

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL

**TÉCNICAS INDIRETAS NA IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS DE
MANEJO ESPECÍFICO PARA CANA-DE-AÇÚCAR**

Rafael Gonçalves Peluco
Engenheiro Agrônomo

2013

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL

**TÉCNICAS INDIRETAS NA IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS DE
MANEJO ESPECÍFICO PARA CANA-DE-AÇÚCAR**

Rafael Gonçalves Peluco

**Orientador: Prof. Dr. José Marques Júnior
Co - orientador: Prof. Dr. Gener Tadeu Pereira**

**Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp,
Campus de Jaboticabal, como parte das
exigências para a obtenção do título de Mestre
em Agronomia (Produção Vegetal).**

Peluco, Rafael Gonçalves

P393t Técnicas indiretas na identificação de áreas de manejo específico para cana-de-açúcar / Rafael Gonçalves Peluco. – – Jaboticabal, 2013

xii, 78 p. : il. ; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2013

Orientador: José Marques Júnior

Co-orientador: Gener Tadeu Pereira

Banca examinadora: Alan Rodrigo Panosso, Zigomar Menezes de Souza

Bibliografia

1. Vinhaça. 2. Fósforo adsorvido. 3. Suscetibilidade magnética. 4. Índice de avermelhamento. 5. Pedotransferência. 6. Geoestatística. I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 633.61:528.4



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

CAMPUS DE JABOTICABAL

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS DE JABOTICABAL

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: TÉCNICAS INDIRETAS NA IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS DE MANEJO ESPECÍFICO PARA CANA-DE-AÇÚCAR

AUTOR: RAFAEL GONÇALVES PELUCO

ORIENTADOR: Prof. Dr. JOSE MARQUES JUNIOR

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. GENER TADEU PEREIRA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE EM AGRONOMIA (PRODUÇÃO VEGETAL), pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. GENER TADEU PEREIRA

Departamento de Ciências Exatas / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal



Prof. Dr. ALAN RODRIGO PANOSSO

Pós-Doutorando / Departamento de Ciências Exatas / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal



Prof. Dr. ZIGOMAR MENEZES DE SOUZA

Universidade Estadual de Campinas / Campinas/SP

Data da realização: 28 de fevereiro de 2013.

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

RAFAEL GONÇALVES PELUCO – nascido em 12 de junho de 1987 em São José do Rio Preto – SP, graduado em Engenharia Agrônômica pela Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – FCAV/UNESP Jaboticabal (2010). Foi bolsista de iniciação científica pela FAPESP no período de 2007 a 2010. Mestre em Agronomia, Produção Vegetal (Bolsista CAPES) pela FCAV/UNESP Jaboticabal (2013). Atualmente é aluno de Doutorado do curso de Pós-Graduação em Agronomia, Ciência do Solo pela FCAV/UNESP Jaboticabal (Bolsista CAPES). Atua na área de Agronomia, com ênfase em Agricultura de Precisão, Gênese, Morfologia e Classificação dos Solos, trabalhando principalmente nos seguintes temas: geoestatística, mapeamento de áreas de manejo específico com base na relação solo-relevo, técnicas pedométricas e classificação numérica. Membro ativo do grupo de pesquisa Caracterização do Solo para fins de Manejo Específico (CSME) da UNESP Campus de Jaboticabal.

DEDICO

*Aos meus educadores e professores da vida, meus amigos, meus exemplos, meus
super heróis... Meus pais que tanto amo,
José Luiz Peluco e Marilza Gonçalves Peluco.*

*"Sejam quais forem os prodígios realizados pela inteligência humana, esta inteligência
tem também uma causa primária. É a inteligência superior a causa primária de todas as
coisas, qualquer que seja o nome pelo qual o homem a designe."*

Allan Kardec

OFEREÇO

À minha irmã Juliana Gonçalves Peluco, pelo companheirismo, brincadeiras, implicâncias... mas sempre com muito amor. À minha amada companheira, minha amiga, a pessoa que sempre me incentiva e apoia em todas as horas com muita luz e amor, seja na vida pessoal ou profissional, minha namorada Cássia Rita Adame e à seus pais Wanderlei Adame (*in memoriam*) e Alice Aparecida Pansani Adame (Chinha), pelos conselhos e apoio em todos os momentos. Aos meus avós paternos, Santo Peluco (*in memoriam*) e Jeni Maria Veronez Peluco, e avós maternos, Mário Gonçalves (*in memoriam*) e Julia Marques Gonçalves, e a todos os tios, tias, primos e primas, vocês são o alicerce da minha vida.

"Em momentos de crise, só a imaginação é mais importante que o conhecimento."

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

À Deus pelo dom da vida, pela oportunidade diária de crescimento pessoal, intelectual e espiritual e pela oportunidade de realizar esse feito.

Ao Prof. Dr. José Marques Júnior e ao Prof. Dr. Gener Tadeu Pereira, pela paciência, orientação, ensinamentos e amizade desde a graduação até agora no mestrado.

Aos membros da banca examinadora Prof. Dr. Zigomar Menezes de Souza e Prof. Dr. Alan Rodrigo Panosso, pelas valiosas contribuições e sugestões.

À todos os amigos integrantes do Grupo de Pesquisa CSME, em especial, Diego Silva Siqueira (Pimpão), Lucas Aguilar Cortez, Daniel De Bortoli Teixeira, Rooney Sobreira Barbosa, Livia Arantes Camargo, Angélica R. S. de Souza Bahia, Frederico Luiz Siansi, Henrique Menezes Santos, Ana Beatriz Coelho França, José Maria do Amaral Resende e Jussara Silva Dantas, pela boa convivência, risadas e apoio nos trabalhos do mestrado.

Aos companheiros e irmãos de república: Thiago de Barros Sylvestre (Thiaguinho), Daniel Tannus Ferreira (Bazzinga) e Lucas Aparecido Gaion. E aos amigos Felipe Batistela Filho (Gordo), Fernando Kuhnen e Juan Lopes.

Aos amigos Bruno Máximo (Urso), Luma Torres (Serena), Victor de Paula Campos Fábio (Sabão), Silvio Aparecido Marcussi (Cúpin), Fábio Cunha de Andrade (Krrapixão), Everton Perressim (Jaca), Eduardo Maniezo Rodriguez, Lucas Quilice (Didown) e toda turma da Agronomia 2006 da FCAV - UNESP JABOTICABAL.

Aos amigos Luís Fernando Moretti (*in memoriam*), Cintia Carvalho Alves (*in memoriam*), Adalto Bianco, Vagner Silva (Ingreis), Thales Antonietti, João Gustavo

Spinola, Silvinho Pereira, Everton Donadi, Diego Frigo, Renans (Bolacha e Bigato), Paulinho Adame, Anderson (Anchi), Igor Toledo, Marcelo Lula, Fernando Lopes, Fernando Rosa, Rogerinho Bedan, Leonan Rafael Toledo, Zé Renato, Tarciso Martins, Guilherme David, Paulinho da Célinha, Iguinho do Poca, Matheus do Pin e toda turma de TABAPUÃ-SP, vocês dispensam comentários... Simplesmente fazem parte de minha história.

À todos os amigos dentro e fora da universidade, especialmente aos amigos da Usina São Martinho e do Departamento de Ciências Exatas e Solos e Adubos, responsáveis por parte da minha formação pessoal, científica e profissional.

À Usina São Martinho S/A pelo apoio na realização dos trabalhos e pela concessão da área de estudo.

À FCAV - UNESP JABOTICABAL, pela estrutura fornecida para minha graduação e pós-graduação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo apoio financeiro.

Finalmente, à todos que de maneira direta ou indireta contribuíram para realização deste trabalho.

"A mente que se abre a uma nova idéia, jamais voltará ao seu tamanho original."

Albert Einstein

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1. CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	1
1.1 INTRODUÇÃO	1
1.2 REVISÃO DE LITERATURA	3
1.2.1 Características e utilização da vinhaça na cultura da cana-de-açúcar.....	3
1.2.2 Comportamento do fósforo nos solos e sua importância para a cana-de-açúcar	5
1.2.3 Suscetibilidade magnética e suas utilizações no estudo dos atributos do solo.....	7
1.2.4 Espectroscopia de reflectância difusa no estudo de atributos do solo	11
1.2.5 Geoestatística aplicada em ciências agrárias	13
1.2.5.1 Variograma.....	14
1.2.5.2 Variograma Cruzado	16
1.2.5.3 Krigagem.....	17
1.3 REFERÊNCIAS	18
CAPÍTULO 2. SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA NA IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS COM DIFERENTES POTENCIAIS À APLICAÇÃO DE VINHAÇA.....	30
2.1 INTRODUÇÃO	31
2.2 MATERIAL E MÉTODOS	33
2.2.1 Localização, caracterização da área e critério de amostragem	33
2.2.2 Metodologia de laboratório.....	34
2.2.3 Análise dos dados	35
2.2.3.1 Estatística descritiva.....	35
2.2.3.2 Geoestatística	36
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	37
2.4 CONCLUSÕES	48
2.5 REFERÊNCIAS	49
CAPÍTULO 3. ESPECTROSCOPIA DE REFLECTÂNCIA DIFUSA E SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA NA IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS COM DIFERENTES POTENCIAIS À ADSORÇÃO DE FÓSFORO.....	53
3.1 INTRODUÇÃO	54
3.2 MATERIAL E MÉTODOS	56
3.2.1 Localização, caracterização da área e critério de amostragem	56
3.2.3 Análise dos dados	58
3.2.3.1 Estatística descritiva.....	58
3.2.3.2 Geoestatística	59
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	59
3.4. CONCLUSÕES.....	67
3.5 REFERÊNCIAS	68
APÊNDICES.....	75

TÉCNICAS INDIRETAS NA IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS DE MANEJO ESPECÍFICO PARA CANA-DE-AÇÚCAR

RESUMO – O objetivo deste estudo foi avaliar a utilização da suscetibilidade magnética e da espectroscopia de reflectância difusa para identificação de áreas com diferentes potenciais à aplicação de vinhaça e adsorção de fósforo na cultura da cana-de-açúcar. Para determinação dos atributos químicos, determinação dos teores de argila, da medição da suscetibilidade magnética e da espectroscopia de reflectância difusa, foram coletadas 86 amostras de solo a cada 30 m, em uma transeção de 2600 m, seguindo o espigão da paisagem ao longo da área cultivada com cana-de-açúcar, e mais 155 pontos em uma malha de densidade amostral de 1 ponto a cada 2,5 ha, totalizando 241 pontos na área experimental de 380 ha. A partir dos dados de cor do solo (matiz, valor e croma) foi calculado um índice de avermelhamento. Também foram realizados cálculos das doses e da capacidade de suporte do solo à aplicação de vinhaça, e do fósforo adsorvido para cada ponto da grade experimental. Foram construídos modelos de regressão entre a suscetibilidade magnética e os demais atributos estudados, e entre o índice de avermelhamento e o fósforo adsorvido. Os dados foram submetidos à análise estatística descritiva, e também foram calculadas as médias de cada atributo conforme as classes de solo da área experimental e foi aplicado o teste de Tukey a 5%. A análise da dependência espacial dos dados foi feita por meio da geoestatística, utilizando-se o variograma. Também foram construídos mapas de padrão espacial e variogramas cruzados. Os resultados indicaram que a suscetibilidade magnética apresentou potencial para auxiliar na identificação de áreas com diferentes capacidades de suporte do solo à aplicação de vinhaça e com diferentes potenciais de adsorção de fósforo. A suscetibilidade magnética apresentou correlação, espacial e linear, significativa com as doses de vinhaça, com a capacidade de suporte do solo à aplicação deste efluente, e com o fósforo adsorvido, podendo ser utilizada como função de pedotransferência, na quantificação indireta desses atributos. O índice de avermelhamento não apresentou correlação linear com o fósforo adsorvido, porém apresentou correlação espacial positiva, evidenciando o potencial da cor do solo para auxiliar no mapeamento de áreas de adsorção de fósforo e caracterizando a importância da utilização de técnicas geoestatísticas em estudos da variabilidade de atributos do solo. A fórmula do cálculo das doses vinhaça proposto pela CETESB é efetiva, porém a densidade amostral sugerida não consegue captar as variações que ocorrem no campo, o que pode resultar na recomendação de doses equivocadas de vinhaça conforme a capacidade de suporte do solo. A recomendação de doses de vinhaça por meio dos mapas de padrão espacial e por classes de solo, apresentaram maior racionalização na aplicação deste efluente do que quando comparada com a recomendação da CETESB, diminuído possíveis riscos de impactos ambientais e aproveitando melhor o potencial fertilizante da vinhaça.

Palavras-chave: vinhaça, fósforo adsorvido, suscetibilidade magnética, índice de avermelhamento, pedotransferência, geoestatística

INDIRECT TECHNIQUES IN IDENTIFICATION OF SPECIFIC MANAGEMENT AREAS FOR SUGARCANE

ABSTRACT – This study aimed to evaluate the utilization of magnetic susceptibility and diffuse reflectance spectroscopy to identify areas with different soil support capacity for application of vinasse and with different potential for adsorption of phosphorus for sugarcane. For determination of the chemical, of clay content, measuring the magnetic susceptibility and the diffuse reflectance spectroscopy, 86 soil samples were collected, every 30 meters on a transect of 2600 meters, following the crest of landscape along the sugarcane crop area, in order to obtain points in the different soil classes, and more 155 points were collected, into a grid of sample density of 1 point per 2.5 ha, totaling 241 points in the experimental area of 380 ha. From the soil color data (hue, value and chroma) was calculated a redness index, and the calculations of levels and soil support capacity for application of vinasse, and phosphorus adsorbed to each experimental grid point were also performed. Regression models were built between the magnetic susceptibility and other studied attributes, and between redness index and adsorbed phosphorus. Data were analyzed using descriptive statistics, and the attributes average values were also calculated for each soil class of the experimental area and the Tukey test at 5 % was applied. The spatial dependence analysis of data was performed using geostatistics by the variograms. Spatial pattern maps and cross variograms were also constructed. The results indicate that the magnetic susceptibility has the potential to assist in identifying areas with different soil support capacity for application of vinasse and with different phosphorus adsorption potential. The magnetic susceptibility shows spatial and linear correlation with vinasse levels, with soil support capacity for application of vinasse, and with the adsorbed phosphorus, so it can be used as pedotransfer function for the indirect quantification of these attributes. The redness index shows no linear correlation with adsorbed phosphorus, but has spatial correlation with it. This demonstrates the soil color potential to assist in mapping phosphorus adsorption areas and the importance of using geostatistical techniques for soil properties variability studies. The formula for calculating vinasse levels proposed by CETESB is effective, but the suggested sampling density cannot capture changes that occur in the field, which can result in the wrong levels recommendation of vinasse as the soil support capacity. The recommended levels of vinasse through spatial patterns maps and through soil classes showed greater rationalization in the application of this effluent than when compared with the recommendation of CETESB, decreasing possible risks of environmental impacts and taking advantage of the best fertilizing potential of vinasse.

Keywords: vinasse, phosphorus adsorbed, magnetic susceptibility, redness index, pedotransfer, geostatistics

CAPÍTULO 1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

1.1 INTRODUÇÃO

O Brasil ocupa o primeiro lugar mundial em produção e em área plantada de cana-de-açúcar, e devido sua extensão, a cultura vem sendo instalada em diferentes ambientes que são resultantes da interação de vários fatores, tais como clima, relevo, compartimentos geológicos entre outros (MAULE et al., 2001), o que resulta em grande variabilidade dos atributos do solo. O estudo e conhecimento da variabilidade dos atributos do solo são fundamentais para o planejamento agrícola sustentável (BARBIERI et al. 2008); e a implantação de novas tecnologias que viabilizem estes estudos são cada vez mais requeridas. A necessidade de incorporação de novas tecnologias é primordial na racionalização de todo o processo produtivo, visto que isto implica na redução de custos operacionais e na maior lucratividade de todo e qualquer sistema da agroindústria. Para tanto, a manipulação, a organização e o gerenciamento de dados referentes aos fatores de produção são essenciais (MOLIN, 1997).

A Agricultura de Precisão apresenta-se como uma moderna ferramenta para auxiliar o produtor na definição das melhores estratégias de manejo a serem adotadas, visando aumentar a eficiência da atividade agrícola e diminuir riscos ambientais. Especificamente no manejo do solo, a agricultura de precisão tem como principal conceito aplicar, no local correto e no momento adequado, as quantidades de insumos necessários à produção agrícola, para áreas cada vez menores e mais homogêneas, tanto quanto a tecnologia e os custos envolvidos o permitam (DOBERMANN; PING, 2004).

Nesse sentido, vários autores (VIEIRA et al., 1983; McBRATNEY, 2003; SIQUEIRA; MARQUES JR; PEREIRA, 2010) têm estudado a delimitação de zonas específicas de manejo com base no uso da geoestatística. No entanto, a aplicação desta técnica requer um elevado número de pontos de observação (LEGROS, 2006), o que pode encarecer a atividade, fato que tem levado pesquisadores a buscarem técnicas alternativas como a aplicação de funções de pedotransferência

(MCBRATNEY et al., 2002), na estimativa de atributos do solo, a partir de outros atributos medidos com maior facilidade e baixo custo.

A suscetibilidade magnética (SM) (GRIMLEY; VEPRASKAS, 2000) e a espectroscopia de reflectância difusa (ERD) (TORRENT; BARRÓN, 2008) são dois atributos de fácil medição que podem ser utilizados em funções de pedotransferência. A utilização da SM e da ERD nos estudos de variabilidade espacial dos atributos do solo, poderia tanto auxiliar no planejamento agrícola, como no manejo da adubação fosfatada, a partir da identificação de áreas com maior potencial para adsorção de fósforo, quanto contribuir para a minimização de possíveis riscos ambientais inerentes às práticas agrícolas como, por exemplo, a aplicação de vinhaça pelo setor sucroenergético.

Segundo Barbieri (2007) o fósforo é um nutriente muito importante para a cana-de-açúcar, com influência direta no desenvolvimento da cultura e longevidade do canavial. Johnson; Loeppert (2006) citam que o baixo teor de fósforo disponível no solo é a limitação nutricional mais generalizada na produção agrícola de solos intemperizados brasileiros, e a maioria das culturas apresenta resposta à aplicação desse nutriente.

Entretanto, é baixa a eficiência da adubação fosfatada, pois grande parte do fósforo adicionado torna-se imóvel ou não disponível, em virtude de reações de adsorção em colóides minerais, precipitação ou conversão em formas orgânicas (TIESSEN; MOIR, 1993; RHEINHEIMER; ANGHINONI, 2001; BUSATO et al., 2005), caracterizando assim a necessidade do conhecimento das áreas de maior potencial à adsorção de fósforo, a fim de otimizar o manejo da adubação fosfatada.

Já a vinhaça, principal subproduto gerado na produção de etanol, requer um manejo mais técnico, pois ao mesmo tempo em que possui um alto valor fertilizante, possui um alto poder poluente (SILVA et al., 2007). De acordo com Silva e Silva (1986) a vinhaça é um resíduo caracterizado por alta demanda bioquímica de oxigênio (DBO), consumindo de 12.000 a 20.000 mg de oxigênio por litro para estabilização das substâncias putrescíveis.

Segundo Silva et al. (2007) para cada litro de etanol produzido, são gerados de dez a dezoito litros de vinhaça. Sendo que na safra 2012/2013 somente na Usina São Martinho, maior unidade do mundo em toneladas de cana-de-açúcar

processadas, foram gerados cerca de 3.000.000 m³ de vinhaça, evidenciando a necessidade de estudos focados na racionalização da aplicação deste efluente. Nesse sentido o objetivo desse estudo foi avaliar a utilização da suscetibilidade magnética e espectroscopia de reflectância difusa para identificação de áreas com diferentes potenciais à aplicação de vinhaça e adsorção de fósforo na cultura da cana-de-açúcar.

1.2 REVISÃO DE LITERATURA

1.2.1 Características e utilização da vinhaça na cultura da cana-de-açúcar

O Brasil é o maior produtor mundial de etanol, sendo o estado de São Paulo o que apresenta maior destaque nesse segmento da economia nacional. Diante da crise do petróleo, no início da década de 70, foi lançado em 1975 no Brasil o Programa Nacional do Álcool – PRÓALCOOL, com intuito de conseguir realizar a substituição gradativa da gasolina por álcool combustível, atualmente denominado etanol (LUDOVICE, 1997).

Porém, foi somente na década de 80, após o segundo choque do petróleo, em 1979, que ocorreu um considerável crescimento em produtividade, subsídios e investimentos. Foram implantadas várias usinas sucroalcooleiras, e aquelas que já produziam açúcar receberam ampliações afim de produzirem, também, o etanol. Desde então as áreas de produção de cana-de-açúcar (*Saccharum sp.*) vêm aumentando de maneira contínua (SILVA et al., 2007).

Juntamente com o aumento da produção de etanol, ocorreu o aumento da produção de vinhaça, principal efluente das destilarias. Para cada litro de etanol são produzidos, em média, 13 litros de vinhaça (FREIRE; CORTEZ, 2000), cuja composição é variável dependendo do tipo de mosto utilizado. O mosto pode ser definido como um líquido passível de sofrer fermentação, processo esse que transforma o mosto em vinho, o qual dá origem ao álcool após o processo de destilação, gerando como resíduo a vinhaça (ALMEIDA, 1955).

Segundo Silva et al. (2007) a vinhaça é caracterizada como efluente das destilarias com alto poder poluente e alto valor fertilizante; o poder poluente, cerca de cem vezes maior que o do esgoto doméstico, decorre da sua riqueza em matéria orgânica, baixo pH, elevada corrosividade e altos índices de demanda bioquímica de oxigênio (DBO), além de elevada temperatura (85 a 90 °C) na saída dos destiladores (ROSSETTO, 1987), é considerada altamente nociva à fauna, flora, microfauna e microflora das águas doces, além de afugentar a fauna marinha que vem às costas brasileiras para procriação (FREIRE; CORTEZ, 2000).

Estudos sobre os efeitos da vinhaça nas propriedades físico-químicas e no pH do solo e os efeitos na cultura canavieira vêm sendo conduzidos, porém, são poucos os trabalhos desenvolvidos no intuito de avaliar o potencial poluidor deste efluente sobre o lençol freático e o solo (LYRA et al., 2003), uma vez que devido ao seu potencial fertilizante as usinas estão utilizando a vinhaça na fertirrigação da cultura da cana-de-açúcar (CUNHA et al., 1981).

De acordo com Penatti et al. (1988) a utilização de vinhaça pode contribuir com o aumento de produtividade da cultura da cana-de-açúcar e ainda pode gerar economia devido à diminuição da compra de fertilizantes. A vinhaça proporciona benefícios químicos, físicos e biológicos ao solo, porém, quando aplicada em excesso, pode resultar em diminuição da qualidade tecnológica do caldo, alterando a qualidade da matéria-prima para a indústria (FREIRE; CORTEZ, 2000).

Segundo Paulino et al. (2002), a necessidade da adubação das soqueiras de cana-de-açúcar é indiscutível, tendo em vista que, em cada ciclo, a planta retira do solo quantidades apreciáveis de nutrientes, que necessitam ser restituídos através da adubação. A vinhaça tem possibilidades de fornecer parte desses nutrientes requeridos pela soqueira, onde seu emprego deve ser prioritário, pelo fato de sua disponibilidade ocorrer no período da safra (SANTANA, 1985).

A vinhaça é rica em água, matéria orgânica, macronutrientes, principalmente potássio (K) e outros elementos traços (FRANCO et al., 2008), logo pode ser utilizada como fertilizante orgânico. Segundo Glória (1985) a cana-de-açúcar é altamente exigente em potássio, e a carência deste macronutriente resulta no menor acúmulo de açúcares no colmo e diminuição da produção de biomassa, fatores que podem ser explicados pela menor translocação e menor fotossíntese.

A deficiência de potássio ainda pode ocasionar diminuição do número de perfilhos e diminuição do crescimento da cana, com formação de colmos mais finos e internódios mais curtos (ORLANDO FILHO, 1977). Porém de acordo com Malavolta; Vitti; Oliveira (1989) o excesso desse elemento também pode ser prejudicial, pois esta situação pode induzir à falta de magnésio e aumentar o teor de cinzas no caldo (CASAGRANDE, 1991).

Logo, ao se aplicar vinhaça, deve-se ter prévio conhecimento da dose adequada (SILVA, 1978), pois tanto a produtividade, quanto a qualidade tecnológica da cana-de-açúcar são influenciadas por estas aplicações (PAULINO et al., 2002), além dos riscos ambientais. Ficando evidente a necessidade de pesquisas que auxiliem no planejamento agrícola e no manejo racional deste efluente.

1.2.2 Comportamento do fósforo nos solos e sua importância para a cana-de-açúcar

O fósforo é um macronutriente que apresenta tanto influência agrônômica quanto na qualidade da matéria-prima para a indústria sucroenergética. De acordo com Santos et al. (2011), na cultura da cana-de-açúcar o fósforo assume grande importância no enraizamento e no perfilhamento e, portanto, na produtividade final e no rendimento de açúcar (SANTOS et al., 2009). A deficiência de fósforo também é problemática, pois segundo Mahadevaiah et al. (2007), reduz a absorção de nitrogênio e dificulta a clarificação do caldo durante a fabricação do açúcar, elevando o custo de fabricação em virtude da necessidade de adição de fosfatos solúveis para atingir o teor ideal de P_2O_5 , fundamental para uma clarificação eficiente.

Uma boa adubação fosfatada também é de grande importância na qualidade da cana-de-açúcar (SANTOS et al., 2011), influenciando a porcentagem aparente de sacarose contida no caldo da cana (pol%) e pureza de caldo (SIMÕES NETO et al., 2009). A qualidade da matéria-prima é definida como o conjunto de características que a cana-de-açúcar deve apresentar, atendendo às exigências da indústria, por ocasião do processamento, em especial o teor de sacarose e a fibra industrial (MOURA et al., 2005).

A adubação fosfatada, embora muito importante, representa um alto investimento devido ao custo das fontes fosfáticas (MENEGATTI et al., 2006). Em Latossolos é comum a deficiência de fósforo disponível mesmo quando o teor total do fósforo é elevado. Este resultado se deve a interação desse nutriente com atributos do solo (ROLIM NETO, 2004).

A utilização de fertilizantes e corretivos, principalmente fosfatados, tem sido intensiva nos tratos culturais devido à necessidade de aumentar a fertilidade do solo e conseqüentemente, a produtividade e qualidade da cana-de-açúcar. Barbieri (2007) trabalhando com agricultura de precisão encontrou necessidades de aplicação de fósforo variando de 80 a 160 kg ha⁻¹, quando levado em conta as particularidades de cada zona de manejo da área. Entretanto, em solos com altos teores de óxidos de ferro, via de regra, é baixa a eficiência da adubação fosfatada, pois grande parte do fósforo adicionado torna-se imóvel ou não disponível, em virtude de reações de adsorção em colóides minerais, precipitação ou conversão em formas orgânicas (MOTTA et al., 2002).

Parte da importância do fenômeno de adsorção de fósforo em solos deve-se ao fato de ser ele um dos ânions mais fortemente retidos, principalmente em Latossolos (RAIJ, 1991; MOTTA et al., 2002; SCHAEFER et al., 2004). Deste modo estes solos requerem altas quantidades de fertilizantes fosfatados para manter as produtividades das culturas em níveis economicamente sustentáveis.

De acordo com Veith e Sposito (1977), as reações de adsorção acontecem em dois estádios, um rápido, em que ocorre a adsorção propriamente dita, e um mais lento, a precipitação. O estádio rápido pode ser observado em superfícies de hematita e gibbsita e está provavelmente, associado à alta energia de adsorção e à baixa saturação da superfície de adsorção. A adsorção do fósforo depende do tipo de cristalinidade dos óxidos de ferro e alumínio, podendo ser afetada pela matéria orgânica, principalmente, por esta competir com o íon fosfato pelos sítios de adsorção (MESQUITA FILHO; TORRENT, 1993; SILVA et al., 2001; HEREDIA; CIRELLI 2007).

A goethita é o principal componente de óxido de ferro da fração argila responsável pela adsorção de fósforo (BORGGAARD et al., 1990; MOTTA et al., 2002; JOHNSON; LOEPPERT, 2006; ULÉN; SNÄLL, 2007; HEREDIA; CIRELLI,

2007). Isto decorre da substituição isomórfica do Fe pelo Al. Esta substituição, de acordo com Resende (1976), provoca desarranjo estrutural que diminui o tamanho das partículas, aumentando a área superficial específica e possibilitando, assim, maior adsorção de fósforo (INDA JUNIOR; KÄMPF 2005).

Segundo Camargo et al. (2012), a adsorção de fósforo nos solos ocorre principalmente devido à presença de óxidos de ferro e alumínio, minerais secundários que também são responsáveis pela cor (BARRÓN; TORRENT, 1986) e suscetibilidade magnética (FINE et al., 1993) dos solos. Esses estudos denotam a importância do conhecimento da variabilidade dos solos, como o mapeamento de locais com maior potencial de adsorção de fosfatos, o que facilitaria e serviria de subsídio para o planejamento agrícola.

1.2.3 Suscetibilidade magnética e suas utilizações no estudo dos atributos do solo

O Brasil apresenta dimensões continentais, com diversas áreas para expansão agrícola, entretanto nestas áreas ainda é pequeno o conhecimento sobre a variabilidade dos atributos do solo, o qual é de grande importância para a identificação do potencial agrícola (SIQUEIRA, 2010c) e desenvolvimento sustentável das práticas de manejo do solo (LÓPEZ, 2009).

Segundo McBratney et al. (2002), no estudo e avaliação quantitativa dos atributos do solo, a coleta e análise das amostras são as etapas mais intensivas e onerosas. No intuito de diminuir os custos com a obtenção de informações nos estudos em ciência do solo, alguns autores propõem o uso de funções de pedotransferência, que são cada vez mais utilizadas na agricultura moderna para estimar, indiretamente, atributos do solo de maneira simples, rápida e confiável.

Funções de pedotransferência podem ser definidas como modelos matemáticos utilizados para fazer estimativas de atributos dos solos a partir de outros atributos medidos com maior facilidade e baixo custo (MCBRATNEY et al., 2002). A condutividade eletromagnética e resistividade elétrica são os métodos geofísicos mais utilizados para mapear a variabilidade espacial dos atributos do solo

de maneira indireta (JOHNSON et al., 2001; BRENNING et al., 2008). Entretanto, as medições feitas por estas técnicas sofrem variações em função do teor de água no solo. Assim, alguns pesquisadores têm utilizado a suscetibilidade magnética (SM) (GRIMLEY; VEPRASKAS, 2000; ROYAL, 2001; SIQUEIRA et al., 2010a) na quantificação indireta de propriedades físicas, químicas e mineralógicas do solo.

A SM pode ser definida como o grau de magnetização de um material em resposta a um campo magnético aplicado. A SM é resultado da translação e rotação dos elétrons que constituem alguns minerais que estão presentes nos solos, nos sedimentos e nas rochas (CRAIK, 1995; LUQUE, 2008). Fatores como clima (EYRE; SHAW, 1994; DEARING et al., 2001; MAHER et al., 2003), material de origem (SINGER et al., 1996; FONTES et al., 2000; HANESCH et al., 2001), relevo (JONG et al., 2000), regime hídrico (MAHER, 1998), fauna/flora (DEARING et al., 1995), erosão, influência antrópica (HANESCH; SCHOLGER, 2005) e tempo (SINGER et al., 1992; WHITE; WALDEN, 1997), podem afetar a SM.

Diante destes aspectos alguns autores (SCHACHTSCHABEL et al. 1998; MAHER; THOMPSON 1999) afirmam que a SM é sensível às variações dos fatores e processos de formação do solo, e pode ser expressa nas propriedades cristalográficas dos minerais presentes nos sedimentos e no solo. Como esses fatores e processos são específicos para cada local, a SM mostra-se uma promissora ferramenta no mapeamento destes locais (SIQUEIRA, 2010c), principalmente nos solos tropicais (Tabela 1.1).

Tabela 1.1. Suscetibilidade magnética de diferentes tipos de solos

Solo	Material de origem	Fe ₂ O ₃ (%)	SM (10 ⁻⁶ m ³ Kg ⁻¹) - Frações do solo		
			Areia	Silte	Argila
1	Basalto	30	144,6	25,5	10,46
2	Arenito Grupo Bauru	3,4	0,71	6,43	1,18
3	Basalto	29,6	191,46	166,52	53,17
4	Basalto	22,9	82,92	36,80	18,83
5	Basalto	23,1	45,25	22,22	4,58
6	Basalto	24	39,71	24,30	0,77

1. Latossolo distrófico A moderado; 2. Latossolo A proeminente; 3. Nitossolo (Typic Acrorthox); 4. Nitossolo A moderado (Typic Haplorthox); 5. Latossolo Vermelho álico A proeminente textura muito argilosa (Typic Acrohumox); 6. Latossolo Vermelho álico (Typic Acrohumox).

Fonte: modificado de SIQUEIRA, (2010c)

Cinco tipos básicos de comportamento magnético podem ser considerados: diamagnetismo, paramagnetismo, ferromagnetismo, ferrimagnetismo e antiferromagnetismo (Figura 1.1). Segundo Santos (2010) nos minerais diamagnéticos, os átomos que compõem a cela unitária do mineral possuem as camadas eletrônicas preenchidas. Assim, o número de spins eletrônicos alinhados numa direção é igual ao número de spins eletrônicos na direção oposta. O campo magnético externo não exerce influência sobre os spins nesse caso, mas inverte o movimento orbital dos elétrons (exemplo: quartzo). Já nos minerais paramagnéticos, as camadas eletrônicas estão incompletas. A presença de um campo magnético externo faz com que os spins se alinhem, e mesmo após a retirada do campo magnético, alguns spins permanecem alinhados (exemplo: olivina).

Quanto aos minerais ferromagnéticos, esses são considerados um caso especial de paramagnetismo. Após a retirada do campo magnético, os spins permanecem alinhados, fazendo com que o mineral possua um grande valor de magnetização remanescente (exemplo: ferro e cobalto). Enquanto nos minerais ferrimagnéticos, os spins não estão emparelhados, assim prevalece o momento magnético do maior número de spins no mesmo sentido (exemplo: magnetita). Por fim, os minerais antiferromagnéticos não apresentam propriedades magnéticas (SIQUEIRA, 2010c).

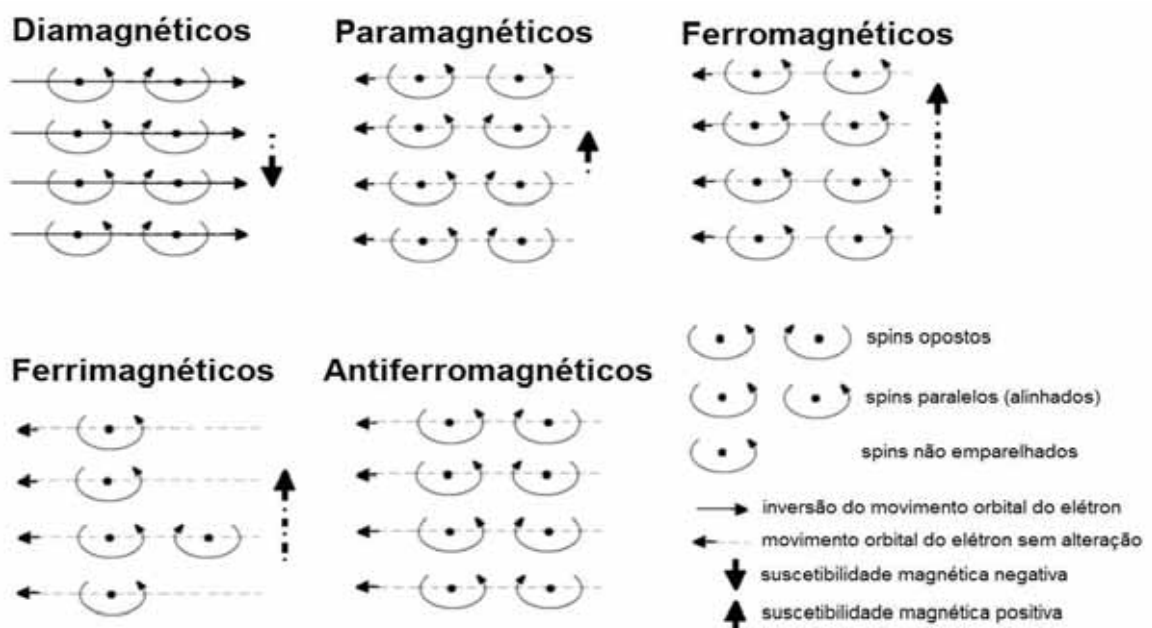


Figura 1.1. Tipos de comportamento magnético na presença de um campo magnético externo (ímã). Fonte: SIQUEIRA, (2010c).

Um crescente interesse nas propriedades dos minerais do solo e no comportamento magnético dos mesmos tem sido observado nos últimos tempos. Muito se aprendeu sobre o comportamento magnético dos minerais do solo desde os primeiros estudos de Le Borgne (1955) que postulou que a SM do solo foi, em geral, maior do que a do subsolo e do material de origem subjacente. Pode-se dizer que as propriedades magnéticas dos minerais do solo dependem essencialmente do teor Fe, pois segundo Coey (1987) esse é o elemento mais abundante dentre os elementos magnéticos da crosta terrestre. Os minerais magnéticos mais importantes nos solos são a magnetita (Fe_3O_4), presente na fração silte e areia fina, e a maghemita ($\gamma\text{-Fe}_3\text{O}_4$), presente na fração argila. Quando estes conferem baixa expressão magnética aos solos, o comportamento magnético do solo passa a ser expresso pela hematita ($\alpha\text{-Fe}_3\text{O}_4$) e pela goethita, ambos presentes na fração argila (MULLINS et al., 1977).

Diversas linhas de pesquisa, como a identificação da poluição do solo (PETROVSK'Y; ELLWOOD, 1999; LECOANET et al., 2001), investigação de climas pretéritos registrados por paleossolos (MAHER; THOMPSON, 1999, MAHER et al., 2003), identificação de limites mais precisos entre diferentes compartimentos do relevo (MATIAS, 2010), delineamento de áreas de solos hidromórficos (GRIMLEY et al., 2004) e delimitação de áreas de manejo específico para cana-de-açúcar (MARQUES JR., 2009; SIQUEIRA, 2010c), tem utilizado as medidas da SM dos solos.

O mapeamento da SM também vem se destacando como um dos métodos mais utilizados para fins ambientais (DEARING et al., 1996; GRIMLEY et al., 2004). Porém, segundo Becegato et al. (2005), no Brasil as pesquisas geofísicas em solos agrícolas ainda são muito incipientes. As propriedades magnéticas já foram utilizadas, nas décadas de 60 e 70, nos primeiros levantamentos de solos do estado de São Paulo, porém, com fins qualitativos, unicamente para distinguir solos provenientes de diferentes materiais de origem. Com as necessidades da agricultura atual por maior conhecimento da variabilidade dos atributos do solo, preocupação ambiental com o uso e o descarte adequados de reagentes laboratoriais e resíduos agroindustriais, a SM pode ser utilizada como ferramenta alternativa na quantificação indireta dos atributos do solo.

Mesmo com os diversos estudos sobre a utilização da SM na predição de atributos do solo, o desenvolvimento de funções de pedotransferência é uma tarefa difícil para aplicações em locais diferentes dos que elas foram desenvolvidas. Não se recomenda a utilização de funções de pedotransferência para além da região geomórfica, tipo de solo ou área de manejo específico, a partir da qual foi desenvolvida (McBRATNEY et al., 2002). Nesse sentido, são necessários estudos que possuam como objetivo investigar a correlação espacial da SM com atributos do solo em diferentes locais. Assim, os resultados são validados e a SM pode ser utilizada como função de pedotransferência pelo setor produtivo (SIQUEIRA, 2010c).

1.2.4 Espectroscopia de reflectância difusa no estudo de atributos do solo

A espectroscopia de reflectância difusa (ERD) é o resultado de múltiplos processos de absorção e dispersão da luz, em todas as direções, que se produzem sobre a superfície dos componentes do solo, sendo a cor do solo resultante da capacidade dos pigmentos para absorver mais a luz de determinados comprimentos de onda em relação a outros (BARRÓN; MELLO; TORRENT, 2000).

De acordo com Torrent e Barrón (1993) esta técnica consiste na aquisição quali-quantitativa de dados por meio da transmissão ou absorção da energia radiante incidente em uma amostra. As energias dos diferentes comprimentos de onda do espectro são absorvidas pelas moléculas e com base na Lei de Beer-Lambert é feita análise quali-quantitativa da amostra. Então, os resultados quantitativos, sofrem um tratamento matemático e novas amostras são estimadas a partir do modelo criado.

Alguns pesquisadores (VISCARRA ROSSEL; MCBRATNEY, 2008; CHANG et al., 2001; DEMATTÊ et al., 2004; TORRENT; BARRÓN, 2008) buscando aumentar o número de pontos coletados, sem que haja elevação dos custos e tempo de análise, tem utilizado a reflectância difusa na quantificação indireta de atributos do solo. Segundo Tifton et al. (2008) a EDR é uma alternativa que pode ser utilizada para reforçar os métodos convencionais de análise do solo, uma vez que vem se desenvolvendo nas últimas duas décadas, superando algumas das suas limitações e

ganhando maior precisão nas aplicações desta tecnologia. A espectroscopia é rápida e oportuna, menos dispendiosa, não destrutiva, simples e, por vezes, mais precisa do que análises convencionais, fortalecida pelo uso de outras ferramentas como a estatística e geoestatística.

Além disso, um único espectro permite a caracterização simultânea de diversos atributos do solo e as técnicas são adaptáveis para sua utilização por pesquisadores, técnicos e agricultores, o que faz a espectroscopia uma alternativa adequada para o estudo da variabilidade espacial dos atributos do solo e das características e desenvolvimento das culturas (TITTONEL et al., 2008). O potencial do uso da reflectância difusa na agricultura, e especificamente no estudo dos atributos do solo, tem sido demonstrado por vários autores (BROWN et al., 2006; VISCARRA ROSSEL et al., 2006; BEN-DOR et al., 2008a; BEN-DOR et al., 2008b; DU et al., 2008), mediante o uso do visível (VIS), infravermelho próximo (NIR), infravermelho médio (MIR) e combinando espectros, de forma eficiente.

Boa estimativa do carbono orgânico e outros compostos orgânicos, foram encontradas com o uso do VIS e MIR, na gama das bandas espectrais de 410, 570 e 660 nm (VISCARRA ROSSEL et al., 2006). Estes autores também mencionam que a precisão das previsões varia para cada atributo e que também depende da região espectral utilizada, estabelecendo que o MIR geralmente apresenta a melhor aproximação para atributos químicos do solo, apresentando pequenas melhorias para o teor das partículas de areia, silte e argila, quando se combinaram os espectros VIS-NIR-MIR.

Segundo Fernandes et al. (2003) a íntima relação entre os óxidos de Fe e a cor do solo pode fornecer informações de grande utilidade em diversas áreas da pedologia, além de permitir a identificação ou mesmo a quantificação destes minerais. Barrón (1985) revela a existência de antigos índices de avermelhamento (IAV), citando os trabalhos de Soileau e McCracken (1967), Hurst (1977), Childs et al. (1979) e Tharimarajan (1979). Torrent et al. (1980) comprovaram a utilidade do IAV, baseados na notação Munsell, para predizer o conteúdo de hematita em alguns solos vermelhos da Espanha. Outro IAV, proposto por Madeira et al. (1997), foi usado com sucesso para estimar a concentração de hematita em solos brasileiros.

De acordo com Campos et al. (2003) esses índices são baseados em coordenadas de sistemas de notação de cores, como o sistema Munsell e os espaços de cores propostos pela CIE (Commission Internationale de l'Éclairage, 1931), como o Yxy e o $L^*a^*b^*$, estabelecidos em 1976 (McLAREN, 1976). Ben-Dor et al. (2008a) desenvolveram um sistema óptico, adaptado a um espectrômetro, com a finalidade de realizar a classificação de solos de forma mais rápida, econômica e precisa. Com este sistema encontraram que o número de amostras a ser enviadas ao laboratório, pode diminuir notoriamente, sendo conveniente identificar claramente a transição entre um e outro perfil do solo.

Vários trabalhos (VISCARRA ROSSEL et al., 2006; DU et al., 2008) vêm sendo desenvolvidos demonstrando que o espectro de reflectância difusa fornece informações sobre os atributos mineralógicos, físicos e químicos do solo, indicando o potencial desta técnica na quantificação indireta desses atributos. Porém, é preciso mais informações que elucidem com mais exatidão a aplicabilidade dessas novas técnicas de mapeamento da variabilidade. Esse tipo de informação é de extrema importância, visto que parte da variabilidade da produção agrícola está associada, dentre outros fatores, com os atributos do solo (SOUSA JUNIOR et al., 2008).

1.2.5 Geoestatística aplicada em ciências agrárias

O estudo da variabilidade dos atributos do solo é de extrema importância para o refinamento das práticas de manejo e planejamento agrícola sustentável (CAMBARDELLA et al., 1994; SOUZA et al., 2003; CORÁ et al., 2004). Para realização de tais estudos pesquisadores têm utilizado métodos de classificação numérica, estatística multivariada, lógica fuzzy, geoestatística, métodos de fractais, entre outros (BURROUGH et al., 1994).

Embora todos estes métodos permitam inferir sobre a variabilidade espacial do solo, a dependência espacial entre as amostras somente pode ser modelada por meio da geoestatística (MULLA et al., 1992; WEBSTER, 2000). A geoestatística surgiu na África do Sul, quando o engenheiro Krige, trabalhando com dados de concentração de ouro, concluiu que não conseguia encontrar sentido nas variâncias,

se não levasse em conta a distância entre as amostras (KRIGE, 1951). Dentre muitos autores que contribuíram para este estudo, atribuí-se a G. Matheron, no início da década de 60, na França, a apresentação e a formalização da teoria das variáveis regionalizadas (BARBIERI, 2007).

As primeiras aplicações da geoestatística ocorreram na mineração (DAVID, 1970; JOURNEL, 1974), posteriormente em hidrologia (DELHOMME, 1976), até que esta técnica passou a ser utilizada em estudos da variabilidade de atributos do solo (VIEIRA et al., 1983; TRANGMAR et al., 1985; SOUZA et al., 1997; BERG; OLIVEIRA, 2000; SILVA et al., 2004).

Mesmo com diversos autores apontando a geoestatística para estudos da variabilidade dos atributos do solo a fim de auxiliar no planejamento agrícola, em muitos locais este ainda é feito somente com base em estatísticas como média e desvio padrão e não assumindo a interdependência entre as amostras (SIQUEIRA, 2010c). Isaaks; Srivastava, (1989) propõem que as análises estatísticas clássicas que consideram a independência entre as amostras baseadas na média podem ser utilizadas, mas que apresentarão maior sucesso quando associadas com análises geoestatísticas.

Segundo Reichardt et al. (1986) de fato a estatística clássica e a geoestatística se completam. Uma não exclui a outra, e perguntas não respondidas por uma, muitas vezes, podem ser respondidas pela outra. Sendo assim, a variabilidade espacial de atributos pode ser estudada por meio das ferramentas da geoestatística, que se fundamenta na teoria das variáveis regionalizadas, por meio do variograma, o qual expressa a dependência espacial entre as amostras (VIEIRA, 1997).

1.2.5.1 Variograma

Os variogramas determinam não só a dependência espacial existente, ou não, entre amostras, mas também o alcance dessa dependência (VIEIRA et al., 1981).

O gráfico que reproduz a existência ou não de dependência espacial de uma variável qualquer em estudo é denominado variograma. Ele pode ser representado analítica e/ou graficamente, sendo estimado pela equação 1.

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

Em que,

$\hat{\gamma}(h)$: é a variância estimada;

$N(h)$: é o número de pares experimentais de dados separados pelo vetor h ;

Z : representa os valores medidos para atributos do solo ou da cultura.

O variograma normalmente é representado pelo gráfico de $\gamma(h)$ versus h . Ele começa no valor chamado de variância pepita (C_0) e vai aumentando obedecendo a semivariância, até uma distância conhecida como alcance (a), onde atinge o patamar ($C_0 + C_1$), conforme mostrado na Figura 1.2.

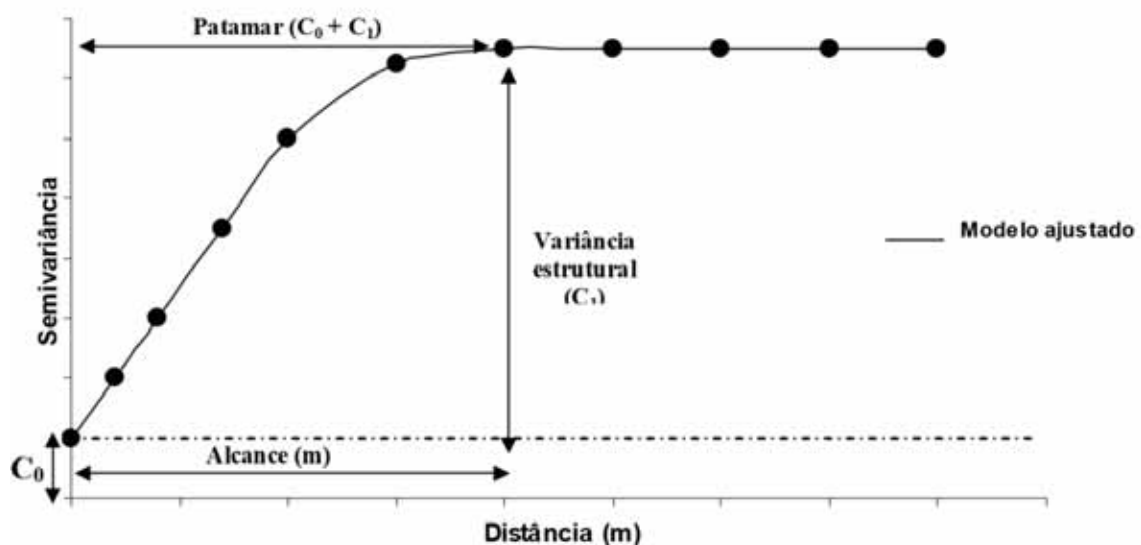


Figura 1.2. Variograma experimental de um atributo qualquer do solo.

Para pesquisadores como Cambardella et al. (1994), Salviano et al. (1998) e Oliveira et al. (1999) a variância pepita (C_0), que é um dos parâmetros avaliados pelo variograma, representa a variação não dependente espacialmente sobre o alcance examinado, ou seja, ela indica a variabilidade não explicada, podendo ser originada dos erros de medição ou de microvariações não detectadas quando é considerada a distância de amostragem utilizada.

Para Isaaks e Srivastava (1989) o patamar do variograma ($C_0 + C_1$) indica que os dados da variável não dependem umas das outras espacialmente, ou seja, as variáveis são separadas por uma distância onde a semivariância não é modificada (variância espacial independente).

A razão entre o efeito pepita (C_0) e o patamar (C_0+C_1) pode ser usada para definir classes distintas de dependência espacial das variáveis do solo, seguindo uma classificação segundo Cambardella et al. (1994):

- 1) $C_0/(C_0+C_1) \leq 25 \%$, variável apresenta forte dependência espacial;
- 2) $C_0/(C_0+C_1)$ entre 25 % e 75 %, variável apresenta moderada dependência espacial;
- 3) $C_0/(C_0+C_1) > 75 \%$, variável apresenta fraca dependência espacial.

Para a geoestatística o alcance é a medida de distância em que a variável apresenta-se espacialmente dependente, isto é, ele é um indicador da distância de separação em que dentro dela existe dependência entre os pontos amostrados (ISAACS; SRIVASTAVA, 1989). Em estudos da ciência do solo os modelos, exponencial e o esférico são os mais ajustados.

1.2.5.2 Variograma Cruzado

O variograma cruzado (Equação 2) expressa a co-regionalização de duas variáveis, z e y (DEUTSCH; JOURNAL, 1998).

$$\hat{\gamma}_{zy}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)][y(x_i) - y(x_i + h)] \quad [2]$$

Em que,

$\hat{\gamma}_{zy}(h)$ é a variância cruzada experimental em uma distância de separação h;

$z(x_i)$ é o valor da variável primária (a ser estimada) no ponto i;

$N(h)$ é o número de pares de pontos separados pela distância h.

Vale ressaltar que o variograma é simplesmente um caso particular do variograma cruzado, em que a semivariância é calculada para uma única propriedade. O variograma cruzado é calculado somente nos locais onde ambas as variáveis (primária e secundária) são amostradas simultaneamente (DEUTSCH; JOURNAL, 1998). Antes da modelagem do variograma cruzado, é verificada a presença do modelo linear de co-regionalização, que é indicado pelos variogramas cruzados bem estruturados e proporcionais aos variogramas simples (ISAAKS AND SRIVASTAVA, 1989).

Se a correlação entre z e y for negativa, a semivariância cruzada também o será. Em situações em que existe a correlação espacial entre duas propriedades, a estimativa de uma delas pode ser feita usando-se informações de ambas; expressas no variograma cruzado e na co-krigagem (GOOVAERTS, 1997).

Algumas características do variograma cruzado são:

- 1) Depende da direção, podendo ser anisotrópico;
- 2) Quando h for igual à zero, não é óbvio que o valor de $\hat{\gamma}_{zy}(0)$ seja nulo, pois além de espaços menores do que a distância de amostragem, temos a falta de correlação entre as duas variáveis;
- 3) O alcance representa a distância máxima de dependência espacial entre as variáveis.

1.2.5.3 Krigagem

A estimativa de valores em pontos não amostrados a partir de seus vizinhos é realizada por um método geoestatístico de interpolação. Essa interpolação de dados é conhecida como krigagem. Isso se torna possível com o conhecimento do comportamento espacial da variável, o que é proporcionado pelo variograma. Neste estimador, pontos com maior proximidade do lugar onde foi realizada a amostragem de dados tem maior peso do que os pontos mais distantes. Da mesma forma ocorre com pontos agrupados e isolados, os primeiros tem um peso maior na estimativa do que os segundos (VIEIRA et al., 1983; BORGELT et al., 1994).

A krigagem, para possibilitar uma melhor estimativa de valores, utiliza um interpolador linear não tendencioso (JOURNAL; HUIJBREGTS, 1991; ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989; VIEIRA et al., 1983). Ela pode ser expressa sob a forma de mapas de isolinhas ou de superfície tridimensional.

O valor estimado para os locais não amostrados, pode ser definido pela equação 3.

$$\hat{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad [3]$$

Em que,

$\hat{Z}(x_0)$: é o valor estimado para locais não amostrados (x_0);

λ_i : é o peso atribuído a cada valor amostrado $Z(x_i)$;

N : é o número de pontos vizinhos usados na estimativa;

$Z(x_i)$: é o valor da variável Z no local x_i .

A construção de um mapa da área de estudo e a definição de isovalores definidos pela krigagem pela estimativa de valores em locais não amostrados podem ser de grande valia no planejamento agrícola e principalmente na visualização e interpretação do comportamento e distribuição espacial dos atributos do solo avaliados. Essas informações são extremamente importantes para a tomada de decisão sobre o manejo específico a ser adotado em cada área delimitada pelos mapas (BURGESS; WEBSTER, 1980).

1.3 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, J. R. O problema da vinhaça. **Brasil Açucareiro**. Rio de Janeiro, v. 46, p.216-221, 1955.

BARBIERI, D. M. **Formas do relevo e variabilidade espacial de atributos químicos e mineralógicos de um argissolo cultivado com cana-de-açúcar**. 2007, 83 p. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2007.

BARRÓN, V. **Influencia de los óxidos de hierro en el color de los suelos.** Córdoba, Universidade de Córdoba, 1985. 200p. (Tese de Doutorado)

BARRÓN, V.; TORRENT, J. Use of the Kubelka-Munk theory to study the influence of iron oxide on soil color. **Journal of Soil Science**, v.37, p.499-510, 1986.

BECEGATO, V. A.; FERREIRA, F. J. F. Gamaespectrometria, resistividade elétrica e susceptibilidade magnética de solos agrícolas no noroeste do estado do Paraná. **Revista Brasileira de Geofísica**, São Paulo v. 23, n. 4, p. 371-405, 2005.

BEN-DOR, E.; HELLER, D.; CHUDNOVSKY, A. A novel method of classifying soil profiles in the field using optical means. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 72, n. 4, p. 1113-1123, 2008a.

BEN-DOR, E.; TAYLOR, R. G.; HILL, J.; DEMATTE, J. A. M.; WHITING, M. L.; CHABRILLAT, S.; SOMMER S., Imaging spectrometry for soil applications. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 97, p. 321-392, 2008b.

BERG, M.V.D.; OLIVEIRA, J.B. Variability of apparently homogeneous soils capes in São Paulo state, Brazil: I. Spatial analysis. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, n.2, p.377-391, 2000.

BORGELT, S.C.; SEARCY, S.W.; STOUT, B.A.; MULLA, D.J. Spatially-variable liming rates - a method for determination. **ASAE**, St. Joseph, v.37, n.5, p.1499-1507, 1994.

BORGGGAARD, O.K.; JÖRGENSEN, S.S.; MOBERG, J.P.; RABEN-LANGE, B. Influence of organic matter on phosphate adsorption by aluminium and iron oxides in sandy soils. **European Journal of Soil Science**, v. 41, p. 443-449, 1990.

BRENNING, A.; KOSZINSKI, S.; SOMMER, M., Geostatistical homogenization of soil conductivity across field boundaries. **Geoderma**, Amsterdam, v. 143, n. 3-4, p. 254-260, 2008.

BROWN, D. J.; SHEPHERD, K. D.; WALSH, M. G.; MAYS, M. D.; REINSCH, T. G. Global soil characterization with VNIR diffuse reflectance spectroscopy. **Geoderma**, Amsterdam, n. 3-4, v. 132, p. 273-290, 2006.

BURGESS, T. M.; WEBSTER, R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I. The semivariogram and punctual kriging. **Journal Soil Science**, Oxford, v.31, n. 3, p.315-31, 1980.

BURROUGH, P.A.; BOUMA, J.; YATES, S.R. The state of the art in pedometrics. **Geoderma**, Amsterdam, v.62, n.1-3, p.311-326, 1994.

BUSATO, J. G.; CANELLAS, L. P.; VELLOSO, A. C. X. Fósforo num Cambissolo cultivado com cana-de-açúcar por longo tempo. I: Fracionamento seqüencial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, 29:935-945, 2005.

CAMARGO, L. A.; MARQUES JR, J.; PEREIRA, G. T.; ALLEONI, L. R. F. Spatial correlation between the composition of the clay fraction and contents of available phosphorus of an Oxisol at hillslope scale. **Catena**, v. 100, p. 100-106, 2012.

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 Soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, n.5, p.1501-1511, 1994.

CAMPOS, R. C.; DEMATTÊ, J. A. M.; QUARTAROLI, C. Determinação indireta do teor de hematita no solo a partir de dados de colorimetria e radiometria. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 4, p. 521-528, 2003.

CASAGRANDE, A. A. **Tópicos de morfologia e fisiologia da cana-de-açúcar**. Jaboticabal: FUNEP, 1991. 157p.

CHANG, C.W., LAIRD, D.A., MAUSBACH, M.J., and HURBURGH, Jr, C.R. Near-infrared reflectance spectroscopy: Principal component regression analyses of soil properties. **Soil Science Society of America Journal**. v. 65, p. 480-490. 2001.

COEY, J. M. D. Magnetic properties of iron in soil iron oxides and clay minerals. In: STUCKI, J.W., GOODMAN, B. A.; SCHWERTMANN, U. (Ed.). **Iron in soils and clay minerals**. Dordrecht: Reidel Publishing Corporation, 1987. p. 217, 397-466.

COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ÉCLAIRAGE (Vienna, Austria). **Proceeding of the eight session**. Cambridge, Inglaterra: Bureau Center de la Commission Internationale de L'Éclairage, 1931. 326 p.

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

CRAIK, D. **Magnetism, principles and applications**. Lisboa. John Wiley and Sons, 1995, 459p.

CUNHA, R. C. A.; COSTA, A. C. S.; MASET FILHO, B.; CASARINI, D. C. P. Effects of irrigation with vinasse and dynamics of its constituents in the soil: I – physical and chemical aspects. **Water Science Technology**, v.19, n.8, p.155-165, 1981.

DAVID, M. The geostatistical estimation of porphyry-type deposits and scale factor problems. In: Pribam Mining Congress, Praga. **Proceedings**. Praga, p.91-109, 1970.

DEARING, J. A., LEES, J. A.; WHITE, C. Mineral magnetic properties of acid gleyed soils under oak and Corsican pine, **Geoderma**, n. 68, v. 68, p. 309–319. 1995.

DEARING, J.A.; HAY, K.L.; BABAN, S.M.K.; HUDDLESTON, A.S.; WELLINGTON, E.M.H.; LOVELAND, P.J. Magnetic susceptibility of soil: an evaluation of competing theories using a national data set. **Geophysical Journal International**, Oxford, v.127, p.728–734, 1996.

DEARING, J. A., LIVINGSTONE, I. P., BATEMAN, M. D.; WHITE, K. Palaeoclimate records from OIS 8.0–5.4 recorded in loess-palaeosol sequences on the Matmata Plateau, southern Tunisia, based on mineral magnetism and new luminescence dating, **Quaternary International**, v. 76–77, p. 43–56. 2001.

DELHOMME, J.P. **Kriging in hydrosciences**. Fontainebleau, Centre D'Informatique Geologique, 1976. 94p.

DEMATTE, J.A.M., CAMPOS, R.C.; ALVES, M.C.; FIORIO, P.R. and NANNI, M.R.. Visible–NIR reflectance: A new approach on soil evaluation. **Geoderma**, v. 121, p. 95-112. 2004.

DEUTSCH, C.V.; JOURNEL, A.G. **GSLIB: Geostatistical Software Library: and User's Guide**, 2ed. Oxford University Press, New York, NY, USA. 1998.

DOBERMANN, A.; PING, J. L. Geostatistical integration of yield monitor data and remote sensing improves yield maps. **Agronomy Journal**, Madison, v. 96, n. 1, p. 285-297, 2004.

DU, C.; LINKER, R.; SHAVIV, A. Identification of agricultural Mediterranean soils using mid-infrared photoacoustic spectroscopy. **Geoderma**, Amsterdam, v. 143, n. 1, p. 85-90, 2008.

EYRE, J. K.; SHAW, J. Magnetic enhancement of Chinese loess—the role of γ Fe₂O₃, **Geophysical Journal International**. v. 117, p. 265–271. 1994.

FERNANDES, R. B. A.; BARRÓN, V.; TORRENT, J. FONTES, M. P. F. Quantificação de óxidos de ferro de latossolos brasileiros por espectroscopia de refletância difusa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 245-257, 2004.

FINE, P.; SINGER, M. J.; VEROSUB, K. L.; TENPAS, J. New evidence for the origin of ferimagnetic minerals in loess from China. **Soil Society of America Journal**, Madison, v. 57, n. 6, p. 1537-1542, 1993.

FONTES, M. P. F.; OLIVEIRA, T. S.; COSTA, L. M. & CAMPOS, A. A. G. Magnetic separation and evaluation of magnetization of Brazilian soils from different parent materials. **Geoderma**. Amsterdam, v.96, p.81-99, 2000.

FREIRE, W. J.; CORTEZ, L. A. B. **Vinhaça de cana-de-açúcar**. Guaíba: Agropecuária, 2000. 203p.

GLÓRIA, N. A. Efeito do potássio na acumulação de sacarose pela cana-de-açúcar. **Álcool & Açúcar**, São Paulo, v.5, n.23, p.20-25, 1985.

GOOVAERTS, P. **Geostatistics for natural resources evaluation**. Oxford University Press, New York, NY, USA. 1997.

GRIMLEY, D. A.; VEPRASKAS, M. J. Magnetic Susceptibility for Use in Delineating Hydric Soils. Madison, **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, n. 6, p. 2174-2180, 2000.

GRIMLEY, D.A.; ARRUDA, N.K.; BRAMSTEDT, M.W. Using magnetic susceptibility to facilitate more rapid, reproducible and precise delineation of hydric soils in the midwestern USA. **Catena**. v.58, p.183–213, 2004.

HANESCH, M., SCHOLGER, R.; DEKKERS, M. J. The application of fuzzy c –means cluster analysis and non-linear mapping to a soil data set for the detection of polluted sites, **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 26, p. 885–891. 2001.

HANESCH, M. & SCHOLGER, R. The influence of soil type on the magnetic susceptibility measured throughout soil profiles. **Geophysical Journal International**, Oxford, v.161, n.1, p.50–56, 2005.

HEREDIA, O. S.; CIRELLI, A. F. Environmental risks of increasing phosphorus addition in relation to soil sorption capacity. **Geoderma**, Amsterdam, v.137, p.426–431, 2007.

INDA JUNIOR, A.V.; KÄMPF, N. Variabilidade de goethita e hematita via dissolução redutiva em solos de região tropical e subtropical. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 6, p. 851-866, 2005.

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

JOHNSON, C.K., DORAN, J.W., DUKE, H.R., WIENHOLD, B.J., ESKRIDGE, K.M., SHANAHAN, J.F. Field-scale electrical conductivity mapping for delineating soil condition. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, p. 1829– 1837, 2001.

JOHNSON, S. E. & LOEPPERT R. H. Role of organic acids in phosphate mobilization from iron oxide. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 70, p. 222-234, 2006.

JONG, E.; PENNOCK, D. J.; NESTOR, P. A. Magnetic susceptibility of soils in different slope positions in Saskatchewan, Canada, **Catena**, Amsterdam, v. 40, n. 3, p. 291-305, 2000.

JOURNAL, A.G. Geostatistical for conditional simulation of orebodies. **Economic Geology**, v.69, p.673-687, 1974.

JOURNAL, A.G.; HUIJBREGTS, C.J. **Mining geostatistics**. 5 ed. London: Academic Press, 1991. 600p.

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

LE BORGNE, E. Susceptibilite magnetique anormal du sol superficiel. Ann. **Journal of Geophysical Research**. v. 11, n. 113, p. 399–419. 1955.

LECOANET, H., L'ÉVÊQUE, F.; AMBROSI, J. P. Magnetic properties of saltmarsh soils contaminated by iron industry emissions (southeast France), **Journal of Applied Geophysics**. v. 48, p. 67–81. 2001.

LEGROS, J. P. **Mapping of the Soil**. Enfield, Jersey, Plymouth: Science Publishers. 411 pp. 2006.

LÓPEZ, L. R. **Pedologia quantitativa: espectrometria VIS-NIR-SWIR e mapeamento digital de solos**. 2009. 171 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ), Piracicaba 2009.

LUDOVICE, M.T.F. **Estudo do efeito poluente da vinhaça infiltrada em canal condutor de terra sobre o lençol freático**. 1997. 143f. Dissertação (Mestrado em Sanidade) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.

LUQUE, E. C. L. **Propiedades magnéticas de los óxidos de hierro en suelos mediterráneos**. 2008. 179 f. Tese (Doutorado) - Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y de Montes, Universidad de Córdoba, Córdoba, 2008.

LYRA, M. R. C. C.; ROLIM, M. M.; SILVA, J. A. A. Toposseqüência de solos fertirrigados com vinhaça: contribuição para a qualidade das águas do lençol freático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, n.3, p.525-532, 2003.

MADEIRA, J.; BÉDIDI, A. & CERVELLE, B. Visible spectrometric indices of hematite (Hm) and goethite (Gt) content in lateritic soils: the application of a Thematic Mapper (TM) image for soil-mapping in Brasilia, Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, v. 18, p. 2835-2852, 1997.

MAHADEVIAH, M. S.; KUMAR, Y.; GALIL, M. S. A.; SURESHA, M. S.; SATHISH, M. A.; NAGENDRAPPA, G. A simple spectrophotometric determination of phosphate in sugarcane juices, water and detergent samples. **E-Journal of Chemistry**, v. 4, p. 467-473, 2007.

MAHER, B. A. Magnetic properties of modern soils and Quaternary loessic paleosols: paleoclimatic implications, **palaeogeography. palaeoclimatology. palaeoecology**. v. 137, n. 30, p. 25–54, 1998.

MAHER, B.A.; THOMPSON, R. The magnetic record of palaeoclimate in the terrestrial loess and palaeosol sequences, in Quaternary Climates. In: **Environments and Magnetism** (eds MAHER, B.A. & THOMPSON, R.). University Press, Cambridge, p. 81–125, 1999.

MAHER, B. A.; ALEKSEEV, A.; ALEKSEEVA, T. Magnetic mineralogy of soils across the Russian Steppe: climatic dependence of pedogenic magnetite formation, **Palaeogeography. palaeoclimatology. Palaeoecology**. v. 201, p. 321– 341, 2003.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1989.

MATIAS, S. S. R. **Suscetibilidade magnética e sua associação com atributos do solo e do relevo em uma topossequência de latossolos**. 2010. 111f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2010.

MAULE, R. F.; MAZZA, J. A.; MARTHA JR.; BUENO, G. Produtividade agrícola de cultivares de cana-de-açúcar em diferentes solos e épocas de colheita. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 58, n. 2, p. 295-301, 2001.

McLAREN, K. The development of the CIE 1976 (L*a*b*) uniform colour-space and colour-difference formula. **Journal of the Society of Dyres and Colourists**, v. 92, p. 338-341, 1976.

McBRATNEY, A.; MYNASNY, B.; STEPHEN R. CATTLE, R. WILLEM VERVOORT. From pedotransfer functions to soil inference systems. **Geoderma**, Amsterdam. v. 109, p. 41-73. 2002.

McBRATNEY, A. B.; SANTOS, M. L. M.; MINASNY, B. On digital soil mapping. **Geoderma**, Amsterdam, v. 117, n. 1-2, p. 3-52, 2003.

MENEGATTI, L. A. A. ; MOLIN, J. P.; GÓES, S. L. 3 ; KORNDORFER, G. H.; SOARES, ROGÉRIO, A. B.; LIMA, E. A. Benefícios econômicos e agronômicos da adoção de agricultura de precisão em usinas de açúcar. In: Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão, 2006, São Pedro-SP. **Anais...** Piracicaba: Esalq, 2006. 1 Cd-rom.

MESQUITA FILHO, M.V.; TORRENT, J. Phosphate sorption as related to mineralogy of a hydrosequence of soils from Cerrado Region (Brazil). **Geoderma**, Amsterdam, v. 58, p. 107-123, 1993.

MOLIN, J. P. Agricultura de precisão: mais um desafio para o agricultor brasileiro. **Plantio Direto**, Passo Fundo, v. 39, n.3, p. 26-7, 1997.

MOTTA, P. E. F.; CURI, N.; SIQUEIRA, J. O.; VAN RAIJ, B.; FURTINI NETO, A. E. & LIMA, J. M. Adsorção e formas de fósforo em Latossolos: influencia da mineralogia e histórico de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 349-359, 2002.

MOURA, M. V. P. F.; FARIAS, C. H. DE A.; AZEVEDO, C. A. V. DE; DANTAS NETO, J.; AZEVEDO, H. M. DE; PORDEUS, R. V. Doses de adubação nitrogenada e potássica em cobertura na cultura da cana-de-açúcar, primeira soca, com e sem irrigação. **Ciência e Agrotecnologia**, v.29, p.753-760, 2005.

MULLA, D.J.; BATÍ, A.U.; HAMMOND, M.W.; BENSON, J.A. A comparison of winter wheat yield and quality under uniform versus spatially variable fertilizer management. **Agriculture Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v.38, n.2, p.301-311, 1992.

MULLINS, B. A. Magnetic susceptibility of the soil and its significance in soil science - a review. **Journal of Soil Science**, v.28, p.223-246, 1977.

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

ORLANDO FILHO, J. Nutrição e adubação de cana-de-açúcar. **Brasil Açucareiro**, Rio de Janeiro, v.8, n.1, p.10-16, 1977.

PAULINO, A. F.; MEDINA, C. C.; ROBAINA, C. R. P.; LAURANI, R. A. Produções agrícola e industrial de cana-de-açúcar submetida a doses de vinhaça. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 23, n. 2, p. 145-150, 2002.

PENATTI, C. P. et al. Efeitos da aplicação da vinhaça e nitrogênio na soqueira da cana-de-açúcar. **Boletim Técnico Copersucar**, São Paulo, v.44, p.32-38, 1988.

PETROVSKÝ, E.; ELLWOOD, B. B. Magnetic monitoring of air-, land-, and waterpollution, in quaternary climates, In: MAHER, B. A.; THOMPSON, R. (ed.). **Environments and magnetism**, University Press, Cambridge. 1999. p. 279-322.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Agronômica Ceres, Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1991. 343p.

REICHARDT, K.; VIEIRA, S.R.; LIBARDI, P.L. Variabilidade espacial de solos e experimentação de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 10, n. 1, p. 1-6, 1986.

RESENDE, M. **Minerology, Chemistry, Morphology and geomorphology of some soils of the Central Plateau of Brazil**. Purdue, 1976, Thesis (PHD.), Purdue University, Purdue.

RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I. Distribuição do fósforo inorgânico em sistemas de manejo de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 36:151-160, 2001.

ROLIM NETO, F. C.; SCHAEFER, C.E.G.R.; COSTA, L. M.; CORRÊA, M. M.; FERNANDES FILHO, E. I.; IBRAIMO, M. M. Adsorção de fósforo, superfície específica atributos mineralógicos em solos desenvolvidos de rochas vulcânicas do Alto Paranaíba (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 953-964, 2004.

ROSSETTO, A. J. Utilização agronômica dos subprodutos e resíduos da indústria açucareira e alcooleira. In: Paranhos, S.B. (ed.). **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Campinas:Fundação Cargill, 1987, v.2, p.435-504.

ROYALL, D. Use of mineral magnetic measurements to investigate soil erosion and sediment delivery in a small agricultural catchment in limestone terrain. **Catena**, Amsterdam, v.46,p.15-34, 2001.

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

SANTANA, S. S. Economicidade da aplicação de vinhaça em comparação à adubação mineral. **Álcool & Açúcar**, São Paulo, v.5, n.23, p.26-38, 1985.

SANTOS, V. R.; MOURA FILHO, G.; ALBUQUERQUE, A. W.; COSTA, J. P. V.; SANTOS, C. G.; SANTOS, A. C. I. Crescimento e produtividade agrícola de cana-de-açúcar em diferentes fontes de fósforo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, p. 389-396, 2009.

SANTOS, H. L. **Variabilidade espacial dos atributos do solo, erosão e suscetibilidade magnética de uma vertente em Gilbués-PI**. 2010. 74 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2010.

SANTOS, D. H.; SILVA, M. A.; TIRITAN, C. S.; FOLONI, J. S. S.; ECHER, F. R. Qualidade tecnológica da cana-de-açúcar sob adubação com torta de filtro enriquecida com fosfato solúvel. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.5, p.443-449, 2011.

SCHACHTSCHABEL, P.; BLUME, H. P.; BRÜMMER, G.; HARTGE, K. H. SCHWERTMANN, U. **Lehrbuch der Bodenkunde (Scheffer/Schachtschabel)**. 14th ed, Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag, p. 494. 1998.

SCHAEFER, C.E.G.R.; GILKES, R.J. & FERNANDES, R.B.A. EDS/SEM study on microaggregates of Brazilian Latosols, in relation to P adsorption and clay fraction attributes. **Geoderma**, Amsterdam, v. 123, p. 1-33, 2004.

SILVA, G. M. A. Efeitos da aplicação da vinhaça como fertilizante em cana-de-açúcar. **Boletim Técnico Copersucar**, São Paulo, v.7, p.9-14, 1978.

SILVA, M. B.; ANJOS, L. H. C.; PEREIRA, M. G.; NASCIMENTO, R. A. M. Estudo de topossequência da baixada litorânea fluminense: efeitos do material de origem e posição topográfica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa. v.25, p.965-976, 2001.

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

SIMÕES NETO, D. E.; OLIVEIRA, A. C.; FREIRE, F. J.; FREIRE, M. B. G. S.; NASCIMENTO, C. W. A.; ROCHA, A. T. Extração de fósforo em solos cultivados com cana-de-açúcar e suas relações com a capacidade tampão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, p.840-848, 2009.

SINGER, M. J., FINE, P., VEROSUB, K. L.; CHADWICK, O. A. Time dependence of magnetic susceptibility of soil chronosequences on the California coast, **Quaternary Research**. v. 37, p. 323–332. 1992.

SINGER, M. J.; VEROSUB, K. L.; FINE, P.; TENPAS, J. A conceptual model for the enhancement of magnetic susceptibility in soils, **Quaternary International**. v. 34-36, p. 243–248. 1996.

SIQUEIRA, D. S.; MARQUES JR., J.; MATIAS, S. S. R.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; BAFFA, O.; OLIVEIRA, L. C. Correlation of properties of Brazilian Haplustalfs with magnetic susceptibility measurements. **Soil Use and Management**, Oxford, v.26, p.425-431, 2010a.

SIQUEIRA, D. S.; MARQUES JR., J.; PEREIRA, G. T. The use of landforms to predict the variability of soil and orange attributes. **Geoderma**, Amsterdam, v. 155, 55-66, 2010b.

SIQUEIRA, D.S. **Suscetibilidade magnética para a estimativa de atributos do solo e mapeamento de áreas sob cultivo de cana-de-açúcar**. 2010. 75 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2010c.

SOUSA JUNIOR, J. A.; DEMATTE, J. A. M.; GENU, A. M. Comportamento espectral dos solos na paisagem a partir de dados coletados por sensores terrestre e orbital. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 2 p. 727-738, 2008.

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, n.3, p.367-372, 1997.

SOUZA, C.K., MARQUES JÚNIOR, J.; MARTINS FILHO, M.V.; PEREIRA, G.T. Influência do relevo e erosão na variabilidade espacial de um Latossolo em Jaboticabal (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.1067-1074, 2003.

TIESSEN, H.; MOIR, J. O. Characterization of available P by sequential extraction. In: CARTER, M.R. ed. **Soil sampling and methods of analysis**. Boca Raton, Lewis, 1993. p.75-86.

TITTONELL, P.; SHEPHERD, K. D.; VANLAUWE, B.; GILLER, K. E. Unravelling the effects of soil and crop management on maize productivity in smallholder agricultural systems of western Kenya - an application of classification and regression tree analysis. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 123, n. 1-3, p. 137-150, 2008.

TORRENT, J.; SCHWERTMANN, U. & SCHULZE, D. G. Iron oxide mineralogy of some soils of two river terrace sequences in Spain. **Geoderma**, v. 23, p. 191-208, 1980.

TORRENT, J.; BARRÓN, V. Diffuse reflectance spectroscopy. In: ULERY, A. L.; REES, L. R. D. Editors, **Methods of Soil Analysis**. Part 5. Mineralogical Methods, SSSA Book Series vol. 5, Soil Science Society of America, p. 367-387, 2008.

TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, New York, v.38, n.1, p.45-93, 1985.

ULÉN, B.; SNÄLL, S. Forms and retention of phosphorus in an illite-clay soil profile with a history of fertilisation with pig manure and mineral fertilizers. **Geoderma**, Amsterdam, v. 137, p. 455-465, 2007.

VEITH, J.A., SPOSITO, G. Reactions of aluminosilicates, aluminium hydrous oxides, and aluminum oxide with o-phosphate: the formation of X-ray amorphous analogs of variscite and montebrasite. **Soil Science Society American Journal**, New York, 41, 870-876, 1977.

VIEIRA, S. R.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Spatial variability of field-measured infiltration rate. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.45, n.6, p. 1040-1048, 1981.

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

VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial 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.

VISCARRA ROSSEL, R. A.; WALVOORT, D. J. J.; MCBRATNEY, A. B.; JANIK, L. J.; SKJEMSTAD, J. O. Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. **Geoderma**, Amsterdam, v. 131, n. 1-2, p. 59-75, 2006.

VISCARRA ROSSEL R.A.; MCBRATNEY A.B. Diffuse reflectance spectroscopy as a tool for digital soil mapping. In: HARTEMINK A.E, MCBRATNEY A.B and MENDONÇA-SANTOS L. Eds. Amsterdam, Springer, **Digital soil mapping with limited data**. p. 381-396, 2008.

WEBSTER, R. Is soil variation random? **Geoderma**, Amsterdam, v.97, n.1-2, p.149-163, 2000.

WHITE, K.; WALDEN, J. The rate of iron oxide enrichment in arid zone alluvial fan soils, Tunisian southern atlas, measured by mineral magnetic techniques, **Catena**, v. 30, 215- 227. 1997.

CAPÍTULO 2. SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA NA IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS COM DIFERENTES POTENCIAIS À APLICAÇÃO DE VINHAÇA

RESUMO – A vinhaça, principal efluente das destilarias, é caracterizada por apresentar alto poder poluente e alto valor fertilizante, logo se manejada adequadamente pode contribuir tanto para o incremento de produtividade do canalial quanto para preservação do meio ambiente, o que torna importante a realização de estudos sobre a racionalização na aplicação deste efluente. Assim, o presente estudo teve o objetivo de avaliar o potencial da suscetibilidade magnética na identificação de áreas com diferentes capacidades de suporte do solo à aplicação de vinhaça na cultura da cana-de-açúcar. Para determinação dos atributos químicos, determinação dos teores de argila, da medição da suscetibilidade magnética, e da realização do cálculo das doses de vinhaça e da capacidade de suporte do solo à aplicação deste efluente, foram coletadas 86 amostras de solo a cada 30 m, em uma transeção de 2600 m, seguindo o espigão da paisagem ao longo da área cultivada com cana-de-açúcar, de maneira a obter pontos nas diferentes classes de solo, e mais 155 pontos em uma malha de densidade amostral de 1 ponto a cada 2,5 ha, totalizando 241 pontos, na profundidade de 0,00 - 0,80 m, na área experimental de 380 ha. Os dados foram submetidos à análise estatística descritiva e foram construídos modelos de regressão entre a suscetibilidade magnética, e os demais atributos estudados. Foram calculadas as médias de cada atributo conforme as classes de solo da área experimental e foi aplicado o teste de Tukey a 5%. Também foi construído um mapa de aplicação convencional de vinhaça, seguindo as normas da CETESB. A análise da dependência espacial dos dados foi feita por meio da geoestatística, utilizando-se o variograma. Foram construídos mapas de padrão espacial e variogramas cruzados, no sentido de averiguar a correlação espacial entre a suscetibilidade magnética e os atributos estudados. Os resultados indicaram que a suscetibilidade magnética apresentou correlação, espacial e linear, significativa com as doses de vinhaça e capacidade de suporte do solo à aplicação deste efluente, podendo ser utilizada para auxiliar na identificação de áreas com diferentes potenciais à aplicação de vinhaça. A suscetibilidade magnética pode ser utilizada, como função de pedotransferência, na quantificação indireta da capacidade de suporte do solo à aplicação de vinhaça e demais atributos estudados, o que possibilita o aumento do número de pontos de observação e permite a aplicação de técnicas geoestatísticas, facilitando o entendimento da variabilidade dos atributos do solo. A fórmula do cálculo das doses vinhaça proposto pela CETESB é efetiva, porém a densidade amostral sugerida não consegue captar as variações que ocorrem no campo, o que pode resultar na recomendação de doses equivocadas de vinhaça conforme a capacidade de suporte do solo. A recomendação de doses de vinhaça por meio dos mapas de padrão espacial e por classes de solo, apresentaram maior racionalização na aplicação deste efluente do que quando comparada com a recomendação da CETESB, diminuído possíveis riscos de impactos ambientais e aproveitando melhor o potencial fertilizante da vinhaça.

Palavras-chave: geoestatística, pedometria, pedotransferência

2.1 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é uma interessante fonte de energia renovável, e sua importância no cenário agrícola tem crescido significativamente nos últimos anos (SILVEIRA et al., 2012), principalmente pela necessidade de inserção de fontes renováveis na matriz energética mundial. Vários países estão considerando o uso da cana-de-açúcar para a produção de bioenergia e buscando a expansão racional desta cultura (VISCARRA ROSSEL et al., 2010), manejando-a de forma a atingir maiores produtividades com sustentabilidade ambiental.

No processo de industrialização da cana-de-açúcar, diversos resíduos são gerados, merecendo destaque a vinhaça, principal efluente das destilarias, que embora apresente alto poder poluente, também possui alto valor fertilizante (SILVA et al., 2007), logo se manejada de maneira adequada pode contribuir tanto para o incremento de produtividade do canavial quanto para a preservação do meio ambiente.

A vinhaça é rica em água, matéria orgânica, macronutrientes, principalmente potássio (K) e outros elementos traços (FRANCO et al., 2008). Brito et al. (2009) citam que, quando bem manejada, os efeitos da vinhaça nos solos são: elevação do pH; aumento da capacidade de retenção de água; maior desenvolvimento da microflora e microfauna; aumento da capacidade de troca catiônica (CTC); aumento da disponibilidade de alguns nutrientes; e ainda melhoria na estrutura física do solo. Porém, o uso inadequado de vinhaça, por exemplo, pela utilização de doses excessivas, pode acarretar desequilíbrio nutricional para as plantas e poluição das águas subsuperficiais.

Embora a aplicação de vinhaça nos canaviais venha sendo realizada há vários anos, somente em 2006 foi criada pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - CETESB, a Norma P4.231 que dispõe sobre os critérios e procedimentos para aplicação da vinhaça em solos agrícolas.

A norma estabelece que para o cálculo de aplicação de vinhaça, devem ser levados em consideração o teor de K da vinhaça, a CTC e o teor de K do solo; e que cada amostra composta de solo é representativa de uma gleba homogênea de no máximo 100 ha. No entanto, considerando a variabilidade dos nossos solos

(MONTANARI et al., 2005), o conhecimento mais detalhado da distribuição espacial destes atributos levaria à maior racionalização da aplicação deste efluente.

De acordo com McBratney et al. (2003) a geoestatística pode ser utilizada em estudos da variabilidade dos atributos do solo, visando acrescentar informações nos mapeamentos em escalas mais detalhadas. Porém, segundo Cortez et al. (2011) a precisão e exatidão desses procedimentos estão relacionadas com o número de pontos de observação, que resultam em aumento do custo destes mapeamentos.

Na avaliação quantitativa de atributos do solo, a coleta e análise das amostras são as etapas mais intensivas e onerosas (McBRATNEY et al., 2003). Dessa maneira, pesquisadores têm apontado a suscetibilidade magnética (SM) (GRIMLEY & VEPRASKAS, 2000; ROYAL, 2001; SIQUEIRA et al., 2010a) para quantificação indireta de propriedades químicas, físicas e mineralógicas do solo.

A SM é uma característica dos minerais presentes nas rochas e no solo e pode ser definida como a medida da facilidade com que um material magnetiza, na presença de um campo magnético (VEROSUB & ROBERTS, 1995). Segundo Maher e Thompson (1999) os minerais com capacidade magnética armazenam arquivos naturais contendo registros dos fatores e processos de formação do solo. Mathé et al. (2006) mencionam que os minerais magnéticos podem ser considerados como micro-marcadores de atributos do solo, sendo possível estabelecer correlações entre a SM e esses atributos. Dearing et al. (1996), relatam que a SM é ideal para a realização de estudos que requerem uma grande quantidade de amostras.

Diversos autores (CORTEZ et al., 2011; SANTOS et al., 2011) utilizaram a SM em conjunto com técnicas geoestatísticas e compartimentalização da paisagem para identificar locais com diferentes potências de produção de laranja e riscos de erosão, e apontaram que estas técnicas utilizadas em conjunto possibilitam a elaboração de mapas que podem auxiliar no planejamento agrícola e nas tomadas de decisão.

Outros autores (SIQUEIRA et al., 2010a) avaliaram o uso da SM para estimar atributos de um Argissolo Vermelho-Amarelo, e encontraram correlações significativas da SM com teor de argila, CTC, capacidade de adsorção de fósforo e teor de hematita, concluindo que a SM pode ser utilizada em funções de pedotransferência.

Assim, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o potencial da SM na identificação de áreas com diferentes capacidades de suporte do solo à aplicação vinhaça na cultura da cana-de-açúcar.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Localização, caracterização da área e critério de amostragem

O estudo foi realizado em uma área comercial da Usina São Martinho (Figura 2.1), com histórico de mais de dez anos de aplicação de vinhaça, localizada no nordeste do estado de São Paulo, no Município de Guataporã. As coordenadas geográficas são 21°29'48" de latitude sul e 48°02'16" de longitude oeste, com altitude média de 557 m acima do nível do mar. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo megatérmico, tropical com estação seca de inverno (Aw) e precipitação média de 1400 mm, com chuvas concentradas no período de novembro a fevereiro. Esta área está inserida na província geomorfológica do Planalto Ocidental Paulista, próximas ao limite das Cuestas Basálticas no divisor litoestratigráfico arenito-basáltico.

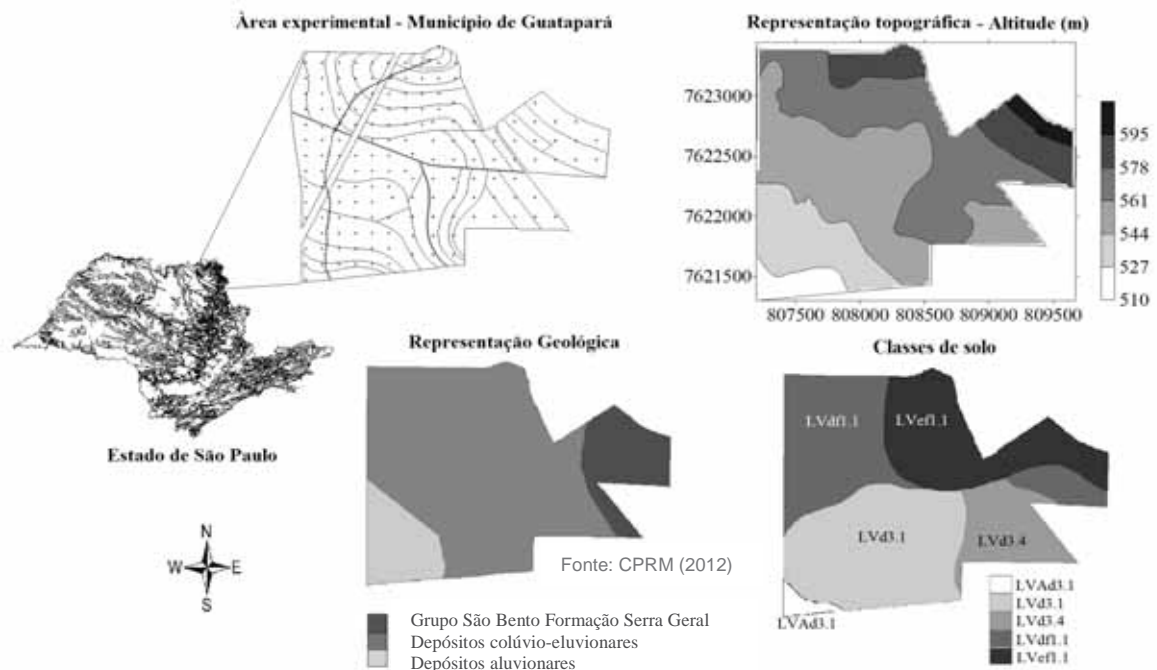


Figura 2.1. Localização da área experimental. Pontos de amostragem, representações topográfica, geológica e das classes de solo.

Na área de experimento (Figura 2.1) foram verificados os materiais de origem, basalto, depósito colúvio eluvionar e depósito aluvionar (CPRM, 2012), e os solos foram classificados, de acordo com o levantamento realizado pelo Centro de Tecnologia Canavieira (CTC) em prestação de serviços à Usina São Martinho, como Latossolo Vermelho distrófico, textura média (LVd3.1; LVd3.4), Latossolo Vermelho distroférico, textura argilosa (LVdf1.1); Latossolo Vermelho eutroférico, textura argilosa (LVef1.1) e Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, textura média (LVAd3.1) (EMBRAPA, 2006), sob cultivo de cana-de-açúcar com colheita mecanizada.

Para realização das análises granulométricas, químicas, e das medições da SM, foram coletadas 86 amostras de solo a cada 30 m, em uma transeção de 2600 m, seguindo o espigão da paisagem, ao longo da área cultivada com cana-de-açúcar, de maneira a obter pontos nas diferentes classes de solo, e mais 155 pontos em uma malha de densidade amostral de 1 ponto a cada 2,5 ha, totalizando 241 pontos, na profundidade de 0,00-0,80 m, na área experimental de 380 ha.

2.2.2 Metodologia de laboratório

As amostras foram secas e passadas em peneira de 2,0 mm de abertura de malha para determinação dos atributos químicos do solo (pH, MO, Ca, Mg, K, e H+Al) e cálculo da capacidade de troca catiônica (CTC) de acordo com Raij et al. (2001). A granulometria do solo foi determinada pela metodologia proposta pela EMBRAPA (1997), e a SM das amostras foi medida por um sensor da Bartington Instruments, conforme metodologia descrita por Dearing (1999).

De acordo com a fórmula proposta na norma P4.231 (CETESB, 2006) procedeu-se o cálculo de aplicação de vinhaça para cada ponto amostral (Equação 1), considerando a CTC e teor de K das análises do solo e a média da concentração de K da vinhaça ($2,825 \text{ kg m}^{-3}$), obtida a partir das análises apresentadas à CETESB pela Usina São Martinho, nas safras 2009/2010, 2010/2011 e 2011/2012.

$$\frac{m^3 \text{vinhaça}}{\text{ha}} = \frac{(0,05 \times CTC - ks) \times 3744 + 185}{kvi}$$

[1]

Em que,

CTC = Capacidade de Troca Catiônica, expressa em cmolc.dm^{-3} , a pH 7,0;

k_s = concentração de potássio no solo, expresso em cmolc.dm^{-3} , a profundidade de 0,80 metros;

3744 = constante para transformar os resultados da análise de fertilidade, expressos em cmolc dm^{-3} ou $\text{meq } 100 \text{ cm}^{-3}$, para kg de potássio em um volume de um hectare por 0,80 metros de profundidade;

185 = kg de K_2O extraído pela cultura por ha, por corte;

k_{vi} = concentração de potássio na vinhaça, expressa em kg de $\text{K}_2\text{O m}^{-3}$

Esta norma estabelece que o K deve ocupar no máximo 5% da CTC dos solos. Desta maneira quanto maior a CTC, maior a quantidade de K necessária para se atingir essa porcentagem. Nesse sentido a fim de avaliar a capacidade de suporte do solo à aplicação deste efluente, utilizou-se a fórmula citada anteriormente, considerando a concentração média de K na vinhaça e adotando o teor de K no solo igual à zero, a fim de calcular a dose máxima do efluente que poderia ser aplicado até que os 5% da CTC do solo seja ocupada por esse elemento.

2.2.3 Análise dos dados

2.2.3.1 Estatística descritiva

Os dados foram submetidos à análise estatística descritiva, obtendo-se os valores de média, mediana, coeficiente de variação, máximo, mínimo, assimetria e curtose. A partir dos pontos da transeção foram construídos modelos de regressão entre a SM e os demais atributos estudados, por meio da utilização do software estatístico Minitab 13.1 (MINITAB, 2000). A SM foi utilizada como função de pedotransferência, por meio do modelo de regressão obtido, para estimar as doses de vinhaça e capacidade de suporte do solo à aplicação deste efluente, para cada ponto amostral.

Com base na carta de solos da área experimental, a partir dos pontos amostrais contidos em cada classe, foram calculados os valores médios dos atributos estudados para cada classe de solo. Também foi construído o mapa de recomendação convencional de vinhaça, seguindo a densidade amostral de 1 ponto a cada 100 ha (CETESB, 2006), a partir da concentração média de K na vinhaça, obtida conforme citado anteriormente, e da análise de solo de um ponto da grade amostral do experimento, que foi escolhido visando manter a homogeneidade das glebas conforme as classes de solo. A dose média de vinhaça ponderada pela área foi calculada para o mapa de recomendação convencional, a fim de compará-la com os valores médios ponderados pela área das doses e capacidade de suporte do solo, obtidos a partir dos mapas de classes de solo e mapas de padrão espacial.

2.2.3.2 Geoestatística

A análise da dependência espacial dos dados foi feita por meio da geoestatística (VIEIRA et al., 1983), utilizando-se os variogramas que foram estimados com base nas pressuposições de estacionariedade da hipótese intrínseca. Os variogramas foram modelados com o auxílio do software GS+ - Geostatistics for Environmental Sciences (ROBERTSON, 1998), e os modelos matemáticos ajustados aos variogramas experimentais, a partir dos quais foi determinado o grau de dependência espacial de cada atributo estudado. Os valores interpolados por meio da krigagem foram usados para construção de mapas dos atributos estudados por meio do software Surfer (1999). As correlações espaciais da SM com os atributos estudados foram avaliadas por variogramas cruzados.

Os variogramas experimentais foram escolhidos com base no número de pares envolvidos no cálculo da semivariância dos primeiros lags, presença de patamar claramente definido e valor do R^2 para o modelo ajustado e validação cruzada (BURROUGH; MCDONNEL 1998).

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise do CV possibilita a comparação entre os atributos estudados, sendo um alto CV o primeiro indicativo da heterogeneidade dos dados (Tabela 2.2). De acordo com a classificação de Warrick e Nielsen (1980) o teor de MO e a capacidade de suporte enquadram-se na classe moderada ($12\% < CV < 24\%$) enquanto que todos os outros atributos enquadram-se na classe alta ($CV \geq 24\%$). Dentre os atributos estudados, a SM e o teor de argila apresentaram grandes amplitudes dos dados. Tais fatos podem estar relacionados à variação dos materiais de origem dos solos encontrados na área do experimento, que está inserida em um divisor litoestratigráfico arenito-basáltico. Fontes et al. (2000) mostraram a variação da SM dos solos em função de diferentes materiais de origem. O teor de argila geralmente é um atributo que apresenta baixo ou médio CV, devido a maior dificuldade de ocorrerem alterações na granulometria dos solos, porém neste trabalho a argila apresentou um alto CV, fato que está relacionado à grande variação das classes de solo na área experimental.

Tabela 2.2. Estatística descritiva dos atributos estudados para os 241 pontos coletados na área de 380 ha.

Atributo	Média	Mediana	CV (%)	Mínimo	Máximo	Assimetria	Curtose
Argila (g Kg ⁻¹)	425,41	454,50	28,88	83,00	619,50	-0,61	-0,48
MO (g dm ⁻³)	30,41	30,00	20,46	16,00	50,00	0,13	-0,10
K ⁺ (mmolc dm ⁻³)	1,82	1,50	60,98	0,30	8,00	1,75	4,58
CTC (mmolc dm ⁻³)	77,18	73,70	25,12	37,40	152,60	0,76	0,71
Vinhaça (m ³ ha ⁻¹)	344,40	352,34	37,36	61,21	702,21	0,04	-0,44
Cap. Suporte (m ³ ha ⁻¹)	577,53	554,53	22,18	313,32	1076,70	0,76	0,72
SM (10 ⁻⁸ m ³ kg ⁻¹)	3015,00	3200,00	54,06	168,00	7458,00	0,03	-0,82

Cap. Suporte= Capacidade de suporte do solo à aplicação de vinhaça; CTC= Capacidade de troca catiônica; CV= Coeficiente de variação; K⁺=Potássio; MO= Matéria orgânica; SM= Suscetibilidade magnética.

Foram observados valores semelhantes de média e mediana para todos os atributos estudados, o que caracteriza distribuições simétricas e possibilita a aplicação das técnicas geoestatísticas. Os atributos estudados, com exceção do K, também apresentaram valores de assimetria e curtose próximos à zero (Tabela 2.2), o que indica distribuições levemente assimétricas sem problemas com valores

extremos. Segundo Warrick e Nielsen (1980), em se tratando de dados obtidos na natureza, o ajuste a uma distribuição teórica é apenas aproximado. A normalidade dos dados não é uma exigência da geoestatística, é conveniente apenas que a distribuição não apresente caudas muito alongadas, o que poderia comprometer as análises. O fato do K apresentar valores de assimetria e curtose mais distantes de zero, e um alto valor de CV, está relacionado à dinâmica deste nutriente no solo, e ao manejo realizado na área, dentre eles a própria aplicação de vinhaça, que é realizada nesta fazenda a mais de uma década.

Foram encontradas relações diretas da SM com a CTC, com os teores de argila, com a MO, com as doses de vinhaça, e com a capacidade de suporte do solo à aplicação de vinhaça, já com o K não foi encontrada relação (Figura 2.4). Hanesch & Scholger (2005), também encontraram correlações significativas da SM com atributos químicos e físicos de diferentes classes de solos. Mullins (1977) aponta que a SM apresenta correlação com argila e MO. A presença de MO favorece um aumento da SM, pois proporciona as condições necessárias para redução de ferro. Santana et al. (2001) postularam que, por meio de sucessivas oxidações de Fe^{2+} em Fe^{3+} , é possível transformar magnetita em hematita, de menor expressão magnética nos solos. Segundo Hanesch et al. (2006) dentre outros fatores, a MO favorece a transformação do Fe pedogenético, causando a neoformação de minerais com característica magnética. Fontes et al. (2000) mencionam que o comportamento magnético também é mais evidente em solos cuja fração argila é maior. Isso ocorre porque, na fração areia, a magnetita é oxidada diretamente a hematita, enquanto que na fração argila a magnetita é oxidada em maghemita, que possui maior SM do que a hematita.

Tais fatos demonstram que a SM é correlacionada com a textura e com a MO, que estão entre os fatores responsáveis pela CTC e o K dos solos (RAIJ, 1969). Como a CTC e o K são utilizados no cálculo da CETESB para determinação das doses de vinhaça, a SM pode ser utilizada como função de pedotransferência na quantificação indireta das doses e capacidade de suporte do solo à aplicação deste efluente.

Após a realização da estimativa das doses e da capacidade de suporte do solo à aplicação de vinhaça, em função da SM, a partir do modelo de regressão

obtido, foram calculados os valores médios dos atributos estudados para cada classe de solo (Tabela 2.3). A divisão por classes de solo permitiu a análise mais detalhada do comportamento dos atributos do solo e doses de vinhaça.

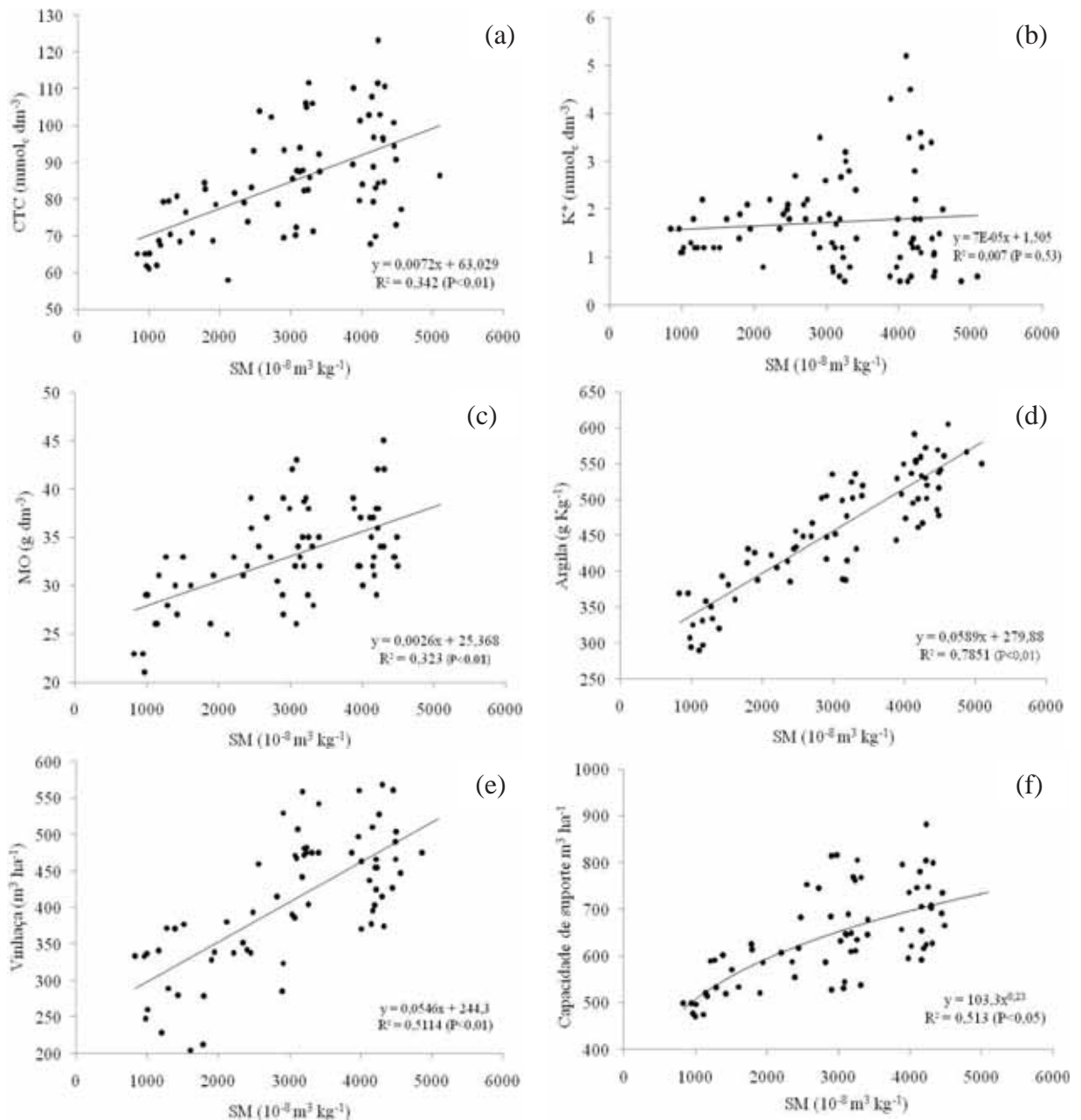


Figura 2. 4. Modelos de regressão entre suscetibilidade magnética e os atributos estudados. a) Capacidade de troca catiônica; b) Potássio; c) Matéria orgânica; d) argila; e) Vinhaça; f) Capacidade de suporte do solo à aplicação de vinhaça.

Observa-se na Tabela 2.3 que houve variação dos atributos estudados conforme as classes de solo, com maiores teores de SM nas áreas de solos mais argilosos, oriundos de basalto com maiores teores de Fe, diferindo estatisticamente das áreas com solos de textura média. Fabris et al. (1998) e Fontes et al. (2000) apontam que a SM de fato apresenta variação em função das classes de solo e dos materiais de origem, sendo encontrados maiores teores de SM em solos originados de rochas basálticas, em relação às sedimentares.

Os teores de MO e CTC também diferiram estatisticamente entre os solos de textura média e solos argilosos, apresentando nestas classes de solo os maiores teores (Tabela 2.3). Enquanto o K apresentou valores mais elevados na área de LVef, diferindo estatisticamente das demais classes de solo que apresentaram valores semelhantes deste macronutriente. Isto ocorreu devido à aplicação de uma dose mais elevada de vinhaça nos talhões de cana que correspondem a área do LVef, em relação as demais áreas.

Quanto à capacidade de suporte, foram constatadas diferenças estatísticas entre as classes de solos, sendo que os solos férricos (LVef e LVdf) que possuem maiores teores de argila, MO, CTC, e SM apresentaram potencial a receber as maiores doses do efluente (Tabela 2.3). Para as doses de vinhaça, os Latossolos férricos apresentaram diferença estatística dos Latossolos Vermelho de textura média, porém, não diferiram estatisticamente do Latossolo Vermelho-Amarelo, que mesmo apresentando menor capacidade de suporte, recebeu maiores doses de vinhaça devido ao seu baixo teor de K. Tais fatos estão de acordo com o proposto pela CETESB (2006), que sugere que quanto maior a CTC e menor o teor de K nos solos, maior a dose de vinhaça que pode ser aplicada.

Em todas as classes de solo a porcentagem do K em relação à CTC se encontra abaixo de 3% (Tabela 2.3), indicando possibilidade de aplicação de doses mais altas de vinhaça até que seja atingido o limite de 5% permitido pela norma da CETESB. Não foi constatada diferença estatística da porcentagem do K em relação à CTC entre as classes de solo, o que denota um mesmo padrão no comportamento deste macronutriente, mesmo em escalas diferentes para cada tipo de solo da área experimental.

Tabela 2.3. Médias dos atributos estudados por classes de solo.

Classes de solo	Área ha	SM $10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$	Argila g Kg^{-1}	MO	CTC $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$	K ⁺	(K/CTC) x100 %	Vinhaça	Vinhaça est. $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$	CS	CS est.
LVAd3.1	7	952 cd	315 b	26 bc	62 bc	1,2 b	1,9a	336 ab	296 cd	476 bc	496 c
LVd3.1	126	1728 c	361 b	28 b	69 b	1,7 b	2,5a	291 b	339 c	519 b	557 b
LVd3.4	47	633 d	207 c	22 c	55 c	1,5 b	2,7a	250 b	279 d	431 c	444 c
LVdf1.1	107	3841 b	477 a	33 a	84 a	1,8 b	2,1a	389 a	454 b	621 a	685 a
LVef1.1	93	4510 a	512 a	33 a	88 a	2,4 a	2,6a	369 a	491a	645 a	709 a
Média pond.	380	2854	411	30	76	2	2,4	333	400	567	615

LVd= Latossolo Vermelho distrófico; LVef= Latossolo Vermelho eutrófico; LVAd= Latossolo Vermelho Amarelo distrófico; LVdf= Latossolo Vermelho distrófico; SM= Suscetibilidade magnética; CS= Capacidade de Suporte do solo a aplicação de vinhaça; CS est.= Capacidade de Suporte do solo a aplicação de vinhaça estimada por meio da SM; (K/CTC)x100= Porcentagem do teor de K do solo em relação à capacidade de troca catiônica do solo; Média pond.= Média ponderada pela área; Vinhaça est.= Dose de vinhaça estimada por meio da SM; Médias apresentadas com letras diferentes, na coluna, diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

Na Figura 2.5, é apresentado o mapa de aplicação de vinhaça, seguindo a metodologia amostral da CETESB em que 1 ponto é representativo de uma gleba homogênea de até 100 ha. As doses de vinhaça recomendadas para as áreas I, II, III e IV, foram $680 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, $470 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, $600 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ e $380 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, respectivamente. Já para a área total do experimento (380 ha), a dose média de vinhaça ponderada pela área, recomendada pelo método convencional (calculada a partir das doses obtidas para as áreas I, II, III e IV e suas respectivas áreas em ha) foi de $548 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, 39% superior à dose recomendada para a área total, em função das classes de solo ($333 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) e 27% superior às doses de vinhaça estimada pela SM ($400 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) (Tabela 2.3). Quando comparada com as médias ponderadas para a área total, da capacidade de suporte ($567 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) e da capacidade de suporte estimada ($615 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) obtidas em função das classes de solo (Tabela 2.3), a dose média calculada a partir dos resultados de densidade de amostragem do solo convencional ($548 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$), mostrou-se muito próxima destas.

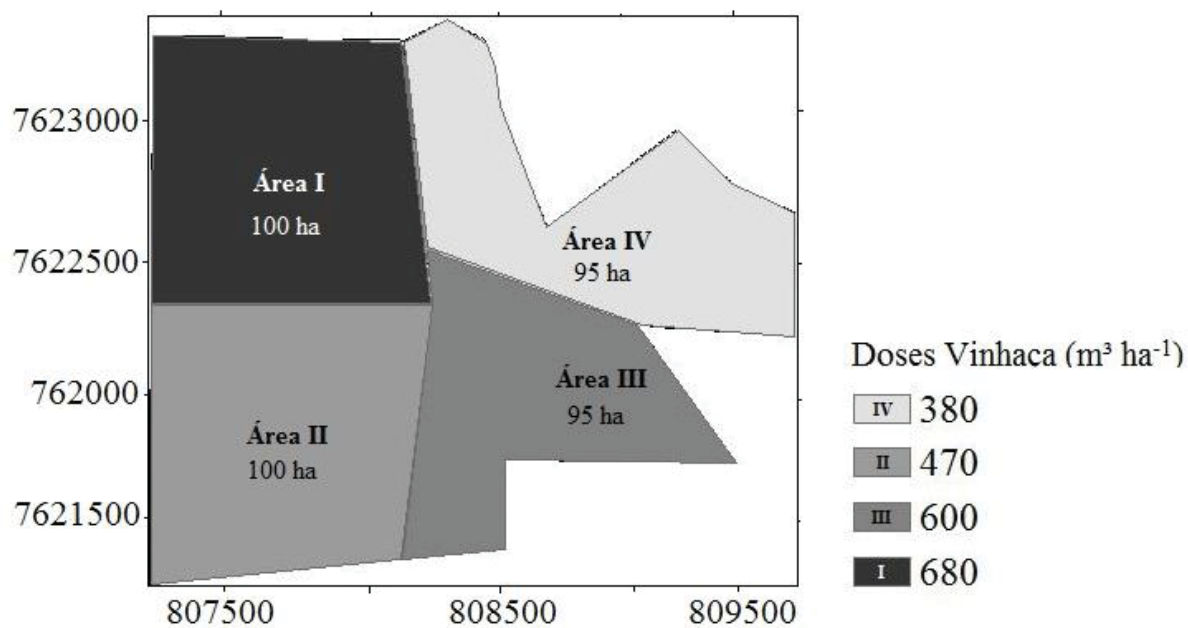


Figura 2.5. Mapa de aplicação de vinhaça pelo método de amostragem recomendado pela CETESB.

Embora as usinas sucroalcooleiras não realizem aplicação de doses tão elevadas de vinhaça por questões agrônômicas e industriais, uma vez que segundo Malavolta; Vitti; Oliveira (1989) o excesso de K pode ser prejudicial à cultura,

induzindo à falta de magnésio e aumentando o teor de cinzas no caldo (CASAGRANDE, 1991), a norma P4.231 (CETESB, 2006) permite a aplicação dessas doses. Mediante a variabilidade dos solos da área experimental, e às características fertilizantes e poluentes da vinhaça (SILVA et al., 2007), a recomendação deste efluente determinada pelo método amostral convencional pode levar a uma aplicação equivocada, aplicando em alguns locais mais vinhaça do que a capacidade de suporte do solo, com grandes riscos de contaminação do meio ambiente e desbalanço nutricional para as plantas, e em outros locais aplicando doses mais baixas, com subaproveitamento do seu potencial fertilizante.

Esses resultados indicam que a recomendação das doses conforme as classes de solo levariam a uma racionalização considerável na aplicação da vinhaça. Porém, segundo Montanari et al. (2005) ocorre variabilidade dentro das classes de solo, logo a aplicação de técnicas geoestatísticas, pode auxiliar na melhor compreensão da variabilidade e dos limites de campo (McBRATNEY et al., 2003).

Nesse sentido, foram gerados variogramas experimentais para SM, argila, MO, CTC, K, doses de vinhaça, doses estimadas de vinhaça, capacidade de suporte e capacidade de suporte estimada do solo, a fim de verificar a dependência espacial destes atributos (Tabela 2.4).

Todos os atributos estudados apresentaram dependência espacial (Tabela 2.4), sendo os modelos esférico, exponencial e gaussiano os que apresentaram melhores ajustes à estrutura da variabilidade espacial dos dados, com base no número de pares envolvidos no cálculo da semivariância dos primeiros lags, presença de patamar claramente definido e valor do R^2 para o modelo ajustado e validação cruzada (BURROUGH; MCDONNEL 1998). McBratney; Webster (1986), em seus estudos sobre modelos de ajuste ao variograma para atributos do solo, indicaram os modelos esféricos e exponenciais como os mais encontrados.

Segundo Cambardella et al. (1994), o modelo esférico foi considerado o mais adaptado para descrever o comportamento de atributos do solo. Vale ressaltar que a CTC, as doses de vinhaça estimadas, a capacidade de suporte, a capacidade de suporte estimada e a SM, foram ajustados ao modelo esférico. Cortez et al. (2011), trabalhando com técnicas geoestatísticas e compartimentalização da paisagem para

delimitações de zonas específicas de manejo para citricultura, também encontraram em seus estudos ajustes dos variogramas da SM ao modelo esférico.

Tabela 2.4. Geoestatística para os atributos estudados.

Variável	Modelo	Efeito pepita (C ₀)	Patamar (C ₀ +C ₁)	Alcance (a)	[C ₀ /(C ₀ +C ₁)] x100	R ²
Argila (g Kg ⁻¹)	Exponencial	7,40	97,40	1284	7,59	0,98
MO (g Kg ⁻¹)	Exponencial	8,90	26,76	435	33,26	0,89
K ⁺ (mmol _c , dm ⁻³)	Exponencial	0,29	0,83	519	36,03	0,95
CTC (mmol _c dm ⁻³)	Esférico	100,00	434,20	844	23,03	0,96
Vinhaça (m ³ ha ⁻¹)	Gaussiano	7640,00	17750,00	928	43,04	0,99
Vinhaça est. (m ³ ha ⁻¹)	Esférico	446,00	3079,00	1226	14,48	0,96
CS (m ³ ha ⁻¹)	Esférico	4260,00	18190,00	874	23,42	0,98
CS est. (m ³ ha ⁻¹)	Esférico	172,82	4671,04	870	3,69	0,91
SM (10 ⁻⁸ m ³ kg ⁻¹)	Esférico	140000,00	1171000,00	1136	11,96	0,96

CTC= Capacidade de troca catiônica; CS= Capacidade de Suporte do solo a aplicação de vinhaça; CS est.= Capacidade de Suporte do solo a aplicação de vinhaça estimada por meio da SM; K⁺= Potássio; MO= Matéria Orgânica; SM= Suscetibilidade Magnética.

Os alcances da argila, das doses de vinhaça, das doses de vinhaça estimada, da capacidade de suporte e da capacidade de suporte estimada foram próximos do alcance da SM do solo, o que indica um padrão de variabilidade semelhante entre esses atributos (Tabela 2.4). Isto reforça a ideia do uso eficiente da SM para auxiliar nos levantamentos taxonômicos e técnicos (CORTEZ et al., 2011). Marques Jr (2009) e Siqueira (2010c) também encontraram valores semelhantes de alcance de variogramas dos atributos físicos e químicos de Latossolos e da SM.

A análise da relação $C_0/(C_0 + C_1)$ para a argila, CTC, doses de vinhaça estimada, capacidade de suporte, capacidade de suporte estimada e SM, mostrou que esses possuem forte grau de dependência espacial, enquanto as doses de vinhaça, o K e a MO; apresentaram dependência espacial moderada (Tabela 2.4), de acordo com a classificação proposta por Cambardella et al. (1994). Para estudar a variabilidade e a fim de verificar a existência de correlação espacial foram construídos mapas de padrão espacial (Figura 2.6), e variogramas cruzados dos atributos estudados em função da SM do solo (Figura 2.7). Os mapas dos atributos estudados apresentaram padrão semelhante ao mapa de classes de solos e ao mapa de relevo. Siqueira et al. (2010b) relatam que o relevo tem grande influência na variabilidade espacial dos atributos do solo.

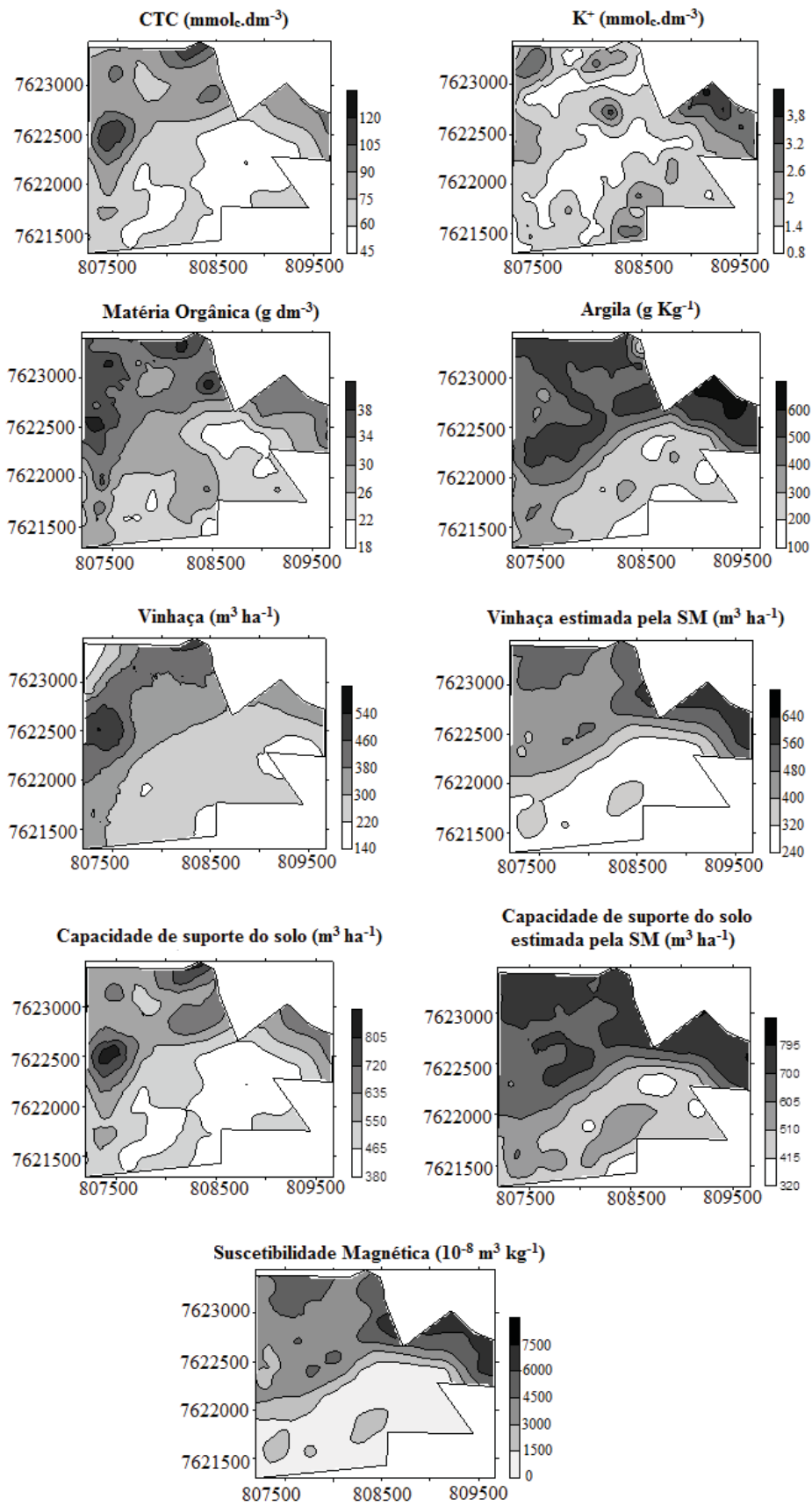


Figura 2.6. Mapas de padrão espacial dos atributos estudados.

É possível verificar grande similaridade do padrão espacial das doses de vinhaça obtidos pelo cálculo da CETESB e das doses de vinhaça estimada pela SM, bem como ocorre entre os padrões espaciais da capacidade de suporte e capacidade de suporte estimada (Figura 2.6). Verifica-se também por meio dos mapas, os mesmos padrões de isolinhas dos mapas de CTC e K. Como esses atributos são utilizados no cálculo de determinação das doses de vinhaça (CETESB, 2006), o padrão espacial dos mesmos influencia diretamente nos mapas de aplicação deste efluente.

Foram verificados nos mapas, maiores valores de CTC e K nas áreas de maiores teores de argila e MO. Segundo Raij (1969) dentre os fatores que afetam a CTC dos solos estão, a textura e a MO, sendo que a participação da MO na CTC dos solos do estado de São Paulo varia de 30% a 90%, com média de 74%. Já as fontes de K nos solos tropicais, baseiam-se principalmente na MO e na adição por meio da adubação, uma vez que em solos tropicais muito intemperizados, os minerais presentes são geralmente pobres nesse elemento (RAIJ et al. 2011). As isolinhas dos mapas de argila e MO também são semelhantes com as do mapa da SM, nos quais é possível observar elevação dos teores de SM conforme se aumenta os teores de argila e MO (Figura 2.6). Corroborando os resultados obtidos por Siqueira et al. (2010a), que encontraram correlações positivas da SM com esses dois atributos do solo.

Na análise dos mapas também é possível observar que a continuidade espacial da SM foi similar à continuidade espacial das doses de vinhaça e da capacidade suporte do solo (Figura 2.6). Regiões da área experimental com maiores teores de SM coincidem com áreas com potencial a receber maiores doses de vinhaça.

Todos variogramas cruzados apresentaram correlação espacial definida positiva (Figura 2.7), indicando que com o aumento da SM ocorre aumento dos atributos estudados, o que está de acordo com os resultados encontrados nas análises de regressão, que com exceção do K, também apresentaram correlações positivas da SM com os demais atributos estudados.

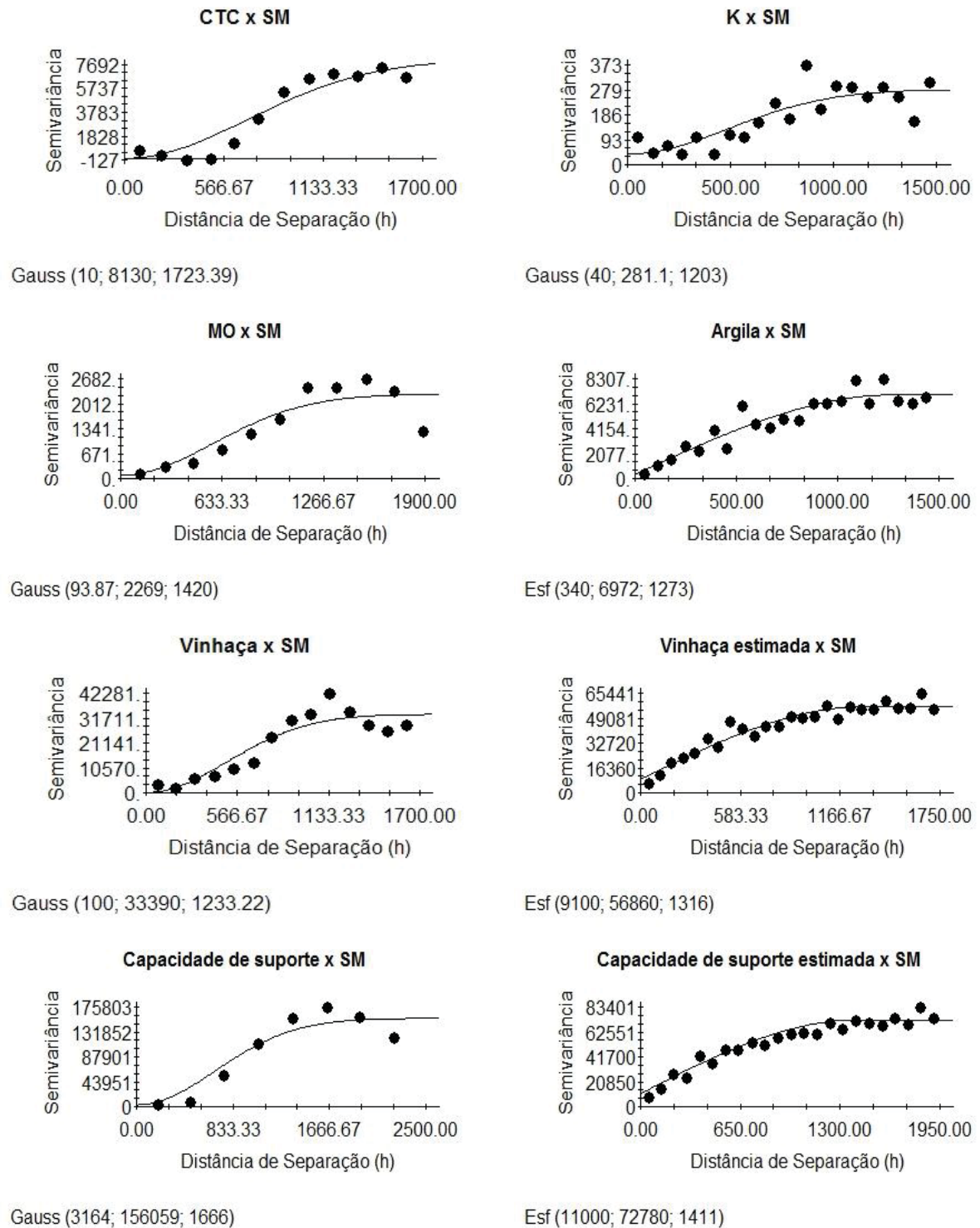


Figura 2.7. Variogramas cruzados dos atributos estudados em função da SM.

Vale ressaltar a correlação espacial positiva das doses de vinhaça, doses de vinhaça estimadas, capacidade de suporte e capacidade de suporte estimada com a SM, o que reforça a ideia de que a SM pode ser utilizada como ferramenta para

auxiliar no mapeamento de áreas com diferentes potenciais à aplicação de vinhaça nos solos agrícolas.

Calculando-se o valor médio ponderado pela área, para a área total do experimento, das doses de vinhaça ($273 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) e doses de vinhaça estimada ($382 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) de acordo com os mapas de padrão espacial (Figura 2.6), verificou-se menores doses quando comparada com a recomendação convencional (Figura 2.5) e com a recomendação por classes de solo (Tabela 2.3), demonstrando uma racionalização ainda maior na aplicação.

Os valores médios ponderados pela área dos mapas de padrão espacial, das capacidades de suporte ($495 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) e capacidade de suporte estimada ($560 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$), foram inferiores aos valores de capacidades de suporte obtidos por classes de solo (Tabela 2.3). Uma vez que os mapas de padrão espacial representam melhor a variabilidade do solo, pode-se concluir que as possibilidades de superestimar as doses de vinhaça pelo método de amostragem convencional foram ainda maiores do que quando analisados pela comparação com as capacidades de suporte médias, calculadas por classes de solo.

2.4 CONCLUSÕES

1. A suscetibilidade magnética apresentou correlação, espacial e linear, significativa com as doses de vinhaça e capacidade de suporte do solo à aplicação deste efluente, podendo ser utilizada para auxiliar no mapeamento e na identificação de áreas com diferentes potenciais à aplicação de vinhaça.

2. A suscetibilidade magnética pode ser utilizada, como função de pedotransferência, na quantificação indireta da capacidade de suporte do solo à aplicação de vinhaça, o que possibilita o aumento do número de pontos de observação e permite a aplicação de técnicas geoestatísticas, facilitando o entendimento da variabilidade dos atributos do solo.

3. A fórmula do cálculo das doses de vinhaça proposto pela CETESB é efetiva, porém a densidade amostral sugerida não consegue captar as variações que

ocorrem no campo, o que pode resultar na recomendação de doses equivocadas de vinhaça conforme a capacidade de suporte do solo.

4. A recomendação de doses de vinhaça por meio dos mapas de padrão espacial e por classes de solo, apresentaram maior racionalização na aplicação deste efluente do que quando comparada com a recomendação da CETESB, diminuindo possíveis riscos de impactos ambientais e aproveitando melhor o potencial fertilizante da vinhaça.

2.5 REFERÊNCIAS

BRITO, F. L.; ROLIM, M. M.; PEDROSA, E. M. R. Efeito da aplicação de vinhaça nas características químicas de solos da zona da mata de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v.4, n.4, p.456-462, 2009.

BURROUGH, P.A., MCDONNELL, R.A., **Principles of Geographical Information Systems**. Oxford, Oxford University Press, 1998. 330 p.

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 Soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, n.5, p.1501-1511, 1994.

CASAGRANDE, A. A. **Tópicos de morfologia e fisiologia da cana-de-açúcar**. Jaboticabal: FUNEP, 1991. 157p.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Geobank - Mapa geológico do estado de São Paulo, na escala 1:750000**. Disponível em: <http://geobank.sa.cprm.gov.br/>. Acesso em 29 dez. 2012.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL – CETESB. **Norma técnica P4.231**. São Paulo, 2006.17p.

CORTEZ, L. A.; MARQUES JR., J.; PELUCO, R. G.; TEIXEIRA, D. B.; SIQUEIRA, D. S. Suscetibilidade magnética para identificação de áreas de manejo específico em citricultura. **Energia na agricultura**, Botucatu, v.26, p.60-79, 2011.

DEARING, J.A.; HAY, K.L.; BABAN, S.M.K.; HUDDLESTON, A.S.; WELLINGTON, E.M.H.; LOVELAND, P.J. Magnetic susceptibility of soil: an evaluation of conflicting theories using a national data set. **Geophysical Journal International**, v. 127, p. 728-734, 1996.

DEARING, J. A. **Environmental magnetic susceptibility: Using the Bartington MS2 system**. 2 ed. Kenilworth: Chi Publishing, 1999. 54p.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2 ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA Centro Nacional e Pesquisa em Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa-SPI; Rio de Janeiro: Embrapa-Solos, 2006. 306 p.

FABRIS, J.D.; COEY, J.M.D.; MUSSEL, W.N. Magnetic soils from mafic lithodomains in Brazil. **Hyperfine Interactions**, v. 113, p. 249-258, 1998.

FONTES, M. P. F.; OLIVEIRA, T. S.; COSTA, L. M. & CAMPOS, A. A. G. Magnetic separation and evaluation of magnetization of Brazilian soils from different parent materials. **Geoderma**. Amsterdam, v.96, p.81-99, 2000.

FRANCO, A. MARQUES, M. O., MELO, W. J. Sugarcane grown in an oxisol amended with sewage sludge and vinasse: nitrogen contents in soil and plant. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.65, p.408-414, 2008.

GRIMLEY, D. A.; VEPRASKAS, M. J. Magnetic Susceptibility for Use in Delineating Hydric Soils. Madison, **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, n. 6, p. 2174-2180, 2000.

HANESCH, M. & SCHOLGER, R. The influence of soil type on the magnetic susceptibility measured throughout soil profiles. **Geophysical Journal International**, v.161, p.50–56, 2005.

HANESCH, M.; STANJEK, H.; PETERSEN, N. Thermomagnetic measurements of soil iron minerals: The role of organic carbon. **Geophysical Journal International**, v.165, p.53–61, 2006.

MAHER, B.A.; THOMPSON, R. The magnetic record of palaeoclimate in the terrestrial loess and palaeosol sequences, in Quaternary Climates. In: **Environments and Magnetism** (eds MAHER, B.A. & THOMPSON, R.). University Press, Cambridge, p. 81–125, 1999.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1989.

MARQUES JR, J. **Caracterização de áreas de manejo específico no contexto das relações solo-relevo**. 2009. 113 f. Tese (Livre-Docência) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2009.

MATHÉ, V.; LÉVÊQUE, F.; MATHÉ, P. E.; CHEVALLIER, C.; PONS, Y. Soil anomaly mapping using a caesium magnetometer: Limits in the low magnetic amplitude case. **Journal of Applied Geophysics**, Amsterdam, v. 58, n. 3, p. 202– 17, 2006.

McBRATNEY, A.B.; WEBSTER, R. Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. **Journal Soil Science**, v.37, p. 617-639, 1986.

McBRATNEY, A. B.; SANTOS, M. L. M.; MINASNY, B. On digital soil mapping. **Geoderma**, Amsterdam, v. 117, n. 1-2, p. 3-52, 2003.

MINITAB, Release. **Making Data analysis Easier**: version 13.1, 2000.

MONTANARI, R.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; SOUZA, Z. M. Forma da paisagem como critério para otimização amostral de latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40 n. 1, p. 69-77, 2005.

MULLINS, C. E. Magnetic susceptibility of the soil and its significance in soil science - a review. **Journal of Soil Science**, v.28, p.223-246, 1977.

RAIJ, B. van A capacidade de troca de cátions das frações orgânica e mineral em solos. **Bragantia**, Campinas, v.28, p.85-112, 1969.

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

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba, International Plant Nutrition Institute, 2011. 420p.

ROBERTSON, G. P. **GS+: geostatistics for the environmental sciences – GS+ user's guide**. Plainwell: Gamma Design Software, p. 152, 1998.

ROYALL, D. Use of mineral magnetic measurements to investigate soil erosion and sediment delivery in a small agricultural catchment in limestone terrain. **Catena**, Amsterdam, v.46,p.15-34, 2001.

SANTANA, G. P.; FABRIS, J. D.; GOULART, A. T.; SANTANA, D. P. Magnetite and its transformation to hematite in a soil derived from steatite. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, p.33-42, 2001.

SANTOS, H. L.; MARQUES JUNIOR, J.; MATIAS, S. S. R.; SIQUEIRA, D. S.; PEREIRA, G. T. Suscetibilidade magnética na identificação de compartimentos da paisagem em uma vertente. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v.6, p.710-716, 2011.

SILVA, M. A. S.; GRIEBELER, N. P.; BORGES, L. C. Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.11, p.108-114, 2007.

SILVEIRA, L. C. I.; KIST, V.; PAULA, T. O. M.; BARBOSA, M. H. P.; OLIVEIRA, R. A.; DAROS, E. Adaptabilidade e estabilidade fenotípica de genótipos de cana-de-açúcar no estado de Minas Gerais. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.42, p.587-593, 2012.

SIQUEIRA, D. S.; MARQUES JR., J.; MATIAS, S. S. R.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; BAFFA, O.; OLIVEIRA, L. C. Correlation of properties of Brazilian Haplustalfs with magnetic susceptibility measurements. **Soil Use and Management**, Oxford, v.26, p.425-431, 2010a.

SIQUEIRA, D.S., MARQUES JR., J., PEREIRA, G.T. The use of landforms to predict the variability of soil and orange attributes. **Geoderma** v. 155, 55-66, 2010b.

SIQUEIRA, D.S. **Suscetibilidade magnética para a estimativa de atributos do solo e mapeamento de áreas sob cultivo de cana-de-açúcar**. 2010. 75 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2010c.

SURFER. **Surfer 7.0. Contouring and 3D surface mapping for scientist's engineers**: user's guide. New York: Golden software, p. 619, 1999.

VEROSUB, K. L.; ROBERTS, A. P. Environmental magnetism: past, present and future. **Journal of Geophysical Research**, v.100, p.2175-2192, 1995.

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

VISCARRA ROSSEL, R.A.; RIZZO, R.; DEMATTÊ, J.A.M.; AND T. BEHRENS,T. Spatial modelling of a soil fertility index using vis-NIR spectra and terrain attributes, **Soil Science Society American Journal**. Madison, v.74, p.1293-1300, 2010.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (ed.) **Applications of soil physics**. New York: Academic, 1980. p.319-344.

CAPÍTULO 3. ESPECTROSCOPIA DE REFLECTÂNCIA DIFUSA E SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA NA IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS COM DIFERENTES POTENCIAIS À ADSORÇÃO DE FÓSFORO

1. **Resumo** – O fósforo é um macronutriente caracterizado por ser um dos principais fatores limitantes à longevidade e desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar. O baixo teor de fósforo disponível no solo é a limitação nutricional mais generalizada na produção agrícola, entretanto, é baixa a eficiência da adubação fosfatada, pois grande parte do fósforo adicionado torna-se imóvel ou não-disponível, em virtude de reações de adsorção em colóides minerais, precipitação ou conversão em formas orgânicas. Assim, a identificação de áreas de adsorção de fósforo poderia contribuir muito para o manejo mais eficiente deste nutriente. O presente trabalho teve como objetivo avaliar a utilização da espectroscopia de reflectância difusa e da suscetibilidade magnética na identificação de áreas com diferentes potenciais à adsorção de fósforo na cultura da cana-de-açúcar. Para determinação do fósforo adsorvido, do teor de argila e medições da suscetibilidade magnética e espectroscopia de reflectância difusa, foram coletadas 86 amostras de solo a cada 30 m, em uma transeção de 2600 m, seguindo o espigão da paisagem, ao longo da área cultivada com cana-de-açúcar, de maneira a obter pontos nas diferentes classes de solo, e mais 155 pontos em uma malha de densidade amostral de 1 ponto a cada 2,5 ha, totalizando 241 pontos, na profundidade de 0,00 - 0,25 m, na área experimental de 380 ha. A partir dos dados de cor do solo (matiz, valor e croma) foi calculado um índice de avermelhamento. Foram construídos modelos de regressão entre o fósforo adsorvido, a suscetibilidade magnética e o índice de avermelhamento. Os dados foram submetidos à análise estatística descritiva e também foram calculadas as médias de cada atributo conforme as classes de solo da área experimental e foi aplicado o teste de Tukey a 5%. A análise da dependência espacial dos dados foi feita por meio da geoestatística, utilizando-se o variograma. Foram construídos mapas de padrão espacial e variogramas cruzados, no sentido de averiguar a correlação espacial entre a suscetibilidade magnética, o índice de avermelhamento, os teores de argila e o fósforo adsorvido. Os resultados obtidos indicaram que a suscetibilidade magnética apresentou correlação linear e espacial com o fósforo adsorvido, possibilitando sua utilização em funções de pedotransferência. Já o índice de avermelhamento não apresentou correlação linear, no entanto apresentou correlação espacial com o fósforo adsorvido. A suscetibilidade magnética e o índice de avermelhamento podem auxiliar no mapeamento e na identificação de áreas de adsorção de fósforo. A utilização de técnicas Geoestatísticas é de extrema importância em estudos da variabilidade de atributos do solo, pois consegue obter resultados não verificados somente pela utilização da estatística clássica.

Palavras-chave: Pedotransferência, geoestatística, variabilidade espacial

3.1 INTRODUÇÃO

O mapeamento da variabilidade espacial dos atributos do solo é de grande importância para o planejamento sustentável das práticas agrícolas (BARBIERI et al. 2008). Porém, este tipo de estudo requer um elevado número de amostras, aumentando o tempo e os custos, tanto na atividade de amostragem de solo quanto nas análises laboratoriais.

Desta forma alguns autores propõem o uso de funções de pedotransferência, que são cada vez mais utilizadas na agricultura moderna para estimar indiretamente atributos do solo de maneira simples e rápida. Segundo McBratney et al. (2002), funções de pedotransferência podem ser definidas como modelos matemáticos utilizados para fazer estimativas de atributos dos solos a partir de outros atributos medidos com maior facilidade e baixo custo. Dois atributos que apresentam facilidade de mediação e podem ser utilizados para determinar indiretamente atributos do solo, são a suscetibilidade magnética (SM) (GRIMLEY; VEPRASKAS, 2000) e a espectroscopia de reflectância difusa (ERD) (TORRENT; BARRÓN, 2008).

A SM pode ser definida como a medida da facilidade com que um material magnetiza, na presença de um campo magnético. Essa medida depende das concentrações e características (estrutura do cristal, composição, tamanho, morfologia e domínio) (VEROSUB; ROBERT, 1995) dos minerais magnéticos presentes na rocha ou no solo, que podem ser considerados como micro-marcadores de atributos do solo. Logo correlações entre a SM e esses atributos podem ser estabelecidas (MATHÉ et al., 2006).

Já a ERD é o resultado de múltiplos processos de absorção e dispersão da luz, em todas as direções, que se produzem sobre a superfície dos componentes do solo, sendo a cor do solo resultante da capacidade dos pigmentos para absorver mais a luz de determinados comprimentos de onda em relação a outros (BARRÓN; MELLO; TORRENT, 2000). De acordo com Torrent e Barrón (1993) esta técnica consiste na aquisição quali-quantitativa de dados por meio da transmissão ou absorção da energia radiante incidente em uma amostra. As energias dos diferentes comprimentos de onda do espectro são absorvidas pelas moléculas e com base na Lei de Beer-Lambert é feita análise quali-quantitativa da amostra. Então, os

resultados quantitativos, sofrem um tratamento matemático e novas amostras são estimadas a partir do modelo criado.

Diversos autores citam que a SM (GRIMLEY; VEPRASKAS, 2000; ROYAL, 2001; SIQUEIRA et al., 2010b) e a ERD (TORRENT; BARRÓN, 2008; VISCARRA ROSSEL et al., 2010) podem ser utilizadas nos estudo de atributos mineralógicos, físicos, químicos e do solo. Dentre os atributos químicos vale ressaltar o fósforo (P), um dos principais fatores limitantes à longevidade e desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar. O baixo teor de fósforo disponível no solo é a limitação nutricional mais generalizada na produção agrícola (LOMBI et al., 2006; JOHNSON; LOEPPERT, 2006) de solos intemperizados, e a maioria das culturas no Brasil apresenta reposta à aplicação desse nutriente.

Entretanto, é baixa a eficiência da adubação fosfatada, pois grande parte do fósforo adicionado torna-se imóvel ou não-disponível, em virtude de reações de adsorção em colóides minerais, precipitação ou conversão em formas orgânicas (BUSATO et al., 2005; RHEINHEIMER; ANGHINONI, 2001; TIESSEN; MOIR, 1993). Rolim Neto et al. (2004) ressaltam que, para a maioria dos solos brasileiros, o suprimento natural de fósforo é insatisfatório ao adequado crescimento das plantas.

O teor e a constituição mineralógica da fração argila assumem papel importante no comportamento do fósforo, da cor e da SM do solo. Motta et al. (2002), avaliando a influência da mineralogia na adsorção de fósforo em Latossolos, verificaram que a adsorção, o teor total e as formas de fósforo ligadas mais fortemente a Al e Fe aumentaram com o caráter oxidico dos solos. Nesse aspecto, os óxidos de Fe e Al da fração argila dos solos são considerados os principais responsáveis pela adsorção de fósforo (ULÉN; SNÄLL, 2007; JOHNSON; LOEPPERT, 2006; BÖRLING et al., 2001).

Desta maneira o presente trabalho teve como objetivo avaliar a utilização da SM e da ERD na identificação de áreas com diferentes potenciais à adsorção de fósforo na cultura da cana-de-açúcar.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Localização, caracterização da área e critério de amostragem

O estudo foi realizado em uma área comercial da Usina São Martinho (Figura 3.1), que recebe adubação fosfatada a mais de uma década, localizada no nordeste do estado de São Paulo, no Município de Guataporá. As coordenadas geográficas são 21°29'48" de latitude sul e 48°02'16" de longitude oeste, com altitude média de 557 m acima do nível do mar. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo megatérmico, tropical com estação seca de inverno (Aw) e precipitação média de 1400 mm, com chuvas concentradas no período de novembro a fevereiro. Esta área está inserida na província geomorfológica do Planalto Ocidental Paulista, próximas ao limite das Cuestas Basálticas no divisor litoestratigráfico arenito-basáltico.

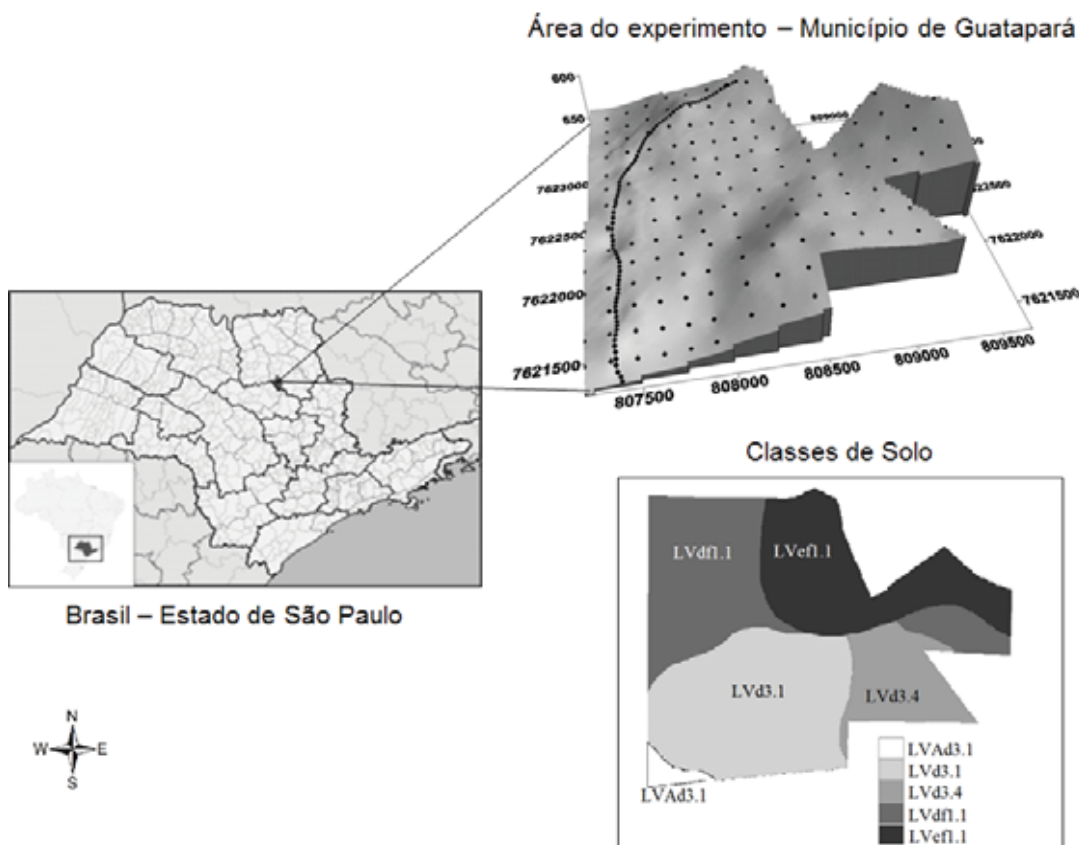


Figura 3.1. Localização da área experimental. Modelo digital de elevação; Pontos de amostragem e Representação das classes de solo.

Na área de experimento (Figura 3.1) os solos foram classificados, de acordo com o levantamento realizado pelo Centro de Tecnologia Canavieira (CTC) em prestação de serviços à Usina São Martinho, como Latossolo Vermelho distrófico, textura média (LVd3.1; LVd3.4), Latossolo Vermelho distroférico, textura argilosa (LVdf1.1); Latossolo Vermelho eutroférico, textura argilosa (LVef1.1) e Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, textura média (LVAd3.1) (EMBRAPA, 2006), sob cultivo de cana-de-açúcar com colheita mecanizada.

Para realização das análises granulométricas, químicas, e das medições da espectroscopia de refletância difusa e da SM, foram coletadas 86 amostras de solo a cada 30 m, em uma transeção de 2600 m, seguindo o espigão da paisagem, ao longo da área cultivada com cana-de-açúcar, de maneira a obter pontos nas diferentes classes de solo, e mais 155 pontos em uma malha de densidade amostral de 1 ponto a cada 2,5 ha, totalizando 241 pontos, na profundidade de 0,00-0,25 m, na área experimental de 380 ha.

3.2.2 Metodologia de laboratório

As amostras foram secas e passadas em peneira de 2,0 mm de abertura de malha para determinação dos atributos estudados. A granulometria do solo foi determinada pela metodologia proposta pela EMBRAPA (1997), e a SM das amostras foi medida por um sensor da Bartington Instruments, conforme metodologia descrita por Dearing (1999).

Foram escolhidos 12 pontos da transeção, de forma a representar as classes de solo da área experimental, para determinação do fósforo remanescente de acordo com a metodologia proposta por Alvarez et al. (2000), a partir dos quais foram obtidos os teores de fósforo adsorvido das amostras.

Para a obtenção dos espectros de reflectância difusa, as avaliações foram feitas com o sensor de laboratório Lambda 950. Foram moídas aproximadamente 0,5 g de TFSA em ágata até obtenção de coloração constante. O conteúdo foi colocado em um porta amostras com um espaço cilíndrico de 16 mm. Os valores de reflectância foram determinados, em espectrofotômetro equipado com esfera

integradora de 80 mm, a cada 1 nm, com um tempo de integração de 0,2 segundos fazendo uma varredura no intervalo de 380 a 780 nm. Após a obtenção dos espectros de reflectância difusa das amostras de solo, foram determinados os valores de triestímulo XYZ definidos pela Comisión Internacional de L'Eclairage-CIE (WYSZECKI; STILES, 1982). A partir das coordenadas XYZ foram deduzidos os valores Munsell de matiz, croma e valor utilizando o programa Munsell Conversion versão 6.4, conforme Barrón et al. (2000). Com base nos valores de croma, valor e matiz, obtidos pela análise de espectroscopia de reflectância difusa foi calculado um índice de avermelhamento (IAV), conforme equação 1 (BARRÓN et al. 2000).

$$IAV = \frac{(10 - Matiz) \times Croma}{Valor} \quad [1]$$

3.2.3 Análise dos dados

3.2.3.1 Estatística descritiva

Os dados foram submetidos à análise estatística descritiva, obtendo-se os valores de média, mediana, coeficiente de variação, máximo, mínimo, assimetria e curtose. A partir dos 12 pontos da transeção foram construídos modelos de regressão entre a SM, o IAV e o P adsorvido, por meio da utilização do software estatístico Minitab 13.1 (MINITAB, 2000). Devido à constatação da correlação estatística do P adsorvido somente com a SM, esta foi utilizada como função de pedotransferência, por meio do modelo de regressão obtido, para estimar os teores de P adsorvido, para cada ponto amostral. Com base na carta de solos da área experimental, a partir dos pontos amostrais contidos em cada classe, foram calculados os valores médios dos atributos estudados por classe de solo e foi aplicado o teste de Tukey a 5%.

3.2.3.2 Geoestatística

A análise da dependência espacial dos dados foi feita por meio da geoestatística (VIEIRA et al., 1983), utilizando-se os variogramas que foram estimados com base nas pressuposições de estacionariedade da hipótese intrínseca. Os variogramas foram modelados com o auxílio do software GS+ - Geostatistics for Environmental Sciences (ROBERTSON, 1998), e os modelos matemáticos ajustados aos variogramas experimentais, a partir dos quais foi determinado o grau de dependência espacial de cada atributo estudado. Os valores interpolados por meio da krigagem foram usados para construção de mapas dos atributos estudados por meio do software Surfer (1999). As correlações espaciais entre os atributos estudados foram avaliadas por variogramas cruzados.

Os variogramas experimentais foram escolhidos com base no número de pares envolvidos no cálculo da semivariância dos primeiros lags, presença de patamar claramente definido e valor do R^2 para o modelo ajustado e validação cruzada (BURROUGH; MCDONNEL 1998).

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na figura 3.2, observa-se que SM e o P adsorvido relacionam-se diretamente, porém, não foi constatada relação entre o P adsorvido e o IAV. Almeida et al. (2003) citam a importância da cor dos solos, tanto do ponto de vista taxinômico quanto agrônômico, pois a coloração dos horizontes superficiais pode ser determinante, por exemplo, para explicar eventuais diferenças na capacidade adsorvida de fosfatos. No entanto esses próprios autores utilizaram a cor do solo para estimativa de atributos mineralógicos e então a partir destes realizaram correlações com o P do solo.

Quanto à SM e o P adsorvido, Siqueira et al. (2010) também encontraram relação direta entre esses atributos. A SM apresenta relação direta com a mineralogia do solo (VEROSUB; ROBERT, 1995). Fine et al. (1993) relatam que a SM do solo pode ser afetada pela presença de óxidos de ferro secundários, que também são os principais responsáveis pela adsorção de fósforo (ULÉN; SNÄLL,

2007). Nesse sentido o modelo de regressão obtido foi utilizado como função de pedotransferência, para o cálculo dos teores de P adsorvido em função da SM, de cada um dos demais pontos da grade experimental.

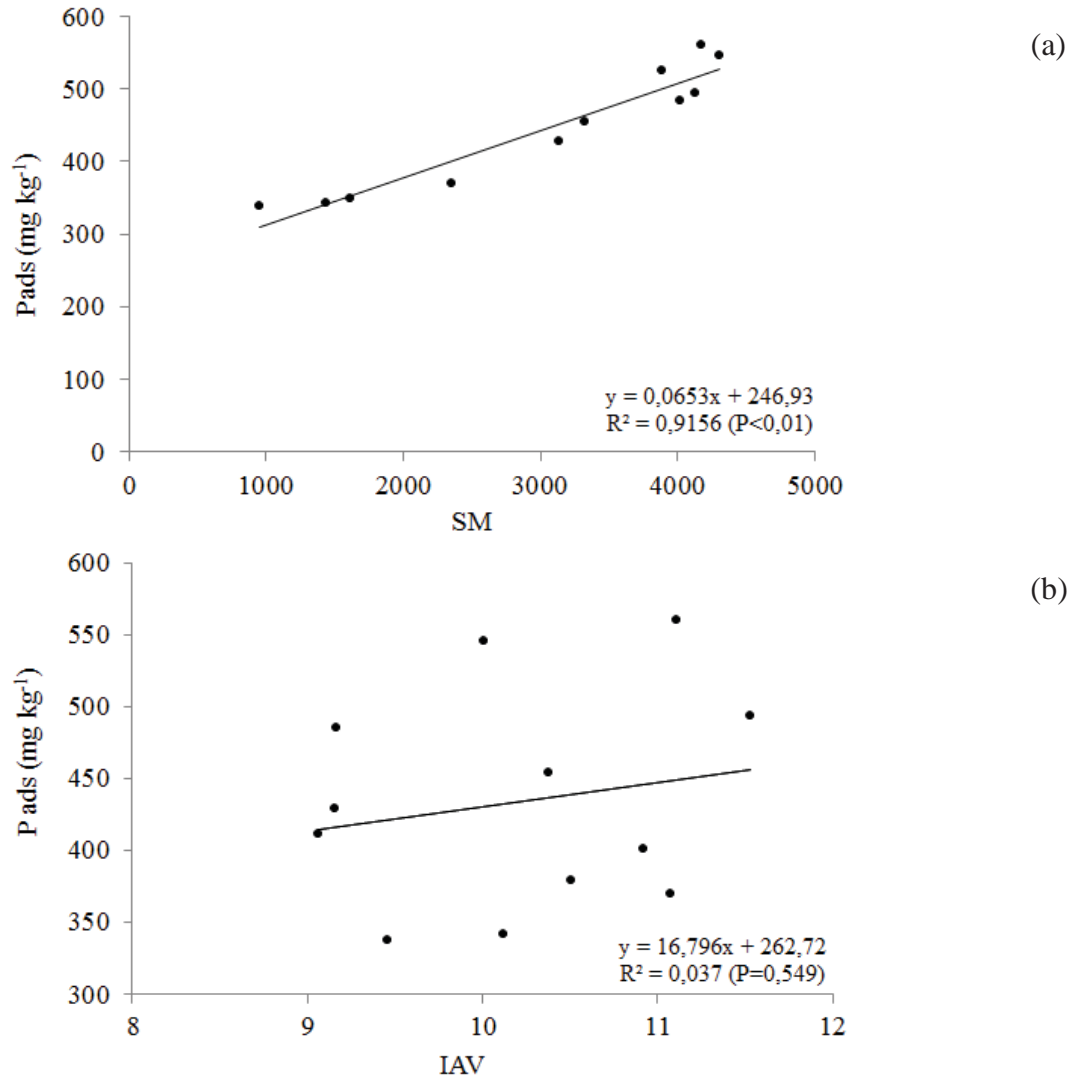


Figura 3.2. Modelos de regressão entre o P adsorvido, a SM (a) e o IAV (b), para os 12 pontos da transeção.

Na Tabela 3.1 são apresentados os valores de média, mediana, coeficiente de variação, mínimo, máximo, assimetria e curtose para SM, IAV, argila, e P adsorvido. A variabilidade dos atributos do solo pode ser inferida por meio do coeficiente de variação (SOUZA et al. 2007). De acordo com a classificação de Warrick e Nielsen (1980) o IAV se enquadra na classe baixa ($CV \leq 12\%$), teor de MO e P ads enquadram-se na classe moderada ($12 < CV < 24$) e teor de argila e SM enquadram-se na classe alta ($CV \geq 24\%$). Dentre os atributos estudados a SM foi

que apresentou maior CV. Isto reflete a grande sensibilidade deste atributo aos processos do solo que variam continuamente na paisagem. Segundo Mathé et al. (2006) a SM pode ser utilizada como micro indicadora das condições do solo.

O menor CV foi verificado para o IAV, o que pode estar relacionado à predominância de Latossolos Vermelhos na área experimental (Tabela 3.1). De acordo com Novaes Filho et al. (2007) há uma correspondência bastante satisfatória entre os intervalos do índice de avermelhamento (IAV) do horizonte diagnóstico dos solos e a nomenclatura do segundo nível categórico (subordem) de Argissolos e Latossolos (Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos), sendo que os intervalos do IAV são próximos para solos vermelho-amarelos e solos vermelhos.

Tabela 1. Estatística descritiva dos atributos estudados para os 241 pontos coletados na área de 380 ha.

Atributo	Média	Mediana	CV (%)	Mínimo	Máximo	Assimetria	Curtose
Argila (g Kg ⁻¹)	425,41	454,50	28,88	83,00	619,50	-0,61	-0,48
MO (g dm ⁻³)	30,41	30,00	20,46	16,00	50,00	0,13	-0,10
P adsorvido (g Kg ⁻¹)	443,81	455,89	23,98	257,90	733,94	0,03	-0,82
IAV	10,29	10,25	11,15	6,20	13,32	-0,10	0,35
SM (10 ⁻⁸ m ³ kg ⁻¹)	3015,00	3200,00	54,06	168,00	7458,00	0,03	-0,82

CV= Coeficiente de variação; MO= Matéria orgânica; SM= Suscetibilidade magnética; IAV= Índice de Avermelhamento.

Na análise da amplitude dos dados verifica-se que a SM e o teor de argila apresentaram as maiores diferenças entre valores de máximo e mínimo (Tabela 3.1). Isto reflete a variação dos materiais de origem dos solos encontrados na área do experimento, que está inserida em um divisor litoestratigráfico arenito-basáltico. Segundo Fontes et al. (2000) a variação dos materiais de origem dos solos contribuem para a variação da SM.

Todos os atributos estudados apresentaram valores semelhantes de média e mediana, caracterizando distribuições simétricas dos dados (Tabela 3.1). Também foram verificados valores de assimetria e curtose próximos à zero, o que indica uma distribuição normal dos dados, mostrando-se suficientes para a aplicação das técnicas geoestatísticas sem comprometimento das análises (WARRICK; NIELSEN, 1980).

Na Tabela 3.2 é possível observar que os atributos estudados apresentaram diferença estatística entre as classes de solo. Os LVef e LVdf, mais argilosos, apresentaram maiores valores de IAV do que os LVd3.4 e o LVAd (textura média).

Já o LVd3.1 não diferiu estatisticamente dos demais. Novaes Filho et al. (2007), em seus estudos visando à identificação de classes pedológicas de microbacias na Amazônia Meridional, utilizaram o IAV e observaram diferenças entre Latossolos Vermelhos, Vermelho-Amarelo e Amarelos, através de intervalos do IAV para cada subgrupo de solo. Fernandes et al. (2004) também observaram variação do IAV em diferentes variações texturais do solo.

Tabela 3.2. Médias dos atributos estudados por classes de solo.

Classes de solo	Área	SM	IAV	Argila	P adsorvido
	ha	$10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$		g Kg^{-1}	mg Kg^{-3}
LVAAd3.1	7	952 cd	9,35 b	315 b	309 cd
LVd3.1	126	1728 c	10,24 ab	361 b	359 c
LVd3.4	47	633 d	9,58 b	207 c	288 d
LVdf1.1	107	3841 b	10,45 a	477 a	497 b
LVef1.1	93	4510 a	10,48 a	512 a	541 a

LVd= Latossolo Vermelho distrófico; LVef= Latossolo Vermelho eutroférico; LVAAd= Latossolo Vermelho Amarelo distrófico; LVdf= Latossolo Vermelho distroférico; SM= Suscetibilidade magnética; Média pond.= Média ponderada pela área; P= Fósforo; IAV= Índice de Avermelhamento; Médias apresentadas com letras diferentes, na coluna, diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

A SM e P adsorvido apresentaram o mesmo comportamento conforme as classes de solo, com maiores valores nos Latossolos Vermelhos férricos argilosos (Tabela 3.2). Segundo Borling et al. (2004) e Camargo et al. (2012), a adsorção de fósforo está relacionada, dentre outros fatores, com o teor de argila e com os óxidos de ferro do solo. O mesmo ocorre com a SM, pois as propriedades magnéticas dos minerais do solo dependem, essencialmente, do teor Fe (COEY, 1987). Também foram encontrados teores mais elevados de SM em solos mais argilosos, pois nesses a magnetita é oxidada diretamente em maghemita, de maior SM do que a hematita, que é encontrada em solos mais arenosos, também decorrente da oxidação da magnetita (FONTES et al., 2000).

No sentido de avaliar a dependência espacial foram construídos variogramas dos atributos estudados. Todos os atributos apresentaram dependência espacial, expressa pelos ajustes dos modelos aos variogramas (VIEIRA, 1995; VIEIRA, 2000). Os modelos ajustados e os parâmetros dos variogramas experimentais estão apresentados na Tabela 3.3.

No presente estudo, a análise da relação $C_0/(C_0 + C_1)$ para todos os atributos mostrou que os variogramas possuem dependência espacial forte, com relações

inferiores a 25% (Tabela 3.3), de acordo com a classificação proposta por Cambardela et al. (1994). Os modelos ajustados foram o exponencial, para o P adsorvido e a argila, e o esférico, para a SM e o IAV. Vários autores encontraram o melhor ajuste dos variogramas dos atributos do solo ao modelo esférico (TRANGMAR et al., 1987; SOUZA et al., 1996; SOUZA; VIEIRA; COGO, 1997; SALVIANO et al., 1998). McBratney e Webster (1986) citaram os modelos esférico e exponencial como os mais encontrados.

Tabela 3.3. Geoestatística para o P adsorvido, teores de argila, SM e IAV.

Variável	Modelo	Efeito pepita (C ₀)	Patamar (C ₀ +C ₁)	Alcance (a)	[C ₀ /(C ₀ +C ₁)]x100	R ²
P adsorvido	Exponencial	20	4958	1395	0,40	0,99
Argila	Exponencial	7,40	97,40	1284	7,60	0,98
IAV	Esférico	0,20	1,39	464	14,57	0,89
SM	Esférico	140000	1171000	1136	11,95	0,96

IAV= Índice de avermelhamento; P= fósforo; SM= Suscetibilidade Magnética

Vale ressaltar que o IAV e a SM, foram ajustados no modelo esférico (Tabela 3.3). Cortez et al. (2011) e Marques Jr. (2009) também encontraram e seus estudos ajustes dos variogramas da SM ao modelo esférico. De acordo com Siqueira (2010b), tal fato indica que os limites reais de campo podem ser expressos com melhor acurácia quando identificados por estes atributos que tiveram ajuste ao modelo esférico. A justificativa desta premissa consiste no fato do alcance encontrado pelo modelo esférico se tratar de um valor real, enquanto que para outros modelos, como o exponencial, o patamar ocorre teoricamente, sem grande precisão na representação de valores reais de campo.

Segundo Burgess e Webster (1980) o modelo esférico é associado à representação da continuidade espacial de atributos com características de transições abruptas, de mais fácil identificação no campo. Enquanto que a identificação dos limites de transição de atributos representados pelo modelo exponencial ou gaussiano, cuja transição de campo é mais sutil, torna-se mais difícil (BURGESS et al., 1981).

Na análise dos alcances, o teor de argila apresentou alcance de 1284m, a SM de 1136m, já o P adsorvido apresentou o maior alcance entre os atributos estudados, de 1395m, enquanto o menor alcance foi constatado para o IAV (464m) (Tabela 3.3).

Observa-se que os alcances da argila e P adsorvido, estão próximos do alcance da SM, indicando um padrão semelhante de variabilidade entre esses atributos, reforçando a ideia do uso eficiente da SM para auxiliar nos levantamentos taxonômicos e técnicos (CORTEZ et al., 2011). Embora os alcances dos atributos estudados tenham sido diferentes do IAV, isso não descarta a possibilidade da utilização da cor do solo no auxílio da realização dos mapeamentos.

Segundo Peluco (2010) a variabilidade espacial é verificada pelo alcance. Quanto maior o alcance menor é a variabilidade espacial dos dados e, o contrário procede. Comparando a variabilidade dos dados indicada pelo CV (estatística descritiva) e pela análise dos alcances (geoestatística) verifica-se para SM, indicada na estatística descritiva como tendo uma alta variabilidade dos dados (alto CV), que quando estudada pela geoestatística ela apresentou menor variabilidade espacial (maior alcance). Neste caso isto pode ser explicado por uma distribuição espacial homogênea, mas com grande amplitude dos dados, o que causa a elevação do CV. Analisando o comportamento do IAV, fato parecido também ocorre, pois o IAV apresentou o CV mais baixo e ao mesmo tempo o menor alcance entre os atributos estudados. Tais fatos demonstram a importância da geoestatística para entender melhor o comportamento dos atributos do solo.

Nesse sentido a fim de visualizar a distribuição espacial dos atributos estudados e averiguar a correlação espacial entre eles, foram construídos mapas de padrão espacial (Figura 3.3) e variogramas cruzados (Figura 3.4). Segundo Bhatti et al. (1991), os variogramas cruzados podem assumir valores positivos indicando que o aumento em um dos atributos é acompanhado pelo aumento do outro, como negativos indicando que quando ocorre o aumento de um dos atributos, ocorre o decréscimo do outro.

Os mapas dos atributos estudados apresentam padrão semelhante ao mapa de solos da usina, indicando que utilização da carta de solos pode auxiliar no planejamento agrícola. Entretanto quando se busca um manejo mais específico, é indispensável a aplicação da geoestatística para estudos mais detalhados da variabilidade dos atributos do solo, pois segundo Corá et al. (2004) e Montanari et al. (2005), mesmo os Latossolos, muitas vezes considerados homogêneos pela literatura, apresentam variabilidade.

É possível verificar grande similaridade da variabilidade espacial entre os mapas de teor de argila, SM e P adsorvido (Figura 3.3). Essa semelhança pode ser validada pela observação dos variogramas cruzados, que apresentaram correlação espacial definida positiva entre esses atributos, com forte (P ads x argila; argila x SM) e médio (Pads x SM) grau de dependência espacial (Apêndice Tabela 2A). Nas áreas com maiores teores de argila são encontrados locais de maior adsorção de P. Novais e Smyth (1999), Silva (1999) e Lima (2001) também constataram que o teor de argila no solo pode exercer influência, aumentando os valores de adsorção de P.

Segundo Valladares et al. (2003), isso se dá pelo fato que os principais constituintes da fração argila dos solos brasileiros muito intemperizados, serem os óxidos de ferro e alumínio, minerais caracterizados pela presença de cargas de superfície variáveis segundo a reação da solução do solo (VOLKSWEISS; RAIJ, 1977), sendo que em condições de reação ácida a moderadamente ácida esses óxidos de ferro e alumínio apresentam-se preferencialmente com cargas positivas, sendo assim capazes de reter em sua superfície vários tipos de ânions, com predomínio de íons fosfatos (KAMPRATH, 1977; HEDLEY et al., 1990; NOVAIS et al., 1991).

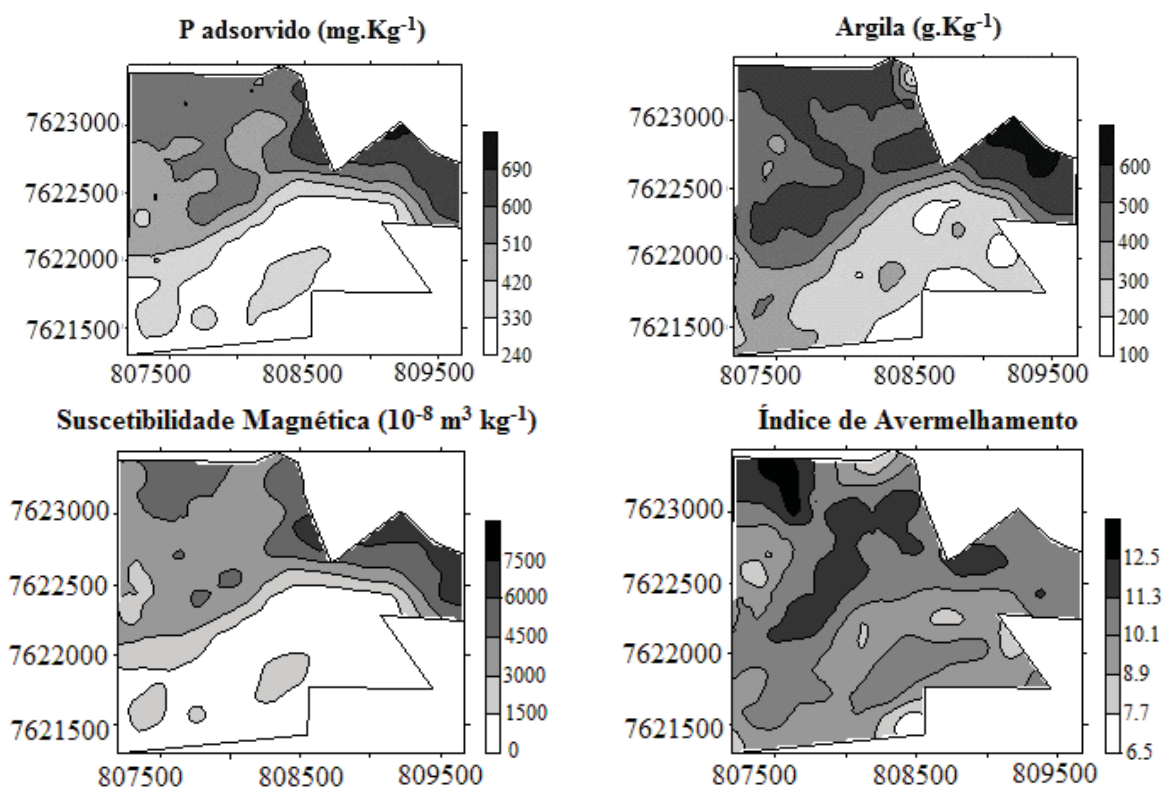


Figura 3.3. Mapas de krigagem dos atributos estudados.

Nas áreas de maiores teores de argila, foram verificados os maiores teores de SM, coincidido também com as zonas de maior adsorção de P (Figura 3.3). Siqueira et al. (2010a), também observaram correlações positivas da SM com esses dois atributos do solo. Segundo Becegatto e Ferreira (2005) a SM é maior em áreas de maior teor de argila, devido a maior disponibilidade de minerais magnéticos nessa classe textural. Como também é na fração argila que são encontrados os principais minerais responsáveis pela adsorção de P, a SM pode ser utilizada no mapeamento de áreas de maior propensão à adsorção deste elemento.

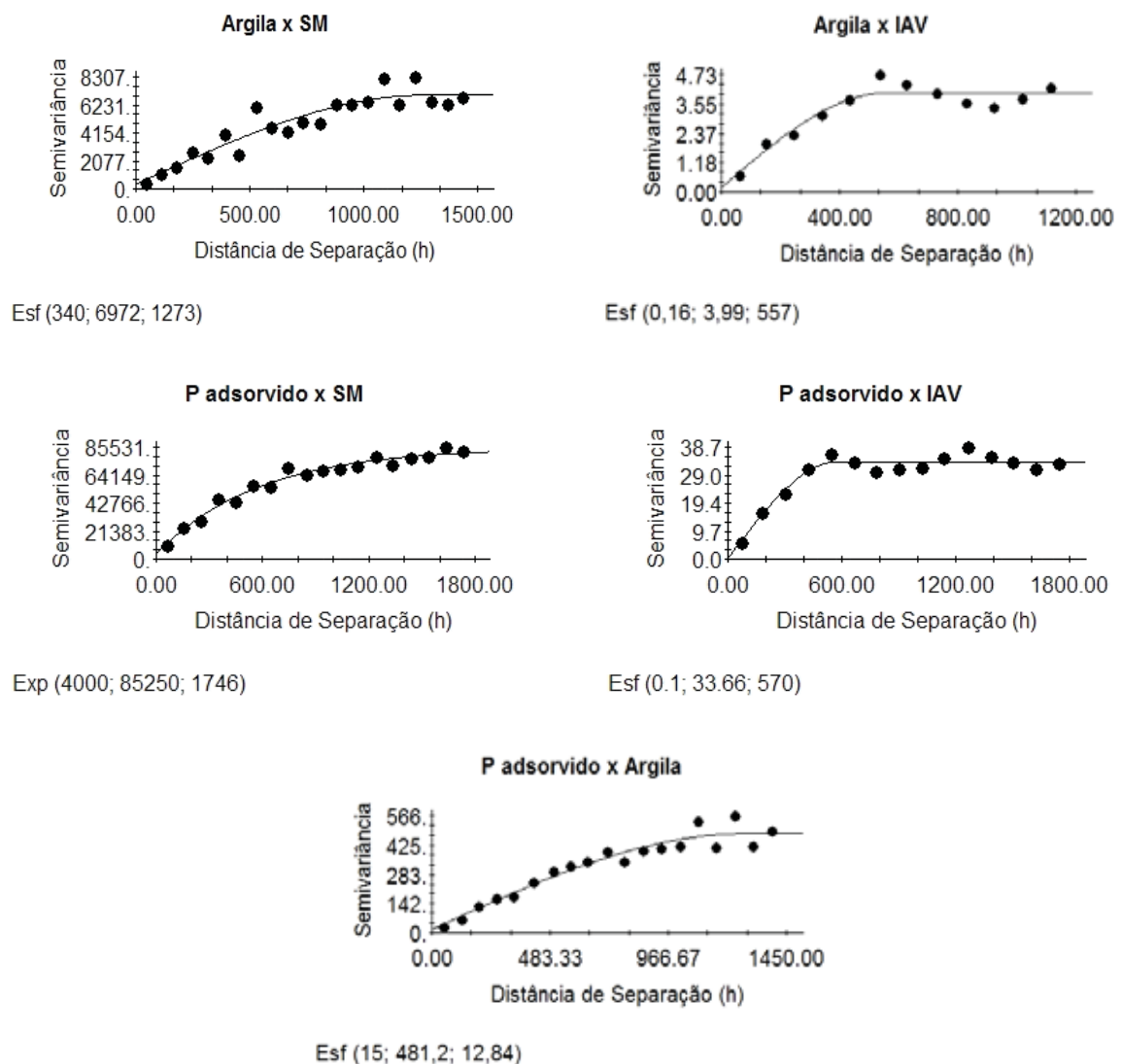


Figura 4. Variogramas cruzados do P adsorvido e Argila em função da SM e IAV.

Na análise dos mapas também é possível verificar que as isolinhas do mapa de IAV são semelhantes às isolinhas do mapa de P adsorvido (Figura 3.3). E embora não tenha sido constatada correlação estatística entre esses atributos (Figura 3.2), foi constatada pela avaliação do variograma cruzado, correlação espacial positiva, com forte grau de dependência espacial ($< 25\%$) entre ao IAV e o P adsorvido (Apêndice Figura 1A). Verifica-se que nas áreas com maior IAV ocorrem os maiores valores de P adsorvido, sugerindo a necessidade de mais estudos sobre o potencial da cor do solo na identificação de áreas de adsorção de fosfatos. Tais fatos evidenciam novamente que a geoestatística é uma ferramenta muito importante e deve ser usada no aprofundamento dos estudos em ciência do solo. Camargo et al. (2012) também encontraram que a análise de correlação simples por si só é insuficiente para correlacionar atributos do solo, apontando a necessidade de utilização suplementar de técnicas geoestatísticas para este tipo de estudo.

De acordo com Almeida; Torrente e Barron, (2003) o emprego de técnicas de refletância difusa na determinação dos espectros de cor tem se mostrado útil não só para uma caracterização qualitativa e mais precisa da cor dos solos, mas também para a quantificação de óxidos de ferro (BARRÓN; TORRENT, 1986), que são grandes responsáveis pela adsorção de fosfatos (MACHADO et al. 1993; RHEINHEIMER, 2000). Fernandes (2000), trabalhando em Latossolos do Sudeste, brasileiro demonstrou o potencial e a importância da espectroscopia de reflectância difusa para este tipo de estudo.

3.4. CONCLUSÕES

1. A suscetibilidade magnética apresentou correlação linear e espacial com o fósforo adsorvido, possibilitando sua utilização em funções de pedotransferência.
2. O índice de avermelhamento não apresentou correlação linear, no entanto apresentou correlação espacial com o fósforo adsorvido.
3. A suscetibilidade magnética e o índice de avermelhamento podem auxiliar no mapeamento e na identificação de áreas de adsorção de fósforo.

4. A utilização de técnicas Geoestatísticas é de extrema importância em estudos da variabilidade de atributos do solo, pois consegue obter resultados não verificados somente pela utilização da estatística clássica.

3.5 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, J. A.; TORRENT, J.; BARRÓN, V. Cor de solo, formas do fósforo e adsorção de fosfatos em latossolos desenvolvidos de basalto do extremo-sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 985-1002, 2003.

ALVAREZ V., V. H.; NOVAIS, R. F.; DIAS, L. E.; OLIVEIRA, J. A. Determinação e uso do fósforo remanescente. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p.27-32, 2000.

BARBIERI, D. M; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos químicos de um argissolo para aplicação de insumos à taxa variável em diferentes formas de relevo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.28, n.4, p.645-653, 2008.

BARRÓN, V.; TORRENT, J. Use of the Kubelka-Munk theory to study the influence of iron oxide on soil color. **Journal of Soil Science**, v.37, p.499-510, 1986.

BARRÓN, V.; MELLO, J. W. V.; TORRENT, J. Caracterização de óxidos de ferro em solos por espectroscopia de Reflectância Difusa. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H. & SCHAEFER, C.E.G.R., eds. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1, p.139-162.

BECEGATO, V. A.; FERREIRA, F. J. F. Gamaespectrometria, resistividade elétrica e susceptibilidade magnética de solos agrícolas no noroeste do estado do Paraná. **Revista Brasileira de Geofísica**, v.23, n.4, 2005.

BHATTI, A. U.; MULLA, D. J.; KOEHLER, F. E.; GURMANI, A. H. Identifying and removing spatial correlation from yield experiments. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 55, p.1523-1528, 1991.

BORLING, K.; BARBERIS, E.; OTABBONG, E. Impact of long-term inorganic phosphorus fertilization on accumulation, sorption and release of phosphorus in five Swedish soil profiles. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 69, n.1, p. 11-21, 2004.

BURGESS, T. M.; WEBSTER, R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I. The semivariogram and punctual kriging. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.31, n.3, p.315-331, 1980.

BURGESS, T. M.; WEBSTER, R.; McBRATNEY, A. B. Optimal interpolation and isarithm mapping of soil properties. IV. Sampling strategy. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.32, n.4, p.643-659, 1981.

BURROUGH, P. A., MCDONNELL, R. A. **Principles of Geographical Information Systems**. Oxford, Oxford University Press, 1998. 330 p.

BUSATO, J. G.; CANELLAS, L. P.; VELLOSO, A. C. X. Fósforo num Cambissolo cultivado com cana-de-açúcar por longo tempo. I: Fracionamento seqüencial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, p.935-945, 2005.

CAMARGO, L. A.; MARQUES JR, J.; PEREIRA, G. T.; ALLEONI, L. R. F. Spatial correlation between the composition of the clay fraction and contents of available phosphorus of an Oxisol at hillslope scale. **Catena**, v. 100, p. 100-106, 2012.

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 Soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, n.5, p.1501-1511, 1994.

COEY, J. M. D. Magnetic properties of iron in soil iron oxides and clay minerals. In: STUCKI, J. W., GOODMAN, B. A.; SCHWERTMANN, U. (Ed.). **Iron in soils and clay minerals**. Dordrecht: Reidel Publishing Corporation, 1987. p. 217, 397-466.

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

CORTEZ, L. A.; MARQUES JR., J.; PELUCO, R. G.; TEIXEIRA, D. B.; SIQUEIRA, D. S. Suscetibilidade magnética para identificação de áreas de manejo específico em citricultura. **Energia na agricultura**, Botucatu, v.26, p.60-79, 2011.

DEARING, J. A. **Environmental magnetic susceptibility: Using the Bartington MS2 system**. 2 ed. Kenilworth: Chi Publishing, 1999. 54p.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA Centro Nacional e Pesquisa em Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa-SPI; Rio de Janeiro: Embrapa-Solos, 2006. 306 p.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, 1999. 412p.

FERNANDES, R. B. A. **Atributos mineralógicos, cor, adsorção e dessorção de fosfatos em Latossolos do sudeste brasileiro**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 2000. 265p. (Tese de Doutorado)

FERNANDES, R. B. A.; BARRÓN, V.; TORRENT, J. FONTES, M. P. F. Quantificação de óxidos de ferro de latossolos brasileiros por espectroscopia de refletância difusa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 245-257, 2004.

FINE, P.; SINGER, M. J.; VEROSUB, K. L.; TENPAS, J. New evidence for the origin of ferimagnetic minerals in loess from China. **Soil Society of America Journal**, Madison, v. 57, n. 6, p. 1537-1542, 1993.

FONTES, M. P. F.; OLIVEIRA, T. S.; COSTA, L. M.; CAMPOS, A. A. G. Magnetic separation and evaluation of magnetization of Brazilian soils from different parent materials. **Geoderma**. Amsterdam, v.96, p.81-99, 2000.

GRIMLEY, D. A.; VEPRASKAS, M. J. Magnetic Susceptibility for Use in Delineating Hydric Soils. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.64, p. 2174-2180, 2000.

HEDLEY, M. J.; HUSSIN, A.; BOLAN, M. S. New approaches to phosphorus fertilization. In: SYMPOSIUM OF PHOSPHORUS REQUIREMENTS FOR SUSTAINABLE AGRICULTURE IN ASIA AND OCEANIA, 1, 1990, Los Banos. **Proceedings...**Manila: IRRI, 1990. p.125-142.

JOHNSON, S. E.; LOEPPERT R. H. Role of organic acids in phosphate mobilization from iron oxide. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 70, p. 222-234, 2006.

JOHNSON, S. E. & LOEPPERT R. H. Role of organic acids in phosphate mobilization from iron oxide. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 70, p. 222-234, 2006.

KAMPRATH, E. J. Phosphorus fixation and availability in highly weathered soil. In: FERRI, M. G. (Coord.). SIMPÓSIO SOBRE O CERRADO: BASES PARA UTILIZAÇÃO AGROPECUÁRIA, 4. 1977, Belo Horizonte. **Anais...** São Paulo: Universidade de São Paulo, 1977. p. 333-347.

LIMA, H. N. **Gênese, química, mineralogia e micromorfologia de solos da Amazônia Ocidental**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 2001. 176p. (Tese de Doutorado).

LOMBI, E.; SCHECKEL, K. G.; ARMSTRONG, R. D.; FORRESTER, S.; CUTLER, J. N. & PATERSON, D. Speciation and distribution of phosphorus in a fertilized soil. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 70, p.2038-2048, 2006.

MACHADO, M. I. C. S.; BRAUNER, J. L. & VIANA, A. C. T. Formas de fósforo na camada arável de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 17, p. 331-336, 1993.

MARQUES JR, J. **Caracterização de áreas de manejo específico no contexto das relações solo-relevo**. 2009. 113 f. Tese (Livre-Docência) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2009.

MATHÉ, V.; LÉVÊQUE, F.; MATHÉ, P. E.; CHEVALLIER, C.; PONS, Y. Soil anomaly mapping using a caesium magnetometer: Limits in the low magnetic amplitude case. **Journal of Applied Geophysics**, Amsterdam, v. 58, n. 3, p.202-17, 2006.

McBRATNEY, A. B.; MINASNY, B.; CATTLE, S. R.; VERVOORT, R. W. From pedotransfer functions to soil inference systems. **Geoderma**, Amsterdam, v. 109, p. 41-73, 2002.

McBRATNEY, A. B.; WEBSTER, R. Choosing functions for semivariograms of soil properties and fitting them to sample estimates. **Journal Soil Science**, Oxford, v. 37, p. 617-637, 1986.

MINITAB, Release. **Making Data analysis Easier**: version 13.1, 2000.

MONTANARI, R.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; SOUZA, Z. M. Forma da paisagem como critério para otimização amostral de latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40 n. 1, p. 69-77, 2005.

MOTTA, P. E. F.; CURI, N.; SIQUEIRA, J. O.; VAN RAIJ, B.; FURTINI NETO, A. E.; LIMA, J. M. Adsorção e formas de fósforo em Latossolos: influencia da mineralogia e histórico de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 349-359, 2002.

NOVAES FILHO, J. P.; COUTO, E. G.; OLIVEIRA, V. A.; JOHNSON, M. S.; LEHMANN, J.; RIHA, S. S. Variabilidade espacial de atributos físicos de solo usada na identificação de classes pedológicas de microbacias na Amazônia meridional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 91-100, 2007.

NOVAIS, R. F.; NEVES, J. C. L.; BARROS, N. F. Aspectos físico-químicos envolvidos na fixação do fósforo no solo. In: ENCONTRO NACIONAL DE ROCHA FOSFÁTICA, 5., 1991. São Paulo. **Anais...** São Paulo: 1991. p. 133-177.

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

PELUCO, R. G. **Disponibilidade de fósforo e sua relação com atributos do solo em sistemas de colheita de cana-de-açúcar**. 2010. 79f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Agrônômica) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2010.

RHEINHEIMER, D. **Dinâmica do fósforo em sistemas de manejo de solos**. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000. 210p. (Tese de Doutorado).

RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I. Distribuição do fósforo inorgânico em sistemas de manejo de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, p. 151-160, 2001.

ROBERTSON, G. P. **GS+: geostatistics for the environmental sciences – GS+ user's guide**. Plainwell: Gamma Design Software, p. 152, 1998.

ROLIM NETO, F. C.; SCHAEFER, C. E. G. R.; COSTA, L. M.; CORRÊA, M. M.; FERNANDES FILHO, E. I.; IBRAIMO, M. M. Adsorção de fósforo, superfície específica atributos mineralógicos em solos desenvolvidos de rochas vulcânicas do Alto Paranaíba (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 953-964, 2004.

ROYALL, D. Use of mineral magnetic measurements to investigate soil erosion and sediment delivery in a small agricultural catchment in limestone terrain. **Catena**, Amsterdam, v. 46, p. 15-34, 2001.

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

SILVA, J. R. T. **Solos do Acre: caracterização física, química e mineralógica e adsorção de fosfato**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 117p. (Tese de Doutorado)

SIQUEIRA, D. S.; MARQUES JR., J.; MATIAS, S. S. R.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; BAFFA, O.; OLIVEIRA, L. C. DE. Predicting the properties of Brazilian Haplustalfs from magnetic susceptibility measurements. **Soil Use and Management**, v. 26, p. 425-431, 2010.

SIQUEIRA, D.S. **Suscetibilidade magnética para a estimativa de atributos do solo e mapeamento de áreas sob cultivo de cana-de-açúcar**. 2010. 75 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2010b.

SOUZA, L. S.; DINIZ, M. S.; CALDAS, R. C. Correção da interferência da variabilidade do solo na interpretação dos resultados de um experimento de cultivares/clones de mandioca. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 20, p. 441-445, 1996.

SOUZA, L. S.; VIEIRA, S. R.; COGO, N. P. Variabilidade dos teores de nutrientes na folha, entre plantas, em um pomar cítrico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, p. 373-377, 1997.

SOUZA, Z. M.; BARBIERI, D. M.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; CAMPOS, M. C. C. Influência da variabilidade espacial de atributos químicos de um Latossolo na aplicação de insumos para cultura de cana-de-açúcar. **Ciência. Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 2, p. 371-377, 2007.

SURFER. **Surfer 7.0. Contouring and 3D surface mapping for scientist's engineers**: user's guide. New York: Golden software, p. 619, 1999.

TIESSEN, H.; MOIR, J. O. Characterization of available P by sequential extraction. In: CARTER, M.R. ed. **Soil sampling and methods of analysis**. Boca Raton, Lewis, 1993. p. 75-86.

TORRENT, J.; BARRÓN, V. Diffuse reflectance spectroscopy. In: A.L. Ulery and L.R. Drees, Editors, **Methods of Soil Analysis. Part 5. Mineralogical Methods**, SSSA Book Series vol. 5, Soil Science Society of America, p.367-387, 2008.

TRANGMAR, B. B; YOST, R. S.; WADE, M. K.; UEHARA, G., SUDJADI, M. Spatial variation of soil properties and rice yeild on recently cleared land. **Soil Science Society American Journal**, New York, v. 51, p. 668-674, 1987.

ULÉN, B.; SNÄLL, S. Forms and retention of phosphorus in an illite-clay soil profile with a history of fertilization with pig manure and mineral fertilizers. **Geoderma**, v. 137, p. 455-465, 2007.

VALLADARES, G. S.; PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C. Adsorção de fósforo em solos de argila de atividade baixa. **Bragantia**, Campinas, v. 62, n. 1, p. 111-118, 2003.

VEROSUB, K. L.; ROBERTS, A. P. Environmental magnetism: past, present and future. **Journal of Geophysical Research**, v. 100, p. 2175-2192, 1995.

VIEIRA, S. R. **Curso de atualização em conservação dos solos: geoestatística em estudos de variabilidade espacial**. Campinas: IAC, 1995. Apostila – parte I e II.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 1, p. 1-53.

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

VISCARRA ROSSEL, R. A.; RIZZO, R.; DEMATTÊ, J. A. M.; AND T. BEHRENS, T. Spatial modelling of a soil fertility index using vis-NIR spectra and terrain attributes, **Soil Science Society American Journal**. doi: 10.2136/sssaj2009.0130, 2010.

VOLKSWEISS, S.; RAIJ, B. van. Retenção e disponibilidade de fósforo em solos. In: FERRI, M. G., (Coord.) **SIMPÓSIO SOBRE O CERRADO: BASES PARA UTILIZAÇÃO AGROPECUÁRIA**, 4., 1977, Belo Horioznte. **Anais...** São Paulo: Universidade de São Paulo, 1977. p. 317-332.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (ed.) **Applications of soil physics**. New York: Academic, 1980. p. 319-344.

WYSZECKI, G. AND STILES, W. S. **Color science: concepts and methods, quantitative data and formulae** (2nd edition). John Wiley & Sons. New York, 1982, 976 p.

APÊNDICES

Apêndice A. Geoestatística dos atributos estudados

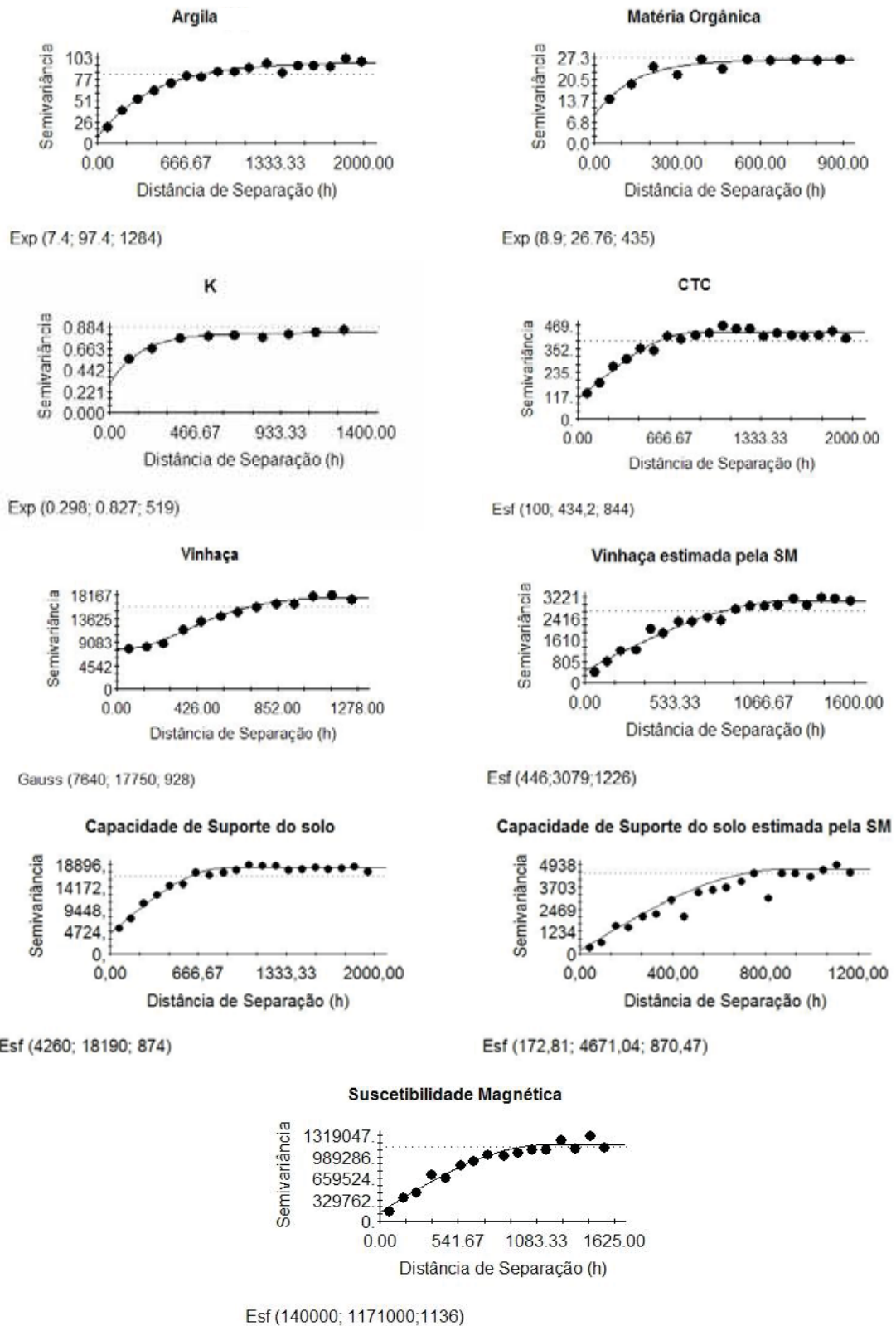
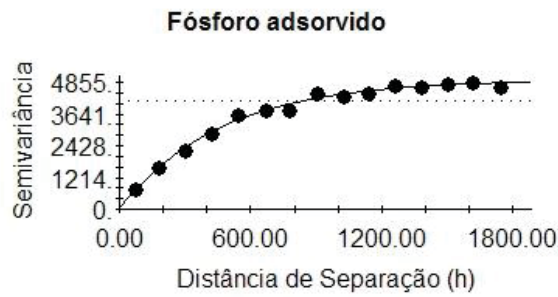
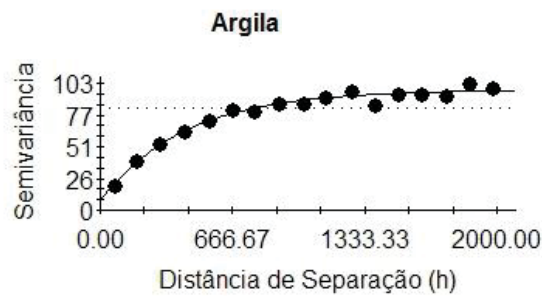


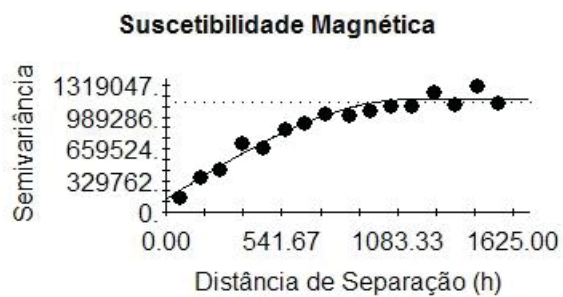
Figura 1A. Variogramas dos atributos estudados (CAPÍTULO 2).



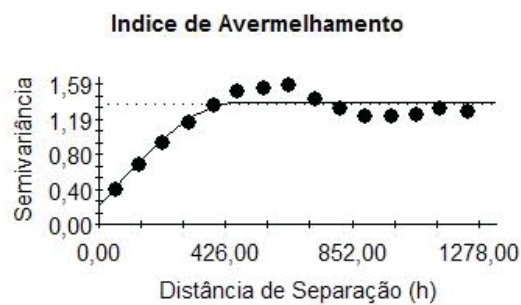
Exp (20; 4958; 1395)



Exp (7.4; 97.4; 1284)



Esf (140000; 1171000; 1136)



Esf (0,202; 1,386; 464)

Figura 2 A. Variogramas dos atributos estudados (CAPÍTULO 3).

Tabela 1A. Parâmetros dos variogramas cruzados dos atributos estudados em função suscetibilidade magnética (CAPÍTULO 2).

Parâmetro	Modelo	Efeito pepita (C_0)	Patamar (C_0+C_1)	Alcance (a)	$1[C_0/(C_0+C_1)] \times 100$	R^2
CTC x SM	Gaussiano	10	8130	1723	0,12	0.9160
K x SM	Gaussiano	40	281.1	1203	14,23	0.7190
MO x SM	Gaussiano	94	2269	1420	4,14	0,9320
Argila x SM	Esférico	340	6972	1273	4,88	0,9610
Vinhaça x SM	Gaussiano	100	33390	1233	0,30	0.8570
Vinhaça est. x SM	Esférico	9100	56860	1316	16,00	0,9854
CS x SM	Gaussiano	3164	156059	1666	2,03	0,9210
CS est. x SM	Esférico	11000	72780	1411	15,11	0,9773

CS= Capacidade de suporte do solo à aplicação de vinhaça; CS est.= Capacidade de suporte do solo à aplicação de vinhaça estimada pela suscetibilidade magnética; Vinhaça est.= Vinhaça estimada pela suscetibilidade magnética; CTC= Capacidade de troca catiônica; K= Potássio; MO= Matéria orgânica; SM= Suscetibilidade magnética.

Tabela 2 A. Parâmetros dos variogramas cruzados do fósforo adsorvido e teor de argila em função da suscetibilidade magnética e do índice de avermelhamento (CAPÍTULO 3).

Parâmetro	Modelo	Efeito pepita (C_0)	Patamar (C_0+C_1)	Alcance (a)	$[C_0/(C_0+C_1)] \times 100$	R^2
P ads x SM	Exponencial	40000	85250	1746	46,921	0,974
P ads x IAV	Esférico	0,1	33,66	570	0,297	0,935
P ads x Argila	Esférico	15	481,2	1284	3,117	0,936
Argila x IAV	Esférico	0,16	3,997	557	0,004	0,903
Argila x SM	Esférico	340	6972	1273	4,877	0,875

P= fósforo; IAV= Índice de Avermelhamento; SM= Suscetibilidade magnética.