítulo 3 apresentou é a Geoestatística, que pode ser aplicada na espacialização mais precisa dos dados de solo e planta coletados a partir de amostras pontuais. O propósito deste capítulo é apresentar o potencial de algumas ferramentas de Análise Espacial avançada para realizar a complexa e laboriosa tarefa de *integrar* as diversas informações coletadas e já espacializadas, como as variáveis de solo e teores de nutrientes na planta e correlacioná-las com a produtividade da soja, por sua vez também espacializada e apresentada sob a forma de mapa (figura 1). Para tanto, serão apresentadas aplicações da Inteligência Computacional, mais especificamente o uso de *Redes Bayesianas* e *Redes Neurais* como ferramentas para esta integração no âmbito da agricultura de precisão no manejo da fertilidade do solo e nutrição de plantas.

Uso de Redes Bayesianas em Agricultura de Precisão para o Manejo da Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas



INTEGRAÇÃO ?

Figura 1. Necessidade de Interpretação e Integração dos Parâmetros Químicos do Solo e da Produtividade Medida

Conforme já apresentado nos capítulos anteriores, foram coletados e depois espacializados diversos dados sobre os parâmetros químicos e físicos dos solos e de nutrição de plantas. A questão central é encontrar uma ferramenta capaz de relacionar estes dados com a produtividade medida através da colheitadeira. Com o auxílio do conhecimento adquirido empiricamente e a partir de pesquisas realizadas pelos especialistas em fertilidade dos solos, deve-se, a partir dos dados coletados, estabelecer a condição de fertilidade do solo e de nutrição de planta adequados para a otimização econômica da produtividade por talhão, conforme padrões de adubação a serem definidos.

Temos como desafios a falta de conhecimento sobre como estes diversos parâmetros se relacionam, a existência de algumas imprecisões na coleta dos dados e ainda a falta de dados em algumas regiões. A imperfeição da informação é geralmente conhecida na literatura de sistemas baseados em conhecimento como "Incerteza". A Teoria de Probabilidade é o modelo mais tradicional para o tratamento da informação incerta (Bittencourt, 1996). O *Teorema de Bayes* provê a base para o tratamento da imperfeição da informação em diversos sistemas baseados em conhecimento (Rich, 1983). As Redes Bayesianas são técnicas matemáticas e estatisticamente rigorosas para a manipulação de incertezas (Taronia et al, 1996).

Os modelos gráficos são a união entre a teoria da probabilidade e a teoria dos grafos. Eles propiciam uma ferramenta natural para trabalhar com dois problemas que ocorrem em aplicações matemáticas e de engenharia: a incerteza e a complexidade. A noção de modularidade é fundamental para a idéia de um modelo gráfico - um sistema complexo pode ser construído a partir de partes simples. A teoria da probabilidade provê a ligação para combinar estas partes, garantindo a consistência do sistema como um todo e propiciando a interação do modelo com os dados (Murphy, 1998).

Conceitos Básicos

Nesta seção serão apresentados, de forma simplificada, alguns conceitos básicos necessários ao entendimento da teoria das Redes Bayesianas, visando a compreensão da aplicação em Agricultura de Precisão apresentada nas seções subseqüentes. Para um conhecimento mais completo desta teoria, o que foge ao escopo deste livro, bem como de seu formalismo matemático sugere-se a leitura dos trabalhos de Howson & Urbach (1993), Bernardo & Smith (1994) Jensen (1996); Castillo et al, (1997).

- **Probabilidade:** associa a uma dada sentença um grau de confiança que é um valor numérico entre 0 (falso) e 1 (verdadeiro), podendo ser obtida através de estudos estatísticos, amostragem e pesquisa.
- Grau de confiança (probabilidade):

- *a priori* (incondicional): probabilidade calculada antes de se obter informações adicionais;
- *a posteriori* (condicional): probabilidade calculada de acordo com as evidências adicionais disponíveis;
- evidências: percepções recebidas até o momento, ou seja, dados disponíveis;

O método *bayesiano* apresenta uma abordagem probabilística para o problema, onde o principal conceito é a ideia da probabilidade *a priori* $P(A)$ e da probabilidade *a posteriori* $P(A/B)$

A probabilidade de um evento ocorrer pode ser modificada pela observação de evidências que o influenciam para mais ou para menos (Bittencourt, 1996; Bonhan-Carter, 1994).

Ex: probabilidade de ocorrência de chuva amanhã

Chove 80 dias por ano na região: $P(\text{chuva})=80/365$ (*a priori*);

No mês analisado chove 20% mais que nos outros meses;

$P(\text{chuva}|\text{evidência})=P(\text{chuva})\cdot\text{Fator [época do ano]}$

Esta nova informação funciona como um fator multiplicativo e representa uma melhora na precisão da informação inicial (probabilidade *a priori*). Outras fontes de dados podem ser utilizadas em conjunto sendo necessário apenas a sua multiplicação à probabilidade *a priori*.

- **Probabilidade condicional:** probabilidade (*a posteriori*) de A dado que B ocorreu é definida por: $P(A|B) = P(A \cap B)/P(B)$, quando $P(B) > 0$. Assim, possibilita a inferência sobre uma proposição desconhecida A dada a evidência B.
- **Independência:** $P(A|B) = P(A)$ a probabilidade de um evento não interfere na outra.

Exemplo: A = sol e B=ondas do mar (o sol não causa ondas do mar)

- Eventos mutuamente excludentes:
 - $P(A \cap B) = 0$ ambos eventos não podem ocorrer simultaneamente.

Ex: Lançamento de um dado (A = face ímpar ou B = face par)

- Independência condicional:
 - Sejam X e Y independentes dado Z então: $P(X|Y,Z) = P(X|Z)$

Ex:Trovão é condicionalmente independente de Chuva, dado Relâmpago $P(\text{Trovão}/\text{Chuva}, \text{Relâmpago}) = P(\text{Trovão}/\text{Relâmpago})$

Teorema de Bayes

A metodologia *bayesiana* consiste em determinar a probabilidade de ocorrer um evento, dada uma certa condição, baseia-se no Teorema de Bayes, cuja equação é expressa por:

$$P(A/B) = P(B/A)P(A)/P(B)$$

Pode-se estender esta expressão para o caso em que a dependência condicional está associada a mais de uma evidência prévia:

$$P(A/B,E) = P(B/A,E)P(A/E)/P(B/E)$$

Teorema de Bayes em Aplicações Espaciais

A utilização do teorema de Bayes em Geomática e aplicações espaciais, ou seja, aplicações com localização no espaço, ainda é muito recente. Para exemplificar a utilização do teorema de Bayes aplicada as Geociências sugerimos a leitura de Bonhan-Carter (1994). Câmara et al (2004) resume uma aplicação do teorema à avaliação de depósitos minerais (Figura 2), que será utilizada nesta seção para ilustrar o uso destas técnicas a aplicações espaciais, uma vez que a Agricultura de Precisão também é uma aplicação com esta característica. Neste caso tem-se:

$$P\{D/A\} = P\{DnA\} / P\{A\} = N\{DnA\} / N\{A\}$$

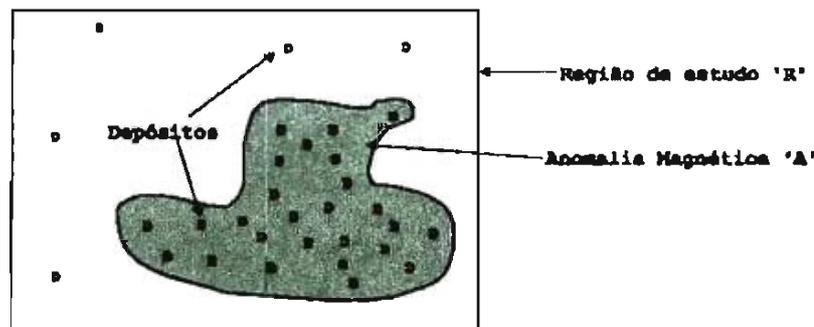


Figura 2. Teorema de Bayes em aplicação espacial. (D: Depósitos = 200 unidades de 1Km²; R: Região de estudo = 10.000 Km²; A: Anomalia Magnética = 3.600 Km²). Fonte: Câmara et al., 2004

Dividindo 'R' em partes de 1KM², temos 10.000 unidades de área (N{T}), nas quais existem 200 depósitos minerais de 1KM², (N{D}). Igualando a probabilidade à proporção territorial, a probabilidade de escolher aleatoriamente uma área que contenha depósitos minerais é:

$$P\{D\} = N\{D\} / N\{T\} = 200/10000 = 0,02$$

Entretanto, se soubermos que 180 dos 200 depósitos estão situados em uma área 'A', a probabilidade de um depósito encontrado estar em 'A' é: $P\{A/D\} = 180/200 = 0,9$.

A probabilidade de encontrarmos depósitos dentro de 'A' é:

$P\{D/A\} = P\{D \cap A\} / P\{A\} = P\{D\}$. $P\{A/D\} / P\{A\} = P\{D\} \cdot 0,9 / (3600/10000) = P\{D\} \cdot 2,5$; ou seja, é 2,5 vezes maior a chance de encontrar um depósito dentro da área 'A' do que fora dela.

Terminando o cálculo, tem-se que $P\{D/A\} = 0,02 \times 2,5 = 0,05$ exatamente igual a $N\{D \cap A\} / N\{A\} = 180/3600 = 0,05$

Redes Bayesianas

Definição

É um formalismo gráfico capaz de representar uma distribuição conjunta de probabilidades de um conjunto $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ de variáveis.

Cada nó do grafo representa uma variável aleatória, e cada arco representa a condição de dependência entre os nós. Apesar do nome, uma rede *bayesiana* não necessariamente utiliza métodos *bayesianos*, seu nome se dá pelo uso da regra de inferência probabilística de Bayes. O diagrama de rede é utilizado para montar ou otimizar um sistema de apoio à decisão.

A seguir serão apresentados, de forma simplificada, os conceitos básicos necessários ao entendimento da aplicação destas redes em Agricultura de Precisão, conforme sugerido neste capítulo.

Forma

Uma rede *bayesiana* para $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$, consiste de:

- Uma estrutura S que codifica a independência condicional sobre as variáveis em X .
- Um conjunto de distribuições de probabilidades locais P associadas aos X_i ;

Estrutura

- É um grafo direcionado e acíclico;
- Os nós representam as variáveis X_i e os arcos os relacionamentos entre elas;
- Cada nó denota uma variável somente;
- O nó antecessor, ou pai, é aquele de onde saem arcos para outros nós, estes últimos são chamados de descendentes ou filhos;
- O nó que não apresenta arcos direcionados a ele possuem a probabilidade *a priori*;

- O nó descendente, o que recebe arcos de outros nós, tem a probabilidade *a posteriori*;
- O pai denota os nós pais de X_i e também as variáveis correspondentes a esses pais.
- Condição paternal *Markoviana*: $P(x) = P\{P_{xi}/pai \mid \hat{I}\{1,2,\dots,n\}\}$, ou seja: X_i é independente de todos os seus não descendentes dado Pai
- Condição ordinal *Markoviana*: $P(x_i/pai) = P(x_i/x_1,x_2,\dots,x_{i-1})$, ou seja: X_i é independente dos seus outros antecessores dado Pai.

Composição das Redes Bayesianas

Apresenta-se a seguir uma seqüência de considerações necessárias para a montagem de uma rede com as características descritas acima:

1. Escolher um conjunto de variáveis relevantes que descrevam o domínio;
2. Ordem de inclusão dos nós na rede, deve ser:
 - i. causas como *raízes* da rede;
 - ii. *variáveis* que as causas (*raízes*) influenciam;
 - iii. *folhas* que não influenciam diretamente nenhuma outra variável.
3. Enquanto houver variáveis a representar:
 - i. escolher uma variável X_i e adicionar um nó na rede
 - ii. estabelecer os *pais*(X_i) dentre os nós que já estão na rede, satisfazendo a *propriedade de dependência condicional*
 - iii. definir a tabela de *probabilidade condicional* para X_i
4. Uma *rede complexa* pode ser formada pelo *conjunto de redes simples*.

Exemplo de Rede Bayesiana

Cada nó possui uma tabela de probabilidade condicional associada que quantifica os efeitos que os pais têm sobre ele. A figura 3 apresenta um exemplo hipotético apenas para efeitos ilustrativos.

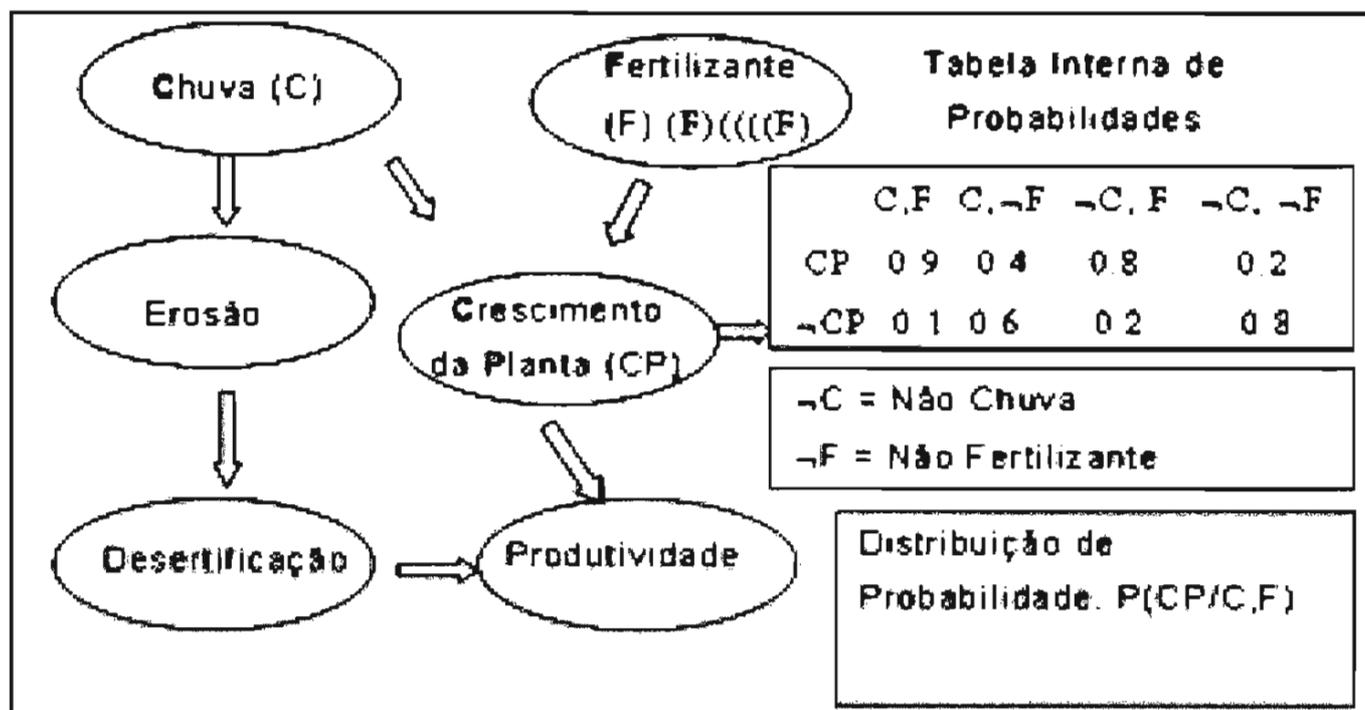
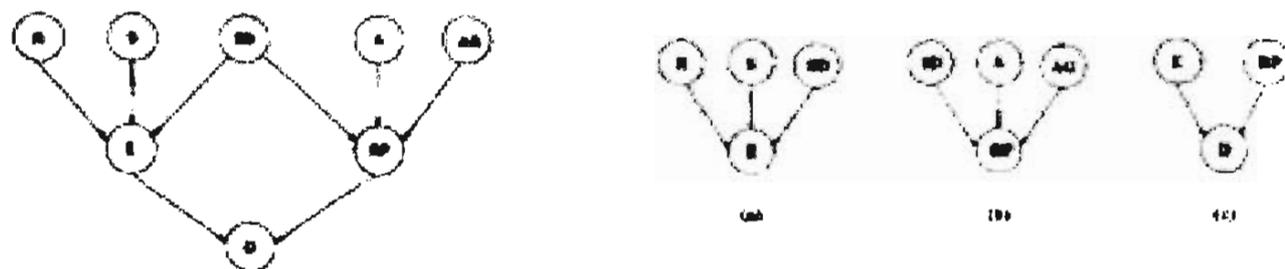


Figura 3. Exemplo da montagem de uma Rede Bayesiana hipotética



<p>Rede Bayesiana para desertificação onde</p> <p>R = tipo de Rocha (permeável, semi-permeável, impermeável)</p> <p>S = Declividade (baixa, média, alta)</p> <p>SD = Camada do Solo (descoberta, superficial, profunda)</p> <p>A = Aspecto (sul, leste/ oeste, norte)</p> <p>AG = Pastagem (pouca, média, alta)</p> <p>E = Erosão (baixa, média, alta)</p> <p>RP = Regeneração Potencial (baixa, média, alta)</p> <p>D = Desertificação (baixa, média, alta)</p>	<p>A rede maior pode ser desmembrada em 3 sub-redes:</p> <p>a) $P(E/R, S, SD)$ b) $P(RP/SD, A, AG)$ c) $P(D/E, RP)$</p> <p>Em cada uma das redes poderá ser aplicado, separadamente, o Teorema de Bayes.</p>
---	--

Figura 4 . Exemplo de Decomposição de Rede (adaptado de Strassopoulou, 1996)

Aplicação de Redes Bayesianas no Projeto de Agricultura de Precisão no Manejo da Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas.

No âmbito do projeto de agricultura de precisão descrito no capítulo 5, deseja-se identificar a influência das principais variáveis de solo e planta na produtividade da soja sob plantio direto.

Em outras palavras, deseja-se otimizar a produção realizando simulações que permitam fazer uma *previsão da produtividade*, manipulando os valores das variáveis.

As redes bayesianas são capazes de trabalhar a *incerteza* utilizando as evidências encontradas na pesquisa de campo para compor o conjunto de probabilidades *a priori* e *a posteriori*, necessárias para a formação da rede.

Materiais e Métodos

Visando verificar a aplicação das redes bayesianas para estudos de agricultura de precisão no manejo da fertilidade do solo e nutrição de plantas, a seguir, serão descritas as etapas utilizadas para a preparação, montagem, compilação e análise de resultados de uma rede bayesiana.

Dados de produtividade e elementos da planta

Conforme apresentado nos capítulos 7 e 8, a Tabela 1 apresenta o ponto amostral georeferenciado (ponto de coleta na lavoura), os valores de produtividade e os resultados de estudos que indicaram os cinco principais nutrientes limitantes para a soja. Indicados pelo DRIS (ver Capítulo 8), são estes: nitrogênio, fósforo, potássio, enxofre e zinco.

Tabela 1. Pontos Amostrais, Produtividade e Fatores Químicos Limitantes

Ponto	X	Y	Produ. kg.ha ⁻¹	N	P	K	S	Zn
				g.kg ⁻¹				mg kg ⁻¹
1	0	0	4109	56,08	3,88	17,49	2,41	14,70
2	0	40	4288	43,00	3,46	18,59	2,34	15,60
...								
106	120	960	3519	45,92	2,45	10,90	1,95	16,10
107	120	1000	4535	44,16	2,56	12,98	2,02	16,30

Análise inicial dos dados

Tabela 2 - Primeira Fase de Análise dos Dados – Análise Estatística

	Produtividade kg ha ⁻¹	N	P	K	S	Zn
		<i>g.kg⁻¹</i>				mg kg ⁻¹
<i>Desvio padrão</i>	632	2,73	0,42	3,16	0,32	1,76
<i>Interv.confiança = 99,99%</i>	489	2,11	0,32	2,44	0,25	1,36
<i>Mínimo (de confiança)</i>	3315	42,57	2,52	12,21	1,63	14,46
<i>Média</i>	3804	44,68	2,84	14,65	1,88	15,82
<i>Máximo (de confiança)</i>	4293	46,80	3,17	17,10	2,12	17,18

Probabilidades a priori

A partir das tabelas anteriores é possível verificar as probabilidades *a priori* em função das ocorrências (tabela 3).

Tabela 3. Probabilidades *a priori* (em %)

	Produtividade	N	P	K	S	Zn
<i>mínimo</i>	27	18	22	25	26	20
<i>médio</i>	53	63	53	49	49	61
<i>maximo</i>	20	19	25	26	25	19

Matriz de Correlação

Serve para verificar a *dependência* entre os dados. Neste caso, conforme ilustra a tabela 4, foi verificado que o *fósforo* poderia ser descartado nas análises, pois revela correlação superior às demais.

Histogramas

Servem para verificar a distribuição dos dados e verificar se as análises futuras podem supor um comportamento *gaussiano*, eliminando a necessidade de se realizar alguns artifícios, conforme apresentado na Figura 5.

Tabela 4 - Matriz de Correlação

	N	P	K	S	Zn
Correlação N	1,0				
Correlação P	0,4	1,0			
Correlação K	0,2	0,7	1,0		
Correlação S	0,2	0,5	0,3	1,0	
Correlação Zn	0,1	-0,2	-0,5	0,1	1,0

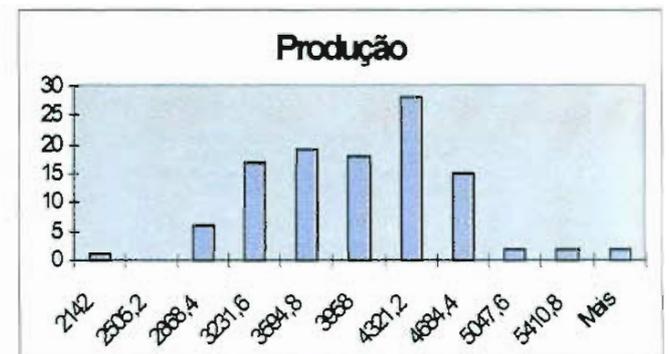
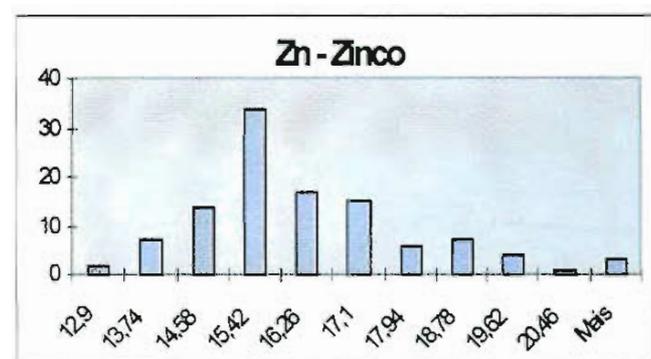
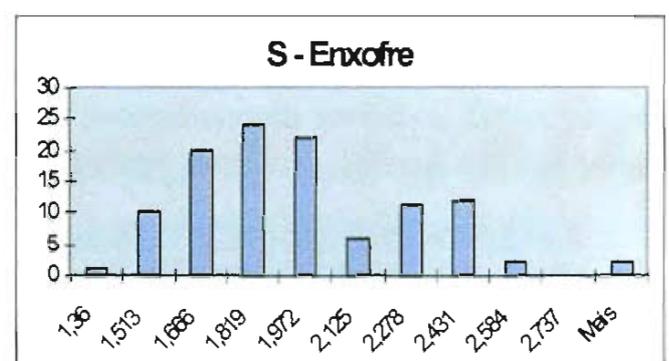
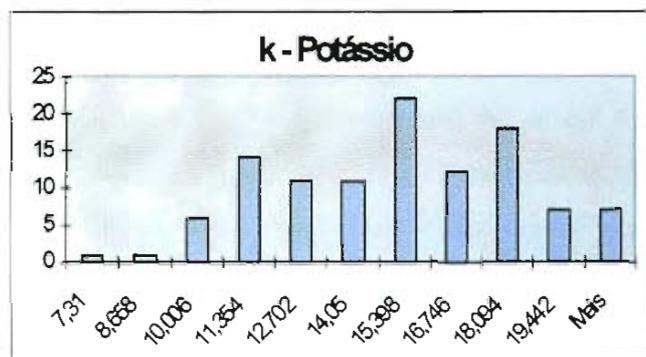
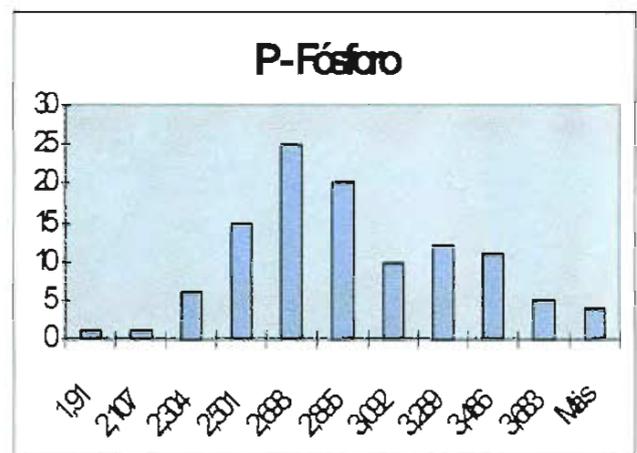
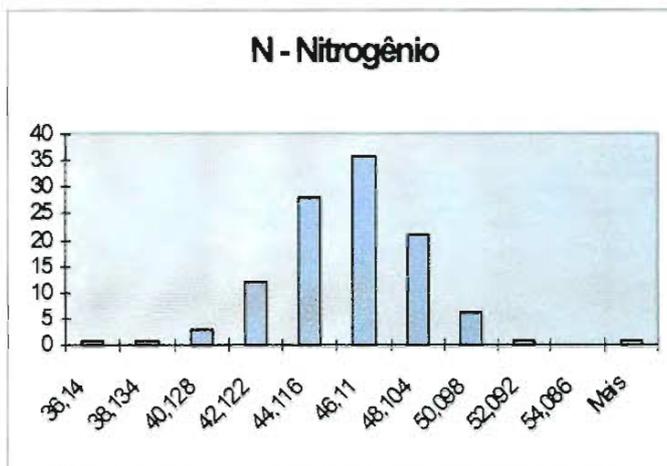


Figura 5. Histogramas dos Nutrientes Limitantes para a Soja Neste Estudo e da sua Produtividade

Apesar de nem todos os histogramas apresentarem curvas *gaussianas* perfeitas, a análise dos mesmos serve de referência para o entendimento de resultados futuros.

Montagem da Rede Bayesiana

Neste trabalho foi utilizado o sistema computacional livre para redes bayesianas denominado Netica vs 1.12 (2004). Neste ambiente, inicialmente são incluídos os *nós pai* e em seqüência os *filhos* e suas dependências, conforme ilustra a Figura 6.

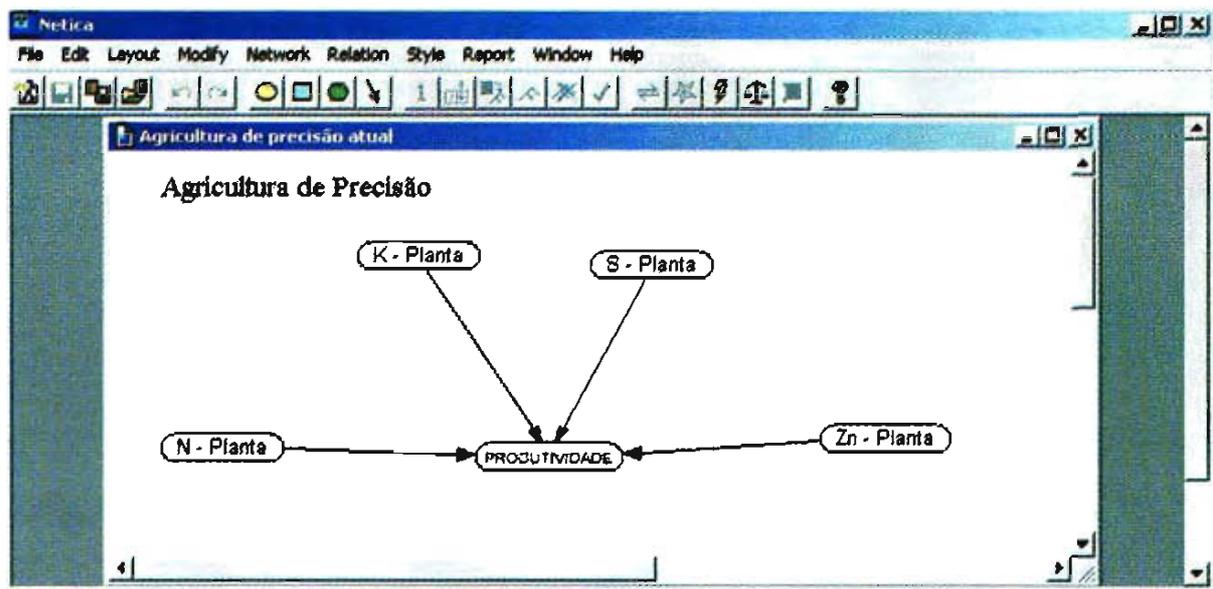


Figura 6. Montagem da Rede Bayesiana no sistema Netica vs 1.1.2

Neste mesmo ambiente computacional interativo, a cada *nó pai* associa-se uma tabela de probabilidades *a priori*, conforme ilustrado na figura 7.

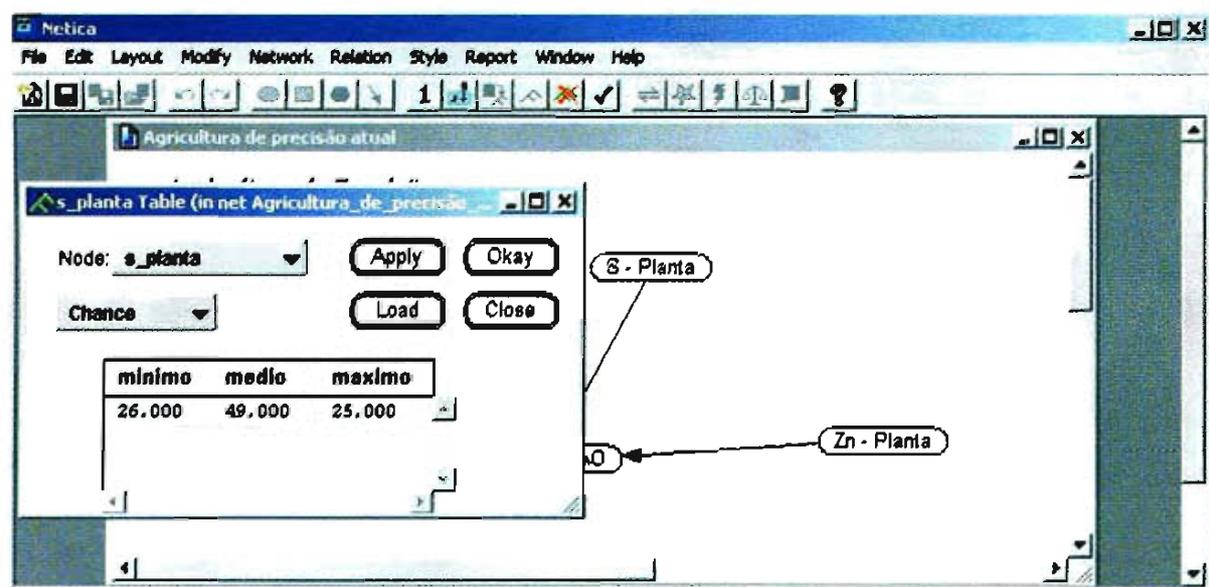


Figura 7. Associação da Tabela de Probabilidade a Cada Nó Pai da Rede Bayesiana.

Após esta etapa, deverá ser incluída a tabela de probabilidades *a posteriori* do *nó filho*. Esta tabela é obtida através da combinação linear dos *nós pais* e dos estados em que os mesmos podem ser encontrados (evidências). O preenchimento desta tabela é realizado através das observações das evidências e a quantificação das probabilidades. Pode ocorrer que o número de observações não contemple totalmente a tabela. Neste caso, pode-se optar pela escolha do *pior caso* ou pelo *desconhecido*, ou seja, considerar as probabilidades iguais para todos os possíveis estados. A figura 8 ilustra o exposto.

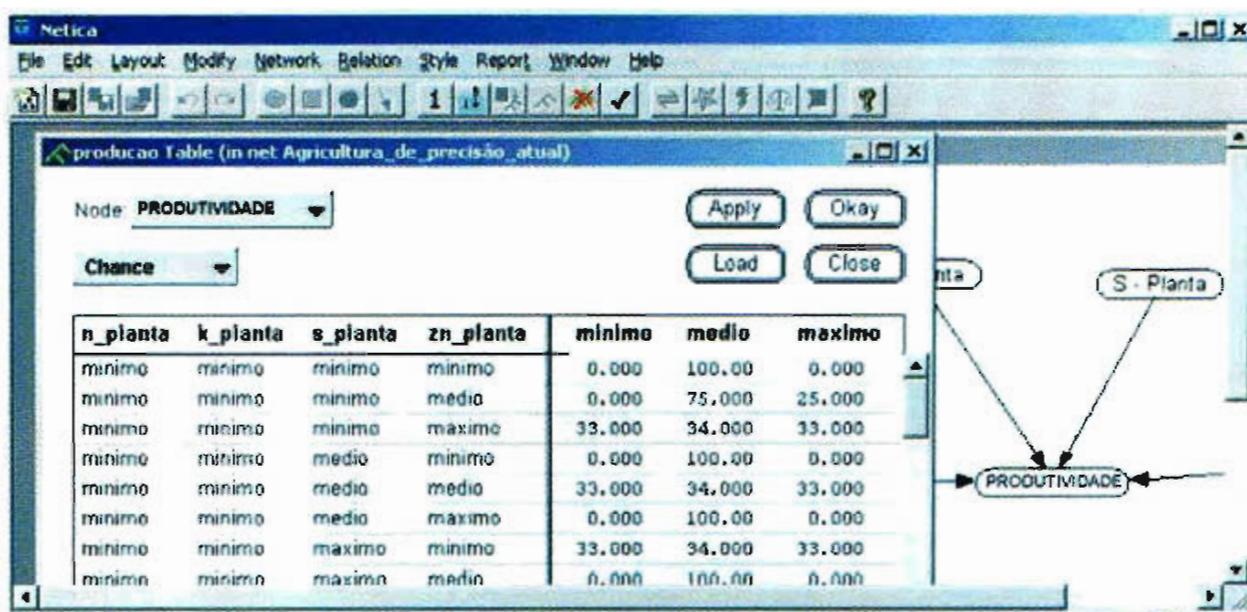


Figura 8. Inclusão da Tabela de Probabilidade *a posteriori* nos nós filhos

Resultados Obtidos

Quando a rede estiver completamente montada deve-se compilá-la. Neste momento, é possível verificar as probabilidades *a priori* (em cada *nó pai*) e *a posteriori* (no único *nó filho*).

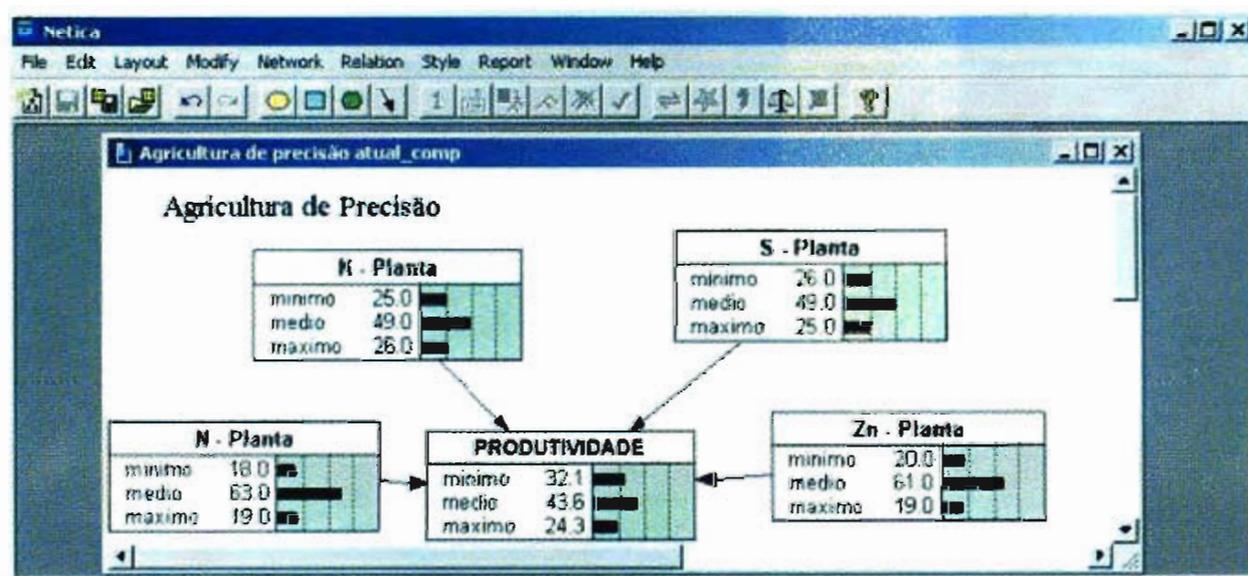


Figura 9. Resultado da Rede Bayesiana para os Fatores Limitantes (evidências): K,S,Zn,N.

A partir deste momento, tem-se um *ambiente interativo* onde é possível realizar diversas *simulações*, testando-se várias combinações de evidências e verificando-se a probabilidade final da produtividade. Em outras palavras, pode-se alterar os diversos parâmetros químicos, considerados limitantes, neste caso: K,S,N, Zn e, observar a mudança que isto acarretará no valor da produtividade, de forma imediata.

Na figura 10 é apresentada uma simulação a partir da combinação das evidências K,S,N,Zn da seguinte maneira: K = mínimo,S e N = médio e Zn = máximo, gerando uma probabilidade de produtividade média de 75%.

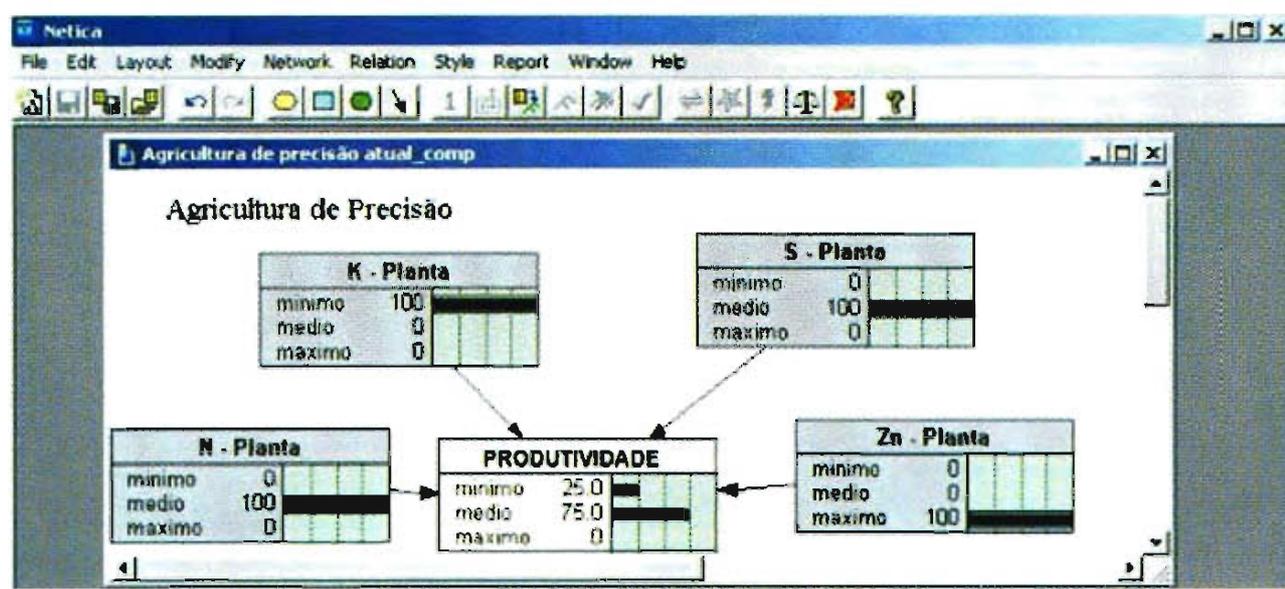


Figura 10. Simulação da produtividade considerando-se K = mínimo,S e N = médio e Zn = máximo.

Na figura 11 tem-se a combinação de evidências: S e Zn = mínimo, K = médio e N = máximo, gerando uma probabilidade de produtividade máxima em 50%.

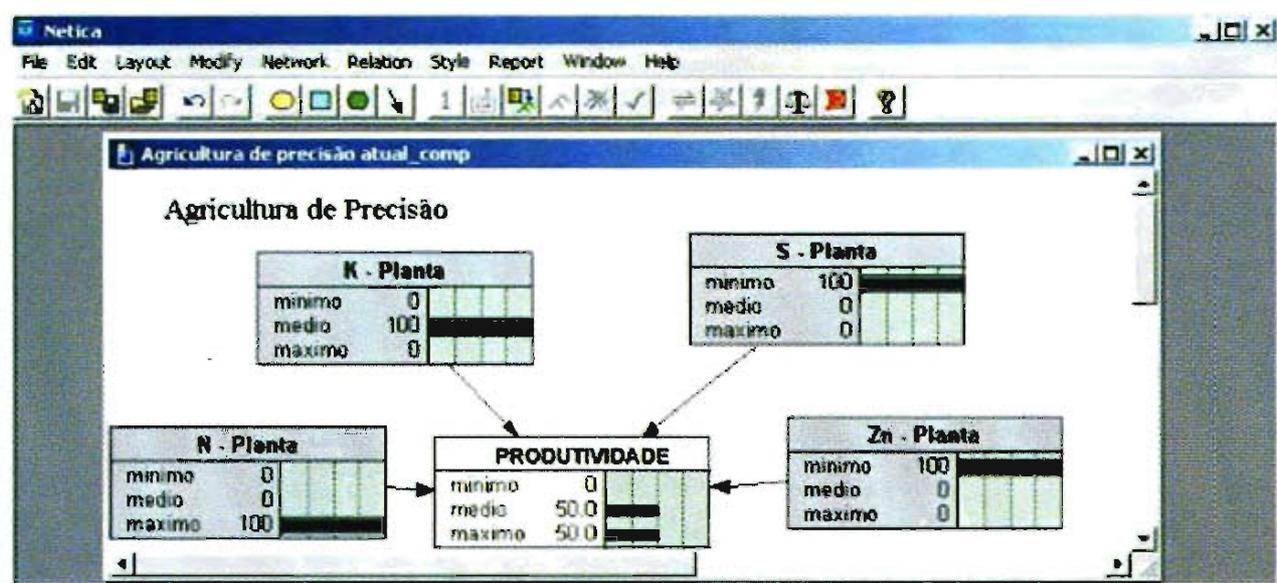


Figura 11. Simulação da produtividade considerando-se S e Zn = mínimo, K = médio e N = máximo.

Uma vez estabelecida a rede pode-se realizar diversos tipos de simulação: alterar os valores dos fatores químicos e obter a produtividade ou obter os valores de probabilidade dos parâmetros químicos a partir de um dado valor de produtividade. Esta é uma das opções mais interessantes, pois permite uma visão de causa/efeito a partir do efeito. A figura 12 apresenta o quanto os fatores químicos (K,N,S,Zn) devem ser combinados, para se obter uma produtividade máxima de soja nas condições locais.

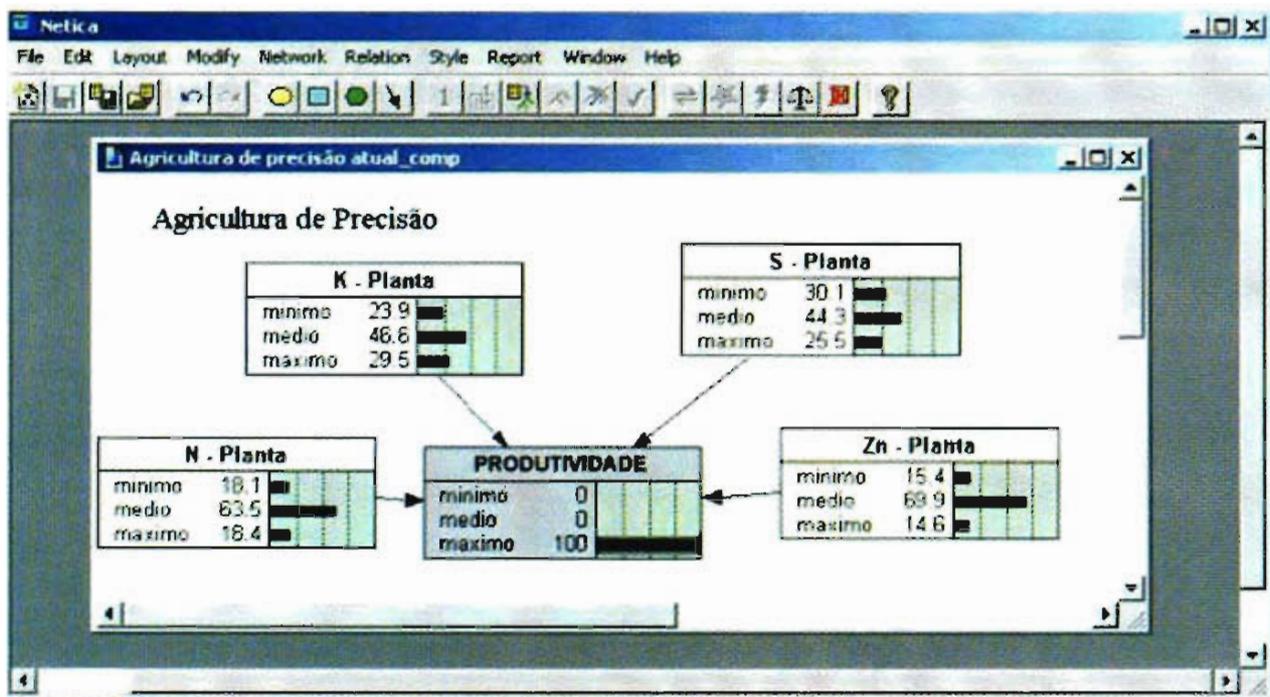


Figura 12. Obtenção da combinação dos fatores químicos limitantes simulando-se a produtividade máxima

Uso de Redes Neurais em Agricultura de Precisão para o Manejo da Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas.

A segunda técnica de análise espacial apresentada é a *Rede Neural* que avaliou a relação entre os parâmetros químicos e físicos do solo, dados de teores de nutrientes da soja e o mapa de produtividade obtido pela colheitadeira, de maneira que, uma vez treinada, a rede possa estimar os próximos mapas de produtividade. Esta técnica poderá ser utilizada, de forma distinta às redes bayesianas, na criação de um ambiente de simulação entre os parâmetros do solo e planta e a produtividade da soja a ser obtida com a variação destes valores nas condições locais do estudo.

Conceitos Básicos

A Rede Neural Artificial (RNA) é um modelo matemático capaz de fazer uma máquina computacional simular o funcionamento do cérebro humano com base no entendimento das estruturas de armazenamento e processamento de informação realizada pelo sistema nervo-

so. As RNA(s) são sistemas paralelos compostos por unidades de processamento simples (nodos) que computam determinadas funções matemáticas (normalmente não lineares). Tais unidades são dispostas em uma ou mais camadas interligadas por um grande número de conexões, geralmente unidirecionais. Na maioria dos modelos estas conexões estão associadas a pesos, os quais armazenam o conhecimento representado no modelo e servem para ponderar a entrada recebida por cada neurônio. A figura 13 ilustra as diversas camadas que compõem as RNA(s): a *camada de entrada* onde os sinais (padrões) são apresentados à rede; as *camadas Intermediárias ou escondidas* onde é efetuada a maior parte do processamento, através das conexões ponderadas e a *camada de saída* onde o resultado final é apresentado. A principal característica das Redes Neurais é a sua capacidade de adaptação e aprendizagem, isto é, a partir de um conjunto de exemplos a rede extrai as características necessárias para representar a informação fornecida, aprender e posteriormente gerar respostas para o problema.

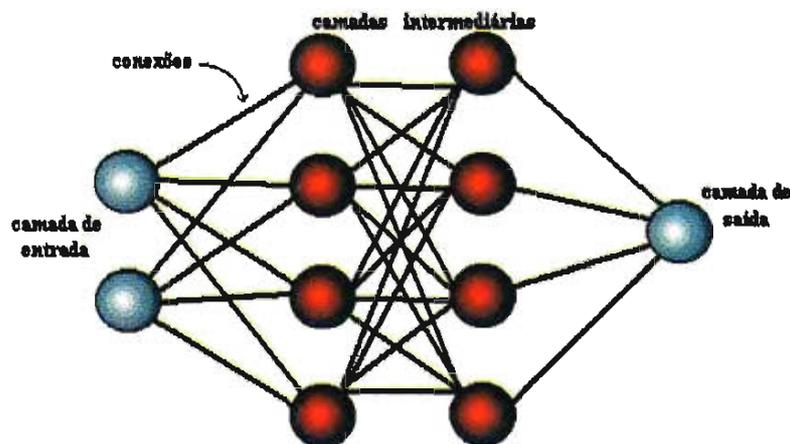


Figura 13. Camadas de uma Rede Neural Artificial.
(Fonte: Carvalho, 1999)

A principal vantagem de se utilizar redes neurais para geração de modelos e subsidiar simulações é aproveitar sua capacidade de aprender com os dados históricos e generalizar as respostas. A rede proposta para subsidiar estudos de agricultura de precisão para o manejo da fertilidade do solo e nutrição de plantas, será utilizada a fim de se correlacionar as variáveis de solo e planta com a produtividade. Desta forma, a cada ano essas informações alimentarão a nova rede aprimorando o aprendizado e, conseqüentemente, a previsão da produtividade de uma cultura.

É fácil imaginar que em uma rede neural com várias camadas, a saída de uma camada será a entrada da camada seguinte. Portanto, para calcular a saída final de uma rede neural basta calcular seqüencialmente as entradas e saídas por toda a rede neural. Para um maior aprofundamento sobre a teoria de Redes Neurais remeto o leitor a Nelson & Illingworth (1990), Carvalho, (1999), Haykin (2001).

Treinamento

Para que uma rede neural seja eficiente em reconhecer padrões e classificá-los, faz-se necessário, sobretudo, efetuar um treinamento dos dados com uma saída conhecida, isto é, um conjunto de dados de entrada para que se tenha uma resposta conhecida. Inicialmente o peso escolhido é aleatório, um *range* entre o máximo e mínimo é criado a partir dos dados de entrada. A matriz peso registra toda a variação dos dados de entrada e de saída. No processo de treinamento da rede os dados de entrada se propagam obtendo uma saída e um erro que é o somatório do quadrado das diferenças entre o valor previsto pela rede e o valor conhecido de saída.

$$erro = \sum_{k=1}^n (calculadok - realk)$$

Esse passo é de grande importância para o treinamento da rede neural, pois identificado os erros podemos corrigir os pesos, obtendo posteriormente um resultado adequado. O método utilizado para a correção de pesos neste trabalho foi o de retro-propagação (*backpropagation*), no qual a correção dos pesos é iniciada na última camada e prossegue em direção à primeira camada. Conforme ilustra a figura 14, os dados seguem da entrada para a saída no sentido *forward* e os erros da saída para a entrada no sentido *backward*.

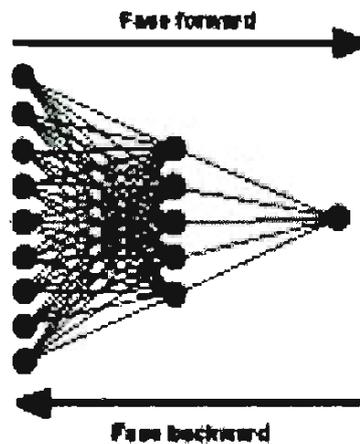


Figura 14. Fluxo de processamento do algoritmo de retro-propagação.

Materiais e Métodos

As variáveis utilizadas na rede neural foram os teores de pH, Al, Ca, Mg, S, P, K, C, Mn, Fe, Zn, CTC, V e Argila no solo a 0-10 cm obtidas conforme descrito no Capítulo 5. Os teores no tecido vegetal da soja foram: N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn na planta.

A rede neural foi estruturada no software MATLAB vs.6.5 (www.mathworks.com) através da ferramenta *toolbox* (*nntool*), a rede utilizada foi a *Backpropagation* (*perceptron MPL*).

Uma rede neural com muitas camadas pode requerer muito tempo de processamento, o que não é desejável. Entretanto, uma rede contendo poucas camadas muitas vezes não possui a capacidade para resolver determinado problema. Para a rede utilizada, *feed-forward backpropagation*, o número de camadas não deve ser maior que três, pois uma camada resolve problemas linearmente separáveis, duas camadas possibilitam a distinção de classes em regiões convexas tão complexas quanto forem o número de neurônios da primeira camada e três camadas possibilitam a formação de regiões arbitrariamente complexas no espaço das classes das amostras. Um outro problema é a quantidade de neurônios que cada camada deve conter. A utilização de grandes quantidades de neurônios faz com que a rede perca seu poder de generalização, porque estas possuem um elevado grau de liberdade, incapacitando-a a adquirir amostras do conjunto de treinamento. Entretanto, com poucos neurônios a rede não consegue convergir para uma resposta aceitável.

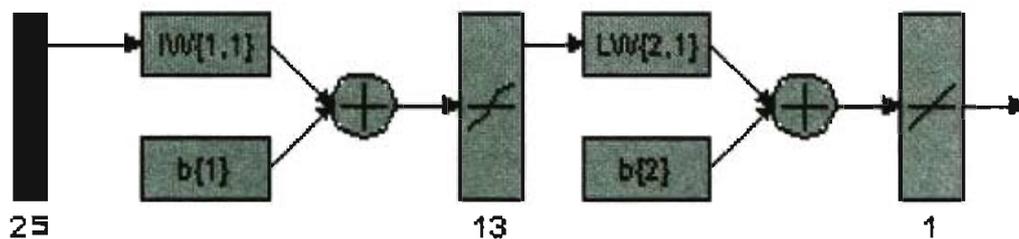


Figura 15. Arquitetura de RNA utilizada

A RNA utilizada possui duas camadas sendo a primeira com treze neurônios e a última com um neurônio (Figura 15). Há estudos recomendando que se inicie o treinamento da rede com um número de neurônios aproximadamente igual a metade do valor de entrada, que, neste caso, foram 25 (vinte e cinco). Assim sendo, o número de neurônios adotado na camada intermediária foi 13 (treze). A última camada deve possuir a quantidade de neurônios que se deseja como resposta e, no presente trabalho, a resposta seria o mapa de produtividade de soja.

No treinamento da rede deve-se observar sempre se o resultado gerado pela RNA está coerente com a resposta (valor conhecido previamente), pois a rede neural pode apresentar o chamado *overfit*, havendo necessidade de treiná-la várias vezes até a obtenção de resultados adequados. Estes valores conhecidos foram retirados do mapa de produtividade existente. A figura 16 destaca os pontos que compõem o arquivo de entrada, no qual a distribuição destes pontos foi realizada em função dos padrões evidenciados no mapa de produtividade.

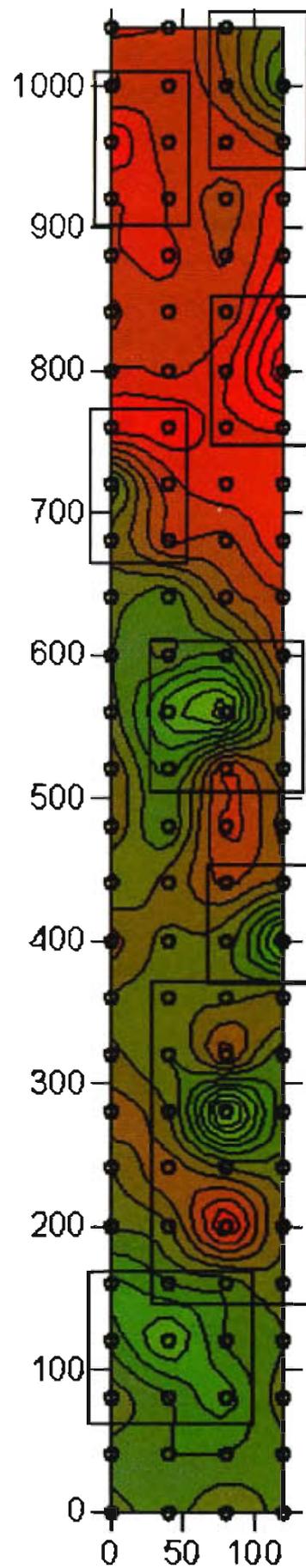


Figura 16. Mapa de Produtividade Indicando as Amostras Utilizadas na RNA.

Para garantir que o resultado seja satisfatório deve-se validar a resposta. Para tanto utilizam-se dois procedimentos: 1) Entrar com o vetor de validação no treinamento da rede para garantir que não haja "overfit" e; 2) Após o treinamento, simular uma entrada com respostas conhecidas para verificar o erro ocorrido em cada ponto.

Resultados e Discussão

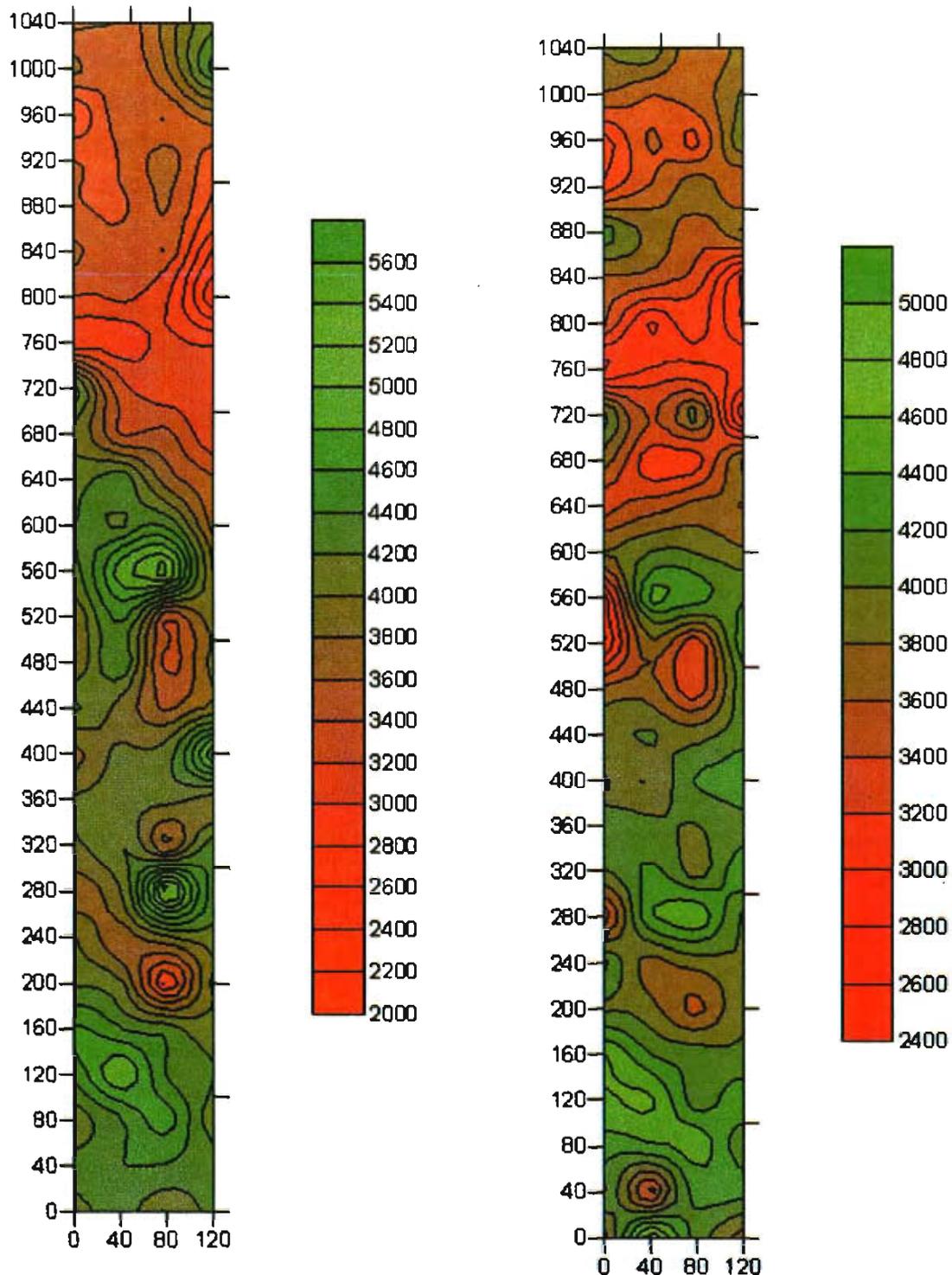


Figura 17. Mapa de Produtividade de soja (em kg ha⁻¹) gerado pela colheitadeira (a) e simulado pela rede neural (b).

A produtividade total da área é de 407.750 kg e a produtividade simulada pela RNA é de 403.054 kg, uma diferença de 1,1%, ou seja, 4.696 kg numa área de 12,4 hectares. Observa-se, na figura 17, que as características da área foram preservadas, ou seja, os locais de boa ou baixa produtividade, de uma forma geral, se mantiveram. No que diz respeito à espacialização de áreas consideradas com produtividade alta ou baixa esta técnica conseguiu reproduzir a realidade da área, porém houve um deslocamento nas extremidades reduzindo o intervalo entre o máximo e o mínimo. Os resultados podem ser aprimorados com uma intensificação no treinamento, ajustes na rede, dependendo do nível de exigência necessário pelo usuário, proprietário rural ou tomador de decisão. Intensificando-se o treinamento, pode-se refinar o resultado e, uma vez treinada, a RNA poderá ser utilizada para fazer simulações de como será a produtividade, variando-se os valores dos parâmetros químicos. Para isto, basta processar a rede (já treinada) com novos valores de entrada.

Conclusões

As redes *bayesianas* podem ser utilizadas em projetos de agricultura de precisão como uma ferramenta de análise de dados, tanto para simular o comportamento da produtividade em função da variação dos parâmetros químicos, quanto para simular a probabilidade destes parâmetros, dada uma determinada situação de produtividade desejável. As redes neurais artificiais apresentam forte potencial para serem utilizadas no estabelecimento de relação entre as variáveis de solo e teores de nutrientes das plantas para subsidiar a simulação de mapas de produtividade.

As Redes Bayesianas bem como as Redes Neurais Artificiais não são soluções incontestáveis e inequívocas para agricultura de precisão, mas podem ser utilizadas como *ferramentas* para subsidiar estes projetos. Este capítulo visou descrever uma experiência inicial nesta direção e lançar uma contribuição no sentido de sugerir o uso destas técnicas no contexto da *integração* das inúmeras informações geradas em projetos de agricultura de precisão e na simulação de mapas de produtividade.

Referências Bibliográficas

BERNARDO, J. M.; SMITH, A. F. M. **Bayesian theory**. Chichester: John Wiley & Sons, 1994.

BITTENCOURT, G. **Inteligência artificial: ferramentas e teorias**. Campinas: UNICAMP - Instituto de Computação, 1996. 240 p.

BONHAM-CARTER, G. F. **Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS**. Kidlington: Pergamon, 1999. 391 p.

CÂMARA, G.; MOREIRA, F.; ALMEIDA, R. inferência geográfica e suporte à decisão. In: CÂ-

MARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. **Introdução à ciência da geoinformação**. Cap. 9. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro>>. Acesso em: 15 Jul. 2004.

CARVALHO, A. P. L. F. **Redes neurais artificiais**. Disponível em: <<http://www.icmsc.sc.usp.br/~andre/neural1.html>>. Acesso em: 7 Abr. 1999.

CASTILLO, E.; GUTIÉRREZ, J. M.; HADI, A. S. **Expert systems and probabilistic network models**. New York: Springer Verlag, 1997. Disponível em: <<http://personales.unican.es/gutierjm/BookCGH.html>>. Acesso em: 15 Set. 2004.

HAYKIN, S. **Redes neurais: princípios e prática**. 2.ed. Porto Alegre: Bookman, 2001. 900 p.

HOWSON, C.; URBACH, P. **Scientific reasoning: the bayesian approach**. Chicago: Open Court, 1993. 120 p.

JENSEN, F. **An introduction to bayesian networks**. London: UCL Press, 1996. 256 p.

MATLAB – User's Guide. New York: The Math Works, 2003. CD ROM.

MURPHY, K. **A brief introduction to graphical models and bayesian Networks**, 1998. Disponível em: <<http://www.ai.mit.edu/~murphyk/Bayes/bnintro.html>>. Acesso em: 10 Mar. 2004.

NELSON, M. M.; ILLINGWORTH, W. T. **A practical guide to neural nets**. Massachusetts: Library of Congress Cataloging in Publication Data, 1990. 344 p.

NETICA 1.12 for Windows. Disponível em: <<http://www.norsys.com>>. Acesso em: 22 Jun. 2004.

RICH, E. **Artificial intelligence**. New York: McGraw-Hill Book Company, 1983. 325 p.

STRASSOPOULOU, A. **Bayesian and neural network for geographic information processing**. Amsterdam: Elsevier, 1996. P. 4-5.

TARONIA, F.; BIEDERMANN, A.; GARBOLINOD, P.; AITKENE, C. G. G. **A general approach to bayesian networks for the interpretation of evidence**. *Forensic Science International*, Amsterdam, v. 139, p. 5-16, 1996.



Agricultura de Precisão: Visão de Uma Instituição de Pesquisa Aplicada

Leandro M. Gimenez

Resumo

A Fundação ABC, uma instituição de pesquisa aplicada e assistência técnica a produtores da Região dos Campos Gerais, Paraná, pode ser considerada pioneira na pesquisa e aplicação das técnicas de Agricultura de Precisão. Este capítulo demonstra os motivos que levaram técnicos e produtores a iniciarem a pesquisa em Agricultura de Precisão em 1998 e os desafios enfrentados. São apresentadas as ferramentas inicialmente utilizadas como o mapeamento da produtividade, a videografia, a amostragem em grade, a condutividade elétrica do solo por meio de sensor portátil e o mapa de solos em escala 1:10.000. São relatadas as dificuldades surgidas na interpretação dos dados obtidos por diversas técnicas e as interferências nas áreas com base nos diagnósticos estabelecidos.

Introdução

A Fundação ABC é uma instituição que realiza pesquisa aplicada e prestação de serviços aos produtores associados e cooperados das Cooperativas Agropecuária Capal (Arapoti), Batavo e Castrolanda, formando o chamado Grupo ABC. Sua região de atuação abrange os municípios de Itaberá, Itararé, Arapoti, Ventania, Piraí do Sul, Telêmaco Borba, Tibagi, Castro, Carambeí, Ponta Grossa, Ortigueira entre outros da região centro-leste do estado do Paraná e no estado de São Paulo. Nesta região estão cerca de 200.00 hectares de áreas produtoras de grãos, além de uma bacia leiteira de 600.000 litros diários. É marcante a influência da colônia holandesa nas cooperativas associadas e nas ações da Fundação ABC. Dentre os exemplos de tecnologias difundidas na região está o plantio direto que se desenvolveu em grande parte devido ao empenho dos produtores locais há mais de 25 anos. Atualmente o sistema é utilizado na grande maioria das propriedades onde se produzem soja, milho, feijão, trigo e aveia branca respeitando-se a rotação de culturas.

Atualmente a Fundação ABC desenvolve trabalhos de pesquisa nas áreas de Fitotecnia, Fitossanidade, Fertilidade do solo, Herbologia, Agrometeorologia, Nutrição e Pastagens e Mecanização Agrícola. Sua área de abrangência apresenta como características a alta variabilidade em clima, topografia movimentada e solos distintos. Estes motivos fizeram com que a instituição, historicamente, se preocupasse com a adaptação das tecnologias às condições

regionais, sendo criados para isso, campos experimentais nos municípios de Castro, Ponta Grossa, Tibagi e Arapoti.

A difusão de tecnologias criadas ou validadas pela Fundação ABC é realizada em reuniões com produtores, dias de campo e principalmente através de uma assistência técnica de qualidade ligada às cooperativas e possuindo estreita relação com os produtores e pesquisadores.

Os estudos na área de Agricultura de Precisão tiveram início na safra de verão de 1998 em parceria com o Departamento de Engenharia Rural da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ/USP), transformando-se em um projeto de investigação cujos trabalhos se estenderam até o término da safra 2003/2004. Ao longo destes anos o foco sempre foi determinar a viabilidade técnica e econômica do uso deste novo conceito de gestão aplicado às condições específicas do sistema produtivo do grupo ABC.

Foram contemplados no projeto o estudo de ferramentas para o levantamento da variabilidade – monitores de colheita, imagens aéreas, vistorias a campo, amostragem georreferenciada de plantas e solo, classificação e mapeamento de solos, mapeamento da condutividade elétrica do solo e mapeamento da resistência à penetração do solo.

Alguns testes foram realizados para verificar as possibilidades de tratamento da variabilidade – calagem, adubação potássica, adubação nitrogenada.

Os dados coletados estão se transformando em informações que devem nortear os próximos passos do grupo ABC em relação à adoção do conceito e de ferramentas da agricultura de precisão. Ao longo dos anos foram gerados pelo menos 60 mapas de colheita, 1500 resultados de amostragem de solo georeferenciados, 300 mapas de teores de nutrientes no solo, 40 mapas de condutividade elétrica do solo além de uma série de informações das visitas realizadas nas áreas de estudo.

Notou-se que há variabilidade nos mapas de colheita e que essa variabilidade, quando gerenciada, viabilizará a aquisição de monitores de colheita. Monitores de colheita apresentaram informações muito úteis, mas também apresentaram uma série de erros e restrições de uso. Os resultados das classificações e mapeamentos do solo apontam para a possibilidade de se utilizar ferramentas da agricultura de precisão na calagem. Ensaio realizados para avaliar a resposta às aplicações de fertilizantes apontam para o caminho de redução de dose ou redistribuição visando o fornecimento de doses mais elevadas para áreas que historicamente apresentam maior potencial produtivo. A topografia e os diferentes tipos de solo em um mesmo talhão têm grande influência na variabilidade da produtividade (Ver Capítulo 6). As condições físicas do solo apresentaram maior relação com o rendimento das culturas que as condições químicas. Ferramentas para medir a variabilidade nas condições físicas do solo são de grande valor para compreender a variabilidade no rendimento das culturas. Conforme a

Fundação ABC se envolvia com o conceito de agricultura de precisão uma série de questionamentos surgiram havendo algumas ações no sentido de aproveitar os conhecimentos adquiridos. Prova disso foi a criação de áreas de suporte e pesquisa, como é o caso da Agrometeorologia e do Laboratório de Informações Geográficas. Foram realizados investimentos expressivos para o reconhecimento da região como um todo: Foi adquirida uma base cartográfica; construída uma rede de estações meteorológicas; produzidos mapas de classificação do solo e desenvolvido um banco de dados para armazenar as informações sobre as tecnologias empregadas e os resultados em produtividade para cada talhão produtivo do grupo ABC.

As atividades de pesquisa na área de agricultura de precisão visando benefícios na escala de talhão e da propriedade continuam em uma fase na qual a Fundação ABC trabalha com os produtores interessados na tecnologia fornecendo a estes o suporte técnico necessário para o aproveitamento de ferramentas e desenvolvimento de novos conceitos.

A demanda para a pesquisa: Agricultura de Precisão traz benefícios?

Em reunião para apresentação de resultados de pesquisa no ano de 1998 grande surpresa tomou conta de produtores do grupo ABC: foi apresentado um mapa de produtividade de uma lavoura de 23ha de soja no qual havia regiões com produtividades inferiores a 1t/ha e regiões onde essa produtividade era superior a 5t/ha. Em algumas semanas surgiu um projeto para responder questionamentos de produtores e da assistência técnica. Todos queriam saber qual o motivo da variabilidade encontrada no mapa de produtividade e quanto poderiam ganhar se “corrigissem” o problema.

A partir da safra de inverno de 1998 iniciaram-se trabalhos visando compreender a variabilidade para tratá-la da maneira mais adequada possível, considerando as condições locais: o sistema plantio direto era utilizado há mais de 20 anos, as condições da fertilidade do solo eram boas, os solos foram, ao longo dos anos, corrigidos e a rotação de culturas sempre procedida. Nos anos seguintes, um volume considerável de dados foi coletado e hoje podemos afirmar com segurança quando nos perguntam sobre os benefícios da agricultura de precisão: não sabemos e provavelmente não chegaremos, em breve, a uma resposta que atenda a todos os nossos associados.

Para se abordar a questão de benefícios obtidos através da utilização da agricultura de precisão é fundamental definir o que se entende sobre este assunto.

Uma definição razoável seria: agricultura de precisão é um método de gestão do sistema produtivo que utiliza ferramentas avançadas para o levantamento da variabilidade presente e seu tratamento, visando a maximização e sustentabilidade dos retornos.

É comum a adoção de uma ou mais ferramentas da agricultura de precisão sem que isso represente, entretanto, que se está gerenciando o sistema produtivo de um modo diferente. Desta forma os benefícios podem ocorrer ao se utilizar somente uma ferramenta disponível valendo ressaltar que este benefício tende a ser inferior ao obtido caso o conceito seja aplicado de modo mais abrangente. Considerando que a variabilidade dos fatores de produção ocorrem em escalas e intensidades diferentes para cada propriedade ou região produtiva, é evidente que as ferramentas a serem utilizadas serão diferentes, assim como os possíveis benefícios obtidos. O papel da pesquisa na determinação da rentabilidade da agricultura de precisão é, em grande parte, o de quantificar a variabilidade.

Desenvolvimento da Pesquisa

Dentre as ferramentas importantes para quantificar a variabilidade encontram-se os sistemas para o *mapeamento da produtividade*. O fato que torna indiscutível o valor destes equipamentos é que eles permitem conhecer o resultado final de todas as tecnologias empregadas na produção: a produtividade. O acompanhamento da variabilidade na produtividade das culturas ao longo dos anos permitiu identificar que para a maior parte dos talhões, as manchas com produtividades diferentes permaneciam no mesmo local.

Do ponto de vista do gerenciamento localizado, esta informação é fundamental para traçar estratégias para o tratamento e convívio com esta variabilidade. A análise dos dados coletados durante o mapeamento da colheita, permite realizar uma série de exercícios na tentativa de quantificar o custo da variabilidade. Se por exemplo em um talhão produtivo tivermos uma produtividade média de 3500kg/ha de soja e considerarmos que o custo de produção seja de R\$800,00/ha, então teremos um custo de R\$13,00/saca de soja. Ao realizar o mapeamento da produtividade veremos que temos neste mesmo talhão manchas que variam de 1500kg/ha até 5000kg/ha e então teremos respectivamente os custos de R\$32,00 e R\$9,60/saca de soja. É possível gerenciar esta diferença e tirar proveito dela? Grande parte desta pergunta pode ser respondida pela caracterização do tamanho e da distribuição destas manchas, o que o mapeamento de produtividade permite fazer com acurácia, desde que se tenha uma série histórica de mapas – 2 a 3 safras/mapas para milho e 3 a 4 safras/mapas para soja.

Nas condições das áreas que estudamos, detectamos que as manchas apresentam tendência de se manter no mesmo local (Figura 1), embora para uma minoria dos talhões isto não tenha ocorrido. Em talhões de 20 a 30 hectares foram identificadas 2 a 3 unidades que poderiam ser gerenciadas de modo distinto do ponto de vista da produtividade.

Com relação à intensidade da variabilidade, os coeficientes de variação para os dados de rendimento dos mapas de produtividade, reunidos ao longo de 5 anos, variaram entre 15% e 35% para soja e 10% e 35% para milho. Isto significa dizer que os dados de rendimento variaram

entre 15 e 35% em relação à média de produção dos talhões para a soja e 10 a 35% no caso do milho. A maneira como esta variação ocorreu pode ser vista no exemplo da Tabela 1.

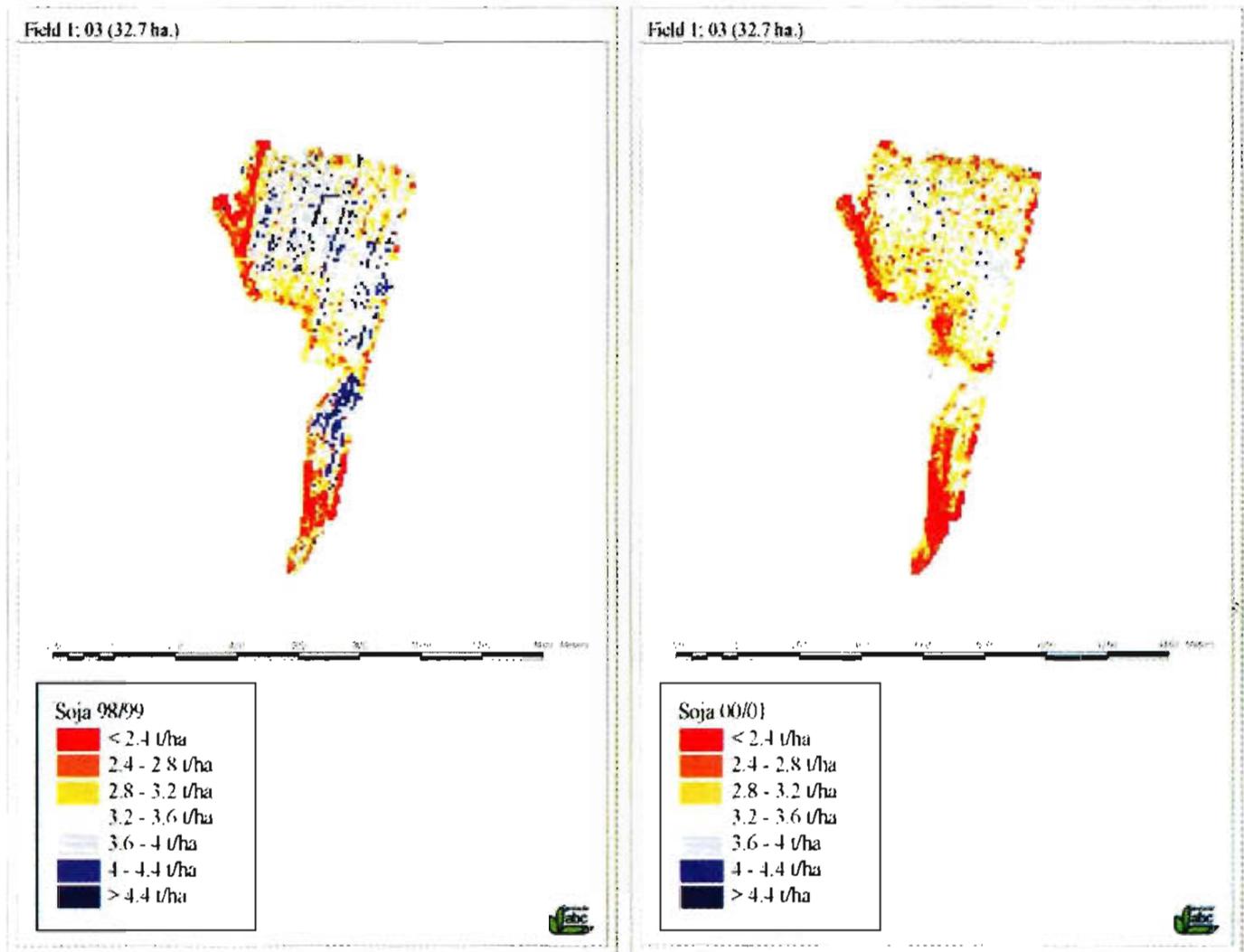


Figura 1. Mapas de produtividade de duas safras de soja para um mesmo talhão - As manchas nesta área tendem a permanecer nos mesmos locais.

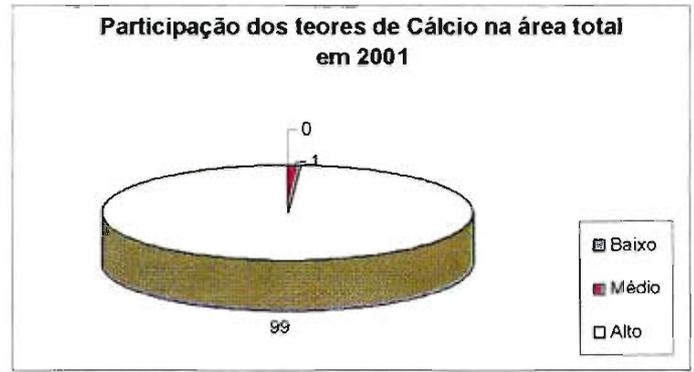
Na tabela 1 os dados obtidos com o monitor de produtividade foram organizados de acordo com a produtividade encontrada em áreas correspondentes a 10% da área total de um talhão. A produtividade média foi de 2990kg/ha sendo que os 10% da área com os menores valores para a produtividade obtiveram uma média de 2307kg/ha e os 10% da área com maiores valores de produtividade apresentaram uma média de 3630kg/ha. Acreditamos que este tipo de análise seja o primeiro passo para se obter informações sobre os benefícios econômicos que a agricultura de precisão possa trazer para uma determinada região, propriedade ou unidade produtiva que hoje é gerenciada de modo uniforme.

Tabela 1. Exemplo de metodologia que pode ser utilizada para quantificar os efeitos da variabilidade na produção de soja para os resultados econômicos.

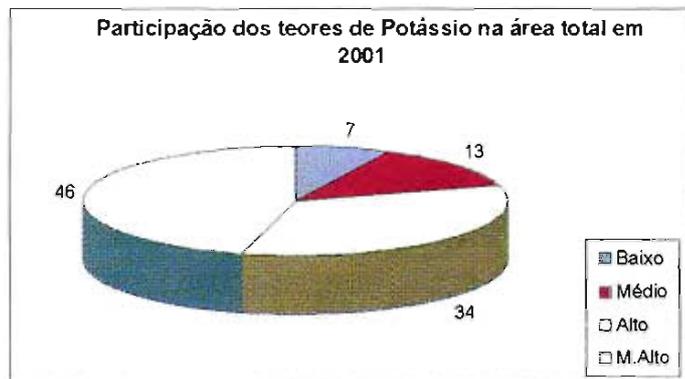
Rendimento (kg/ha)	Área (%)	Custo (R\$/ha)	Custo (R\$/sc)	Resultado (R\$/sc)
2307	10	950	24,7	20,3
2629	10	950	21,7	23,3
2766	10	950	20,6	21,4
2873	10	950	19,8	25,2
2971	10	950	19,2	25,8
3055	10	950	18,7	26,3
3132	10	950	18,2	26,8
3214	10	950	17,7	27,3
3319	10	950	17,2	27,8
3630	10	950	15,7	29,3

Outra ferramenta utilizada pela pesquisa no estudo da agricultura de precisão é a caracterização da *variabilidade do solo*. Além de suporte para as plantas, o solo é o meio do qual as plantas retiram a água e os nutrientes necessários ao seu desenvolvimento. Sendo formado por materiais e processos distintos, o solo possui, por natureza, uma variabilidade considerável que se apresenta com escalas e padrões específicos de acordo com a região considerada (planícies, várzeas, planaltos), relevo local (planos, côncavos, convexos) e posição topográfica (topo, meia encosta, base de encosta). A variabilidade encontrada nos solos agrícolas também pode ter sido criada por práticas do homem nas atividades de produção, por exemplo.

Ao estudarmos o solo é comum dividi-lo em três grandes partes: física, química e biológica. A variabilidade ocorre em cada uma destas partes e uma parte tem influência sobre as demais. Tradicionalmente temos estudado e valorizado as condições químicas do solo, devido à alta relevância da adubação no custo da produção, ótimos resultados obtidos ou relativa praticidade em fornecer este ou aquele corretivo e aplicar um ou outro fertilizante. Em nossos estudos, quando iniciamos as avaliações da variabilidade dos solos na tentativa de explicar as manchas encontradas nos mapas de colheita, a primeira ação foi a amostragem do solo em grade visando o *mapeamento dos teores de nutrientes no solo*. As amostragens realizadas com uma densidade de 2 amostras/hectare com profundidade de 0 a 10cm apresentaram mapas com valores elevados de teores de nutrientes e com grande variabilidade. As relações existentes entre os teores de nutrientes e a produtividade foram desanimadoras. Na maioria das vezes não ocorria uma relação ou em alguns casos a relação era oposta àquela esperada – como, por exemplo, teores adequados de fósforo no solo associados a baixas produtividades. Nas Figuras 2 a 5 são apresentados alguns resultados médios para as amostragens que foram realizadas em 13 talhões no ano de 2001. Os teores de fósforo encontravam-se nas classes médio a muito alto, assim como os teores de cálcio, magnésio e para a maioria dos demais nutrientes. Para o potássio e para a saturação por bases foi encontrado maior número de classes.



Figuras 2 e 3. Participação da área amostrada nas classes de teores dos nutrientes fósforo e cálcio.



Figuras 4 e 5. Participação da área amostrada nas classes de teores do potássio e da saturação por bases.

Após o estudo das relações existentes entre os parâmetros químicos do solo e a produtividade, chegou-se à conclusão de que haviam fatores que não estavam sendo levados em consideração até o momento e que deveriam ser avaliados. Foram realizadas amostragens de solo em grade para iniciar uma linha de trabalho visando estabelecer a relação entre os parâmetros físicos do solo e o rendimento das culturas. Amostragens realizadas nas mesmas áreas demonstraram haver porções dos talhões que possuíam diferentes classes de textura do solo (Figura 6).

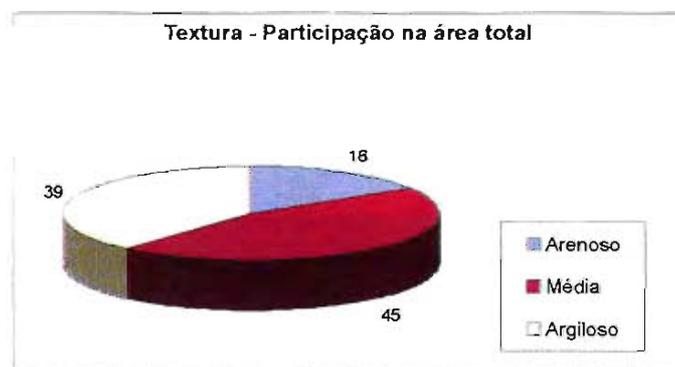
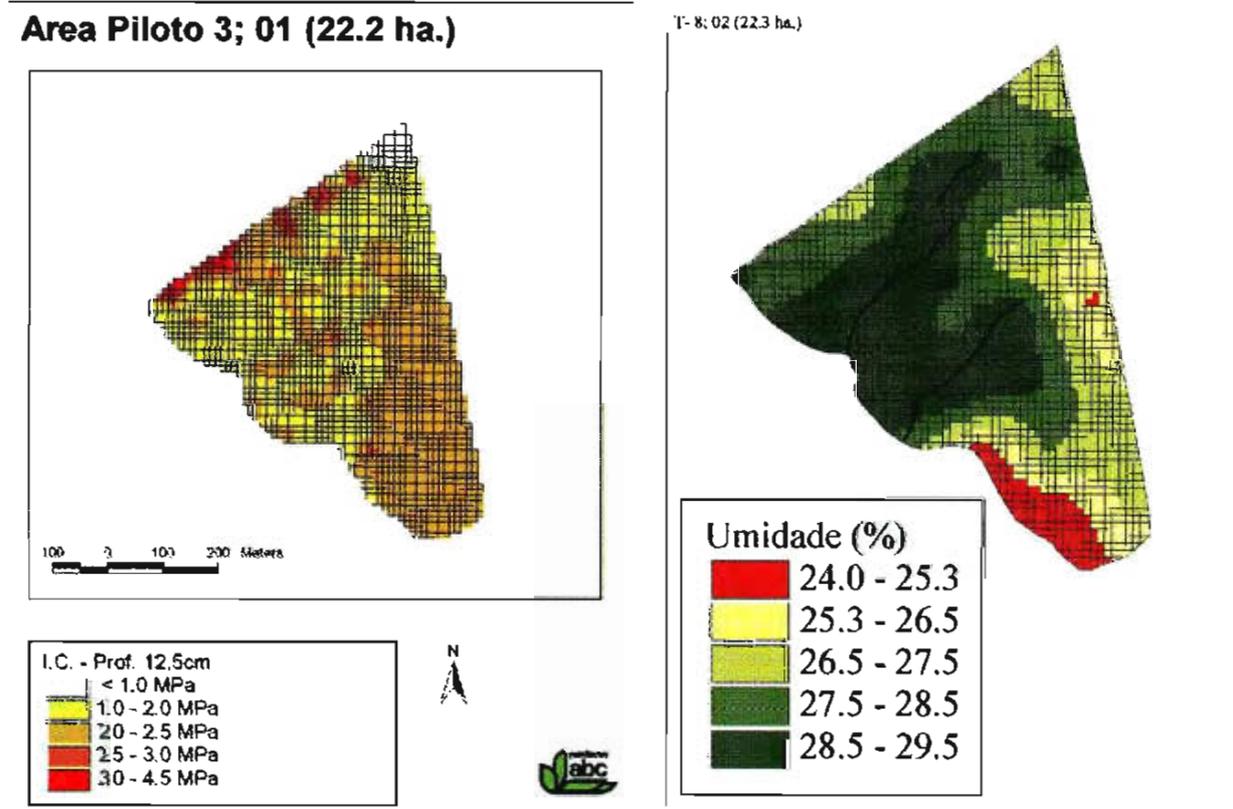


Figura 6. Participação da área amostrada nas classes de textura do solo.

A partir do relacionamento de parâmetros químicos do solo com a textura, a compreensão das relações entre teores de nutrientes, condições físicas do solo e produtividade foi possível. Pode-se dizer que não haviam relações diretas entre o valor de um determinado teor de nutriente no solo e a produtividade, antes disso o teor do nutriente estava relacionado ao tipo de solo (aqui entendido como textura do solo), e o solo era um forte condicionador do rendimento. Naturalmente é necessário fazer ressalvas no sentido de que se parte do pressuposto que o trabalho foi conduzido em áreas cultivadas no sistema de plantio direto há mais de 20 anos, onde os teores de nutrientes eram elevados e, na maioria das vezes, a correção do solo havia sido realizada.

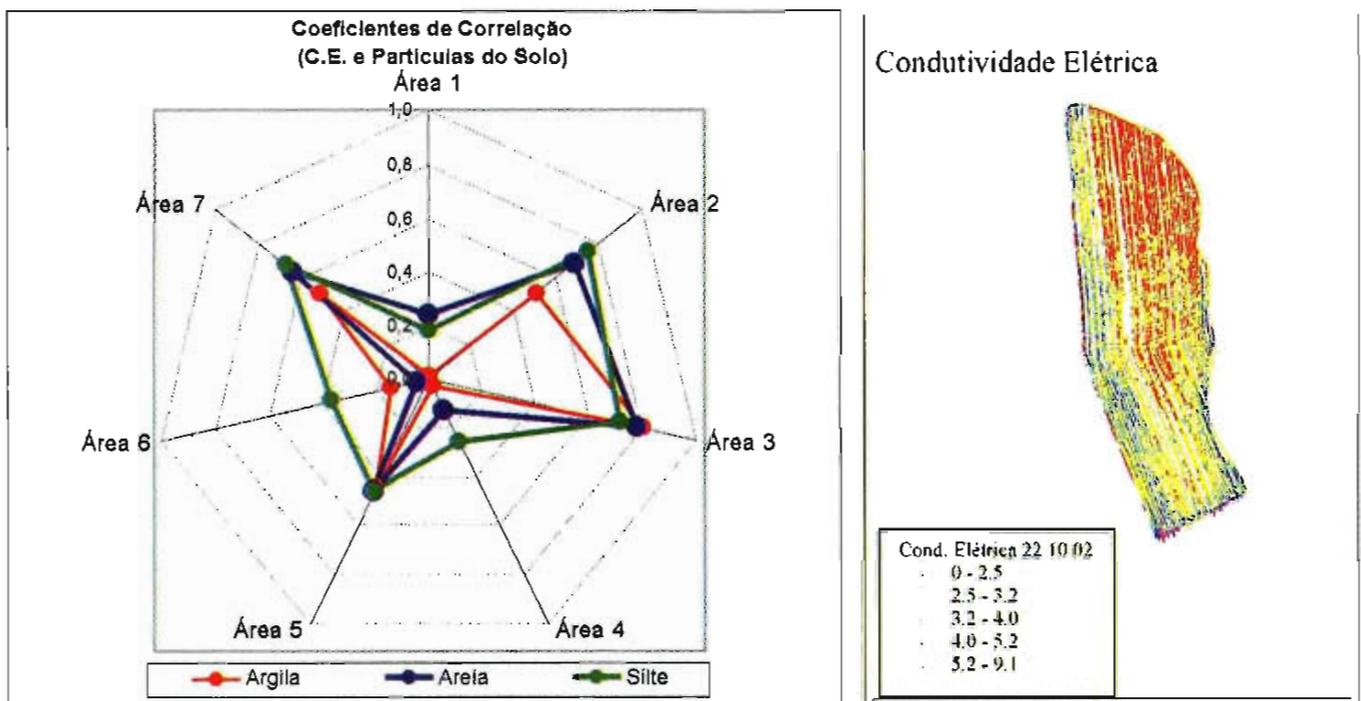
Sempre foi reconhecida a importância dos parâmetros físicos do solo para o desenvolvimento das plantas e para produção, entretanto, na região em que os estudos foram realizados, o sistema plantio direto é utilizado há vários anos e não há restrições climáticas que resultem de deficiência hídrica no solo. Deste modo, tais parâmetros tiveram sua importância reduzida em muitos casos.

Foram realizadas avaliações para estimar a variabilidade dos *parâmetros físicos do solo* e sua relação com a produtividade. Em alguns talhões foram realizadas avaliações para verificar a ocorrência de impedimentos físicos para o desenvolvimento do sistema radicular das plantas. Foram produzidos mapas representando a resistência à penetração do solo e atualmente estudam-se parâmetros relacionados à capacidade de retenção de água pelo solo.



Figuras 7 e 8. Mapas representando a resistência à penetração a 12,5cm de profundidade expressa em MPa e porcentagem de umidade gravimétrica na faixa de 0 a 20cm de profundidade em um talhão de 23ha do município de Castro/PR.

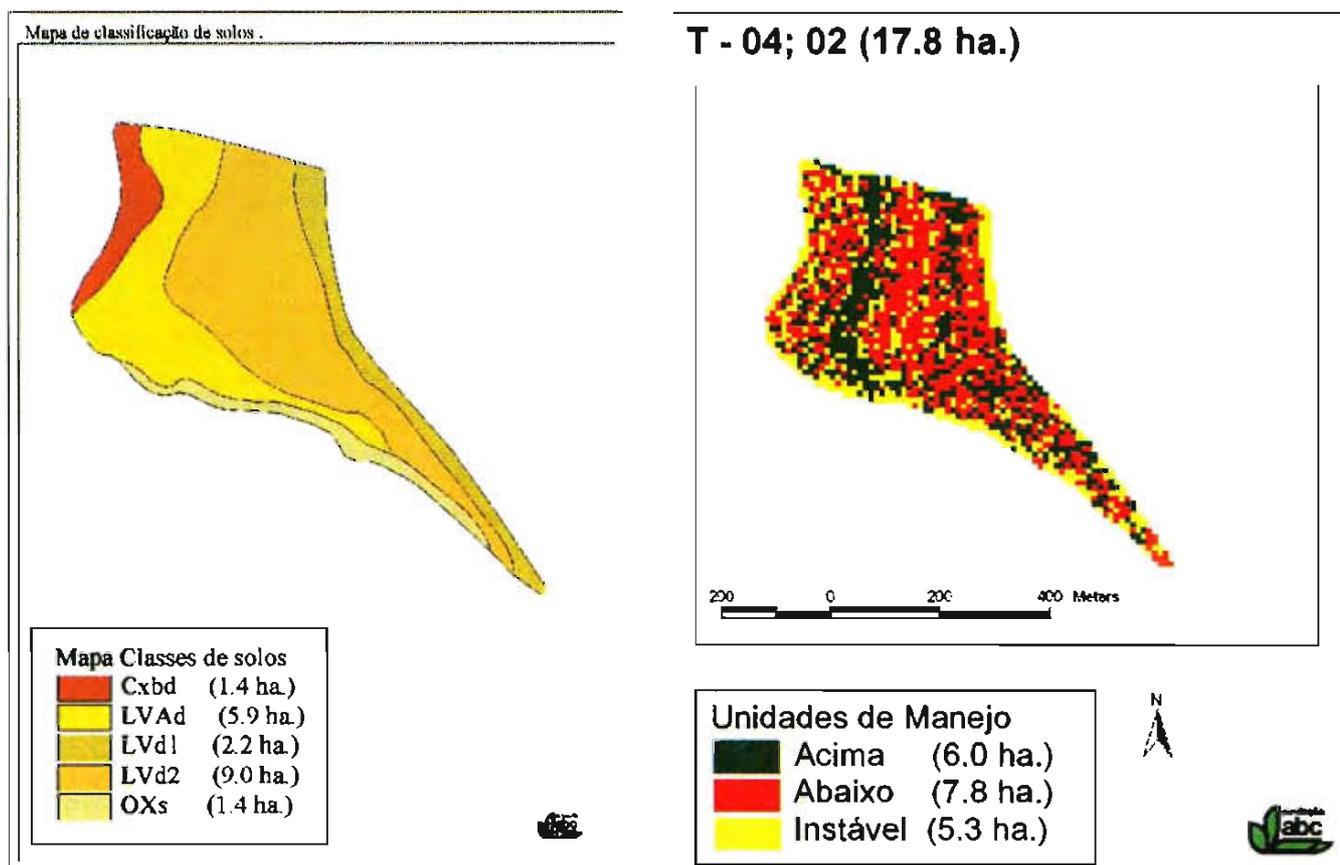
Avaliou-se também a condutividade elétrica do solo em uma série de talhões, apresentando, este fator, íntima relação com a umidade do solo. Embora o equipamento tenha a capacidade de identificar regiões com texturas distintas, os mapas gerados foram bastante influenciados pela umidade devendo este fator ser sempre considerado. Os coeficientes de correlação apresentados na Figura 9 representam o quanto a relação entre as leituras de condutividade elétrica do solo se relacionaram com a textura do solo. Quanto mais próximos de 1 maior a relação. Pôde-se notar que os coeficientes variaram sensivelmente entre as áreas avaliadas no talhão de 25ha (Figura 10).



Figuras 9 e 10. Coeficientes de correlação entre as leituras de condutividade elétrica do solo na profundidade de 0 a 30cm e a participação das partículas na textura do solo na profundidade de 0 a 10cm para 7 talhões. Mapa de condutividade elétrica na profundidade de 0 a 30cm em um talhão de 25ha em Carambel/PR.

Considerando toda a variabilidade encontrada nos parâmetros físicos e químicos do solo decidiu-se realizar a classificação e mapeamento do solo nos talhões onde os estudos estavam sendo realizados. Os mapas de classificação do solo já vêm sendo empregados em áreas de produção das agroindústrias como as usinas de açúcar e álcool, indústrias da madeira e celulose e indústria do suco de laranja. Para estas empresas erros no planejamento devido ao desconhecimento do solo cultivado podem ocasionar problemas enormes pois os ciclos de produção são longos, assim como os custos de implantação. Por se tratarem de agroindústrias é fundamental um planejamento adequado para que a matéria prima não falte e, pelo fato de terem esta preocupação, estas empresas subdividem suas áreas produtivas em função dos diferentes tipos de solo e passam a gerenciá-las de modo diferente.

Na Figura 11 é apresentado um mapa pedológico ou de classificação de solos de um talhão de 16ha. O mapeamento foi realizado em uma escala de 1:10.000 e permitiu identificar 5 solos com classes diferentes. A Figura 12 representa o mapa de unidades de manejo no mesmo talhão da Figura 11. As unidades representam o comportamento da produtividade em relação à média de produção do talhão durante 4 anos. Em verde temos as regiões que apresentaram produtividade superior à média. Em vermelho as regiões que apresentaram produtividade inferior e em amarelo as regiões onde a produtividade variou ao longo dos anos. Nota-se que há uma relação entre os mapas e neste caso há uma influência do tipo de solo na produtividade. As regiões ao sul - na bordadura do talhão - apresentam produtividades variadas ao longo do ano (amarelo) o que pode ser associado ao tipo solo que ocorre nesta porção do talhão. Trata-se de um ORGANOSSOLO que influencia muito a produtividade de acordo com as condições climáticas, podendo ocorrer danos severos em anos muito úmidos, por exemplo, quando ocorre acúmulo de água.



Figuras 11 e 12 . Mapa de classificação do solo (Cxbd: Cambissolo Háplico Tb Distrófico; LVAd: Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico; LVd: Latossolo Vermelho Distrófico; OXs: Organossolo Háplico Sápico) e mapa de unidades de manejo para um talhão de 18ha na região de Tiagi/PR.

Para as áreas estudadas foram encontradas as seguintes classes do 1º nível categórico do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos: LATOSSOLO, CAMBISSOLO, GLEISSOLO, ORGANOSSOLO, NEOSSOLO e PLINTOSSOLO. Estas classes tiveram influências distintas

para a produtividade de soja e de milho. Cerca de 70% da área mapeada se apresentava sob a classe LATOSSOLO, das quais ocorriam, no 2º nível categórico, as seguintes classes: LATOSSOLO VERMELHO AMARELO, LATOSSOLO AMARELO e LATOSSOLO BRUNO. Estas por sua vez se subdividiam até chegar ao 5º nível categórico e apresentavam características e propriedades que influenciavam a produtividade de modo bastante distinto. Na somatória entre as 12 áreas estudadas chegou-se ao total de 59 unidades de mapeamento em um total de 290ha.

Além de mapear o solo e a produtividade das culturas também foram realizadas visitas aos talhões durante as diferentes fases de desenvolvimento das culturas na tentativa de identificar regiões com comportamento diferente, problemas operacionais, ocorrência de pragas, doenças e plantas daninhas. Estas visitas tiveram importância na eliminação de dúvidas durante a interpretação dos mapas de produtividade. A demarcação de áreas que apresentavam problemas como a incidência de doenças, problemas de drenagem, problemas operacionais (distribuição de fertilizantes, falhas no plantio, regiões de manobra), influência das bordaduras e o traçado de curvas de nível e do percurso de escoamento da água foram de grande utilidade.

Este tipo de prática é bastante lento e seria interessante se houvesse outra maneira de realizar esta operação. Uma ferramenta que foi utilizada, ainda que de modo incipiente, é a videografia aérea. Através desta técnica foi possível identificar áreas com comportamento distinto em um mesmo talhão. As câmeras foram instaladas em aviões que sobrevoaram as lavouras em dias claros com ausência de núvens. As imagens foram realizadas na fase de florescimento de modo, quando não havia mais práticas futuras para a correção de possíveis problemas (adubação, controle de ervas). As imagens de videografia aérea auxiliaram na compreensão dos mapas de produtividade.

Acreditamos que o uso da videografia aérea nas fases iniciais de desenvolvimento das plantas, seguida de uma visita a campo para diagnosticar as possíveis manchas detectadas, seria uma boa maneira de localizar e até mesmo tratar parte da variabilidade em uma mesma safra.

Interferências realizadas

Experimentos foram conduzidos visando obter as respostas para tratamento diferenciado com corretivos, fertilizantes, materiais genéticos e populações de plantas diferentes.

Em um talhão de 24ha localizado no município de Ponta Grossa, foi aplicado calcário em faixas, realizada uma amostragem de solo em grade e obtido o mapa de colheita do milho na safra posterior à aplicação do calcário. Os resultados apontaram para ganhos crescentes em rendimento na medida em que os valores de saturação por bases eram menores (Figura 13). Importante ressaltar que tais valores de saturação por bases são pouco comuns.

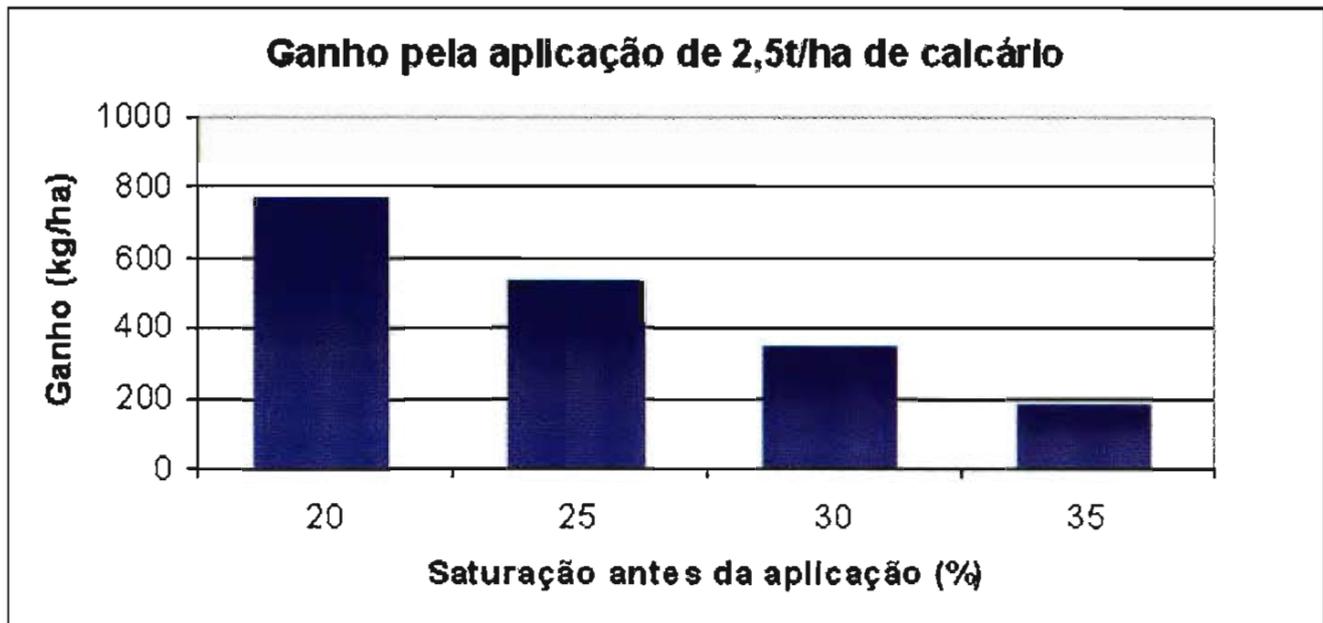


Figura 13. Ganhos obtidos pela aplicação de 2,5t/ha de calcário em um talhão de 24ha com diferentes saturações por bases localizado no município de Ponta Grossa.

Em outro ensaio realizado em um talhão localizado em Ponta Grossa, foram avaliadas estratégias para o fornecimento de potássio para a soja sendo deixada uma testemunha sem a aplicação do fertilizante. Observou-se que, para o solo classificado como CAMBISSOLO, não houve resposta à aplicação do fertilizante e à estratégia de fornecimento. Para o solo classificado como LATOSSOLO houve resposta à aplicação do potássio e não houve resposta para a estratégia de fornecimento.

Em experimento realizado em outro talhão localizado também em Ponta Grossa, foi avaliada a resposta à aplicação dos nutrientes fósforo e potássio na cultura da soja e em unidades classificadas como de alta produtividade e baixa produtividade. Os resultados demonstraram que, independentemente do local, não houve resposta ao fornecimento dos nutrientes e que houve diferença estatística para o local sendo que se comprovou maior produtividade na unidade detectada anteriormente com o mapeamento da produtividade.

Em ensaio realizado no município de Tibagi, em um talhão que possuía textura arenosa, foram avaliadas estratégias de fornecimento do fertilizante potássico em unidades consideradas como de alta e baixa produtividade. Os resultados demonstraram não haver diferença significativa entre as estratégias avaliadas e entre as regiões consideradas.

Em experimentos realizados em dois talhões localizados em Castro e em Tibagi, foi avaliado o fornecimento de fertilizantes em regiões consideradas como de alta e baixa produtividade e em locais classificados como de alta e baixa fertilidade, segundo um Índice composto que considerava os teores de vários nutrientes. No experimento de Tibagi não houve resposta ao fornecimento de fertilizantes, mas houve diferença significativa na produtividade, sendo que as áreas caracterizadas como de alta fertilidade apresentaram os maiores rendimentos. No expe-

rimento de Castro não houve resposta à aplicação de fertilizantes independentemente da classificação de fertilidade e de produtividade. Houve diferença significativa entre a produtividade para a região classificada previamente como sendo de alta fertilidade e de alta produtividade.

Os resultados obtidos nos ensaios realizados demonstraram que, na maioria das vezes, não ocorreu resposta à aplicação dos fertilizantes e que os mapas de produtividade permitem uma boa regionalização. Maiores estudos são necessários para avaliar o fornecimento de fertilizantes em taxa variada (Ver Capítulo 8) considerando os seus efeitos não somente na safra em estudo, mas sim na rotação de culturas. Ainda em relação ao fornecimento de nutrientes, deve ser melhor estudado o balanço entre nutrientes e sua relação com a produtividade (Ver Capítulo 6).

Implicações dos trabalhos em Agricultura de Precisão

Embora muitos dados e conhecimentos tenham sido gerados ao longo de cinco anos de trabalho dentro de talhões com dimensões reduzidas, talvez o maior benefício dos trabalhos desenvolvidos na área de agricultura de precisão seja o despertar para variabilidade e as implicações que isto pode acarretar.

Na medida em que as atividades desenvolvidas no projeto levantavam uma série de dúvidas, foram sendo tomadas medidas para reduzir as incertezas e aumentar o conhecimento sobre a região de atuação do grupo ABC. Atualmente, mais de 60% das propriedades do grupo ABC se encontram digitalizadas sobre uma base cartográfica detalhada de toda a região. Com a construção de uma rede de estações meteorológicas a Fundação ABC faz análises pormenorizadas sobre os parâmetros climáticos para os diferentes municípios da região. Finalmente, trabalhos têm sido conduzidos pelos setores de pesquisa para a regionalização com maior detalhamento das recomendações de cultivares, tratamentos fitossanitários, aplicação de corretivos e fertilizantes.

Agradecimentos

São louváveis as participações de:

- Empresas como John Deere, AGCO, CHN, Serrana e Syngenta no apoio financeiro para a viabilização de estudos em agricultura de precisão com a Fundação ABC;
- Instituições de pesquisa como a ESALQ/USP, Embrapa Solos e IAPAR na troca de conhecimentos para a realização do projeto;
- Cooperativas Arapoti, Batavo e Castrolanda através de seus produtores, apoiando com o fornecimento das áreas, disponibilizando máquinas e, na logística, para a realização das avaliações planejadas;
- Fundação ABC através de sua diretoria, gerência e corpo técnico tomando medidas necessárias, assumindo riscos e apoiando incondicionalmente as ações durante todo este período.

Embrapa

Solos

Embrapa

**Florestas
Meio Ambiente
Pecuária Sudeste**

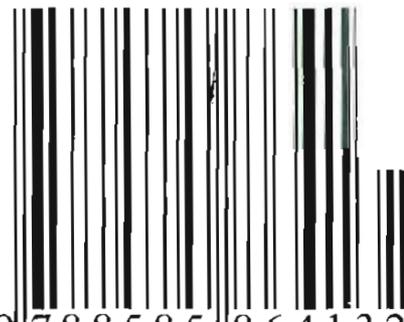
Parcerias:



Ministério da Agricultura,
Pecuária e Abastecimento



ISBN 8585864132



9 788585 864132