



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA

**POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE E VARIABILIDADE ESPACIAL DE
ATRIBUTOS DO SOLO EM PLANTIO DIRETO DE SOJA
NO NORDESTE PARAENSE**

CARLA LETICIA PARÁ DA SILVA

Belém
Pará – Brasil
2009



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA

**POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE E VARIABILIDADE ESPACIAL DE
ATRIBUTOS DO SOLO EM PLANTIO DIRETO DE SOJA
NO NORDESTE PARAENSE**

CARLA LETICIA PARÁ DA SILVA

Belém
Pará – Brasil
2009



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA**

**POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE E VARIABILIDADE ESPACIAL DE
ATRIBUTOS DO SOLO EM PLANTIO DIRETO DE SOJA
NO NORDESTE PARAENSE**

CARLA LETICIA PARÁ DA SILVA

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do Curso de Mestrado em Agronomia, área de Concentração Produção Vegetal, para obtenção do título de “Mestre em Agronomia”.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Roberto Silva Farias

Belém
Pará – Brasil
2009



Silva, Carla Leticia Pará da

Potencial de produtividade e variabilidade espacial de atributos do solo em plantio direto de soja no nordeste paraense. – Belém, 2009.

63 f.il.

Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal Rural da Amazônia

1. Soja 2. Variabilidade espacial 3. Atributos do solo 4. Plantio direto I. Título.

CDD - 633.34



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA

**POTENCIAL DE PRODUTIVIDADE E VARIABILIDADE ESPACIAL DE
ATRIBUTOS DO SOLO EM PLANTIO DIRETO DE SOJA
NO NORDESTE PARAENSE**

CARLA LETICIA PARÁ DA SILVA

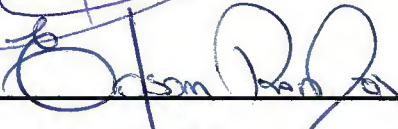
Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do Curso de Mestrado em Agronomia, área de Concentração Produção Vegetal, para obtenção do título de **Mestre**.

Aprovada em 18 de setembro de 2009.

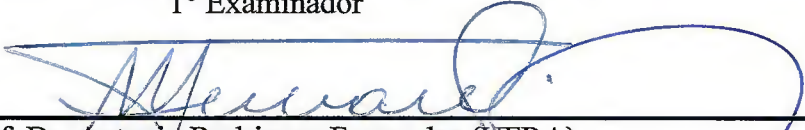
Banca Examinadora



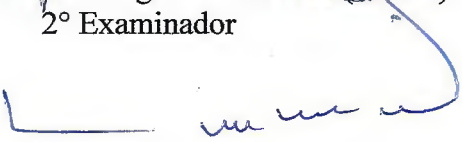
Prof. Dr. Paulo Roberto Silva Farias (UFRA)
Orientador



Prof. Dr. Edson Marcos Leal Soares Ramos (UFPA)
1º Examinador



Prof. Dr. Antonio Rodrigues Fernandes (UFRA)
2º Examinador



Prof. Dr. Francisco de Assis de Oliveira (UFRA)
3º Examinador

Dedico à minha família este trabalho:

Ao meu marido, Alexandre, pelos 9 anos de amor, apoio e compreensão;

A Beatriz e ao meu outro filho que estou esperando, razões da minha vida;

Aos meus irmãos, Clívia, Carlos, Dayana, Yuri (*in memoriam*) e Ygor;

Aos meus pais, Carlos Antonio e Leticia Pará, minha eterna gratidão;

Ao meu sogro, José Leonino e minha sogra, Antonia Corrêa, pelo apoio incondicional.

AGRADECIMENTOS

Ao meu Deus, Todo Poderoso, que até aqui me ajudou e me deu bênçãos sem medida.

À Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA, pela aceitação no referido curso;

Ao DAAD (Deutscher Akademischer Austausch Dienst) pela bolsa concedida;

Ao meu orientador Prof. Dr. Paulo Roberto Silva Farias pela orientação, apoio e pelo conhecimento passado;

A Prof^a. Dra. Herdjânia Veras de Lima, a quem admiro muito profissionalmente e que me ajudou muito desde o ensinamento da coleta de solos até a análise dos dados;

À Coordenadoria de Pós-Graduação do Curso de Mestrado em Agronomia e a secretária Gracy Monteiro pelo apoio prestado durante o curso;

À Fazenda Beira Rio por disponibilizar a área do experimento e por todo apoio na execução do trabalho;

Ao Eng. Agrônomo e Secretário de Agricultura de Capitão-Poço/PA, Henrique Oeiras pelo apoio e empenho durante o desenvolvimento do trabalho;

Aos meus amigos e Eng. Agrônomos Neilo Bergamin e Clévea Rossana, pela ajuda na coleta de solos;

À minha amiga e Eng^a. Agrônoma Patricia Surama Parise Maia pela amizade e apoio;

À minha amiga e companheira de estudos, Elizabeth Shimizu, que esteve ao meu lado desde 2006, estudando como aluna especial, até 2009, quando vencemos a batalha do mestrado.

À amiga e Eng^a. Agrônoma Camila Cramer, pela amizade, apoio nos momentos mais difíceis e ajuda nas análises dos dados;

À amiga e Estatística Valéria Sá que foi brilhante nas análises geoestatísticas e que não mediu esforços para me ajudar;

Às minhas amigas e Eng^{as}. Agrônomas Danielle Pegado e Sandra Gonçalves que desde a graduação sempre estiveram do meu lado;

Aos colegas de mestrado da turma de 2007 e 2008 pelo companheirismo e incentivo durante o curso;

À equipe de estagiários da Entomologia e Física do Solo: Bruno Monteiro, Rengles Menezes, Gerson, Javier Pitta, Ana Sales, Nara Pontes, Sâmala, Lorena, Katiane e Caroline Abreu que foram incansáveis durante o georreferenciamento, nas coletas de solo e colheita da soja;

A todos os funcionários do “barracão” de solos que me deram muito apoio e me ajudaram na debulha manual da soja;

A todos os funcionários dos laboratórios de análises química e física do solo da UFRA, que sempre estiveram dispostos a me ajudar;

Aos membros da banca examinadora pela contribuição para a finalização deste trabalho;

A todos que de maneira direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho.

Muito obrigado (Muito obrigado)
Muito obrigado (Muito obrigado)
É importante saber agradecer
A quem me fez bem
A quem me abençoou
Quem esteve comigo
Na hora da alegria e da dor

Meu Deus nunca me abandonou
E amigos fiéis ao meu lado colocou
Por isso eu quero agradecer
Muito obrigado, Senhor!
Muito obrigado!

Eu Te agradeço, meu Senhor!
Por todas as bênçãos
Tu és meu Deus, meu Salvador!
Eu te agradeço.
(Música de Ana Paula Valadão Bessa)

“Entrega o teu caminho ao SENHOR; confia Nele, e Ele o fará”
Salmos 37:5

“Prepara-se o cavalo para o dia da batalha, porém do Senhor vem a vitória.”
Provérbios 21:31

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi utilizar as técnicas de agricultura de precisão para avaliar o potencial de produtividade e a variabilidade espacial dos atributos químicos e físicos do solo em plantio direto de soja, no nordeste paraense. O estudo foi realizado na fazenda Beira Rio, no município de Capitão Poço, PA, em uma área de 39,52 ha, onde fez-se a coleta de amostras de solo na camada de 0,0 – 0,05 m de profundidade. Para a análise física e química do solo e produtividade da soja foram selecionados 196 pontos. Foram analisadas as variáveis químicas: pH em água e KCl, P, K, Ca, Mg, Al e físicas: resistência à penetração, densidade do solo, umidade na capacidade de campo e textura. Os dados foram analisados usando semivariogramas e interpolação por krigagem para construção de mapas. As variáveis estudadas ajustaram-se aos modelos exponencial, esférico e gaussiano. Concluiu-se que foi possível determinar as áreas com alta e baixa variabilidade e sugerir estabelecimento de subáreas homogêneas, com a finalidade de tornar o manejo dos recursos mais eficiente.

Palavras-chave: soja, variabilidade espacial, atributos do solo, plantio direto.

ABSTRACT

The objective was to use the techniques of precision agriculture to assess the potential productivity and spatial variability of chemical and physical attributes of soil no-tillage on soybean in northeastern Pará. The study was conducted at the Beira Rio, the municipality of Capitão Poço, PA, in an area of 39.52 ha, where he is collecting samples of soil layer from 0.0 to 0.05 m deep. For the analysis of physical and chemical soil and soybean yield were selected 196 points. We analyzed the chemical variables: pH in water and KCl, P, K, Ca, Mg, , Al and physical properties: resistance to penetration, bulk density, moisture at field capacity and texture. The data were analyzed using semivariograms and kriging for the construction of maps. The variables were adjusted to exponential models, spherical and Gaussian. It was concluded that it was possible to determine the areas with high and low variability and suggest the establishment of homogeneous subareas, in order to make resource management more efficient.

Keywords: soybean, spatial variability, soil properties, no-tillage.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1 Origem da soja	15
2.2 Classificação botânica.....	16
2.3 Mercado da soja	17
2.4 Atributos físicos do solo	18
2.5 Atributos químicos do solo	20
2.6 Agricultura de Precisão.....	21
2.7 Elaboração de mapas de rendimento	22
2.8 Sistema de Informação Geográfica (SIG).....	25
2.9 Variabilidade Espacial.....	26
2.10 Geoestatística	27
2.11 Análise Geoestatística	28
2.11.1 Análise Variográfica: o semivariograma experimental.....	29
2.11.2 Modelos.....	30
2.11.3 Modelos com patamar	30
2.11.4 Modelo Aleatório (Efeito Pepita Puro)	31
2.11.5 Krigagem.....	32
3. MATERIAL E MÉTODOS	32
3.1 Área de estudo.....	32
3.2 Georreferenciamento dos talhões.....	34
3.3 Análise Física.....	35
3.4 Análise Química.....	36
3.5 Produtividade.....	37
3.6 Análise da estatística descritiva.....	39
3.7 Análise geoestatística.....	39
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
5. CONCLUSÕES	51
6. RECOMENDAÇÕES	52
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama esquemático do hidrômetro da ASTM, modelo 152 H.	20
Figura 2. Esquema do semivariograma experimental utilizado.	29
Figura 3. Imagem de satélite do Estado do Pará, destacando a capital do estado, Belém e o município de Capitão Poço (resolução espacial de 30 m).	33
Figura 4. Área experimental em Latossolo Amarelo, com plantio de soja, cultivar BRS Sambaíba, localizada na Fazenda Beira Rio, Capitão Poço – PA (junho de 2008). (a) Vista geral da plantação e (b) Linhas de plantio.	34
Figura 5. Grade de amostragem com os 196 pontos de coletas georreferenciados.	35
Figura 6. Um dos 196 pontos de amostragem da colheita manual da soja, em Latossolo Amarelo, sistema de plantio direto, em Capitão Poço – PA (setembro de 2008).	38
Figura 7. Produtividade média e potencial de produtividade da soja, em Latossolo Amarelo, sistema de plantio direto, em Capitão Poço – PA (setembro de 2008).	42
Figura 8. Variabilidade espacial da declividade (A), classes texturais (B) e produtividade da soja sob plantio direto (C) em Capitão Poço – PA (setembro de 2008).	43
Figura 9. Semivariogramas da produtividade (A), densidade do solo (B), resistência do solo à penetração (C) e umidade na capacidade de campo (D).	45
Figura 10. Semivariograma de pH em água (A), pH em KCl (B), fósforo (C), potássio (D), cálcio (E), magnésio (F), alumínio (G) e acidez potencial (H).	45
Figura 11. Distribuição espacial da produtividade (A), Densidade (B) e Resistência à penetração (C).	47
Figura 12. Mapa de produtividade com as cotas de declividade (A), mapa de pH (B) e mapa de acidez potencial (C).	48
Figura 13. Mapa de produtividade com as cotas de declividade (A), mapa de fósforo (B), mapa de potássio (C), mapa de cálcio (D) e mapa de magnésio (E).	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Estatística descritiva das análises físicas e químicas e da produtividade da soja sob plantio direto em Capitão Poço – PA (junho de 2008).	41
Tabela 2. Parâmetros dos semivariogramas das variáveis estudadas, ajustados aos modelos.	44

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, a soja é a cultura com a maior área cultivada. De acordo com o oitavo levantamento realizado pela Companhia Nacional de Abastecimento – Conab (2009), na safra 2008/2009, a cultura ocupou uma área de 21,56 milhões de hectares, com produção total de 57,63 milhões de toneladas de grãos e produtividade média de 2.696 kg ha⁻¹. No Pará, a soja (em grão) possui uma área plantada de 67,6 mil ha, produção de 194,8 mil t e rendimento médio de 2.882 kg ha⁻¹.

Em função do seu potencial produtivo, a soja ocupa posição de destaque na economia brasileira, justificando a necessidade de pesquisas no sentido de otimizar o seu cultivo e reduzir os gastos.

A partir dos avanços tecnológicos na agropecuária, especialistas têm notado, cada vez mais, que os diversos setores da agricultura não podem ser tratados de maneira homogênea no que diz respeito à medição de variáveis nas áreas agrícolas. Neste sentido, a variação espacial e temporal deve ser considerada para melhor aplicação e aproveitamento dos insumos químicos, podendo assim aumentar a produtividade, reduzir o custo de produção e o impacto ambiental causado pelo excesso de produtos químicos utilizados (FARIAS et al., 2003).

O gerenciamento do processo de produção em função da variabilidade é o que se convencionou chamar Agricultura de Precisão (CARVALHO et al., 2002).

A Agricultura de Precisão se baseia no conjunto de técnicas que explora a variabilidade do terreno a partir de informações georreferenciadas da área, principalmente, no que se refere aos atributos químicos, físicos e biológicos do solo bem como a produtividade, possibilitando otimizar a aplicação de insumos na lavoura, buscando a redução de custos e impactos ao meio ambiente. Todo o embasamento desta tecnologia está na análise da variabilidade espacial dos fatores de produção, especialmente do solo. A partir dela, as decisões devem ser tomadas para que se faça a aplicação de insumos de uma forma localizada e com dosagens precisas. A tecnologia deve ser validada com base em análises que comprovem as vantagens não apenas econômicas, mas também de benefícios ao meio ambiente por resultar em menor excedente de insumo (KNOB, 2006).

Vários são os fatores que influenciam a produtividade das culturas. Entre estes, as propriedades físicas do solo se destacam por serem modificadas pelo uso de máquinas e implementos e por afetarem positiva ou negativamente o crescimento das plantas, assim como os atributos químicos (HORN e FLEIGE, 2003), por serem afetados diretamente pelo manejo.

O solo, normalmente, por mais uniforme que seja, apresenta variações nos atributos físicos e químicos. Mesmo em áreas consideradas homogêneas, pertencentes a uma mesma classe de solo, existe variação espacial de atributos a curtas distâncias, em grau suficiente para interferir na produtividade das culturas (AMARO FILHO et al., 2007).

Em uma área de solo homogêneo, a medida de uma propriedade em alguns pontos pode revelar grandes variações de valores, pois o solo é produto da ação de diversos fatores de formação e varia continuamente na superfície (GONÇALVES et al., 2001).

Silva e Chaves (2001) comentam que os atributos químicos apresentam maior variação que as propriedades físicas em uma área cultivada, sendo assim, uma amostragem aleatória, que utiliza a média para caracterizar determinado atributo no solo, seria insuficiente para representar a área.

A análise da variabilidade espacial é realizada por um conjunto de técnicas e conceitos, como a geoestatística, que considera como fator primordial a localização geográfica e a dependência espacial das variáveis em estudo, denominadas variáveis regionalizadas. O semivariograma é o principal método geoestatístico para se detectar a variabilidade espacial (GUEDES et al., 2008).

Portanto, conhecer a variabilidade espacial de atributos do solo que controlam a produtividade das culturas e os riscos de contaminação do ambiente e investigar as causas dessa variabilidade são fatores importantes em um sistema de produção que vise a sustentabilidade por meio do manejo regionalizado de insumos e práticas agrícolas, como é o sistema de agricultura de precisão (CORA et al., 2004).

Este trabalho foi realizado com o objetivo de utilizar as técnicas de agricultura de precisão para avaliar o potencial de produtividade e a variabilidade espacial dos atributos químicos e físicos do solo, em plantio direto de soja, no nordeste paraense.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Origem da soja

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) é uma planta pertencente à família Leguminosae, com grande importância econômica mundial. A planta tem como centro de origem a região da China Antiga, no continente asiático, constituindo-se na base alimentar do povo chinês há mais de cinco mil anos (CÂMARA, 1998).

A soja é provavelmente nativa do vale do rio Amarelo, na Região Norte da China. Evidências históricas indicam que a domesticação ocorreu no século XI A.C. O cultivo expandiu-se vagarosamente por algumas regiões da Ásia, apenas chegando ao Ocidente no final do século XV, onde permaneceu como simples curiosidade botânica pelos quatro séculos seguintes. Originou-se a uma latitude de aproximadamente 40° N, com um clima continental caracterizado por invernos frios e verões quentes e secos (HARTWIG e KIIHL, 1979).

O primeiro registro de plantio de soja no Brasil data de 1914, no município de Santa Rosa, RS. Mas foi somente a partir dos anos 40 que ela adquiriu alguma importância econômica, merecendo o primeiro registro estatístico nacional em 1941, no Anuário Agrícola do RS (área cultivada de 640 ha, produção de 450 t e rendimento de 700 kg/ha). Nesse mesmo ano instalou-se em Santa Rosa, RS, a primeira indústria processadora de soja do País e, em 1949, com produção de 25.000 t, o Brasil figurou pela primeira vez como produtor de soja nas estatísticas internacionais (EMBRAPA SOJA, 2003).

Sendo o principal complexo exportador brasileiro, a cultura da soja se confunde com o processo de modernização da agricultura nacional. Pode-se dizer que a expansão da cultura da soja foi uma das principais responsáveis pela introdução do conceito de agronegócio no país, não só pelo volume físico e financeiro envolvido, mas também pela necessidade da visão empresarial da atividade por parte dos produtores, fornecedores de insumos, processadores da matéria-prima e negociantes, de forma a manter as vantagens competitivas de produção (GUIMARÃES, 2007).

Durante a década de 1960, o cultivo de soja se concentrava nos três estados da Região Sul do Brasil: Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná. Atualmente, 60% da produção de soja está concentrada na região Centro-Oeste. A zona sul é caracterizada por pequenos agricultores, principalmente organizados em cooperativas, enquanto que a área central é caracterizada por grandes explorações, com níveis muito elevados de mecanização e, principalmente organizados em grandes grupos privados. Além disso, o clima é mais estável no Brasil Central. A mais recente expansão de soja tem tido lugar na região Norte da

Amazônia Legal. A produção de soja na região Norte representa apenas uma pequena fração da área plantada atualmente, mas está se expandindo (SMALING et al., 2008).

O Estado do Pará, nos últimos dez anos, vem se constituindo em uma das mais novas áreas de expansão da cultura da soja, sendo constatado um aumento considerável da área plantada.

Em 1997, com o início do plantio comercial, a área plantada no Estado do Pará foi de 575 hectares, passando, no ano de 2007, para uma área de 71,1 mil hectares, fato que permitiu a produção de 201,1 mil toneladas (CONAB, 2008). A atual condição da cultura na região foi alcançada em decorrência do incentivo do governo do Estado, do interesse dos produtores rurais pelo agronegócio da soja e da geração e disponibilização, por meio da pesquisa local, de tecnologias adaptadas às condições da região, principalmente relacionadas às indicações de cultivares (BENCHIMO et al., 2005).

Segundo a Embrapa Soja (2006), são indicadas para plantio no Estado do Pará, seis cultivares, BRS Sambaíba, BRS Tracajá, BRS Candeia, BRS Babaçu, BRS Seridó RCH e BRS 219 (Boa Vista), sendo a linhagem BR 97-1665 plenamente adaptada a região e com amplas possibilidades de indicação para plantio. Contudo, dentre elas destacam-se as BRS Sambaíba e BRS Tracajá, sendo que a primeira representa cerca de 80% do material plantado na última safra, enquanto que a segunda somente 10%. As demais são pouco utilizadas, por pouca disponibilidade de sementes no mercado de produção e também preferência do produtor.

2.2 Classificação botânica

A soja pertence à classe das dicotiledôneas, família leguminosa e subfamília Papilionoides. A espécie cultivada é a *Glycine max* Merrill. O sistema radicular é pivotante, com a raiz principal bem desenvolvida e raízes secundárias em grande número, ricas em nódulo de bactérias *Bradyrhizobium japonicum* fixadoras de nitrogênio atmosférico (MISSÃO, 2006).

O caule herbáceo, ereto com porte variável de 0,60 m a 1,50 m, nubescendo de pêlos brancos, parcedaneos ou tostados. É bastante ramificado, com os ramos inferiores mais alongados e todos os ramos formando ângulos variáveis com haste principal.

As folhas são alternadas, longas pecioladas, compostas de três folíolos ovalados ou lanceolados, de comprimento variável entre 0,5 a 12,5 cm. Na maioria das variedades as folhas amarelam à medida que os frutos amadurecem e caem quando as vagens estão maduras.

As flores nascem em racínios curtos, axiliares de terminais, geralmente com 9 a 10 flores cada um, de coloração branca, amarela ou violácea, dependendo da variedade.

Os frutos são vagens achatadas, pubescentes, de cor cinza, amarela palha ou preta, dependendo da variedade. Encerram duas a cinco sementes e nascem, geralmente, em agrupamento de três a cinco, de modo que se pode encontrar até 400 vagens por planta.

As sementes possuem forma arredondada, achatada ou alongada. A coloração é variada (o comércio prefere as sementes amarelas) e o tamanho também é variado.

2.3 Mercado da soja

A soja é um dos produtos agrícolas mais amplamente comercializados no mundo, provavelmente por causa da variedade de formas de consumo que se estendem desde alimentação (humana e animal) até a indústria farmacêutica e siderúrgica. Essa diversidade é possível porque as indústrias de processamento de soja produzem subprodutos, farelo e óleo, que se constituem em importante insumo para diferentes setores industriais (FREITAS et al., 2001).

O sucesso da cultura da soja é um dos principais exemplos dos resultados positivos alcançados pelo agronegócio nacional em anos recentes. As lavouras com a oleaginosa, que contaram com novas cultivares, desbravaram novas áreas agrícolas pelo Brasil, levaram progresso a pequenos municípios, tornaram-se o motor da economia de várias regiões e têm sido um dos maiores responsáveis pela expansão da receita cambial do País (MISSÃO, 2006).

De acordo com a Conab (2009), a área de soja plantada nesta safra de 2008/2009 é de 21,56 milhões de hectares, 1,2% maior que a safra 2007/2008, apesar das expectativas iniciais de redução, devido a um custo de produção mais alto no início da safra.

No que se refere à média de produtividade, houve uma redução de 5,0% em relação à safra anterior devido à estiagem ocorrida nos meses de novembro e dezembro nos Estados de Paraná e Mato Grosso do Sul, que são 2º e 4º maiores produtores de soja do País, respectivamente. Esta ocorrência climática teve efeitos mais negativos nesses estados, porque boa parte da soja plantada este ano foi de ciclo precoce e de plantio cedo (fim de setembro e início de outubro), portanto, a cultura encontrava-se nas fases de floração e frutificação durante o período de seca ocasionando, assim, perda de produtividade. Por essa razão, estima-se uma produção de 57,63 milhões de toneladas, ou seja, 4,0% menor que a atingida na safra 2007/2008 (CONAB, 2009).

Dentre os grandes produtores mundiais de soja (EUA, Brasil e Argentina), o Brasil figura com o maior potencial de expansão da área cultivada, podendo multiplicar a atual

produção e suprir a esperada demanda adicional pelo produto das próximas décadas. Para 2020, a produção projetada para o Brasil é de 105 milhões de toneladas, quando será destacadamente o maior produtor e exportador do produto (DALL'AGNOL e HIRAKURI, 2008).

Para a soja em 2009, a produção esperada de 57,8 milhões de toneladas apresenta variação negativa de 3,6% em comparação ao total obtido em 2008. A exemplo do ocorrido com a maioria dos grãos, a cultura sofreu prejuízos como reflexo das condições climáticas desfavoráveis. A área a ser colhida registra uma elevação de 1,0%, enquanto que o rendimento médio esperado mostra um decréscimo de 4,6%, passando de 2.817 kg/ha, obtidos em 2008, para 2.688 kg/ha, nesta avaliação de janeiro para 2009 (IBGE, 2008).

2.4 Atributos físicos do solo

A capacidade do solo em prover o sistema radicular de condições físicas adequadas para o crescimento e desenvolvimento das plantas pode ser alterada pelas práticas de manejo. Essas modificações influenciam a produtividade das culturas através das modificações na disponibilidade de água, na difusão de oxigênio e na resistência do solo à penetração (RP) das raízes (WATANABE et al., 2000).

O sistema de manejo do solo é considerado uma das fontes mais importantes de variabilidade espacial das propriedades físicas do solo. A aplicação de técnicas geoestatísticas em estudos de variabilidade espacial de diferentes sistemas de manejo ainda é pouco utilizada (SCHAFFRATH et al., 2008).

A resistência à penetração é um dos atributos físicos do solo, que influencia o crescimento de raízes e serve como base à avaliação dos efeitos dos sistemas de manejo do solo sobre o ambiente radicular (TORMENA e ROLOFF, 1996).

Em solos compactados, as raízes das plantas não utilizam adequadamente os nutrientes disponíveis, uma vez que o desenvolvimento de novas raízes, responsáveis pela absorção de água e nutrientes, fica prejudicado. Na soja, o sistema radicular, em condições normais de cultivo, distribui-se quase totalmente nos primeiros 150 mm do solo (QUEIROZ-VOLTAN et al., 2000).

De acordo com Dexter (2004) a compactação é uma redução do volume de uma determinada massa de solo. Quando o solo é compactado, o volume de poros é reduzido. No entanto, nem todos os poros são reduzidos similarmente. Os maiores poros são geralmente perdidos ou reduzidos na primeira dimensão e a compactação cessa quando o solo se tornou forte o suficiente para resistir ao estresse aplicado sem qualquer falha. Esta perda preferencial

dos maiores poros tem o efeito de alterar a distribuição do tamanho dos poros e, conseqüentemente, a retenção de água.

Fisicamente estabelecida pela pressão, a resistência à penetração é dada pela razão entre a força necessária para a penetração de uma base metálica do penetrômetro, provida de um cone na sua extremidade, cuja área basal é conhecida e constante. Sua avaliação deve ser concomitante à da umidade do solo, uma vez que varia de forma inversamente proporcional. Por outro lado, varia positivamente com a densidade do solo (BENGOUGH et al., 2001).

Rosolem et al. (1994), em vasos, verificam que na RP de 0,69 Mpa houve a uma redução de 50% no comprimento radicular da soja, em Latossolo Vermelho-Escuro. Em geral, tem-se adotado o valor de RP de 2,0 MPa como crítico ao crescimento radicular (TORMENA et al., 1998).

Em Latossolo Vermelho distrófico, Beutler et al. (2003) adotaram o valor de 2,22 MPa como crítico para a produção da soja nesse solo.

Em trabalho realizado por Beutler et al. (2007), em Latossolo Vermelho, textura média, observaram que a produtividade de soja decresceu a partir da resistência do solo à penetração de 2,33 MPa e da densidade de 1,51 Mg m⁻³.

Em relação a densidade, existe carência de informações que indiquem valores restritivos ao crescimento radicular das plantas. Lima et al. (2007) consideraram um valor médio de densidade de 1,58 Mg m⁻³, para um solo Argissolo Vermelho distrófico arênico, de textura superficial franco arenosa como não representante de um fator crítico para o desenvolvimento das plantas.

A textura é de particular importância, uma vez que a interação água - solo depende da composição granulométrica, particularmente da fração argila (GONÇALVES et al., 2001).

O método do densímetro baseia-se na sedimentação do tamanho das partículas e é determinado com base na medida do seu tempo de queda num líquido. Este método considera a sedimentação de partículas teoricamente esféricas e em regime de fluxo laminar (não-turbulento), conforme sugere a Lei de Stokes, usada para calcular a velocidade que as partículas em suspensão sedimentam. A partir desta velocidade, é calculado o tempo necessário para que uma partícula do solo de determinado diâmetro seja sedimentada. O material que permanece nessa suspensão aquosa pode ser quantificado a partir de sua densidade e, expresso em massa (ALMEIDA, 2008).

O hidrômetro recomendado pela “American Society for Testing and Materials” (ASTM), tido como padrão, é o modelo nº 152 H, com escala de Bouyoucos em g L⁻¹, conforme apresentado na Figura 1.

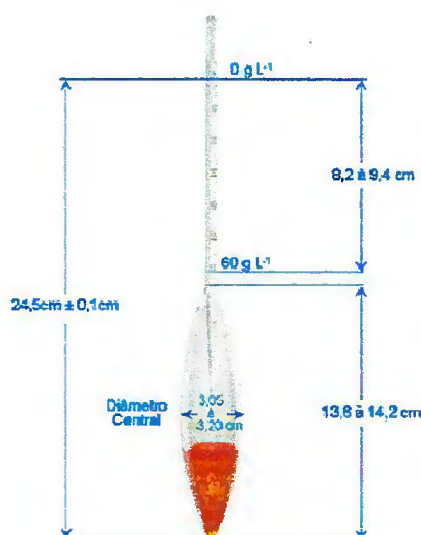


Figura 1. Diagrama esquemático do hidrômetro da ASTM, modelo 152 H (Fonte: Almeida, 2008).

2.5 Atributos químicos do solo

A convencional aplicação de insumos é baseada em teores médios da fertilidade do solo, podendo subestimar ou superestimar esses teores no solo, acarretando excessos ou déficit nutricionais em determinadas áreas. Portanto, o conhecimento detalhado da variabilidade espacial dos atributos da fertilidade pode otimizar a aplicação localizada de corretivos e fertilizantes, melhorando, dessa maneira, o controle do sistema de produção das culturas (SOUZA et al., 2004).

O fósforo (P) é o nutriente mais limitante da produtividade de biomassa em solos tropicais (NOVAIS e SMYTH, 1999). Os solos brasileiros são carentes de P, em consequência do material de origem e da forte interação do P com o solo (RAIJ, 1991), em que menos de 0,1% encontra-se em solução (FARDEAU, 1996).

O fósforo é crucial no metabolismo das plantas, desempenhando papel importante na transferência de energia da célula, na respiração e na fotossíntese. É também componente estrutural dos ácidos nucleicos de genes e cromossomos, assim como de muitas coenzimas, fosfoproteínas e fosfolipídeos. As limitações na disponibilidade de P no início do ciclo vegetativo podem resultar em restrições no desenvolvimento, das quais a planta não se recupera posteriormente, mesmo aumentando o suprimento de P a níveis adequados. O suprimento adequado de P é, pois, essencial desde os estádios iniciais de crescimento da planta (GRANT et al., 2001).

A aplicação de fertilizantes fosfatados em área total (fosfatagem), no sistema de plantio direto, tem sido realizada em superfície, sem incorporação. Por causa da presença da palhada e do maior nível de matéria orgânica, este manejo proporciona um ambiente menos oxidativo, fazendo com que as reações de fixação sejam minimizadas e que haja menor contato dos resíduos com o solo, promovendo impacto direto na fertilidade das camadas superficiais, até 10 cm de profundidade (COSTA, 2000).

O potássio é absorvido na forma iônica (K^+) e assim permanece nas plantas, não formando compostos. É um nutriente muito móvel na planta, mantém o potencial osmótico e participa da abertura e fechamento dos estômatos, regulando a transpiração e entrada do CO_2 e influenciando a fotossíntese. O potássio também é ativador de um grande número de enzimas, e atua no transporte transmembrana (EPSTEIN e BLOOM, 2005).

As plantas podem tolerar relativamente altas concentrações de potássio sem apresentar distúrbios. No entanto, ele pode causar efeitos indiretos pela deficiência induzida de outros nutrientes, como cálcio e magnésio. Altas concentrações de potássio podem, também, inibir a absorção de boro, zinco, manganês e amônio, induzindo, ou ao menos contribuindo para a deficiência destes elementos (BERGMANN, 1992).

O cálcio é absorvido como Ca^{+2} , e é um importante componente da parede celular, sendo imprescindível para o crescimento apical, tanto das raízes como parte aérea. É um elemento imóvel quanto à redistribuição na planta (DEON, 2007).

O magnésio é um nutriente absorvido pelas plantas como cátion divalente (Mg^{2+}). É o elemento central da molécula de clorofila e ativador enzimático. É móvel quanto à redistribuição na planta. O magnésio é outro nutriente presente no calcário, quando este for dolomítico, mas pode ser fornecido às plantas como sulfato de magnésio (DEON, 2007).

2.6 Agricultura de Precisão

Segundo Elias e Camargo (2000), os conceitos fundamentais de Agricultura de precisão foram concebidos no ano de 1929 pelos pesquisadores C. M. Linsley e F. C. Bauer, da Estação Experimental Agrícola da Universidade de Illinois dos Estados Unidos da América. Na época, comprovou-se a existência da variabilidade espacial da acidez do solo, obtendo-se reduções significativas nos custos da produção de grãos, sem o comprometimento da produtividade, realizando a aplicação diferenciada de calcário em uma área experimental.

As primeiras ações de pesquisa no Brasil, na área de Agricultura de Precisão, foram realizadas na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, da Universidade de São

Paulo (ESALQ-USP) em 1997, onde um trabalho pioneiro com a cultura de milho resultou no primeiro mapa de variabilidade de colheita do Brasil (BALASTREIRE et al., 1997).

Strauch (2002) e Bongiovanni et al. (2006) definem a agricultura de precisão como um conjunto de tecnologias capazes de auxiliar o produtor rural a identificar as estratégias a serem adotadas para aumentar a eficiência no gerenciamento da agricultura, maximizando a rentabilidade das colheitas, tornando o agronegócio mais competitivo, otimizando o uso dos recursos edafoclimáticos e minimizando o uso de insumos agrícolas no sistema de produção.

Para Menegatti e Molin (2002), a agricultura de precisão é um sistema de gerenciamento agrícola baseado na variabilidade espacial encontrada nos talhões, visando a otimização do lucro, sustentabilidade e proteção do ambiente.

De acordo com Brusco et al. (2005), a agricultura de precisão visa uma forma de manejo sustentável, na qual as mudanças ocorrem sem prejuízos para as reservas naturais, ao mesmo tempo em que os danos são minimizados.

Searcy (2000), caracteriza a agricultura de precisão como uma filosofia de administração, que tenta reduzir as ineficiências na produção agrícola e aumentar o retorno econômico do produtor.

A agricultura de precisão surge como uma nova demanda de informática na agricultura, pois implica na coleta e manipulação de uma grande quantidade de dados que só podem ser gerenciados por métodos computacionais (MOLIN, 2002).

A agricultura de precisão propõe que o tratamento localizado dos pontos do terreno pode maximizar o uso da terra e de insumos agrícolas, aumentando a produtividade e diminuindo o gasto com insumos. Tal prática diminui a toxidez causada pelo excesso de algumas substâncias que são empregadas na produção agrícola, reduzindo assim a pressão sobre o meio ambiente (ARAÚJO et al., 2004)

A Agricultura de Precisão, de acordo com Sulzbach (2003), pode ser definida como um ciclo de atividades e tomada de decisões no sistema produtivo, podendo ser dividido em três etapas: (1) Colheita e geração de mapas de produtividade; (2) Análise e avaliação do mapa de produtividade e (3) Geração e execução de mapas de aplicação variável para as seguintes atividades: preparo do solo; plantio; fertilização do solo e pulverização.

De acordo com Atherton et al. (1999), os aspectos cruciais da agricultura de precisão são: quantificação da variabilidade do rendimento em áreas pequenas; quantificação da variabilidade espacial das propriedades do solo que influenciam no rendimento e ajuste das entradas tais como os fertilizantes, os pesticidas e as sementes baseados no conhecimento da variabilidade do solo e do rendimento

Alguns benefícios da AP podem ser sumariados em:

- i) melhor controle da área de cultivo mediante o conhecimento da variação do rendimento de grãos de local para local;
- ii) uso racional de insumos, para maior retorno;
- iii) menor impacto ambiental e melhoria da qualidade do solo ao longo do tempo;
- iv) priorização dos investimentos em insumos nas áreas em que o potencial de rendimento de grãos é maior, garantindo maior possibilidade de retorno econômico com menor investimento (salienta-se que o retorno econômico obtido dependerá da variabilidade da área trabalhada e da importância econômica da cultura);
- v) maior fluxo de informações para direcionar a tomada de decisões de manejo; e
- vi) valorização da propriedade rural (PIRES et al., 2004).

Segundo Balastreire (2000), os principais benefícios econômicos que podem advir da utilização desta tecnologia são decorrência da possibilidade de se fazer aplicação localizada de insumos (fertilizantes, corretivos, defensivos agrícolas) em taxa variável em cada ponto do campo, possibilitando assim a melhoria das suas características, pois, aplica-se às quantidades certas nos locais certos, e com isso, pode-se aumentar a produtividade das culturas com redução de custos.

As tecnologias da agricultura da precisão que estão sendo desenvolvidas podem detectar condições específicas do micro-local em tempo real e podem automaticamente ajustar tratamentos para se conhecer as necessidades de cada local (SCHMOLDT, 2001).

A importância da agricultura da precisão tem sido muito reconhecida como um contribuinte chave na tecnologia da produção de colheita mundial, mas até agora, esta tecnologia está tornando-se somente praticável em grandes fazendas (WAHEED et al., 2006).

2.7 Elaboração de mapas de rendimento

As técnicas de agricultura de precisão diferenciam-se dos conceitos tradicionais de agricultura pelo seu nível de gerenciamento. O conhecimento adquirido com as informações fornecidas pela agricultura de precisão permite aos produtores melhor suporte na tomada de decisões, resultando em potenciais benefícios ambientais, economia de insumos e lucros (MOLIN et al., 2006).

A grande maioria dos trabalhos que vem sendo executados na área de agricultura de precisão tem por base o levantamento das hipóteses a serem avaliadas a partir dos mapas de produtividade.

Segundo Sulzbach (2003), mapa de produtividade é a representação gráfica da quantidade do produto agrícola colhida a cada ponto georreferenciado da lavoura, possuindo como objetivo a determinação da variabilidade espacial da produção.

Segundo Molin (2002), muitos pesquisadores consideram que o mapa de colheita é o meio de informações mais completo para se visualizar a variabilidade espacial das lavouras. Entretanto é necessário que se faça um tratamento preliminar dos dados antes de transformá-los em mapas, pois estes irão servir para análise e tomada de decisão.

O mapa de produtividade é apenas uma etapa de todo o processo que envolve a agricultura de precisão e representa o efeito combinado de diversas fontes de variabilidade espacial e temporal. Uma parte dessa variabilidade pode ser atribuída a fatores que são constantes ou variam lentamente, enquanto outros fatores são transitórios, mudando em sua importância e distribuição espacial e temporal de uma safra para outra (CAPELLI, 2004).

A interpretação do mapa de produtividade é imprescindível para a correção dos fatores de produção que persistem ao longo do tempo, tais como: variação do tipo de solo na área plantada e outros como acidez do solo em locais específicos, deficiência de fertilizantes, ou mesmo, formulação inadequada de N-P-K e locais com falta ou excesso de água (CAPELLI, 2004).

A geração e a interpretação de mapas de produtividade de culturas agrícolas é um dos segmentos da Agricultura de Precisão, que tem recebido especial atenção de pesquisadores e de fabricantes de máquinas agrícolas, em face de sua importância no contexto do entendimento do processo da variabilidade espacial da produção agrícola e na definição de ações de manejo agrônômico, que visam o aumento e manutenção sustentada dos índices de produtividade de uma lavoura agrícola.

A pesquisa em relação aos mapas de produtividade desenvolve-se na atualidade, principalmente com dois focos: O foco relativo à indústria/mecanização, com estudos de sensores de rendimento e demais instrumentação compatível, que são instalados em colheitadeiras que também são equipadas com sistema de geoposicionamento (GPS). O outro foco é o agrônômico que concentra estudos, de impacto da tecnologia, na gestão da lavoura, com os objetivos de caracterizar e definir a importância e metodologia de aplicação e análise destes mapas de rendimento (GIOTTO et al., 2006).

Desta maneira, mapas de produtividade podem ser utilizados na investigação das causas da variabilidade, e podem ser um recurso eficaz nas decisões sobre o manejo do solo (MOLIN, 1997).

Um mapa de produtividade evidencia regiões com alta e baixa produtividade, mas não explica a causa de tal variação, que pode ser por doenças, baixo pH, estresse hídrico e outras; se a causa específica não é determinada, nenhuma resposta ao gerenciamento pode ser obtida (LARK e STAFFORD, 1997).

O mapa de produtividade é apenas uma etapa de todo o processo que envolve a agricultura de precisão e representa o efeito combinado de diversas fontes de variabilidade espacial e temporal. Uma parte dessa variabilidade pode ser atribuída a fatores que são constantes ou variam lentamente, enquanto outros fatores são transitórios, mudando em sua importância e distribuição espacial e temporal de uma safra para outra (CAPELLI, 2004).

Molin (2002) reforça que essa informação é o ponto de partida tido por usuários e pesquisadores para se visualizar a variabilidade espacial das lavouras, por materializar a resposta da cultura.

No começo da década de 90, começaram a ser desenvolvidas tecnologias e princípios para manejar as variabilidades espacial e temporal associadas com os aspectos da produção agrícola. A produtividade das culturas varia espacialmente, e determinar as causas dessas variações é o desafio que enfrenta a Agricultura de Precisão. As variações espaciais podem ser estudadas a partir de técnicas geoestatísticas que permitem elaborar mapas e delimitar áreas de manejo diferenciadas (FARIAS et al., 2003).

2.8 Sistema de Informação Geográfica (SIG)

Sistema de Informação Geográfica (SIG) é um conjunto de equipamentos, sistemas computacionais, dados e usuários, perfeitamente integrados, de forma a tornar possível a coleta, o armazenamento, o processamento e a análise de dados georreferenciados, além de proporcionar a produção de informações (TOZI, 2000).

SIG integra diversos outros sistemas (ex: processamento digital de imagens, análise estatística, análise geográfica, digitalização para ser capaz de realizar estas operações e ainda dispor de entrada e saída de dados de diversos formatos, tendo como ponto central um banco de dados. (LAMPARELLI et al., 2001).

Qualquer SIG apresenta duas características principais: insere e integra num único banco de dados, informações espaciais provenientes de diversas fontes e oferece um mecanismo para combinar estas informações, por meio de algoritmos de manipulação e análise, bem como de consulta, de recuperação, de visualização e de impressão do conteúdo do banco de dados georreferenciados (MOREIRA, 2001).

No caso da agricultura de precisão, as bases de dados são construídas com base em um constante acompanhamento do local, análise e interpretação de fotografias multiespectrais dos resultados obtidos, formando um ciclo para que se possa desenvolver um plano de gestão para o local. Isto, combinado com informação econômica e administrativa, se torna uma ferramenta poderosa de tomada de decisão (BONGIOVANNI et al., 2006).

Carvalho Júnior et al. (2003) recomenda a utilização de SIG em trabalhos de zoneamento, pois cria um banco de dados georreferenciados e permite atualizações e correções de modo rápido e bastante simples e ainda permite avaliar as unidades de mapeamento para todos os seus componentes, bem como a percentagem de ocorrência de cada componente dentro da unidade de mapeamento.

2.9 Variabilidade Espacial

Há necessidade de se obter estimativas das propriedades do solo e planejar pesquisas de forma mais econômica, buscando métodos mais racionais e quantitativos para o estudo das variabilidades intrínsecas dos solos. Desse modo, o conhecimento da variabilidade do solo subsidia a tomada de decisão, além de auxiliar em levantamentos e classificação e na elaboração de mapas (WEBSTER, 1985).

A variabilidade espacial dos atributos do solo influencia na eficiência do manejo e no desenvolvimento da cultura. Portanto, o conhecimento da variabilidade espacial das propriedades do solo é um importante passo para que se possa empregar um manejo mais adequado com relação à realização de práticas agrícolas, estratégia de amostragem e planejamento agrícola eficiente (BHATII et al., 1991).

Dampney e Moore (1999) citam que atributos do solo, não facilmente alterados como a textura e profundidade do solo, assim como os atributos que podem ser alterados, como o pH e os teores de nutrientes do solo e fatores estacionais de curta duração, como o clima, doenças foliares e pragas são os principais fatores que podem causar variabilidade na produtividade ou na qualidade das culturas.

Uma vez quantificada, a dependência espacial das propriedades do solo pode ser utilizada para a classificação e para o levantamento de solos em uma área, assim como pode ser usada na interpolação entre observações, permitindo o mapeamento da propriedade do solo dentro da área, por meio da krigagem. Esta técnica permite a estimativa de valores de forma não tendenciosa e com variância mínima (GONÇALVES et al., 2001). Gonçalves (1997) apresenta um estudo geoestatístico detalhado de várias propriedades físicas dentro da

área do presente estudo, no qual foram realizadas interpolações por krigagem para descrever a sua distribuição espacial.

2.10 Geoestatística

Trabalhando com os dados de mineração de ouro, Krige (1951), concluiu que, as variâncias obtidas através da abordagem clássica de amostragem, não faziam sentido se não considerasse as distâncias entre as amostras. Foi então, que Matheron (1963), baseado nestas observações, desenvolveu a Teoria das Variáveis Regionalizadas. Ela foi definida como uma função espacial numérica, variando de um local para outro, apresentando continuidade aparente e cuja variação não pode ser representada por uma simples função matemática. A aplicação dessa teoria a problemas voltados para a geologia e mineração recebeu o nome de geoestatística (MELLO, 2004).

Através dos avanços tecnológicos na agropecuária, especialistas têm notado, cada vez mais, que os diversos setores da agricultura não podem ser tratados de maneira homogênea no que diz respeito à medição de variáveis nas áreas agrícolas. Neste sentido, a variação espacial e temporal deve ser considerada para que se possa ter melhor aplicação e aproveitamento dos insumos, podendo assim melhorar a produtividade, reduzir o custo de produção e o impacto ambiental causado pelo excesso utilizado (FARIAS et al., 2003).

Quando uma quantidade muito grande de dados é coletada, como é o caso do mapeamento de colheita, onde são coletados pontos amostrais a cada um ou dois segundos, técnicas de suavização podem ser utilizadas para evidenciar as tendências no mapa. Porém, quando os dados são esparsos, como nas amostragens de solo, precisa-se de técnicas de interpolação para produzir, como por exemplo, mapas dos componentes da fertilidade ou da textura (KNOB, 2006).

A formação dos solos não é homogênea ao longo do tempo, tampouco no espaço, e muitas vezes suas propriedades não variam ao acaso, mas apresentam dependência espacial ou temporal. Essa dependência pode invalidar o uso de análises estatísticas convencionais em experimentos de campo, especialmente naqueles que utilizam grandes parcelas. Desse modo, é importante o conhecimento do comportamento espacial ou temporal da variável em estudo para se escolher o modelo matemático adequado (BERNER et al., 2007).

Para representar a dependência espacial nas amostragens, utiliza-se de um tipo de estatística chamada geoestatística (FARIAS et al., 2002b).

Segundo Lamparelli et al. (2001) a geoestatística é um conjunto de técnicas que estima valores regionalizados e espacializados de atributos ou características de determinada área a

ser estudada, utilizando como ferramenta básica à interpolação, gerando como produto um mapa da área segundo um atributo com estimativas não viciadas e de mínima variância.

Os atributos do solo não variam ao acaso, mas de acordo com uma dependência espacial (VIEIRA et al., 1983). Portanto, há necessidade de se identificar o grau dessa dependência, e gerar um mapa preciso das variáveis analisadas. A partir da análise geoestatística dos dados é possível conhecer tal dependência espacial.

A análise geoestatística dos dados consiste em tentativas e erros para a elaboração do melhor modelo de um semivariograma teórico, visando à geração de mapa que represente realmente a situação no campo pelo processo de interpolação.

A análise estatística deve ser realizada através das ferramentas da geoestatística, na maior parte dos estudos, envolvendo áreas não homogêneas, pois o uso da estatística clássica, baseada na média e no desvio padrão é contra indicada nos casos que existe dependência espacial.

Segundo Vieira (2000) a geoestatística aplicada a agricultura de precisão tem por objetivo identificar, na aparente desordem entre as amostras, a medida da correlação espacial, realizar estimativas de valores em locais não amostrados a partir de alguns valores conhecidos na população e identificar inter-relações de propriedades no espaço, além de permitir estudar padrões de amostragem adequados.

O conhecimento da variabilidade espacial das propriedades físicas do solo pode contribuir na definição de melhores estratégias para o manejo sustentável do solo. A utilização de técnicas geoestatísticas permite avaliar e descrever detalhadamente a distribuição espacial das propriedades do solo. Em relação às propriedades físicas do solo, a maioria dos estudos tem demonstrado uma ampla diversidade de resultados, com variação entre os locais estudados, com ou sem continuidade espacial, provavelmente associada ao sistema de manejo e às características intrínsecas dos solos (GREGO e VIEIRA, 2005).

2.11 Análise Geoestatística

Os procedimentos a serem descritos utilizaram-se da informação da posição da amostra e o valor que a variável assume em cada ponto. Desta forma, de cada amostra deve-se ter o valor da variável e as coordenadas do ponto onde foi coletada. As coordenadas devem ser expressas em um sistema de unidades que permita o cálculo da distância entre as amostras (UTM).

2.11.1 Análise Variográfica: O Semivariograma Experimental

Antes de se prosseguir com os estudos, foram definidos os parâmetros e características do semivariograma, com base no esquema mostrado na Figura 2.

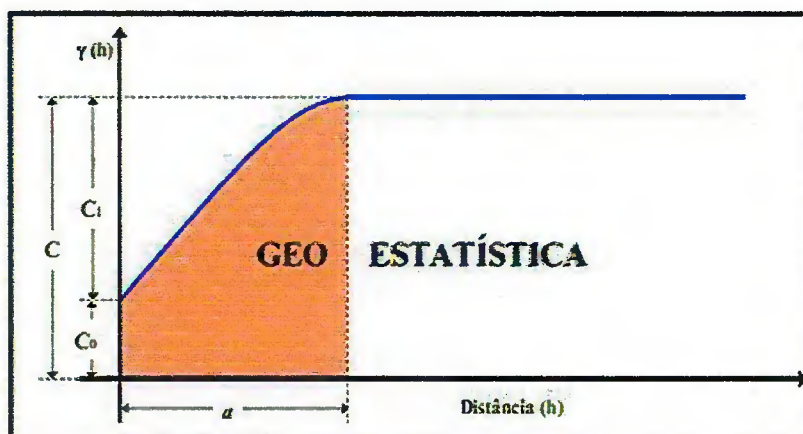


Figura 2. Esquema do semivariograma experimental utilizado (adaptado de GUERRA, 1988).

Esquemáticamente a Figura 2 representa:

Alcance (a): À medida que a distância entre os pares aumenta, a variabilidade tenderá a aumentar até atingir um determinado nível. À distância onde o variograma atinge este nível é denominado de alcance ou “range”.

Patamar (C): Representa o nível de variabilidade onde o variograma se estabiliza. Este patamar deve ser teoricamente igual à variância amostral. Este parâmetro é também denominado “Sill”.

Variância Espacial (C_1): Representa as diferenças espaciais entre os valores de uma variável tomada em dois pontos separados por distâncias cada vez maiores.

Efeito Pepita (C_0): que corresponde ao ponto onde o semivariograma intercepta o eixo das ordenadas, se refere à variância não explicada ou ao acaso, frequentemente causada por erros de medições de microvariações não detectadas pela escala de amostragem (VIEIRA, 2000).

Para distância igual a zero ($h = 0$), o variograma deveria apresentar variabilidade nula. Entretanto, vários fatores como erros de amostragens, erros de medidas ou ainda microregionalizações da variável em análise, causam uma descontinuidade na origem do variograma, denominado de efeito pepita (“nugget effect”).

A obtenção do semivariograma é descrita como o primeiro passo no procedimento de uma análise Geoestatística. Na verdade, ele é o passo mais importante porque o modelo

escolhido será utilizado no processo da krigagem (Mapas de Contornos) e influenciará todos os resultados interpolados e as conclusões. Neste estágio o avaliador deverá decidir se usa ou não a Geoestatística para a avaliação (FARIAS et al., 2002b).

2.11.2 Modelos

Dependendo do comportamento de $\gamma(h)$ para altos valores de h , os modelos podem ser classificados em: modelos com patamar ("Sill") e modelos sem patamar.

2.11.3 Modelos com patamar

Nos modelos seguintes, C_0 é o efeito pepita, $C_0 + C_1$ é o patamar, e α é o alcance do semivariograma.

a) Modelo Linear

O modelo linear é dado por,

$$\begin{cases} \gamma(h) = C_0 + \frac{C_1}{\alpha} & 0 < h < \alpha \\ \gamma(h) = C_0 C_1 & h \geq \alpha, \end{cases} \quad (\text{Eq 01})$$

onde C_1/α é o coeficiente angular para $0 < h < \alpha$, determinado pela inclinação da reta que passa pelos primeiros pontos de $\gamma(h)$, dando-se maior peso àqueles que correspondem a maior número de pares; o efeito pepita, C_0 , é determinado pela interseção da reta no eixo $\gamma(h)$; o alcance α , é o valor de h correspondente ao cruzamento da reta inicial com o patamar e $C_1 = \text{patamar} - C_0$.

b) Modelo Esférico

O modelo esférico é dado por,

$$\begin{cases} \gamma(h) = C_0 + C_1 \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{\alpha} - \frac{1}{2} \left(\frac{h^3}{\alpha^3} \right) \right) \right] & 0 < h < \alpha \\ \gamma(h) = C_0 C_1 & h \geq \alpha. \end{cases} \quad (\text{Eq 02})$$

O modelo esférico é obtido selecionando-se os valores do efeito pepita, C_0 , e do patamar, $C_0 + C_1$, depois passando-se uma reta que intercepte o eixo-y em C_0 e seja tangente aos primeiros pontos próximos de $h = 0$. Essa reta cruzará o patamar à distância, $a' = 2/3 a$. Assim, o alcance, a , será $a = 1/3 a$.

c) Modelo Exponencial

O modelo exponencial é dado por,

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp\left(-3\frac{h}{\alpha}\right) \right] \quad 0 < h < d, \quad (\text{Eq 03})$$

onde d é a máxima distância na qual o semivariograma é definido.

Uma diferença fundamental entre o modelo exponencial e o esférico é que o exponencial atinge o patamar apenas assintoticamente, enquanto que o modelo esférico o atinge no valor do alcance. O parâmetro a é determinado visualmente como a distância após a qual o semivariograma se estabiliza. Os parâmetros C_0 e C_1 para os modelos exponencial e gaussiano são determinados da mesma maneira que para o esférico.

d) Modelo Gaussiano

O modelo gaussiano é dado por,

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp\left(-3\frac{h}{\alpha}\right)^2 \right] \quad 0 < h < d. \quad (\text{Eq 04})$$

A função é parabólica próxima à origem. Este modelo apresenta um alcance extenso e o patamar semelhante ao modelo exponencial.

2.11.4 Modelo Aleatório (Efeito Pepita Puro)

$$\gamma(h) = C, \quad \text{para qualquer } h. \quad (\text{Eq 05})$$

À medida que aumenta a descontinuidade na origem do semivariograma, mais aleatório é o fenômeno que originou a variável em análise. Esta característica decorre de uma provável regionalização, inferior à escala de trabalho da malha de amostragem e/ou às variações espúrias associadas com a coleta e medição das amostras (FARIAS et al., 2002a, 2002b).

2.11.5 Krigagem

O estimador espacial denominado de Krigagem tem como base os dados amostrados da variável regionalizada e as propriedades estruturais do semivariograma obtido a partir destes dados. Krigagem é um método de inferência espacial, o qual estima dados em pontos não amostrados a partir de pontos amostrados, considerando a estrutura de dependência espacial do fenômeno. Este método foi desenvolvido por Matreron na década de 60, e recebeu o nome de Krigagem em homenagem ao engenheiro de minas sul-africano Daniel G. Krige, que primeiro desenvolveu e implementou esta fórmula de inferência em 1951 (MELO, 2004).

Supondo-se que se queira estimar valores z^* , para qualquer local, x_0 , onde não se tem valores medidos, e que a estimativa deve ser uma combinação linear dos valores medidos, tem-se:

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(x_i), \quad (\text{Eq } 06)$$

onde N é o número de vizinhos medidos, $Z(x_i)$, utilizados na estimativa da propriedade e λ_i são os ponderadores aplicados a cada $Z(x_i)$, os quais são selecionados de forma que a estimativa obtida seja não tendenciosa.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

A área experimental está localizada no município de Capitão Poço, PA, distante cerca de 200 km da capital, Belém; microrregião do Guamá, mesorregião do nordeste paraense (Figura 3), na Fazenda Beira Rio, compreende as coordenadas geográficas: 01° 42' 58" de latitude Sul e 47° 00' 54" de longitude Oeste de Greenwich (sede da fazenda), apresentando solo do tipo Latossolo Amarelo, o relevo local é suave ondulado com declividade em torno de 3,8 %, clima tipo Ami, segundo a classificação de Köppen, com os maiores índices de pluviosidade de janeiro a março e os menores de agosto a novembro.

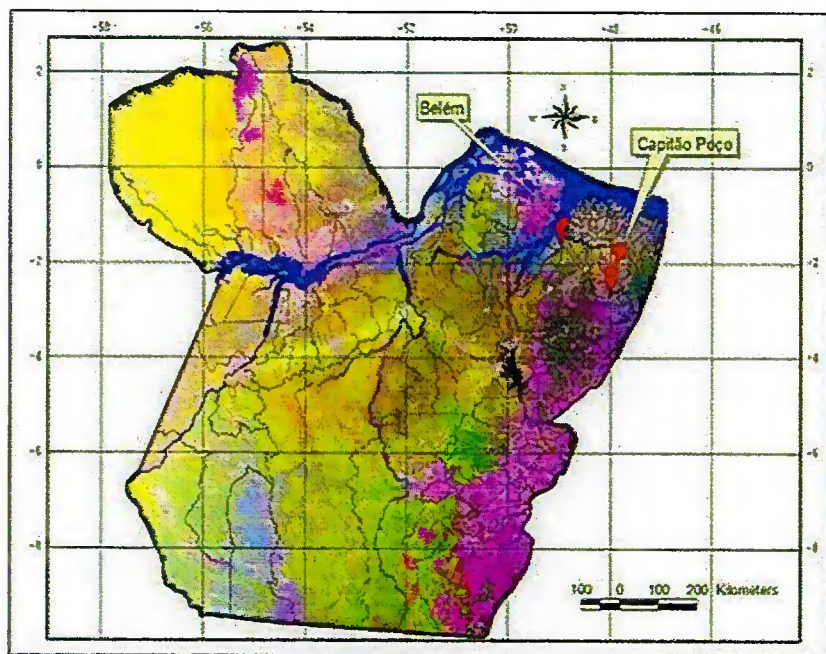


Figura 3. Imagem de satélite do Estado do Pará, destacando a capital do estado Belém e o município de Capitão Poço - PA (resolução espacial de 30 m).

A área foi cultivada com plantas de soja (*Glycine max* (L.) Merrill), cultivar BRS Sambaíba, plantadas em espaçamentos de 0,4 x 0,5m, em sistema de plantio direto implantado há 5 anos. A cobertura do solo foi consequência da cultura anterior ao longo do tempo, com solo coberto por massa seca de culturas, suficiente para boa proteção do solo. O plantio da soja foi feito em linhas retas sem a utilização de curvas de nível (Figura 4).

A cultivar BRS Sambaíba foi desenvolvida pela Embrapa Soja e possui hábito de crescimento determinado e boa resistência ao acamamento e deiscência de vagens. É resistente às doenças cancro da haste, mancha olho-de-rã e pústula bacteriana. Esta cultivar possui flores de coloração branca, pubescência marrom, vagem marrom clara e semente de tegumento amarelo com hilo de cor preta (EL-HUSNY, 2003).



(a)



(b)

Figura 4. Área experimental em Latossolo Amarelo, com plantio de soja, cultivar BRS Sambaíba, localizada na Fazenda Beira Rio, Capitão Poço – PA (junho de 2008). (a) Vista geral da plantação e (b) Linhas de plantio.

3.2 Georreferenciamento dos talhões

Os pontos de amostragens foram identificados por um receptor GPS V Plus, fabricado pela Garmin. Esse modelo, cujo uso atende, principalmente, a usuários terrestres e náuticos, possui características predominante padrões, pois seu sistema de acesso e operação de tarefas é igual, ou extremamente semelhante a outros receptores, por esse motivo o mesmo foi escolhido como o receptor para coleta dos pontos para georreferenciar os talhões. As coordenadas (ponto) utilizadas no trabalho foram transformadas para o sistema UTM

(Universal Transversa de Mercator), seguindo o sistema das coordenadas retangulares. Esse sistema de coordenadas estabelece a divisão da terra em 60 fusos de 6° cada. O fuso tem este tamanho para garantir níveis aceitáveis de deformação.

Selecionou-se para a coleta das amostras, uma área com 39,52 ha. A digitalização dos pontos amostrais foi feita no software SURFER 8.0 (Golden Software, 2002). Na área experimental, foram selecionados para a amostragem, 196 pontos, distantes 100 m de cada um, resultando em uma malha de 14 colunas e 14 linhas (Figura 5). Cada ponto de amostragem teve sua localização espacial conhecida.

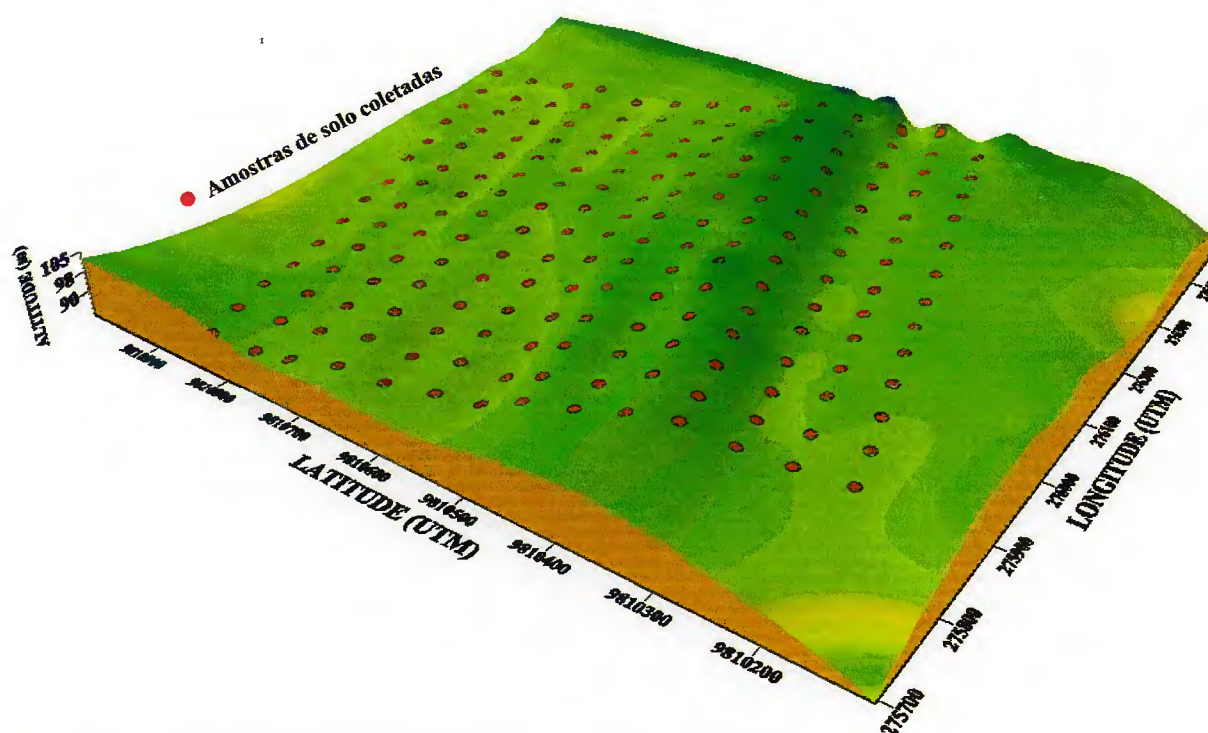


Figura 5. Grade de amostragem com os 196 pontos de coletas georreferenciados.

3.3 Análise Física

Em cada ponto georreferenciado foi coletada uma amostra indeformada, em anel cilíndrico de aço inox com volume de 100 cm³, utilizando-se amostrador específico. As amostras indeformadas foram coletadas na camada superficial de 0 a 5 cm, totalizando 196 amostras.

As amostras foram saturadas, durante 24 horas, e submetida ao potencial de 10 kPa, que corresponde a capacidade de campo, em mesa de tensão. Após estabelecido o equilíbrio, as amostras foram submetidas à determinação da resistência do solo à penetração (RP), com três repetições por amostra.

A RP foi determinada com o auxílio de um penetrômetro eletrônico estático de laboratório com velocidade constante de penetração de $0,01 \text{ m min}^{-1}$, registro de uma leitura por segundo, cone com semi-ângulo de 30° e área de $3,14 \times 10^{-6} \text{ m}^2$, equipado com atuador linear e célula de carga de 20 kgf acoplado a um microcomputador para a aquisição dos dados em formato txt. Em uma planilha do Excel, estes dados foram convertidos para kPa. Foi calculado o valor médio das três repetições para representar a RP média de cada amostra.

Em seguida, as amostras foram secas em estufa a 105° C por 24 h para a determinação da densidade do solo (D_s).

A densidade do solo foi determinada utilizando a equação 06:

$$D_s = \frac{M_s}{V_a}, \quad (\text{Eq 06})$$

onde D_s = densidade do solo (g.cm^{-3}); M_s = massa do solo seco em estufa a 105° C e V_a = volume do anel (cm^3).

A análise granulométrica foi realizada pelo método do densímetro, por Camargo et al. (1986). Colocou-se no becker de 500 mL, 50 g de TFSE, 25 mL de NaOH 1N como dispersante e 100 mL de água destilada. Deixou-se em repouso por uma noite. No outro dia, o conteúdo foi completado com água destilada até 300 mL. Agitou-se durante 15 minutos. O conteúdo foi transferido para uma proveta de 1000 mL e completado o volume da proveta com água destilada. A solução foi agitada com uma haste durante 40 segundos, em seguida colocou-se o densímetro, recomendado pela “American Society for Testing and Materials” modelo n°152 H, com escala de Bouyoucos em g L^{-1} , para fazer a leitura do silte + argila. Para a correção da leitura, foi colocado em uma proveta de 1000 mL, 25 mL de NaOH 1N e completado o volume da proveta (prova em branco). Antes de cada leitura da suspensão do solo, era feita a leitura do densímetro e da temperatura do termômetro na prova em branco. Após duas horas do início da sedimentação, fez-se a leitura da argila.

3.4 Análise Química

Para análise dos atributos químicos, foram retiradas amostras deformadas, coletadas na profundidade de 0 - 0,10 m no centro de cada parcela. As análises foram realizadas segundo Embrapa (2007) e efetuadas no Laboratório de Química do Solo do Instituto de Ciências Agrárias/UFRA.

As amostras de solo foram destorroadas e secas ao ar livre e passadas em peneira de 2 mm de malha obtendo-se terra fina seca ao ar (TFSA).

Os atributos químicos do solo determinados foram: potencial hidrogeniônico (pH) [em água e KCl], teor de fósforo disponível (P) [mg dm^{-3}], teor de potássio trocável (K^+) [$\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$], teor de cálcio trocável (Ca^{2+}) [$\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$], teor de magnésio trocável (Mg^{2+}) [$\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$], teor de alumínio (Al^{3+}) e acidez potencial ($\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$) [$\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$].

O pH foi determinado em água na relação (solo: solução de 1:2,5); o P e K foram extraídos por Mehlich-1 (0,025 N de H_2SO_4 + 0,05 mol L^{-1} de HCl), sendo o P determinado por colorimetria e o K por fotometria de chama; Al, Ca e Mg extraídos com KCl 1 mol L^{-1} , sendo o Al determinado por titulação (volumetria de neutralização), enquanto que Ca e Mg foram determinado por complexometria com EDTA; H+Al extraído com solução de acetato de cálcio 1 N pH 7,0 e determinado por titulação.

3.5 Produtividade

Para a determinação da produtividade, foram selecionados 196 pontos georreferenciados, onde as plantas foram coletadas manualmente, utilizando-se um quadrado de 1,2 x 1,2 m (Figura 6).

Após a colheita das plantas, estas foram acondicionadas em sacos, devidamente identificados e levadas para secagem ao ar livre. Posteriormente, foram acondicionadas em um ambiente fechado para debulha manual e separação dos grãos da palha por peneiramento. Escolheu-se a debulha manual como forma de evitar possíveis perdas de grãos que normalmente ocorrem com a debulha mecanizada.



Figura 6. Um dos 196 pontos de amostragem da colheita manual da soja, em Latossolo Amarelo, sistema de plantio direto, em Capitão Poço – PA (setembro de 2008).

A determinação do grau de umidade foi efetuada em estufa a 105° C durante 24 horas, utilizando-se uma amostra para cada lote, segundo as prescrições da Regra de Análise de Sementes - RAS (Brasil, 1980), sendo os resultados expressos em porcentagem.

A produtividade de grãos foi obtida do produto colhido manualmente na área útil das parcelas com umidade corrigida para 13% como segue:

$$MC = \frac{(100 - UI) \times MI}{100 - UC}, \quad (\text{Eq 07})$$

sendo que:

- MI - massa inicial;
- MC - massa corrigida;
- UI - umidade inicial;
- UC - umidade corrigida.

Os resultados de produtividade são apresentados em kg.ha⁻¹.

Em alguns pontos de amostragem não houve produção de soja, pois as mesmas encontravam-se em local com acúmulo de água, fato que impediu o crescimento e desenvolvimento radicular da planta.

3.6 Análise da Estatística Descritiva

Para cada atributo estudado, efetuou-se uma análise exploratória dos dados, no software EXCEL, não levando-se em consideração a posição geográfica da amostra; assim, foram calculados a média, a mediana, valores mínimo e máximo, o desvio-padrão e o coeficiente de variação.

3.7 Análise Geoestatística

Os procedimentos utilizados se utilizam da informação da posição da amostra e o valor que as variáveis assumiram em cada ponto; desta forma se tem, de cada ponto de amostragem, o valor das variáveis e as coordenadas (latitude e longitude).

Avaliou-se a dependência das amostras e construiu-se um semivariograma conforme Vieira et al. (1983):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2, \quad (\text{Eq 08})$$

onde $N(h)$ é o número de pares experimentais de valores medidos $Z(x_i)$, $Z(x_i + h)$, separados por um vetor h . O gráfico de $\gamma(h)$ “versus” valores correspondentes de h , chamado semivariograma, é uma função do vetor h e, portanto depende da magnitude e direção de h . Após o ajuste do semivariograma aos modelos gaussiano, esférico e exponencial, os dados das amostragens foram estimados através da krigagem ordinária.

Para propriedades espacialmente dependentes, espera-se que a diferença entre valores $[Z(x_i) - Z(x_i + h)]$ seja, em média, crescente com a distância até determinado ponto a partir do qual se estabiliza um valor, denominado patamar (C_1) que é aproximadamente igual à variância dos dados. Esta distância recebe o nome de alcance (a) e representa o raio de um círculo dentro do qual os valores são tão parecidos uns com os outros que se correlacionam. O valor da semivariância na interseção do eixo Y tem o nome de efeito pepita (C_0) e representa a variabilidade da propriedade estudada em espaçamentos menores que o amostrado; assim, quanto maior o efeito pepita mais fraca é a dependência espacial de um atributo (OLIVEIRA et al., 2009).

A análise da dependência espacial foi feita através do ajuste dos dados ao semivariograma experimental, de acordo com a teoria das variáveis regionalizadas. Realizou-se a seleção dos modelos com base no maior valor de R^2 (coeficiente de determinação). Após a obtenção dos gráficos de ajuste do modelo do semivariograma, fez-se a estimação dos dados

(Krigagem) no software SURFER v. 8, com vista a definir o padrão espacial das variáveis estudadas, a partir de mapas temáticos.

A escala dos mapas foram baseadas nas classes de teores de nutrientes (baixo, médio e alto) para os solos do Pará, segundo Cravo et al. (2007).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A área estudada apresenta solo de textura predominantemente argilosa com valores médios da Ds iguais a $1,37 \text{ g cm}^{-3}$ (Tabela 1); estima-se que valores de Ds superiores a $1,45 \text{ g cm}^{-3}$, para solos com textura argilosa, caracterizam solos compactados por restringir o desenvolvimento radicular das plantas (REINERT et al., 2001). A média dos valores de RP igual a $1,84 \text{ MPa}$ (Tabela 1), foi determinada na umidade da capacidade de campo (Ucc), umidade na qual ocorre a maior produção de grãos de soja (BEUTLER e CENTURION, 2003). Estudos realizados por Petter (1990), no campo, verificou valores de RP de $2,8 \text{ MPa}$ como sendo restritivos ao crescimento de raízes de soja.

A variabilidade dos dados foi analisada a partir dos coeficientes de variação dos dados (C.V.), conforme o critério de classificação proposto por Gomes (2000), em que foi considerado: baixo (C.V. < 10%); médio (10% < C.V. < 20%); alto (20% < C.V. < 30%) e muito alto (C.V. > 30%), o qual tem sido adotado em muitos trabalhos relacionados com estudos de solo, por ser uma medida adimensional e possibilitar a comparação da variabilidade de duas variáveis.

A densidade do solo (Ds) apresentou média variabilidade, com C.V. igual a 11%, discordando de Rosa Filho et al. (2009) e Carvalho et al. (2002) que observaram C.V. baixo para Ds em áreas cultivadas com soja sob plantio direto (Tabela 1). Os valores da resistência do solo a penetração (RP) apresentaram coeficiente de variabilidade muito alto, 50 % (Tabela 1). Foi observada baixa variabilidade nos dados de umidade do solo na capacidade de campo (Ucc), 9 %, mostrando que a variação da RP não ocorre devido a umidade do solo e sim, a mudança na estrutura do solo, ocasionada, possivelmente, pelos implementos agrícolas utilizados durante o cultivo e colheita da soja.

As variáveis químicas apresentaram C.V. médio e alto para o pH (água e KCl) e $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$, respectivamente, sendo que nas demais variáveis foi observado C.V. muito alto (Tabela 1). Cavalcante et al. (2007) obtiveram valores muito altos para as variáveis K e Mg em área sob plantio direto, corroborando com os resultados encontrados, entretanto, para o Ca o C.V. obtido pelo mesmo autor foi considerado médio. Segundo Vanni (1998), coeficiente de variação maior que 35% revela que a série de dados é heterogênea e que a média tem pouco

significado. Dessa forma, pode-se dizer que as variáveis P, K, Ca, Mg e Al apresentaram série de dados heterogêneos e média com pouco significado.

O alto valor de C.V. para as variáveis químicas pode ser explicado, possivelmente, pelo efeito residual de adubações anteriores, já que as adubações ocorrem na linha de plantio, enquanto a correção da acidez do solo é feita a lanço, não havendo homogeneização sobre as áreas aplicadas. O não-revolvimento do solo, como ocorre no plantio direto, também favorece a maior variabilidade nos dados (MONTEZANO et al., 2006).

O valor muito alto de C.V. observado nos dados de produtividade (Tabela 1), pode ser explicado pelo fato de 7,7% da área estudada (3,04 ha) ter apresentado 0,00 de produção de soja e 29,74% (11,75 ha) ter apresentado produção acima da média nacional que é 2627 kg/ha (43,8 sacas/ha) (CONAB, 2009).

Mesmo que os valores de CV sejam moderados, este não é um bom indicador da variabilidade espacial de atributos do solo, pois podem ocorrer no campo valores extremamente altos ou baixos (MONTANARI et al., 2008).

Tabela 1. Estatística descritiva das análises físicas e químicas e da produtividade da soja sob plantio direto em Capitão Poço – PA (junho de 2008).

Atributos	Média	Mediana	Valor		DP	CV %
			Mínimo	Máximo		
Densidade do solo (g cm ⁻³)	1,37	1,37	1,04	1,76	0,15	11
Resistência à penetração (MPa)	1,84	1,69	0,32	5,11	0,92	50
Umidade na capacidade de campo (cm ³ cm ⁻³)	0,40	0,40	0,31	0,50	0,04	9
pH água	5,13	5,02	4,26	6,74	0,51	10
pH KCl	4,46	4,34	3,07	6,08	0,46	10
Fósforo (mg dm ⁻³)	8,86	6,35	0,55	39,03	7,50	85
Potássio (cmol _c dm ⁻³)	0,18	0,15	0,02	0,57	0,10	57
Cálcio (cmol _c dm ⁻³)	2,25	1,78	0,44	6,84	1,39	62
Magnésio (cmol _c dm ⁻³)	0,73	0,71	0,09	2,75	0,46	64
Alumínio (cmol _c dm ⁻³)	0,55	0,48	0,09	2,40	0,37	67
Acidez potencial (cmol _c dm ⁻³)	5,97	5,89	1,60	11,25	1,68	28
Produtividade (kg ha ⁻¹)	2090	2242	0,00	4563	907	43

Para a produtividade, observou-se uma alta variabilidade na área estudada (Figura 7). A produção variou de 0,0 a 4563 kg ha⁻¹ de soja, cuja média de produtividade foi de 2090 kg ha⁻¹, representando apenas 43% do potencial total da área. Da produtividade total, aproximadamente 30% é representada por plantas com produção superior a média nacional

(CONAB, 2009). Pela Figura 7, observa-se que a área tem potencial para produzir acima da média nacional. A área cultivada, a partir de técnicas de Agricultura de Precisão, poderia alcançar uma produção de 3058 kg/ha (51 sacas) com um potencial de produção de 90%. A média de produtividade poderia ser aumentada, significativamente, com controle da área de cultivo mediante o conhecimento da variação do rendimento de grãos de local para local.

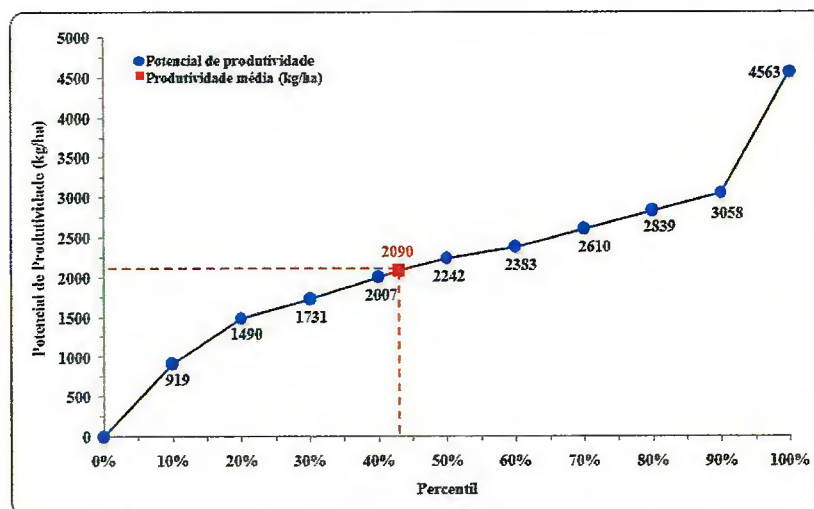


Figura 7. Produtividade média e potencial de produtividade da soja, em Latossolo Amarelo, sistema de plantio direto, em Capitão Poço – PA (setembro de 2008).

Realizou-se, através dos dados dos semivariogramas ajustados, a krigagem ordinária, para a construção do mapa da distribuição espacial da produtividade da área.

A utilização de mapas de produtividade é importante para a compreensão do processo de variabilidade espacial da produção agrícola e para justificar ações de manejo agrônomico que visam o aumento e manutenção sustentada dos índices de produtividade de uma lavoura agrícola.

Na Figura 8A, está representado o mapa de declividade do terreno com valores médios de 3,8%, que se enquadra na classe de relevo suave ondulado. Faz-se importante destacar que práticas conservacionistas simples como, curvas de níveis, não foram utilizadas na implantação do cultivo, apesar do relevo contribuir para o acúmulo de água, durante o período chuvoso, nos pontos mais baixos do terreno. A ausência de práticas conservacionistas pode ter contribuído, com o decorrer dos anos, para diferenciação da textura do solo em alguns pontos da área, sendo que, nas classes com textura média (franco argilo-arenosa) pode ter ocorrido perda de material, especialmente argila, a qual se acumulou nos pontos mais baixos permitindo o acúmulo de argila e, conseqüente, aparecimento da classe textural muito argilosa (Figura 8B).

O mapa de krigagem da produtividade (Figura 8C) mostra que os pontos de menor produtividade coincidem com as partes mais altas do terreno (105,87 m). Este fato sugere que apesar da área ser cultivada em sistema de plantio direto, processos erosivos podem ter sido influenciado pelo arraste de partículas e, conseqüentemente, na perda de nutrientes dos pontos mais altos, culminando com a diminuição da produtividade.

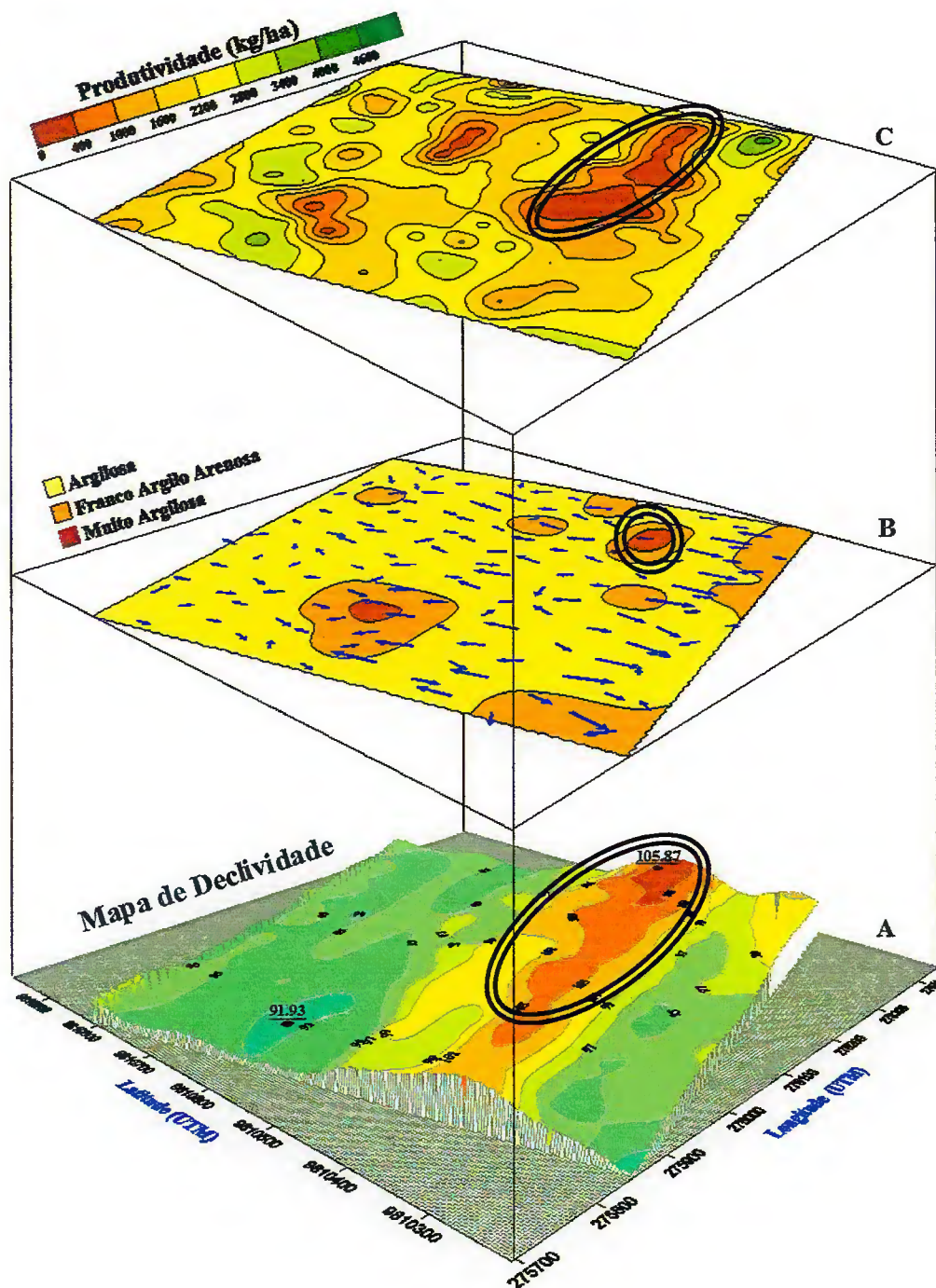


Figura 8. Variabilidade espacial da declividade (A), classes texturais (B) e produtividade da soja sob plantio direto (C) em Capitão Poço – PA (setembro de 2008).

Todos os dados de amostragens se ajustaram aos modelos, indicando que as variáveis estão correlacionadas espacialmente.

A análise geoestatística, efetuada por meio do semivariograma, demonstrou que a maioria das variáveis ajustaram-se ao modelo exponencial, com exceção da Ds e do teor de H^+ + Al^{3+} , que ajustaram-se ao modelo esférico e da textura que se ajustou ao modelo gaussiano, respectivamente (Tabela 2), indicando que as mesmas seguem uma tendência ao espalhamento, influenciadas, principalmente, pela declividade do terreno.

Tabela 2. Parâmetros dos semivariogramas das variáveis estudadas, ajustados aos modelos.

Atributos	Modelos	Parâmetros			
		C_0	C_1	a (m)	R^2
Densidade do solo ($g\ cm^{-3}$)	Esférico	0,01	0,007	130	0,98
Resistência à penetração (MPa)	Exponencial	0,25	0,5	100	0,98
Umidade na capacidade de campo ($cm^3\ cm^{-3}$)	Exponencial	0,0004	0,0007	110	0,95
Textura	Gaussiano	0,18	0,46	50	0,98
pH água	Exponencial	0,02	0,23	150	0,99
pH KCl	Exponencial	0,01	0,19	170	0,99
Fósforo ($mg\ dm^{-3}$)	Exponencial	120	150	180	0,82
Potássio ($cmol_c\ dm^{-3}$)	Exponencial	0,0055	0,005	75	0,95
Cálcio ($cmol_c\ dm^{-3}$)	Exponencial	0,5	1,3	125	0,98
Magnésio ($cmol_c\ dm^{-3}$)	Exponencial	0,0	0,21	130	0,98
Alumínio ($cmol_c\ dm^{-3}$)	Exponencial	0,035	0,105	145	0,97
Acidez potencial ($cmol_c\ dm^{-3}$)	Esférico	1,5	1,845	115	0,98
Produtividade ($kg\ ha^{-1}$)	Exponencial	150000	950000	120	0,97

C_0 : efeito pepita; C_1 : variância espacial; a: alcance; R^2 : coeficiente de determinação espacial.

O modelo esférico é obtido selecionando-se os valores do efeito pepita e do patamar, depois passando-se uma reta que intercepta o eixo Y em C_0 e seja tangente aos primeiros pontos próximos de $h = 0$. Uma diferença fundamental do modelo exponencial para o esférico é que o exponencial atinge o patamar apenas assintoticamente, enquanto que o modelo esférico o atinge no valor do alcance. (Figuras 9 e 10) (MARINS, 2006).

Os dados encontrados discordam daqueles observados por Carvalho et al. (2002) que afirmam ser o modelo matemático esférico, ajustado a todos os semivariogramas, o que predomina nos trabalhos em ciência do solo.

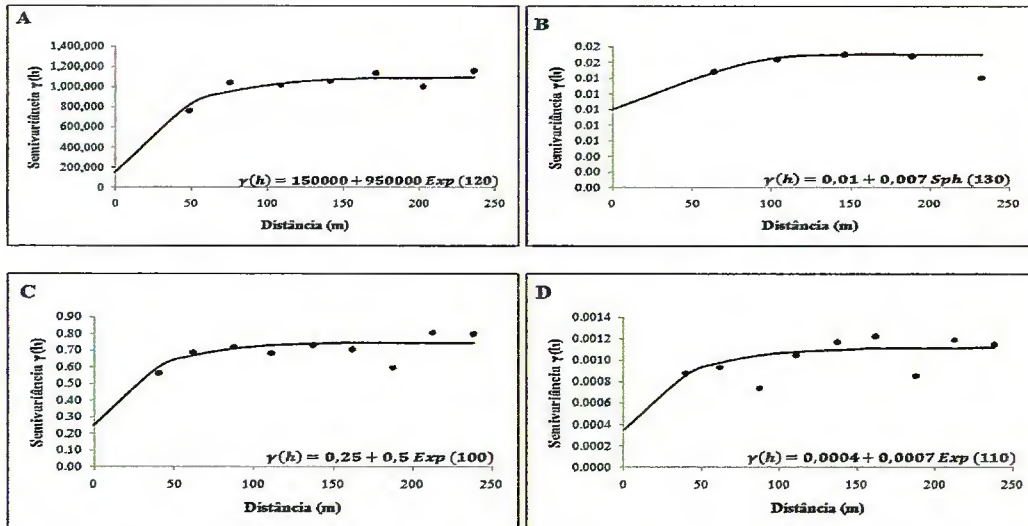


Figura 9: Semivariogramas da produtividade (A), densidade do solo (B), resistência do solo à penetração (C) e umidade na capacidade de campo (D).

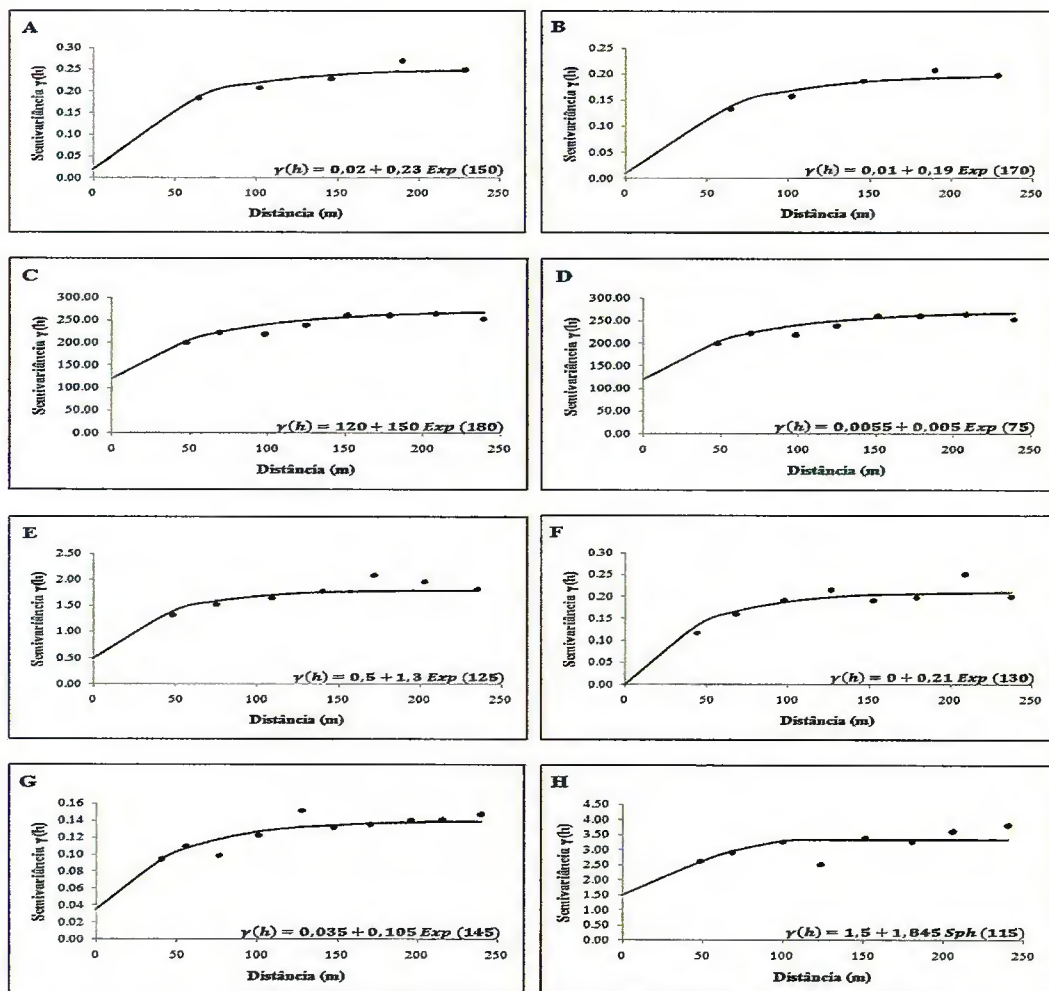


Figura 10: Semivariograma de pH em água (A), pH em KCl (B), fósforo (C), potássio (D), cálcio (E), magnésio (F), alumínio (G) e acidez potencial (H).

O semivariograma para a produtividade apresenta alcance de 120 m, para os atributos físicos apresentam alcance de 130 m para a Ds, 110 m para a Ucc e 100 m para a RP (Tabela 2 e Figura 9). O alcance semelhante para os dados físicos pode ser explicado pela influência da granulometria do solo nas propriedades Ds e RP, e que ambas as variáveis refletem as técnicas de manejo utilizadas na área.

Para os atributos químicos, o alcance é de 150 m para o pH em água, de 170 m para pH em KCl, 115 m para a acidez potencial, 125 m para o Ca, 130 para o Mg, 145 m para o Al, 180 para o P e 75 para o K (Tabela 2 e Figura 10). O alcance é de fundamental importância para a interpretação dos semivariogramas, pois indica a distância até onde os pontos amostrais estão correlacionados entre si, ou seja, os pontos localizados em uma área cujo raio seja o alcance, são mais semelhantes entre si, do que os separados por distâncias maiores (CARVALHO et al., 2002).

Nos semivariogramas para os atributos físicos e químicos (Tabela 2), observa-se que o coeficiente de determinação espacial (R^2) decresce na seguinte ordem: (1) pH em água e em KCl; (2) RP, Ds, textura, Ca, Mg e H + Al; (3) Al e produtividade; (4) Ucc e K e (5) P. De acordo com os valores de coeficiente de determinação espacial, o pH em água e em KCl indicaram ser os atributos de melhor ajuste variográfico.

Os mapas de distribuição espacial (Figuras 11 a 13) foram obtidos por interpolação (krigagem), a partir dos parâmetros dos modelos ajustados aos semivariogramas, a fim de estimar valores em locais não amostrados.

A menor produtividade da soja (Figura 11 A) coincidiu com as regiões mais compactadas (Figura 11 C). Isso pode ser justificado pela influência da compactação no desenvolvimento da planta.

As áreas com baixa densidade ($1,05$ a $1,45 \text{ g.cm}^{-3}$) (Figura 11 B) coincidiram com as áreas de menor RP (entre $0,3$ e $2,36 \text{ Mpa}$) (Figura 11 C) e também com os locais de maior produtividade. Já nas áreas de alta densidade (acima de $1,45 \text{ g.cm}^{-3}$) houve uma maior RP e menor produtividade.

De acordo com Silva et al. (2004), em lavouras sob plantio direto, o tráfego de máquinas provoca distintos estados de compactação. O maior estado de compactação ocorre na região dita “cabeceira” da lavoura, (destaque da Figura 11 C) onde as máquinas realizam as manobras e o estado de compactação vai reduzindo-se para o centro da lavoura.

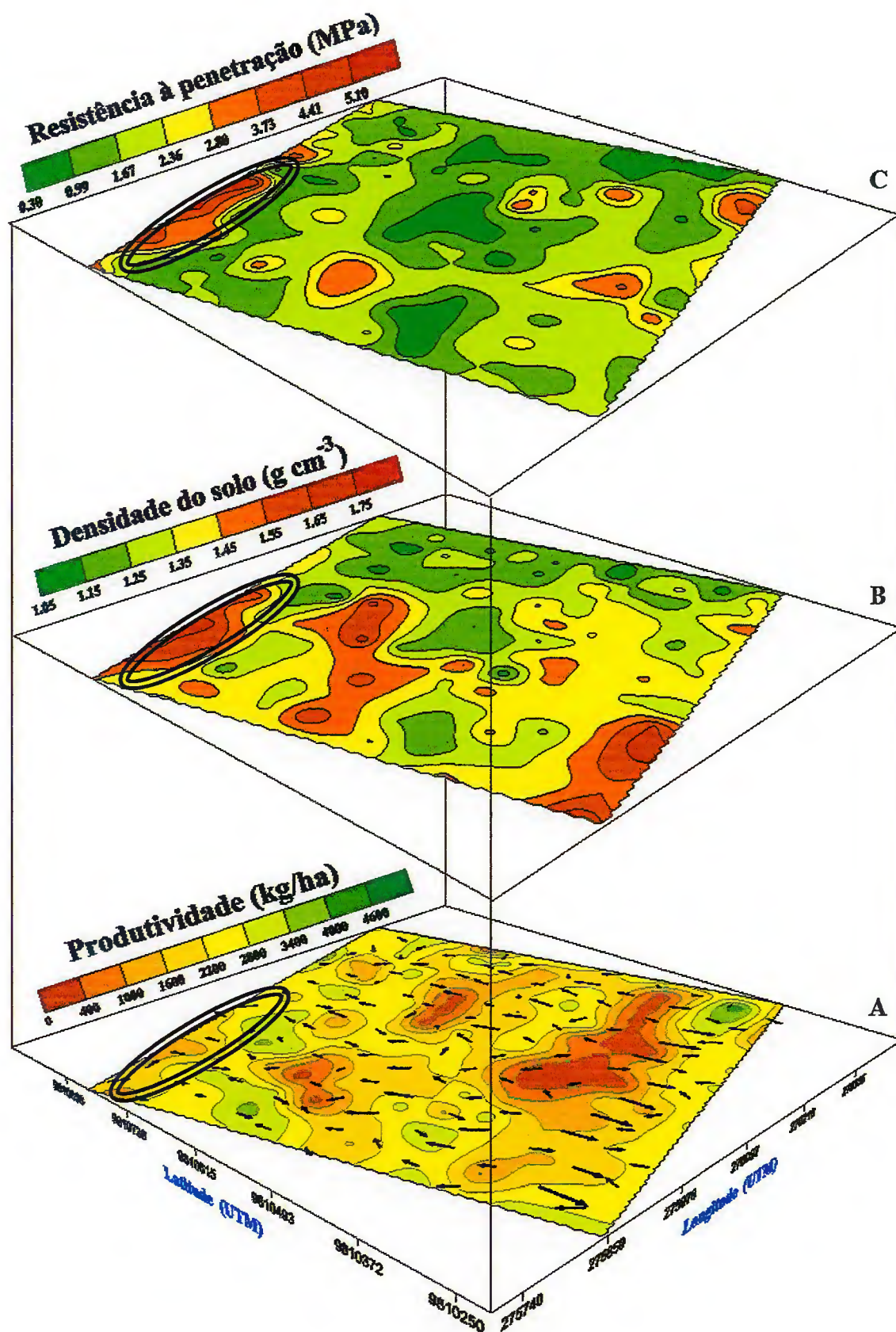


Figura 11: Distribuição espacial da produtividade (A), Densidade (B) e Resistência à penetração (C).

As áreas de maior pH (Figura 12 B) e de menor acidez potencial (Figura 12 C) coincidem com maior produtividade (Figura 12 A).

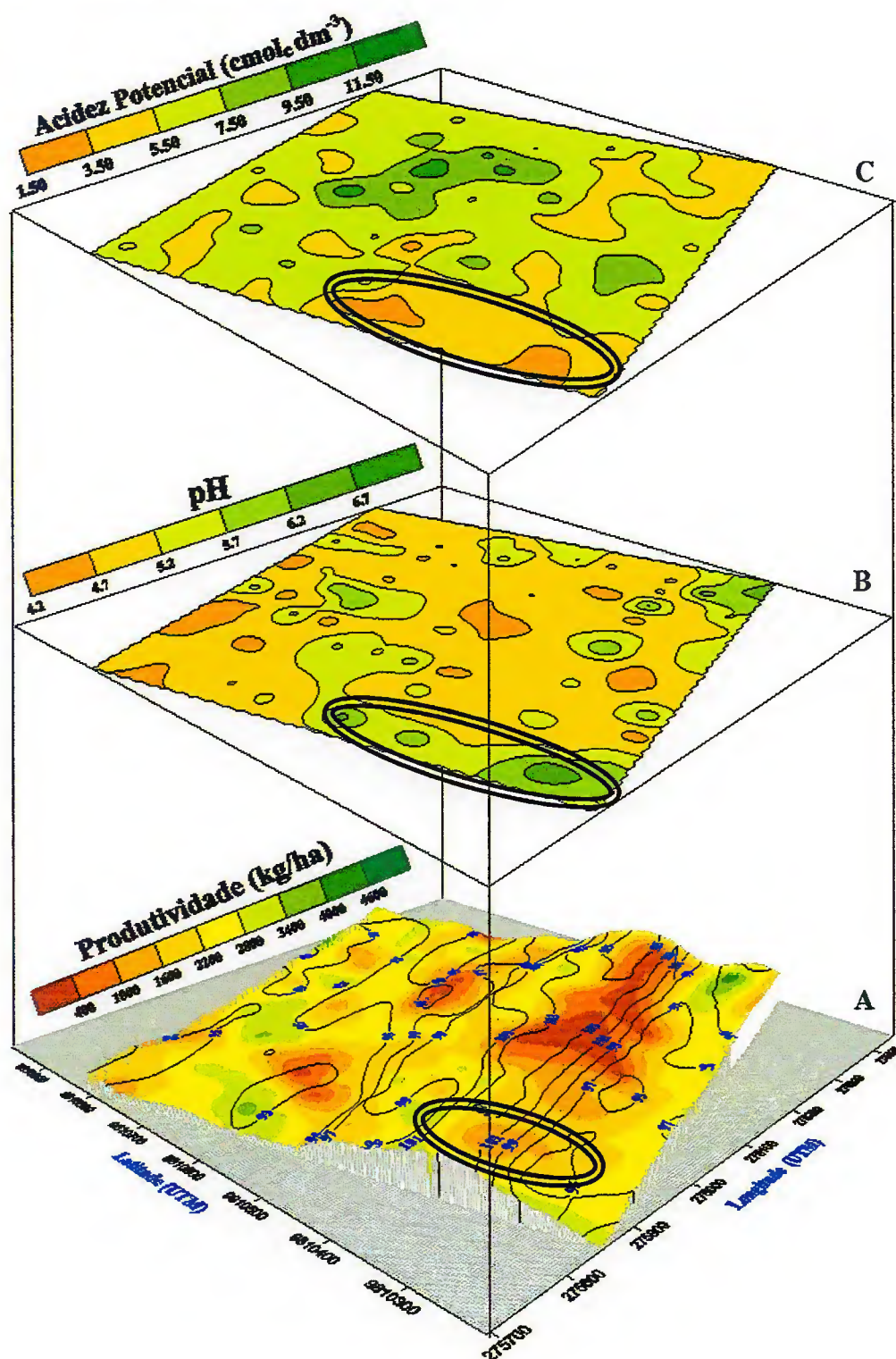


Figura 12. Mapa de produtividade com as cotas de declividade (A), mapa de pH (B) e mapa de acidez potencial (C).

Segundo Nolla e Anghinoni (2004), o pH é um dos indicadores que podem ser utilizados para definir se há ou não necessidade de calagem. E a acidez potencial tem sido utilizada para determinar a dose de corretivo por aplicar no solo para atingir objetivos pré-estabelecidos.

O fósforo (Figura 13 B) apresenta teores baixos ($<10 \text{ mg dm}^{-3}$) nas partes mais altas e maiores teores nas áreas de menor altitude do terreno, provavelmente devido ao arraste do nutriente para as partes mais baixas. Este fato foi demonstrado com a representação dos vetores, que indicam a direção do escoamento da água da chuva. Discordando do encontrado por Mello et al.(2006), que apresentou teores mais baixos de fósforo em altitudes menores.

O potássio mostra comportamento diferente e maiores teores nas áreas com menores altitudes (Figura 13 C - áreas verdes). Um dos fatores que podem estar influenciando, é a alta mobilidade desse nutriente no solo, ocorrendo sua deposição nas partes baixas do terreno.

O cálcio e o magnésio apresentam distribuições espaciais mais descontínuas, ocorrendo os menores teores nas áreas de maior altitude (Figura 13 D e E - circuladas), provavelmente pela lixiviação de bases. Discordando do encontrado por Mello et al.(2006), que apresentou teores mais altos de cálcio e magnésio em altitudes maiores.

Na área destacada com um triângulo na Figura 13 B, C, D e E, demonstrou uma coincidência de menores teores de fósforo, potássio, cálcio e magnésio, com uma menor produtividade da soja (Figura 13 A).

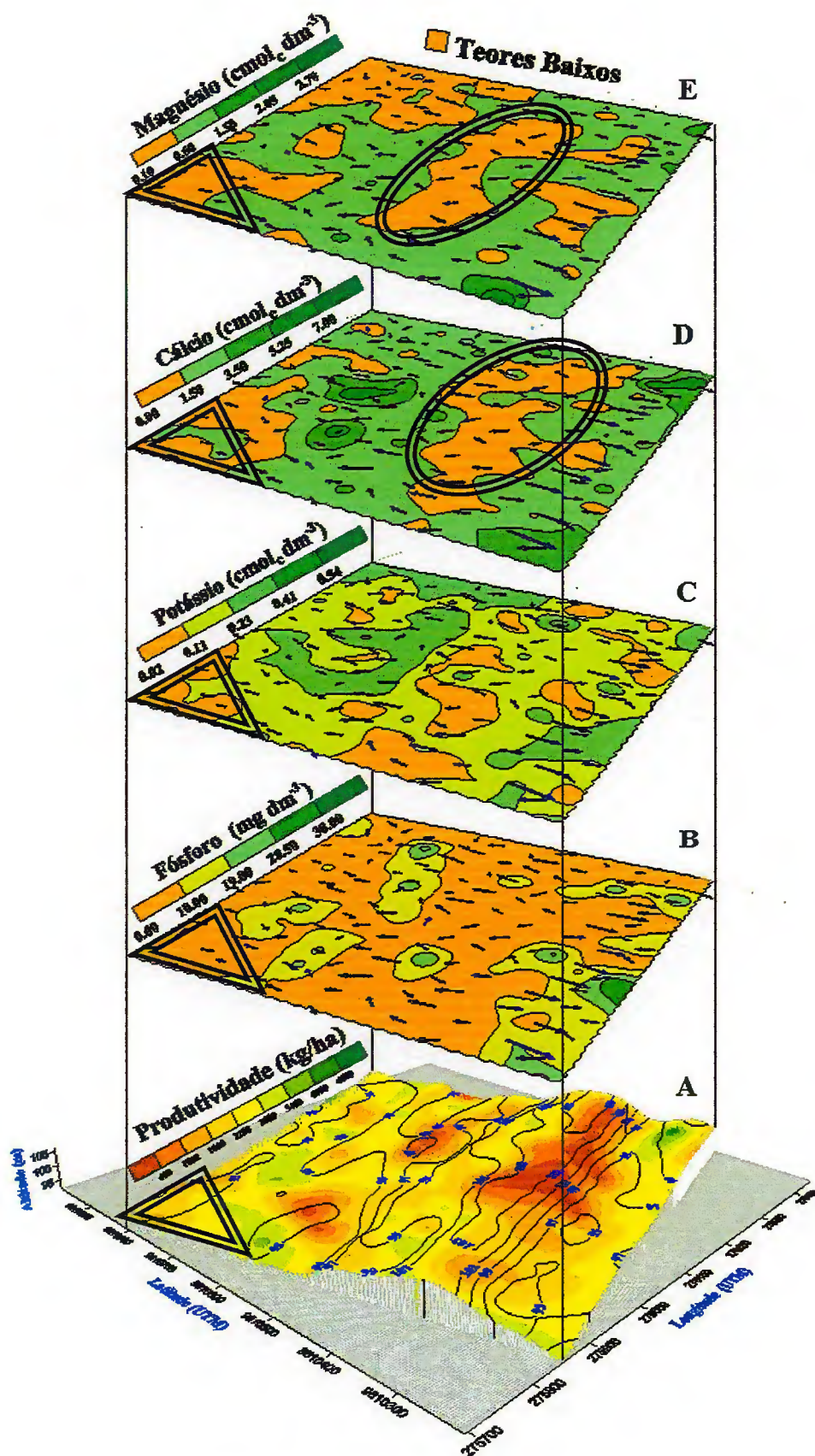


Figura 13: Mapa de produtividade com as cotas de declividade (A), mapa de fósforo (B), mapa de potássio (C), mapa de cálcio (D) e mapa de magnésio (E).

5. CONCLUSÕES

1. A área estudada apresenta solo de textura predominantemente argilosa com valores médios da Ds iguais a $1,37 \text{ g cm}^{-3}$. A média dos valores de RP igual a 1,84 MPa;
2. A Ds apresentou média variabilidade e a RP apresentou C. V. muito alto. Foi observada baixa variabilidade nos dados de umidade do solo na capacidade de campo, mostrando que a variação da RP não ocorre devido a umidade do solo e sim, a mudança na estrutura do solo, ocasionada, possivelmente, pelos implementos agrícolas utilizados durante o cultivo e colheita da soja;
3. O valor muito alto de C.V. observado nos dados de produtividade pode ser explicado pelo fato de 3,04 ha ter apresentado 0,00 de produção de soja e 11,75 ha ter apresentado produção acima da média nacional;
4. As variáveis químicas apresentaram C.V. médio e alto para o pH (água e KCl) e $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$, respectivamente, sendo que nas demais variáveis foi observado C.V. muito alto;
5. Para a produtividade, observou-se uma alta variabilidade na área estudada. A produção variou de 0,0 a 4563 kg ha^{-1} de soja, cuja média de produtividade foi de 2090 kg ha^{-1} , representando apenas 43% do potencial total da área;
6. As áreas de menor produtividade coincidiram com as partes mais altas do terreno.
7. A maioria das variáveis ajustaram-se ao modelo exponencial, com exceção da Ds e do teor de $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$, que ajustaram-se ao modelo esférico e da textura que se ajustou ao modelo gaussiano;
8. As áreas com baixa densidade coincidiram com as áreas de menor RP e também com os locais de maior produtividade. Já nas áreas de alta densidade houve uma maior RP e menor produtividade;
9. As áreas de maior pH e de menor acidez potencial coincidiram com as áreas de maior produtividade;
10. O fósforo apresentou teores baixos nas partes mais altas e maiores teores nas áreas de menor altitude do terreno, provavelmente devido ao arraste do nutriente para as partes mais baixas; o potássio apresentou maiores teores nas áreas com menores altitudes. O cálcio e o magnésio apresentaram distribuições espaciais mais descontínuas, ocorrendo os menores teores nas áreas de maior altitude, provavelmente pela lixiviação de bases.
11. A geoestatística foi utilizada com eficiência para mostrar a variabilidade, mapear e analisar as áreas de risco, mostrando-se ser uma ferramenta extremamente útil para auxiliar em Programa de Agricultura de Precisão para a sojicultura.

6. RECOMENDAÇÕES

i) Nas áreas declivosas, deverão ser utilizadas práticas conservacionistas para reduzir o escoamento superficial e, conseqüentemente, o arraste de nutrientes das áreas mais altas para as mais baixas;

ii) A partir de técnicas de Agricultura de Precisão, a área cultivada poderá alcançar um potencial de produção de 90%. A média de produtividade poderia ser aumentada, significativamente, com controle da área de cultivo mediante o conhecimento da variação do rendimento de grãos de local para local.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, B. G. Métodos alternativos de determinação de parâmetros físicos do solo e uso de condicionadores químicos no estudo da qualidade do solo. 2008.151 p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Piracicaba, SP.

AMARO FILHO, J.; DELMIRO DE NEGREIROS, R. F.; DE ASSIS, R. N., Jr; ANUNCIATO MOTA, J. C. Amostragem e Variabilidade Espacial de Atributos Físicos de um Latossolo Vermelho em Mossoró, RN. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.415-422, 2007.

ARAÚJO, J. C.; MOLIN, J. P.; VETTORAZZI, C. A. Uso de fotografias aéreas coloridas 35 mm na avaliação de produtividade de grãos. **Eng. Agríc. Jaboticabal**, v.24, n.3, set./dez., 2004.

ASSIS, R. L.; MION, R. L.; RUIZ, E. R. S.; GROSSI, C. H.; NERY, M. S.; LANÇAS, K. P.; ANTUNIASSI, U. R. Mapas de densidade e resistência mecânica à penetração do solo em diferentes profundidades no sistema de plantio direto em Botucatu. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 28, Londrina, PR, 2001. Anais... Londrina: SBCS, 2001. p. 27-30.

ATHERTON, B.C.; MORGAN, M.T.; SHEARERE, S.A.; STOMBAWGH, T.S.; WARD, A. D. Site-specific farming: a perspective on information needs, benefits and limitations. **J. Soil Water Conserv.** v.54, n.2, p.455–461, 1999.

BALASTREIRE, L. A. **O estado da arte da Agricultura de Precisão no Brasil** – Departamento de Engenharia /Rural ESALQ/USP. Piracicaba – SP, 2000.

BALASTREIRE, L. A.; ELIAS, A. I.; AMARAL, J. R. Agricultura de Precisão: mapeamento da produtividade da cultura do milho. **Engenharia Rural**, Piracicaba, v.8, n.1, p.97-111, 1997.

BENCHIMO, R. L.; EL-HUSNY, J. C.; SILVEIRA FILHO, A.; BARRIGA, J. P. A Mela da Soja no Estado do Pará nas Safras de 2003 a 2005. Comunicado técnico, 152, Dezembro, 2005.

BERGMANN, W. Nutritional disorders of plants: development, visual and analytical diagnosis. 2. ed. New York: Gustav Fischer Publishing House Jena, 1992. 741 p.

BERNER, P. G. M.; VIEIRA, S. R.; LIMA, E.; ANJOS, L. H. C. Variabilidade espacial de propriedades físicas e químicas de um Cambissolo sob dois sistemas de manejo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, n.5, 2007.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Efeito do conteúdo de água e da compactação do solo na produção de soja. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.38, n.7, p.849-856, jul. 2003.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; CENTURION, M. A. P. C.; FREDDI, O. S.; SOUZA NETO, E. L.; LEONEL, C. L.; SILVA, A. P. Traffic soil compaction of an oxisol related to soybean development and yield. **Scientia Agricola**, v.64, n.6, p.608-615, nov/dez, 2007.

BENGOUGH, A.G.; CAMPBELL, D.J.; O' SULLIVAN, M.F. Penetrometer techniques in relation to soil compaction and root growth. In: SMITH, K.A. & MULLINS, C.E. Soil and environmental analysis: Physical methods. 2.ed. Edinburgh, Marcel Dekker, 2001. p.377-403.

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 Sens. Environ.** v.37, p.181-191, 1991.

BONGIOVANNI, R., MONTOVANI, E. C., BEST, S.; ROEL, A. Agricultura de precisión: integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Montevideú: PROCISUR/IICA 2006. 244 p.

BRASIL. Ministério da Agricultura. **Regras para análise de sementes.** Brasília: SNAD/LANARV, 1980. 188p.

BRUSCO, J.; SOUZA; E. G.; RODRIGUES JUNIOR, F. A.; JOHANN, J. A; PEREIRA, J. O. **Mapas de lucratividade da soja em sistema de cultivo agricultura de precisão e cultivo convencional.** 3º Simpósio Internacional de Agricultura de Precisão 16 a 18 de agosto de 2005 - Embrapa Milho e Sorgo - Sete Lagoas, MG.

CÂMARA, G. M. S. Origem, difusão geográfica e importância da soja. In: Soja: tecnologia da produção. Piracicaba: Publique, 1998.

CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agrônômico de Campinas.** Campinas: Instituto Agrônômico, 1986. 94 p.(IAC. Boletim Técnico, 106)

CAPELLI, N. L. Agricultura de precisão – Novas tecnologias para o processo produtivo. Disponível em: <<http://wwwbases.cnptia.embrapa.br>>. 2004.

CARVALHO JUNIOR, W.; CHAGAS, C. S.; PEREIRA, N. R.; STRAUCH, J. C. M. Elaboração de zoneamentos agropedoclimáticos por geoprocessamento: soja em municípios do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27. p.379-387, 2003.

CARVALHO, J. R. P.; SILVEIRA, P. M.; VIEIRA, S. R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.37, n.8, p.1151-1159, ago. 2002.

CAVALCANTE, E. G. S.; ALVES, C. A.; PEREIRA, G. T.; SOUZA, Z. M. Variabilidade espacial de MO, P, K e CTC do solo sob diferentes usos e manejos. **Ciência Rural**, v.37, n.002, 2007.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira: grãos: terceiro levantamento – Dezembro, 2008**, Brasília: Conab, 2008.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento de safra brasileira: grãos, décimo segundo levantamento, setembro/2009** / Companhia Nacional de Abastecimento. – Brasília : Conab, 2009.

CORA, J. E.; ARAUJO, A. V.; PEREIRA, G. T.; BERALDO, J. M. G. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cultura de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, n.6, p.1013-1021, 2004.

COSTA, A. **Doses e modos de aplicação de calcário na implantação de sucessão soja-trigo em sistema de plantio direto**. 2000. 146p. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

CRAVO, M. S.; VIÉGAS, I. J. M.; BRASIL, E. C. **Recomendação de adubação e calagem para o Estado do Pará**. Embrapa Amazônia Oriental, 2007.

DALL'AGNOL, A.; HIRAKURI, M. H. **Realidade e perspectivas do Brasil na produção de alimentos e agroenergia, com ênfase na soja**. Disponível em: <http://www.redeagroenergia.cnpm.embrapa.br/artigos/Agronegociosoja2008.pdf>. Acesso em: 09 jan 2009.

DAMPNEY, P.M.R.; MOORE, M. Precision agriculture in England: current practice and research-based advice to farmers. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4., 1998, St. Paul. **Proceedings**. Madison: American Society of Agronomy, 1999. p.661-673.

DEON, M. D. Crescimento e nutrição da soja submetida a excesso de P, S, K, Ca e Mg em solução nutritiva. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2007.

DEXTER, A. R. Soil physical quality Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, Amsterdam, v.120, n.3, p.201–214, 2004.

EL-HUSNY, J. C.; ANDRADE, E. B.; SOUZA, F. R. S.; FILHO, A. S.; ALMEIDA, L. A.; KLEPKER, D.; MEYER, M. C. **Recomendação de Cultivares de Soja para a Microrregião de Paragominas, Pará**. Comunicado técnico 82. Embrapa Amazônia Oriental. Março, 2003.

ELIAS, A. I.; CAMARGO, J. R. O. **O estado da arte da Agricultura de Precisão no Brasil**. – Piracicaba: L. A. Balastreire, 2000.

EMBRAPA SOJA. Reunião de Pesquisa de Soja da Região Central do Brasil. Ata da XXVIII Reunião de Pesquisa de Soja da Região Central do Brasil. Londrina: Embrapa Soja, 2006.249p.

EMBRAPA SOJA. Tecnologias de produção de soja – região central do Brasil – 2003. Londrina: Embrapa Soja, 2003. Disponível em: <http://www.cnpso.embrapa.br/html/sistemasdeproducao/importancia.htm#>. Acessado em: 11 nov, 2008.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos e análises de solos**. Rio de Janeiro, 1997.

EPSTEIN; E.; BLOOM, A. J. **Mineral nutrition of plants. Principles and perspectives**. Ed. 2. Sunderland: Sinauer, 2005, 225 p.

FARDEAU, J. C. Dynamics of phosphate in soils: an isotopic outlook. **Fertility Research**, v.45, p.91-100, 1996.

FARIAS, P. R. S.; BARBOSA, J. C.; VIEIRA, S. R.; SÁNCHEZ-VILA, X.; FERRAZ, L. C. C. B. Geostatistical analysis of the spatial distribution of *Rotylenchulus reniformis* on cotton cultivated under crop rotation. **Russian Journal of Nematology**, v.10, p.1-9, 2002a.

FARIAS, P. R. S.; SÁNCHEZ-VILA, X.; BARBOSA, J. C.; VIEIRA, S. R.; FERRAZ, L. C. C. B.; SOLÍS-DELFIN, J. Using geostatistical analysis to evaluate the presence of *Rotylenchulus reniformis* in cotton crops in Brazil: economic implications. **Journal of nematologists**. v.34, n.3, p.232-238, 2002b.

FARIAS, P. R. S.; NOCITI, L. A. S.; BARBOSA, J. C.; PERECIN, D. Agricultura de precisão: mapeamento da produtividade em pomares cítricos usando geoestatística. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal – SP, v.25, n.2, p.235-241, agosto, 2003.

FREITAS, S. M.; MARGARIDO, M. A.; BARBOSA, M. Z.; FRANCA, T. J. E. Análise da dinâmica de transmissão de preços no mercado internacional de farelo de soja, 1990-99. **Agricultura em São Paulo**. São Paulo, v.48, n.1, p.1-20, 2001.

GIOTTO, E.; SULZBACH, L.; ANTUNES, M. U. F. Evolução Temporal da Produtividade de uma Lavoura de Soja - Estudo de Caso. **Geomática**, Santa Maria, v.1, n.1, 2006.

GOLDEN SOFTWARE, INC. (Golden, Estados Unidos). SURFER for windows: realese 8.0, contouring and 3D surface mapping for scientist's engineers user's guide. New York: 2002. 714p.

GOMES, P. F. **Curso de estatística experimental**. 14. ed. Piracicaba: Degaspari, 2000. 477 p.

GONÇALVES, A. C. A. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo para fins de manejo de irrigação. 1997. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1997.

GONÇALVES, A. C. A.; FOLEGATTI, M. V.; MATA, J. D. V. Análises exploratória e geoestatística da variabilidade de propriedades físicas de um Argissolo Vermelho. **Acta Scientiarum**, Maringá, v.23, n.5, p.1149-1157, 2001.

GRANT, C.A.; FLATEN, D.N.; TOMASIEWICZ, D.J.; SHEPPARD, S.C. A importância do fósforo no desenvolvimento inicial da planta. *Informações Agronômicas* nº 95, setembro, 2001.

GREGO, C.R.; VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial de propriedades físicas de solo em uma parcela experimental. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.29, p.169-177, 2005.

GUEDES, L. P. C.; URIBE-OPAZO, M. A.; JOHANN, J. A.; SOUZA, E. G. Anisotropia no estudo da variabilidade espacial de algumas variáveis químicas do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.32, p.2217-2226, 2008.

GUERRA, P. A. G. Geoestatística operacional. Ministério das Minas e Energia, 1988, 145p.

GUIMARÃES, R. S. Volume de contratos futuros de soja negociados na Bolsa de Mercadorias & Futuros (BM&F). Dissertação (Mestrado em Administração) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2007.

HARTWIG, E. E.; KIIHL, R. A. S. Identification and utilization of a delayed flowering character in soybean for short-day conditions. *Field Crops Research*, Amsterdam, v. 2, p. 145-151, 1979.

HORN, R.; FLEIGE, H. A method for assessing the impact of load on mechanical stability and on physical properties of soils. *Soil & Tillage Research*, Amsterdam, v. 73, p. 89-99, 2003.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**. Disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/lspa_200801comentarios.pdf. Acessado em: 18 fev.2008.

KNOB, M. J. Aplicação de técnicas de agricultura de precisão em pequenas propriedades. Santa Maria - RS. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2006.

KRIGE, D. G. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. **Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa**, v.52, p.119-139, 1951.

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

LARK, R.M.; STAFFORD, J.V. Exploratory analysis of yield maps of combine crops, In: European Conference On Precision Agriculture, 1, 1997. *Precision Agriculture* 97, v.1, Warwick, 1997, p.887-894.

LIMA, C. L. R.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; SUZUKI, L. E. A. S.; DALBIANCO, L. Densidade crítica ao crescimento de plantas considerando água disponível e resistência à penetração de um Argissolo Vermelho distrófico arênico. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.37, n.4, p.1166-1169, jul-ago, 2007.

MATHERON, G. Principles of geostatistics. **Economic Geology**, v.58, p.1246-1266, 1963.

MELLO, G.; BUENO, C. R. P.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial das propriedades físicas e químicas do solo em áreas intensamente cultivadas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, n.2, p.294-305, 2006.

MARINS, A. C. Métodos de estimação da função semivariância aplicados a dados simulados e reais de produtividade da soja e de atributos físicos de um latossolo. Cascavel- PR. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2006.

MELLO, J. M. Geoestatística aplicada ao inventário florestal. Piracicaba – SP. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, SP, 2004.

MENEGATTI, Leonardo A. Angeli; MOLIN, José P. Metodologia para identificação e caracterização de erros em mapas de produtividade. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.** v.7, n.2, Campina Grande, Maio/Agosto, 2003.

MISSÃO, M. R. SOJA: origem, classificação, utilização e uma visão abrangente do mercado. **Maringá Management: Revista de Ciências Empresariais**, v.3, n.1, p.7-15, jan./jun, 2006.

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

MOLIN, J. P. Agricultura de precisão, parte I: o que é e estado da arte em sensoriamento. **Engenharia Agrícola**, v.17, p.97-107, 1997.

MOLIN, J. P.; MILAN, M.; NESRALLAH, M. G. T.; CASTRO, C. N.; GIMENEZ, L. M. Utilização de dados georreferenciados na determinação de parâmetros de desempenho em colheita mecanizada. **Engenharia Agrícola**, v.26, n.3, Jaboticabal, set./dez, 2006.

MONTANARI, R.; PEREIRA, G. T.; MARQUES JÚNIOR, J.; SOUZA, Z. M.; PAZETO, R. J.; CAMARGO, L. A. Variabilidade espacial de atributos químicos em Latossolo e Argissolos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.38, n.5, p.1266-1272, ago, 2008.

MONTEZANO, Z. F.; CORAZZA, E. J.; MURAOKA, T. Variabilidade espacial da fertilidade do solo em área cultivada e manejada homoganeamente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n.30, p.839-847, 2006.

MOREIRA, M. A. Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação. São José dos Campos: INPE, 2001. 250 p.

NOLLA, A.; ANGHINONI, I. Métodos utilizados para a correção da acidez do solo no Brasil. **Revista de Ciências Exatas Naturais**, v.6, p.97-111, 2004.

NOVAIS, F. R.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: UFV, 1999, 399p.

OLIVEIRA, P. C.; FARIAS, P. R. S.; LIMA, H. V.; FERNANDES, A. R.; OLIVEIRA, F. A.; PITTA, J. D. Variabilidade espacial de propriedades químicas do solo e da produtividade de citros na Amazônia Oriental. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, n.6, p.708-716, 2009.

PETTER, R. L. **Desenvolvimento radicular da soja em função da compactação do solo, conteúdo de água e fertilidade em Latossolo**. 1990. 144 f. Dissertação (Mestrado em Biodinâmica do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1990.

PIRES, J. L. F.; CUNHA, G. R.; PASINATO, A.; FRANÇA, S.; RAMBO, L. **Discutindo agricultura de precisão – aspectos gerais**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2004. 18 p. html. (Embrapa Trigo. Documentos Online; 42). Disponível em: http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/do/p_do42.htm.

QUEIROZ-VOLTAN, R. B.; NOGUEIRA, S. S. S.; MIRANDA, M. A. C. Aspectos da estrutura da raiz e do desenvolvimento de plantas de soja em solos compactados. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, v.35, n.5, p.929-938, 2000.

RAIJ, B. V. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Ceres; Potafos, 1991, 343p.

REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; SILVA, V. R. Propriedades físicas de solos em sistema plantio direto irrigado. In:CARLESSO, R.; PETRY, M.T.; ROSA, G.M.; CERETTA, C.A., eds. Irrigação por aspersão no Rio Grande do Sul.Santa Maria, 2001, p.114-133.

ROSA FILHO, G.; PASSOS E CARVALHO, M.; ANDREOTTI, M.; MONTANARI, R.; BINOTTI, F. F.S.; GIOIA, M. T. Variabilidade da produtividade da soja em função de atributos físicos de um latossolo vermelho distroférico sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.283-293, 2009.

ROSOLEM, C. A.; ALMEIDA, A. C. S.; SACRAMENTO, L. V. S. Sistema radicular e nutrição da soja em função da compactação do solo. **Bragantia**, Campinas, v. 53, n. 2, p. 259-266, 1994.

SCHMOLDT, D. L. Precision agriculture and information Technology. **Computers and Electronics in Agriculture**. v.30, p.5-7, 2001.

SCHAFFRATH, V. R.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; GONÇALVES, A. C. A. Variabilidade e correlação espacial de propriedades físicas de solo sob plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.32, p.1369-1377, 2008.

SEARCY, S. W. Agricultura de precisão: um desafio para a extensão e educação continuada. In: BALASTREIRE, L.A. (Ed.). **O estado-da-arte da agricultura de precisão no Brasil**. Piracicaba: L.A. Balastreire, 2000, p.17-24.

SILVA, P. C. M.; CHAVES, L.H.G. Avaliação e variabilidade espacial de fósforo, potássio e matéria orgânica em alissolos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v.5, n.3, p.431-436, 2001.

SILVA, V. R.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n.2, p.399-406, mar-abr, 2004.

SMALING, E. M. A.; ROSCOE, R.; LESSCHEN, J. P.; BOUWMAN, A. F.; COMUNELLO, E. From forest to waste: Assessment of the Brazilian soybean chain, using nitrogen as a marker. **Agriculture, Ecosystems and Environment**. v.128, n.3, p.185-197, 2008.

STRAUCH, J. C. M, **Estudo de viabilidade técnica-econômica para implantação da agricultura de precisão na cultura de soja sob rotação de culturas em plantio direto na região de Campos Gerais – PR**. 2002. Disponível em: www.cnpq.br/embrapa.br/search/pesqs/proj07/home.html.

SULZBACH, L. Tecnologia de agricultura de precisão: estudo de caso: integração de modelos digitais de atributos químicos do solo e modelos digitais de culturas agrícolas. Santa Maria, RS. 2003.168f Tese (Mestrado em Engenharia Agrícola)- Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

TORMENA, C. A.; ROLOFF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.20, p.333-339, 1996.

TORMENA, C. A.; ROLOFF, G.; SÁ, J. C. M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, n.2, p.301-309, 1998.

TOZI, F. A. Sistema de Informação Geográfica na agricultura. In BALASTREIRE, L. A. (Editora) **Estado-da-arte da agricultura de precisão no Brasil**. Piracicaba, 2000, p.187-192.

VANNI, S. M. **Modelos de regressão: Estatística aplicada**. São Paulo, Legmar Informática, 1998. 177p.

VIEIRA, S. R.; HATFIELD, J. L.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, Berkeley, v.51, n.3, p.1-75, 1983.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVARES, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000, p.1-54.

WAHEED, T.; BONNELL, R. B.; PRASHER, S. O.; PAULET, E. Measuring performance in precision agriculture: CART—A decision tree approach agricultural water management. p.173–185, 2006.

WATANABE, S. H.; TORMENA, C. A.; ARAUJO, M. A.; GONÇALVES, A. C. A.; SILVA, A. P.; PINTRO, J. C.; COSTA, A. C. S.; FILHO, P. S. V. Resistência do solo à penetração e porosidade de aeração de um latossolo vermelho distrófico sob plantio direto por dois anos. **Acta Scientiarum**, v.22, n.4, p.1055-1060, 2000.

WEBSTER, R. Quantitative spatial analysis of soil in the field. **Adv. Soil Sci.**, New York, v.3, p.1-70, 1985.