

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

JOSÉ EDUARDO SORIA
Engenheiro Agrônomo

CORRELAÇÕES LINEARES E ESPACIAIS ENTRE ATRIBUTOS
FÍSICO-QUÍMICOS DE SOLOS DE DIFERENTES AMBIENTES DE
PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR NO NOROESTE DO ESTADO DE
SÃO PAULO

ILHA SOLTEIRA
2014

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

JOSÉ EDUARDO SORIA
Engenheiro Agrônomo

CORRELAÇÕES LINEARES E ESPACIAIS ENTRE ATRIBUTOS
FÍSICO-QUÍMICOS DE SOLOS DE DIFERENTES AMBIENTES DE
PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR NO NOROESTE DO ESTADO DE
SÃO PAULO

Dissertação apresentada à Faculdade de
Engenharia – UNESP – Campus de Ilha
Solteira para a obtenção do título de
MESTRE EM AGRONOMIA, especialidade:
Sistemas de Produção.

Prof. Dr. Marcelo Andreotti
Orientador

Ilha Solteira
2014

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

- S714c Soria, José Eduardo.
Correlações lineares e espaciais entre atributos físico-químicos de solos de diferentes ambientes de produção de cana-de-açúcar no Noroeste do Estado de São Paulo / José Eduardo Soria. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2014
97 f. : il.
- Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Especialidade: Sistema de Produção, 2014
- Orientador: Marcelo Andreotti
Inclui bibliografia
1. Geoestatística. 2. Ambientes de produção. 3. Cana-de-açúcar.
4. Atributos do solo.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Correlações lineares e espaciais entre atributos físico-químicos de solos de diferentes ambientes de produção de cana-de-açúcar no noroeste do Estado de São Paulo

AUTOR: JOSÉ EDUARDO SÓRIA

ORIENTADOR: Prof. Dr. MARCELO ANDREOTTI

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE EM AGRONOMIA ,
Área: SISTEMAS DE PRODUÇÃO, pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. MARCELO ANDREOTTI

Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. MOREL DE PASSOS E CARVALHO

Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. MARCELO RODRIGO ALVES

CSolos Mapeamento e Consultoria

Data da realização: 04 de julho de 2014.

Dedico esta conquista ao meu filho,
o qual tenho amor incondicional,
por ser minha inspiração e
meu alicerce na vida.

Agradeço a todos os amigos pela
ajuda e compreensão nos momentos difíceis,
pelas ricas discussões, pelo constante apoio
e estímulo e por tantas outras coisas que,
por vezes, somente bons amigos
podem fazer por nós.

SORIA, J. E. **Correlações lineares e espaciais entre atributos físico-químicos de solos de diferentes ambientes de produção de cana-de-açúcar no noroeste do Estado de São Paulo**. 2014. 97 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Produção) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2014.

RESUMO

Vários fatores são responsáveis pela variabilidade espacial da produtividade das culturas, dentre eles, destaca-se os atributos físicos e químicos do solo. Objetivou-se avaliar a variabilidade e caracterizar a dependência espacial entre atributos físicos e químicos dos solos na região noroeste do Estado de São Paulo, bem como estudar as correlações lineares e espaciais para identificar as interações entre tais atributos em ambientes de produção de cana-de-açúcar. Para as análises foram utilizados dados do levantamento de solos do Centro de Tecnologia Canavieira realizado na região noroeste de São Paulo, com fornecimento dos dados das coordenadas geográficas, em 638 pontos amostrais pertencentes numa grade não regular, coletados nas profundidades de 0 a 0,25 e 0,25 a 0,50 m. Foram analisadas as frações granulométricas, bem como os da fertilidade do solo e dos ambientes de produção. Foi realizada a análise estatística descritiva e geoestatística para os atributos. Os ambientes de produção para a cultura da cana-de-açúcar apresentaram relação com os atributos do solo, sendo estes capazes de auxiliar na definição do potencial de produção do solo. Os teores de silte, argila, MO, P, K, Ca, Mg, valores de pH, SB, CTC e V% apresentaram correlações lineares e espaciais positivas com o potencial de produção do solo. Enquanto que os teores de areia, Al^{3+} e m% apresentam correlações negativas com o potencial de produção do solo. Nos mapas de krigagem foi possível verificar áreas de menor e maior potencial de produção para a cultura da cana-de-açúcar, ou seja, identificar onde estão os melhores e os piores ambientes de produção. Portanto, com o auxílio dos mapas de krigagem dos atributos do solo é possível estabelecer zonas específicas de manejo e definir o potencial produtivo para uma determinada área caracterizada como ambiente de produção.

PALAVRAS-CHAVE: Geoestatística. Variabilidade espacial. Ambientes de produção. *Saccharum spp.*

SORIA, J. E. Linear and spatial correlations between physic-chemical soils attributes of different sugarcane production environments in the northwest of São Paulo State, Brazil. 2014. 97 f. Dissertation (MSc in Crop Systems) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2014.

ABSTRACT

Several factors are responsible for the spatial variability of crop yields, among them, there is the physical and chemical soil attributes. Aimed to evaluate the variability and characterize the spatial dependence between physical and chemical attributes of soils in the northwestern region of São Paulo State, as well as studying the linear and spatial correlations to identify the interactions between such attributes in sugarcane production environments. Data were used soil survey of the Sugarcane Technology Center conducted in the northwestern region of São Paulo State, with provision of data of geographical coordinates, in 638 points belonging to a non-regular grid for the analyzes were collected at depths from 0 to 0.25 and 0,25 to 0,50 m. The granulometric fractions were analyzed, as well as soil fertility and production environments. Descriptive statistics and geostatistic analysis was performed for the attributes. Sugarcane production environments correlate with soil attributes, which are able to help in defining the production potential of the soil. The silt, clay, organic matter, P, K, Ca, Mg, pH, SB, CEC and V% showed positive linear and spatial correlations with the soil production potential. While the proportions of sand, Al^{3+} and m% had negative correlations with the production potential of the soil . In kriging maps it was possible to areas of lower and higher sugarcane production potential, in other words identify where the best and the worst production environments are. Therefore, with the aid of kriging maps of soil attributes is to develop specific management zones and define the productive potential to an area characterized as the production environment.

Key-words: Geostatistics. Spatial variability. Production environments. *Saccharum* spp.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de semivariograma experimental.....	16
Figura 2 - Localização da área de estudo e dos pontos amostrados.....	27
Figura 3 - Coleta das amostras de solo.....	29
Figura 4 - Semivariograma simples do ambiente de produção para a cana-de-açúcar dos solos da região Noroeste do Estado de São Paulo.....	52
Figura 5 - Semivariograma simples dos teores de areia, silte e argila das camadas 0-0,25 e 0,25-0,50 m, dos solos da região Noroeste do Estado de São Paulo.....	53
Figura 6 - Semivariograma simples dos teores de matéria orgânica, valores de potencial hidrogeniônico e teor de fósforo das camadas 0-0,25 e 0,25-0,50 m, dos solos da região Noroeste do Estado de São Paulo.....	54
Figura 7 - Semivariograma simples dos teores de potássio, cálcio e magnésio das camadas 0-0,25 e 0,25-0,50 m, dos solos da região Noroeste do Estado de São Paulo.....	55
Figura 8 - Semivariograma simples dos teores de alumínio, acidez potencial e valores da saturação por alumínio das camadas 0-0,25 e 0,25-0,50 m, dos solos da região Noroeste do Estado de São Paulo.....	56
Figura 9 - Semivariograma simples dos valores de soma de bases, capacidade de troca catiônica e saturação por bases das camadas 0-0,25 e 0,25-0,50 m, dos solos da região Noroeste do Estado de São Paulo.....	57

Figura 10 - Mapa de krigagem do ambiente de produção para a cana-de-açúcar dos solos da região Noroeste do Estado de São Paulo.....	70
Figura 11 - Mapas de krigagem dos teores de areia das camadas 0-0,25 (a) e 0,25-0,50 m (b) dos solos da região Noroeste do Estado de São Paulo.....	71
Figura 12 - Mapas de krigagem dos teores de silte das camadas 0-0,25 (a) e 0,25-0,50 m (b) dos solos da região Noroeste do Estado de São Paulo.....	72
Figura 13 - Mapas de krigagem dos teores de argila das camadas 0-0,25 (a) e 0,25-0,50 m (b) dos solos da região Noroeste do Estado de São Paulo.....	73
Figura 14 - Mapas de krigagem dos teores de matéria orgânica das camadas 0-0,25 (a) e 0,25-0,50 m (b) dos solos da região Noroeste do Estado de São Paulo.....	74
Figura 15 - Mapas de krigagem dos valores de potencial hidrogeniônico das camadas 0-0,25 (a) e 0,25-0,50 m (b) dos solos da região Noroeste do Estado de São Paulo.....	75
Figura 16 - Mapas de krigagem dos teores de cálcio das camadas 0-0,25 (a) e 0,25-0,50 m (b) dos solos da região Noroeste do Estado de São Paulo.....	76
Figura 17 - Mapas de krigagem dos teores de magnésio das camadas 0-0,25 (a) e 0,25-0,50 m (b) dos solos da região Noroeste do Estado de São Paulo.....	77

Figura 18 - Mapas de krigagem dos teores de alumínio das camadas 0-0,25 (a) e 0,25-0,50 m (b) dos solos da região Noroeste do Estado de São Paulo.....	78
Figura 19 - Mapas de krigagem dos teores de acidez potencial das camadas 0-0,25 (a) e 0,25-0,50 m (b) dos solos da região Noroeste do Estado de São Paulo.....	79
Figura 20 - Mapas de krigagem dos valores de soma de bases das camadas 0-0,25 (a) e 0,25-0,50 m (b) dos solos da região Noroeste do Estado de São Paulo.....	80
Figura 21 - Mapas de krigagem dos valores de capacidade de troca de catiônica das camadas 0-0,25 (a) e 0,25-0,50 m (b) dos solos da região Noroeste do Estado de São Paulo.....	81
Figura 22 - Mapas de krigagem dos valores de saturação por bases das camadas 0-0,25 (a) e 0,25-0,50 m (b) dos solos da região Noroeste do Estado de São Paulo.....	82
Figura 23 - Mapa de krigagem dos valores de saturação por alumínio da camada 0,25-0,50 m dos solos da região Noroeste do Estado de São Paulo.....	83

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1** - Classificação do avaliador da dependência espacial (ADE) segundo Robertson (2004) e Dalchiavon (2010).....33
- Tabela 2** - Análise descritiva do ambiente de produção para a cana-de-açúcar e dos atributos físico-químicos na camada de 0 a 0,25 m, dos solos da região Noroeste do Estado de São Paulo.....35
- Tabela 3** - Análise descritiva dos atributos físico-químicos na camada de 0,25 a 0,50 m, dos solos da região Noroeste do Estado de São Paulo.....36
- Tabela 4** - Matriz de correlação linear simples entre ambiente de produção para a cana-de-açúcar e dos atributos físico-químicos da camada 0 a 0,25 m, dos solos da região Noroeste do Estado de São Paulo.....43
- Tabela 5** - Matriz de correlação linear simples entre ambiente de produção para a cana-de-açúcar e dos atributos físico-químicos da camada 0,25 a 0,50 m, dos solos da região Noroeste do Estado de São Paulo.....44
- Tabela 6** - Equações de regressão simples e coeficientes do ajuste entre ambiente de produção para a cana-de-açúcar e os atributos físico-químicos da camada 0 a 0,25 m, dos solos da região Noroeste do Estado de São Paulo.....48
- Tabela 7** - Equações de regressão simples e coeficientes do ajuste entre ambiente de produção para a cana-de-açúcar e os atributos físico-químicos da camada 0,25 a 0,50 m, dos solos da região Noroeste do Estado de São Paulo.....49

- Tabela 8** - Soma do quadrado do resíduo e avaliador de dependência espacial do ambiente de produção para a cana-de-açúcar e dos atributos físico-químicos da camada 0 a 0,25 m, dos solos da região Noroeste do Estado de São Paulo.....63
- Tabela 9** - Soma do quadrado do resíduo e avaliador de dependência espacial dos atributos físico-químicos da camada 0,25 a 0,50 m, dos solos da região Noroeste do Estado de São Paulo.....64
- Tabela 10** -Parâmetros das validações cruzadas referentes às krigagens do ambiente de produção para a cana-de-açúcar e dos atributos físico-químicos da camada 0 a 0,25 m, dos solos da região Noroeste do Estado de São Paulo.....67
- Tabela 11** -Parâmetros das validações cruzadas referentes às krigagens dos atributos físico-químicos da camada 0,25 a 0,50 m, dos solos da região Noroeste do Estado de São Paulo.....68

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1	GEOESTATÍSTICA COMO FERRAMENTA NA PESQUISA AGRÍCOLA	15
2.1.1	SEMIVARIOGRAMA SIMPLES, VALIDAÇÃO CRUZADA E KRIGAGEM.....	16
2.1.2	SEMIVARIOGRAMA CRUZADO E COKRIGAGEM.....	18
2.2	ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DOS SOLOS	19
2.3	VARIABILIDADE ESPACIAL DOS SOLOS.....	21
2.4	CANA-DE-AÇÚCAR E OS AMBIENTES DE PRODUÇÃO	23
2.5	A GEOESTATÍSTICA NO ESTUDO DA CANA-DE-AÇÚCAR.....	24
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	27
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	27
3.2	OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS ATRIBUTOS AVALIADOS	28
3.2.1	COLETA DAS AMOSTRAS DE SOLO	29
3.2.2	DETERMINAÇÕES DOS ATRIBUTOS DO SOLO.....	30
3.3	ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS ATRIBUTOS PESQUISADOS	31
3.3.1	ANÁLISE DESCRITIVA INICIAL.....	31
3.3.2	MATRIZ DE CORRELAÇÃO E ANÁLISE DE REGRESSÃO	31
3.3.3	ANÁLISE GEOESTATÍSTICA.....	32
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
4.1	ANÁLISE DESCRITIVA DOS DADOS.....	34
4.2	MATRIZ DE CORRELAÇÃO E ANÁLISE DE REGRESSÃO LINEAR.....	42
4.3	ANÁLISE GEOESTATÍSTICA.....	52
4.3.1	SEMIVARIOGRAMAS SIMPLES.....	52
4.3.2	VALIDAÇÃO CRUZADA	66
4.3.3	KRIGAGEM SIMPLES.....	69
4.3.4	COKRIGAGEM.....	86
5	CONCLUSÃO	87
	REFERÊNCIAS	88

1 INTRODUÇÃO

Com a crescente procura por fontes renováveis de energia, visando a menor dependência dos combustíveis fósseis, e pela preocupação com o ambiente, a cultura da cana-de-açúcar foi inserida como uma das melhores alternativas para suprir essa necessidade.

A cana-de-açúcar é uma das culturas agrícolas de maior importância para o Brasil, principalmente para o Estado de São Paulo, que atualmente é o maior produtor nacional. A expansão dessa cultura no estado tem ocorrido principalmente, na região noroeste. Entretanto, esta região tem pouca tradição no cultivo da cana, fazendo-se necessário o estudo regionalizado em novas áreas, para a exploração agrícola, tanto no conhecimento das características de solo, quanto de clima, visando um manejo mais sustentável.

O solo é um dos principais recursos de um sistema de produção agroindustrial, sendo extremamente importante o conhecimento de seus atributos para a realização de um manejo adequado, para a expressão de sua capacidade produtiva. Sendo assim, o levantamento pedológico se enquadra como uma ferramenta indispensável para a realização deste manejo.

Os processos e atributos do solo que determinam o desempenho e a produção das culturas, bem como o impacto da agricultura ao ambiente variam no espaço e no tempo. Estes atributos físicos e químicos do solo podem ser espacialmente correlacionados, conduzindo para que a dependência espacial explique a influência dos fatores e processos de sua formação, assim como do seu manejo. Desta forma, este conhecimento pode contribuir para o aumento da produtividade agrícola, e o mapeamento dos atributos do solo numa área torna-se importante tanto para a recomendação de práticas de manejo do solo, como para a avaliação dos efeitos da agricultura sobre a qualidade ambiental. Com isso, o efeito das alterações nos atributos físicos e químicos do solo, provocada por diferentes manejos do solo e sua correlação com a variabilidade espacial, e principalmente temporal sobre a produtividade das culturas, ainda não estão bem elucidados.

Portanto, a caracterização da variabilidade espacial e temporal dos atributos físicos e químicos dos solos, associada a outras técnicas estatísticas de tomada de

decisões pode contribuir para uma agricultura econômica e ecologicamente sustentável.

O presente trabalho teve por objetivo avaliar a variabilidade e caracterizar a dependência espacial entre alguns atributos físicos e químicos dos solos na região noroeste do Estado de São Paulo, bem como estudar as correlações lineares e espaciais para identificar as interações entre tais atributos em diferentes ambientes de produção de cana-de-açúcar.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 GEOESTATÍSTICA COMO FERRAMENTA NA PESQUISA AGRÍCOLA

Para representar uma população, vários pesquisadores utilizam a estatística clássica, a qual considera que os dados apresentam uma distribuição normal, onde é admitido que as amostras sejam independentes entre si, sendo amparados pela casualização e repetição. Nestes estudos de campo, a análise dos dados fica reduzida a uma média e as medidas de dispersão em relação a ela. Sendo assim, os efeitos da heterogeneidade espacial sobre a representatividade dos valores médios são ignorados (CHAVES; FARIAS, 2009).

Muitas vezes um atributo não varia ao acaso, mas apresenta dependência espacial ou temporal, e essa dependência pode invalidar o uso de análises estatísticas convencionais em experimentos de campo. Desta forma, várias tecnologias são levadas ao campo visando à utilização de sistemas que considerem a variabilidade espacial dos atributos estudados (GOOVAERTS, 2001). A geoestatística vem se destacando dentre essas ferramentas, pois permite detectar a existência da variabilidade e distribuição espacial das medidas estudadas (CARVALHO; SILVEIRA; VIEIRA, 2002; VIEIRA et al., 2002). Segundo Carvalho, Takeda e Freddi (2003), a pesquisa da ciência do solo tem-se apoiado na geoestatística que, juntamente com a estatística descritiva, tem dado inúmeras respostas às mais variadas questões existentes que, até então, eram ignoradas.

A geoestatística é um ramo da estatística espacial que se baseia na teoria das variáveis regionalizadas. Ela parte do princípio que a diferença de valor entre duas observações quaisquer é função da distância e da direção em que ocorre este afastamento entre os pontos de medida, ou seja, a dependência espacial manifesta-se como uma correlação entre as amostras que diminui à medida que a distância entre os pontos amostrais aumentam e desaparece completamente quando a distância entre os pontos é suficientemente grande, os quais, neste caso, são considerados estatisticamente independentes (VIEIRA, 2000).

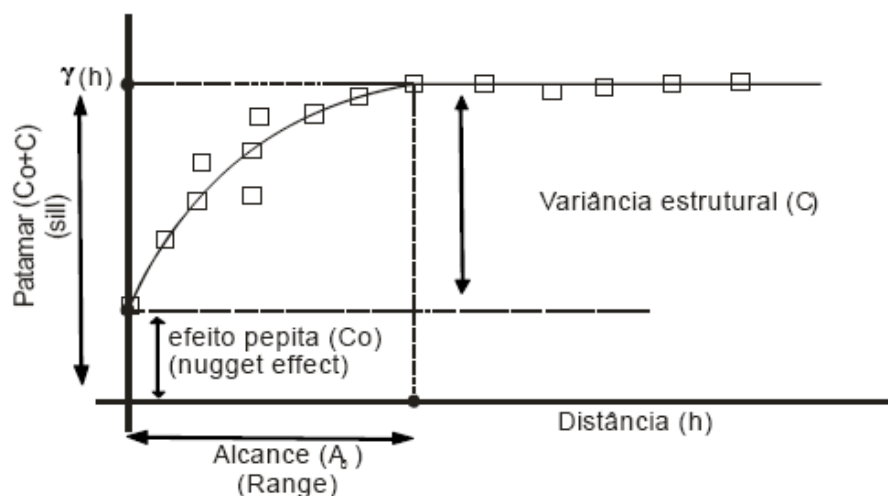
O semivariograma é a ferramenta básica da geoestatística, sendo a mais adequada para representar a dependência espacial de amostras de solos (VIEIRA, 2000), constituindo a base de suporte às técnicas de mapeamento por krigagem, e

permitindo representar quantitativamente a variação de um fenômeno regionalizado (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA, 2004; DALCHIAVON et al., 2011).

2.1.1 SEMIVARIOGRAMA SIMPLES, VALIDAÇÃO CRUZADA E KRIGAGEM

O semivariograma relaciona a distância entre pares de amostras com a semivariância estatística (variação entre os pares), para todos os pares possíveis a cada distância sugerida. O gráfico do semivariograma (Figura 1) é composto por uma série de valores (efeito pepita, variância estrutural e alcance), aos quais é preciso adequar um modelo matemático. O efeito pepita (C_0) indica a descontinuidade entre as amostras, ou seja, a variabilidade espacial não detectada durante o processo de amostragem do solo. A variância estrutural (C) é um componente do semivariograma que indica o ponto onde a correlação entre as amostras se estabiliza. Enquanto que o patamar ($C_0 + C$) representa a distância na qual toda a semivariância da amostra é de influência aleatória, correspondendo à variância total, obtida pela estatística descritiva. Já o alcance (A_0) representa o tamanho das manchas de variabilidade espacial para um determinado atributo, onde a partir deste ponto não existe mais correlação entre as amostras (VIEIRA, 2000).

Figura 1 - Exemplo de semivariograma experimental.



Fonte: Robertson (2004).

Quanto maior o efeito pepita, mais fraca é a dependência espacial de um atributo (VIEIRA, 1997). Assim, Cambardella et al. (1994) e Vieira (1997) observaram que valores elevados de efeito pepita (C_0) correspondem à variabilidade não detectada durante o processo de amostragem.

Segundo Lemos Filho et al. (2008), o alcance é o principal parâmetro fornecido pela geoestatística, representando a distância na qual uma variável regionalizada apresenta continuidade espacial, sendo que a partir desta distância, o comportamento espacial da variável passa ser totalmente aleatório. O valor do alcance pode inferir na qualidade das estimativas, pois ele determina o número de valores usados na interpolação, delimitando a extensão da correlação espacial entre as amostras (MENDES; FONTES; OLIVEIRA, 2008). De acordo com Souza, Cogo e Vieira (1997), os valores de alcance podem ser utilizados para se definir o espaçamento de coleta de dados. Todavia, deve-se atentar que o valor de alcance (A_0) varia entre os diferentes atributos do solo (VIEIRA, 2000; BERTOLANI; VIEIRA, 2001; SIQUEIRA; VIEIRA; DECHEN, 2009).

Os ajustes dos modelos experimentais que têm sido testados para os atributos do solo são o esférico, exponencial, gaussiano e linear (VIEIRA, 2000). Segundo Reichert et al. (2008), o ajuste pode depender do atributo e da camada de solo analisada. Sendo assim, são considerados para o ajuste do modelo: **a)** a menor soma dos quadrados dos desvios (SQD); **b)** o maior coeficiente de determinação (r^2) e **c)** o maior avaliador do grau da dependência espacial (ADE). Para cada atributo é estimado o efeito pepita (C_0), o alcance (A_0) e o patamar ($C_0 + C$). É preciso considerar também a interação entre os parâmetros de ajuste do semivariograma para se determinar a melhor representação da variabilidade espacial de um fenômeno qualquer (SIQUEIRA; VIEIRA; CEDDIA, 2008).

O ajuste é validado pela técnica da validação cruzada, assim como também para a definição do tamanho da vizinhança que proporcionará a melhor malha de krigagem. Dalchiavon (2012) relatou que a validação cruzada é destinada à avaliar modelos alternativos de semivariogramas utilizados na krigagem. Assim, trabalhando-se na obtenção do número ideal de vizinhos, são obtidos, por meio da interpolação por krigagem, os mapas para a interpretação e o detalhamento da variabilidade espacial dos atributos pesquisados.

A relação de dependência espacial (ADE) é calculada pela razão entre a variância estrutural (C) e o patamar ($C+C_0$), proposta por Cambardella et al. (1994) e modificada por Robertson (2004) e por Dalchiavon (2010). Este parâmetro avalia o quanto a variável é dependente, mostrando se ela apresenta uma forte, moderada ou fraca dependência espacial.

Segundo Vieira (2000), existindo dependência espacial entre as amostras, e conhecendo o semivariograma da variável, podem-se interpolar valores em qualquer posição no campo de estudo, sem tendência e com variância mínima. Dentre os métodos de interpolação de dados, a krigagem é o método mais eficiente e utilizado no mapeamento dos atributos do solo (SCHLOEDER; ZIMMERMAN; JACOBS, 2001). Ou seja, o objetivo da krigagem é que a estimativa da variável represente o melhor possível, o que seria o valor medido para aquele local (VIEIRA, 2000).

Os resultados do estudo podem ser expressos em forma de mapa de isolinhas ou de superfície tridimensional. Porém, a maneira mais utilizada para representar a variabilidade espacial dos atributos do solo em uma área é por meio de mapas de isolinhas (CORÁ; BERALDO, 2006). Grego e Vieira (2005) citam que as construções dos mapas com os valores obtidos por meio da krigagem são importantes para a verificação e interpretação da variabilidade espacial.

2.1.2 SEMIVARIOGRAMA CRUZADO E COKRIGAGEM

Em ciência do solo, frequentemente alguns atributos são relacionados com outros, sendo possível utilizar-se desta vantagem. Quando ocorre correlação espacial entre dois atributos do solo, pode-se estimar um deles por informações de ambos expressos no semivariograma cruzado. Um semivariograma cruzado teria aparência semelhante ao do semivariograma simples, porém com significados diferentes, pelo simples fato de envolver o produto das diferenças dos dois atributos. Ao contrário do semivariograma simples, o valor do semivariograma cruzado para distância igual a zero deve ser nulo. Assim, além de espaços menores do que a distância de amostragem, acumulado no mesmo atributo, está a falta de correlação entre ambos. O alcance aqui representa apenas o final ou a distância máxima de dependência espacial entre os atributos. Já o patamar do semivariograma cruzado, se existir, deve aproximar-se do valor da covariância entre ambos. Assim, quando os

dois atributos forem de correlação inversa, isto é, quando um aumenta e o outro diminui, a covariância será negativa e, conseqüentemente, o semivariograma cruzado será negativo (VIEIRA, 2000).

A cokrigagem é uma técnica de avaliação geoestatística que permite estimar um atributo de interesse por intermédio de outro de mais fácil determinação. Isso só é possível se existir dependência espacial de cada um e também dependência espacial entre ambos (VAUCLIN et al., 1983). Assim, com a utilização da cokrigagem pode-se estimar o valor de um atributo de difícil mensuração por avaliação de outro de fácil mensuração, desde que as condições de dependências espaciais sejam cumpridas.

O simples fato de que, pela krigagem ou cokrigagem, pode-se conhecer também a variância da estimativa diferencia-os de qualquer outro método. Essa é uma propriedade interessantíssima, pois além de permitir a estimativa de valores sem tendência para os locais onde os atributos não foram medidos, ainda se pode conhecer a confiança associada a essas estimativas, as quais podem ser chamadas ótimas (VIEIRA, 2000).

2.2 ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DOS SOLOS

A formação dos solos não é homogênea ao longo do tempo, tampouco no espaço, e muitas vezes seus atributos não variam ao acaso, mas apresentam dependência espacial ou temporal (BERNER et al., 2007).

Segundo Ferreira (2010), o solo é considerado um sistema trifásico muito heterogêneo. As três fases são representadas no solo da seguinte maneira: a fase sólida constitui a matriz do solo; a fase líquida que consiste na água do solo na qual existem substâncias dissolvidas, devendo ser chamada então de solução do solo; e a fase gasosa que é a atmosfera do solo.

O levantamento pedológico apresenta informações de atributos de solos e suas distribuições no espaço, sendo essencial para a avaliação do potencial e das limitações de uma área, constituindo numa base de dados para estudos de viabilidade técnica e econômica de projetos e planejamento de uso, manejo e conservação de solos (EMBRAPA, 1995). Entretanto, nos planejamentos agropecuários e ambientais não tem sido incorporado o conhecimento das variações

dos solos que ocorrem dentro das unidades de mapeamento, no sentido de evitar a degradação dos recursos naturais, bem como auxiliar na redução dos custos de produção das atividades agrícolas (BERTOLANI, 2003).

De acordo com Vieira (2004), a variabilidade espacial de solos sempre existiu e deve ser considerada toda vez que a amostragem de campo for efetuada, pois pode indicar locais que necessitam de tratamento diferenciado quanto ao manejo, sem prejuízo para a representatividade, possibilitando maior detalhamento de uma determinada área.

A variabilidade espacial, horizontal e vertical, de diversos atributos do solo é dependente de fatores de sua formação e relacionado com o seu manejo (SOUZA et al., 2001). Segundo Motomiya, Corá e Pereira (2006), no Brasil, grandes áreas agrícolas sobre Latossolos, considerados homogêneos do ponto de vista pedológico, apresentam diferenças na distribuição espacial de seus atributos de acordo com o manejo adotado ao longo de sucessivos cultivos. Nesta linha de pesquisa, Abreu et al. (2003) destacaram que o manejo do solo modifica a variabilidade natural dos solos.

A textura do solo constitui-se num dos atributos físicos mais estáveis e representa a distribuição quantitativa das partículas sólidas minerais quanto ao tamanho. A grande estabilidade faz com que a textura seja considerada um atributo de grande importância na descrição, identificação e principalmente na classificação do solo (FERREIRA, 2010). A textura relaciona-se, direta ou indiretamente, com muitos outros atributos químicos e físicos do solo, como a capacidade de troca catiônica (CTC), a retenção e infiltração de água, a drenagem, a erodibilidade, dentre outras (STRECK et al. 2002). Assim, a textura adquire grande importância nas relações solo-água-planta-atmosfera.

A fração areia é constituída principalmente por quartzo, tem reduzida capacidade de retenção a água e reduzida atividade química, por outro lado, essas partículas de maior diâmetro no solo facilitam a sua drenagem e aeração. Em contrapartida, a fração argila influi acentuadamente nos atributos do solo, por apresentar características específicas devido ao seu tamanho, o que resulta em alta reatividade química (MEURER, 2007).

A matéria orgânica do solo (MOS), apesar de sua pequena proporção nos solos tropicais, desempenha grande influência sobre vários atributos físicos,

químicos e biológicos do solo e exerce várias funções nos ecossistemas terrestres (SILVA; MENDONÇA, 2007). A contribuição da MOS nos atributos físicos está relacionada à formação e estabilidade dos agregados, que influenciam a aeração, a permeabilidade e a capacidade de retenção de água pelo solo (SILVA; CAMARGO; CERETA, 2004). Na fertilidade do solo, a MOS tem acentuado efeito, sendo fonte de nutrientes para as plantas, tem a capacidade de gerar cargas negativas, aumentando a CTC, além dos efeitos sobre o poder tampão e pH do solo (MEURER, 2007). Enquanto que os efeitos dos fatores de natureza biológica estão intimamente relacionados com a atividade dos microrganismos do solo, sendo a MOS a sua principal fonte de energia (MEURER, 2007).

A acidez do solo é resultado do equilíbrio entre a atividade de H^+ na solução e a concentração de H^+ e de Al^{3+} adsorvidos na CTC do solo. O conhecimento da relação entre a acidez do solo e o crescimento e desenvolvimento das plantas é fundamental para o estabelecimento de práticas de correção do solo, que visem à maior eficiência dos sistemas de produção agrícola e ao uso eficiente dos recursos naturais (SOUSA; MIRANDA; OLIVEIRA, 2007). Tanto a matéria orgânica (MO) quanto o potencial hidrogeniônico (pH) exercem grande influência no crescimento e desenvolvimento das plantas, uma vez que estão diretamente ligados a disponibilidade de nutrientes (CANELLAS; SANTOS; AMARAL, 1999; SOUZA; MIRANDA; OLIVEIRA, 2007).

Segundo Marques Júnior (1995), a variabilidade dos atributos do solo é influenciada pela sua localização na paisagem ou no declive, mesmo que esse seja de pequena expressão. Vieira (1997) ressalta a importância da incorporação do conhecimento da variabilidade espacial dos atributos do solo ao processo de produção agrícola. Assim, nos últimos anos, diversos trabalhos têm demonstrado a importância do conhecimento da variabilidade espacial dos atributos do solo em sistemas de produção agrícola (ABREU et al., 2003; GREGO; VIEIRA, 2005).

2.3 VARIABILIDADE ESPACIAL DOS SOLOS

Na agricultura de precisão, o solo deixa de ser tratado como homogêneo, e a sua variação espacial passa a ser considerada visando à exploração e ao monitoramento de suas características produtivas com vistas a ganhos, conservação

do ambiente e desenvolvimento humano. Os estudos de variabilidade espacial visam compreender o comportamento espacial de um determinado atributo para a sua utilização em agricultura de precisão, possibilitando que a amostragem seja realizada com o menor número possível de amostras sem apresentar riscos para a representatividade desse atributo (SIQUEIRA; VIEIRA; CEDDIA, 2008).

A mudança do estado natural (mata nativa) para os cultivos agrícolas tem acrescentado grande fonte de variabilidade aos atributos dos solos, promovendo maior heterogeneidade (BECKETT; WEBSTER, 1971), muitas vezes contrariando o conceito de que quanto mais intensamente cultivado, mais homogêneos ficariam esses atributos devido ao seu manejo químico e físico (POCAY, 2000).

A variabilidade dos resultados na coleta de amostras de solo decorre de erros de execução metodológica durante o processo de amostragem e de heterogeneidade do solo em profundidade e no sentido horizontal. Com isso, é difícil separar a contribuição de cada um desses fatores, mas a experiência mostra que se a amostragem for bem feita tomando-se os cuidados sugeridos pela metodologia, a principal fonte de variação é a heterogeneidade do solo (REICHARDT, 1987).

Dependência espacial, em outras palavras, significa auto correlação, ou seja, o valor em qualquer ponto depende de algum modo, de seu vizinho (VIEIRA, 1997). De acordo com Vieira (2000), a ferramenta estatística que vem despontando como alternativa e propondo um método de investigação da dependência espacial e, ou, temporal dos atributos do solo é a geoestatística. A análise geoestatística que permite detectar a existência da variabilidade e distribuição espacial das medidas estudadas constitui importante ferramenta na análise e descrição detalhada da variabilidade dos atributos do solo (VIEIRA, 2000; CARVALHO; SILVEIRA; VIEIRA, 2002; VIEIRA et al., 2002).

Embora a geoestatística contribua muito no planejamento e entendimento da variabilidade espacial do fenômeno, os erros inerentes aos diversos métodos de caracterização de um atributo têm um papel bastante importante na variabilidade dos dados (SIQUEIRA; VIEIRA; CEDDIA, 2008).

Aplicando procedimentos estatísticos descritivos e a geoestatística para uma cronosequência de solos, Saldaña, Sten e Zink (1998) analisaram a distribuição espacial de alguns atributos do solo (frações granulométricas, pH, carbonato de cálcio e carbono orgânico) e verificaram que a geoestatística contribuiu para

estabelecer um modelo de evolução da paisagem. Inclusive, com o procedimento estatístico foi possível analisar as diferenças entre terraços e, com a geoestatística identificaram-se variações do alcance dentro dos terraços em diferentes escalas.

Dalchiavon et al. (2012), estudando a variabilidade espacial de atributos da fertilidade em um Latossolo sob sistema de semeadura direta, verificaram que todos os atributos químicos estudados apresentaram dependência espacial, sendo possível gerar mapas para a área de estudo. Esses autores relatam ainda que, os teores dos atributos variaram desde a classe baixa até a classe alta dentro da mesma malha (talhão), confirmando a necessidade de um manejo diferenciado dentro da área de estudo. Zanão Junior et al. (2010) verificaram que a dependência espacial também varia conforme o atributo avaliado e a profundidade de coleta.

Os métodos tradicionais de compilação de mapas de solos tendem a ser qualitativos (SILVA, 2000), omitindo informações a respeito da variação dos solos. Goovaerts (1999) destacou a importância em se utilizar técnicas estatísticas e geoestatísticas para elaborar esquemas de amostragem para mapeamento e caracterização do solo. Esse tipo de estudo gera uma grande quantidade de informações georreferenciadas, permitindo uma análise quantitativa dos atributos do solo.

2.4 CANA-DE-AÇÚCAR E OS AMBIENTES DE PRODUÇÃO

Como o Brasil é um dos mais tradicionais produtores de cana-de-açúcar e possui grande extensão territorial, a cultura encontra-se em vários tipos de solos que estão sob a influência de diferentes condições de clima, o que resulta em vários tipos de ambientes para a produção (DIAS, 1997). Vários fatores interferem na produção e maturação da cultura da cana-de-açúcar, sendo os principais a interação edafoclimática, o manejo da cultura e a cultivar escolhida (CESAR et al., 1987).

Lepsch (1987) descreveu que o conhecimento dos atributos inerentes a cada solo, os chamados fatores edáficos, são importantes para julgar o potencial de produção agrícola. Sendo assim, as informações e interpretações dos atributos dos solos constituem fator fundamental para o planejamento adequado do uso da terra, bem como de seu manejo racional.

Joaquim et al. (1994) desenvolveram trabalhos relacionando os solos com a produtividade da cana-de-açúcar e constataram que os solos mais produtivos foram os de textura argilosa (teor de argila maior que 350 g kg^{-1}), eutróficos ou endoeutróficos, seguidos dos solos distróficos ou epieutróficos, também de textura argilosa ou média (teor de argila entre 250 e 350 g kg^{-1}). Os solos de textura média ou mais arenosos e, principalmente, de características álica ou epiálicas ou endoálicas, foram os de mais baixa produtividade. Assim, os autores também verificaram que existiram mudanças no comportamento das variedades com a melhoria da qualidade do solo, concluindo que é possível estabelecer uma classificação preliminar do potencial de produtividade dos solos para a cultura da cana-de-açúcar.

De acordo com Joaquim et al. (1997), os ambientes de produção são fundamentais para o planejamento da cultura da cana-de-açúcar. Assim, os ambientes de produção são definidos em função dos atributos dos solos relacionando-os com os seus respectivos potenciais produtivos. Portanto, a aplicação de tecnologia associada à variabilidade espacial e temporal faz-se necessária para os ambientes de produção, sobretudo na cultura da cana para correlacionar o solo e a sua capacidade produtiva (GREGO; VIEIRA, 2005).

2.5 A GEOESTATÍSTICA NO ESTUDO DA CANA-DE-AÇÚCAR

A busca por uma maior eficiência dos setores da economia compreende um aumento da competitividade do setor agrícola, onde a utilização de novas tecnologias para o conhecimento da variabilidade espacial dos solos é necessária (TSCHIEDEL; FERREIRA, 2002). Segundo Johnson e Richard (2005), a relevância econômica da cultura da cana-de-açúcar explica os estudos de variabilidade espacial dos atributos do solo. Esta análise da variabilidade do solo, pelo uso da geoestatística, auxilia em alternativas de manejo, não apenas no intuito de reduzir os efeitos da variabilidade do solo sobre a produção das culturas (TRANGMAR et al., 1985), mas também na estimativa das respostas das culturas sob alguma prática de manejo (OVALLES; REY, 1994).

O conhecimento da variabilidade espacial dos atributos de solo e de cultura apresenta-se como ferramenta vantajosa para analisar a variabilidade de

produtividade e aperfeiçoar o manejo em áreas agrícolas por meio de um gerenciamento agrícola que leve em consideração informações pontuais de solo e de culturas (SILVA et al., 2003; MENDES; FONTES; OLIVEIRA, 2008; AMADO et al., 2009).

De acordo com Souza, Marques Júnior e Pereira (2004), em lavouras altamente tecnificadas, como a cultura da cana-de-açúcar, é primordial obter a informação da variabilidade espacial de atributos físicos e químicos do solo, com o objetivo de redução de custos nos sistemas de produção. Flowers, Weisz e White (2005) citam que o uso de técnicas que propiciem maior captação das variações ocorridas nas lavouras proporciona a implantação de um sistema de cultivo que diminua a variabilidade das características intrínsecas do solo e propiciem o estabelecimento de um planejamento agrícola adequado, ou seja, áreas com características similares teriam um mesmo conjunto de práticas agronômicas.

Em estudo realizado por Campos et al. (2009), a distribuição espacial dos atributos granulométricos e químicos do solo permitiu a alocação das variedades de cana-de-açúcar de acordo com a fertilidade do solo e o teor de argila, onde os mapas de krigagem desses atributos do solo forneceram informações para o estabelecimento dos ambientes de produção. Souza et al. (2010) verificaram que os estudos de geoestatística vem se mostrando como uma ferramenta adequada para o estudo de definição de zonas de manejo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar, auxiliando a agricultura de precisão.

Souza et al. (2004) encontraram variabilidade diferenciada para os atributos granulométricos em um Latossolo Vermelho eutrófico sob cultivo de cana-de-açúcar, apesar desses solos serem considerados homogêneos, onde a identificação de compartimentos da paisagem na área de estudo auxiliou na compreensão da variabilidade espacial dos atributos estudados. Berner et al. (2007) verificaram que o cultivo contínuo aumentou a estabilidade da variabilidade espacial de atributos relacionados à porosidade em um Cambissolo cultivado com cana-de-açúcar.

Segundo Souza et al. (2010), a variabilidade da produção de cana-de-açúcar pode ser melhor explicada quando os atributos do solo são relacionados com a altitude, e esta auxilia na compreensão da correlação entre atributos do solo e produtividade de cana-de-açúcar.

Nos estudos de melhoramento genético da cana-de-açúcar, assume-se que o efeito da variabilidade do solo não é suficiente para alterar as respostas do solo nas áreas de ensaios de variedades. Contudo, Grego, Vieira e Xavier (2010) observaram que a variabilidade espacial encontrada para os atributos do solo, em ambiente de produção da cana, indicou ser difícil obter áreas homogêneas para a implantação dos experimentos. Estes mesmos autores utilizaram a análise geoestatística para auxiliar na eficácia da criação de variedades de cana na fase clonal, melhorando os critérios de avaliação.

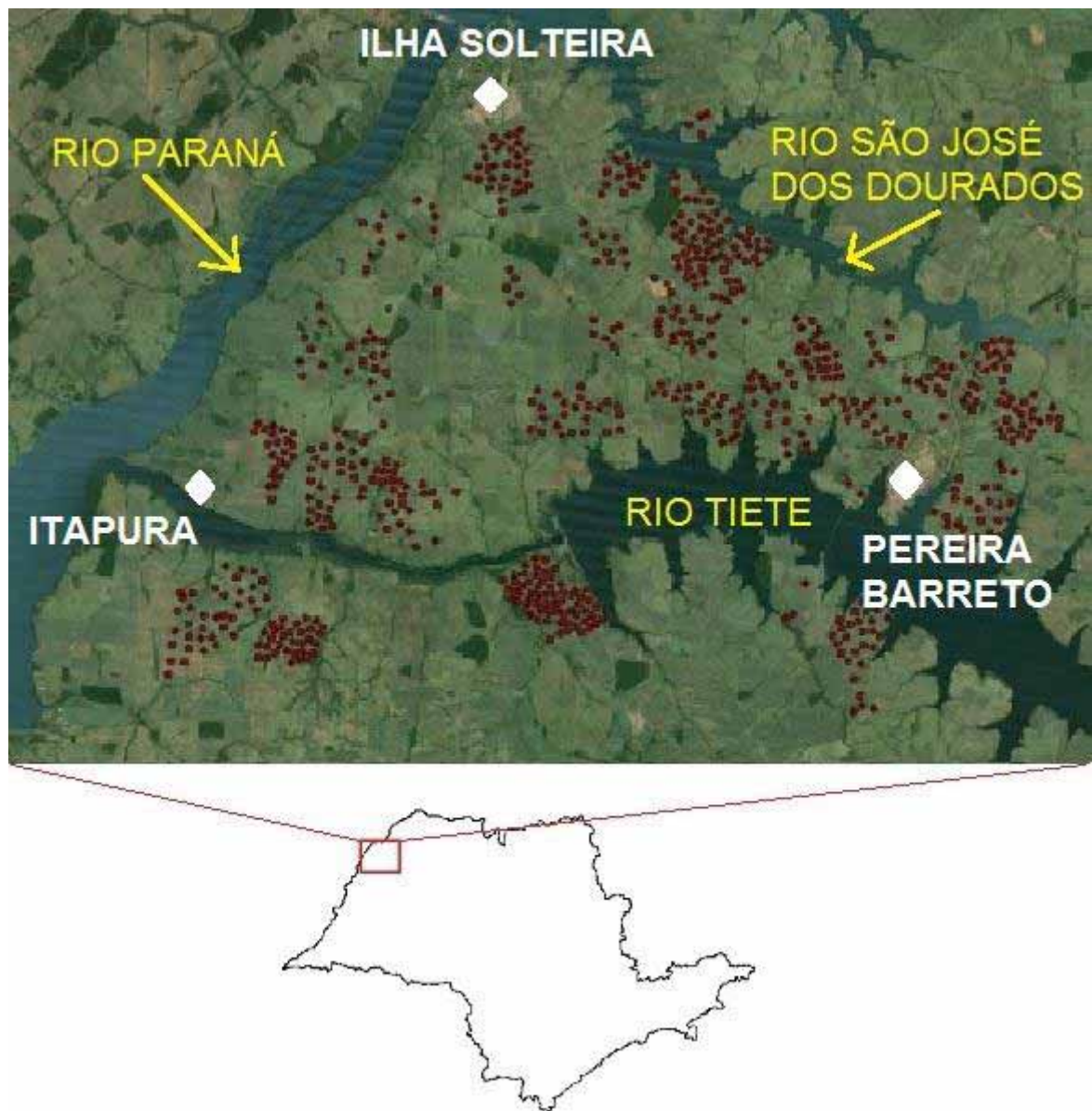
A utilização de técnicas geoestatísticas na análise dos atributos do solo permite, portanto, realizar com precisão o planejamento do cultivo de cana-de-açúcar, a partir da separação de ambientes (CAMPOS et al., 2009).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O trabalho foi desenvolvido na região noroeste do estado de São Paulo, Brasil, entre as latitudes 20°20'20" e 20°45'51" Sul e as longitudes 51°01'10" e 51°31'30" Oeste, englobando os municípios de Castilho, Ilha Solteira, Itapura, Pereira Barreto e Santa Fé do Sul (Figura 2).

Figura 2 - Localização da área de estudo e dos pontos amostrados.



Fonte: Google Earth (2014).

O clima da região, de acordo com a classificação de Köppen, é definido como Aw, sendo caracterizado como tropical úmido com estação chuvosa no verão e seca no inverno, com temperatura variando entre 26,8 e 21,2°C, precipitação média anual de 1.128 mm e chuvas concentradas no período de novembro a fevereiro. A vegetação original da região caracteriza-se como floresta tropical subcaducifólia (VIANELLO; ALVES, 2004).

Segundo o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT, 1981), a área de estudo encontra-se predominantemente sobre as formações do Grupo Bauru (Adamantina e Santo Anastácio), o qual apresenta o arenito como principal rocha. Próximo às margens dos rios Paraná, São José dos Dourados e Tietê, tem-se o afloramento do basalto, pertencente à formação Serra Geral do Grupo São Bento.

O levantamento de reconhecimento dos solos do Estado de São Paulo realizado pelo Centro Nacional de Ensino e Pesquisa Agronômica (BRASIL, 1960) apresenta como principais solos da região os Latossolos Vermelhos com textura variando de média a argilosa e fertilidade variando entre eutrófico e distrófico, ocorrendo caráter férrico próximo as margens dos rios, e os Argissolos Vermelhos e Vermelhos-Amarelos com textura e fertilidade variando entre arenosa/média a média/média e eutrófico ou distrófico, respectivamente (nomes atualizados para a nova classificação do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – EMBRAPA, 2013).

3.2 OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS ATRIBUTOS AVALIADOS

Foram utilizados dados do levantamento de solos do Centro de Tecnologia Canavieira – CTC, realizado na região noroeste do Estado de São Paulo. As informações fornecidas consistem em 638 pontos amostrais pertencentes a uma grade não regular, coletados em duas profundidades, 0 a 0,25 e 0,25 a 0,50 m, dos quais são conhecidas as coordenadas geográficas (Figura 2).

Os dados granulométricos de teores de argila, silte e areia total foram utilizados como atributos físicos do solo. Para a análise dos atributos químicos foram utilizados os teores de matéria orgânica, valores de pH em água, acidez potencial, teores de fósforo, cálcio, magnésio, potássio e alumínio, valores de soma de bases,

capacidade de troca catiônica e saturações por bases e por alumínio. Para cada ponto amostrado também foi fornecido o potencial de produção para a cultura da cana-de-açúcar, classificados segundo metodologia do CTC, descrita em Joaquim et al. (1997). Os ambientes de produção foram classificados numericamente para análise dos dados, onde os melhores ambientes receberam as notas mais altas e os piores as notas mais baixas, em uma escala de 0 a 10. Sendo assim, o ambiente “A” recebeu nota variando de 10 a 8; o ambiente “B” de 8 a 6; o ambiente “C” de 6 a 4; o ambiente “D” de 4 a 2, e; o ambiente “E” recebeu nota variando de 2 a 0. Sendo utilizado o valor central de cada intervalo para substituição das classes dos ambientes.

3.2.1 COLETA DAS AMOSTRAS DE SOLO

A coleta das amostras de solos foi realizada sob a cultura da cana-de-açúcar em diferentes idades de corte, sendo a amostragem realizada no meio da entrelinha da cultura, com o auxílio de um trado holandês (Figura 3). Foram coletadas amostras deformadas em duas profundidades (0 a 0,25 e 0,25 a 0,50 m), as quais foram submetidas às determinações analíticas químicas e físicas em laboratório.

Figura 3 - Coleta das amostras de solo.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

3.2.2 DETERMINAÇÕES DOS ATRIBUTOS DO SOLO

Para as análises físicas, utilizaram-se as frações granulométricas do solo, onde se determinaram os teores de argila (AG), silte (ST) e areia total (AR), realizada pelo método da pipeta (EMBRAPA, 1997).

As análises químicas foram compostas pelo pH em água, acidez potencial, e teores de matéria orgânica, fósforo, bases do solo e alumínio. A determinação da matéria orgânica (MO) foi realizada por extração em dicromato de sódio e determinado por colorimetria. O pH foi determinado em água (pH), com uma relação de 1 para 2,5 e determinado em potenciômetro. O fósforo (P), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e o potássio (K) foram extraídos por resina trocadora de íons e determinados por colorimetria (fósforo), espectrofotometria de absorção atômica (cálcio e magnésio), e fotômetro de chama (potássio). O alumínio (Al) foi extraído por solução salina de KCl e determinado por titulação acidimétrica. Enquanto que a acidez potencial (AP) foi determinada com solução tamponada e titulação alcalimétrica do extrato, conforme proposto por Raij et al. (2001).

A soma de bases (SB), a capacidade de troca catiônica (T), a saturação por bases (V%) e a saturação por alumínio (m%) foram calculada pelas equações abaixo:

$$SB = K^{+} + Ca^{2+} + Mg^{2+} \dots\dots\dots(1)$$

$$CTC = SB + (H^{+} + Al^{3+}) \dots\dots\dots(2)$$

$$V\% = \frac{SB}{CTC} \times 100 \dots\dots\dots(3)$$

$$m\% = \frac{Al^{3+}}{Al^{3+} + SB} \times 100 \dots\dots\dots(4)$$

3.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS ATRIBUTOS PESQUISADOS

3.3.1 ANÁLISE DESCRITIVA INICIAL

A análise da variabilidade para todos os atributos foi, primeiramente, realizada pela análise descritiva, auxiliada pela estatística clássica. Utilizou-se o pacote computacional SAS, onde foram calculados a média, mediana, moda, valores mínimos e máximos, desvio padrão, coeficiente de variação, curtose e assimetria (SCHLOTZHAVER; LITTEL, 1997).

Foi identificada a presença do *outlier*, no gráfico de ramos e folhas e no *boxplot*, pela localização da marca do asterisco com a designação do respectivo valor. Optou-se pela não substituição desses, pois os valores considerados como *outlier* representavam solos distintos, já que na área foi verificada a ocorrência deste solos muito argilosos, como o Nitossolo férrico, até solos arenosos, como o Neossolo Quartzarênico.

3.3.2 MATRIZ DE CORRELAÇÃO E ANÁLISE DE REGRESSÃO

Foi montada a matriz de correlação de Pearson, objetivando efetuar as regressões lineares para as combinações, duas a duas, entre todos os atributos dos solos estudados e o potencial produtivo do solo para a cultura da cana-de-açúcar. O objetivo foi estudar a correlação linear entre eles, na tentativa de procurar selecionar aqueles que fossem semelhantes, e que provavelmente poderiam apresentar semivariogramas cruzados e, portanto, cokrigagem.

Posteriormente, para cada camada do solo, foram efetuadas as regressões lineares entre os atributos e o potencial produtivo do solo para a cultura da cana-de-açúcar, objetivando selecionar aquelas que, nos devidos casos, proporcionariam as melhores relações entre causa e efeito, avaliadas pelo aumento do coeficiente de determinação. Para tanto, foram utilizadas planilhas de cálculos do Excel.

3.3.3 ANÁLISE GEOESTATÍSTICA

Para cada atributo foi analisada a dependência espacial pelo cálculo do semivariograma, com base nas pressuposições de estacionaridade da hipótese intrínseca, pelo uso do pacote computacional *Gama Design Software 7.0* (ROBERTSON, 2004), a partir do qual foi realizada a interpolação dos dados e a construção dos mapas.

O semivariograma foi estimado, segundo Vieira et al. (2002), por:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \dots\dots\dots(5)$$

Sendo: $N(h)$ é o número de pares de valores medidos $Z(x_i)$ e $Z(x_i + h)$ separados por uma distância h , sendo Z os valores medidos para atributos do solo.

De acordo com Vieira (2000), é esperado que medições localizadas próximas sejam mais parecidas do que aquelas separadas por grandes distâncias. Ou seja, o aumento $\gamma(h)$ com a distância h até um valor máximo no qual se estabiliza em um patamar correspondente à distância limite de dependência espacial, que é o alcance. Medições localizadas à distâncias maiores que o alcance terão distribuição aleatória, razão porque serão independentes entre si. Para cada atributo foram relacionados o efeito pepita (C_0), alcance (a_0) e o patamar (C_0+C).

Os ajustes dos semivariogramas foram testados para os modelos exponencial, esférico e gaussiano. Sendo efetuado prioritariamente pela seleção inicial de: **a)** a menor soma dos quadrados dos desvios (SQD); **b)** o maior coeficiente de determinação (r^2) e **c)** o maior avaliador do grau da dependência espacial (ADE). A decisão final do modelo representante do ajuste foi por meio da validação cruzada, assim como também para a definição do tamanho da vizinhança de pontos que proporcionariam a melhor malha de krigagem.

Por outro lado, sabe-se que a validação cruzada é uma ferramenta destinada à avaliar modelos alternativos de semivariogramas que serão utilizados para a krigagem. Assim, trabalhou-se na obtenção do número ideal de vizinhos, para interpolação por krigagem, na obtenção dos mapas para interpretação e detalhamento da variabilidade espacial dos atributos pesquisados.

A análise do avaliador da dependência espacial (ADE) foi realizada conforme sugestões de Cambardella et al. (1994), modificada por Robertson (2004), conforme a seguinte expressão:

$$ADE = \left[\frac{C}{C+C_0} \right] 100 \dots\dots\dots(6)$$

Sendo: ADE é o avaliador da dependência espacial; C é a variância estrutural; C+C₀ é o patamar.

O avaliador da dependência espacial foi classificado segundo Cambardella et al. (1994), modificado por Robertson (2004) e por Dalchiavon (2010), sendo classificadas em 3 e 5 classes, respectivamente, conforme a seguinte tabela:

Tabela 1- Classificação do avaliador da dependência espacial (ADE) (ROBERTSON, 2004; DALCHIAVON, 2010).

Classificação do ADE	Robertson (2004)	Dalchiavon (2010)
Muito fraca		< 20%
Fraca	≤ 25%	≥ 20% e < 40%
Moderada	> 25% e ≤ 75%	≥ 40% e < 60%
Forte	> 75%	≥ 60% e < 80%
Muito Forte		≥ 80%

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ANÁLISE DESCRITIVA DOS DADOS

A área de estudo apresentou grande variabilidade de solos, com variações tanto nos atributos físicos quanto químicos, o que pode ser verificado nas Tabelas 1 e 2, referentes à análise descritiva dos dados das camadas 0 a 0,25 e 0,25 a 0,50 m, respectivamente. Isso pode ser confirmado pelo levantamento de reconhecimento dos solos do Estado de São Paulo (BRASIL, 1960), em virtude também da grande variação relacionada à geologia da região (IPT, 1981), a qual pode dar origem a diferentes solos, bem como pelo efeito de manejos anteriores ao plantio da cana-de-açúcar nos talhões em diferentes épocas.

Pode-se constatar nas análises das Tabelas 1 e 2 que, na área de estudo, as camadas variaram por todas as classes texturais, desde a classe arenosa até muito argilosa, como pode ser verificado pelos valores de máximo e mínimo dos atributos físicos (AR, ST e AG). Esta ampla variação também pode ser verificada nas classes de fertilidade, pelos valores de máximo e mínimo dos parâmetros saturação por bases (V%) e por alumínio (m%), onde foram constatadas camadas de solos classificadas como eutróficas, distróficas e distróficas álicas. Devido a essa grande variação de classes texturais e de fertilidade, pode-se inferir que existem na região solos com potencial de produção para a cultura da cana-de-açúcar variando de alto (ambiente de produção classificado como A) a baixo (ambiente de produção classificado como E), sendo atestados pelos valores 9 de máximo e 1 de mínimo do atributo AMB, respectivamente (JOAQUIM et al., 1997).

Tabela 2- Análise descritiva do ambiente de produção para a cana-de-açúcar e dos atributos físico-químicos na camada de 0 a 0,25 m, dos solos da região Noroeste do Estado de São Paulo.

Atributo ^(a)	Medidas estatísticas descritivas						
	Média	Mediana	Valor		Desvio Padrão	Coeficiente	
			Máximo	Mínimo		Variação (%)	Curtose Assimetria
AMB	5,3	5,0	9,0	1,0	1,8	34,2	0,148 0,331
AR1 (g kg ⁻¹)	713	749	915	190	125	17,6	2,628 -1,588
ST1 (g kg ⁻¹)	89	81	380	10	45	50,5	5,698 1,667
AG1 (g kg ⁻¹)	199	180	650	30	102	51,5	2,450 1,466
MO1 (g dm ⁻³)	20	18	81	5	8	41,7	5,842 1,723
pH1	5,6	5,6	7,7	3,7	0,8	13,7	-0,572 0,063
P1 (mg dm ⁻³)	10	6	273	0	20	192,8	98,145 8,712
K1 (mmol _c dm ⁻³)	2,6	1,8	20,0	0,1	2,4	93,6	-0,041 0,029
Ca1 (mmol _c dm ⁻³)	26	20	177	4	20	77,4	10,270 2,724
Mg1 (mmol _c dm ⁻³)	12	9	104	1	9	78,2	0,141 0,084
Al1 (mmol _c dm ⁻³)	0,7	0,2	14,6	0,0	1,4	202,5	24,401 4,108
AP1 (mmol _c dm ⁻³)	23	21	69	3	8	35,6	2,028 0,974
SB1 (mmol _c dm ⁻³)	40,1	31,9	251,0	7,4	29,4	73,3	10,375 2,665
T1 (mmol _c dm ⁻³)	62,6	53,8	287,2	31,1	30,5	48,8	10,004 2,655
V%1	60	61	94	15	16	26,0	-0,560 -0,200
m%1	3,2	0,4	60,1	0,0	6,9	217,6	15,711 2,572

^(a)AMB, AR, ST, AG, MO, pH, P, K, Ca, Mg, Al, AP, SB, T, V% e m% são respectivamente o ambiente de produção, teores de areia, silte, argila, matéria orgânica, potencial hidrogeniônico, teores de fósforo, potássio, cálcio, magnésio, alumínio, acidez potencial (H⁺ + Al³⁺), soma de bases, capacidade de troca catiônica, saturações por bases e por alumínio na camada 0-0,25m; ^(b) DF = distribuição de frequência, sendo IN e LN, respectivamente, do tipo indeterminada e lognormal.

Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Tabela 3- Análise descritiva dos atributos físico-químicos na camada de 0,25 a 0,50 m, dos solos da região Noroeste do Estado de São Paulo.

Atributo ^(a)	Medidas estatísticas descritivas						
	Média	Mediana	Valor		Desvio Padrão	Coeficiente	
			Máximo	Mínimo		Variação (%)	Curtose Assimetria
AR2 (g kg ⁻¹)	671	706	877	110	134	20,0	1,879 -1,392
ST2 (g kg ⁻¹)	89	83	282	10	40	45,2	2,165 1,089
AG2 (g kg ⁻¹)	241	215	730	26	118	59,0	1,961 1,339
MO2 (g dm ⁻³)	13	12	40	4	5	37,2	2,698 1,341
pH2	5,5	5,5	7,2	3,7	0,7	13,6	-0,558 -0,067
P2 (mg dm ⁻³)	5	2	319	0	16	341,1	280,911 15,166
K2 (mmol _c dm ⁻³)	1,6	1,0	12,9	0,1	1,7	109,1	8,965 2,708
Ca2 (mmol _c dm ⁻³)	21	16	143	4	17	81,2	11,110 2,889
Mg2 (mmol _c dm ⁻³)	9	7	63	1	7	77,3	0,305 0,072
Al2 (mmol _c dm ⁻³)	1,1	0,2	15,6	0,0	2,3	207,0	12,539 3,356
AP2 (mmol _c dm ⁻³)	21	20	92	4	9	41,0	12,634 2,624
SB2 (mmol _c dm ⁻³)	31,2	23,9	167,6	5,7	23,3	74,7	8,311 2,552
T2 (mmol _c dm ⁻³)	52,3	46,0	190,0	20,1	24,2	46,3	8,149 2,472
V%2	56	57	90	9	16	28,9	-0,440 -0,253
m%2	5,5	0,7	61,1	0,0	11,1	200,7	8,199 2,842

^(a)AR, ST, AG, MO, pH, P, K, Ca, Mg, Al, AP, SB, T, V% e m% são respectivamente os teores de areia, silte, argila, matéria orgânica, potencial hidrogeniônico, teores de fósforo, potássio, cálcio, magnésio, alumínio, acidez potencial (H⁺+Al³⁺), soma de bases, capacidade de troca catiônica, saturações por bases e por alumínio na camada 0,25-0,50m; ^(b) DF = distribuição de frequência, sendo IN e LN, respectivamente, do tipo indeterminada e lognormal.

Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Campos et al. (2009), estudando os atributos físicos e químicos do solo em uma área de aproximadamente 500 hectares com cana-de-açúcar, na região de Pereira Barreto (SP), observaram grande variação para a textura do solo. Na camada de 0 a 0,25 m, de 240, 20 e 90 g kg⁻¹ para os valores mínimos, e 880, 350 e 510 g kg⁻¹ para os valores máximos, nos teores de areia, silte e argila, respectivamente. E para a saturação por bases (V%), os autores observaram classes de fertilidades para mesma camada, variando de eutróficos a distróficos, com valores máximos de 80,1 e mínimo de 32,3%. Os autores concluíram que as variações dos atributos do solo podem ser explicadas pelas superfícies geomorfológicas e pelas variações no material de origem.

Dalchiavon et al. (2012) avaliaram os atributos químicos em uma área de 3 ha num Latossolo Vermelho Distroférrico típico sob sistema de semeadura direta, onde encontraram valores de V% e m% variando de 74,4 a 9,4% e 76,9 a 0%, respectivamente. Em uma área de 25 ha de um Latossolo Vermelho Distrófico típico, textura média, também sob sistema de semeadura direta, Zanão-Junior et al. (2010) verificaram valores de V% variando de 65,1 a 20,8%. Enquanto Souza et al. (2010) observaram a variação da saturação por bases entre 60,7 e 31,1%, em uma lavoura de cana-de-açúcar de 23 ha sobre um Argissolo Vermelho-Amarelo.

Em relação aos atributos físicos, Campos et al. (2013) verificaram em uma área de 10,5 ha, cultivada com cana-de-açúcar, teores de argila variando entre 202,1 e 347,6 g kg⁻¹, num Cambissolo Háplico Alítico. Enquanto que Souza et al. (2004) constataram teores de argila com valores mínimos de 590 g kg⁻¹ e máximos de 700 g kg⁻¹ em uma área experimental de cana-de-açúcar de 42 ha num Latossolo Vermelho Eutroférrico.

Na literatura, a maioria dos trabalhos de geoestatística é realizada em pequenas áreas, sobre um único tipo de solo. Pode ser verificado que nesses estudos, os atributos físicos variam pouco e os atributos químicos apresentam uma maior variabilidade nas camadas superficiais devido ao efeito de correção e adubação. Em contrapartida, trabalhos realizados em grandes áreas, como no trabalho realizado por Campos et al. (2009) e da presente pesquisa, apresentam grande variação tanto nos atributos físicos quanto nos químicos dos vários tipos de solos abrangendo a área em sistemas diferentes também de manejo por efeito de idade e variedades de cana implantadas.

De acordo com Pimentel-Gomes e Garcia (2002), a variabilidade de um atributo pode ser classificada segundo a magnitude de seu coeficiente de variação (CV), sendo suas classes determinadas como baixa ($CV \leq 10\%$), média ($10\% < CV \leq 20\%$), alta ($20\% < CV \leq 30\%$) e muito alta ($CV > 30\%$). Para as duas camadas (0 a 0,25 e 0,25 a 0,50 m), apenas os valores de AR, pH e V% não apresentaram variabilidade classificada como muito alta. Sendo os valores de AR e pH classificados como de média variabilidade e os valores de V% classificados como de alta variabilidade.

Coeficientes de variação são adimensionais e permitem a comparação de valores entre diferentes atributos do solo, onde valores elevados podem ser considerados os primeiros indicadores da existência de heterogeneidade nos dados. Segundo Vanni (1998), um valor de coeficiente de variação maior que 35% revela que a série de dados é heterogênea e a média tem pouco significado. Se for maior que 65%, a série de dados é muito heterogênea e a média não tem significado algum. Porém, se for menor que 35%, a série de dados é homogênea e a média tem significado, podendo ser utilizada como representativa da série de dados onde foi obtida. Sendo assim, pode-se verificar nas Tabelas 1 e 2 que, no atributo AMB, e para ambas as camadas, os atributos AR, pH, V%, demonstraram que os valores apresentam uma série de dados homogênea, onde a média pode ser utilizada para representá-los. Em contrapartida, também para as duas camadas, os atributos ST, AG, MO, AP e T apresentaram uma série de dados heterogênea e os atributos P, K, Ca, Mg, Al, SB e m% apresentaram uma série de dados muito heterogênea, onde as médias desses atributos apresentam pouco ou nenhum significado sobre a série de dados, respectivamente.

Vieira et al. (2011) observaram valores de coeficiente de variação baixos para os teores de argila (4,27 e 9,04%) e de baixos à médios para os teores de areia (2,60 e 14,71%), em duas áreas de Latossolos. Estudando os atributos granulométricos do solo, Campos et al. (2013) averiguaram valores de CV médio para areia (18,08%) e baixos para silte (7,29%) e argila (9,98%), em uma área de Cambissolo. Enquanto que Souza et al. (2004) encontraram valores médios de CV para areia (14,98%) e silte (16,64%) e baixos para argila (4,77%) num Latossolo Vermelho Eutroférico. Por outro lado, nos trabalhos de Campos, Marques Junior e Pereira (2010) e Campos et al. (2009) os valores de CV foram classificados como

altos ou muito altos para os atributos granulométricos, variando de 27 a 44,8% para a argila, 56,4% para o silte e 22,9% para a areia total. Sendo os resultados destes trabalhos, semelhantes aos resultados da presente pesquisa.

Vários autores constataram, em suas pesquisas, coeficiente de variação para o teor de matéria orgânica menor do que no presente trabalho. Marques Junior et al. (2008) observaram valor de 12,9%, enquanto Souza, Marques Junior e Pereira (2010) verificaram valores que variaram de 10,37 a 19,89%, sendo estes classificados como médios. Outros autores constataram valores maiores, com CVs classificados como altos, como Campos et al. (2009) que observaram valores de 20,94% e Souza et al. (2010) que verificaram valores de 26,64%.

O potencial hidrogeniônico (pH) do solo foi o atributo que apresentou o menor coeficiente de variação para ambas das camadas, uma vez que é um atributo transformado ($\log [H^+]$). Mesmo assim, os valores foram um pouco maiores que o verificados na literatura, em virtude da variabilidade de solos e manejos da área. Campos, Marques Junior e Pereira (2010) e Zanão Junior et al. (2010) observaram baixa variabilidade para este atributo, com valores de CV de 5,14 e 4,57%, respectivamente.

O teor de fósforo foi o atributo que apresentou um dos maiores coeficientes de variação para as duas camadas. Campos et al. (2009), Dalchiavon et al. (2012) e Marques Junior et al. (2008), também observaram alta variabilidade para este atributo, entretanto, com valores de CV menores do que os da presente pesquisa. Salviano, Vieira e Sparovek (1998) relataram que a alta variabilidade para os teores de fósforo pode ser atribuída à aplicação de fertilizantes em linha, ao efeito residual da adubação, à imobilidade do elemento no solo e à exposição de camadas mais pobres desse nutriente, pelo processo de erosão superficial.

Assim como neste trabalho, Dalchiavon et al. (2012) verificaram valores muito altos de CV para os teores de K, Ca e Mg em ambas as camadas estudadas. Souza et al. (2010) obtiveram valores muito altos de CV apenas para o K e valores altos para Ca e Mg. Campos et al. (2009) observaram variabilidade dos dados muito alta para os valores de SB e CTC e altos para V%, corroborando com os resultados deste trabalho. Mas estes mesmos autores verificaram média variabilidade dos dados para a acidez potencial (AP), diferindo dos resultados encontrados na

presente pesquisa, uma vez que houve variação na classificação e manejos dos solos na área.

Tanto o teor de alumínio, quanto a sua saturação no solo (m%) apresentaram altos valores de CV, sendo classificados como muito altos. Dalchiavon et al. (2012) também obtiveram resultados semelhantes para a saturação por alumínio.

Esta grande variabilidade dos atributos físico-químicos dos solos pode ser atribuída ao efeito da variação de classes de solos na área de estudo, com grande efeito antrópico para instalação da cultura da cana-de-açúcar, em diferentes momentos, uma vez que na área existiam desde cana planta até soqueiras de diferentes idades.

Alguns parâmetros podem ser utilizados para caracterizar uma distribuição simétrica ou assimétrica, como por exemplo, a proximidade entre os valores da média e da mediana, ou utilizando os valores de assimetria e curtose que devem ser próximos de zero.

Vários atributos apresentaram valores próximos entre os parâmetros média e mediana, mas apenas o atributo potencial de produção para a cultura da cana-de-açúcar (AMB), assim como os atributos da primeira camada do solo pH1, K1, Mg1, V%1, e da segunda camada pH2, Mg2 e V%2 apresentaram valores de assimetria e curtose próximos de zero, considerados portanto, que as distribuições dos dados são simétricas, ou próximas disso. Os maiores valores de assimetria e curtose foram obtidos para o P, Al e m%, na primeira camada e P, Al e AP para a segunda camada. Os atributos P, Al e m%, para ambas as camadas, apresentaram os maiores distanciamentos entre a média e a mediana, o que pode ser um indicativo de distribuição de dados assimétricos, em que as medidas de tendência central são dominadas por valores atípicos.

Dalchiavon (2012), estudando a produtividade da cana-de-açúcar num único talhão, verificou distribuição normal, para este atributo, sendo os valores de média e mediana muito próximos e valores de assimetria e curtose próximos a zero. Em relação aos atributos do solo, Campos et al. (2009), estudando os teores de areia, silte e argila e os químicos: pH, matéria orgânica, acidez potencial, soma de bases, capacidade de troca catiônica e saturação por bases, verificaram distribuições simétricas para todas as variáveis, fundamentados pela proximidade entre as médias e as medianas, exceto para o atributo silte, entretanto, em áreas de menores

dimensões, muitas vezes como a mesma classe de solo, em relação à presente pesquisa.

Estudando as frações granulométricas do solo, Souza et al. (2004) e Campos et al. (2013) verificaram que os dados seguiram uma distribuição simétrica, mas nem sempre apresentaram normalidade.

Souza et al. (2010) observaram que os valores da média e mediana de todos os atributos químicos do solo (pH, Ca, Mg, K, P, MO, V%), nas profundidades de 0 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m, e a produtividade da cultura da cana-de-açúcar, foram próximos. Enquanto que Zanão Junior et al. (2010), indicaram distribuição normal para os atributos pH, MO e V%, baseados pelos valores próximos da média e mediana, assim como valores próximos a zero de assimetria e curtose.

Nos estudos de Vieira et al. (2011), os valores de assimetria e curtose indicaram que na maioria dos dados (MO, Ca, Mg, AG), não houve distribuição normal, com exceção da areia total para uma das áreas estudadas. Enquanto Campos et al. (2008), observaram valores altos de assimetria e curtose para o teor de fósforo no solo.

No trabalho de Campos, Marques Junior e Pereira (2010), os valores da média e da mediana, para as variáveis AR, pH, SB, V% e MO, ficaram próximos, indicando distribuições simétricas. Para os atributos ST, AG e CTC, os autores verificaram certo distanciamento entre a média e a mediana, o que pode ser um indicativo de distribuição de dados não simétricos.

A estimação por krigagem apresenta melhores resultados quando a normalidade dos dados é satisfeita (PAZ-GONZALEZ; TABOADA CASTRO; VIEIRA, 2001). Entretanto, a normalidade dos dados não é uma exigência da geoestatística, sendo conveniente apenas que a distribuição não apresente caudas muito alongadas, o que poderia comprometer as estimativas da krigagem, as quais são baseadas nos valores médios (ISAACS; SRIVASTAVA, 1989).

4.2 MATRIZ DE CORRELAÇÃO E ANÁLISE DE REGRESSÃO LINEAR

Analisando as Tabelas 3 e 4, nota-se uma correlação entre os atributos físicos e químicos e o potencial de produção do solo para a cultura da cana-de-açúcar, para as camadas 0 a 0,25 e 0,25 a 0,50 m, respectivamente. Para a camada 0 a 0,25 m, todos os atributos do solo apresentaram correlação significativa com o potencial de produção, o que não foi verificado para a camada 0,25 a 0,50 m, onde as correlações AMB x P2 e AMB x AP2 não foram significativas.

Para ambas as camadas, foram verificadas correlações lineares positivas do AMB com os atributos físicos ST e AG, e químicos MO, pH, K, Ca, Mg, SB, T e V%, e os atributos P e AP, os quais apresentaram correlações lineares positivas apenas para a primeira camada. Sendo assim, para a região de estudo, os solos com valores elevados destes atributos apresentam melhor potencial de produção para a cultura da cana-de-açúcar. Já as correlações lineares negativas com o AMB foram verificadas para os atributos AR, Al e m%, para as duas camadas estudadas. Isso era esperado, pois solos arenosos apresentam menor retenção de água e podem apresentar menor disponibilidade de nutrientes. Enquanto que o alumínio, também representado pela sua saturação (m%), é um elemento tóxico para as plantas, podendo se tornar um problema em solos com altos teores deste elemento.

O conhecimento e entendimento das relações entre os atributos do solo e suas influências no potencial de produção do solo para determinada cultura são de extrema importância. Assim, com o conhecimento do tipo de solo e seus atributos é possível determinar o potencial de produção para a cultura em questão em uma determinada região, definindo a sua implantação ou selecionando microrregiões com melhores potenciais para a expansão da lavoura. Em adição, para os atributos que podem ser alterados pelo manejo, o uso destas informações torna-se imprescindível na tomada de decisões quanto ao planejamento das atividades agrícolas da cultura, com a introdução de práticas de manejo que visem o aumento ou melhoria dos atributos que apresentaram correlações positivas e diminuição dos atributos que apresentaram correlação negativa com o ambiente de produção da cana-de-açúcar.

Tabela 4- Matriz de correlação linear simples entre ambiente de produção para a cana-de-açúcar e dos atributos físico-químicos da camada 0 a 0,25 m, dos solos da região Noroeste do Estado de São Paulo.

Atributos ^(a)	Coeficiente de correlação ^(b)														
	AMB	AR1	ST1	AG1	MO1	pH1	P1	K1	Ca1	Mg1	Al1	AP1	SB1	T1	V%1
AR1	-0,67**														
ST1	0,42**	-0,65**													
AG1	0,64**	-0,94**	0,36**												
MO1	0,43**	-0,62**	0,54**	0,52**											
pH1	0,21**	-0,12**	0,24**	0,04 ^{NS}	0,36**										
P1	0,16**	-0,12**	0,12**	0,10*	0,20**	0,25**									
K1	0,38**	-0,39**	0,32**	0,33**	0,41**	0,26**	0,28**								
Ca1	0,54**	-0,65**	0,50**	0,58**	0,69**	0,45**	0,38**	0,44**							
Mg1	0,44**	-0,53**	0,43**	0,47**	0,61**	0,52**	0,38**	0,40**	0,86**						
Al1	-0,23**	0,12**	-0,15**	-0,08*	-0,26**	-0,57**	-0,10*	-0,20**	-0,30**	-0,30**					
AP1	0,15**	-0,38**	0,17**	0,40**	0,25**	-0,59**	-0,09*	-0,03 ^{NS}	0,05 ^{NS}	-0,07 ^{NS}	0,44**				
SB1	0,54**	-0,64**	0,50**	0,56**	0,69**	0,49**	0,40**	0,51**	0,98**	0,93**	-0,31**	0,01 ^{NS}			
T1	0,56**	-0,72**	0,53**	0,65**	0,73**	0,32**	0,36**	0,48**	0,96**	0,87**	-0,19**	0,27**	0,96**		
V%1	0,40**	-0,32**	0,30**	0,26**	0,44**	0,79**	0,29**	0,42**	0,68**	0,70**	-0,62**	-0,54**	0,72**	0,55**	
m%1	-0,26**	0,16**	-0,16**	-0,12**	-0,29**	-0,57**	-0,11**	-0,22**	-0,33**	-0,33**	0,97**	0,39**	-0,34**	-0,23**	-0,65**

^(a)AMB, AR, ST, AG, MO, pH, P, K, Ca, Mg, Al, AP, SB, T, V% e m% são respectivamente o ambiente de produção, teores de areia, silte, argila, matéria orgânica, potencial hidrogeniônico, teores de fósforo, potássio, cálcio, magnésio, alumínio, acidez potencial ($H^+ + Al^{3+}$), soma de bases, capacidade de troca catiônica, saturações por bases e por alumínio na camada 0-0,25m; ^(b)* significativo à 5% de probabilidade; ** significativo à 1% de probabilidade; ^{NS} não significativo.

Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Tabela 5- Matriz de correlação linear simples entre ambiente de produção para a cana-de-açúcar e dos atributos físico-químicos da camada 0,25 a 0,50 m, dos solos da região Noroeste do Estado de São Paulo.

Atributos ^(a)	Coeficiente de correlação ^(b)														
	AMB	AR2	ST2	AG2	MO2	pH2	P2	K2	Ca2	Mg2	Al2	AP2	SB2	T2	V%2
AR2	-0,68**														
ST2	0,37**	-0,53**													
AG2	0,65**	-0,96**	0,27**												
MO2	0,38**	-0,46**	0,32**	0,41**											
pH2	0,35**	-0,19**	0,24**	0,13**	0,33**										
P2	0,05 ^{NS}	-0,05 ^{NS}	0,07 ^{NS}	0,03 ^{NS}	0,12**	0,09*									
K2	0,25**	-0,21**	0,13**	0,19**	0,22**	0,31**	0,13**								
Ca2	0,61**	-0,64**	0,38**	0,60**	0,58**	0,43**	0,11**	0,33**							
Mg2	0,56**	-0,56**	0,35**	0,52**	0,52**	0,46**	0,12**	0,32**	0,78**						
Al2	-0,31**	0,09*	-0,12**	-0,06 ^{NS}	-0,17**	-0,61**	-0,05 ^{NS}	-0,18**	-0,30**	-0,29**					
AP2	-0,08 ^{NS}	-0,22**	-0,01 ^{NS}	0,25**	0,21**	-0,52**	0,00 ^{NS}	-0,13**	-0,06 ^{NS}	-0,08*	0,61**				
SB2	0,63**	-0,64**	0,39**	0,60**	0,59**	0,47**	0,13**	0,41**	0,98**	0,88**	-0,31**	-0,08*			
T2	0,58**	-0,70**	0,37**	0,67**	0,64**	0,27**	0,12**	0,34**	0,92**	0,82**	-0,09*	0,28**	0,93**		
V%2	0,55**	-0,35**	0,27**	0,30**	0,32**	0,74**	0,11**	0,40**	0,70**	0,68**	-0,65**	-0,60**	0,74**	0,49**	
m%2	-0,35**	0,13**	-0,13**	-0,10**	-0,20**	-0,61**	-0,06 ^{NS}	-0,21**	-0,33**	-0,34**	0,97**	0,56**	-0,35**	-0,14**	-0,70**

^(a)AMB, AR, ST, AG, MO, pH, P, K, Ca, Mg, Al, AP, SB, T, V% e m% são respectivamente o ambiente de produção, teores de areia, silte, argila, matéria orgânica, potencial hidrogeniônico, teores de fósforo, potássio, cálcio, magnésio, alumínio, acidez potencial ($H^+ + Al^{3+}$), soma de bases, capacidade de troca catiônica, saturações por bases e por alumínio na camada 0,25-0,50m; ^(b)* significativo à 5% de probabilidade; ** significativo à 1% de probabilidade; ^{NS} não significativo.

Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Observando os valores em módulos dos coeficientes de correlação lineares entre o AMB e os atributos de solo, constata-se que para a primeira camada, o maior coeficiente foi da relação AMB x AR1 e o menor coeficiente foi para AMB x AP1. Para a segunda camada, o maior coeficiente de correlação também foi observado para a relação AMB x AR2 e o menor para a relação AMB x K2. Destaca-se nestas correlações, os altos valores inversos entre AMB e AR em ambas as camadas, demonstrando que solos arenosos são classificados como piores ambientes de produção da cultura da cana-de-açúcar, pela provável redução na capacidade de troca de cátions e principalmente pelo efeito de baixa retenção de água.

A amplitude dos coeficientes de correlação lineares foi de 0,52 na camada de 0 a 0,25 m, e 0,43 na camada de 0,25 a 0,50 m (diferença entre o valor máximo e mínimo em módulo). Assim, distinguem-se os coeficientes de correlação em três classes: valores maiores que 0,50^{**}; valores entre 0,50^{**} e 0,30^{**}; e, valores menores que 0,30^{**}. Para a camada 0 a 0,25 m, os atributos AR, AG, Ca, SB e T apresentam valores de coeficiente de correlação em módulo maior que 0,50^{**}, sendo os atributos que melhor se correlacionaram com o AMB. Os atributos ST, MO, K, Mg e V% apresentam valores de coeficiente de correlação em módulo entre 0,50^{**} e 0,30^{**}. Enquanto os atributos pH, P, Al, AP e m% apresentaram valores baixos de coeficiente de correlação, inferiores à 0,30^{**}.

Para a camada 0,25 a 0,50 m, os atributos AR, AG, Ca, Mg, SB, T e V% apresentam valores de coeficiente de correlação em módulo maior que 0,50^{**}. Os atributos ST, MO, pH, Al e m% apresentam valores de coeficiente de correlação em módulo entre 0,50^{**} e 0,30^{**}; e o atributo K apresentou valor de coeficiente de correlação menor que 0,30^{**}. Neste contexto, verifica-se que os atributos com as maiores correlações foram os que mais influenciaram no potencial de produção do solo para a cultura da cana-de-açúcar.

Souza et al. (2010) estudando a correlação linear entre os atributos químicos do solo (pH, Ca, Mg, K, P, MO e V%), nas profundidades 0 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m, com a produtividade da cana-de-açúcar, verificaram coeficientes de correlação baixos para todos os atributos do solo estudados, com exceção do teor de potássio, que apresentou significância. Resultados semelhantes a estes foram verificados por Rachid Junior et al. (2006), os quais constataram baixa correlação entre a

produtividade da soja com os atributos químicos do solo (P, K, MO, pH, acidez potencial, Ca e Mg) e alta correlação com o teor de potássio.

Resultados semelhantes ao presente trabalho foram verificados por Dias et al. (1999), que analisando as relações entre a produtividade da cultura da cana-de-açúcar e os atributos do solo, verificaram correlações positivas para matéria orgânica (0,71**), fósforo disponível (0,56**), potássio (0,40**), cálcio (0,70**), magnésio (0,67**), soma de bases trocáveis (0,71**), capacidade de troca catiônica (0,80**) e saturação por bases (0,43**), e correlações negativas com o teor de alumínio (-0,28**) e saturação por alumínio (-0,33**), para o horizonte A dos solos estudados. Para os atributos físicos, apenas as correlações com areia e silte foram semelhantes ao presente trabalho, sendo verificada correlação negativa com o teor de areia (-0,54**) e positiva para o silte (0,73**). O teor de argila apresentou correlação negativa (-0,57**) com a produtividade da cana-de-açúcar, diferindo aos resultados deste trabalho.

Dalchiavon et al. (2013), observaram influência linear direta entre a produtividade da cultura da cana-de-açúcar e o teor de matéria orgânica (0,29**) para a camada 0 a 0,20 m. Os autores concluíram que, apesar de significativo, o coeficiente de correlação apresentou baixa magnitude, basicamente devido ao elevado número de observações. Souza et al. (2008) observaram que, entre a produtividade de cana-de-açúcar e o teor de matéria orgânica ocorreram os maiores coeficientes de correlação linear. Enquanto Braga (2011) estudando os atributos P, MO, pH, K, Ca, Mg, acidez potencial, Al, soma de bases, capacidade de troca catiônica, saturação por bases e por alumínio num Argissolo e correlacionando com a produtividade da cana-de-açúcar, verificou correlação significativa apenas para a matéria orgânica, mas somente na camada 0 a 0,20 m.

Dalchiavon et al. (2012) não constataram correlações significativas para a produtividade da cultura da cana-de-açúcar e os valores de pH do solo para as camadas 0 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m, quando houve a manutenção da palhada na lavoura. Contudo, quando houve remoção da palhada, houve correlação significativa para este atributo com a produtividade apenas na camada 0 a 0,20 m.

Cerri e Magalhães (2012) obtiveram baixas correlações entre os atributos do solo e a produtividade da cultura da cana-de-açúcar, afirmando que os atributos físicos e químicos do solo sozinhos são insuficientes para explicar a variabilidade da

produção da cultura. Esses mesmos autores verificaram correlações positivas com o teor de argila (0,27**), MO (0,44**) e acidez potencial (0,32**), semelhante aos resultados deste trabalho. Inexplicavelmente, como expressa os autores, a saturação por bases não apresentou correlação positiva com a produtividade de colmos (-0,15^{ns}), assim como para o pH (-0,29^{ns}) e o teor de P (-0,24^{ns}). Os próprios autores citam que em solos eutróficos, seriam esperadas produtividades superiores, em virtude da maior disponibilidade de nutrientes, entretanto, as variedades de cana-de-açúcar tem comportamento muito discrepante em diferentes classes de solos, daí a necessidade de planejamento de plantio de variedades de acordo com o ambiente de produção.

Baixa correlação da produtividade de culturas com atributos do solo vem sendo observadas em diversas pesquisas, o que dificulta a implantação da agricultura de precisão (VIEIRA; MOLIN, 2001). Esta baixa correlação linear, entre dois atributos quaisquer, não invalidam a hipótese de ocorrência de apreciável correlação espacial entre eles (KITAMURA; CARVALHO; LIMA, 2007).

Nas Tabelas 5 e 6 constam as equações de regressão simples e os respectivos coeficientes entre o potencial de produção do solo para a cultura da cana-de-açúcar e os atributos do solo, para as camadas de 0 a 0,25 e 0,25 a 0,50 m, respectivamente. Houve ajustes de regressões lineares do AMB com os atributos AR1, ST1, AG1, MO1, pH1, Al1, AP1 e V%1, ajuste potencial para o atributo P1 e quadráticos para os atributos K1, Ca1, Mg1, SB1, T1 e m%1, para a primeira camada. Para a segunda camada, houve ajustes de regressão linear do AMB com os atributos AR2, ST2, AG2, MO2 e V%2, ajuste exponencial para o pH2 e quadráticos para os atributos K2, Ca2, Mg2, Al2, SB2, T2 e m%2.

Tabela 6- Equações de regressão e coeficientes do ajuste entre ambiente de produção para a cana-de-açúcar e os atributos físico-químicos da camada 0 a 0,25 m, dos solos da região Noroeste do Estado de São Paulo.

Modelo Matemático ^(a)	Coeficiente de ajuste ^(b)					n.º da equação
	a	b	c	r	r ²	
AMB = a+b.AR1	12,23	-9,698.10 ⁻³	-	0,668**	-	7
AMB = a+b.ST1	3,807	1,706.10 ⁻²	-	0,420**	-	8
AMB = a+b.AG1	3,074	1,131.10 ⁻²	-	0,635**	-	9
AMB = a+b.MO1	3,430	9,524.10 ⁻²	-	0,434**	-	10
AMB = a+b.pH1	2,588	4,893.10 ⁻¹	-	0,207**	-	11
AMB = a.P1^b	4,118	1,044.10 ⁻¹	-	0,238**	-	12
AMB = a+b.K1+c.K1²	4,215	5,328.10 ⁻¹	-2,200.10 ⁻²	-	0,167**	13
AMB = a+b.Ca1+c.Ca1²	3,141	1,060.10 ⁻¹	-5,325.10 ⁻⁴	-	0,364**	14
AMB = a+b.Mg1+c.Mg1²	3,666	1,727.10 ⁻¹	-1,581.10 ⁻³	-	0,257**	15
AMB = a+b.Al1	5,530	-3,046.10 ⁻¹	-	0,234**	-	16
AMB = a+b.AP1	4,550	3,422.10 ⁻²	-	0,151**	-	17
AMB = a+b.SB1+c.SB1²	3,043	7,158.10 ⁻²	-2,406.10 ⁻⁴	-	0,360**	18
AMB = a+b.T1+c.T1²	1,522	7,703.10 ⁻²	-2,177.10 ⁻⁴	-	0,371**	19
AMB = a+b.V%1	2,499	4,710.10 ⁻²	-	0,403**	-	20
AMB = a+b.m%1+c.m%1²	5,611	-1,261.10 ⁻¹	1,888.10 ⁻³	-	0,078**	21

^(a) AMB, AR, ST, AG, MO, pH, P, K, Ca, Mg, Al, AP, SB, T, V% e m% são respectivamente o ambiente de produção, teores de areia, silte, argila, matéria orgânica, potencial hidrogeniônico, teores de fósforo, potássio, cálcio, magnésio, alumínio, acidez potencial (H⁺+Al³⁺), soma de bases, capacidade de troca catiônica, saturações por bases e por alumínio na camada 0-0,25m; ^(b) * significativo à 5% de probabilidade; ** significativo à 1% de probabilidade.

Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Tabela 7- Equações de regressão e coeficientes do ajuste entre ambiente de produção para a cana-de-açúcar e os atributos físico-químicos da camada 0,25 a 0,50 m, dos solos da região Noroeste do Estado de São Paulo.

Modelo Matemático ^(a)	Coeficiente de ajuste ^(b)					n.º da equação
	a	b	c	r	r ²	
AMB = a+b.AR2	11,54	-9,278.10 ⁻³	-	0,685**	-	22
AMB = a+b.ST2	3,813	1,703.10 ⁻²	-	0,374**	-	23
AMB = a+b.AG2	2,897	1,006.10 ⁻²	-	0,653**	-	24
AMB = a+b.MO2	3,470	1,379.10 ⁻¹	-	0,379**	-	25
AMB = a.exp^{b.pH2}	1,977	1,673.10 ⁻¹	-	0,309**	-	26
AMB : P2^{NS}	-	-	-	-	-	-
AMB = a+b.K2+c.K2²	4,658	5,433.10 ⁻¹	-3,593.10 ⁻²	-	0,075**	27
AMB = a+b.Ca2+c.Ca2²	3,076	1,320.10 ⁻¹	-7,308.10 ⁻⁴	-	0,442**	28
AMB = a+b.Mg2+c.Mg2²	3,456	2,602.10 ⁻¹	-2,973.10 ⁻³	-	0,347**	29
AMB = a+b.Al2+c.Al2²	5,769	-6,313.10 ⁻¹	-3,903.10 ⁻²	-	0,137**	30
AMB : AP2^{NS}	-	-	-	-	-	-
AMB = a+b.SB2+c.SB2²	2,890	9,710.10 ⁻²	-3,948.10 ⁻⁴	-	0,447**	31
AMB = a+b.T2+c.T2²	1,924	7,850.10 ⁻²	-2,135.10 ⁻⁴	-	0,353**	32
AMB = a+b.V%2	1,853	6,196.10 ⁻²	-	0,551**	-	33
AMB = a+b.m%2+c.m%2²	5,806	-1,454.10 ⁻¹	2,071.10 ⁻³	-	0,164**	34

^(a) AMB, AR, ST, AG, MO, pH, P, K, Ca, Mg, Al, AP, SB, T, V% e m% são respectivamente o ambiente de produção, teores de areia, silte, argila, matéria orgânica, potencial hidrogeniônico, teores de fósforo, potássio, cálcio, magnésio, alumínio, acidez potencial (H⁺+Al³⁺), soma de bases, capacidade de troca catiônica, saturações por bases e por alumínio na camada 0,25-0,50m; ^(b) * significativo à 5% de probabilidade; ** significativo à 1% de probabilidade; ^{NS} não significativo.

Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Todos os atributos físicos apresentaram regressões lineares com o AMB para ambas as camadas, sendo o teor de areia (AR) o único com coeficiente angular (coeficiente de ajuste “b”) negativo. Para os atributos químicos, em ambas as camadas, a maioria das regressões com o AMB foram quadráticas, com exceção dos atributos MO1, MO2, pH1, pH2, P1, Al1, AP1, V%1 e V%2. Para as regressões do AMB com o pH, foi verificado ajuste linear para a primeira camada e exponencial para a segunda camada. Enquanto que para o Al, houve ajuste linear negativo para

a primeira camada e quadrático para a segunda camada. Para as bases do solo (K, Ca e Mg) assim como para sua somatória (SB) foram verificados ajustes quadráticos com o AMB para ambas as camadas, com a concavidade negativa. Isso indica que quando dos maiores teores destes nutrientes, provavelmente, não serão verificados os melhores ambientes, assim, como as relações AMB x T1 e AMB x T2, que também apresentaram o mesmo comportamento. Entretanto, para a saturação por bases, em ambas as camadas, as regressões foram lineares positivas com o AMB, ou seja, os solos com os melhores potenciais de produção para a cultura da cana-de-açúcar foram os solos que apresentaram os maiores valores de saturação por bases.

A regressão do AMB com o teor de MO para ambas as camadas apresentou o mesmo comportamento da saturação por bases, sendo assim, os melhores ambientes apresentaram os maiores teores de MO. Essas equações demonstram o quão importante é a adoção de práticas agronômicas que visem elevar os teores destes atributos para a melhoria do potencial de produção do solo para a cultura da cana-de-açúcar.

Carvalho et al. (2010) e Dalchiavon et al. (2013) destacaram a relevância da MO no âmbito do manejo e conservação do solo, por influenciar substancialmente os seus atributos químicos, físicos e biológicos, com implicação direta sobre a produtividade vegetal.

Além das correlações entre o AMB e os atributos do solo, verifica-se nas Tabelas 3 e 4 outras correlações interessantes do ponto de vista agronômico. Os atributos físicos, principalmente AR e AG, apresentaram os maiores valores de coeficiente de correlação com os atributos químicos MO, T, SB, Ca e Mg, para as duas camadas. Onde o teor de areia proporcionou correlações negativas, e o teor de argila positivas com esses atributos químicos. Isso indica que solos com alto teor de argila e, por consequência, baixo teor de areia, tem maiores teores de matéria orgânica, devido à proteção que a argila fornece a ela (LIMA et al., 2008). Em relação ao atributo T, não deve-se inferir que seu aumento está diretamente relacionado com o aumento do teor de argila, pois solos tropicais apresentam argila de baixa atividade e com cargas dependentes de pH, sendo que o teor de matéria orgânica do solo tem grande influência na capacidade de troca de cátions destes solo (MEURER, 2007). Sendo assim, solos argilosos apresentam maiores teores de

matéria orgânica, que por sua vez propiciam uma maior capacidade de troca de cátions para o solo. Os atributos Ca e Mg, bem como a SB, também apresentaram correlação com os atributos físicos dos solos da região de estudo, onde verificou-se que a maioria dos solos argilosos apresentam altos teores de bases trocáveis, provavelmente devido a características regionais do material de origem.

Entre os atributos químicos, algumas correlações podem ser destacadas como o teor de MO que apresentou os maiores valores de coeficiente de correlação linear com os atributos K, Ca, Mg, SB, T e V%, para as duas camadas, mas com valores menores para as correlações com K e V% para a segunda camada. Dessas correlações, o maior coeficiente foi verificado para a relação MO x T, nas duas camadas, confirmando a grande influência do teor de matéria orgânica na capacidade de troca catiônica dos solos tropicais (FERREIRA, BOTELHO, 1999; RAIJ, 1986). Outro atributo químico que também merece destaque é o pH, que apresentou, para ambas as camadas, os maiores coeficientes de correlação (linear positivo) com os atributos SB, Ca, Mg e V%, e coeficiente de correlação linear negativo com os atributos Al, AP e m%. Com isso, nota-se a importância do conhecimento do pH, o qual fornece um valor adimensional, mas que auxilia na interpretação de toda a fertilidade do solo. Outro fato importante é a apreciável correlação do pH do solo com a V%, fato já verificado por outros autores deste o século passado. Catani e Gallo (1955) trabalhando com solos do estado de São Paulo, e Castro, Barreto e Anastácio (1972) trabalhando com solos de todo o Brasil, evidenciaram comportamento linear em relação ao pH e a V%.

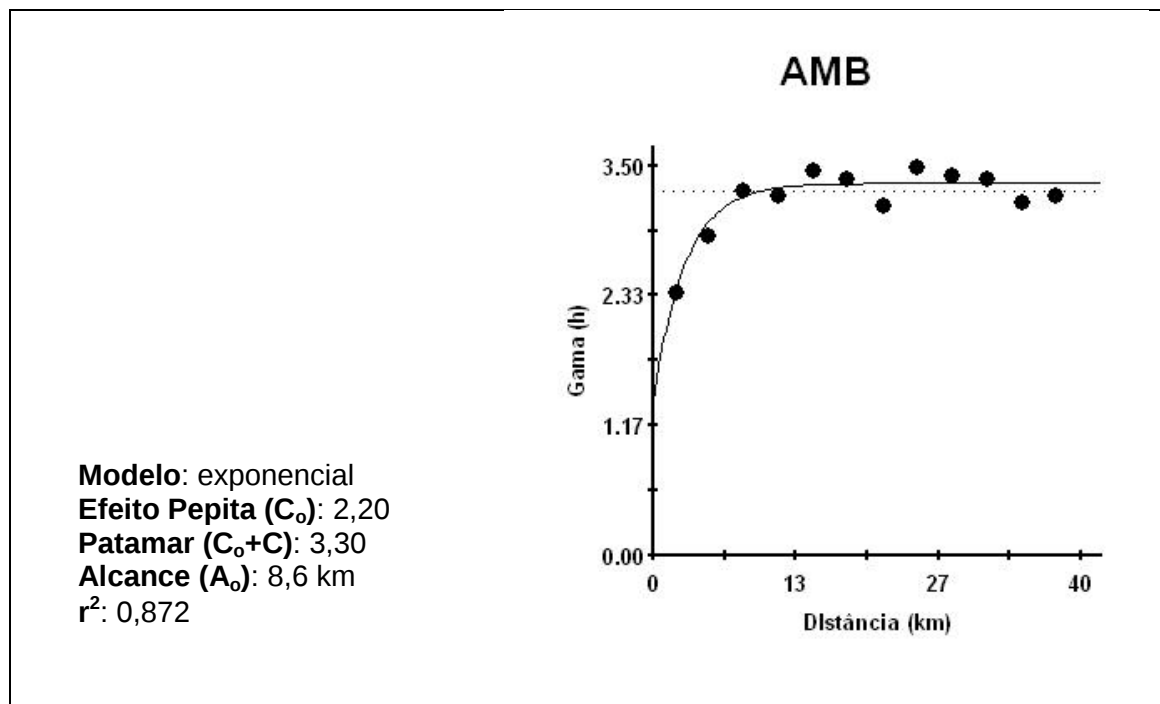
Neste contexto, Souza et al. (2010) verificaram na matriz de correlação linear dos atributos químicos do solo, correlações significativas e positivas entre a saturação por bases e os atributos pH (0,68** e 0,57**), teores de cálcio (0,74** e 0,73**), magnésio (0,54** e 0,61**), para ambas as camadas (0 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m, respectivamente). Enquanto que Dalchiavon et al. (2013) observaram correlações positivas entre os teores de matéria orgânica e cálcio, sendo essas significativas, com valores de 0,27** e 0,31** para as camadas 0 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m, respectivamente.

4.3 ANÁLISE GEOESTATÍSTICA

4.3.1 SEMIVARIOGRAMAS SIMPLES

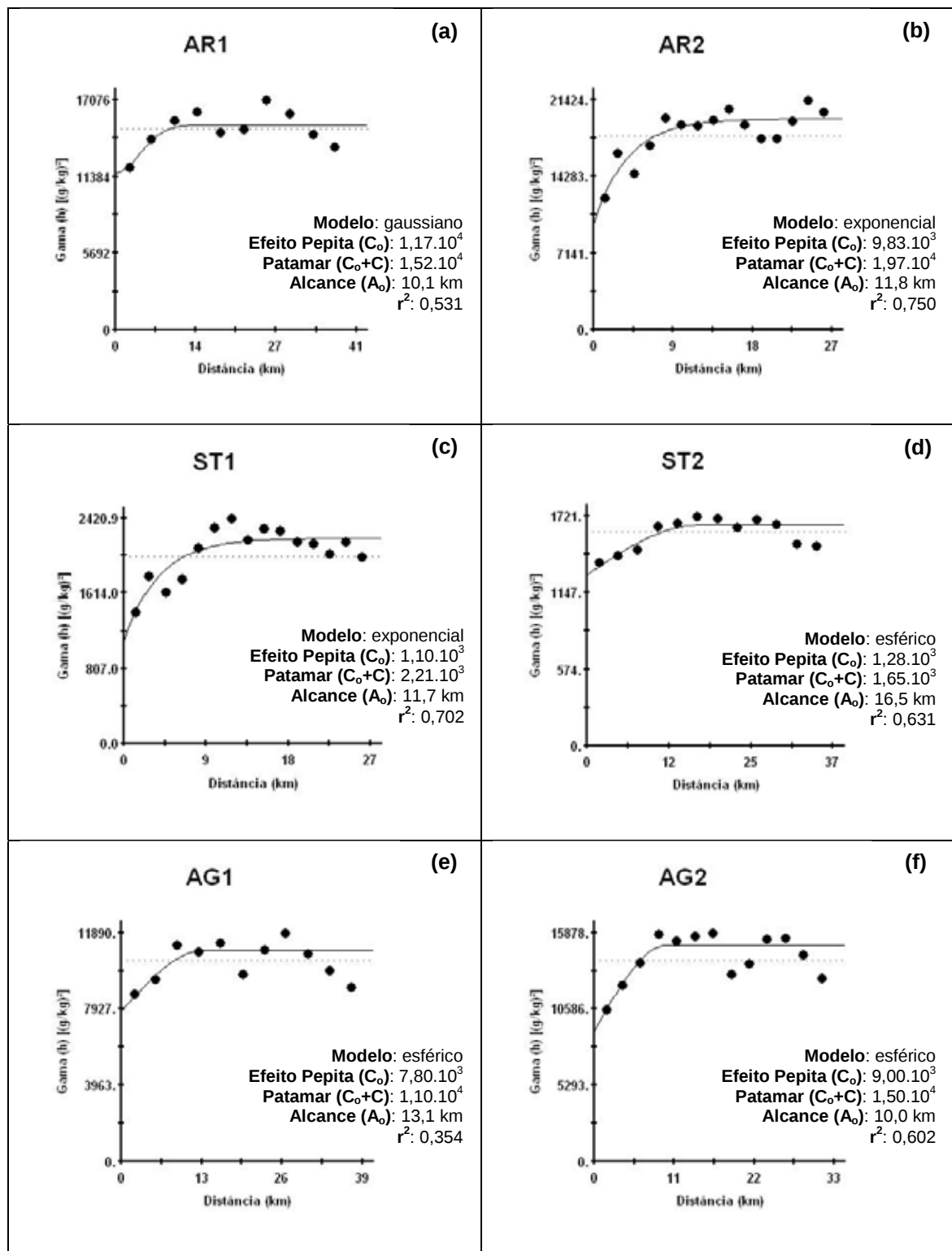
De acordo com os resultados da análise geoestatística, todas as variáveis estudadas apresentaram dependência espacial, com exceção dos teores de fósforo e potássio para as duas camadas e saturação por alumínio para a camada 0 a 0,25 m. Nas Figuras 4 a 9, são apresentados os semivariogramas e seus respectivos parâmetros de ajuste (modelo, C_0 , $C_0 + C$, A_0 e r^2) para o potencial de produção da cana-de-açúcar e para os atributos físicos e químicos do solo.

Figura 4- Semivariograma simples do ambiente de produção para a cana-de-açúcar dos solos da região Noroeste do Estado de São Paulo.



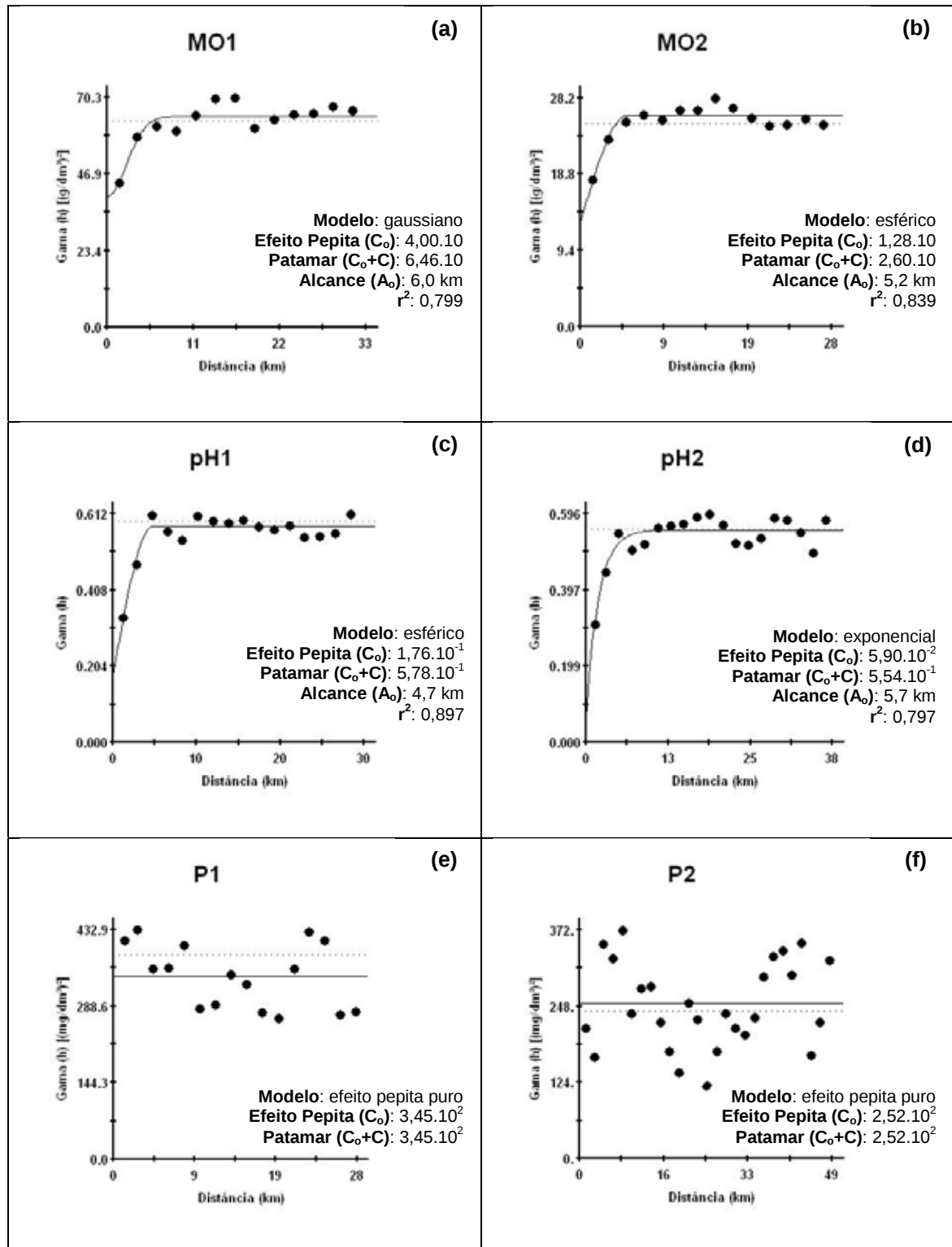
Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Figura 5- Semivariograma simples dos teores de areia, silte e argila das camadas 0-0,25 e 0,25-0,50 m, dos solos da região Noroeste do Estado de São Paulo.



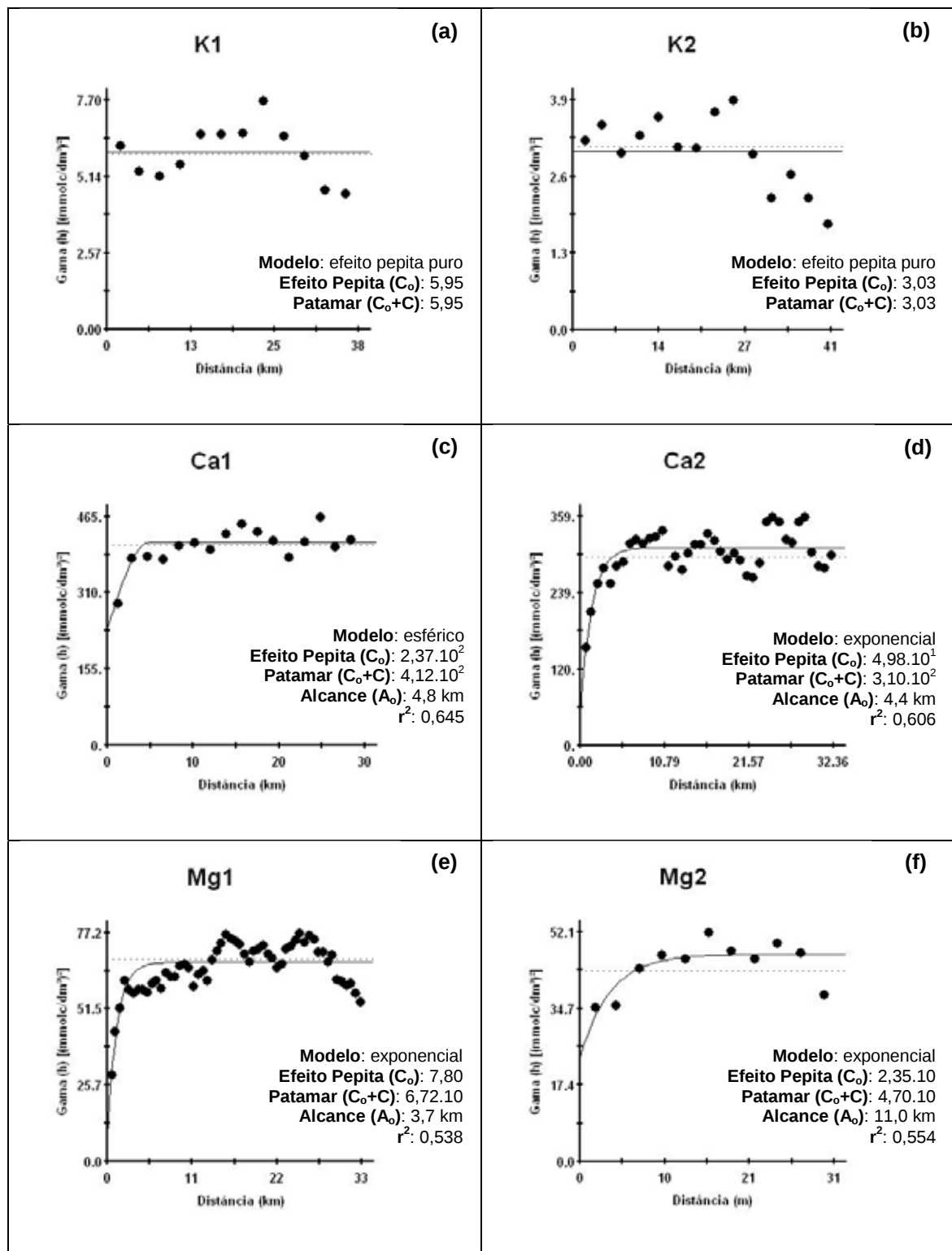
Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Figura 6- Semivariograma simples dos teores de matéria orgânica, valores de potencial hidrogeniônico e teor de fósforo das camadas 0-0,25 e 0,25-0,50 m, dos solos da região Noroeste do Estado de São Paulo.



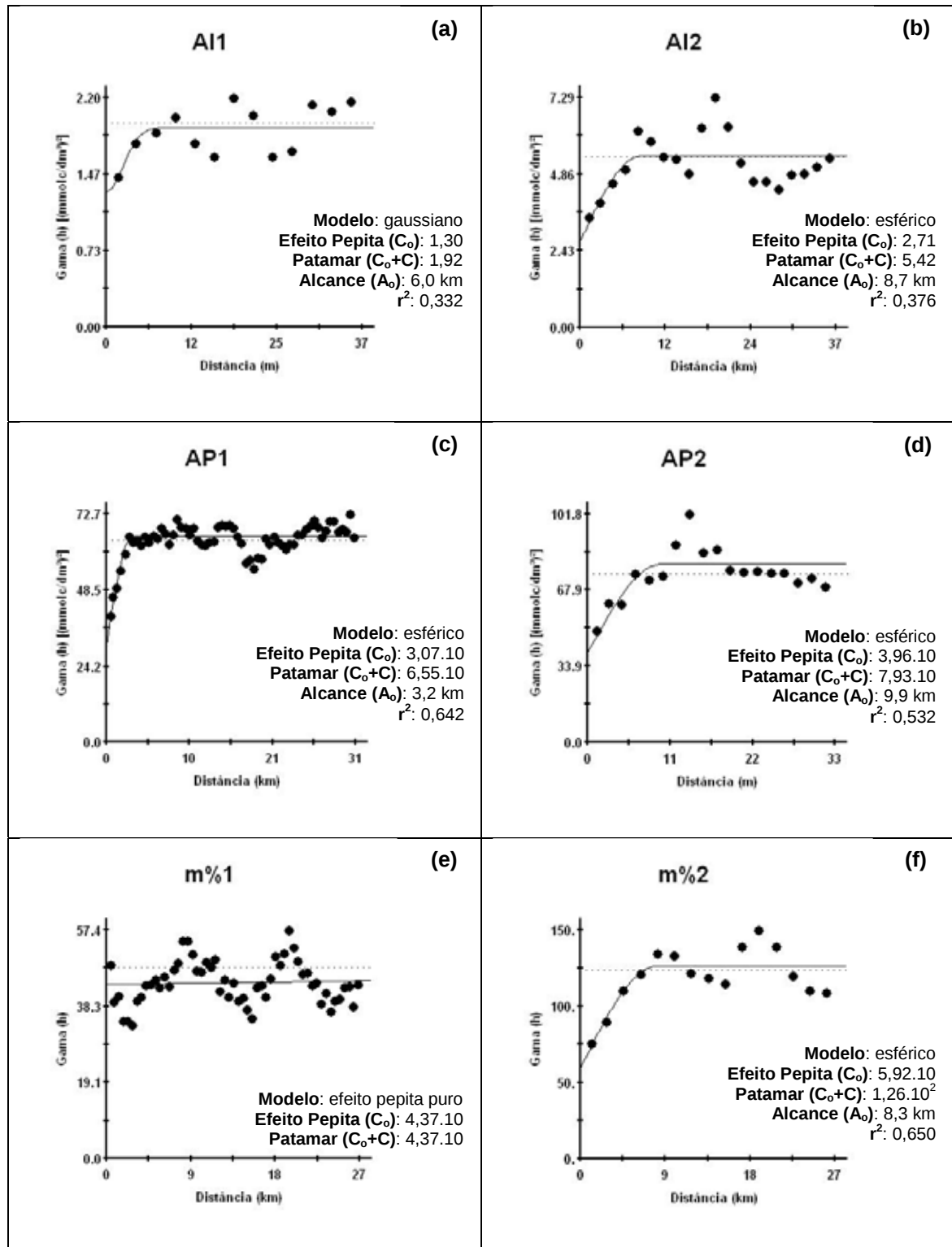
Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Figura 7- Semivariograma simples dos teores de potássio, cálcio e magnésio das camadas 0-0,25 e 0,25-0,50 m, dos solos da região Noroeste do Estado de São Paulo.



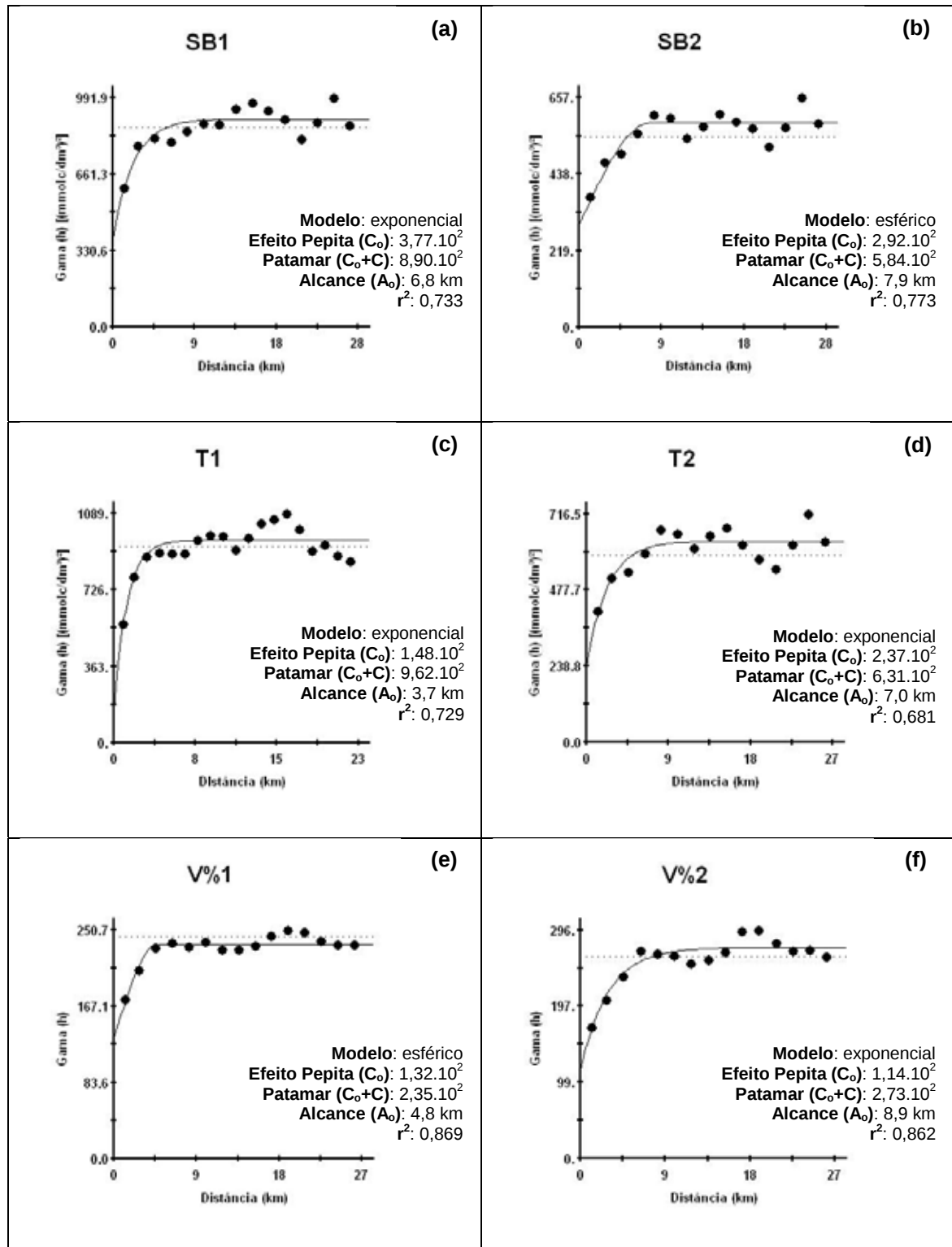
Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Figura 8- Semivariograma simples dos teores de alumínio, acidez potencial e valores da saturação por alumínio das camadas 0-0,25 e 0,25-0,50 m, dos solos da região Noroeste do Estado de São Paulo.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Figura 9- Semivariograma simples dos valores de soma de bases, capacidade de troca catiônica e saturação por bases das camadas 0-0,25 e 0,25-0,50 m, dos solos da região Noroeste do Estado de São Paulo.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Para os atributos P1, P2, K1, K2 e m%1 (Figuras 6e, 6f, 7a, 7b e 8e), os quais não apresentaram dependência espacial, ou seja, efeito pepita puro, os semivariogramas apresentam-se sem patamar. Segundo Berner et al. (2007), modelos sem patamar representam fenômenos com infinita capacidade de dispersão, nesse caso, o campo de amostragem não foi suficientemente grande para se detectar o alcance desses atributos, ou a distância entre pontos amostrais não permitiram atingir o alcance, como é o caso dos nutrientes de baixa mobilidade no solo. Os teores de K e P se distribuíram no terreno de forma mais aleatória, e a adubação em linha, geralmente realizada para esses nutrientes, pode ser a causa dessa maior aleatoriedade (CAMPOS et al., 2008).

Dalchiavon et al. (2012) obtiveram ajuste ao modelo exponencial para o teor de K nas duas camadas (0 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m), e para o P na primeira camada. Para o teor de P na segunda camada e m% para ambas as camadas, os autores ajustaram estes atributos ao modelo esférico, resultados estes que diferem do presente trabalho.

De acordo com Cambardella et al. (1994) e Vieira (1997), valores elevados de efeito pepita (C_0) correspondem à variabilidade não detectada durante o processo de amostragem. No presente trabalho constataram-se altos valores de C_0 em vários atributos dos solos, assim como no ambiente de produção, pelo fato provável, da grade não ter sido regular na amostragem. Vieira et al. (2011) não encontraram um padrão de ocorrência de valores de C_0 , contudo, muitos atributos revelaram elevados valores de C_0 , indicando alta descontinuidade da variabilidade espacial. Os autores consideram que este comportamento deve-se à grade de amostragem, uma vez que, se o espaçamento fosse menor, seria possível detectar padrões de variabilidade que não foram detectadas.

Das variáveis estudadas que apresentaram dependência espacial, os ajustes foram feitos para os modelos gaussiano, esférico e exponencial. Sendo assim, o potencial de produção do solo para a cultura da cana-de-açúcar apresentou ajuste ao modelo exponencial (Figura 4).

Para os atributos da camada 0 a 0,25 m, os ajustes foram gaussianos para AR, MO e Al, esféricos para AG, pH, Ca, AP, e V%, e exponenciais para ST, Mg, SB e T. Para a camada 0,25 a 0,50 m, os atributos apresentaram ajustes ao modelo

esférico para ST, AG, MO, Al, AP, SB e m%, e exponenciais para AR, pH, Ca, Mg, T e V%.

Nos estudos de geoestatística, a maioria dos atributos do solo e da planta tem apresentado melhor ajuste ao modelo esférico (BERTOLANI; VIEIRA, 2001). Esta predominância de ajuste ao modelo esférico foi verificada também neste trabalho, mas com grande número de ajustes ao modelo exponencial. Verifica-se que dos 26 atributos que apresentaram dependência espacial, para as duas camadas, 12 se ajustaram ao modelo esférico, 11 ao modelo exponencial e 3 ao modelo gaussiano.

Em relação aos atributos físicos do solo, Campos et al. (2009) verificaram ajuste gaussiano para os teores de areia, silte e argila, diferente ao do presente trabalho, onde este ajuste só foi verificado para o AR1. Fato não constatado por Campos, Marques Junior e Pereira (2010), os quais observaram que estes atributos se ajustaram melhor ao modelo esférico, os quais foram verificados nos atributos ST2, AG1 e AG2. Campos et al. (2013) e Souza et al. (2004) ajustaram o teor de areia ao modelo exponencial e o teor de argila ao modelo esférico.

Vieira et al. (2011), estudando a variabilidade dos atributos MO, Ca, Mg, AR e AG, para as regiões de Angatuba e Campos Novos Paulista, estado de São Paulo, verificaram que a maioria dos dados ajustaram-se ao modelo esférico, com exceção do Mg e AG que se ajustaram ao modelo exponencial. Nos estudos realizados por Campos et al. (2008), todos os atributos apresentaram dependência espacial, onde K, CTC e V% ajustaram-se ao modelo esférico, e o P ao modelo exponencial.

Na análise de dependência espacial dos atributos químicos MO, pH, AP, SB, CTC e V%, Campos et al. (2009), ajustaram todos os atributos ao modelo gaussiano, com exceção do pH e MO, que se ajustaram ao modelo esférico. Enquanto, Souza et al. (2010) obtiveram ajustes ao modelo esférico para todos os atributos químicos (pH, Ca, Mg, K, P, MO e V%), semelhante ao verificado por Campos, Marques Junior e Pereira (2010), para pH, SB, CTC, V% e MO, fato este que não ocorreu para todos os atributos químicos analisados neste trabalho.

Campos et al. (2009) e Dalchiavon et al. (2012) estudando a dependência espacial do teor de matéria orgânica do solo, verificaram ajustes ao modelo esférico para este atributo, para todas as camadas estudadas, diferentemente ao verificado no presente trabalho em que este modelo só foi constatado na segunda camada para o teor de MO (Figura 6b). Zanão Junior et al. (2009) verificaram ajuste ao

modelo gaussiano para MO1 e MO2, o que só foi verificado neste trabalho na camada de 0 a 0,25 m (Figura 6a).

Zanão Junior et al. (2009) não constataram dependência espacial para o pH nas duas camadas estudadas, resultados estes que diferem do presente trabalho. Enquanto Campos, Marques Junior e Pereira (2010) ajustaram o modelo esférico para o pH, semelhante ao verificados para o pH1 (Figura 6c), mas não verificado para o pH2 (Figura 6d).

O desempenho dos semivariogramas pode ser avaliado pelo seu coeficiente de determinação espacial (r^2), o que pode ser verificado nas Figuras 4 a 9. O valor do coeficiente para o ambiente de produção foi de 0,872 (Figura 4). Para os atributos do solo, os coeficientes variaram de 0,332 a 0,897, para a primeira camada, e de 0,376 a 0,862, para a segunda camada. Para ambas as camadas o teor de alumínio foi o atributo que apresentou os menores coeficientes (Figuras 8 a,b). Os atributos químicos MO, pH, SB, T e V% apresentaram os maiores valores de coeficientes de determinação espacial para as duas camadas. Enquanto que os atributos físicos apresentaram uma maior variação de valores do coeficiente para a primeira em comparação com a segunda camada (Figura 5), pelo provável efeito antrópico nos solos dos diferentes ambientes de produção.

Esta alta variação dos valores de coeficiente de determinação de ajustes do semivariogramas (r^2) nos atributos do solo também foi verificada por Vieira et al. (2011), os quais observaram valores variando de 0,355 (Mg) a 0,933 (Ca) para a região de Angatuba e valores variando de 0,051 (Ca) a 0,726 (AR) para a região de Campos Novos Paulista. Com isso, os autores concluíram que os melhores ajustes foram realizados para os solos da região de Angatuba. Souza et al. (2010) estudando a dependência espacial dos atributos químicos do solo, também verificaram uma variação nos coeficientes de determinação, com valores entre 0,60 (Ca) a 0,94 (K).

Outros autores observaram melhores ajustes para os semivariogramas, com valores de coeficientes de determinação maiores que 0,90. Campos et al. (2013) verificaram valores de 0,98 para o teor de areia e 0,90 para o teor de argila. Campos, Marques Junior e Pereira (2010) obtiveram ajustes que variaram de 0,96 a 0,98 para os atributos físicos e 0,97 a 0,99 para os atributos químicos do solo. Enquanto Souza et al. (2008) verificaram valores 0,90 para os teores de P e K; 0,97

para a CTC e 0,98 para a MO. Cabe destacar que os valores obtidos por estes autores foram em malhas regulares de menor tamanho e com a mesma classe de solo, fato este não coincidente ao presente trabalho.

O alcance (A_0) é de fundamental importância para a interpretação dos semivariogramas. Ele indica a distância até onde os pontos amostrais estão correlacionados entre si (VIEIRA, 1997). Devido ao tamanho da área estudada e a grade não regular de amostragem, a unidade do alcance no presente trabalho foi o quilômetro (km), unidade esta verificada em poucos trabalhos da literatura, sendo difícil a discussão dos valores em comparação a outros trabalhos.

Os valores de alcance dos atributos estudados variaram de 3,2 km para o atributo AP1 a 16,5 km para o atributo ST2. Esta variação de valores de alcance mostra que este parâmetro varia entre os diferentes atributos e classes de solo, fato este já verificado por Vieira (2000), Bertolani e Vieira (2001). Em geral, no presente trabalho, os atributos físicos apresentaram os maiores valores de alcance, variando de 10,1 a 13,1 km para a camada de 0 a 0,25 m, e de 10,0 a 16,5 km para a camada de 0,25 a 0,50 m. Enquanto que para os atributos químicos houve uma maior variação entre as camadas, de 3,2 a 6,8 km na primeira e de 4,4 a 11,0 km na segunda camada. Dentre dos atributos químicos, MO, pH e Ca apresentaram as menores alterações de valores de A_0 entre as camadas. Enquanto que os outros atributos químicos apresentaram os maiores valores de A_0 para a camada de 0,25 a 0,50 m, mostrando que esta camada apresenta maior homogeneidade para estes atributos, uma vez que as operações de manejo do solo são mais intensas na primeira camada.

Um comportamento semelhante ao presente trabalho foi verificado por Campos et al. (2009), os quais verificaram valores bem próximos de alcance para os atributos físicos (AG e AR) e uma maior variação para os atributos químicos estudados (pH, MO, AP, SB, CTC e V%). Contudo, os valores encontrados por estes autores são muito inferiores aos do presente trabalho, com alcances variando de 1,2 a 1,3 km para os atributos físicos e 1,0 a 2,1 km para os atributos químicos. Segundo Souza et al. (2004), os atributos granulométricos são mais estáveis quando comparados com os atributos químicos, ou seja, modificam-se pouco ao longo do tempo por ação do intemperismo ou pelo manejo, assim, esses atributos apresentam valores de alcance mais próximos.

Campos, Marques Junior e Pereira (2010) também verificaram este comportamento do alcance nos seus estudos, onde observaram variações de 2,4 a 3,0 km para os atributos físicos (AR, ST e AG) e de 1,9 a 2,8 km para os atributos químicos (pH, SB, CTC, V% e MO). Campos et al. (2008) verificaram valores de alcance de 2,4 km para a saturação por bases e 2,6 km para a capacidade de troca catiônica para a camada de 0 a 0,20 m. Em ambos os trabalhos, os valores de alcance foram menores do que os constatados na presente pesquisa.

Vários outros trabalhos, com valores de A_0 muito inferior a estes podem ser encontrados na literatura. Souza et al. (2010) estudando a dependência espacial dos atributos químicos do solo e da produtividade da cultura da cana-de-açúcar em uma área de 23 ha observaram valores de alcance variando de 83 a 471 m. Zanão Junior et al. (2009) verificaram valores variando de 496 a 539 m para os atributos MO e V%. Souza et al. (2004) estudando os atributos físicos do solo, verificaram valores de 230,1 m para o teor de argila, 157,7 m para o teor de silte e 210,0 m para o teor de areia. Em estudos realizados por Dalchiavon et al. (2012), em um Latossolo Vermelho Distriférico sob sistema de plantio direto, o alcance ficou entre 113,1 m (Mg1) e 40,2 m (K2). Uma observação ressaltada pelos autores e também verificada no presente trabalho foi que nenhum dos atributos apresentou o mesmo valor de alcance para ambas as camadas de solo analisada, denotando, além da variabilidade vertical, variabilidade horizontal entre as profundidades.

O avaliador de dependência espacial (ADE), que expressa a proporção da variância estrutural (C) no patamar ($C_0 + C$), permite analisar o grau de dependência espacial na variância dos dados experimentais. Nas Tabelas 7 e 8, constata-se que o ADE dos atributos do solo variaram de 22,4 a 89,4% na camada 0 a 0,25 m e de 23,2 a 88,4% na camada 0,25 a 0,50 m.

Segundo Cambardella et al. (1994), modificado por Robertson (2004), dos 26 atributos estudados nas duas camadas, 2 atributos apresentaram dependência espacial fraca, 20 apresentaram dependência espacial moderada e 4 apresentaram dependência espacial forte. Os atributos do solo AG, MO, AI, AP, SB e V% apresentaram a mesma classe de dependência espacial para ambas as camadas de solo estudadas.

Tabela 8- Soma do quadrado do resíduo e avaliador de dependência espacial do ambiente de produção para a cana-de-açúcar e dos atributos físico-químicos da camada 0 a 0,25 m, dos solos da região Noroeste do Estado de São Paulo.

Atributos ^(a)	SQR ^(b)	Avaliador da Dependência Espacial ^(c)		
		ADE	Classe 1	Classe 2
AMB	$1,47.10^{-1}$	33,3	Moderada	Fraca
AR1	$8,89.10^6$	23,2	Fraca	Fraca
ST1	$1,10.10^3$	50,1	Moderada	Moderada
AG1	$7,62.10^6$	28,8	Moderada	Fraca
MO1	$1,13.10^2$	38,0	Moderada	Fraca
pH1	$7,23.10^{-3}$	69,6	Moderada	Forte
P1	-	-	-	-
K1	-	-	-	-
Ca1	$8,43.10^3$	42,5	Moderada	Moderada
Mg1	$1,92.10^3$	88,4	Forte	Muito Forte
Al1	$4,71.10^{-1}$	32,1	Moderada	Fraca
AP1	$7,34.10^2$	53,1	Moderada	Moderada
SB1	$3,38.10^4$	58,1	Moderada	Moderada
T1	$6,37.10^4$	84,6	Forte	Muito Forte
V%1	$6,89.10^2$	43,8	Moderada	Moderada
m%1	-	-	-	-

^(a) AMB, AR, ST, AG, MO, pH, P, K, Ca, Mg, Al, AP, SB, T, V% e m% são respectivamente o ambiente de produção, teores de areia, silte, argila, matéria orgânica, potencial hidrogeniônico, teores de fósforo, potássio, cálcio, magnésio, alumínio, acidez potencial ($H^+ + Al^{3+}$), valores de soma de bases, capacidade de troca de catiônica, saturações por bases e por alumínio na camada 0-0,25 m; ^(b) SQR é a soma do quadrado do resíduo; ^(c) ADE, Classe 1 e Classe 2 são, respectivamente, o avaliador de dependência espacial, classes de dependência segundo Cambardella et al. (1994), modificado por Robertson (2004) e classes de dependência segundo Dalchiavon (2010).

Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Tabela 9- Soma do quadrado do resíduo e avaliador de dependência espacial dos atributos físico-químicos da camada 0,25 a 0,50 m, dos solos da região Noroeste do Estado de São Paulo.

Atributos ^(a)	SQD ^(b)	Avaliador da Dependência Espacial ^(c)		
		ADE	Classe 1	Classe 2
AR2	2,03.10 ⁷	50,0	Moderada	Moderada
ST2	5,97.10 ⁴	22,4	Fraca	Fraca
AG2	1,39.10 ⁷	40,0	Moderada	Moderada
MO2	1,20.10	50,8	Moderada	Moderada
pH2	1,65.10 ⁻²	89,4	Forte	Muito Forte
P2	-	-	-	-
K2	-	-	-	-
Ca2	2,40.10 ⁴	84,0	Forte	Muito Forte
Mg2	1,47.10 ²	50,0	Moderada	Moderada
Al2	9,57	50,0	Moderada	Moderada
AP2	1,03.10 ³	50,1	Moderada	Moderada
SB2	1,57.10 ⁴	50,0	Moderada	Moderada
T2	2,62.10 ⁴	62,4	Moderada	Forte
V%2	2,04.10 ³	58,2	Moderada	Moderada
m%2	1,83.10 ³	53,1	Moderada	Moderada

^(a) AR, ST, AG, MO, pH, P, K, Ca, Mg, Al, AP, SB, T, V% e m% são respectivamente os teores de areia, silte, argila, matéria orgânica, potencial hidrogeniônico, teores de fósforo, potássio, cálcio, magnésio, alumínio, acidez potencial ($H^+ + Al^{3+}$), valores de soma de bases, capacidade de troca catiônica, saturações por bases e por alumínio na camada 0,25-0,50 m; ^(b) SQD é a soma do quadrado do resíduo; ^(c) ADE, Classe 1 e Classe 2 são, respectivamente, o avaliador de dependência espacial, classes de dependência segundo Cambardella et al. (1994), modificado por Robertson (2004) e classes de dependência segundo Dalchiavon (2010).

Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Para os atributos MO, Ca, Mg, AG e AR, Vieira et al. (2011) encontraram valores de dependência espacial entre as amostras variando de moderada a alta, resultados estes semelhantes ao presente trabalho, com exceção do AR1 que apresentou grau de dependência espacial fraca. Campos et al. (2009) verificaram grau de dependência espacial forte para os atributos capacidade de troca catiônica e saturação por bases, fato este só observado para a T1 no presente trabalho. Resultado semelhantes, exceto para o pH2, foram verificados por Zanão Junior et al.

(2010) para os atributos MO, pH e V%, os quais apresentaram ADE moderado. Em relação aos atributos físicos, Souza et al. (2004) verificaram valores semelhantes ao presente trabalho de ADE para o teor de argila, classificando como moderado grau de dependência espacial. Para o teor de silte, os dados de ADE só foram semelhantes para a primeira camada, classificada como moderada. Já para o teor de areia, os dados diferem da pesquisa citada, sendo esta classificada como de forte dependência como constatado por Souza et al. (2004). Em contrapartida, Campos et al. (2013) obtiveram grau de dependência espacial fraca para o teor de areia, corroborando com os dados deste trabalho.

Dalchiavon (2010) sugere uma classificação mais detalhada do avaliador de dependência espacial, separando em 5 classes. Sendo assim, dos 26 atributos estudados nas duas camadas (Tabelas 7 e 8), 6 apresentam dependência espacial fraca, 14 dependência espacial moderada, 2 dependência espacial forte e 4 com dependência espacial muito forte. Nesta classificação do ADE, apenas AP, SB e V% apresentam a mesma classe de dependência espacial para as duas camadas e nenhum atributo apresentou grau de dependência espacial muito fraca.

No comparativo entre as duas classificações, devido ao maior intervalo das classes sugeridas por Cambardella et al. (1994), vários atributos que apresentaram dependência espacial moderada nesta classificação passaram a apresentar grau de dependência espacial fraca na nova classificação sugerida por Dalchiavon (2010), ou seja, estes atributos apresentaram valores de ADE inferiores a 40%. Com isso, observa-se que a classificação proposta por Dalchiavon (2010) permitiu classificar mais detalhadamente o grau de dependência espacial dos atributos avaliados.

Em estudo realizado por Dalchiavon et al. (2012), onde analisaram os atributos P, MO, pH, K, Ca, Mg, V% e m%, os autores verificaram que o ADE variou de 50% (P2) a 92% (V%2), sendo classificados de moderado a muito forte grau de dependência espacial destes atributos, segundo a classificação proposta por (DALCHIAVON, 2010).

4.3.2 VALIDAÇÃO CRUZADA

A validação cruzada é uma ferramenta destinada à avaliar modelos de semivariogramas que efetuam a krigagem, onde trabalhando na obtenção do número ideal de vizinhos, auxilia a interpolação por krigagem. Nas Tabelas 9 e 10 são apresentados os parâmetros das validações cruzadas referentes às krigagens do ambiente de produção para a cana-de-açúcar e dos atributos dos solos. Os valores dos coeficientes de correlação variaram de 0,361 (Al1) a 0,671 (pH2). Os coeficientes angulares (b) das retas das validações cruzadas ficaram entre 0,559 (ST1) a 1,053 (AR2).

Em estudo realizado por Campos et al. (2009), em uma área de 505 ha cultivado com cana-de-açúcar na região de Pereira Barreto, o coeficiente de correlação do teste de validação cruzada para os atributos estudados foi a seguinte: areia (0,61), silte (0,57), argila (0,59), pH (0,65), MO (0,61), AP (0,58), SB (0,60), CTC (0,64) e V% (0,69). Verifica-se, portanto, que os valores dos coeficientes dos atributos AR, AG, MO e pH, apresentaram semelhança ao presente trabalho.

Tabela 10- Parâmetros das validações cruzadas referentes às krigagens do ambiente de produção para a cana-de-açúcar e dos atributos físico-químicos da camada 0 a 0,25 m, dos solos da região Noroeste do Estado de São Paulo.

Atributos ^(a)	Coeficiente de Correlação (r)	VO = a + b. VE ^(b)	
		a	B
$\gamma(h)$ simples dos atributos do solo			
AMB	0,557	-0,01	1,002
AR1 (g kg ⁻¹)	0,586	-0,65	0,999
ST1 (g kg ⁻¹)	0,473	3,66	0,559
AG1 (g kg ⁻¹)	0,583	-3,76	1,026
MO1 (g dm ⁻³)	0,590	0,14	0,999
pH1	0,626	0,31	0,945
P1 (mg dm ⁻³)	-	-	-
K1 (mmol _c dm ⁻³)	-	-	-
Ca1 (mmol _c dm ⁻³)	0,499	0,12	1,001
Mg1 (mmol _c dm ⁻³)	0,484	2,32	0,803
Al1 (mmol _c dm ⁻³)	0,361	0,10	0,851
AP1 (mmol _c dm ⁻³)	0,502	0,91	0,958
SB1 (mmol _c dm ⁻³)	0,514	1,64	0,962
T1 (mmol _c dm ⁻³)	0,555	6,22	0,904
V%1	0,455	5,45	0,911
m%1	-	-	-

^(a) AMB, AR, ST, AG, MO, pH, P, K, Ca, Mg, Al, AP, SB, T, V% e m% são respectivamente o ambiente de produção, teores de areia, silte, argila, matéria orgânica, potencial hidrogeniônico, teores de fósforo, potássio, cálcio, magnésio, alumínio, acidez potencial ($H^+ + Al^{3+}$), valores de soma de bases, capacidade de troca de catiônica, saturações por bases e por alumínio na camada 0-0,25 m; ^(b) VO e VE são respectivamente o valor observado e o valor estimado.

Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Tabela 11- Parâmetros das validações cruzadas referentes às krigagens dos atributos físico-químicos da camada 0,25 a 0,50 m, dos solos da região Noroeste do Estado de São Paulo.

Atributos ^(a)	Coeficiente de Correlação (r)	VO = a + b. VE ^(b)	
		a	b
$\gamma(h)$ simples dos atributos do solo			
AR2 (g kg ⁻¹)	0,649	-36,14	1,053
ST2 (g kg ⁻¹)	0,371	0,02	1,001
AG2 (g kg ⁻¹)	0,603	-6,58	1,030
MO2 (g dm ⁻³)	0,577	0,00	1,003
pH2	0,671	0,38	0,932
P2 (mg dm ⁻³)	-	-	-
K2 (mmol _c dm ⁻³)	-	-	-
Ca2 (mmol _c dm ⁻³)	0,593	1,19	0,949
Mg2 (mmol _c dm ⁻³)	0,476	0,11	0,989
Al2 (mmol _c dm ⁻³)	0,514	0,02	0,971
AP2 (mmol _c dm ⁻³)	0,476	0,17	0,991
SB2 (mmol _c dm ⁻³)	0,563	-1,25	1,043
T2 (mmol _c dm ⁻³)	0,592	-0,27	1,012
V%2	0,549	1,28	0,978
m%2	0,510	0,31	0,937

^(a) AR, ST, AG, MO, pH, P, K, Ca, Mg, Al, AP, SB, T, V% e m% são respectivamente os teores de areia, silte, argila, matéria orgânica, potencial hidrogeniônico, teores de fósforo, potássio, cálcio, magnésio, alumínio, acidez potencial (H⁺+Al³⁺), valores de soma de bases, capacidade de troca catiônica, saturações por bases e por alumínio na camada 0,25-0,50 m; ^(b) VO e VE são respectivamente o valor observado e o valor estimado.

Fonte: Dados da pesquisa do autor.

4.3.3 KRIGAGEM SIMPLES

Nas Figuras 10 a 23 são apresentados os mapas de krigagem simples do potencial de produção do solo para a cultura da cana-de-açúcar e dos atributos físicos e químicos do solo que apresentaram dependência espacial, para as duas camadas analisadas. O uso da krigagem tem grande potencial de uso agrícola, como pode ser verificado no trabalho de Campos et al. (2009), que estabeleceram práticas de manejo do solo e de cultura com o auxílio dos mapas de krigagem.

Utilizando a geoestatística como ferramenta para gerar os mapas da região de estudo, através da extrapolação por krigagem dos ambientes de produção e dos atributos do solo, foi possível estimar valores e teores destes para áreas não trabalhadas, isto é, nas áreas onde não se coletaram amostras de solos. A área total extrapolada foi de 140.317 ha, sendo esta estimada a partir de uma área de coleta de 18.963 ha. Portanto, a área inicial de coleta das amostras de solo representa apenas 13% da área total extrapolada pela krigagem.

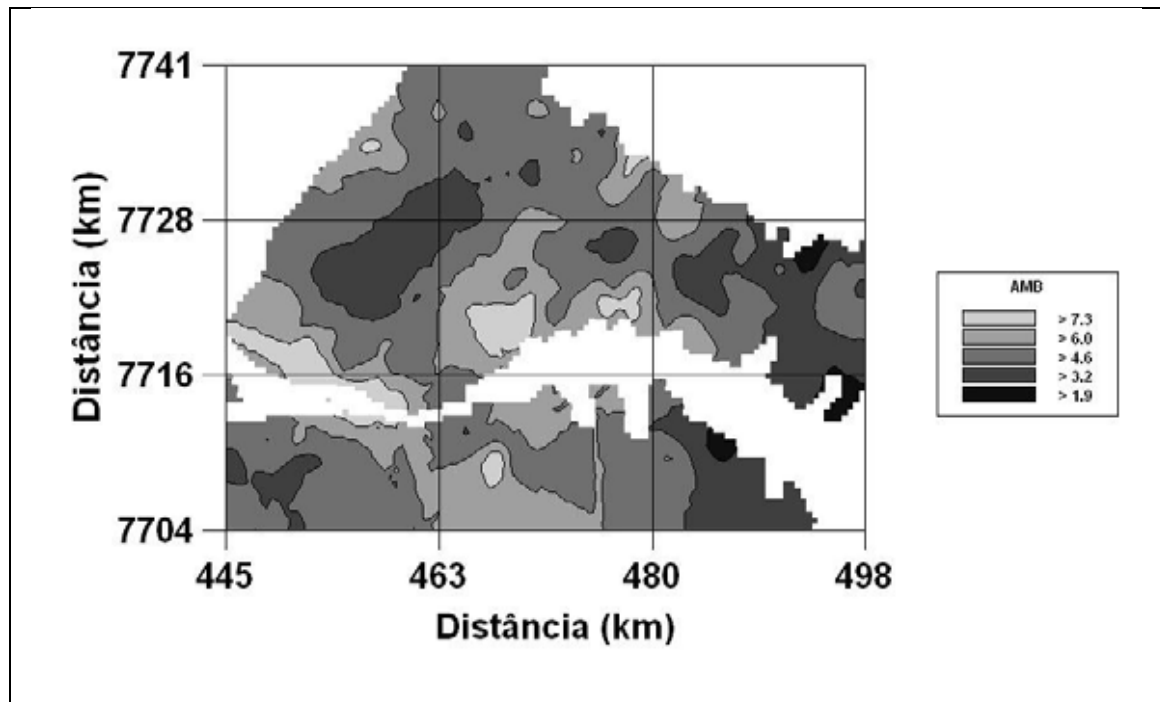
Na conversão qualitativa para a quantitativa dos ambientes de produção, onde foram dadas notas de 0 a 10 (notas mais altas para os melhores ambientes e mais baixas para os piores ambientes), observa-se no mapa de krigagem do AMB (Figura 10), que os melhores ambientes foram verificados próximos às margens dos rios, principalmente no quadrante central (entre as distâncias horizontais 463 a 480 km E e as distâncias verticais 7716 a 7728 km N) e na região do município de Itapura, próximo à Fóz do rio Tietê no Paraná. Enquanto que os piores ambientes foram verificados próximos à região do município de Pereira Barreto e no cruzamento das distâncias 7728 km N com 463 km E (coordenadas UTM).

Analisando-se ainda a Figura 10, a legenda do mapa dos ambientes de produção apresentou uma escala variando de 7,3 a 1,9, sugerida pelo programa GS+, ou seja, de ambiente “B” a ambiente “E”. Isto não significa que na região não ocorram solos com alto potencial de produção para a cana-de-açúcar (ambiente “A”), mas sim que a área de ocorrência deste ambiente é muito pequena em comparação aos outros, dentro da área de estudo. Assim, verifica-se que a maior parte da região apresentou solos com notas abaixo de 5 para os ambientes de produção, ou seja, solos com médio a baixo potencial de produção, com ambientes variando de “C” a “E”. Constatação esta esperada devido, principalmente, a geologia da região, a qual

tem predominância do arenito, e que pode ser verificado na análise dos mapas dos atributos dos solos que acompanham praticamente a mesma distribuição (Figuras 11 a 23).

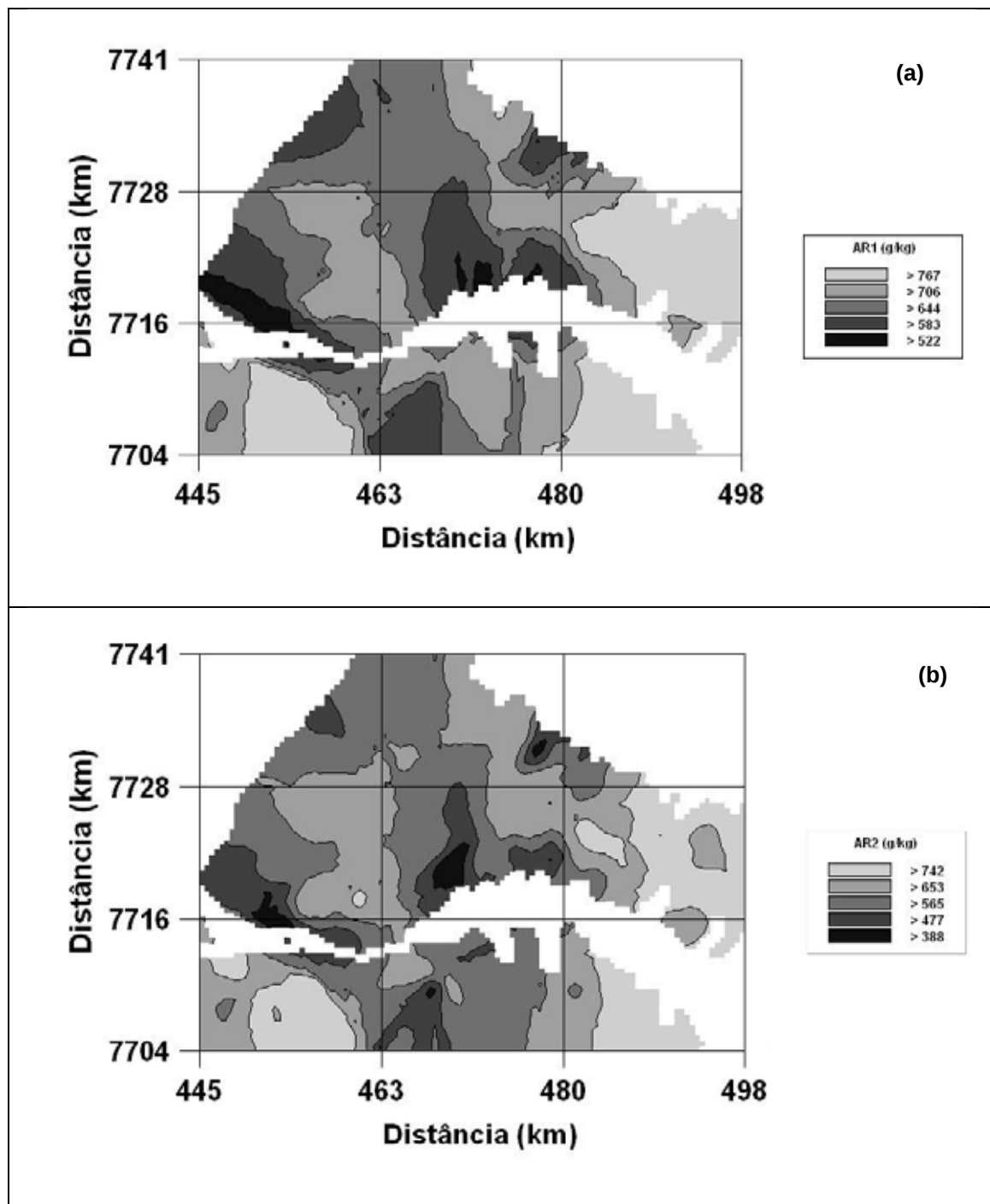
Segundo Faria et al. (2003), a produtividade das culturas varia espacialmente e determinar as causas dessas variações é fundamental para o estabelecimento de zonas específicas de manejo. Sendo assim, com a análise de correlação linear de Pearson e dos mapas de krigagem pode-se explicar grande parte da variação do potencial de produção do solo para a cultura da cana-de-açúcar para a região estudada.

Figura 10- Mapa de krigagem do ambiente de produção para a cana-de-açúcar dos solos da região Noroeste do Estado de São Paulo.



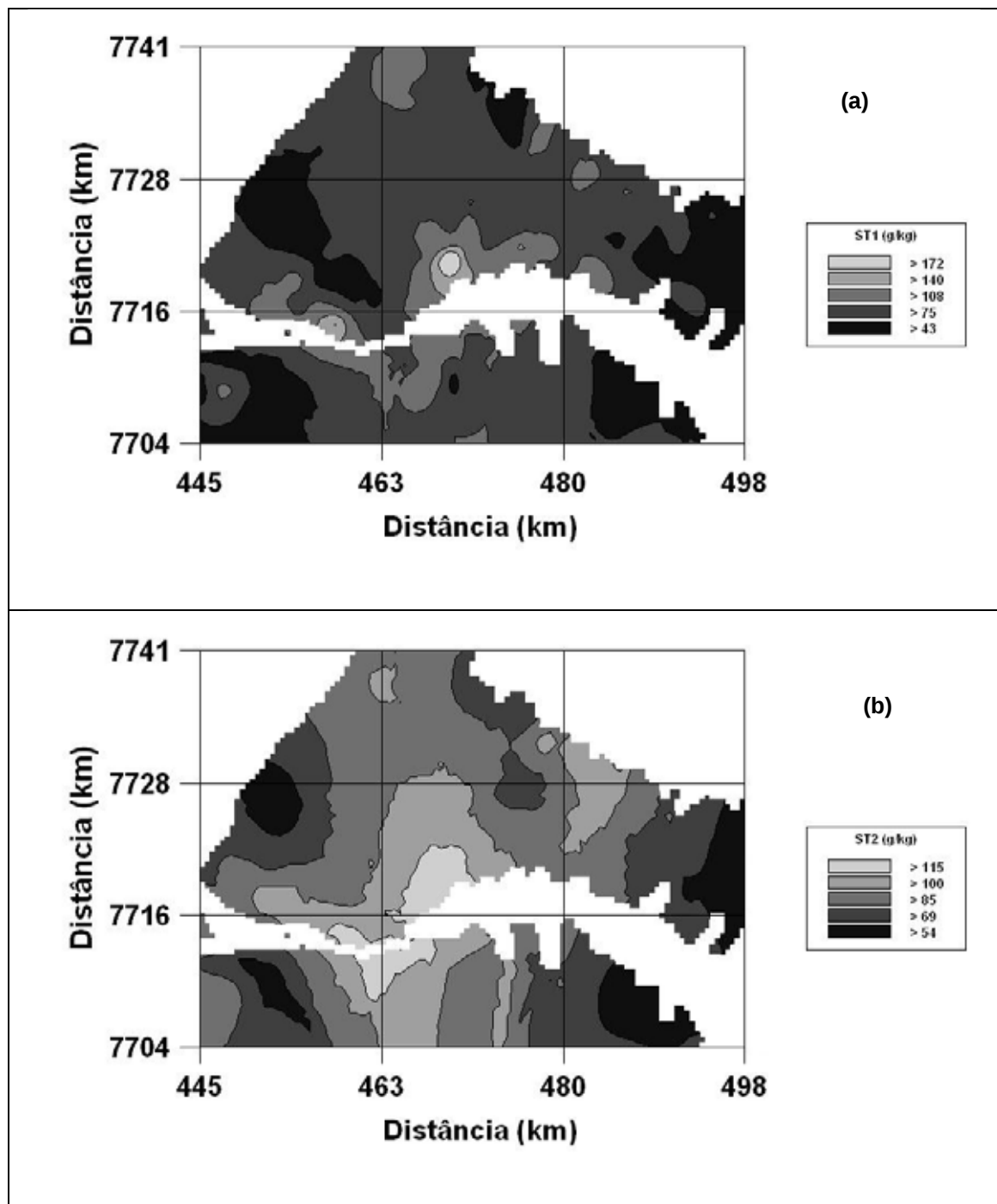
Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Figura 11- Mapas de krigagem dos teores de areia das camadas 0-0,25 (a) e 0,25-0,50 m (b) dos solos da região Noroeste do Estado de São Paulo.



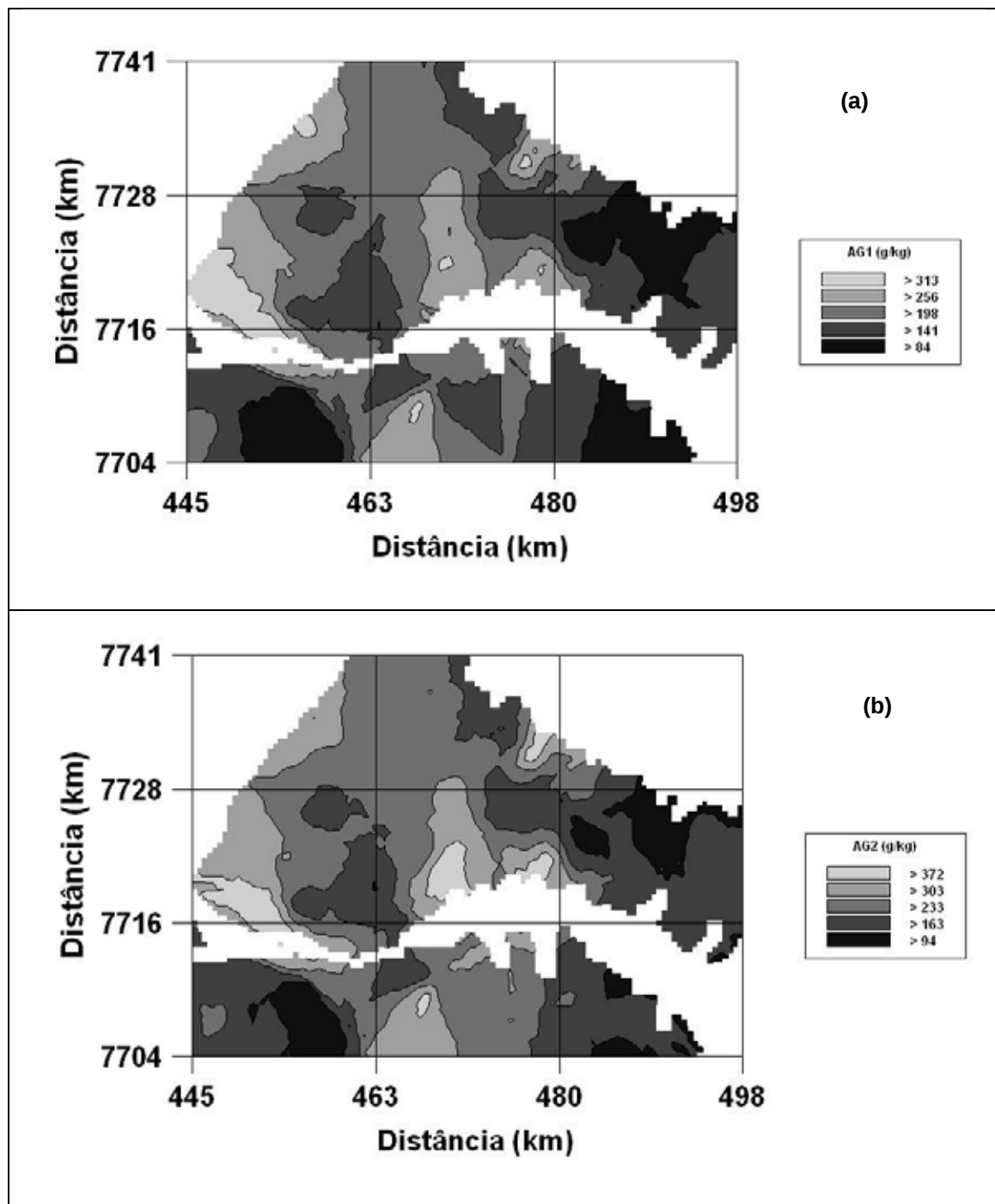
Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Figura 12- Mapas de krigagem dos teores de silte das camadas 0-0,25 (a) e 0,25-0,50 m (b) dos solos da região Noroeste do Estado de São Paulo.



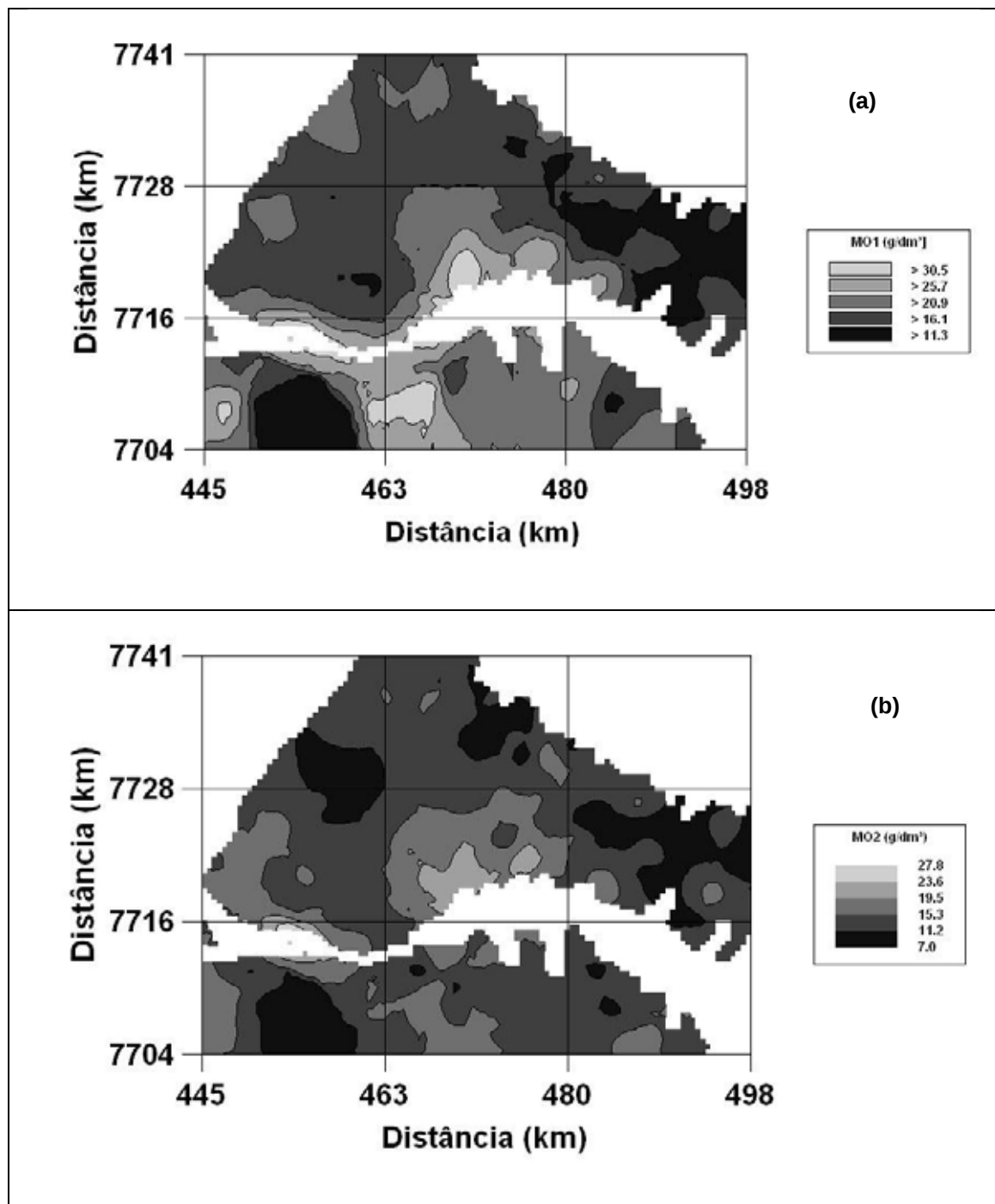
Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Figura 13- Mapas de krigagem dos teores de argila das camadas 0-0,25 (a) e 0,25-0,50 m (b) dos solos da região Noroeste do Estado de São Paulo.



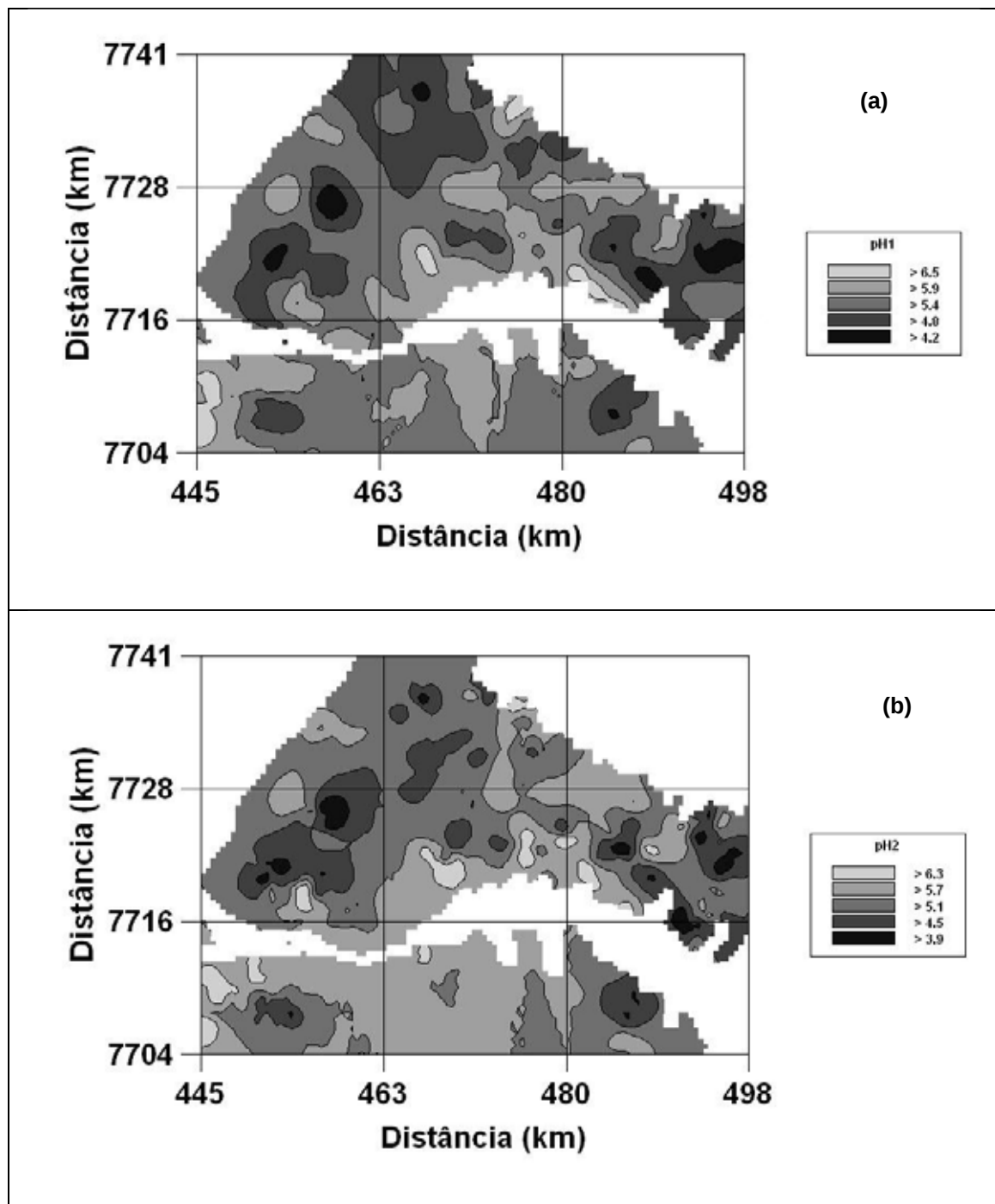
Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Figura 14- Mapas de krigagem dos teores de matéria orgânica das camadas 0-0,25 (a) e 0,25-0,50 m (b) dos solos da região Noroeste do Estado de São Paulo.



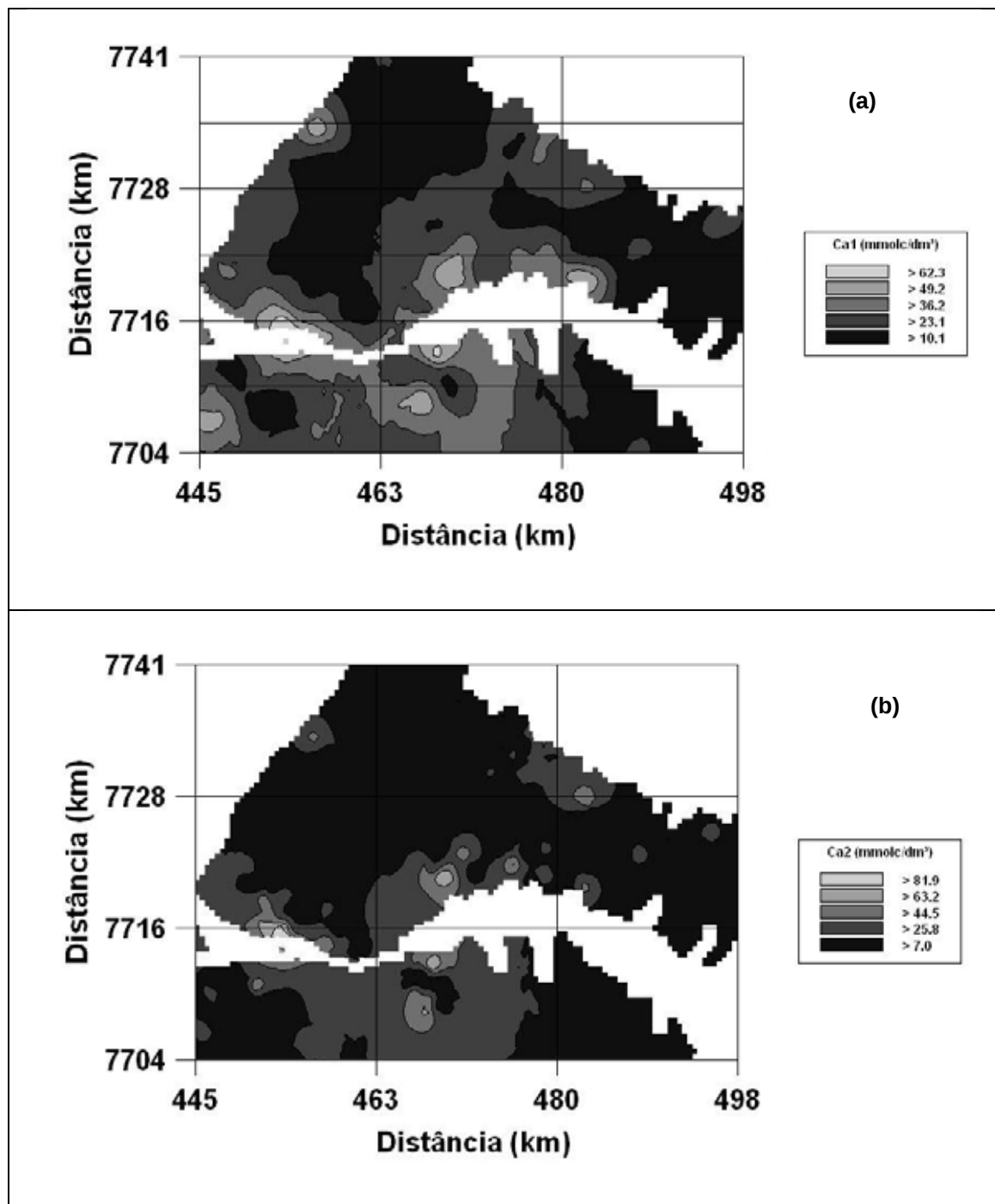
Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Figura 15- Mapas de krigagem dos valores de potencial hidrogeniônico das camadas 0-0,25 (a) e 0,25-0,50 m (b) dos solos da região Noroeste do Estado de São Paulo.



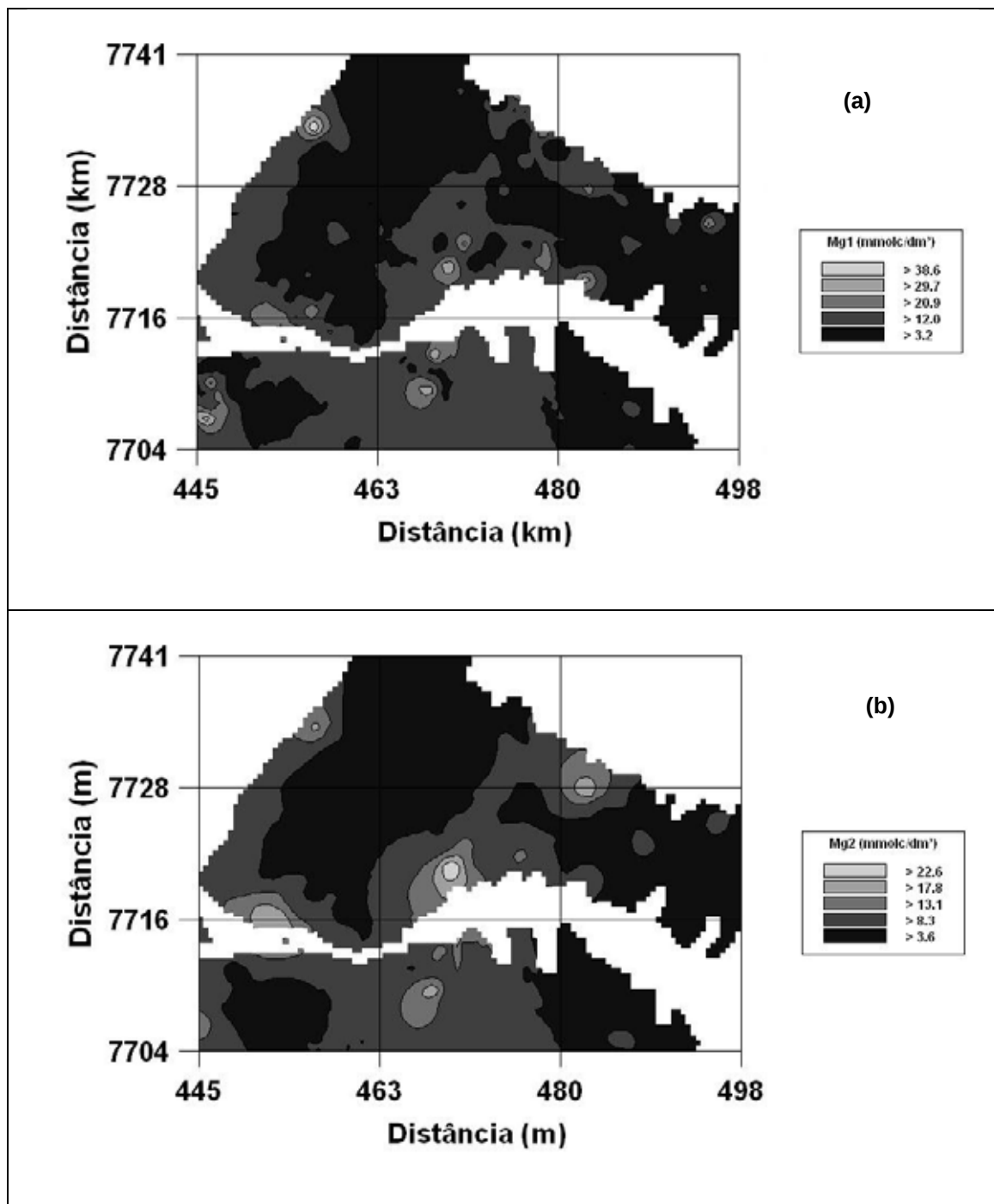
Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Figura 16- Mapas de krigagem dos teores de cálcio das camadas 0-0,25 (a) e 0,25-0,50 m (b) dos solos da região Noroeste do Estado de São Paulo.



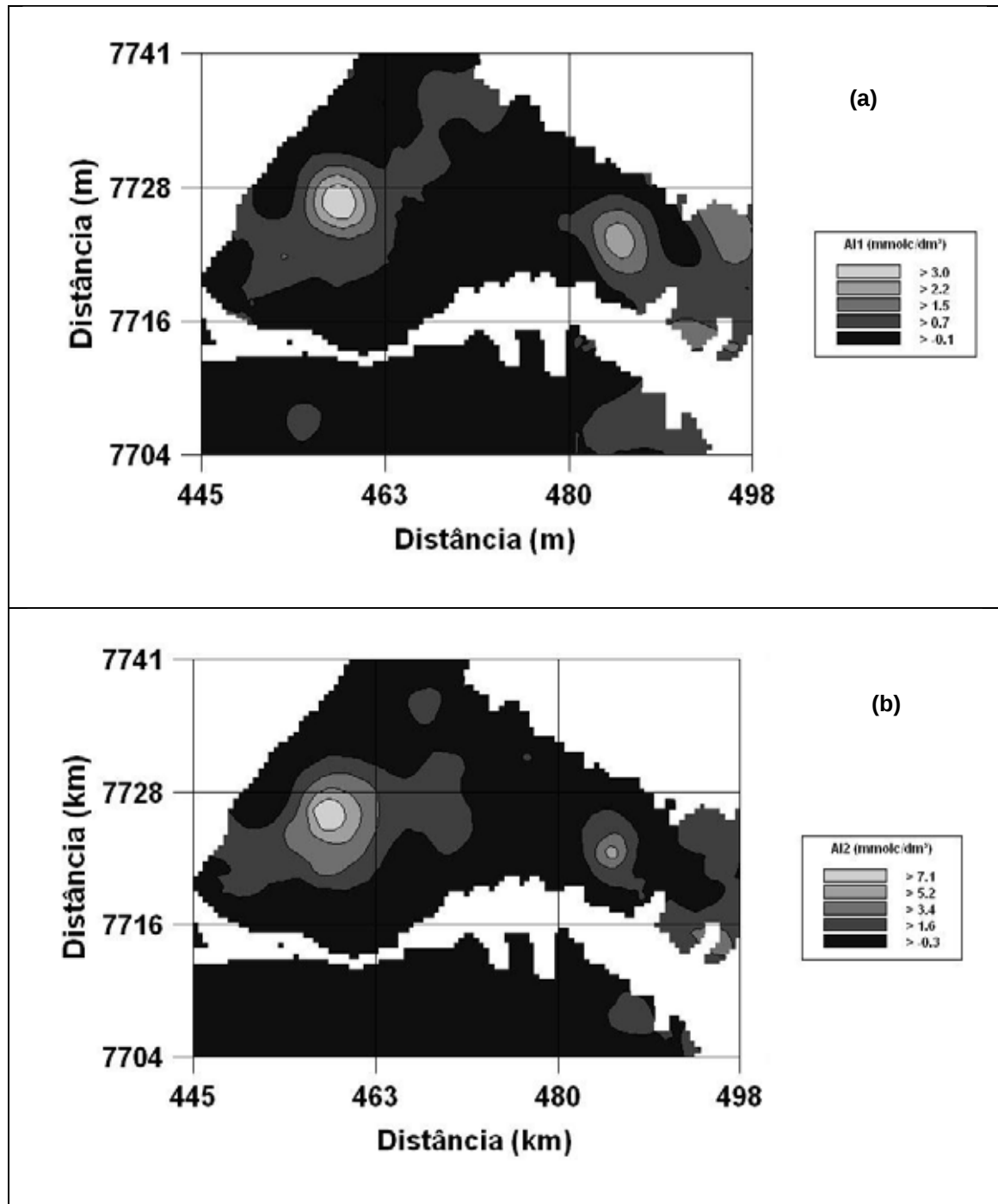
Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Figura 17- Mapas de krigagem dos teores de magnésio das camadas 0-0,25 (a) e 0,25-0,50 m (b) dos solos da região Noroeste do Estado de São Paulo.



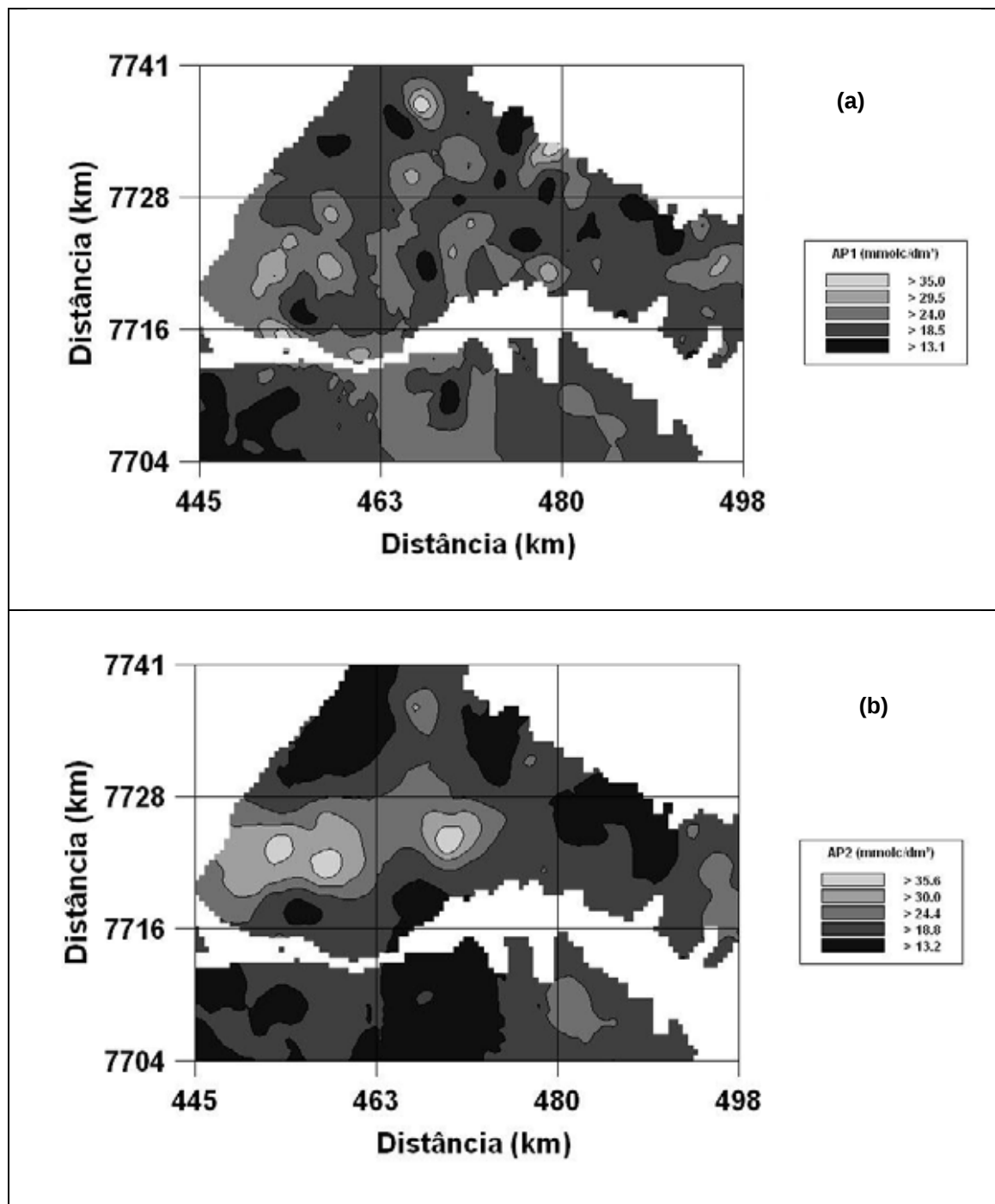
Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Figura 18- Mapas de krigagem dos teores de alumínio das camadas 0-0,25 (a) e 0,25-0,50 m (b) dos solos da região Noroeste do Estado de São Paulo.



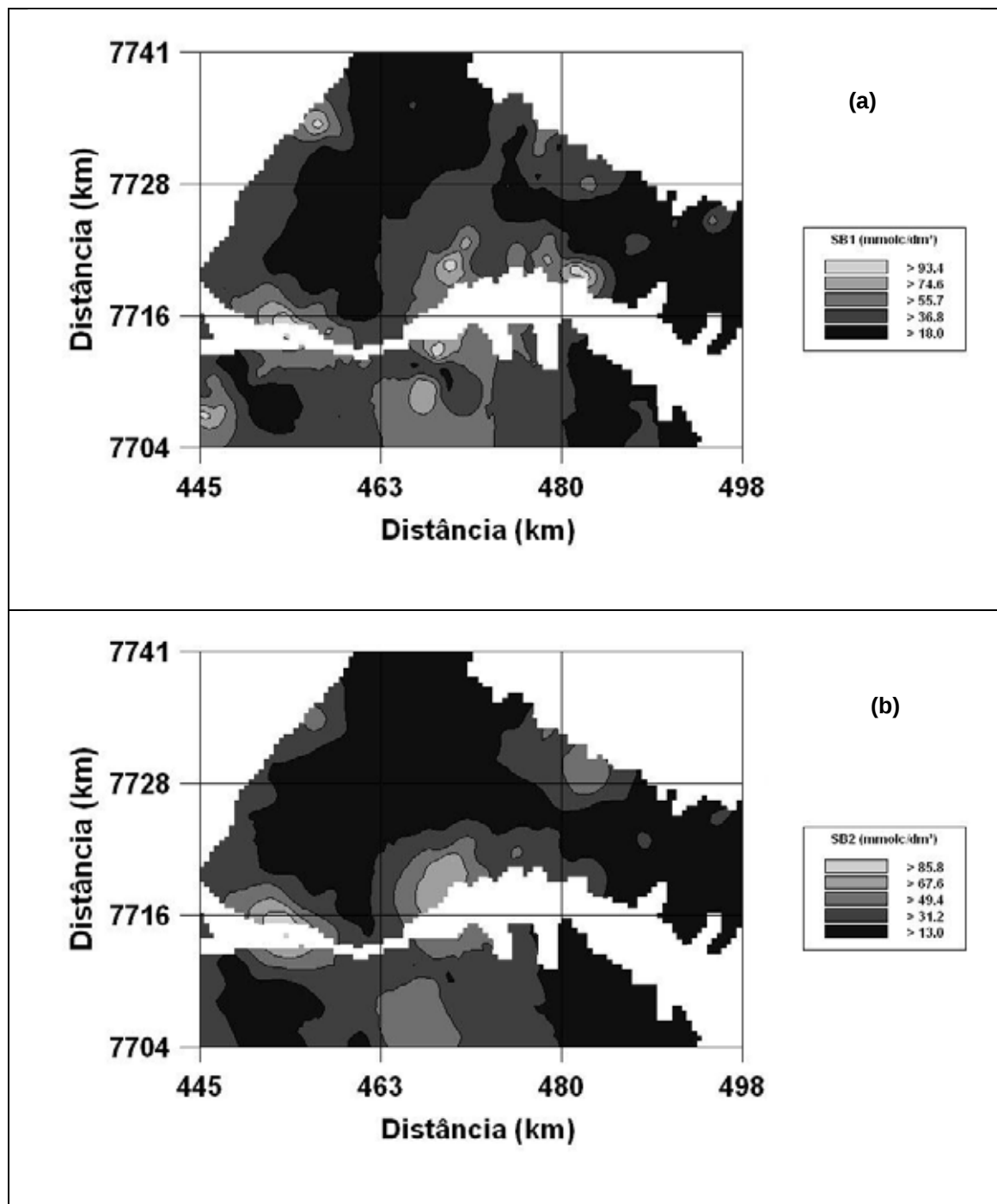
Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Figura 19- Mapas de krigagem dos teores de acidez potencial das camadas 0-0,25 (a) e 0,25-0,50 m (b) dos solos da região Noroeste do Estado de São Paulo.



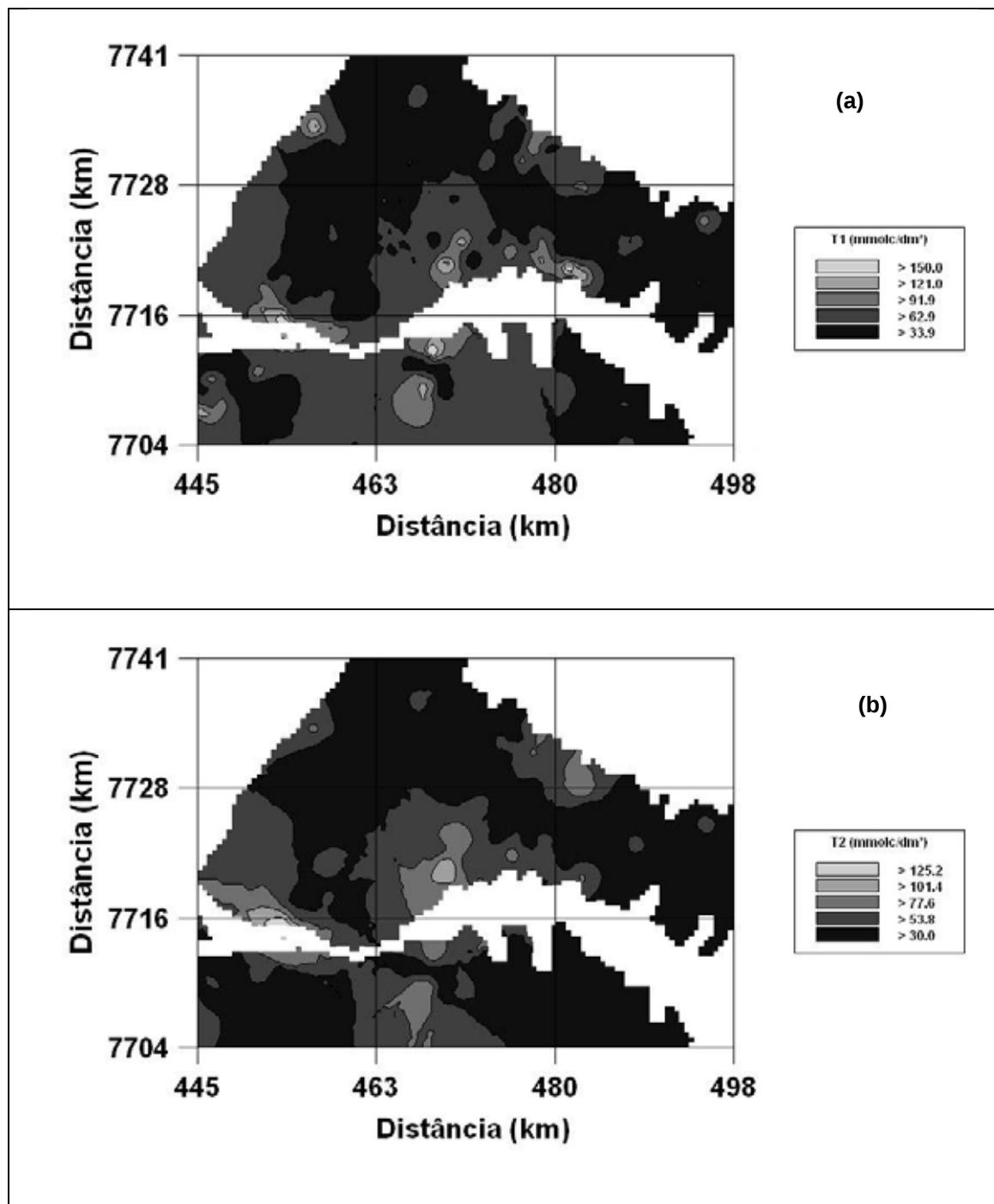
Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Figura 20- Mapas de krigagem dos valores de soma de bases das camadas 0-0,25 (a) e 0,25-0,50 m (b) dos solos da região Noroeste do Estado de São Paulo.



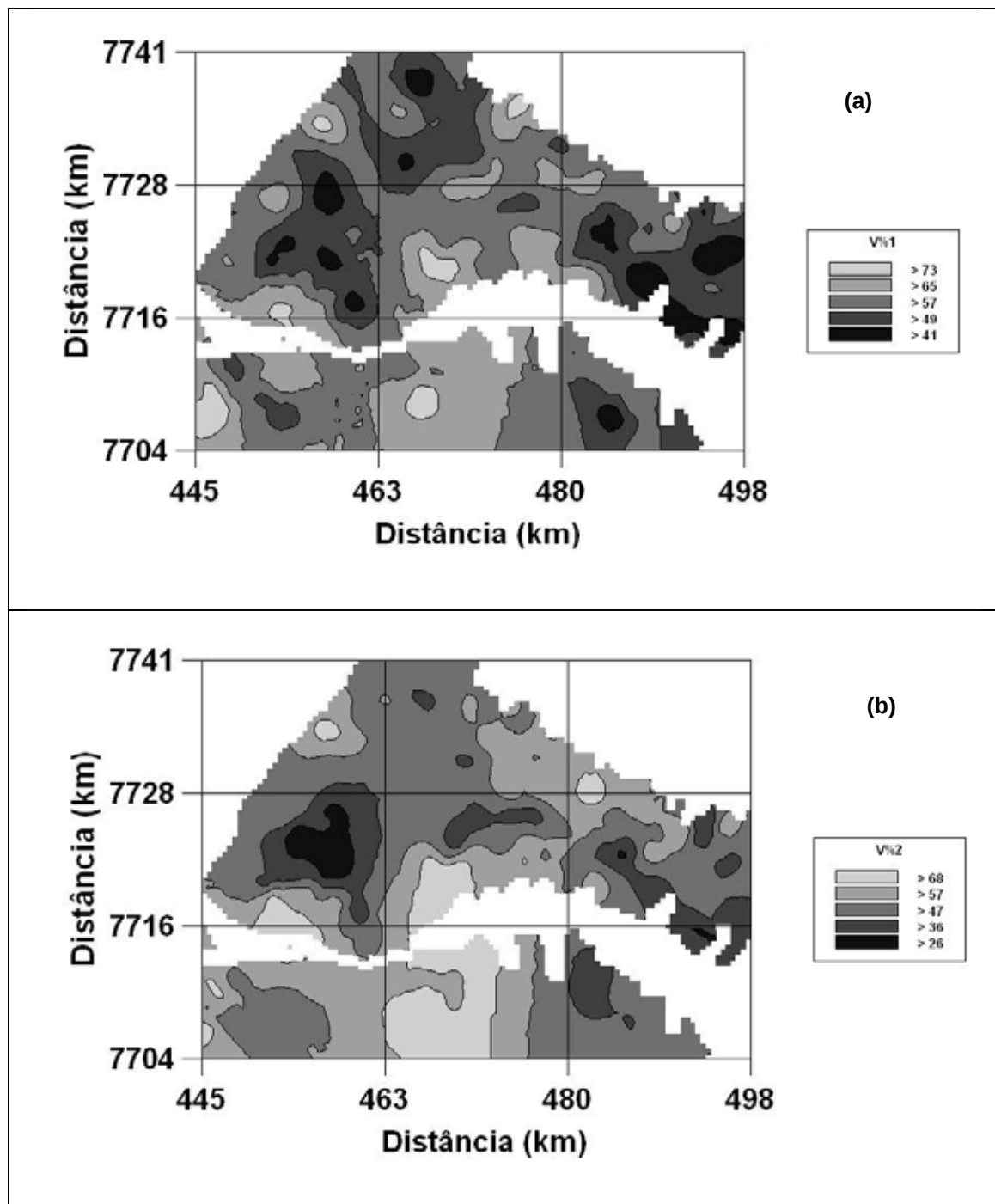
Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Figura 21- Mapas de krigagem dos valores de capacidade de troca de catiônica das camadas 0-0,25 (a) e 0,25-0,50 m (b) dos solos da região Noroeste do Estado de São Paulo.



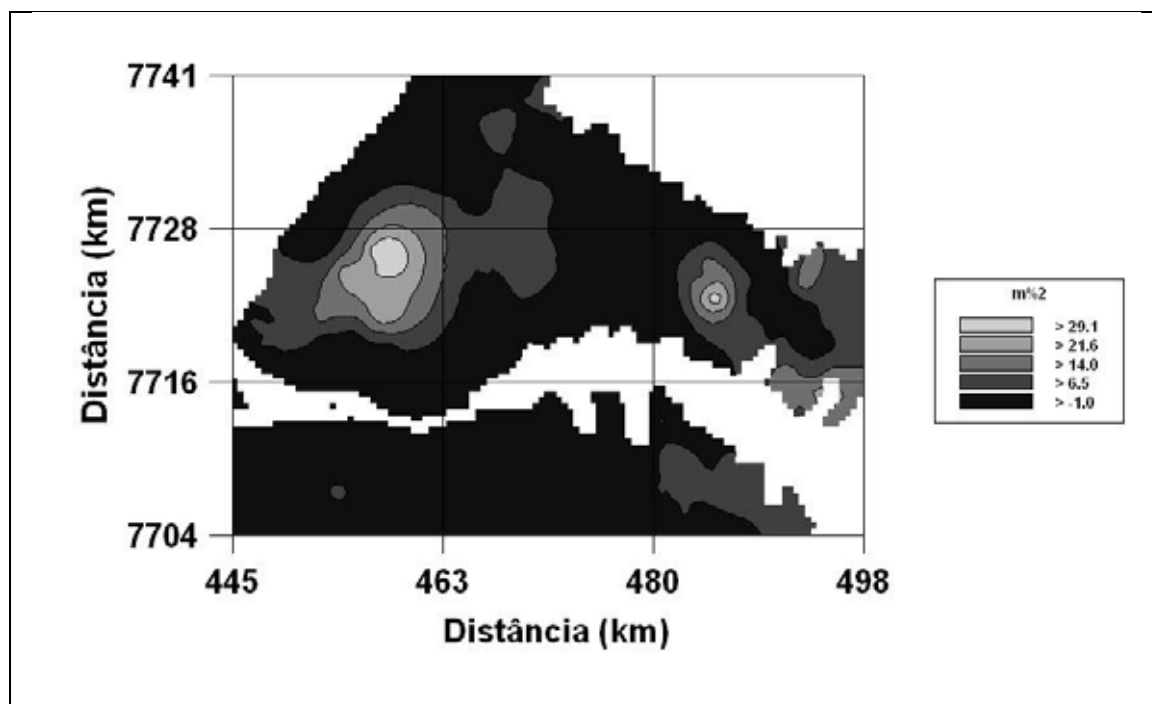
Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Figura 22- Mapas de krigagem dos valores de saturação por bases das camadas 0-0,25 (a) e 0,25-0,50 m (b) dos solos da região Noroeste do Estado de São Paulo.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Figura 23- Mapa de krigagem dos valores de saturação por alumínio da camada 0,25-0,50 m dos solos da região Noroeste do Estado de São Paulo.



Fonte: Dados da pesquisa do autor.

Na comparação entre os mapas de krigagem dos ambientes de produção com os atributos do solo, constata-se que os teores de argila, matéria orgânica, valores de soma de bases, capacidade de troca catiônica e a saturação por bases acompanha a distribuição dos ambientes de produção. Onde os maiores valores destes atributos, para as duas camadas analisadas, foram verificadas onde os solos apresentaram os melhores ambientes, em contrapartida, os menores valores nos piores ambientes. Os atributos teores de areia, alumínio e saturação por alumínio também acompanharam a distribuição dos ambientes de produção, mas de forma inversa, ou seja, quando dos maiores valores destes atributos foram verificados os piores ambientes de produção e vice-versa, assemelhando-se ao comportamento da matriz de correlação linear simples (Tabelas 3 e 4).

Em estudos geoestatísticos, Campos et al. (2009) verificaram que, o conjunto dos mapas de krigagem das variáveis granulométricas e químicas do solo forneceu informações para o estabelecimento dos ambientes de produção, com definição de manejo do solo e de culturas diferenciado. Evidenciando assim, a grande relação entre os atributos e o potencial de produção do solo. Isso demonstra que o conhecimento da distribuição espacial dos atributos do solo e do ambiente de

produção é fundamental para o planejamento agrícola, com a definição de zonas específicas de manejo do solo e da cultura.

Avaliando os mapas de krigagem dos atributos granulométricos (Figuras 11 a 13) constata-se que os solos da região em estudo apresentaram predominância nas classes texturais média e arenosa para as camadas estudadas. A região do município de Pereira Barreto (quadrante entre as distâncias 480 e 498 km E na horizontal e 7716 e 7728 km N na vertical) apresentou altos teores de areia e por consequência menores teores de argila, assim como o quadrante entre as distâncias 480 e 498 km E na horizontal e 7704 e 7716 km N na vertical, com a mesma característica. Os maiores teores de argila podem ser observados principalmente próximos às margens dos rios Tietê e Paraná, principalmente na região do município de Itapura.

A distribuição dos componentes da fração granulométrica (areia, silte e argila), está relacionada com o material de origem da região, onde pode ser verificado a predominância do arenito, principalmente nas cotas mais altas, e afloramento do basalto nas margens dos rios Tietê, Paraná e São José dos Dourados (Figura 2). Campos et al. (2009) estudando os solos da região de Pereira Barreto, relacionaram os altos teores de areia com o arenito e os altos teores de argila com o basalto. Souza, Marques Junior e Pereira (2010) estudando duas áreas de Latossolos espaçadas em 18 km uma da outra, analisadas em uma escala menor (baixo nível de detalhe), constataram que a dependência da variabilidade dos atributos físicos está ligada ao material de origem e às ações de manejo ao longo do tempo.

Os atributos químicos apresentaram distribuição semelhante à dos atributos físicos, onde os maiores teores de matéria orgânica, nutrientes (Ca e Mg), valores de soma de bases, capacidade de troca catiônica e saturação por bases (Figuras 14, 16, 17, 20, 21 e 22) estão próximos às margens dos rios, principalmente na região de Itapura, enquanto os menores valores estão na região do município de Pereira Barreto. Campos et al. (2009) verificaram resultados semelhantes ao presente trabalho, onde a distribuição dos atributos químicos foi semelhante aos texturais, sendo que os valores de pH, MO, SB e CTC acompanharam o padrão de distribuição da fração argila do solo.

Os mapas de krigagem dos teores de alumínio (Figura 18) resultaram em duas grandes áreas na região com valores mais elevados deste elemento, o que também

pode ser verificado pelo mapa de krigagem da saturação por alumínio (Figura 23). Quando em comparação visual destes mapas com o dos ambientes de produção (Figura 10), verifica-se que estas regiões apresentaram solos com baixos potenciais de produção, confirmando que este elemento pode restringir o potencial de produção do solo.

Souza et al. (2008) afirmaram que a variabilidade espacial de atributos químicos deve ser levada em consideração no planejamento agrícola, pois estas informações poderão ser usadas para otimizar as aplicações de fertilizantes, aumentando a produtividade e diminuindo custos e problemas ambientais. Em estudo realizado por Campos et al. (2009), as informações dos atributos químicos (SB, AP, CTC, pH e V%) propiciaram a divisão da área em três ambientes diferenciados para a adubação em plantio da cana-de-açúcar, enquanto que os mapas de MO e AR forneceram informações significativas para a aplicação complementar de torta de filtro. Os mapas de krigagem dos atributos texturais e químicos permitiram a implantação das variedades de cana-de-açúcar em função da exigência hídrica e da fertilidade do solo.

4.3.4 COKRIGAGEM

Foram testadas todas as possibilidades de causa e efeito dos atributos pela cokrigagem, mas provavelmente em função da alta variabilidade de solos e manejo antrópico nas camadas de solo e em função do plantio e tratos culturais de canaviais de diferentes idades, não foram obtidos ajustes semivariográficos dos pares e consequentemente sem mapeamento por cokrigagem. Sendo assim, em trabalhos futuros, deve ser estudada a subdivisão da área em talhões com mesmas variedades ou plantios de mesma idade ou até mesmo em subdivisões de ambientes melhores e piores.

Braga (2011), estudando a variabilidade dos atributos de um Argissolo e dos componentes de produção da cana-de-açúcar, verificou que apenas o teor de matéria orgânica apresentou cokrigagem com a produtividade da cultura. Este mesmo autor observou que, a variabilidade espacial do teor de matéria orgânica explicou 65,3% da variabilidade espacial da produtividade de cana-de-açúcar, de maneira que nas regiões onde ocorreram os mais elevados valores de matéria orgânica foram justamente as regiões de produtividade mais elevadas, ao passo que, nas regiões que os valores de matéria orgânica foram baixos, a produtividade foi menor.

5 CONCLUSÃO

A região de estudo apresenta uma grande variação de solos, sendo isso verificado pela grande variação nos atributos físico-químicos dos solos nos ambientes de produção da cultura da cana-de-açúcar. Os quais acompanham a distribuição do material de origem da região.

Os atributos teores de silte, argila, matéria orgânica, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, valores de pH, soma de bases, capacidade de troca de catiônica e saturação por bases apresentam correlações lineares e espaciais positivas com o potencial de produção do solo. Enquanto que os teores de areia, alumínio e saturação por alumínio apresentam correlações negativas com o potencial de produção do solo.

A partir de uma área de coleta de 18.693 ha foi possível extrapolar os ambientes de produção e os atributos do solo para uma área de 140.317 ha, com a utilização da geoestatística, através da krigagem dos dados.

Nos mapas de krigagem é possível verificar na região áreas com menor e maior potencial de produção do solo para a cultura da cana-de-açúcar, ou seja, estimar para locais não amostrados onde estão os melhores e os piores ambientes de produção.

A variabilidade espacial dos atributos físicos e químicos do solo deve ser levada em consideração no planejamento agrícola, visando ao estudo de zonas específicas de manejo, os quais devem receber tratamentos diferenciados com o objetivo de aumentar a produtividade e diminuir os custos de produção e os problemas ambientais.

REFERÊNCIAS

- ABREU, S. L.; REICHERT, J. M.; SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; BLUME, E. Variabilidade espacial de propriedades físico-hídricas do solo, da produtividade e da qualidade de grãos de trigo em Argissolo Franco Arenosos sob plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, p. 275-282, 2003.
- AMADO, T. J. C.; PES, L. Z.; LEMAINSKI, C. L.; SCHENATO, R. B. Atributos químicos e físicos de LATOSSOLOS e sua relação com os rendimentos de milho e feijão irrigados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 4, p. 831-843, 2009.
- BECKETT, P. H. T.; WEBSTER, R. Soil variability: a review. **Soil Fertility**, Madison, v. 31, p. 1-15, 1971.
- 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**, Viçosa, v. 31, p. 837-344, 2007.
- BERTOLANI, F. C. **Variabilidade de atributos do solo em unidades de mapeamento de um levantamento pedológico semidetalhado**. 2003. 128 f. (Tese de Doutorado)- Faculdade de Engenharia Agrícola- FEAGRI, Universidade de Campinas - UNICAMP, Campinas, 2003.
- BERTOLANI, F. C.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial da taxa de infiltração de água e da espessura do horizonte A, em um Argissolo Vermelho-Amarelo, sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 987-995, 2001.
- BRAGA, J. A. **Inter-relações da produtividade de cana-de-açúcar com atributos físico-químicos de um Argissolo Vermelho Eutrófico do Noroeste Paulista**. 2011. 85 f. (Dissertação de Mestrado)- Faculdade de Engenharia - FEIS, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2011.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. Serviço Nacional de Pesquisas Agronômicas. Comissão de Solos. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado de São Paulo (contribuição à carta de solos do Brasil)**. Rio de Janeiro: MA/SNPA, 1960. 634 p. (Boletim do Serviço Nacional de Pesquisas Agronômicas, 12).
- CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa Soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, p. 1501-1511, 1994.

CAMPOS, M. C. C.; MARQUES JUNIOR, J; PEREIRA, G. T. Influência das superfícies geomorfológicas na distribuição espacial dos atributos do solo em área sob cultivo de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 40, n. 2, p. 133-141, 2010.

CAMPOS, M. C. C.; MARQUES JUNIOR, J; PEREIRA, G. T.; SOUZA, Z. M.; BARBIERI, D. M. Aplicação de adubo e corretivo após o corte da cana planta utilizando técnicas geoestatísticas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 4, p. 974-980, 2008.

CAMPOS, M. C. C.; MARQUES JUNIOR, J; PEREIRA, G. T.; SOUZA, Z. M.; MONTANARI, R. Planejamento agrícola e implantação de sistema de cultivo de cana-de-açúcar com auxílio de técnicas geoestatísticas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 3, p. 297-304, 2009.

CAMPOS, M. C. C.; OLIVEIRA, I. A.; AQUINO, R. E.; BERGAMIN, A. C.; SILVA, D. A. P. Distribuição espacial de atributos físicos do solo em área cultivada com cana-de-açúcar. **Revista Agro@mbiental**, Boa Vista, v. 7, n. 2, p. 119-128, 2013.

CANELLAS, L. P.; SANTOS, G. A.; AMARAL, N. M. B. Reações da matéria orgânica. In: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Gênese, 1999. p. 69-90.

CARVALHO, J. R. P.; SILVEIRA, P. M.; VIEIRA, S. R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, p. 1151-1159, 2002.

CARVALHO, M. P.; DALCHIAVON, F. C; GIOIA, M. T.; BRAGA, J. A. Inter-relações da resistência mecânica, umidade e do teor de matéria orgânica de um Argissolo Vermelho paulista sobre a produtividade da cana-de-açúcar. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 29., 2010, Guarapari. **Anais...** Guarapari: Fertbio, 2010. p. 1-5.

CARVALHO, M. P.; TAKEDA, E. Y; FREDDI, O. S. Variabilidade espacial de atributos de um solo sob videira em Vitória Brasil (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 695-703, 2003.

CASTRO, A. F.; BARRETO, W. O.; ANASTÁCIO, M. L. A. Correlação entre pH e grau de Saturação de Bases de alguns Solos Brasileiros. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v. 7, p. 9-17, 1972.

CATANI, R. A.; GALLO, J. R. Avaliação da exigência em calcário dos solos do Estado de São Paulo, mediante correlação entre o pH e a porcentagem da saturação de bases. **Revista de Agricultura**, Piracicaba, v. 30, p. 49-60, 1955.

CERRI, D. G. P.; MAGALHÃES, P. S. G. Correlation of physical and chemical attributes of soil with sugarcane yield. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 4, p. 613-620, 2012.

CESAR, M. A. A.; DELGADO, A. A.; CAMARGO, A. P. de; BISSOLI, B. M. A.; SILVA, F. C. da. Capacidade de fosfatos naturais e artificiais em elevar o teor de fósforo no caldo de cana-de-açúcar (cana-planta), visando o processo industrial. **STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 6, p. 32-38, 1987.

CHAVES, L. H. G.; FARIAS, C. H. A. Variabilidade espacial de cobre e manganês em Argissolo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 6, p. 1013-1021, 2004.

CORÁ, J. E.; BERALDO, J. M. G. Variabilidade espacial de atributos do solo antes e após calagem e fosfatagem em doses variadas na cultura de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 2, p. 374-387, 2006.

DALCHIAVON, F. C. **Aspectos da produtividade do arroz de terras altas irrigado com atributos químicos do solo sob plantio direto**. 2010. 113 f. (Dissertação de Mestrado) - Faculdade de Engenharia - FEIS, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2010.

DALCHIAVON, F. C. **Correlação de Pearson e geoestatísticas entre a produtividade de cana-de-açúcar, estabelecida em dois métodos de colheita, e atributos físico-químicos do solo**. 2012. 107 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia - FEIS, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2012.

DALCHIAVON, F. C.; CARVALHO, M. P.; ANDRADE, F. G.; MONTANARI, R.; ANDREOTTI, M. Produtividade da cana-de-açúcar e definição de zonas específicas de manejo do solo. **Semina: Ciência Agrárias**, Londrina, v. 34, n. 5, p. 2077-2088, 2013.

DALCHIAVON, F. C.; CARVALHO, M. P.; ANDREOTTI, M.; MONTANARI, R. Variabilidade espacial de atributos da fertilidade de um Latossolo Vermelho Distroférico sob Sistema Plantio Direto. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 43, n. 3, p. 453-461, 2012.

DALCHIAVON, F. C.; CARVALHO, M. P.; FREDDI, O. S.; ANDREOTTI, M.; MONTANARI, R. Variabilidade espacial da produtividade do feijoeiro correlacionada com atributos químicos de um Latossolo Vermelho Distroférico sob sistema de semeadura direta. **Bragantia**, Campinas, v. 70, n. 4, p. 908-916, 2011.

DIAS, F. L. F. **Relação entre a produtividade, clima, solos e variedades de cana-de-açúcar, na Região Noroeste do Estado de São Paulo**. 1997. 64 f. (Dissertação

de Mestrado)- Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ, Universidade de São Paulo - USP, Piracicaba, 1997.

DIAS, F. L. F.; MAZZA, J. A.; MATSUOKA, S.; PERECIN, D.; MAULE, R. F. Produtividade da cana-de-açúcar em relação a clima e solos da região noroeste do Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 627-634, 1999.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Brasília: Embrapa Serviço de Produção de Informações, 2013. 353 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Análise espacial de dados geográficos**. Planaltina: Embrapa-Cerrado, 2004. 209 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA/ Centro Nacional de Pesquisa de Solo, 1997. 212 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Procedimentos normativos para levantamentos pedológicos**. Brasília: EMBRAPA-SPI, 1995. 101 p.

FARIA, 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, v. 25, n. 2, p. 235-241, 2003.

FERREIRA, M. M. Caracterização física do solo. In: LIER, Q. J. van. **Física do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. p. 1-28.

FERREIRA, W. A.; BOTELHO, S. M. **Capacidade de troca de cátions das principais classes de solos da Amazônia, determinada a diferentes valores de pH**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 1999. 22 p. (Embrapa Amazônia Oriental. Boletim de Pesquisa, 2).

FLOWERS, M.; WEISZ, R.; WHITE, J. G. Yield-based management zones and grid sampling strategies describing soil test and nutrient variability. **Agronomy Journal**, Madison, v. 97, n. 3, p. 968-982, 2005.

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

GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R.; XAVIER, M. A. Spatial variability of some biometric attributes of sugarcane plants (variety IACSP93-3046) and its relation to physical and chemical soil attributes. **Bragantia**, Campinas, v. 69, p. 107-119, 2010. Suplemento.

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

GOOVAERTS, P. Geoestatistical modeling of uncertainty in soil science. **Geoderma**, Amsterdam, v. 103, n. 1-2, p. 3-36, 2001.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT. 1981. **Mapa geológico do Estado de São Paulo**. [S.l.: s.n.], 1981. v. 1-2.

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

JOAQUIM, A. C.; BELLINASSO, I. F.; DONZELLI, J. L.; QUADROS, A. C.; BARATA, M. Q. F. Potencial e manejo de solos cultivado com cana-de-açúcar. In: SEMINÁRIOS COPERSUCAR DE TECNOLOGIA AGRONÔMICA, 6., 1994, Piracicaba. **Título...** Piracicaba: Copersucar, 1994. p.1-9.

JOAQUIM, A. C.; DONZELLI, J. L.; QUADROS, A. C.; SARTO, L. F. Potencial de produção de cana-de-açúcar. In: SEMINÁRIOS COPERSUCAR DE TECNOLOGIA AGRONÔMICA, 7., 1997, Piracicaba. **Título...** Piracicaba: Copersucar, 1997. p. 68-76.

JOHNSON, R. M.; RICHARD, E. P. Sugarcane yield, sugarcane quality, and soil variability in Louisiana. **Agronomy Journal**, Madison, v. 97, n. 3, p. 760-771, 2005.

KITAMURA, A. E.; CARVALHO, M. P.; LIMA, C. G. R. Relação entre a variabilidade espacial das frações granulométricas do solo e a produtividade do feijoeiro sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 2, p. 361-369, 2007.

LEMO FILHO, L. C. A.; OLIVEIRA, E. L.; FARIA, M. A.; ANDRADE, L. A. B. Variação espacial da densidade do solo e da matéria orgânica em área cultivada com cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.). **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 39, n. 2, p. 193-202, 2008.

LEPSCH, I. F. Influência dos fatores edáficos na produção. In: CASTRO, P. R. C.; FERREIRA, S. O.; YAMADA, T. (Coord.) **Ecofisiologia da produção**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1987. p. 83-98.

LIMA, A. M. N.; SILVA, I. R.; NEVES, J. C. L.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; MENDONÇA, E. S.; DEMOLINARI, M. S. M.; LEITE, F. P. Frações da matéria

orgânica do solo após três décadas de cultivo de eucalipto no vale do Rio Doce-MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 1053-1063, 2008.

MARQUES JÚNIOR, J. **Distribuição e atributos dos solos em relação à forma e evolução de uma vertente em Monte Alto**. 1995. 226 f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ, Universidade de São Paulo - USP, Piracicaba. 1995.

MARQUES JUNIOR, J.; SOUZA, Z. M.; PEREIRA, G. T.; BARBIERI, D. M. Variabilidade espacial de matéria orgânica, P, K e CTC de um latossolo cultivado com cana-de-açúcar por longos períodos. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, Campina Grande, v. 8, n. 1, p. 143-152, 2008.

MENDES; A. M. S.; FONTES, R. L. F.; OLIVEIRA, M. Variabilidade espacial da textura de dois solos do Deserto Salino, no Estado do Rio Grande do Norte. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 39, n. 1, p. 19-27, 2008.

MEURER, E. J. Fatores que influenciam o crescimento e o desenvolvimento das plantas. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F. de; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 65-90.

MOTOMIYA, A. V. A.; CORÁ, J. E.; PEREIRA, G. T. Uso da krigagem indicatriz na avaliação de indicadores de fertilidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 3, p. 485-496, 2006.

OVALLES, F.; REY, J. Variabilidad interna de unidades de fertilidad en suelos de la depresión del Lago de Valencia. **Agronomia Tropical**, Maracay, v. 44, n. 1, p. 41-65, 1994.

PAZ-GONZALEZ, A.; TABOADA CASTRO, M. T.; VIEIRA, A. R. Geoestatistical analysis of heavy metals in a one-hectare plot under natural vegetation in a serpentine área. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 81, p. 469-479, 2001.

PIMENTEL-GOMES, F. P.; GARCIA, C. H. **Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais**. Piracicaba: FEALQ, 2002. 309 p.

POCAY, V. G. **Relações entre pedoforma e variabilidade espacial de atributos de Latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar**. 2000. 177 f. 2000. .. f. (Dissertação de Mestrado)– Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinária - FCAV, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Jaboticabal, 2000.

RACHID JUNIOR, A.; URIBE-OPAZO, M. A.; SOUZA, E. G.; JOHANN, J. A. Variabilidade especial e temporal de atributos químicos do solo e da produtividade

da soja num sistema de agricultura de precisão. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 14, n. 3, p. 156-169, 2006.

RAIJ, B. van. Propriedades eletroquímicas de solos. In: SÍMPÓSIO AVANÇADO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO, 1., 1986, Piracicaba. **Anais...** Campinas: Fundação Cargill, 1986. p.9-41.

RAIJ, B. van.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2001. 285 p.

REICHARDT, K. **A água nos sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1987. 188 p.

REICHERT, J. M.; DARIVA, T. A.; REINERT, D. J.; SILVA, V. R. Variabilidade espacial de Planossolo e produtividade de soja em várzea sistematizada: análise geoestatística e análise de regressão. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 4, p. 981-988, 2008.

ROBERTSON, G. P. **GS⁺**: geostatistics for environmental sciences. 7. ed. Michigan: Gamma Design Software, 2004. 159 p.

SALDAÑA, A.; STEIN, A.; ZINK, J. A. Spatial variability of soil properties at different scales within three terraces of the Henares River (Spain). **Catena**, Amsterdam, v. 33, n. 3-4, p. 139-153, 1998.

SALVIANO, A. A. C.; VIEIRA, S.R.; SPAROVEK, G. Variabilidade espacial de atributos de solo e de *Crotalaria juncea* L. em áreas severamente erodidas. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 22, p. 115-122, 1998.

SCHLOEDER, C. A.; ZIMMERMAN, N. E.; JACOBS, M. J. Comparison of methods for interpolating soil properties using limited data. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 65, n. 2, p. 470-479, 2001.

SCHLOTZHAVER, S. D.; LITTELL, R. C. **SAS**: system for elementary statistical analysis. 2. ed. Cary: SAS, 1997. 441 p.

SILVA, E. F. da. **Mapas de solos produzidos em escalas e épocas distintas**. 2000. 177 f. Tese (Doutorado)– Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ, Universidade de São Paulo – USP, Piracicaba, 2000.

SILVA, L. R.; CAMARGO, F. A. O.; CERETA, C. A. Composição da fase sólida orgânica do solo. In: MEUBER, E. J. (Ed). **Fundamentos de química do solo**. 2. ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004. 290 p.

SILVA, L. R.; MENDONÇA, E. S. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V. V. H.; BARROS, N. F. de; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira De Ciência do Solo, 2007. p. 205-274.

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

SIQUEIRA, G. M.; VIEIRA, S. R.; CEDDIA, M. B. Variabilidade de atributos físicos do solo determinados por métodos diversos. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 1, p. 203-211, 2008.

SIQUEIRA, G. M.; VIEIRA, S. R.; DECHEN, S. C. F. Variabilidade espacial da densidade e da porosidade de um Latossolo Vermelho Eutroférico sob semeadura direta por vinte anos. **Bragantia**, Campinas, v. 68, p. 751-759, 2009.

SOUSA, D. M. G.; MIRANDA, L. N.; OLIVEIRA, S. A. Acidez do solo e sua correção. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F. de; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 205-274.

SOUZA, L. S.; COGO, N. P.; VIEIRA, S. R. Variabilidade de propriedades físicas e químicas do solo em um pomar cítrico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, p. 367-372, 1997.

SOUZA, Z. M.; CERRI, D. G. P.; COLET, M. J.; RODRIGUES, L. H. A.; MAGALHÃES, P. S. G.; MANDONI, R. J. A. Análise dos atributos do solo e da produtividade da cultura de cana-de-açúcar com o uso da geoestatística e árvore de decisão. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 40, n. 4, p. 840-847, 2010.

SOUZA, Z. M.; CERRI, D. G. P.; MAGALHÃES, P. G.; CAMPOS, M. C. C. Correlação dos atributos físicos e químicos do solo com a produtividade de cana-de-açúcar. **Revista de Biologia e Ciência da Terra**, Campina Grande, v. 8, n. 2, p. 183-190, 2008.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 937-944, 2004.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Geoestatística e atributos do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 40, n. 1, p. 48-56, 2010.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JUNIOR, J; PEREIRA, G. T.; BARBIERI, D. M. Variabilidade espacial da textura de um Latossolo Vermelho eutroférico sob cultivo de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 2, p. 309-319, 2004.

SOUZA, Z. M.; SILVA, M. L. S.; GUIMARÃES, G. L.; CAMPOS, D. T. S.; CARVALHO, M. P.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo Vermelho Distrófico sob semeadura direta, em Selvíria, MS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 3, p. 699-707, 2001.

STRECK, E. V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C.; SCHNEIDER, P. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002. 126 p.

TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; WADE, M. K.; UEHARA, G. Applications of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 38, n. 1, p. 45-94, 1985.

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

VANINI, S. M. **Modelos de regressão: estatística aplicada**. São Paulo: Legmar Informática & Editora, 1998. 177 p.

VAUCLIN, M.; VIEIRA, S. R.; VAUCHAUD, G.; NIELSEN, D. R. The use of cokriging with limited field observations. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 47, n. 1, p. 175-184, 1983.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa, MG: UFG, 2004. 449 p.

VIEIRA, S. R. **Análise da variabilidade espacial e temporal de umidade do solo em um Latossolo Vermelho eutroférico em Campinas, São Paulo**. Campinas: FAPESP, 2004. 57 p. Relatório FAPESP 02/02863-3.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F., ALVAREZ, V.H., SCHAEFER, G.R. (Ed.). **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 1, p. 1-54.

VIEIRA, S. R. Variabilidade especial de argila, silte e atributos químicos em uma parcela experimental de um Latossolo Roxo de Campinas (SP). **Bragantia**, Campinas, v. 56, n. 1, p. 181-190, 1997.

VIEIRA, S. R.; DECHEN, S. C. F.; SIQUEIRA, G. M.; DUFRANC, G. Variabilidade especial de atributos físicos e químicos relacionados com o estado de agregação de

dois Latossolo cultivados no sistema de semeadura direta. **Bragantia**, Campinas, v. 70, n. 1, p. 185-195, 2011.

VIEIRA, S. R.; MILLETE, J.; TOPP, G. C.; REYNOLDS, W. D. Handbook for geostatistical analysis of variability in soil and climate data. In: ALVARES V. V. H; SCHAEFER, C. E. G. R.; BARROS, N. F.; MELO, J. W. V.; COSTA, L. M. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. v. 2, p. 1-45.

VIEIRA, S. R.; MOLIN, J. P. Spatial variability of soil fertility for precision agriculture. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 3., 2001, Montpellier. **Proceedings ...** Montpellier: Agro Montpellier, 2001. p. 491-496.

ZANÃO JUNIOR, L. A.; LANA, R. M. Q.; CARVALHO-ZANÃO, M. P.; GUIMARÃES, E. C. Variabilidade espacial de atributos químicos em diferentes profundidades em um Latossolo em sistema de plantio direto. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 57, n. 3, p. 429-438, 2010.