

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA E ANÁLISE DE
INCERTEZAS EM MAPEAMENTO DE SOLOS**

Daniel De Bortoli Teixeira

Engenheiro Agrônomo

2015

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA E ANÁLISE DE
INCERTEZAS EM MAPEAMENTO DE SOLOS**

Daniel De Bortoli Teixeira

Orientador: Prof. Dr. José Marques Júnior

Coorientador: Prof. Dr. Gener Tadeu Pereira

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

2015

T266s Teixeira, Daniel De Bortoli
Suscetibilidade magnética e análise de incertezas em mapeamento de solos / Daniel De Bortoli Teixeira. -- Jaboticabal, 2015
xvii, 88 p. ; il. ; 28 cm

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2015

Orientador: José Marques Júnior

Coorientador: Gener Tadeu Pereira

Banca examinadora: Glauco de Souza Rolim, Livia Arantes Camargo, Gustavo de Mattos Vasques, Ricardo Simão Diniz Dalmolin
Bibliografia

1. Geoestatística. 2. Planejamento amostral. 3. Unidade de Mapeamento. 4. Mapeamento detalhado. 5. Cana-de-açúcar. I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 633.61:528.42

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação – Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de Jaboticabal.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

CAMPUS DE JABOTICABAL

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS DE JABOTICABAL

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: “SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA E ANÁLISE DE INCERTEZAS EM MAPEAMENTO DE SOLOS”

AUTOR: DANIEL DE BORTOLI TEIXEIRA

ORIENTADOR: Prof. Dr. JOSE MARQUES JUNIOR

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. GENER TADEU PEREIRA

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


Prof. Dr. JOSE MARQUES JUNIOR

Departamento de Solos e Adubos / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal

Prof. Dr. GLAUCO DE SOUZA ROLIM

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


Profa. Dra. LIVIA ARANTES CAMARGO

Departamento de Solos e Adubos / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal


Prof. Dr. GUSTAVO DE MATTOS VASQUES

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária / Rio de Janeiro/RJ


Prof. Dr. RICARDO SIMÃO DINIZ DALMOLIN

Universidade Federal de Santa Maria / Santa Maria/RS

Data da realização: 18 de agosto de 2015.

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

DANIEL DE BORTOLI TEIXEIRA – Filho de Carlos Alberto Paiva Teixeira e Valéria Mello De Bortoli Teixeira, nasceu em Ribeirão Preto - São Paulo no dia 20 de outubro de 1987. Em março de 2005 ingressou no Curso de Agronomia pela Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal – SP. Foi bolsista de iniciação científica pela FAPESP durante o período de dezembro de 2006 até dezembro de 2009. Em dezembro de 2011, obteve o título de Mestre em Agronomia (Ciência do Solo) pela Universidade Estadual Paulista - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal - SP. Em março de 2012, ingressou no Curso de Doutorado em Agronomia (Produção Vegetal) pela Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Câmpus de Jaboticabal – SP. No mês de agosto de 2015, submeteu-se à banca para a defesa de Tese, sendo aprovado como Doutor em Agronomia.

Duvida sempre de ti mesmo, até que os dados não deixem lugar para dúvidas.

Louis Pasteur

*A experiência nunca falha, apenas as nossas opiniões falham, ao esperar da
experiência aquilo que ela não é capaz de oferecer.*

Leonardo Da Vinci

DEDICATÓRIA

A minha esposa Denise Boito Pereira da Silva que me apoiou durante todo o período do doutorado, me dando forças para trilhar este caminho.

AGRADECIMENTOS

À Deus, que me deu forças para chegar até aqui e colocou todas estas pessoas na minha vida.

Aos meus pais, Carlos Alberto Paiva Teixeira e Valéria Mello De Bortoli Teixeira, e irmãos, Larissa De Bortoli Teixeira e Yuri De Bortoli Teixeira, pela dedicação e apoio.

À Denise Boito Pereira da Silva, minha esposa, pela dedicação, paciência, suporte psicológico, motivação, carinho e incentivo. Muito obrigado por tudo.

Aos professores José Marques Júnior e Gener Tadeu Pereira, meus orientadores, pela incentivo e conselhos dados durante estes anos de convivência.

Aos professores membros da Banca de Qualificação, Glauco de Souza Rolim, Carolina Fernandes, Diego Silva Siqueira e Livia Arantes Camargo, cujas críticas e sugestões contribuíram, de forma significativa, para a melhoria do presente estudo.

Aos professores da Banca de Defesa, Glauco de Souza Rolim, Livia Arantes Camargo, Gustavo de Mattos Vasques, Ricardo Simão Diniz Dalmolin, que se disponibilizaram para ajudar nosso estudo, pelas críticas e sugestões que contribuíram para nosso avanço profissional e pessoal.

Aos amigos e companheiros do Laboratório de RaioX, Diego Silva Siqueira, Livia Arantes Camargo, Angélica Santos Rabelo de Souza Bahia, Ronny Sobreira Barbosa, Ludmila de Freitas, Danilo Almeida Baldo do Carmo, Ivanildo Amorim de Oliveira, Rafael Gonçalves Peluco, Renato Eleotério de Aquino, Kathleen Lourenço Fernandes, Laercio Santos Silva, Adrien Dorvalino Ferroni, Vinícius Augusto Filla, Ana Beatriz Coelho França, Frederico Luiz Siansi pelos grandes momentos vividos, inúmeros cafés tomados e sobretudo pela amizade conquistada.

Ao meu grande amigo Diego Silva Siqueira que atuou como um verdadeiro coorientador no trabalho e na vida, sempre me aconselhando e me passando calma nos momentos mais difíceis. Muito obrigado!

Ao meu amigo e padrinho de casamento Alan Rodrigo Panosso que sempre se preocupou e procurou me ajudar mesmo a distância.

A Mara Regina Moitinho, uma grande amiga que esteve presente em todos os momentos difíceis desta etapa me apoiando e dando forças. Obrigado pelas risadas, café, conversas e conselhos.

Aos amigos do Departamento de Ciências Exatas, Mara Regina Moitinho (e Guilherme), Elton da Silva Bicalho, Maria José Servidone Trizólio, Norival Inácio, Shirley Aparecida Martineli de Sousa, João Fernandes da Silva Jr., Risely Ferraz de Almeida, Eduardo Barreto de Figueiredo, Ricardo de Oliveira Bordonal, Clariana Valadares Xavier, Elienai Ferreira da Silva pelo grande incentivo, apoio e amizade em todas as horas.

Aos amigos de Chapadinha, Ismênia Ribeiro de Oliveira, Jussara Silva Dantas, José Roberto Brito Freitas, Jose Maria do Amaral Resende, pela troca de conhecimentos, experiências e amizade.

A todos os integrantes e ex-integrantes do Grupo de Oração da UNESP de Jaboticabal, em especial à Denise Boito Pereira da Silva, Natalia María Alejandra Aguilar, Liziane Figueiredo Brito, Roberto Carvalheiro Brito, Fernando Brito Carvalheiro e Mariana Brito Carvalheiro, André Ferreira de Camargo, Vinícius Augusto Filla, Silvan Brito Gomes, Joviany Talita da Silva, Rodrigo Nowaki, Andréa Bastos, Filipe Inácio Matias, Pe. Edison e Pe. Gustavo, pelos momentos de orações e boa companhia.

Enfim, a todos que fizeram parte deste caminho...obrigado e contem comigo.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO	xii
ABSTRACT	xiii
LISTA DE FIGURAS	xiv
LISTA DE TABELAS	xvii
CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS	1
1 Introdução e justificativas	1
1.2 Revisão de Literatura	4
1.2.1 Métodos para definição da unidade de mapeamento	4
1.2.2 Ferramentas estatísticas para a determinação das incertezas	6
1.2.3 Utilização de informações categóricas e atributos covariativos dos processos e fatores de formação do solo no mapeamento híbrido	10
1.3 Referências	14
CAPÍTULO 2 – PLANEJAMENTO AMOSTRAL PARA QUANTIFICAÇÃO E MAPEAMENTO DE ATRIBUTOS DE SOLOS UTILIZANDO INFORMAÇÕES AUXILIARES	21
Resumo	21
2.1 Introdução	22
2.2 Material e Métodos	24
2.2.1 Descrição da área e amostragem	24
2.2.2 Análises laboratoriais	27
2.2.3 Análises dos dados	28
2.2.3.1 Estatística descritiva	28
2.2.3.2 Análises Geoestatísticas	28
2.2.3.2.1 Retirada de tendência	28
2.2.3.2.2 Krigagem ordinária (KO)	29
2.2.3.2.3 Krigagem simples com média local variando (KSMLV)	29
2.2.3.3 Comparação dos mapas	30
2.3 Resultados e Discussão	31
2.4 Conclusões	47

2.5 Referências.....	48
CAPÍTULO 3 – DELINEAMENTO DE UNIDADES DE MAPEAMENTO COM BASE NA INCERTEZA ESPACIAL DA SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA E TEOR DE ARGILA.....	55
Resumo	55
3.1 Introdução.....	56
3.2 Material e Métodos	58
3.2.1 Descrição da área e amostragem	58
3.2.2 Análises laboratoriais	61
3.2.3 Análises dos dados.....	61
3.2.3.1 Estatística descritiva	61
3.2.3.2 Análises Geoestatísticas.....	61
3.2.3.3 Definição das zonas de transição entre unidades de mapeamento.....	63
3.3 Resultados e Discussão.....	64
3.4 Conclusões	76
3.5 Referências.....	77
CAPÍTULO 4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	82
APÊNDICES	84
APÊNDICE A – Valores de alcance dos variogramas (m) em função da densidade amostral e da utilização das informações secundárias (geologia, geomorfologia, pedologia).....	85
APÊNDICE B – Padrão espacial dos atributos do solo em função das densidades amostrais e da utilização das informações secundárias geológicas, geomorfológicas e pedológicas.....	86

SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA E ANÁLISE DE INCERTEZAS EM MAPEAMENTO DE SOLOS

RESUMO – A falta de informação sobre variabilidade espacial dos atributos dos solos é um dos fatores limitantes para o crescimento de diferentes áreas do conhecimento e setores produtivos. Estas informações aliadas ao conhecimento das suas incertezas possibilitam a correta interpretação dos resultados e possíveis tomadas de decisão aliadas a este. O estudo foi desenvolvido em duas etapas: na primeira etapa, objetivou-se, utilizar informações geológicas, geomorfológicas e pedológicas para a redução da densidade amostral necessária para a caracterização espacial da suscetibilidade magnética (SM), teor de argila e saturação por bases (V%); na segunda etapa objetivou-se, utilizar as incertezas espaciais da SM e teor de argila para o delineamento de unidades de mapeamento. A área de estudo, localizada no município de Guatapará, possui 870 ha e é caracterizada pela transição geológica Basalto – Depósito Aluvionar - Depósito Colúvio Eluvionar, formas da paisagem côncavas e convexas e presença de Latossolos e Neossolo. Foram coletadas 371 amostras na profundidade de 0-0,25 m para a avaliação da SM, teor de argila e V%. A incorporação das informações secundárias nos modelos geoestatísticos foi realizada por meio da krigagem simples com médias locais variando. Para a SM as informações sobre a geologia e geomorfologia foram responsáveis por cerca de 45% e 44% da sua continuidade espacial. Para o teor de argila, estes resultados foram superiores indicando 54% (geologia) e 53% (geomorfologia). Para o V%, não foi observada relação entre as informações secundárias e sua continuidade espacial. As incorporações das informações geológicas e geomorfológicas aos dados de SM propiciaram, respectivamente, a redução em 44% e 37% no número de amostras requeridas para representar o padrão espacial do atributo. Para o teor de argila foi verificada a possibilidade de redução em 35% no número de amostras utilizando ambas as informações. Na segunda etapa do estudo, mapas médios e de desvio padrão (incertezas) da SM e teor de argila foram calculados com base em 200 realizações da simulação sequencial gaussiana. Para a definição das zonas de transição entre unidades de mapeamento, os picos de incertezas representativos da região de transição entre as unidades de mapeamento foram identificados na transeção delineada seguindo o sentido do decaimento mais suave do declive a partir do topo da vertente até o sopé. Após esta identificação os mapas das unidades de mapeamento bem como a zona de transição entre as mesmas foram construídos com base nas isolinhas espaciais das incertezas. A incorporação das incertezas da SM e teor de argila propiciaram o delineamento de unidades de mapeamento semelhantes. Entretanto, devido ao menor custo e rapidez na quantificação da SM, esta se apresenta como alternativa mais viável para o delineamento de unidades de mapeamento considerando as informações sobre a variabilidade espacial e incertezas dos atributos do solo.

Palavras-chave: geoestatística, incertezas espaciais, planejamento amostral, protocolo de mapeamento, suscetibilidade magnética

MAGNETIC SUSCEPTIBILITY AND ANALYSIS OF UNCERTAINTY IN SOIL MAPPING

ABSTRACT – The lack of information on spatial variability of soil attributes is one of the limiting factors for the development of different areas of knowledge and productive sectors. This information and the knowledge of their uncertainties allow the correct interpretation of results and possible decision making. The study was conducted in two stages: the first stage aimed to use geological, geomorphological, and pedological information in order to reduce the sampling density needed for the spatial characterization of magnetic susceptibility (MS), clay content and base saturation (BS); the second stage aimed to use the spatial uncertainty of MS and clay content for the delineation of mapping units. The study area, located in the municipality of Guatapar, has 870 ha and is characterized by geological transition Basalt – Alluvial Deposit - Eluvial-Colluvial Deposit, concave and convex landforms and presence of Oxisols and Entisols. 371 samples were collected at a depth of 0-0.25 m for the evaluation of MS, clay content and BS. The incorporation of secondary information in geostatistical models was performed through the simple kriging with varying local means. For MS, information about geology and geomorphology were responsible for approximately 45% and 44% of its spatial continuity. For clay content, these results were higher, indicating 54% (geology) and 53% (geomorphology). For BS, there was no relation between secondary information and its spatial continuity. The incorporation of geological and geomorphology information to the MS data allowed a reduction of 44% and 37% in the number of samples required to represent the spatial pattern of the attribute. For clay content was verified the possibility of reducing by 35% the number of samples using both information. In the second stage of the study, average and standard deviation (uncertainty) maps of MS and clay content were calculated based on 200 realizations of the sequential gaussian simulation. For the definition of the transition zones between map units, the typical uncertainty peaks of the transition region between the soil units were identified in the outlined transect following the direction of the smoother decay of the slope from the top of the hillside to the foothill. After this identification, the maps of the map units as well as the transition zone between them were constructed based on the isolines of the uncertainties. The incorporation of the uncertainties of MS and clay content led to the delineation of similar mapping units. However, due to lower cost and quick quantification, MS presents itself as more viable alternative for the delineation of mapping units considering the information on the spatial variability and uncertainty of soil attributes.

Keywords: geostatistics, spatial uncertainties, sampling design, mapping protocol, magnetic susceptibility

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1 (Capítulo 1). Etapas para o procedimento de simulação sequencial gaussiana.....	9
Figura 1 (Capítulo 2). Caracterização da área de estudo. Localização da área amostral (a); mapa geológico na escala 1:500000 (SG – Serra Geral; AD – Depósito Aluvinonar; ECD – Depósito Colúvio Eluvionar) (b); mapa geomorfométrico na escala de Escala 1:100000 (Cc – côncava; Cx – Convexa) (c); mapa pedológico na escala 1:12000 (LVAd - Latossolo Vermelho Amarelo distrófico textura média; LVd - Latossolo Vermelho distrófico textura média; LVdf - Latossolo Vermelho distroférico textura argilosa; LVef - Latossolo Vermelho eutroférico textura argilosa; RQod – Neossolo Quartzarênico órtico distrófico textura arenosa) (d); distribuição espacial das amostras (e).	25
Figura 2 (Capítulo 2). Modelos dos variogramas ajustados aos dados de suscetibilidade magnética (SM), teor de argila e saturação por bases (V%) nas densidades amostrais em função dos estratificadores utilizados. Linhas tracejadas indicam o maior e menor alcance encontrado dentre as densidades amostrais avaliadas.....	37
Figura 3 (Capítulo 2). Padrão espacial da suscetibilidade magnética, teor de argila e saturação por bases (V%) na densidade de 1 amostra a cada 2,6 ha sem considerar informações secundárias.	41
Figura 4 (Capítulo 2). Raiz do erro quadrático médio relativo (RRMSE) estimado a partir da validação externa em função das densidades avaliadas, com e sem (convencional) utilização das informações secundárias (geologia, geomorfologia, pedologia).	43

Figura 1 (Capítulo 3). Caracterização da área de estudo. Localização da área amostral (a); mapa geológico na escala 1:500.000 (SG – Serra Geral; ECD – Depósito Colúvio Eluvionar; AD – Depósito Aluvionar) (b); mapa geomorfométrico na escala de escala 1:100,000 (Cc – pedoforma côncava; Cx – pedoforma convexa) (c); mapa de solos na escala 1:12,000 (LVAd - Latossolo Vermelho Amarelo distrófico; LVd - Latossolo Vermelho distrófico; LVdf - Latossolo Vermelho distroférico; LVef - Latossolo Vermelho eutroférico; RQod – Neossolo Quartzarênico órtico distrófico) (d); distribuição espacial das amostras e transeção (e). 60

Figura 2 (Capítulo 3). Gráficos boxplot dos valores de suscetibilidade magnética (SM) ($\times 10^{-8} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$) e teor de argila (g kg^{-1}) de acordo com a geologia (SG – Basalto formação Serra Geral; ECD – Depósito Colúvio Eluvionar; AD – Depósito Aluvionar), geomorfologia (Cc – pedoforma côncava; Cx – pedoforma convexa) e pedologia (LVAd – Latossolo Vermelho Amarelo distrófico; LVd – Latossolo Vermelho distrófico; LVdf – Latossolo Vermelho distroférico; LVef – Latossolo Vermelho eutroférico; RQod – Neossolo Quartzarênico órtico distrófico). Os limites inferiores e superiores da caixa indicam o primeiro (Q1) e terceiro quartil (Q3), respectivamente; a linha no interior da caixa indica a mediana dos dados; valores maiores que $Q3+1,5\times(Q3-Q1)$ e menores que $Q1-1,5\times(Q3-Q1)$ são considerados outliers sendo identificados por círculos.... 65

Figura 3 (Capítulo 3). Identificação de amostras outliers em função da classe de solo. (a) valores outliers para a suscetibilidade magnética; (b) valores outliers para o teor de argila. 67

Figura 4 (Capítulo 3). Modelos e parâmetros dos variogramas da suscetibilidade magnética (SM) (a) e teor de argila (b). (Esf. =modelo esférico; C_0 = efeito pepita; C_1 =contribuição; a= alcance (m); SSR=soma de quadrado dos resíduos). 68

- Figura 5 (Capítulo 3).** Padrão espacial das estimativas médias (*E-type*) da suscetibilidade magnética ($\times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$) (a) e teor de argila (g kg^{-1}) (b); e padrão espacial das incertezas expressas pelo desvio padrão das estimativas da suscetibilidade magnética ($\times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$) (c) e teor de argila (g kg^{-1}) (d)..... 70
- Figura 6 (Capítulo 3).** Valores de incertezas (desvio padrão) (—) e das estimativas *E-type* (médias) (—) ao longo da transeção amostral para a suscetibilidade magnética (SM) ($\times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$) (a) e teor de argila (g kg^{-1}) (b). A linha vermelha contínua (—) indica o limite entre unidades de mapeamento identificados por meio das incertezas, enquanto a linha vermelha tracejada (---) e a região demarcada em vermelho identificam a zona de incertezas. 72
- Figura 7 (Capítulo 3).** Mapa das unidades de mapeamento propostas com base nas incertezas da suscetibilidade magnética (a) e teor de argila (b). A linha tracejada (---) indica os limites entre as unidades previamente delineadas de forma convencional.. 73

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1 (Capítulo 2). Distribuição dos pontos de amostragem e área de cada compartimento geológico, geomorfológico e pedológico.	26
Tabela 2 (Capítulo 2). Média, intervalo de confiança a 95% e coeficiente de variação (%) para suscetibilidade magnética (SM), teor de argila e saturação por bases (V%) em função dos compartimentos estratificadores.	32

CAPÍTULO 1 – Considerações gerais

1.1 Introdução e justificativas

O mapeamento dos atributos do solo contribui para uma série de atividades relacionadas aos processos agrícolas dentre os quais podemos citar: otimização do uso de insumos agrícolas (WHITE; ZASOSKI, 1999), otimização amostral (PEREIRA et al., 2013), planejamento agrícola, implantação de sistemas de cultivo para cana-de-açúcar (CAMPOS et al., 2008), dentre outras. Mapas em escala pouco detalhadas podem ser utilizados para fornecer indícios sobre a relação entre os atributos do solo, clima, características genéticas do solo, produtividade agrícola, produção animal e saúde humana; escalas intermediárias, abrangendo estados e municípios possibilitam, por exemplo, o delineamento de áreas com deficiência ou toxicidade de determinado elemento químico (WHITE; ZASOSKI, 1999). Os mapeamentos nesta escala são escassos em território brasileiro (MARQUES JR. et al., 2015), mas contribuem para planejamentos agrícolas e urbanos em países como a China (LIU et al., 2013) e EUA (FRANZEN et al., 2006). Também, em alguns países da Europa as informações sobre distribuição espacial dos atributos do solo auxiliam na avaliação do impacto da política agrícola (CCE, 2009) em diferentes níveis de detalhe (DELLEN et al., 2011).

No Brasil existem poucos estudos em escalas detalhadas e abrangem áreas variando de poucos metros quadrados a 380 hectares (SIQUEIRA et al., 2014). No entanto a forma como esta informação é gerada influencia sua qualidade e possíveis utilizações (ODEH et al., 2007). Análises geoestatísticas (DEUTSCH; JOURNAL, 1998) e mapeamentos livres e categóricos (HUDSON, 1992) se destacam como as principais metodologias utilizadas para o mapeamento de solos. Por sua vez, esta última apresenta como desvantagem a não incorporação de informações diretas sobre a variabilidade espacial dos atributos do solo no momento do seu delineamento.

As análises geoestatísticas são comumente realizadas de forma exploratória, muitas vezes, não atendendo aos princípios da hipótese de estacionariedade da média, a qual afirma que ao longo de toda a área avaliada devem ser obtidos os

mesmos valores de média dos atributos avaliados (DEUTSCH; JOURNAL, 1998). Em adição, ao utilizar as análises geoestatísticas de forma exploratória, ignorando a existência de informações prévias obtidas por meio de mapas categóricos (ex. mapas pedológicos, geológicos e geomorfológicos), parte da precisão do mapa resultante do modelo geoestatístico é perdida. Desta forma, técnicas de mapeamento híbrido, a qual combina ambas as técnicas citadas acima vêm se destacando (CASTRIGNANÒ et al., 2009; HENGL et al., 2014).

Outro fator a se considerar para a definição da técnica a ser utilizada é a forma com que o mapa gerado é testado. Mapas categóricos utilizam a escala do seu levantamento como indício da precisão do mapa obtido. Por outro lado, mapas quantitativos são testados por meio de validações e análises de erros (TEIXEIRA et al., 2011; PEREIRA et al., 2013). Em ambos os casos, apenas uma visão geral do erro é obtida. Neste sentido, técnicas de simulação geoestatística promovem um avanço do conhecimento dos “erros” do mapeamento por meio das análises de incertezas (CASTRIGNANÒ et al., 2009). A utilização das análises de incertezas possibilita a identificação do “erro” envolvido na estimativa em cada região analisada. Estes erros podem ser associados a estratégias de otimização amostral (GRUNWALD et al., 2007) bem como a composição de cenários de estimativas (TEIXEIRA et al., 2012). Assim, a união destas informações apresenta grande potencial para atender as demandas de informações detalhadas de mapas dos atributos do solo (BREVİK et al., 2015).

Atualmente no Brasil, apesar do grande avanço científico das técnicas geoestatísticas, como variograma escalonado (PEREIRA et al., 2013), cokrigagem (TEIXEIRA et al., 2013b), simulação sequencial Gaussiana (TEIXEIRA et al., 2012; 2013a), dentre outras, pouco se sabe sobre o planejamento amostral (densidade amostral) ideal para a caracterização espacial dos atributos do solo (SIQUEIRA et al., 2014). Grande parte dos trabalhos brasileiros com foco no planejamento amostral é realizada em áreas relativamente pequenas e sem variabilidade de fatores geológicos e geomorfológicos (PEREIRA et al., 2013; TEIXEIRA et al., 2013b). Desta forma, a aplicação dos resultados obtidos é limitada aos fatores avaliados no estudo. Assim, o estudo do planejamento amostral em áreas com maior complexidade dos fatores de formação do solo apresenta-se como importante

atividade de pesquisa (BREVIK et al., 2015). O primeiro desafio científico transposto nesta Tese está relacionado à determinação do planejamento amostral dos atributos do solo utilizando informações previamente conhecidas e disponibilizadas gratuitamente. Uma das principais justificativas para a não utilização das técnicas geoestatísticas nos setores agrícolas é a grande demanda de amostras requerida. Assim, os resultados obtidos podem viabilizar a caracterização dos atributos do solo em escala detalhada.

O segundo desafio científico transposto pela Tese está relacionado à elaboração de um protocolo para a utilização das incertezas espaciais dos atributos do solo visando à incorporação da variabilidade espacial dos atributos do solo nos mapas de unidades de mapeamento. O protocolo consiste no delineamento de áreas homogêneas para a definição de unidades de mapeamento (área definida cuja variabilidade dos atributos é mínima) com base nas incertezas espaciais da suscetibilidade magnética (SM) e teor de argila, sendo estes atributos covariativos dos fatores e processos de formação do solo. A inclusão da variabilidade dos atributos do solo na readequação dos limites das unidades de mapeamento tem sido proposta por diversos autores (McBRATNEY et al., 2003; GRUNWALD, 2009). Entretanto a utilização desses conceitos no Brasil ainda está em fase inicial e se concentra principalmente em áreas menores e intensamente detalhadas (SIQUEIRA et al., 2014). Pedologicamente, o projeto poderá auxiliar na composição das unidades de mapeamento e atualização de legenda do mapa de solos além de indicar a localização mais adequada para a determinação do pédon modal de cada unidade delineada.

Diante do exposto acima, a hipótese deste trabalho é que a utilização de conjunta de mapas previamente disponíveis e modelos matemáticos podem auxiliar na redução da densidade amostral requerida, bem como propiciar o delineamento de unidades de mapeamento com controle da variabilidade espacial dos atributos do solo. Assim, objetivou-se: (i) avaliar a incorporação das informações geológicas, geomorfológicas e pedológicas na redução da densidade amostral necessária para a caracterização dos atributos do solo; e, (ii) utilizar as incertezas espaciais da SM e teor de argila para o aprimoramento de unidades de mapeamento.

1.2 Revisão de Literatura

1.2.1 Métodos para definição da unidade de mapeamento

As unidades de mapeamento podem ser definidas como corpos de solos delineados e agrupados de acordo com características morfológicas, variabilidade dos atributos do solo e recomendações de manejo. A facilidade em sua determinação está relacionada à complexidade dos ambientes estudados. Solos brasileiros apresentam grande diversidade dos fatores e processos de formação do solo (material de origem, forma da paisagem, dentre outros) o que, aliado a grande extensão territorial nacional, dificulta a obtenção de mapas de unidade de mapeamento em escalas detalhadas para todo o território (MINASNY et al., 2010; SIQUEIRA, 2013).

Diversas metodologias propõem auxiliar a identificação e mapeamento destas unidades de solos e de seus atributos. Segundo Legros (2006), as principais metodologias utilizadas podem ser agrupadas em cinco classes: (i) mapeamento pela similaridade de pédonos (mapeamento por malha de observações); (ii) mapeamento livre ou categórico, no qual são utilizados conceitos de relação solo-paisagem para definir os locais de amostras; (iii) classificação pela capacidade de uso da terra; (iv) mapeamento utilizando-se análise geoestatística; e, (v) mapeamento por meio da lógica Fuzzy. Mapeamentos que utilizam conjuntamente conceitos determinísticos (classes i, ii e iii) e matemáticos (classes iv e v) compreendem uma nova classe de mapeamento denominada de mapeamentos híbridos. Esta nova abordagem propicia o conhecimento dos solos e seus atributos, com menor subjetividade do que a apresentada pelos métodos tradicionais (McBRATNEY et al., 2000).

A utilização das informações espaciais produzidas por metodologias geoestatísticas e/ou lógica Fuzzy possibilita o conhecimento sobre a variabilidade espacial dos atributos do solo. Conforme discutido anteriormente, esta é uma das principais informações utilizadas para o delineamento das unidades de mapeamento do solo, de forma que a variabilidade espacial dos atributos do solo seja mínima dentro de uma unidade de solo e máxima entre unidades (CASTRIGNANÒ et al.,

2009). Em adição, estas metodologias fornecem também as incertezas presentes nas estimativas espaciais dos atributos do solo (GRUNWALD et al., 2007; TEIXEIRA et al., 2012; SILVA Jr. et al., 2012; OLIVEIRA et al., 2013, 2014) e/ou unidades de mapeamento (ZHU et al., 1997; Nolasco-CARVALHO et al., 2009; SILVA; LIMA et al., 2009).

O conceito de incerteza difere do conceito de erro da estimativa. Os erros são obtidos pela diferença entre os valores reais e os estimados por um determinado modelo. Em geoestatística, a principal forma de determinação dos erros das estimativas é a chamada validação externa, no qual um conjunto de pontos é utilizado para a comparação dos valores preditos pelo modelo com os obtidos em campo (TEIXEIRA et al., 2012). Por outro lado, as incertezas são estimadas quando não se tem o conhecimento do valor real obtido em campo transmitindo uma ideia de dúvida ou conhecimento incompleto do fenômeno (PEREIRA, 2009).

As incertezas das estimativas dos atributos do solo estão relacionadas, principalmente, a densidade amostral e a variabilidade dos mesmos. Assim, regiões com menor densidade amostral (maior espaçamento entre amostras) (TEIXEIRA et al., 2012) e regiões com maior variabilidade dos atributos do solo (transições geológicas e geomorfológicas) apresentarão maior incerteza das estimativas (GRUNWALD et al., 2007). Por outro lado, a incerteza na determinação das unidades de mapeamento está relacionada principalmente a probabilidade de certo local pertencer ou não a unidade delineada (ODGERS et al., 2015). Entretanto, como as unidades de solos devem ser delineadas com menor variabilidade dos atributos do solo, as duas técnicas podem ser utilizadas para a sua determinação.

As incertezas estão presentes e podem ser aplicadas no mapeamento convencional do solo, mapeamento digital do solo e agricultura de precisão. No mapeamento convencional do solo, as incertezas são facilmente visualizadas ao se comparar mapas da mesma área delineados por diferentes pedólogos (BAZAGLIA FILHO et al., 2013). Sua estimativa e utilização poderia contribuir para a escolha do local em que será determinado o pédon modal que dará nome a unidade de solo mapeada. Para o mapeamento digital do solo, as incertezas podem identificar as regiões com maior necessidade de covariáveis ambientais mais detalhadas (geologia, relevo, dentre outras) visando o aumento do refinamento e da qualidade

do mapa obtido. Enquanto para a agricultura de precisão, a incorporação do conhecimento das incertezas possibilitaria a identificação das regiões com maior necessidade de amostragem.

1.2.2 Ferramentas estatísticas para a determinação das incertezas

A determinação das incertezas das estimativas sempre foi algo complexo e de difícil execução. Entretanto, com o avanço computacional das últimas décadas diversas metodologias foram desenvolvidas e viabilizadas para esta finalidade. Dentre as principais metodologias utilizadas para a determinação das incertezas associadas às unidades de solo e aos seus atributos, destacam-se as técnicas de lógica Fuzzy, teoria algébrica de gráficos, técnicas de interpolação por equações multiquádricas, técnicas de propagação de erros e técnicas geoestatísticas.

A lógica Fuzzy é aplicada tanto para o mapeamento dos atributos do solo (SILVA; LIMA, 2009) quanto para a delimitação das unidades de solo (ZHU, 1997). Seu objetivo é simular, de modo aproximado, o raciocínio humano visando responder uma questão baseada em um conhecimento inexato, incompleto e não totalmente confiável (SILVA; LIMA, 2009). A técnica permite simular por meio de probabilidades as incertezas e transições comuns aos sistemas pedológicos, associando o grau de certeza à experiência do pedólogo, aos dados auxiliares relacionados aos fatores de formação do solo e aos conhecimentos previamente obtidos (NOLASCO-CARVALHO et al., 2009). Zhu (1997) utilizando a lógica Fuzzy para avaliar as incertezas presentes no mapeamento de solo em áreas montanhosas verificou que as áreas com alta elevação apresentaram maior precisão (menor incerteza) no mapeamento do que as demais. Entretanto, esta técnica apresenta alta complexidade de entendimento e dificuldade em sua implementação o que a faz ser pouco utilizada.

A teoria algébrica de gráficos associada aos limites de classificação arbitrários entre as unidades de mapeamento de solo também pode ser utilizada para produzir uma medida de incerteza das unidades de solo delineadas (PHILLIPS, 2013). Nesta, quanto maior a complexidade da região, maior a incerteza e o erro potencial associado à taxonomia adjacente. Assim, como a álgebra de gráficos, as técnicas de

interpolação por equações multiquádricas também são utilizadas para avaliar a incerteza em torno de valores interpolados de variáveis categóricas, como no caso das unidades de solo (YAMAMOTO; LANDIM, 2013). Esta é comumente aplicada para ocasiões em que os princípios geoestatísticos não podem ser satisfeitos devido ao pequeno número de dados disponíveis. Neste caso, a variância da interpolação pode ser utilizada como medida da incerteza em torno do valor interpolado, possibilitando o mapeamento de zonas de incertezas entre as unidades de solo.

Outra forma de se avaliar a incerteza consiste na utilização das análises de propagação de erros. Estas são utilizadas, principalmente, para calcular a incerteza presente nas estimativas de um atributo do solo o qual é derivado de outros atributos medidos. Hengl et al. (2014) determinaram a incerteza espacial das estimativas do estoque de carbono do solo, baseado nas incertezas individuais dos atributos que afetam seu cálculo.

As técnicas geoestatísticas são as principais ferramentas utilizadas para a avaliação das incertezas e podem ser aplicadas na estimativa dos atributos do solo (GRUNWALD et al., 2007; TEIXEIRA et al., 2012; SILVA Jr. et al., 2012; OLIVEIRA et al., 2013, 2014) e das unidades de mapeamento (variáveis categóricas) (SILVA et al., 2015). As técnicas de krigagem, devido a sua simplicidade e rapidez de execução, são os principais interpoladores geoestatísticos utilizados nas ciências agrárias. Seus estimadores fornecem a melhor estimativa local da variável estudada por meio da minimização da estimativa da variância, resultando na suavização dos detalhes espaciais. Mapas da variância da krigagem são utilizados por alguns autores (CAMBULE et al., 2014) para a representação das incertezas nas estimativas dos atributos do solo. Entretanto, a utilização da variância produzida pela krigagem como medida de erro local é inadequada quando a configuração dos dados conjuntamente com a incerteza nas estimativas são consideradas (ZHAO et al., 2009), uma vez que apenas o variograma e a configuração amostral são consideradas em seus cálculos. Assim, dentre as técnicas geoestatísticas, as simulações são as mais adequadas para a determinação das incertezas nas estimativas dos atributos do solo (DEUTSH; JOURNAL, 1998), entretanto o tempo de execução pode inviabilizar sua utilização para um grande número de dados (HENGL et al., 2014).

As técnicas de simulação, além de possibilitar a avaliação das incertezas das estimativas, também apresentam-se como alternativa à suavização característica dos mapas krigados (GRUNWALD et al., 2007). Estas são baseadas na técnica de simulação de Monte Carlo, na qual, em sua essência gera uma realização de um processo aleatório (PEREIRA, 2009). As simulações geoestatísticas apresentam como principais características a reprodução dos histogramas e variogramas dos dados amostrais (DEUTSH; JOURNEL, 1998). Sua utilização tem sido amplamente difundida, sendo aplicada na predição espacial e avaliação das incertezas em áreas como: conservação do solo (CASTRIGNANÒ et al., 2008), mapeamento de unidades de solo (SILVA et al., 2015), respiração do solo (TEIXEIRA et al., 2012, 2013a), contaminação do solo por metais pesados (ZHAO et al., 2007), e determinação de atributos físicos (TEIXEIRA et al., 2012), químicos (OLIVEIRA et al., 2013, 2014) e mineralógicos (SILVA Jr. et al., 2012) do solo.

As simulações geoestatísticas são processos desenhos alternativos, igualmente prováveis, de realizações conjuntas de uma componente de uma variável aleatória a partir de um modelo de função aleatória (DEUTSH; JOURNEL, 1998). A Figura 1 apresenta um resumo das etapas da técnica de simulação (simulação sequencial gaussiana – SSG) utilizada nesta Tese. O procedimento da SSG inicia-se com a normalização dos dados da variável analisada. Posteriormente, o variograma é modelado para os dados da variável normalizada. Então é definido um caminho aleatório capaz de passar por todos os locais a serem simulados (malha refinada). Estimativas locais do valor e variância são realizadas pela krigagem simples (KS) considerando os valores originais vizinhos e os previamente simulados. Com base na média e variância estimadas pela KS constroem-se a função de distribuição acumulada (fdac). A partir da fdac, seleciona-se aleatoriamente um valor para representar a estimativa deste local da malha amostral refinada. Após a determinação dos valores simulados em todos os pontos de uma grade mais refinada, realiza-se a transformação de volta para os valores originais. Posteriormente estas etapas são repetidas até que todas as realizações sejam efetuadas. Assim, inúmeras realizações equiprováveis são conduzidas. Então, com base nas n realizações efetuadas estima-se a incerteza na estimativa da variável.

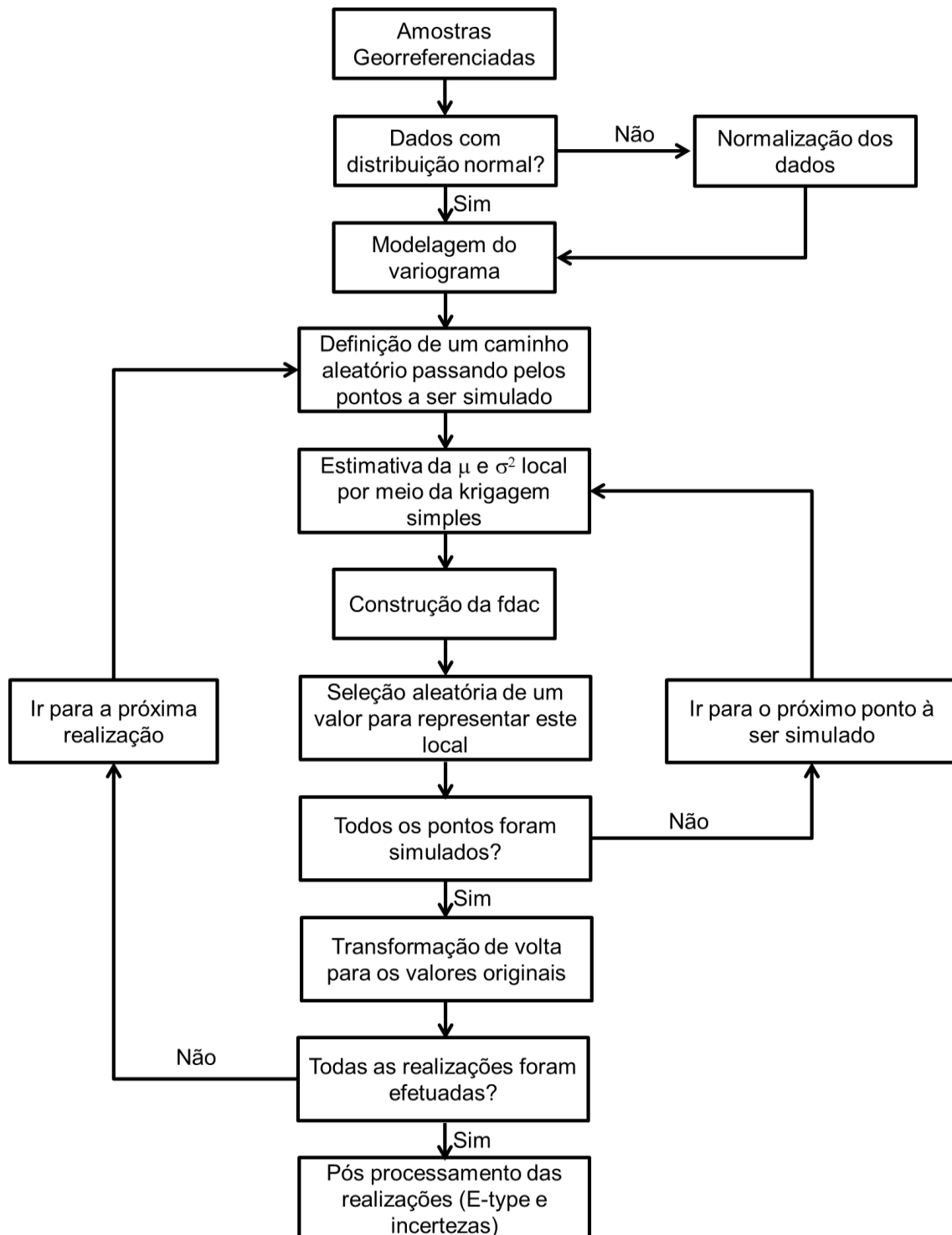


Figura 1. Etapas para o procedimento de simulação sequencial gaussiana.

As incertezas podem ser derivadas visualmente por meio da comparação das n realizações efetuadas ou por meio da estimativa local do desvio padrão (GRUNWALD et al., 2007; TEIXEIRA et al., 2012; SILVA Jr. et al., 2012; OLIVEIRA

et al., 2013, 2014), variância (DEUTSH; JOURNAL, 1998), valores mínimos e máximos (GRUNWALD et al., 2007; TEIXEIRA et al., 2012), intervalo de confiança da média (VISCARRA-ROSSEL et al., 2014), percentis (ODGERS et al., 2015) e cálculo das probabilidades conjuntas (TEIXEIRA et al., 2013a).

1.2.3 Utilização de informações categóricas e atributos covariativos dos processos e fatores de formação do solo no mapeamento híbrido

A utilização de conhecimento prévio por meio de mapas com informações categóricas (CASTRIGNANÓ et al., 2009; HENGL et al., 2014; SAMUEL-ROSA et al., 2015) e ou por meio de atributos facilmente obtidos e relacionados a característica de interesse (TEIXEIRA et al., 2013b) constitui outra área de pesquisa com avanços recentes significativos (BREVIK et al., 2015). Entretanto, grande parte das pesquisas a utilizam apenas como forma de melhorar a qualidade do mapa final obtido e não como informações úteis para o planejamento amostral, etapa prévia a interpolação que muitas vezes pode inviabilizar sua execução.

A incorporação destas informações pode ser feita de diversas formas, com destaque para as técnicas de lógica Fuzzy, discutida anteriormente, e análises geoestatísticas. Dentre as análises geoestatísticas mais utilizadas podemos citar as técnicas de krigagem estratificada, krigagem com deriva externa e krigagem simples com média local variando.

A técnica de krigagem estratificada é utilizada em áreas onde a estacionariedade da média não pode ser assumida. Nesta condição os dados devem ser avaliados dentro de cada estrato como populações independentes (compartimentos geológicos, geomorfológicos, unidades de mapeamento e etc.). Entretanto, a estratificação é comumente condicionada à existência de dados suficientes em cada estrato para o desenvolvimento da análise (GOOVAERTS, 1997).

A técnica de krigagem com deriva externa possibilita a estimação de uma variável primária com base em dados de uma variável secundária correlacionada linearmente. Nesta técnica, os valores da variável primária devem ser amostrados de forma mais escassa em relação a variável secundária que, por sua vez, deve ser

obtida para todos os pontos em que a variável primária é conhecida e também para todos os pontos a serem estimados (YAMAMOTO; LANDIM, 2013). Embora seja amplamente aplicada, esta técnica apresenta grande complexidade e requer um maior tempo para sua execução.

A técnica de krigagem simples com médias locais variando (KS_{MLV}), utilizada nesta Tese, é uma derivação da técnica de krigagem simples (KS). Na prática, a KS_{MLV} é aplicada em situações em que: (i) o formalismo da estacionariedade não pode ser assumido para toda a área; (ii) existe um bom conhecimento da tendência do fenômeno; e, (iii) objetiva-se fornecer informações secundárias, sejam estas qualitativas ou quantitativas, da área em estudo (GOOVAERTS, 1997). O procedimento da KS_{MLV} inicia-se com a identificação dos compartimentos influentes (geologia, geomorfologia, unidades de mapeamento, dentre outros) na média da variável de interesse. Posteriormente, são estimados os valores médios da variável para cada compartimento. Os valores dos resíduos, obtidos pela diferença entre os valores reais observados e as médias de cada compartimento são utilizados para a construção do variograma e posterior interpolação por meio da KS. Após a interpolação é adicionada aos valores interpolados à média de cada compartimento estratificado, incorporando desta forma as informações previamente conhecidas.

Além da metodologia para a incorporação das informações auxiliares, outra atividade de pesquisa em desenvolvimento é a definição das variáveis a serem utilizadas para auxiliar a predição espacial dos atributos ou unidades de solo (SAMUEL-ROSA et al., 2015). Estas variáveis são selecionadas com base na disponibilidade de dados e experiência do pesquisador (MILLER et al., 2015). Para a modelagem e mapeamento de atributos do solo em escala global as principais covariáveis utilizadas são geologia, clima, biomassa e unidades de solo (HENGL et al., 2014). Entretanto, para escalas mais detalhadas informações derivadas do relevo apresentam as maiores contribuições aos modelos (FÜRST et al., 2010).

As principais informações de relevo utilizadas, muitas vezes derivadas a partir de técnicas de sensoriamento remoto, são: declividade, altitude, distância da rede de drenagem, curvaturas de perfil, curvaturas plana, orientação da vertente, curvatura da seção transversal e índice topográfico (MILLER et al., 2015). Recentemente, Vasconcelos et al. (2012) propôs uma nova metodologia para a identificação de

compartimentos geomorfométricos visando diminuir a subjetividade da identificação de compartimentos pelos modelos conceituais de paisagem (DALRYMPLE et al., 1968) e auxiliar a utilização deste tipo de informação no mapeamento digital de solos (SIQUEIRA, 2013). Tal metodologia mostrou-se eficaz na identificação de áreas com maior potencial de produtividade e qualidade de cana-de-açúcar (SANCHEZ NETO, 2015) bem como auxiliou na identificação de unidades de solo segundo a variabilidade natural dos atributos do mesmo (SIQUEIRA, 2013).

Informações auxiliares quantitativas também podem ser utilizadas na definição de unidades de solo (SIQUEIRA, 2013) ou estimativas de atributos do solo (TEIXEIRA et al., 2013b). Para tal, as variáveis selecionadas devem apresentar forte relação com as propriedades do solo, ser de fácil obtenção e variar suavemente no espaço (GOOVAERTS, 1997). Neste sentido as técnicas de condutividade elétrica (BRENNING et al., 2008), suscetibilidade magnética (SM) (CAMARGO, 2013; MARQUES Jr. et al., 2014) e espectroscopia de reflectância difusa (ERD) (BARRÓN et al., 2000) têm se destacado por viabilizar a caracterização da variabilidade e mapeamento de atributos do solo.

A condutividade elétrica pode apresentar instabilidades em solos tropicais, uma vez que esta sofre alterações em regiões com elevada presença de óxidos (WU et al., 2008) e sob condições com grande variação da umidade do solo. Entretanto, a SM e a ERD não apresentam tais instabilidades, mostrando-se como opção ao delineamento de unidades de mapeamento com diferentes padrões de variabilidade (CAMARGO, 2013; SIQUEIRA, 2013). A ERD fornece informações sobre os atributos físicos, químicos e mineralógicos com considerável diminuição de tempo, em especial dos atributos mineralógicos quando comparado a outras técnicas mineralógicas, como a difração de raios X (BAHIA, 2013). Entretanto, para sua determinação são necessários equipamentos altamente tecnológico que requerem um alto investimento inicial.

A SM, por sua vez, requer um menor investimento inicial. Esta está relacionada com a capacidade de um material se magnetizar na presença de um campo magnético e é oriunda das propriedades de rotação dos elétrons dos minerais presentes na rocha ou no solo (CRAIK, 1995). Assim, sua magnitude depende das características e concentrações dos minerais magnéticos (MARQUES

Jr. et al., 2014). Segundo Dearing (1994) existem cinco tipos de comportamento magnéticos: ferromagnetismo (ex. ferro e cobalto), ferrimagnetismo (ex. magnetita e maghemita), antiferromagnetismo (ex. hematita e goethita), diamagnetismo (ex. calcita e quartzo) e paramagnetismo (ex. olivina e biotita).

As substâncias ferromagnéticas apresentam alta SM, mas não são comumente encontradas no ambiente. Nestas os spins dos elétrons são altamente ordenados e alinhados na mesma direção. Nos minerais ferrimagnéticos, assim como os ferromagnéticos, os momentos magnéticos são fortemente alinhados, mas existem dois conjuntos opostos de forças desiguais controlados pela estrutura de rede cristalina de certos minerais. Nos minerais antiferromagnéticos, a presença de dois conjuntos opostos de forças faz com que o momento magnético seja praticamente nulo. Nos minerais diamagnéticos o campo magnético interage com o movimento dos elétrons produzindo valores de SM baixos ou negativos. Por último, os minerais paramagnéticos também apresentam alinhamento dos elétrons apenas sobre a presença de campo magnético apresentando baixos valores de SM (DEARING, 1994).

Devido a grande relação da SM com os principais minerais presentes no solo nas regiões tropicais, esta é considerada covariativa dos fatores e processos de formação do solo. A SM tem sido aplicada com êxito para diversos fins tais como: determinação do potencial de perda de solos (BARBOSA, 2014), produtividade de cana-de-açúcar (MARQUES Jr., 2014), emissão de CO₂ do solo (LEAL et al., 2015), adsorção de fósforo (PELUCO et al., 2015), aplicação de vinhaça (PELUCO et al., 2013), mapeamentos detalhados em áreas de cana-de-açúcar (SIQUEIRA, 2013), dentre outros.

1.3 Referências

BAHIA, A. S. R. S. **Espectroscopia de reflectância difusa como técnica auxiliar na caracterização da emissão de CO₂ e atributos do solo**. 2012. 74 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2012.

BARBOSA, R. S. **Erodibilidade de Latossolos predita pela suscetibilidade magnética e espectroscopia de reflectância difusa**. 2014. 65 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2014.

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. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**, Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p.139-162.

BAZAGLIA FILHO, O.; RIZZO, R.; LEPSCH, I. F.; PRADO, H.; GOMES, F. H.; MAZZA, J. A.; DEMATTÊ, J. A. M. Comparison between detailed digital and conventional soil maps of an area with complex geology. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 5, p. 1136-1148, 2013.

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.

BREVIK, E.C.; CALZOLARI, C.; MILLER, B.A.; PEREIRA, P.; KABALA, C.; BAUMGARTEN, A.; JORDÁN, A. Soil mapping, classification, and pedologic modeling: History and future directions. **Geoderma**, Amsterdam, 2015. (In press).

CAMARGO, L. A. **Mineralogia da argila por difração de raios x e espectroscopia de reflectância difusa em Latossolos sob diferentes superfícies geomórficas**. 2013. 125 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2013.

CAMBULE, A. H.; ROSSITER, D. G.; STOORVOGEL, J. J.; SMALING, E. M. A. Soil organic carbon stocks in the Limpopo National Park, Mozambique: Amount, spatial distribution and uncertainty. **Geoderma**, Amsterdam, v. 213, p. 46-56, 2014.

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

CASTRIGNANO, A.; BUTTAFUOCO, G.; CANU, A.; ZUCCA, C.; MADRAU, S. Modelling spatial uncertainty of soil erodibility factor using joint stochastic simulation. **Land Degradation & Development**, Chichester, v. 19, n.2, p. 198-213, 2008.

CASTRIGNANÒ, A.; COSTANTINI, E. A. C.; BARBETTI, R.; SOLLITTO, D. Accounting for extensive topographic and pedologic secondary information to improve soil mapping. **Catena**, Amsterdam, v. 77, n. 1, p. 28-38, 2009.

CCE. **Communication from the Commission to the European Parliament and the Council: A Simplified CAP for Europe – A Success For All**. COM (2009) 128 final of 18.3.2009. Brussels, Belgium. 2009.

CRAIK, D. **Magnetism, Principles and Applications**. John Wiley and Sons, 1995. 459 p.

DALRYMPLE, J. B.; BLONG, R. J.; CONACHER, A. J. A hypothetical nine unit land a surface model. Z. **Geomorphology**, Berlin, v. 12, n. 1, p. 60-76, 1968.

DEARING, J. A. **Environmental magnetic susceptibility. Using the Bartington MS2 System**. British Library, England. 1994. 104 p.

DELLEN, H.; VLIET, J.; RUTLEDGE, D. T.; KIRKBY, M. J. Comparison of scale and scaling issues in integrated land-use models for policy support. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 142, n. 1-2, p. 18-28, 2011.

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

FRANZEN, D. W.; NANNA, T.; NORVELL, W. A. A survey of soil attributes in North Dakota by landscape position. **Agronomy Journal**, Madison, v. 98, p. 1015-1022, 2006.

FÜRST, C.; ZIRLEWAGEN, D.; LORZ, C. Regionalization of Magnetic Susceptibility Measurements Based on a Multiple Regression Approach. **Water, Air, and Soil Pollution**, Dordrecht, v. 208, n. 1-4, p. 129–151, 2010.

GOOVAERTS, P. **Geostatistics for Natural Resources Evaluation**. New York: Oxford University Press, 1997. 483 p.

GRUNWALD, S. Multi-criteria characterization of recent digital soil mapping and modeling approaches. **Geoderma**, Amsterdam, v. 152, n. 3-4, p. 195–207, 2009.

GRUNWALD, S.; REDDY, K. R.; PRENGER, J. P.; FISHER, M. M. Modeling of the spatial variability of biogeochemical soil properties in a freshwater ecosystem. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 201, n. 3-4, p. 521-535, 2007.

HENGL, T.; JESUS, J. M.; MACMILLAN, R. A.; BATJES, N. H.; HEUVELINK, G. B. M.; RIBEIRO, E.; SAMUEL-ROSA, A.; KEMPEN, B.; LEENAARS, J. G. B.; WALSH, M. G.; GONZALEZ, M. R. SoilGrids1km — Global Soil Information Based on Automated Mapping. **Plos One**, San Francisco, v. 9, n. 8, 2014.

HUDSON, B. D. The Soil Survey as Paradigm-Based Science. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, p. 836-841, 1992.

LEAL, F. T.; FRANÇA, A. B. C.; SIQUEIRA, D. S.; TEIXEIRA, D. D. B.; MARQUES Jr., J.; LA SCALA Jr., N. Characterization of potential CO₂ emissions in agricultural areas using magnetic susceptibility. **Scientia Agricola**, Piracicaba, 2015 (No prelo).

LEGROS, J. P. **Mapping of the soil**. Science Pub Inc, 2006. 411 p.

LIU, Y.; LV, J.; ZHANG, B.; BI, J. Spatial multi-scale variability of soil nutrients in relation to environmental factors in a typical agricultural region, Eastern China. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 450–451, p. 108–119, 2013.

MARQUES Jr., J.; SIQUEIRA, D. S.; CAMARGO, L. A.; TEIXEIRA, D. D. B.; BARRON, V.; TORRENT, J. Magnetic susceptibility and diffuse reflectance spectroscopy to characterize the spatial variability of soil properties in a Brazilian Haplustalf. **Geoderma**, Amsterdam, v. 219-220, p. 63-71, 2014.

MARQUES Jr., J.; ALLEONI, L. R. F.; TEIXEIRA, D. D. B.; SIQUEIRA, D. S.; PEREIRA, G. T. Sampling planning of micronutrients and aluminium of the soils of São Paulo, Brazil. **Geoderma Regional**, Amsterdam, v. 4, p. 91-99, 2015.

McBRATNEY, A. B.; ODEH, I. O. A.; BISHOP, T. F. A.; DUNBAR, M. S.; SHATAR, T. M. An overview of pedometric techniques for use in soil survey. **Geoderma**, Amsterdam, v. 97, n. 3-4, p. 293-327, 2000.

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

MILLER, B. A.; KOSZINSKI, S.; WEHRHAN, M.; SOMMER, M. Impact of multi-scale predictor selection for modeling soil properties. **Geoderma**, Amsterdam, v. 239-240, p. 97-106, 2015.

MINASNY, B.; ALEX, B.; MCBRATNEY, A. B.; HARTEMINK, A. E. Global pedodiversity, taxonomic distance, and the World Reference Base. **Geoderma**, Amsterdam, v. 155, n. 3-4, p. 132-139, 2010.

NOLASCO-CARVALHO, C. C.; FRANCA-ROCHA, W.; UCHA, J. M. Mapa digital de solos: Uma proposta metodológica usando inferência fuzzy. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 1, p. 46-55, 2009.

ODEH, I. O. A.; CRAWFORD, M.; MCBRATNEY, A. B. Digital mapping of soil attributes for regional and catchment modelling, using ancillary covariates, statistical and geostatistical techniques. In: LAGACHERIE, P.; MCBRATNEY, A. B.; VOLTZ, M. (Eds.). **Developments in Soil Science**, London: Elsevier. 2007. p. 437-454.

ODGERS, N. P.; MCBRATNEY, A. B.; MINASNY, B. Digital soil property mapping and uncertainty estimation using soil class probability rasters. **Geoderma**, Amsterdam, v. 237-238, p. 190-198, 2015.

OLIVEIRA, I. R.; TEIXEIRA, D. D. B.; PANOSSO, A. R.; CAMARGO, L. A.; MARQUES Jr., J.; PEREIRA, G. T. Modelagem geoestatística das incertezas da distribuição espacial do fósforo disponível no solo, em área de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 6, p. 1481-1491, 2013.

OLIVEIRA, I. R.; Teixeira, D. D. B.; PANOSSO, A. R.; MARQUES Jr., J.; PEREIRA, G. T. Modelagem e quantificação da incerteza espacial do potássio disponível no solo por simulações estocásticas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 49, n. 9, p. 708-718, 2014.

PELUCO, R. G.; MARQUES Jr., J.; SIQUEIRA, D. S.; PEREIRA, G. T.; BARBOSA, R. S.; Teixeira, D. D. B. Mapeamento do fósforo adsorvido por meio da cor e da suscetibilidade magnética do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 50, n. 3, p. 259-266, 2015.

PELUCO, R. G.; MARQUES Jr., J.; SIQUEIRA, D. S.; PEREIRA, G. T.; BARBOSA, R. S.; TEIXEIRA, D. D. B.; ADAME, C. R.; CORTEZ, L. A. Suscetibilidade magnética do solo na estimação da capacidade de suporte à aplicação de vinhaça. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 48, n. 6, p. 661-672, 2013.

PEREIRA, G. T. **Avaliação da variabilidade espacial por técnicas de simulação**. 2009. 118 f. Tese de Livre Docência – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2009.

PEREIRA, G. T.; SOUZA, Z. M.; TEIXEIRA, D. D. B.; MONTANARI, R.; MARQUES JR., J. Optimization of the sampling scheme for maps of physical and chemical properties estimated by kriging. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 5, p. 1128-1135, 2013.

PHILLIPS, J. D. Evaluating taxonomic adjacency as a source of soil map uncertainty. **European Journal of Soil Science**, Chichester, v. 64, n. 4, p. 391-400, 2013.

SAMUEL-ROSA, A.; HEUVELINK, G. B. M.; VASQUES, G. M.; ANJOS, L. H. C. Do more detailed environmental covariates deliver more accurate soil maps? **Geoderma**, Amsterdam, v. 243-244, p. 214-227, 2015.

SANCHEZ NETO, V. **Produção e qualidade da cana-de-açúcar em diferentes formas do relevo**. 2015. 51 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2015.

SILVA Jr., J. F.; MARQUES Jr., J.; CAMARGO, L. A.; TEIXEIRA, D. D. B.; PANOSSO, A. R.; PEREIRA, G. T. Simulação geoestatística na caracterização espacial de óxidos de ferro diferentes pedofomas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 6, p. 1690-1703, 2012.

SILVA, A. F.; PEREIRA, M. J.; ZIMBACK, C. R. L.; LANDIM, P. M. B.; SOARES, A. Simulação sequencial de atributos diagnósticos do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, n. 5, p. 418-425, 2015.

SILVA, S. A.; LIMA, J. S. S. Lógica Fuzzy no mapeamento de variáveis indicadoras de fertilidade do solo. **Idesia**, Arica, v. 27, n. 3, p. 41-46, 2009.

SIQUEIRA, D. S. **Mapeamento de atributos e planejamento amostral para Latossolos utilizando suscetibilidade magnética, cor e relação solo-paisagem**. 2013. 109 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2013.

SIQUEIRA, D. S.; MARQUES Jr., J.; PEREIRA, G. T.; BARBOSA, R. S.; TEIXEIRA, D. D. B.; PELUCO, R. G. Sampling density and proportion for the characterization of the variability of Oxisol attributes on different materials. **Geoderma**, Amsterdam, v. 232–234, p. 172–182, 2014.

TEIXEIRA, D. D. B.; BICALHO, E. S.; CERRI, C. E. P.; PANOSSO, A. R.; PEREIRA, G. T.; LA SCALA, N. Quantification of uncertainties associated with space-time estimates of short-term soil CO₂ emissions in a sugar cane area. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 167, p. 33-37, 2013a.

TEIXEIRA, D. D. B.; BICALHO, E. S.; PANOSSO, A. R.; CERRI, C. E. P.; PEREIRA, G. T.; LA SCALA, N. Spatial variability of soil CO₂ emission in a sugarcane area characterized by secondary information. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 70, n. 3, p. 195-203, 2013b.

TEIXEIRA, D. D. B.; BICALHO, E. S.; PANOSSO, A. R.; PERILLO, L. I.; IAMAGUTI, J. L.; PEREIRA, G. T.; LA SCALA JR., N. Uncertainties in the prediction of spatial variability of soil CO₂ emissions and related properties. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 5, p. 1466-1475, 2012.

TEIXEIRA, D. D. B.; PANOSSO, A. R.; CERRI, C. E. P.; PEREIRA, G. T.; LA SCALA, N. Soil CO₂ emission estimated by different interpolation techniques. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 345, n. 1-2, p. 187-194, 2011.

VASCONCELOS, V.; CARVALHO Jr., O. A.; MARTINS, E. S.; COUTO Jr., A. F.; GUIMARAES, R. F.; GOMES, R. A. T. Sistema de classificação geomorfométrica baseado em uma arquitetura sequencial em duas etapas: árvore de decisão e classificador espectral, no Parque Nacional Serra da Canastra. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Brasília, v.13, n. 2, p. 171-186, 2012.

VISCARRA-ROSSEL, R. A.; WEBSTER, R.; BUI, E. N.; BALDOCK, J. A. Baseline map of organic carbon in Australian soil to support national carbon accounting and monitoring under climate change. **Global Change Biology**, Chichester, v. 20, n. 9, p. 2953–2970, 2014.

WHITE, J. G.; ZASOSKI, R. J. Mapping Soil Micronutrients. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 60, n. 1-2, p. 11-26, 1999.

WU, Y.; SLATER, L.; VERSTEEG, R.; LABRECQUE, D. A comparison of the low frequency electrical signatures of iron oxide versus calcite precipitation in granular zero valent iron columns. **Journal of Contaminant Hydrology**, Amsterdam, v. 95, n. 3-4, p. 154-167, 2008.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística Conceitos e Aplicações**. Editora Oficina de Textos, 2013. 216 p.

ZHAO, Y.; XU, X.; DARILEK, J. L.; HUANG, B.; SUN, W.; SHI, X. Spatial variability assessment of soil nutrients in an intense agricultural area, a case study of Rugao County in Yangtze River Delta Region, China. **Environmental Geology**, New York, v. 57, n. 5, p. 1089–1102, 2009.

ZHAO, Y.; XU, X.; HUANG, B.; SUN, W.; SHAO, X.; SHI, X.; RUAN, X. Using robust kriging and sequential Gaussian simulation to delineate the copper- and lead-contaminated areas of a rapidly industrialized city in Yangtze River Delta, China. **Environmental Geology**, New York, v. 52, n. 7, p. 1423-1433, 2007.

ZHU, A. X. Measuring uncertainty in class assignment for natural resource maps under Fuzzy logic. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v. 63, n. 10, p. 1195-1202, 1997.

CAPÍTULO 2 – Planejamento amostral para quantificação e mapeamento de atributos de solos utilizando informações auxiliares

Resumo – Existe grande demanda mundial por mapas detalhados de atributos do solo. Para esta demanda ser atendida, a determinação do planejamento amostral ideal para cada local torna-se imprescindível. Neste estudo objetivou-se avaliar a incorporação de informações geológicas, geomorfológicas e pedológicas na redução da densidade amostral necessária para a caracterização dos atributos do solo. A área de estudo, localizada no município de Guatapar, possui 870 ha. Foram coletadas 371 amostras na profundidade de 0-0,25 m para a avaliao da suscetibilidade magntica (SM), teor de argila e saturao por bases (V%). Foram consideradas as densidades de 1 amostra a cada 2,6; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 11; e 14 ha. A incorporao das informaoes secundrias nos modelos geoestatsticos foi realizada por meio da krigagem simples com mdias locais variando. A avaliao da acurcia das estimativas espaciais em cada densidade amostral com e sem a incorporao das informaoes secundrias foi realizada por meio de validao externa. Para a SM as informaoes sobre a geologia e geomorfologia foram responsveis, respectivamente, por cerca de 45% e 44% da sua continuidade espacial. Para o teor de argila, estes resultados foram superiores indicando 54% (geologia) e 53% (geomorfologia). Por outro lado, informaoes pedolgicas sobre as unidades de mapeamento no explicaram a variabilidade espacial dos atributos estudados. Para o V% no foi observada relao entre as informaoes secundrias e sua continuidade espacial. As incorporaoes das informaoes geolgicas e geomorfolgicas aos dados de SM propiciaram, respectivamente, a reduo em 37% e 44% no nmero de amostras requeridas para representar o padro espacial do atributo. Para o teor de argila, a utilizao destas informaoes propicia a reduo de 35% na densidade amostral requerida. Para V%, a incorporao das informaoes secundrias no possibilitaram a reduo da densidade amostral. Assim, pode-se afirmar que a incorporao de informaoes previamente existentes possibilita a melhoria na qualidade das estimativas geradas e a diminuio do nmero de amostras necessrias para a representao detalhada da SM e teor de argila. Os

padrões espaciais estimados com a utilização das informações geológicas e formas da paisagem para a modelagem de todos os atributos avaliados podem apresentar maior potencial de uso para composição de modelos ambientais.

Palavras-chave: densidade amostral, geologia, geomorfologia, classe de solos, geoestatística, krigagem simples com média local variando.

2.1 Introdução

As recentes alterações no uso da terra e intensificação dos processos de formação e degradação do solo comprometem a qualidade do mesmo e do ambiente. Neste contexto, existe grande demanda por informações detalhadas sobre o solo que possibilitem sua utilização de forma sustentável (Grunwald et al., 2011; Brevik et al., 2015). O mapa de solos é uma das ferramentas disponíveis para atender essa demanda, sendo considerado uma das principais ferramentas para o planejamento estratégico das atividades agrícolas, urbanas e, de gestão da variabilidade do solo (Li e Heap, 2008). Desde que em escala adequada (Delden et al., 2011), seu conhecimento pode ser utilizado para o delineamento de áreas com deficiência ou toxicidade de determinado elemento químico (Lv et al., 2013), fornecimento de indícios sobre a relação entre os atributos do solo e a produtividade agrícola, produção animal e saúde humana (White e Zasoski, 1999), otimização amostral (Vašát et al., 2010; Montanari et al., 2012) e de insumos agrícolas (White e Zasoski, 1999).

Diversos protocolos de modelagem e mapeamento do solo vêm sendo desenvolvidos para auxiliar na compreensão de sua variabilidade (Legros, 2006). Segundo Castrignanò et al. (2009), as principais metodologias utilizadas podem ser divididas em dois grupos: (i) protocolos que consideram o solo como uma unidade descontínua, na qual é possível sua divisão em um número discreto de classes; e, (ii) protocolos que consideram o solo como um corpo contínuo, os quais descrevem quantitativamente a variação das variáveis no espaço. A primeira é representada principalmente pelas metodologias de mapeamento por similaridade entre pedons

(Soil Survey Staff, 1975) e pelos mapeamentos livres e categóricos, nos quais são utilizados conceitos da relação solo-paisagem (Hudson, 1992). A segunda é representada, principalmente, pelos mapeamentos utilizando as análises geoestatísticas (Isaaks e Srivastava, 1989).

No entanto, ao considerar o solo como um corpo contínuo, diversos pesquisadores observam que a variabilidade de seus atributos coincide com a variação geológica (Liu et al., 2013; Siqueira, et al., 2014), forma do relevo (Siqueira et al., 2010; Quijano et al., 2011) e práticas agrícolas de manejo (Liu et al., 2013). Assim, na última década protocolos de mapeamento híbrido, nos quais ambos os conceitos são reunidos, vêm apresentando destaque, especialmente para levantamentos em escalas locais e regionais (McBratney et al., 2000). Nestes protocolos, informações previamente adquiridas como mapas geológicos, geomorfológicos, pedológicos ou mapa de atributos em escalas menos detalhadas podem ser utilizados junto com análises quantitativas (ex. análises geoestatísticas) visando o refinamento do delineamento das unidades de mapeamento e a melhor compreensão e confiabilidade nos padrões espaciais produzidos (Castrignanò et al., 2009; Cambule et al., 2013; Hengl et al., 2014).

Para a construção e delineamento destes mapas, o planejamento amostral por meio da identificação da densidade amostral adequada apresenta importante etapa a ser avaliada (McBratney et al., 2002; Vašát et al., 2010). A densidade amostral influencia diretamente o nível de detalhe a ser obtido (escala ou resolução) (Delden et al., 2011) e os custos do mapeamento (Dematte et al., 2007). Medidas como o índice de diversidade de Shannon (Minasny et al., 2010) podem ser utilizados como primeiro indicativo da intensidade da pedodiversidade de solo (variabilidade) em grandes escalas. Para escalas mais detalhadas (escalas regionais ou locais) o estudo da incorporação de informações secundárias em modelos geoestatísticos (Castrignanò et al., 2009; Cambule et al., 2013) e a utilização de atributos com potencial para identificação da variação dos processos de formação do solo (susceptibilidade magnética - SM, condutividade elétrica e espectroscopia de reflectância difusa) (Bilgili et al., 2011; Siqueira et al., 2014) representam crescente atividade de pesquisa. No entanto, as informações secundárias utilizadas frequentemente têm caráter quantitativo (informações de satélites, condutividade

elétrica e SM) (Benedetto et al., 2012) e não qualitativo ou categórico (Castrignanò et al., 2009).

Informações qualitativas, muitas vezes disponibilizadas gratuitamente, apresentam grande potencial para integrar o planejamento amostral de atributos do solo (Cambule et al., 2013). Entretanto, umas das principais dificuldades é a definição de quais informações utilizar para o planejamento amostral e mapeamento dos atributos do solo (Miller et al., 2015). Hengl et al. (2014) afirmam que informações sobre clima, litologia, índices de biomassa, e unidades taxonômicas são as principais covariáveis para a modelagem de atributos do solo em escala global. Para escalas regionais e locais, informações sobre a geomorfologia, litologia e pedologia apresentam grande potencial (Anderson et al., 2003). A hipótese desta pesquisa é que o conhecimento sobre os fatores de formação do solo (geologia e forma da paisagem), muitas vezes previamente mapeados e disponíveis gratuitamente, devem ser considerados no momento da modelagem matemática. Sua incorporação pode auxiliar no delineamento dos padrões espaciais dos atributos do solo, bem como reduzir a densidade amostral necessária para a representação do fenômeno em estudo. Neste sentido, objetivou-se avaliar a incorporação de informações geológicas, geomorfológicas e pedológicas na redução da densidade amostral necessária para a caracterização da suscetibilidade magnética, teor de argila e saturação por bases.

2.2 Material e Métodos

2.2.1 Descrição da área e amostragem

A área de estudo localiza-se no município de Guatapará, estado de São Paulo, Brasil (Figura 1a). As coordenadas centrais da mesma são 21°28'40"S e 48°01'38"O, e altitude variando de 649 a 519 m. O clima local pode ser definido, segundo Thornthwaite (1948), como B1rB'4a', Tipo Mesotérmico Úmido, com pequena deficiência hídrica, sendo a evapotranspiração de verão menor que 48% da evapotranspiração anual. A vegetação natural local era constituída por floresta

tropical subcaducifolia. Atualmente a área é cultivada com cana-de-açúcar sob sistema de colheita mecanizada há mais de 10 anos.

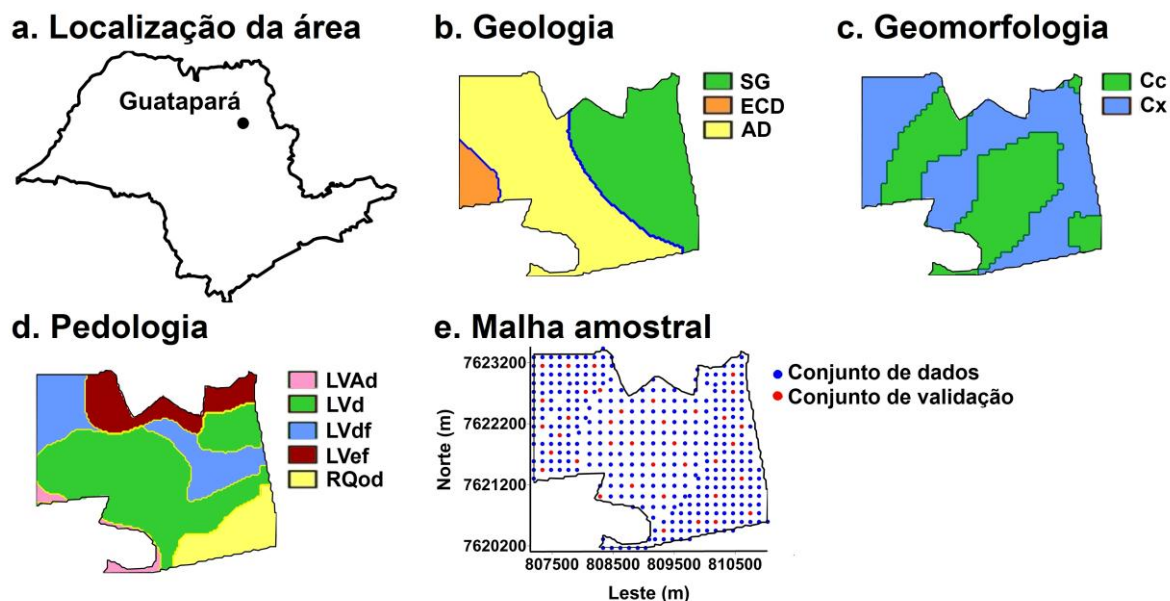


Figura 1. Caracterização da área de estudo. Localização da área amostral (a); mapa geológico na escala 1:500000 (SG – Serra Geral; AD – Depósito Aluvionar; ECD – Depósito Colúvio Eluvionar) (b); mapa geomorfométrico na escala de Escala 1:100000 (Cc – côncava; Cx – Convexa) (c); mapa pedológico na escala 1:12000 (LVAd - Latossolo Vermelho Amarelo distrófico textura média; LVd - Latossolo Vermelho distrófico textura média; LVdf - Latossolo Vermelho distroférico textura argilosa; LVef - Latossolo Vermelho eutroférico textura argilosa; RQod – Neossolo Quartzarênico órtico distrófico textura arenosa) (d); distribuição espacial das amostras (e).

A área apresenta três materiais de origem relacionados à transição entre Basalto do Grupo São Bento Formação Serra Geral (SG), Depósito Colúvio-Eluvionar (ECD) e Depósito Aluvionar (AD) (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, IPT, 1981; Geobank, 2014) (Figura 1b). Foram realizadas visitas técnicas na área para comprovar as informações geológicas. Os compartimentos geomorfométricos foram identificados segundo a metodologia proposta por Vasconcelos et al. (2012) (Figura 1c), na qual identificou as áreas apresentando curvaturas horizontais côncavas (Cc) e convexas (Cx). Para a identificação destas curvaturas foram utilizadas informações SRTM com resolução horizontal de 90 metros e precisão vertical da ordem de 5 metros. Inicialmente foi

realizado um pré-tratamento (filtro de mediana) nestas informações para a retirada de valores com variação superior a 10 m, sendo posteriormente realizada a interpolação dos dados pelo método Topogrid. A partir dos dados interpolados foi gerada a assinatura geomorfométrica (imagem da curvatura horizontal) (para mais detalhes veja Vasconcelos et al., 2012). Os valores pontuais da assinatura foram normalizadas por meio da divisão pelo valor pontual máximo encontrado produzindo valores variando de -1 a 1. Após a padronização, valores positivos foram considerados pertencentes à curvatura convergente (côncava) e negativos pertencentes à curvatura divergente (convexa).

O mapa pedológico (escala 1:12000) gerado pelo Centro de Tecnologia Canavieira (CTC) (Figura 1d) registra a ocorrência das seguintes unidades de mapeamento: Latossolo Vermelho Amarelo distrófico textura média (LVAd); Latossolo Vermelho distrófico textura média (LVd); Latossolo Vermelho distroférico textura argilosa (LVdf); Latossolo Vermelho eutroférico textura argilosa (LVef); Neossolo Quartzarênico órtico distrófico textura arenosa (RQod).

Na área experimental foi instalada uma malha de amostragem regular contendo 371 pontos separados por distâncias mínimas variando de 145 m a 174 m, abrangendo uma área total de cerca de 870 ha (Figura 1e). Previamente antes do início da modelagem, foram selecionados aleatoriamente 10% dos pontos (N=37) para a construção de um conjunto de dados a serem utilizados no processo de validação. A distribuição dos pontos bem como a área representativa de cada compartimento delimitado na Figura 1b-d são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Distribuição dos pontos de amostragem e área de cada compartimento geológico, geomorfológico e pedológico.

	----- Geologia -----			Geomorfologia		----- Pedologia -----				
	SG ^a	AD ^b	ECD ^c	Cc ^d	Cx ^e	LVAd ^f	LVd ^g	LVdf ^h	LVef ⁱ	RQod ^j
N	144	23	204	142	229	13	161	87	57	53
Área (ha)	353,8	46,3	469,8	361,8	508,2	23,4	423,7	184,1	134,0	104,9
Área (%)	40,7	5,3	54,0	41,6	58,4	2,7	48,7	21,2	15,4	12,0

(N=371); ^aBasalto formação Serra Geral; ^bDepósito Aluvionar; ^cDepósito Colúvio Eluvionar; ^dCôncava; ^eConvexa; ^fLatossolo Vermelho Amarelo distrófico textura média; ^gLatossolo Vermelho distrófico textura média; ^hLatossolo Vermelho distroférico textura argilosa; ⁱLatossolo Vermelho eutroférico textura argilosa; ^jNeossolo Quartzarênico órtico distrófico textura arenosa.

A partir da densidade amostral original (1 ponto a cada 2,6 ha), diferentes densidades amostrais foram consideradas utilizando 334, 290, 218, 174, 145, 124, 109, 97, 79 e 62 pontos, as quais equivalem, respectivamente, a uma densidade de 1 ponto a cada 2,6; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0; 8,0; 9,0; 11,0; e 14,0 ha. Os pontos que integraram as densidades foram aleatoriamente selecionados, seguindo metodologia desenvolvida em outros trabalhos (Siqueira et al., 2014; Teixeira et al., 2013). A menor densidade amostral (1 ponto a cada 14 ha) utilizada foi determinada seguindo os princípios das análises geoestatísticas, referente a necessidade de no mínimo 50 pares de pontos para cada cálculo da semivariância experimental (Goovaerts, 1997). Em cada ponto da malha amostral foram coletadas amostras na profundidade de 0-0,25 m para a determinação da suscetibilidade magnética (SM), teor de argila e saturação por bases (V%). Esta profundidade foi escolhida por ser utilizada para a determinação do manejo do solo no setor sucroenergético paulista (Siqueira et al., 2014).

2.2.2 Análises laboratoriais

A suscetibilidade magnética (SM) em baixa frequência (0,47 kHz) foi determinada em 10 g de terra fina seca ao ar utilizando o equipamento Bartington MS2, acoplado ao sensor Bartington MS2B (Dearing, 1994). O teor de argila foi determinado pelo método da pipeta, utilizando solução de NaOH 0,1 mol L⁻¹ como dispersante químico e agitação mecânica em aparato de baixa rotação por 16 horas (EMBRAPA, 1997). A saturação por bases (V%) foi calculada a partir dos valores de Ca, Mg, K, extraídos pelo método da resina trocadora de íons (Raij et al., 2001), e H+Al, sendo a acidez trocável (Al³⁺) determinada segundo Raij e Zullo (1977).

2.2.3 Análises dos dados

2.2.3.1 Estatística descritiva

A variabilidade dos atributos do solo foi previamente descrita por meio dos cálculos da média, intervalo de confiança de 95% e coeficiente de variação para cada compartimento estudado.

2.2.3.2 Análises Geoestatísticas

A variabilidade espacial dos atributos avaliados foi determinada por meio do cálculo e modelagem do variograma experimental, com base na teoria das variáveis regionalizadas e nos princípios da hipótese intrínseca (Isaaks e Srivastava, 1989). O variograma descreve a continuidade espacial das variáveis como função das distâncias entre duas localizações, sendo estimado por:

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

em que, $\hat{\gamma}(h)$ é a semivariância experimental para uma distância de separação h , $z(x_i)$ é o valor da propriedade no ponto i , e $N(h)$ é o número de pares de pontos separados pela distância h . Durante a modelagem do variograma experimental são estimados os coeficientes do modelo: efeito pepita (C_0), patamar (C_0+C_1) e alcance, (a).

Neste estudo foram testados modelos esféricos, exponenciais e gaussianos. A escolha do melhor modelo ajustado aos variogramas utilizados baseou-se na validação cruzada, coeficiente linear e angular da regressão entre valores observados e estimados, e soma de quadrado dos resíduos (SQR) obtidos para o ajuste do modelo (dados não apresentados no trabalho).

2.2.3.2.1 Retirada de tendência

A estacionariedade necessária ao uso da geoestatística foi avaliada por meio das análises de tendência utilizando regressões linear e quadrática, para os eixos da Latitude, Longitude e suas interações. Assim, para as propriedades em que foi identificada a presença de tendência, a modelagem do variograma foi conduzida nos valores do resíduo da análise de regressão. O resíduo foi calculado pela diferença entre o valor medido e o valor estimado pelo polinômio (Davis, 1986).

2.2.3.2.2 Krigagem ordinária (KO)

Após a modelagem do variograma foi conduzido o procedimento de interpolação por meio da KO. Esta metodologia consiste na realização de uma média ponderada das amostras vizinhas (equação 2), sendo os pesos (λ_i) de cada amostra vizinha determinados por meio da semivariância $\hat{\gamma}(h)$ em função de h (Equação 1), resultando em uma estimativa de variância mínima (Isaaks e Srivastava, 1989).

$$\hat{z}(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i z(x_i) \quad (2)$$

em que, $\hat{z}(x_0)$ é o valor a ser estimado da propriedade no ponto 0, N é o número de valores utilizados na predição, λ_i é a ponderação associada a cada valor e $z(x_i)$ é o valor observado no ponto i .

2.2.3.2.3 Krigagem simples com média local variando (KS_{MLV})

A técnica da KS_{MLV} foi empregada visando a incorporação das informações secundárias categóricas, referentes à geologia (Figura 1b), geomorfologia (Figura 1c) e pedologia (Figura 1d), nos modelos de variabilidade dos atributos do solo estudados. Previamente, foi necessária a conversão das informações categóricas (compartimentos indicados pelos mapas) em informações contínuas, pelo cálculo da média dos atributos estudados ($\hat{\mu}_{KS}$) dentro de cada compartimento identificado pela informação secundária (Castrignanò et al., 2009).

$$\hat{\mu}_{KS} = \frac{1}{n_k} \sum_{\alpha=1}^n (z(x_\alpha; s_k)) \quad (3)$$

em que, $\hat{\mu}_{KS}$ é a média local estimada para os locais pertencentes ao compartimento k delineado no mapa, n_k é o número de locais pertencentes ao compartimento k e $z(x_\alpha; s_k)$ são os valores dos pontos pertencentes ao compartimento k .

Após a estimativa das médias locais por compartimento, foram calculados os valores do resíduo, dados pelas diferenças entre os valores pontuais observados e a média de cada compartimento ($\hat{\mu}_{KS}$). O variograma experimental (equação 1) foi estimado para os valores dos resíduos. Os procedimentos de modelagem e validação dos dados foram os mesmo adotados para os variogramas utilizados no procedimento de KO. Posteriormente as estimativas espaciais foram calculados pela KS_{MLV} (equação 4). A KS_{MLV} é uma variação da metodologia da krigagem simples para ocasiões em que a média da variável aleatória apresenta variabilidade ao longo do espaço Goovaerts (1997):

$$\hat{z}_{KS}(\mathbf{x}_0) - \hat{\mu}_{KS}(\mathbf{x}_0) = \sum_{i=1}^{N(\mathbf{x})} \lambda_i^{KS} [z(\mathbf{x}_i) - \hat{\mu}_{KS}(\mathbf{x}_0)] \quad (4)$$

em que, $\hat{z}_{KS}(\mathbf{x}_0)$ é o valor do atributo estimado por meio da KS no ponto 0 ; $\hat{\mu}_{KS}(\mathbf{x}_0)$ é a média da variável aleatória em estudo no ponto x_0 ; λ_i^{KS} é a ponderação associada a cada valor e $z(\mathbf{x}_i)$ é o valor observado no ponto i .

2.2.3.3 Comparação dos mapas

A acurácia das estimativas com e sem incorporação das informações secundárias nas densidades amostrais avaliadas foi verificada por meio da estimativa da raiz erro quadrático médio relativo (RRMSE) (equação 5) (Li e Heap, 2008) aplicado ao conjunto de dados de validação (Figura 1e).

$$RRMSE = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\frac{p_i - o_i}{o_i} \right]^2 \right\}^{0,5} \quad (5)$$

em que, n é o número de valores estimados ($N=37$), p_i é o valor estimado no ponto i , e o_i é o valor observado do atributo no ponto i . Menores valores de RRMSE estão relacionados a uma maior acurácia entre as estimativas. Esta metodologia assemelha-se à utilizada por Teixeira et al. (2013) para a avaliação dos padrões espaciais estimados utilizando informações secundárias aos modelos.

2.3 Resultados e Discussão

A média dos valores de SM na área total ($2299 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$) não foi contemplada pelos intervalos de confiança estimados a 95% de probabilidade (IC 95%) após a estratificação pela geologia, geomorfologia e pedologia (Tabela 2). Esse é o primeiro indício de que estes compartimentos apresentam influência sobre os valores de SM e seus limites devem ser considerados durante as análises de continuidade espacial.

Os intervalos de confiança de 95% para a SM após a estratificação pela geologia indicam que a formação SG ($2899 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$) difere significativamente das demais (ECD = $1966 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$; AD = $1503 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$). Os valores encontrados para a formação SG assemelham-se aqueles encontrados para rochas básicas e ultrabásicas em solos africanos (Preetz et al., 2008). Estes altos valores devem-se ao fato de que o material de origem (SG) foi formado a partir de um magma com altas concentrações de Fe sob alta temperatura favorecendo a formação de magnetita (Preetz et al., 2009).

Os materiais de origem ECD e AD apresentaram valores de SM superiores aos relatados por outros autores para rochas sedimentares (Preetz et al., 2008; Camargo et al., 2014). Tal fato deve-se a diversidade de constituição da rocha, originária de material sedimentar. Assim, caso a rocha intemperizada possua minerais férricos, a rocha sedimentar formada pode apresentar maiores valores de SM mesmo após o processo de sedimentação. Aliado a este fato, pode-se também

atribuir os altos valores aqui encontrados ao manejo da colheita manual após queima da cana-de-açúcar nos ciclos anteriores da cultura. Schwertmann (1985) afirma que a presença de fogo pode promover a transformação dos óxidos de ferro pedogenéticos e posterior neoformação de maghemita, a qual apresenta alto potencial magnético. Estima-se que durante o processo de queima da cana-de-açúcar a temperatura do solo nas camadas superficiais varie de 160 a 200 °C (Ripoli e Ripoli, 2004), enquanto a formação de maghemita pode ocorrer em temperaturas inferiores a 250 °C (Liu et al., 2010).

Tabela 2. Média, intervalo de confiança a 95% e coeficiente de variação (%) para suscetibilidade magnética (SM), teor de argila e saturação por bases (V%) em função dos compartimentos estratificadores.

	SM ($\times 10^{-8}$ m ³ kg ⁻¹)			Argila (g kg ⁻¹)			V%		
	Média	IC (95%)	CV	Média	IC (95%)	CV	Média	IC (95%)	CV
Geologia									
SG ^a	2899	2489 – 3309	81	349	314 – 384	56	58	56 – 61	24
AD ^b	1503	1106 – 1900	58	325	296 – 354	20	54	49 – 59	20
ECD ^c	1966	1701 – 2231	92	321	298 – 345	50	54	52 – 56	25
Geomorfologia									
Cc ^d	1796	1480 – 2113	100	305	280 – 330	47	55	52 – 57	25
Cx ^e	2611	2317 – 2906	82	349	323 – 374	53	56	54 – 58	24
Pedologia									
LVA ^d f	355	162 – 548	81	273	239 – 306	18	56	45 – 66	29
LVd ^g	1502	1242 – 1761	104	286	263 – 308	46	55	53 – 57	21
LVdf ^h	3665	3390 – 3940	33	438	412 – 464	26	57	53 – 61	29
LVef ⁱ	4783	4363 – 5204	31	524	492 – 555	21	53	49 – 57	26
RQod ^j	206	143 – 268	102	113	102 – 125	35	59	55 – 64	24
Área total	2299		89	332		51	56		25

^aBasalto formação Serra Geral; ^bDepósito Aluvionar; ^cDepósito Colúvio Eluvionar; ^dCôncava; ^eConvexa; ^fLatossolo Vermelho Amarelo distrófico textura média; ^gLatossolo Vermelho distrófico textura média; ^hLatossolo Vermelho distroférico textura argilosa; ⁱLatossolo Vermelho eutroférico textura argilosa; ^jNeossolo Quartzarênico órtico distrófico textura arenosa.

Considerando a forma da paisagem como estratificadora e os intervalos de confiança de 95%, verificou-se maiores valores de SM na superfície Cx (2611×10^{-8} m³ Kg⁻¹) em relação à superfície Cc (1796×10^{-8} m³ Kg⁻¹). Siqueira et al. (2010) avaliando a determinação da SM em arenitos da formação adamantina com baixo

teor de ferro total no solo ($\text{Fe}_2\text{O}_3 < 40 \text{ g kg}^{-1}$) também verificaram a influência destas formas na diferenciação da SM da ordem de $130 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ para forma Cc e $330 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ Kg}^{-1}$ para forma Cx. Quijano et al. (2011) estudando a relação entre a SM e características do relevo em uma área sem variação geológica, também verificaram maiores valores de SM em áreas convexas, os quais foram atribuídos ao caráter oxidativo do ambiente, propício a neoformação de minerais com maior expressão magnética. Os ambientes oxidantes podem promover a oxidação total ou parcial da magnetita e neoformação de maghemita (Dearing, 1994; Ker, 1998). Neste estudo, devido a grande variação geológica, os maiores valores de SM encontrados para a superfície Cx também podem ser explicados pela localização de grande parte desta superfície (27%) sobre a geologia SG, a qual apresenta os maiores valores de SM.

Utilizando as unidades de mapeamento pedológicas encontradas na área como estratificadores observa-se maiores valores de SM na sequência: $\text{LVef} > \text{LVdf} > \text{LVd} > \text{LVAd} = \text{RQod}$ (intervalo de confiança de 95%). Os valores de SM são maiores para solos com grande teor de ferro (solos férricos), apresentando valores de SM de $4783 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ (LVef) e $3665 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ (LVdf). A classificação atual dos solos para o caráter teor de ferro está dividida em 4 classes: perférrico ($>360 \text{ g kg}^{-1}$), férrico ($180 < \text{Fe}_2\text{O}_3 < 360 \text{ g kg}^{-1}$), mesoférrico ($80 < \text{Fe}_2\text{O}_3 < 180 \text{ g kg}^{-1}$) e hipoférrico ($<80 \text{ g kg}^{-1}$) (EMBRAPA, 2006). A diferenciação dos valores de SM para as mesmas classes de teor de ferro indica a necessidade do maior detalhamento e readequação destas classes, uma vez que informações precisas sobre o conteúdo de ferro podem auxiliar na identificação de zonas homogêneas de manejo e unidades mínimas de mapeamento do solo (Marques Jr. et al., 2014). Técnicas que expressam o teor de ferro total de solos, como a SM e difração de raio-x, apresentam grande potencial de aplicação para mapeamento de atributos do solo (Camargo et al., 2014). Entretanto, a rapidez, simplicidade, necessidade mínima de preparo das amostras e ausência de resíduos químicos destacam a SM sobre as demais técnicas, impulsionando o seu uso nos últimos anos (Hanesch e Scholger, 2005; Siqueira et al., 2010; Wang, 2013).

Para os teores de argila, observa-se que a média geral (332 g kg^{-1}) foi contemplada pelos intervalos de confiança dos compartimentos estratificados pela geologia e geomorfologia. Assim, neste estudo, apenas as unidades de

mapeamento pedológicas apresentam influência sobre os teores de argila. Embora o material de origem (Siqueira et al., 2014) e a forma da paisagem (Sanchez et al., 2013) apresentem influências na textura do solo, é esperado melhor resultado na estratificação utilizando as unidades de mapeamento pedológicas devido ao teor de argila ser considerado como atributo diagnóstico na identificação destas (EMBRAPA, 2006). Os teores médios de argila estratificados pelo tipo de solo apresentaram a seguinte sequência: LVef>LVdf>LVd=LVAAd>RQod (intervalo de confiança de 95%). Nota-se que a classificação dos solos segundo sua textura (argilosa, média e arenosa) é respeitada pela diferenciação entre os solos. Entretanto, dentro da classificação da textura argilosa, houve diferenças significativas entre os solos LVef (524 g Kg⁻¹) e LVdf (438 g Kg⁻¹) (intervalo de confiança de 95%). Esse resultado assemelha-se aquele encontrado para a SM, indicando que um maior refinamento da classificação pode resultar em informações mais detalhadas. Assim, a SM pode ser útil tanto na readequação da legenda do teor de ferro total do solo quanto na readequação dos intervalos de classe textural. Preetz et al. (2009) propõem a subdivisão das unidades de mapeamento pedológicas com base no padrão da SM.

Para aos valores de V% a média na área total (56%) foi contemplada em todos os intervalos de confiança de 95% após a estratificação, indicando que não houve influência da geologia, geomorfologia e pedologia para este atributo. A ausência de influência é explicada pelo manejo intensivo do solo durante os ciclos de cultivo, o que pode levar a uma relativa homogeneização da área, diminuindo a influência dos fatores e processos intrínsecos ao solo. Cardoso et al. (2014), em área de cana-de-açúcar, verificaram uma alta influência antrópica na variabilidade dos atributos químicos do solo, afetando principalmente os nutrientes com menor mobilidade no solo. Entretanto, alguns autores (Campos et al., 2008) relatam que em transições geológicas arenito-basalto a influência antrópica não é capaz de homogeneizar a variabilidade proporcionada pelas características intrínsecas do solo. Isso indica que as áreas de transição geológica comportam-se de forma distinta, afetando o padrão de continuidade mais em algumas regiões do que em outras.

A variação inferida por meio do coeficiente de variação (CV) indica maior heterogeneidade da SM (89%), em relação aos teores de argila (51%) e V% (25%)

(Tabela 2). A baixa variação do V% é atribuída ao manejo semelhante ao longo dos ciclos de cultivo (Panosso et al., 2012). Os maiores valores de CV para a SM estão relacionados à maior sensibilidade desta propriedade às mudanças dos processos e fatores de formação do solo (geologia, forma da paisagem), conforme pode ser comprovado pela comparação dos intervalos de confiança. Diversos autores (Matias et al., 2014; Siqueira et al., 2014), em solos com variação de ferro total (Fe_2O_3) entre 40 a 180 g Kg^{-1} , também observaram a maior sensibilidade às mudanças de geologia e forma da paisagem por parte da SM em relação aos atributos físicos e químicos do solo.

No geral, a estratificação dos atributos em função da pedologia e geologia promoveram reduções dos valores de CV comparados àqueles encontrados para a área total (sem estratificação). A estratificação com base na forma da paisagem promoveu redução nos valores de CV apenas para o V%. A redução no CV indica que os compartimentos conhecidos estão promovendo a identificação de áreas mais homogêneas entre si, sendo este mais um indício de que seu conhecimento deve ser incorporado nas futuras análises espaciais e processos de tomada de decisão, como por exemplo, a identificação de áreas de manejo específico.

Para a SM e teor de argila, as maiores reduções médias de CV foram promovidas pela estratificação com base nos compartimentos pedológicos (18,8% e 21,8%, respectivamente), seguidas pela estratificação pela geologia (12% e 9%, respectivamente). A maior redução do CV quando os compartimentos de solos são considerados pode estar relacionada ao maior grau de compartimentalização e detalhamento (5 classes) da área em relação a geologia (3 classes) e geomorfologia (2 classes). Entretanto, ressalta-se, que a divisão em áreas menores (aumento no número de polígonos dentro de uma área) não garante o controle de variabilidade dentro de cada polígono delimitado e, conseqüentemente, a redução do CV.

Embora o valor de CV seja um indicativo da variação dos atributos, este não contempla as relações espaciais existentes entre as amostras analisadas. As análises geoestatísticas, as quais se baseiam na construção e modelagem do variograma experimental (Isaaks e Srivastava, 1989) permitem a verificação espacial das inter-relações entre os atributos do solo bem como determinar a influência

espacial dos estratificadores nas estimativas dos locais não amostrados (Goovaerts, 1997; Lv et al., 2013).

A influência da incorporação dos compartimentos estratificadores nos modelos geoestatísticos foi avaliada em função das densidades amostrais de 1 ponto a cada 2,6; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 11; e 14 ha (Figura 2). Para verificar a variabilidade captada ou promovida pelos diferentes estratificadores (geologia, geomorfologia e pedologia) os parâmetros dos variogramas ajustados aos dados sem considerar as informações secundárias (convencional) foram comparados aos variogramas considerando tais informações (Goovaerts, 1997). Os variogramas da SM e teor de argila sem informações secundárias (convencional) foram calculados com base nos resíduos da análise de tendência (Davis, 1986), obtidas por meio de regressões lineares simples entre o eixo da Latitude e os valores dos atributos (dados não apresentados). Estas regressões são indícios do efeito dos compartimentos geológicos e de solo na variação dos atributos uma vez que estes apresentam maior variação nessa direção (Figura 1).

Todos os modelos teóricos ajustados aos variogramas experimentais foram esféricos, o qual além de ser o mais utilizado em ciências do solo (Cambardella et al., 1994) descreve atributos com mudanças abruptas ao longo da superfície em estudo (Isaaks e Srivastava, 1989). Esta característica nos permite afirmar que é possível utilizar mapas categóricos vetoriais (geológicos, geomorfológicos e pedológicos) para auxiliar na delimitação dos padrões espaciais de atributos do solo, uma vez que, estes mapas apresentam as mesmas características de mudanças abruptas no espaço. Para a SM e teor de argila, não foi possível captar dependência espacial na densidade de 1 ponto a cada 14 ha quando as informações pedológicas foram incorporadas. Para o V%, em nenhum dos modelos foi possível observar dependência espacial na menor densidade avaliada. Siqueira et al. (2014) avaliando o efeito da densidade amostral na captação da dependência espacial da SM, argila e V%, verificaram que o V% é mais sensível à diminuição da densidade amostral em relação aos demais atributos. Nanni et al. (2011) também avaliando a densidade amostral em região de transição geológica verificaram que os alcances dos variogramas do V% apresentaram variação de 21% em relação a densidade amostral, sendo um dos atributos mais sensíveis a esta variação.

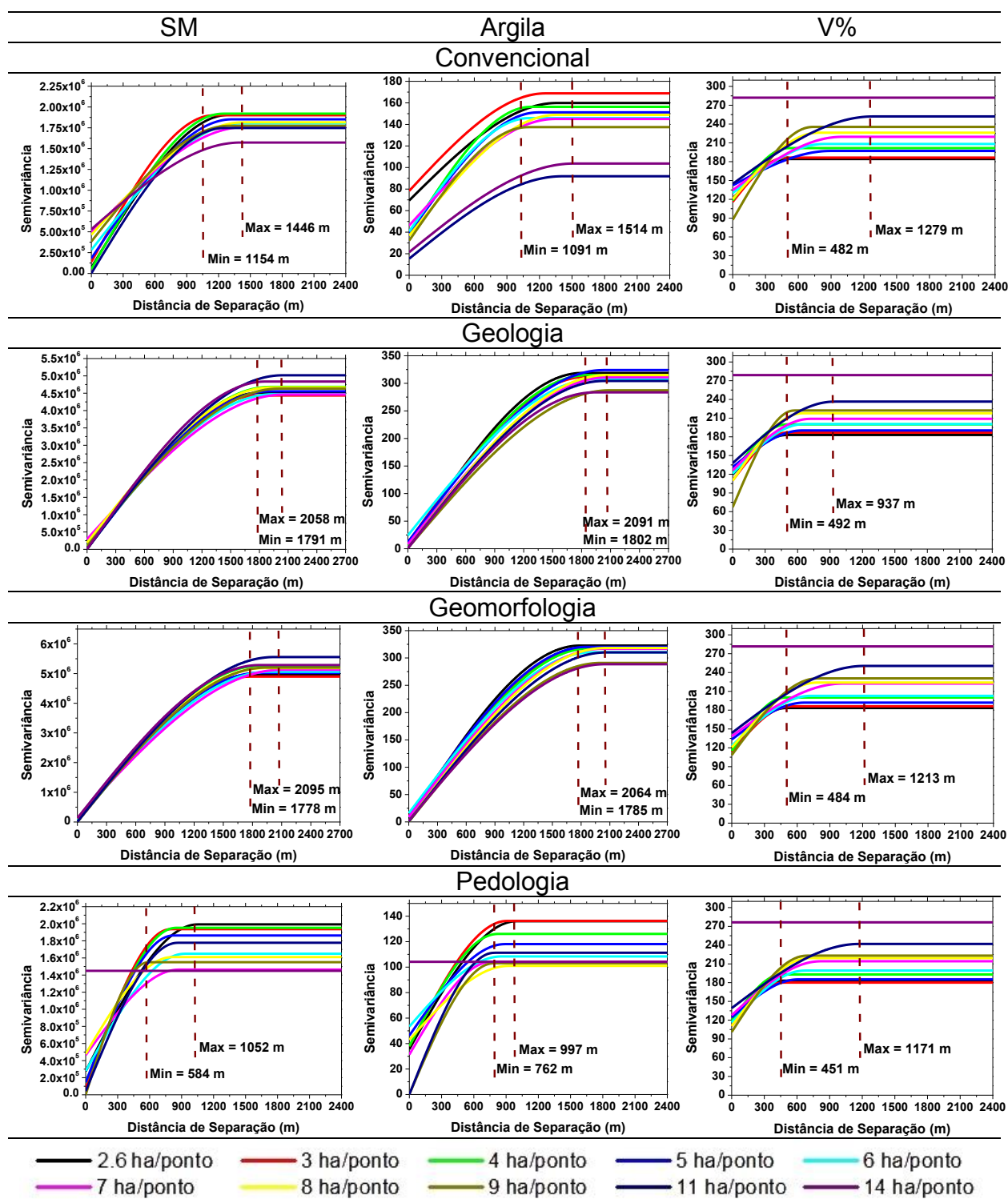


Figura 2. Modelos dos variogramas ajustados aos dados de suscetibilidade magnética (SM), teor de argila e saturação por bases (V%) nas densidades amostrais em função dos estratificadores utilizados. Linhas tracejadas indicam o maior e menor alcance encontrado dentre as densidades amostrais avaliadas.

Os valores médios de alcance encontrados para a SM (1326 m) e teor de argila (1274 m) sem considerar informações secundárias, estão relativamente próximos aos alcances encontrados por Campos et al. (2007) em uma litosequência arenito-basalto (alcance da argila = 1211 m), Matias et al. (2014) em transição arenito-basalto com influência de lamitos (alcance da SM = 1881 m; alcance da argila = 930 m) e Cambule et al. (2013) em transição ente arenitos, riolitos e depósitos aluviais (alcance do carbono orgânico do solo = 1400 m). Esses resultados indicam que os protocolos e resultados desenvolvidos neste estudo apresentam potencial de uso para regiões com transições geológicas. Por sua vez, o menor valor médio de alcance para o V% (776 m) indica uma menor continuidade espacial deste atributo. Resultados semelhantes foram encontrados por outros autores (Marques Jr. et al., 2014) os quais verificam uma menor continuidade espacial por parte dos atributos químicos em relação aos atributos físicos e mineralógicos. A semelhança entre os valores de alcance da SM e argila pode ser um indicativo da alta associação espacial entre estes atributos (Peluco et al., 2013). Esta associação permite que a SM seja utilizada como co-variável em estimativas dos teores de argila no solo (Hanesch e Scholger, 2005; Siqueira et al., 2010, 2014).

O grau de dependência espacial (GDE) médio dos variogramas da SM (0,15) e argila (0,24) podem ser classificados como forte, caracterizado pela relação $C_0/(C_0+C_1) \leq 0,25$. Para o V% o valor do GDE (0,60) pode ser classificado como moderado ($0,25 < C_0/(C_0+C_1) \leq 0,75$). Segundo Cambardella et al. (1994) a forte dependência espacial dos atributos do solo está relacionada a sua interação com os fatores intrínsecos (material de origem, clima, relevo), enquanto a dependência espacial moderada é atribuída aos fatores extrínsecos como o manejo exercido pelas práticas agrícolas. Estes resultados confirmam aqueles observados na Tabela 2, nos quais a influência da geologia, geomorfologia e pedologia é encontrada para SM e teor de argila, enquanto a variabilidade do V% pode ser atribuída, principalmente, ao manejo agrícola (fator antrópico).

Os modelos variográficos que utilizam informações sobre a geologia e geomorfologia apresentaram os maiores valores médios de alcance para a SM (1924 e 1914 m, respectivamente) e teor de argila (1968 e 1946 m, respectivamente). A maior continuidade espacial observada (maior valor de alcance

do variograma) deve-se a maior captação da variação espacial por meio destes estratificadores e a relativa homogeneização dos dados devido a maior continuidade espacial destes compartimentos. A diferença entre os valores dos alcances médios com e sem informações secundárias indica a captação da variação ou a fração da variação devido aos fatores estratificadores. Assim, estima-se que as informações geológicas sejam responsáveis por cerca de 45% e 54% da variação espacial da SM e teor de argila, respectivamente. A geomorfologia, por sua vez, responde por cerca de 44% e 53% da variabilidade espacial da SM e teor de argila, respectivamente.

As informações das unidades de mapeamento pedológicas promoveram uma diminuição dos valores médios de alcance para a SM e teor de argila (841 e 857 m, respectivamente). Assim, pode-se afirmar que estas unidades de mapeamento ao invés de reduzir, promovem o aumento da variação espacial dos modelos em 37% e 33% para a SM e teor de argila, respectivamente. Este resultado contrasta com aquele observado na Tabela 2, em que as unidades de mapeamento pedológicas contribuem para a redução dos valores de CV. Tal resultado indica que embora o mapa pedológico (escala 1:12.000) identifique regiões com propriedades semelhantes, seu delineamento não é adequado para compor modelos espaciais.

Os mapas de unidades de mapeamento pedológico ou táxons são delineados por meio do conhecimento tácito de pedólogos (Hudson, 1992), os quais objetivam minimizar a variância dentro das classes e maximizar as variâncias entre classes mapeadas (Castrignanó et al., 2009). Este conhecimento baseia-se principalmente no paradigma solo-paisagem e nas informações geológicas locais (Hudson, 1992). Embora estas informações englobem os principais fatores responsáveis pela variabilidade dos atributos do solo, as informações diretas sobre a continuidade espacial dos mesmos frequentemente é ignorada no momento do delineamento. A inclusão do conhecimento da variabilidade espacial dos atributos do solo para a composição dos mapas de unidades de mapeamento vem sendo proposta por diversos autores (Burrough, 1991; McBratney et al., 2000; McBratney et al., 2003; Legros, 2006). Por outro lado, os limites geológicos e geomorfológicos são facilmente identificados no campo sendo que mesmo mapas pouco detalhado (mapa geológico – 1:500.000; mapa geomorfológico – escala 1:100.000) expressam as classes de variabilidade de atributos no campo (Vidal-Torrado et al., 2005).

Para o V%, todos os agentes estratificadores avaliados promoveram a variação espacial, resultando em um incremento de cerca de 19% (geologia), 4% (geomorfologia) e 14% (pedologia). Este fato confirma novamente que o manejo antrópico está sendo o principal fator atuante na variação espacial deste atributo.

A influência das diferentes densidades amostrais pode ser observada pela diferença entre os modelos e parâmetros dos variogramas de cada atributo (Teixeira et al., 2013). Os modelos sem informações secundárias apresentaram maior variação em seus parâmetros (C_0 , C_0+C_1 e alcance) em função das densidades amostrais estudadas. Este resultado indica que a utilização das informações secundárias pode suavizar os efeitos da diminuição da densidade amostral. A densidade amostral ideal para os atributos do solo é foco de diversas pesquisas devido ao seu papel fundamental para o planejamento e, principalmente, viabilização da caracterização da variabilidade local dos atributos do solo para diferentes fins (Kerry et al., 2010; Bilgili et al., 2011; Nanni et al., 2011; Montanari et al., 2012; Cherubin et al., 2014; Siqueira et al., 2014).

No geral, os menores valores de alcance e C_0 foram encontrados para as densidades amostrais maiores (1 ponto a cada 2,6 e 3 ha), e os maiores para as densidades amostrais menores (1 ponto a cada 7 e 11 ha). Esta mesma tendência foi encontrada por outros pesquisadores (Bilgili et al., 2011; Nanni et al., 2011; Teixeira et al., 2013). O valor de C_0 indica a variação não captada pela estrutura de dependência espacial, sendo resultante da soma das variações devido a erros de medida e daquela existente em escala menor que a avaliada (Isaaks e Srivastava, 1989). O pequeno aumento dos valores de alcance com a diminuição da densidade amostral deve-se ao maior espaçamento inicial entre as amostras. Em adição, o aumento no número de pontos e redução do espaçamento entre amostras promove uma maior captação da variabilidade estrutural resultando em menores valores de C_0 .

Os padrões espaciais da SM, teor de argila e V% estimados para a densidade de 1 ponto a cada 2,6 ha sem considerar as informações dos estratificadores são apresentados na Figura 3. Os padrões espaciais da SM e teor de argila foram semelhantes ($r=0,913$; $p<0,001$) apresentando maiores valores na parte superior direita do mapa, região está situada na geologia SG, geomorfologia convexa e

classe de solo LVef e LVdf. Os menores valores situaram-se na parte inferior do mapa localizada principalmente sobre geologia ECD e unidade de mapeamento de solo RQod. Estes resultados confirmam aqueles relatados na Tabela 2. A alta associação entre SM e teor de argila, também relatada em outros estudos (Hanesch e Scholger, 2005), deve-se ao fato de que os solos estudados são altamente intemperizados e originados a partir de materiais de origem com presença de Fe, favorecendo concomitantemente a formação da argila e óxidos de ferro com potencial de expressão magnética.

Na parte central dos mapas de SM e teor de argila, localizadas na transição geológica AD / ECD, observa-se a influência acentuada das formas da paisagem. Esta transição pode ser considerada relativamente mais suave que a transição SG / ECD, devido a maior semelhança entre os materiais de origem. Nestes locais, os maiores valores de teor de argila e SM podem ser atribuídos ao arraste de partículas do solo das áreas convexas para as áreas côncavas (Troeh, 1965). Fürst et al. (2010), avaliando a estimativa espacial da SM por meio de co-variáveis e análises de regressão múltipla, observaram que os parâmetros geomorfológicos apresentaram maior contribuição aos modelos em escalas maiores, enquanto os parâmetros geológicos apresentaram maior contribuição em escalas menores.

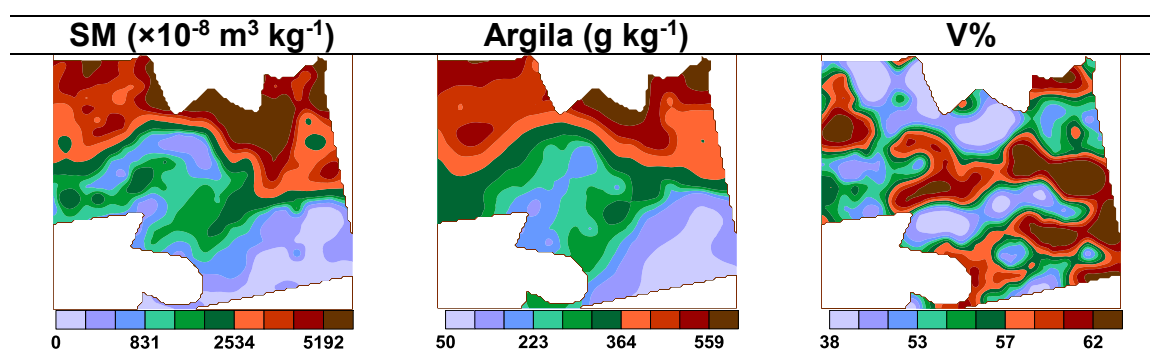


Figura 3. Padrão espacial da suscetibilidade magnética, teor de argila e saturação por bases (V%) na densidade de 1 amostra a cada 2,6 ha sem considerar informações secundárias.

Nota-se que as isolinhas de variabilidade da SM e teor de argila na parte superior dos mapas apresentam-se dispostas no sentido latitudinal (leste – oeste). Este sentido coincide com as principais isolinhas apresentadas no mapa pedológico (Figura 1), o que pode confirmar a influência das unidades de mapeamento nos

valores de SM e teor de argila baseados no intervalo de confiança dos valores estratificados (Tabela 2). Entretanto, a ausência da captação de outras isolinhas de variabilidade, como a captada pela geomorfologia, e o deslocamento existente entre as isolinhas indicadas pelas unidades de mapeamento de solo (Figura 1) e àquelas apresentadas pelos padrões espaciais da SM e teor de argila (Figura 3) indica a perda desta relação espacialmente. Resultado este, previamente indicado pelas análises variográficas (Figura 2), na qual a estratificação por meio das unidades de mapeamento de solos promove diminuição da continuidade espacial dos atributos analisados.

Os padrões espaciais do V% apresentaram valores de correlação linear de -0,20 ($P < 0,001$) e -0,23 ($P < 0,001$) com os padrões espaciais da SM e teor de argila, respectivamente. Esta relação inversa, também foi observada por outros autores (Siqueira et al., 2010; Matias et al., 2014). Estes resultados devem-se a relação inversa entre V% e CTC, sendo esta última diretamente dependente da qualidade e quantidade da argila e matéria orgânica do solo.

Os maiores valores de V% concentram-se principalmente na parte direita do mapa, região esta caracterizada pela geologia SG e solos LVef, LVdf e RQod. Embora em todas as etapas deste estudo, a estratificação do V% apenas promoveu uma pequena redução nos valores de CV (Tabela 2) quando os compartimentos geológicos foram considerados, seu padrão espacial indica que este estratificador pode apresentar-se como fator contribuinte para os valores de V%. Liu et al. (2013) estudando a variação espacial dos nutrientes do solo em áreas agrícolas observaram relação espacial dos mesmos com a geologia apenas em avaliações em grande escala, enquanto em escalas mais detalhadas o manejo do solo foi o principal fator condicionador da variabilidade. Os padrões espaciais do V% apresentam maior continuidade na direção latitudinal do mapa, direção esta da linha de plantio da cultura da cana-de-açúcar e dos demais tratamentos culturais. Esta menor variação nos atributos químicos na direção do plantio da cana-de-açúcar também foi observada por Panosso et al. (2012).

A qualidade das estimativas espaciais em função das diferentes densidades avaliadas e da utilização de informações secundárias é apresentada na Figura 4. Analisando os índices RRMSE, verifica-se maior variação da SM, seguida pelo teor

de argila e V%, em função da diminuição da densidade amostral e da incorporação de informações secundárias, resultados estes similares aos encontrados por Siqueira et al. (2014). A SM quando associada as informações auxiliares apresentou maiores ganhos na representação da continuidade espacial, por ser altamente responsiva a mudanças pedoambientais, tais como aquelas ocasionadas pela geologia (Fialová et al., 2006) e forma da paisagem (Jong et al., 2000).

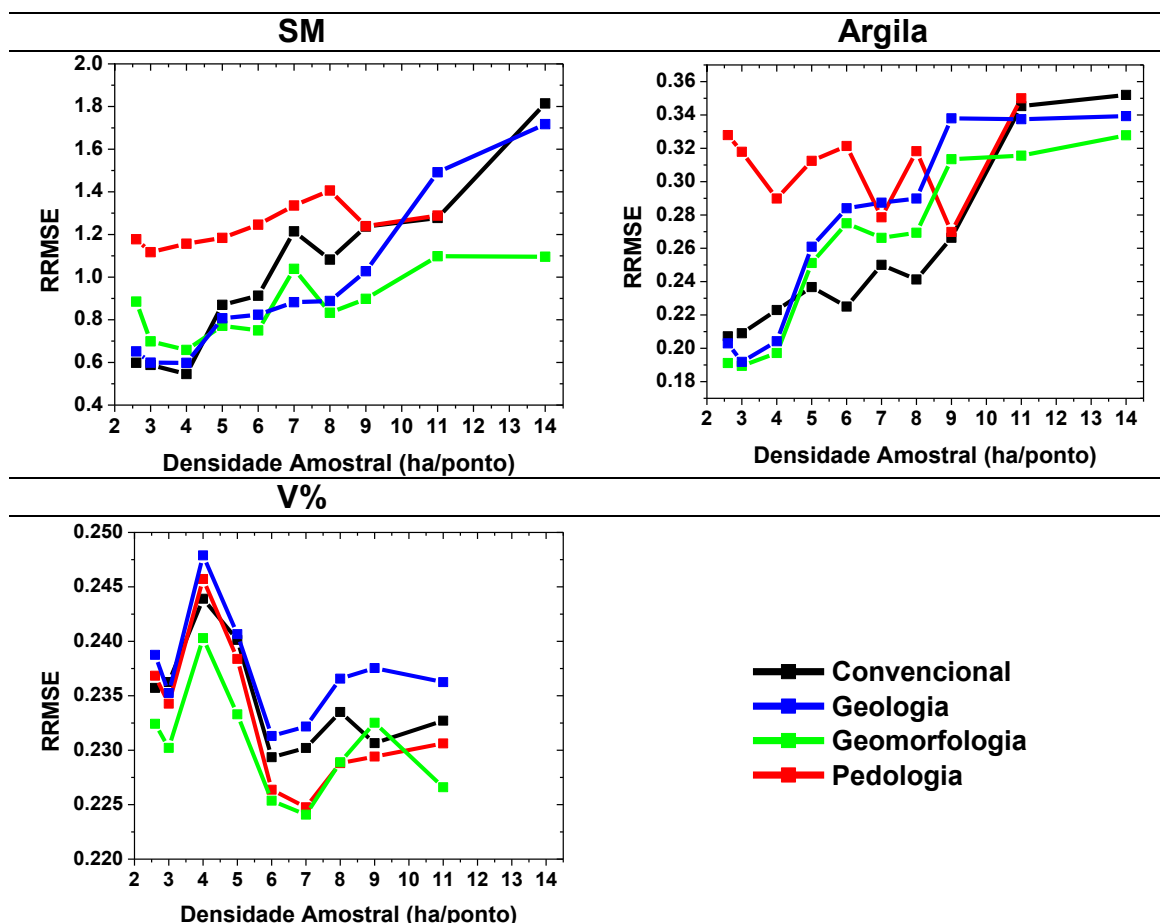


Figura 4. Raiz do erro quadrático médio relativo (RRMSE) estimado a partir da validação externa em função das densidades avaliadas, com e sem (convencional) utilização das informações secundárias (geologia, geomorfologia, pedologia).

Para a SM, os estratificadores (geologia e geomorfologia) contribuíram positivamente para a captação da variação espacial. Tais contribuições são evidenciadas apenas em densidades inferiores à 1 ponto a cada 5 ha. A ausência de contribuição para densidades maiores deve-se ao fato de que a intensa amostragem consegue reproduzir os limites das isolinhas com precisão inclusive aqueles devido

aos fatores estratificadores. Sanchez et al. (2013) estudando a variação espacial dos atributos físicos e químicos do solo em áreas de café na densidade de 1 ponto a cada 4 ha verificaram que a intensa amostragem propiciou a captação das isolinhas devido aos limites geomorfológicos. Alguns autores propõem a utilização de intensa amostragem para a captação e compreensão da variabilidade espacial dos atributos e unidades de mapeamento (Minasny e McBratney, 2007; Silva et al., 2014), entretanto os custos de tais levantamentos inviabilizam sua utilização em grandes áreas (Dematte et al., 2007).

A utilização dos estratificadores na modelagem da SM promoveu um aumento na acurácia das estimativas variando de 11,3% (1 amostra a cada 5 ha) à 39,6% (1 amostra a cada 14 ha) para geologia; e 5,4% (1 amostra a cada 14 ha) à 27,3% (1 amostra a cada 7 ha) para a geomorfologia. A utilização das informações pedológicas, por sua vez, promoveu diminuição da acurácia das estimativas em todas as densidades amostrais avaliadas, variando de 0,2% (1 amostra a cada 9 ha) à 112,0% (1 amostra a cada 4 ha). A maior contribuição por parte da geologia contrasta com sua menor escala (1:500.000) em relação aos outros mapas utilizados (geomorfologia - 1:100.000; pedologia - 1:12.000). Entretanto, em regiões com presença de litosequencia a geologia representa o efeito principal nas propriedades magnéticas do solo (Fialová et al., 2006). A composição do material de origem (química, mineralogia, textura, permeabilidade) e a sua estrutura (acamamento, variações verticais e laterais de camadas, fraturas) orientam a evolução da paisagem, sendo as feições do relevo respostas a este fator (Huggett, 2007). Assim, parte da variabilidade promovida pela transição entre as formas da paisagem pode ser expressa também pela transição geológica (Sinowski e Auerswald, 1999).

Ainda para a SM, nota-se que os padrões espaciais na densidade amostral de 1 amostra a cada 5 ha sem considerar informações auxiliares e, a densidade de 1 amostra a cada 8 ha considerando a geologia no processo de modelagem apresentam resultados semelhantes. Isso indica a possibilidade de redução em 37% no número de amostras coletadas sem alterar a acurácia do mapa obtido, por meio da incorporação de informações secundárias de acesso aberto (Geobank, 2014 - <http://geobank.sa.cprm.gov.br>). Por sua vez, o uso de informações sobre a geomorfologia na densidade de 1 amostra a cada 9 ha apresenta acurácia

semelhante a densidade de 1 amostra a cada 5 ha sem informações secundárias, indicando a possibilidade de uma redução de 44% das amostras necessárias para a modelagem. Segundo Dematte et al. (2007) o grande número de amostras necessárias para a caracterização em nível detalhado de áreas agrícolas pode inviabilizar a aplicação de técnicas como a agricultura de precisão. McBratney et al. (2002) afirmam que a coleta de dados é a etapa mais difícil e onerosa para o processo de modelagem do solo. Assim, técnicas que possibilitam a redução da densidade amostral apresentam importante atividade de pesquisa (Kerry et al., 2010; Bilgili et al., 2011; Teixeira et al., 2013; Siqueira et al., 2014, Brevik et al., 2015). Além disso, esse tipo de informação pode balizar planejamentos de coleta de amostras de solo para locais sem conhecimento aprofundado da variabilidade ou para locais que necessitem maior nível de detalhamento.

Para o teor de argila, a incorporação de informações auxiliares promoveu menores ganhos na acurácia do que os relatados para a SM (Figura 4), variando de 6,9% (1 amostra a cada 14 ha) à 11,6% (1 amostra a cada 4ha) quando as informações geológicas são consideradas e de 2,1% (1 amostra a cada 2,6 ha) à 8,4% (1 amostra a cada 4 ha) ao considerar as informações geomorfológicas no processo de modelagem. Nota-se também uma acurácia semelhante entre os padrões espaciais na densidade amostral de 1 amostra a cada 2,6 ha sem considerar informações auxiliares e, a densidade de 1 amostra a cada 4 ha utilizando as informações geológicas e geomorfológicas, indicando uma redução em 35% no número de amostras coletadas sem alterar a acurácia do mapa obtido.

Estes resultados contradizem a grande semelhança entre os padrões espaciais (Figura 3) e entre os variogramas (Figura 2) destes atributos frente à incorporação das informações auxiliares. Castrignanò et al. (2009) não observaram diferenças entre a precisão dos mapas de argila quando informações topográficas e pedológicas (unidades de mapeamento do solo) foram consideradas. Benedetto et al. (2012) para a predição do conteúdo de argila do solo utilizaram informações auxiliares provenientes de dois sensores geofísicos (radar de penetração no solo e indução eletromagnética), entretanto, não conseguiram captar grande porção da variabilidade da argila, demonstrando a grande complexidade deste atributo. Hengl et al. (2014) mapeando atributos do solo em escala global por meio de modelos com

informações secundárias, verificaram que os atributos granulométricos apresentam maior dificuldade para o mapeamento do que atributos físicos e químicos do solo. Entretanto, modelos que consideram informações auxiliares e forneçam resultados semelhantes ou suavemente inferiores aos apresentados por aqueles que não a consideram podem apresentar maior potencial de uso para composição de modelos ambientais (Odeh et al., 2007).

A diferença observada entre as respostas das variáveis (SM e argila) frente a incorporação das informações auxiliares deve-se a: (i) menor variabilidade do teor de argila em relação a SM (Tabela 1) resultando em uma menor resposta as mudanças de compartimentos; (ii) maior influência do carreamento superficial da argila, promovendo uma relativa homogeneização dos seus teores nas regiões de transição entre compartimentos; e, (iii) maior erro envolvido em sua determinação em laboratório. Segundo Cantarella et al. (2006), em laboratórios brasileiros, as análises granulométricas apresentam erros variando de 15 a 32%. Em contrapartida, a determinação da SM apresenta uma maior acurácia por se tratar de uma metodologia simples, rápida e segura (Dearing, 1994). Portanto, devido a alta correlação existente entre estas variáveis, e o alto erro na determinação do teor de argila, o uso SM na determinação do teor de argila pode ser uma técnica alternativa interessante para diminuição do erro global (Siqueira et al., 2010; Peluco et al., 2013).

Pequenas diferenças foram observadas entre os padrões espaciais do V% antes e após considerar as informações dos estratificadores. Novamente, esta pequena influência indica que o fator antrópico é o agente promotor e/ou controlador da variabilidade deste atributo. Holmes et al. (2005) avaliando a variabilidade em multi-escala dos nutrientes de solos tropicais, verificaram que a mudança no uso do solo é o principal fator atuante na variabilidade em grande escala.

Em virtude das maiores contribuições por parte da geologia encontradas em todas as etapas deste trabalho, principalmente em relação a SM e teor de argila, pode-se afirmar que este é o principal fator controlador da variabilidade dos atributos avaliados. Assim, os resultados encontrados neste trabalho apresentam potencial para ser extrapolados para cerca de 44.000 ha do estado de São Paulo (Siqueira et al., 2014), os quais apresentam a mesma transição geológica abordada neste

estudo, e para outras regiões que apresentem transições geológicas semelhantes. Em adição, pode-se afirmar que para regiões com grande transição geológica, a continuidade espacial e limites dessas transições apresentarão maior influência na compreensão da variabilidade espacial de atributos do solo do que os limites dos compartimentos geomorfológicos e pedológicos (Nanni et al., 2011; Liu et al., 2013; Lv et al., 2013; Matias et al., 2014). Porém, para regiões com transição geológica suave ou sob a mesma geologia, os limites dos compartimentos geomorfológicos descreverão com maior precisão a variabilidade dos atributos do solo (Siqueira et al., 2010; Sanchez et al., 2013).

Recentemente, Hengl et al. (2014) propuseram uma primeira aproximação do mapeamento global de alguns atributos e unidades de mapeamento com resolução de 1 Km. Entretanto, apesar da alta resolução do mapa apresentado pelos autores, os baixos valores de validação para alguns atributos e a escassez de informações de solo em escalas detalhadas para regiões da Ásia, África e América Latina, indicam que modelos regionais ou locais ainda precisam ser desenvolvidos (Grunwald, 2009). Neste sentido, os resultados apresentados neste trabalho podem auxiliar na identificação das variáveis utilizadas como informações secundárias para o mapeamento de atributos do solo em escalas regionais e locais, bem como fornecer informações para o planejamento amostral de atributos do solo e posterior detalhamento das estimativas espaciais.

2.4 Conclusões

A utilização de informações auxiliares reduz o efeito da diminuição da densidade amostral dos atributos do solo. A incorporação de informações sobre a geologia e geomorfologia na estimativa da SM e teor de argila propicia redução no número de amostras para uma representação espacial acurada e deve ser considerada no momento do planejamento amostral. Para o V%, a incorporação destas informações não propicia redução na densidade amostral. Os maiores ganhos na continuidade espacial da SM em relação ao teor de argila e V%, quando as informações auxiliares são consideradas, deve-se a sua alta resposta às

mudanças pedoambientais como as ocasionadas pelas transições geológicas e geomorfológicas.

As informações pedológicas possibilitam identificar regiões com propriedades semelhantes, entretanto seu delineamento não é adequado para compor modelos espaciais. Isto reforça a necessidade da inclusão do conhecimento da variabilidade espacial dos atributos do solo para a composição dos mapas de unidades de mapeamento.

Os resultados apresentados por este estudo podem auxiliar na determinação de planejamentos amostrais para locais sem conhecimento prévio da variabilidade, bem como auxiliar no detalhamento da variabilidade de estudos em pequenas escalas que necessitem planos amostrais locais ou regionais.

2.5 Referências

- Anderson, M.C., Kustas, W.P., Norman, J.M., 2003. Upscaling and Downscaling - A Regional View of the Soil-Plant-Atmosphere Continuum. *Agron. J.* 95, 1408-1423.
- Benedetto, D.D., Castrignano, A., Sollitto, D., Modugno, F., Buttafuoco, G., Papa, G., 2012. Integrating geophysical and geostatistical techniques to map the spatial variation of clay. *Geoderma* 171-172, 53-63.
- Bilgili, A.V., Akbas, F., van Es, H.M., 2011. Combined use of hyperspectral VNIR reflectance spectroscopy and kriging to predict soil variables spatially. *Precis. Agric.* 12, 395-420.
- Brevik, E.C.; Calzolari, C.; Miller, B.A.; Pereira, P.; Kabala, C.; Baumgarten, A.; Jordán, A. Soil mapping, classification, and pedologic modeling: History and future directions. *Geoderma*, 2015. (In press).
- Burrough, P.A., 1991. Sampling Designs for Quantifying Map Unit Composition. In: *Spatial Variabilities of Soils and Landforms*, Soil Sci. Soc. Am., SSSA Special Publication 28, 89-125.

- Camargo, L.A., Marques Jr, J., Pereira, G.T, Bahia, A.S.R.S., 2014. Clay mineralogy and magnetic susceptibility of Oxisols in geomorphic surfaces. *Sci. Agric.* 71, 244-256.
- Cambardella, C.A., Moorman, T.B., Novak, J.M., Parkin, T.B., Karlen, D.L., Turco, R.F., Konopka, A.E., 1994. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58, 1501-1511.
- Cambule, A.H., Rossiter, D.G., Stoorvogel, J.J., 2013. A methodology for digital soil mapping in poorly-accessible areas. *Geoderma* 192, 341-353.
- Campos, M.C.C., Marques Jr., J., Pereira, G.T., Montanari, R., Camargo, L.A. 2007. Soil-landscape relationships in a sandstone-basalt lithosequence in Pereira Barreto, São Paulo. *Rev. Bras. Cienc. Solo* 31, 519-529. (in Portuguese)
- Campos, M.C.C., Marques Jr., J., Pereira, G.T., Souza, Z.M., Barbieri, D.M., 2008. Fertilizer and limestone applications after the harvest of sugarcane as determined by geostatistics techniques. *Cienc. Rural* 38, 974-980. (in Portuguese)
- Cantarella, H., Quaggio, J.A., van Raij, B., Abreu, M.F., 2006. Variability of soil analysis in commercial laboratories: implications for lime and fertilizer recommendations. *Commun. Soil Sci Plan.* 37, 2213-2225.
- Cardoso, J.A., Lacerda, M.P.C., Rein, T.A., Santos Jr., J.D.G., Figueiredo, C.C., 2014. Variability of soil fertility properties in areas planted to sugarcane in the state of Goiás, Brazil. *Rev. Bras. Cienc. Solo* 38, 506-515.
- Castrignanò, A., Costantini, E.A.C., Barbetti, R., Sollitto, D., 2009. Accounting for extensive topographic and pedologic secondary information to improve soil mapping. *Catena* 77, 28-38.
- Cherubin, M.R., Santi, A.L., Eitelwein, M.T., Ros, C.O., Bisognin, M.B. 2014. Sampling grids used to characterise the spatial variability of pH, Ca, Mg and V% in Oxisols. *Rev. Cienc. Agron.* 45, 659-672.
- Davis, J.C., 1986. *Statistics and data analysis in geology*, second ed. John Wiley, New York.
- Dearing, J.A., 1994. *Environmental magnetic susceptibility. Using the Bartington MS2 System*, British Library, England (104 pp.).

- Delden, H., Vliet, J., Rutledge, D.T., Kirkby, M.J., 2011. Comparison of scale and scaling issues in integrated land-use models for policy support. *Agr. Ecosyst. Environ.* 142, 18-28.
- Demattê, J.A.M., Galdos, M.V., Guimarães, R.V., Genú, A.M., Nanni, M.R., Zullo Jr., J. 2007. Quantification of tropical soil attributes from ETM+/LANDSAT -7 data. *Int. J. Remote Sens.* 28, 3813-3829.
- EMBRAPA, 2006. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Brazilian system of soil classification, second ed., Embrapa, Rio de Janeiro. (in Portuguese).
- EMBRAPA, 1997. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual of soil analysis methods. Embrapa, Rio de Janeiro. (in Portuguese)
- Fialová, H., Maier, G., Petrovský, E., Kapicka, A., Boyko, T., Scholger, R. 2006. Magnetic properties of soils from sites with different geological and environmental settings. *J. Appl. Geophys.* 59, 273–283.
- Fürst, C., Zirlewagen, D., Lorz, C., 2010. Regionalization of Magnetic Susceptibility Measurements Based on a Multiple Regression Approach. *Water Air Soil Poll.* 208, 129–151.
- GEOBANK, 2014. Serviço Geológico do Brasil – CPRM. Available in <http://geobank.sa.cprm.gov.br/> (Accessed at: 04/15/2014. (in Portuguese))
- Goovaerts, P., 1997. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. Oxford University Press, New-York.
- Grunwald, S., Thompson, J.A., Boettinger, J.L., 2011. Digital Soil Mapping and Modeling at Continental Scales: Finding Solutions for Global Issues. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 75, 1201-1213.
- Hanesch, M., Scholger, R., 2005. The influence of soil type on the magnetic susceptibility measured throughout soil profiles. *Geophys. J. Int.* 161, 50–56.
- Hengl, T., Jesus, J.M., Macmillan, R.A., Batjes, N.H., Heuvelink, G.B.M., Ribeiro, E., Samuel-Rosa, A., Kempen, B., Leenaars, J.G.B., Walsh, M.G., Gonzalez, M.R., 2014. SoilGrids1km — Global Soil Information Based on Automated Mapping. *PLoS ONE* 9(8), e105992. doi:10.1371/journal.pone.0105992.

- Holmes, K.W., Kyriakidis, P.C., Chadwick, O.A., Soares, J.V., Roberts, D.A. 2005. Multi-scale variability in tropical soil nutrients following land-cover change. *Biogeochemistry* 74, 173–203.
- Hudson, B.D., 1992. The Soil Survey as Paradigm-Based Science. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56, 836-841.
- Huggett, R.J., 2007. *Fundamentals of geomorphology*, second ed. Routledge, London.
- Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), 1981. *Geomorphological Map of the State of São Paulo* (94 pp. (in Portuguese))
- Isaaks, E.H., Srivastava, R.M., 1989. *Applied geostatistics*. Oxford University Press, New York.
- Jong, E., Pennock, D.J., Nestor, P.A., 2000. Magnetic susceptibility of soils in different slope positions in Saskatchewan, Canada. *Catena* 40, 291–305.
- Ker, J.C., 1998. Brazilian Latosols: a review. *Geonomos* 5, 17-40. (in Portuguese).
- Kerry, R., Oliver, M.A., Frogbrook, Z.L., 2010. Sampling in Precision Agriculture, in: Oliver, M.A. (Ed.), *Geostatistical Applications for Precision Agriculture*, Springer, England, pp. 35-63.
- Legros, J.P., 2006. *Mapping of the soil* (411 pp.)
- Li, J., Heap, A.D., 2008. A Review of Spatial Interpolation Methods for Environmental Scientists. *Geoscience Australia, Record 2008/23* (137 pp.).
- Liu, X.M., Shaw, J., Jiang, J.Z., Bloemendal, J., Hesse, P., Rolph, T., Mao, X.G., 2010. Analysis on variety and characteristics of maghemite. *Sci. China Earth Sci.* 53, 1153-1162.
- Liu, Y., Lv, J., Zhang, B., Bi, J., 2013. Spatial multi-scale variability of soil nutrients in relation to environmental factors in a typical agricultural region, Eastern China. *Sci. Total Environ.* 450–451, 108–119.
- Lv, J., Liu, Y., Zhang, Z., Dai, J. 2013. Factorial kriging and stepwise regression approach to identify environmental factors influencing spatial multi-scale variability of heavy metals in soils. *J. Hazard. Mater.* 261, 387–397.

- Marques Jr., J., Siqueira, D.S., Camargo, L.A., Teixeira, D.D.B., Barron, V., Torrent, J., 2014. Magnetic susceptibility and diffuse reflectance spectroscopy to characterize the spatial variability of soil properties in a Brazilian Haplustalf. *Geoderma* 219-220, 63-71.
- Matias, S.S.R., Marques Jr., J., Siqueira, D.S., Pereira, G.T., 2014. Outlining precision boundaries among areas with different variability standards using magnetic susceptibility and geomorphic surfaces. *Eng. Agric.* 34, 695-706.
- McBratney, A.B., Odeh, I.O.A., Bishop, T.F.A., Dunbar, M.S., Shatar, T.M., 2000. An overview of pedometric techniques for use in soil survey. *Geoderma* 97, 293-327.
- McBratney, A.B., Minasny, B., Cattle, S.R., Vervoort, R.W., 2002. From pedotransfer functions to soil inference systems. *Geoderma* 109, 41-73.
- McBratney, A.B., Santos, M.L.M., Minasny, B., 2003. On digital soil mapping. *Geoderma* 117, 3-52.
- Miller, B.A., Koszinski, S., Wehrhan, M., Sommer, M., 2015. Impact of multi-scale predictor selection for modeling soil properties. *Geoderma* 239-240, 97-106.
- Minasny, B., Alex, B., McBratney, A.B., Hartemink, A.E., 2010. Global pedodiversity, taxonomic distance, and the World Reference Base. *Geoderma* 155, 132-139.
- Minasny, B., McBratney, A.B. 2007. Estimating the Water Retention Shape Parameter from Sand and Clay Content. *Soil Sci. Soc. Am.* 71, 1105-1110.
- Montanari, R., Souza, G.S.A., Pereira, G.T., Marques Jr., J., Siqueira, D.S., Siqueira, G.M. 2012. The use of scaled semivariograms to plan soil sampling in sugarcane fields. *Precis. Agric.* 13, 01-11.
- Nanni, M.R., Povh, F.P., Demattê, J.A.M., Oliveira, R.B., Chicati, M.L., Cezar, E., 2011. Optimum size in grid soil sampling for variable rate application in sitespecific management. *Sci. Agric.* 68, 386-392.
- Odeh, I.O.A., Crawford, M., McBratney, A.B., 2007. Digital mapping of soil attributes for regional and catchment modelling, using ancillary covariates, statistical and geostatistical techniques, in: Lagacherie, P., McBratney, A.B., Voltz, M. (Eds.), *Developments in Soil Science*, Elsevier, London, pp. 437-454.

- Panosso, A.R., Perillo, L.I., Ferraudo, A.S., Pereira, G.T., Miranda, J.G.V., La Scala Jr., N. 2012. Fractal dimension and anisotropy of soil CO₂ emission in a mechanically harvested sugarcane production area. *Soil Till. Res.* 124, 8–16.
- Peluco, R.G., Marques Jr., J., Siqueira, D.S., Pereira, G.T., Barbosa, R.S., Teixeira, D.D.B., Adame, C.R., Cortez, L.A. 2013. Suscetibilidade magnética do solo na estimação da capacidade de suporte à aplicação de vinhaça. *Pesqu. Agropecu. Bras.* 48, 661-672.
- Preetz, H., Altfelder, S., Hennings, V., Igel, J., 2009. Classification of soil magnetic susceptibility and prediction of metal detector performance – case study of Angola. P. SPIE 7303, 730313-1.
- Preetz, H., Altfelder, S., Igel, J., 2008. Tropical Soils and Landmine Detection – An Approach for a Classification System. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72, 151-159.
- Quijano, L., Gaspar, L., López-Vicente, M., Chaparro, M.A.E., Machín, J., Navas, A., 2011. Soil magnetic susceptibility and surface topographic characteristics in cultivated soils. *Latinmag Lett. Special Issue 1*, 1-6.
- Raij, B. van., 2001. Chemical analysis to evaluate the fertility of tropical soils. Instituto Agronômico, Campinas. (in Portuguese)
- Raij, B. van, Zullo, M.A.T., 1977. Methods of soil analysis. Instituto Agronômico, Campinas. (in Portuguese)
- Ripoli, T.C.C., Ripoli, M.L., 2004. Sugarcane biomass: Harvest, energy and environment. TCC Ripoli, Piracicaba. (in Portuguese)
- Sanchez, M.G.B., Marques Jr., J., Siqueira, D.S., Camargo, L.A., Pereira, G.T. 2013. Delineation of specific management areas for coffee cultivation based on the soil–relief relationship and numerical classification. *Precis. Agric.* 14, 201–214.
- Schwertmann, U. 1985. The effect of environments on iron oxide minerals. *Adv. Soil Sci.* 1, 172-200.
- Silva, A.F., Pereira, M.J., Carneiro, J.D., Zimback, C.R.L., Landim, P.M.B., Soares, A., 2014. A new approach to soil classification mapping based on the spatial distribution of soil properties. *Geoderma* 219–220, 106–116.
- Sinowski, W., Auerswald, K., 1999. Using relief parameters in a discriminant analysis to stratify geological areas with different spatial variability of soil properties. *Geoderma* 89, 113–128.

- Siqueira, D.S., Marques Jr, J., Matias, S.S.R., Barrón, V., Torrent, J., Baffa, O., Oliveira, L.C., 2010. Correlation of properties of Brazilian Haplustalfs with magnetic susceptibility measurements. *Soil Use Manage.* 26, 425–431.
- Siqueira, D.S., Marques Jr., J., Pereira, G.T., Barbosa, R.S., Teixeira, D.D.B., Peluco, R.G., 2014. Sampling density and proportion for the characterization of the variability of Oxisol attributes on different materials. *Geoderma* 232–234, 172–182.
- Soil Survey Staff, 1975. (Soil taxonomy): a basic system of soil classification of making and interpreting soil surveys, USDA. Agriculture Handbook, 4361st ed. USDA—Natural Resources Conservation Service, Washington.
- Teixeira, D.D.B., Bicalho, E.S., Panosso, A.R., Cerri, C.E.P., Pereira, G.T., La Scala, N., 2013. Spatial variability of soil CO₂ emission in a sugarcane area characterized by secondary information. *Sci. Agric.* 70, 195-203.
- Thornthwaite, C.W., 1948. An approach towards a rational classification of climate. *Geographical Review* 38, 55-94.
- Troeh, F.R., 1965. Landform equations fitted to contour maps. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 263, 616-627.
- Vašát, R., Heuvelink, G.B.M., Borůvka, L., 2010. Sampling design optimization for multivariate soil mapping. *Geoderma* 155, 147–153.
- Vasconcelos, V., Carvalho Jr, O.A., Martins, E.S., Couto Jr., A.F., Guimaraes, R.F., Gomes, R.A.T., 2012. Geomorphometric classification system based on a two-stage sequential architecture: decision tree and spectral classifier, in the Serra da Canastra national park. *Rev. Bras. Geomorf.* 13, 171-186. (in Portuguese)
- Vidal-Torrado, P., Lepsch, I.F., Castro, S.S., 2005. Concepts and Applications of Pedology Geomorphology Relationship in Tropical Moist Regions, in: Vidal-Torrado, P., Ferraciu, L.R., Cooper, M., Cardoso, E.J., Prochonow, L.I. (Org.). *Tópicos em Ciência do Solo*. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, pp. 145-192. (in Portuguese)
- Wang, X.S., 2013. Assessment of heavy metal pollution in Xuzhou urban topsoils by magnetic susceptibility measurements. *J. Appl. Geophys.* 92, 76–83.
- White, J.G., Zasoski, R.J., 1999. Mapping Soil Micronutrients. *Field Crop. Res.* 60, 11-26.

CAPÍTULO 3 – Delineamento de unidades de mapeamento com base na incerteza espacial da suscetibilidade magnética e teor de argila

Resumo – O objetivo deste estudo foi utilizar as incertezas espaciais da suscetibilidade magnética (SM) e teor de argila para o aprimoramento de unidades de mapeamento do solo. Na área experimental, abrangendo 870 ha, foi instalada uma malha de amostragem regular contendo 371 pontos, onde se avaliou a SM e teor de argila na profundidade de 0-0,25 m. Com o auxílio do modelo digital de elevação e observações de campo, foi identificada uma transeção na área em estudo de 4440 m a partir do topo da vertente até o sopé, no sentido do decaimento mais suave do declive. As incertezas nas estimativas espaciais foram contabilizadas pelos mapas de desvio padrão estimados com base em 200 realizações da simulação sequencial gaussiana. Para a definição das zonas de transição na transeção, foram selecionadas as isolinhas das incertezas representativas da transição entre as unidades de mapeamento do solo. Ambos os atributos apresentaram valores de pico das incertezas próximos à mudança de unidades de mapeamento previamente conhecidas. As zonas de incerteza, determinadas na transeção previamente delineada, variaram de 45 a 210 m e de 60 a 170 m, para a SM e teor de argila, respectivamente. Entretanto, após a extrapolação das incertezas para a lateral da transeção, verificaram-se mudanças na amplitude das zonas de incerteza, principalmente nas regiões de transição entre formas da paisagem e geologia. O delineamento de unidades de mapeamento incorporando as incertezas da SM e teor de argila foi semelhante. Entretanto, devido ao menor custo e rapidez, a SM passa a ser a alternativa mais viável. O conhecimento das incertezas espaciais possibilita a readequação dos limites nos mapas de unidades de mapeamento do solo e pode ajudar na identificação de regiões mais propícias a determinação do pédon modal representante de cada unidade.

Palavras-chave: geoestatística, simulação sequencial gaussiana, classes de solo.

3.1 Introdução

Mapas pedológicos apresentam grande potencial para contribuir para o aumento da produção agrícola (Grunwald et al., 2011, Brevik et al., 2015), planejamento agrícola e modelagem de impactos ambientais (Rogowski e Wolf, 1994). Entretanto, os mapas pedológicos apresentam algumas limitações que dificultam ou até impossibilitam sua utilização, tais como: (i) subjetividade, uma vez que as delimitações dos limites das unidades mapeadas dependem da experiência e impressões do mapeador (Bazaglia Filho et al., 2013); (ii) ausência da representação do padrão de variabilidade espacial e temporal dos atributos do solo (Rogowski e Wolf, 1994); e, (iii) definição de limites arbitrários para a distinção entre diferentes unidades de solo (Phillips, 2013).

Bazaglia Filho et al. (2013) comparando o mapeamento de unidades de solo realizado por diferentes mapeadores, observaram que o executor exerce grande influência na delimitação das unidades de manejo do solo, principalmente no limite das mesmas. Trabalhos na área de mapeamento digital do solo (Nanni et al., 2014) também demonstram dificuldade no mapeamento preciso das transições dos solos. Esta imprecisão nos limites do mapa de solos são consequência da utilização de critérios previamente estabelecidos pela chave de classificação, levando a distinção entre solos com comportamentos semelhantes, e a junção de outros com comportamentos distintos (Phillips, 2013).

Algumas metodologias buscam contornar estes problemas, por meio da incorporação da variabilidade espacial dos atributos do solo (Siqueira et al., 2015) por meio de técnicas de mapeamento híbrido (Legros et al., 2006). Tais metodologias são normalmente testadas por meio de validações e análises de erros (Cambule et al., 2014) fornecendo apenas uma visão geral do erro associada ao mapeamento. Neste sentido, técnicas que avaliam e incorporam as incertezas associadas às informações dos mapas de solo promovem um avanço do conhecimento dos erros do mapeamento (Castrignanò et al., 2009; Brevik et al., 2015). A identificação e determinação das incertezas podem ser realizadas diretamente sobre as unidades de mapeamento utilizando lógica Fuzzy (Zhu, 1997) e técnicas de simulações indicativas (Silva et al., 2015) ou sobre os atributos do

solo, principalmente, por meio de simulações geoestatísticas (Grunwald et al., 2007; Castrignanò et al., 2008; Teixeira et al., 2012; Viscarra-Rossel et al., 2014) e técnicas de propagação de erros (Hengl et al., 2014).

As incertezas determinadas nas unidades de solo são utilizadas para identificar a probabilidade com que àquela classe está definida corretamente (Phillips, 2013). Sua utilização é difícil, uma vez que, é necessário o conhecimento de grande número de pédonos modais para sua determinação (Silva et al., 2015). Por sua vez, a incerteza na avaliação espacial de atributos do solo é utilizada para a identificação de locais com necessidade de maior número de amostras (Teixeira et al., 2012), construção de cenários de estimativas (Grunwald et al., 2007), além de fornecer uma medida indireta da qualidade da estimativa gerada em cada local (Viscarra-Rossel et al., 2014). Apesar da necessidade de um grande número de amostras, principalmente para atender aos princípios das análises geoestatísticas (Isaaks & Srivastava, 1989), a amostragem dos atributos do solo é mais rápida, simples e barata que a amostragem de pédonos. Assim, para solos com pouca variação vertical dos atributos diagnósticos ou dos atributos covariativos a estes, propõe-se a utilização das incertezas espaciais dos atributos na determinação das incertezas das unidades de mapeamento, e assim, incorporar, simultaneamente, informações sobre a variabilidade espacial dos atributos do solo ao mapa gerado.

A definição dos atributos a serem utilizados na identificação das incertezas é de grande importância. Silva et al. (2015) propõe a avaliação das incertezas para os atributos diagnósticos do solo (cor do solo, gradiente textural, saturação por bases, teores de argila e areia e carbono orgânico do solo). Para solos tropicais, a mineralogia do solo e o teor de argila apresentam grande relação com as classes taxonômicas do solo (Costa et al., 1999) e influenciam diretamente na definição das unidades de mapeamento (Marques Jr. et al., 2014; Siqueira et al., 2015). A suscetibilidade magnética (SM) é covariativa dos fatores e processos de formação do solo, estando intimamente relacionada à mineralogia dos mesmos (Camargo et al., 2014). Sua utilização crescente deve-se a simplicidade e baixo custo em sua determinação (Dearing, 1994), e a sua alta relação com os atributos físicos, químicos e mineralógicos do solo (Siqueira et al., 2010). Assim, a hipótese desta pesquisa é que a incorporação das incertezas dos atributos do solo covariativos dos

fatores e processo de formação do solo (SM e teor de argila) podem auxiliar no delineamento de unidades de mapeamento, bem como na readequação dos limites entre unidades de solo incorporando simultaneamente informações sobre a variabilidade espacial dos atributos do solo. Neste sentido, objetivou-se utilizar as incertezas espaciais da SM e teor de argila para o aprimoramento das unidades de mapeamento do solo.

3.2 Material e Métodos

3.2.1 Descrição da área e amostragem

A área de estudo, cujas coordenadas centrais são 21°28'40"S e 48°01'38"O, localiza-se no município de Guatapar, estado de So Paulo – Brasil (Figura 1a). A vegetao natural local era constituda por floresta tropical subcaduciflia. Atualmente, a rea  cultivada com cana-de-aucar sob o sistema de colheita mecanizada h mais de 10 anos. Segundo Thornthwaite (1948), o clima da regio pode ser definido como B1rB'4a', Tipo Mesotrmico mido, com pequena deficincia hdrica, sendo a evapotranspirao de vero menor que 48% da evapotranspirao anual.

A rea localiza-se em uma transio geolgica entre Basalto do Grupo So Bento Formao Serra Geral (SG), Depsito Colvio-Eluvionar (ECD) e Depsito Aluvionar (AD) (Instituto De Pesquisas Tecnolgicas Do Estado De So Paulo, IPT, 1981; Geobank, 2014) (Figura 1b). Na rea foram identificados a presena das curvaturas horizontais cncavas (Cc) e convexas (Cx) (Figura 1c). Para a identificao destas curvaturas foram utilizados informaoes SRTM com resoluo horizontal de 90 metros e preciso vertical da ordem de 5 metros. Inicialmente foi realizada uma filtragem de mediana para a retirada de valores com variao superior a 10 m, sendo posteriormente realizada a interpolao dos dados pelo mtodo Topogrid. A partir dos dados interpolados foi gerada a assinatura geomorfomtrica (imagem da curvatura horizontal). Posteriormente, os valores da assinatura foram normalizados por meio da diviso pelo valor mximo encontrado produzindo valores

variando de -1 a 1. Os valores positivos foram considerados pertencentes à curvatura convergente (côncava) e negativos pertencentes à curvatura divergente (convexa). Para mais detalhes veja Vasconcelos et al. (2012).

De acordo com o mapa de solos (escala 1:12000) gerado pelo Centro de Tecnologia Canavieira (CTC) (Figura 1d), a área registra a ocorrência de cinco unidades de mapeamento de solo: Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (LVAd) (2,7 % da área total); Latossolo Vermelho distrófico (LVd) (49,7 % da área total); Latossolo Vermelho distroférico (LVdf) (21,2 % da área total); Latossolo Vermelho eutroférico (LVef) (15,4 % da área total); Neossolo Quartzarênico órtico distrófico (RQod) (12,0 % da área total).

Na área experimental foi instalada uma malha de amostragem regular contendo 371 pontos separados por distâncias mínimas variando de 145 m a 174 m, abrangendo uma área total de cerca de 870 ha (Figura 1e). A densidade amostral resultante (0,4 amostras/ha) está de acordo com o indicado pelos Procedimentos Normativos de levantamentos pedológicos (Embrapa, 1995). Sob cada ponto da malha amostral foram coletadas amostras na profundidade de 0-0,25 m para a determinação da SM e teor de argila. Com o auxílio do modelo digital de elevação e observações de campo, foi identificada uma transeção na área em estudo de 4440 m a partir do topo da vertente, seguindo o espigão até o sopé, no sentido do decaimento mais suave do declive (Figura 1e). Esta transeção contempla duas classes geológicas, ambas as curvaturas e todas as unidades de mapeamento pedológicas presentes na área.

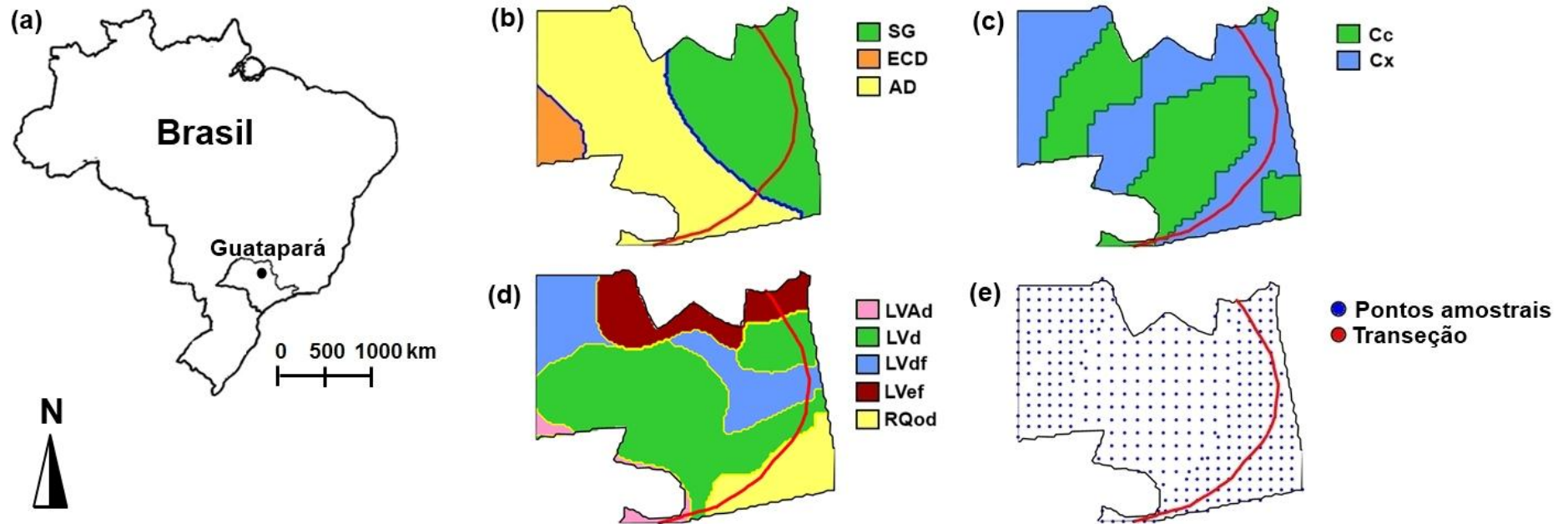


Figura 1. Caracterizaao da rea de estudo. Localizaao da rea amostral (a); mapa geologico na escala 1:500.000 (SG – Serra Geral; ECD – Deposito Coluvio Eluvionar; AD – Deposito Aluvionar) (b); mapa geomorfometrico na escala de 1:100.000 (Cc – pedoforma concava; Cx – pedoforma convexa) (c); mapa de solos na escala 1:12.000 (LVAd - Latossolo Vermelho Amarelo distrofico textura media; LVd - Latossolo Vermelho distrofico textura media; LVdf - Latossolo Vermelho distroferico textura argilosa; LVef - Latossolo Vermelho eutroferico textura argilosa; RQod – Neossolo Quartzarenico ortico distrofico textura arenosa) (d); distribuiao espacial das amostras e transeao (e).

3.2.2 Análises laboratoriais

A SM foi determinada em baixa frequência (0,47 kHz) utilizando 10 g de terra fina seca ao ar no equipamento Bartington MS2, acoplado ao sensor Bartington MS2B (Dearing, 1994). O teor de argila foi determinado pelo método da pipeta, utilizando solução de NaOH 0,1 mol L⁻¹ como dispersante químico e agitação mecânica em aparato de baixa rotação por 16 horas (EMBRAPA, 1997).

3.2.3 Análises dos dados

3.2.3.1 Estatística descritiva

A variabilidade dos atributos do solo foi previamente descrita por meio da construção dos gráficos boxplot em função dos compartimentos geológicos, geomorfológicos e pedológicos. Os gráficos boxplot apresentam os valores mínimos, máximos, 1º quartil (Q1), 2º quartil (mediana), 3º quartil (Q3) e intervalo interquartil (IR). Os valores maiores que $Q3 + 1,5 \times (Q3 - Q1)$ ou menores que $Q1 - 1,5 \times (Q3 - Q1)$ são considerados outliers.

3.2.3.2 Análises Geoestatísticas

A variabilidade espacial das variáveis foi determinada utilizando a modelagem do variograma experimental, com base na teoria das variáveis regionalizadas (Isaaks & Srivastava, 1989). Sob as hipóteses intrínsecas de estacionariedade, o variograma estima a continuidade espacial das variáveis como função das distâncias entre duas localizações, sendo estimado por:

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

em que, $\hat{\gamma}(h)$ é a semivariância experimental para uma distância de separação h , $z(x_i)$ é o valor da propriedade no ponto i , e $N(h)$ é o número de pares de pontos

separados pela distância h . No processo de modelagem, são estimados os parâmetros do modelo teórico: efeito pepita (C_0), contribuição (C_1) e alcance (a). Neste estudo, modelos esféricos, exponenciais e gaussianos foram testados. A escolha dos modelos e parâmetros ajustados aos variogramas experimentais baseou-se na soma de quadrado dos resíduos (SSR) obtido durante o ajuste do modelo teórico ao variograma experimental.

Após a modelagem do variograma experimental, a estimativa dos atributos nos locais não amostrados foi realizada por meio da simulação sequencial gaussiana (SSG). A técnica de SSG foi adotada devido às características da mesma de honrar os valores amostrados, reproduzir os histogramas e variogramas da amostra e permitir a avaliação das incertezas das estimativas dos padrões espaciais (Grunwald et al., 2007).

Para o procedimento de simulação, os dados foram previamente normalizados (média e variância igual a 0 e 1, respectivamente) devido a exigência de distribuição multigaussiana dos dados. Após a normalização, os variogramas experimentais foram modelados nas variáveis transformadas. Posteriormente, um caminho aleatório capaz de passar por todos os pontos não amostrados da malha refinada é determinado. Estimativas locais do valor e variância são realizadas pela krigagem simples objetivando a construção da função de distribuição acumulada (fdac). A partir da fdac, considerando os valores originais vizinhos e os previamente simulados, a estimativa do valor em cada ponto da grade amostral é efetuada. Após a determinação dos valores simulados em todos os pontos de uma grade mais refinada, realiza-se a transformação de volta para os valores originais. Desta forma o procedimento é repetido até que todas as realizações sejam efetuadas. Neste trabalho foram consideradas 200 realizações de cada variável. O procedimento da SSG baseou-se na rotina-SGSIM do “Geostatistical Software Library” (Deutsch & Journel, 1998).

Os mapas produzidos pela SSG foram gerados a partir de uma malha refinada com 128 linhas \times 109 colunas, resultando em uma resolução espacial de 30 m. Mapas dos valores médios (estimativas *E-type*) e de desvio padrão foram estimados a partir da contabilização dos pontos simulados em cada local nas 200 realizações. Os mapas dos valores médios demonstram a tendência predominante

dos valores dos atributos na área estudada, enquanto os mapas do desvio padrão representam a incerteza presente nas estimativas espaciais (Grunwald et al., 2007).

3.2.3.3 Definição das zonas de transição entre unidades de mapeamento

A definição das zonas de transição para o aprimoramento dos limites das unidades de mapeamento foi determinada com base nas incertezas das estimativas espaciais da SM e teor de argila nos locais correspondentes à transeção demarcada previamente (Figura 1e). Geomorfologicamente, a transeção é a parte do relevo mais preservada e, portanto, mais representativa dos fatores e processos de formação do solo. Vários estudos utilizando métodos de mapeamento híbrido em nível detalhado se baseiam na variabilidade de atributos do solo ao longo da transeção (Siqueira et al., 2015).

Os valores das incertezas foram comparados aos limites das unidades de mapeamento previamente delineadas. Posteriormente, foram identificados picos de valores de incerteza próximos às transições entre as unidades de mapeamento (Figura 1d). Estes picos representam o ponto em que as populações apresentam o máximo de heterogeneidade e assim caracterizam o local com maior probabilidade de que a transição entre as unidades de solo ocorra. Para uma estimativa mais conservadora do local da transição entre unidades, foi considerado a variação de 10% do valor do pico da incerteza para a delimitação da zona de incertezas.

Após a identificação dos limites das zonas de incertezas na transeção previamente delineada, foi realizada a extrapolação destes limites para as laterais da transeção, utilizando as isolinhas dos mapas de incerteza espacial. Este procedimento possibilitou o aprimoramento e readequação dos limites das unidades de solo previamente mapeadas, incorporando informações sobre a variabilidade espacial dos atributos do solo e incertezas espaciais dos mesmos.

3.3 Resultados e Discussão

Os valores das medianas da SM na geologia SG ($3074 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$) assemelham-se àqueles relatados por Preetz et al. (2008) para rochas básicas e ultrabásicas (Figura 2). Entretanto, este mesmo autor relata valores de SM para rochas sedimentares inferiores aos encontrados neste estudo para AD ($1138 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$) e ECD ($1219 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$). Estes altos valores de SM para AD e ECD devem-se a soma de quatro fatores: (i) presença de íon ferro no material que sofreu intemperização e originou as rochas deposicionais; (ii) manejo de queima da cana-de-açúcar durante os ciclos anteriores da cultura, favorecendo a formação de magnetita e maghemita, as quais apresentam alto potencial magnético (Schwertmann, 1985); (iii) carreamento de partículas da fração argila e areia muito fina das partes mais altas do relevo, onde se encontram solos do basalto (SG), para as partes mais baixas (AD), promovendo redistribuição dos teores de maghemita e magnetita do solo (Jong et al., 1998; Matias et al., 2014); e, (iv) delineamento ineficiente da geologia devido a escala do mapa adotado (1:500.000), uma vez que, áreas pertencentes a geologia SG podem ter sido classificadas erroneamente como pertencentes a geologia AD.

A variabilidade apresentada pela SM nas geologias SG (CV=81%) e ECD (CV=92%) em comparação a geologia AD (CV=58%) também são um indicativo do nível de detalhe do mapa geológico e da redistribuição dos teores de maghemita e magnetita do solo. A menor variabilidade encontrada na geologia AD deve-se a sua localização, limítrofe a geologia ECD, a qual possui características semelhantes. Em contrapartida, devido à transição abrupta presente entre as rochas magmática (SG) e depósitos mais recentes (ECD), a variabilidade do limite indicado pelo mapa influencia os valores de CV.

Os gráficos boxplot para os teores de argila em função das unidades geológicas (Figura 2) apresentam comportamento semelhante ao relatado para a SM. Os valores das medianas dos teores de argila para as geologias SG, AD e ECD foram de 286, 279 e 328 g kg^{-1} , respectivamente. Solos originados de basalto apresentam textura argilosa ($350 \text{ g kg}^{-1} < \text{teor de argila} < 600 \text{ g kg}^{-1}$) a muito argilosa ($>600 \text{ g kg}^{-1}$), enquanto os solos originados de rochas sedimentares podem

apresentar desde textura arenosa ($<150 \text{ g kg}^{-1}$) a muito argilosa ($>600 \text{ g kg}^{-1}$) (Prado, 2013). A presença de teores de argila $< 350 \text{ g kg}^{-1}$ em área delimitada pertencente ao basalto indica novamente a influência da escala pouco detalhada do mapa geológico (1:500.000).

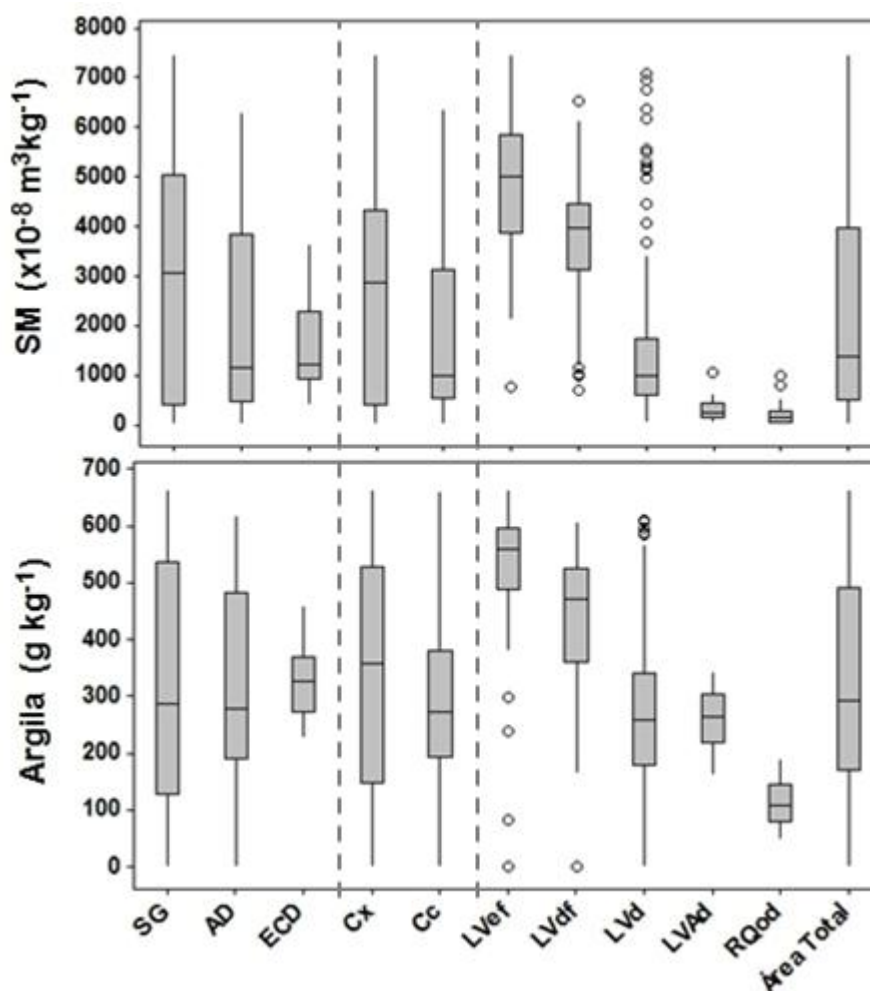


Figura 2. Gráficos boxplot dos valores de suscetibilidade magnética (SM) ($\times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$) e teor de argila (g kg^{-1}) de acordo com a geologia (SG – Basalto formação Serra Geral; ECD – Depósito Colúvio Eluvionar; AD – Depósito Aluvionar), geomorfologia (Cc – pedoforma côncava; Cx – pedoforma convexa) e pedologia (LVAd – Latossolo Vermelho Amarelo distrófico; LVd – Latossolo Vermelho distrófico; LVdf – Latossolo Vermelho distroférico; LVef – Latossolo Vermelho eutroférico; RQod – Neossolo Quartzarênico órtico distrófico). Os limites inferiores e superiores da caixa indicam o primeiro (Q1) e terceiro quartil (Q3), respectivamente; a linha no interior da caixa indica a mediana dos dados; valores maiores que $Q3 + 1,5 \times (Q3 - Q1)$ e menores que $Q1 - 1,5 \times (Q3 - Q1)$ são considerados outliers sendo identificados por círculos.

Os compartimentos geomorfológicos também influenciaram os valores de SM e teores de argila (Figura 2). A SM apresenta valores de mediana de 2878 e 995 $\times 10^{-8}$ m³ kg⁻¹ para as superfícies Cx e Cc, respectivamente. Por sua vez, os teores de argila apresentam valores de mediana de 358 e 273 g kg⁻¹ para Cx e Cc, respectivamente. Os compartimentos geomorfológicos apresentam influência indireta nos valores de SM e teor de argila, uma vez que estes influenciam o transporte de partículas nas direções horizontal, via enxurrada (Matias et al., 2014) e vertical, por lessivagem (Hanesch e Scholger, 2005). Aliado a isso, os compartimentos geomorfológicos também alteram a dinâmica de água no sistema, alterando processos de oxidação e redução responsáveis pela neoformação de minerais com maior ou menor potencial magnético (Jong et al., 2000). Entretanto, neste estudo, os valores de SM e teor de argila podem ser explicados devido a maior localização da superfície Cx sobre a geologia SG. Em regiões de transição geológica, o material de origem atua como principal fator influente nos valores de SM, uma vez que controla o conteúdo de minerais primários resistentes ao intemperismo e que permanecem no solo (ex. magnetita); além disso, coordenam a disponibilidade de ferro no solo, que por sua vez afetará a neoformação de outros minerais com expressão magnética (Hanesch e Scholger, 2005).

Ao estratificar os valores de SM e teor de argila em função das unidades de mapeamento de solos identificadas na área, verifica-se a presença de valores *outliers* em cinco unidades de solo para a SM e três unidades de solo para o teor de argila (Figura 2). Os valores *outliers* são indicativos da presença de pontos que não fazem parte da mesma população de dados que os demais. A retirada dos valores *outliers* é um procedimento comum adotado em protocolos de estimativa de parâmetros do solo (Batjes, 2002), entretanto a presença destes valores pode estar relacionada ao conceito de *taxadjunt*. Neste conceito, pédonos que não se enquadram em um determinado táxon, mas têm características similares em morfologia, composição e nas recomendações de manejo podem ser agrupados na mesma classe de solo, desde que não ultrapasse a relação 20 a 30% dos pédonos identificados na área (USDA, 1999). Considerando a baixa variabilidade vertical dos atributos diagnósticos para Latossolos (Costa et al., 1999), podemos inferir que os valores de SM e teor de argila apresentados possuam, em parte, representatividade

de horizontes pedológicos. Logo o conhecimento da variação horizontal nos horizontes superficiais pode indicar locais com maior o menor predisposição para *taxadjunt*.

Ao localizar os valores *outliers* espacialmente, observa-se que tanto os pontos destacados para a SM (Figura 3a) quanto para o teor de argila (Figura 3b) situam-se, principalmente, nas regiões de transição entre as unidades de solo. Este fato pode ser um indicativo da influência da escala do mapeamento de solos (Escala 1:12000), a qual embora seja mais detalhada que o mapa geológico também apresenta problemas no delineamento dos limites entre unidades de mapeamento. O mapa de solos é composto pela observação entre as informações geológicas locais e àquelas oriundas da paisagem (Hudson, 1992), entretanto este não apresenta informações sobre a variabilidade espacial dos atributos do solo (Rogowski & Wolf, 1994). Assim, a precisão no delineamento das unidades de mapeamento pode ser afetada. Informações sobre a presença de valores *outliers* nos limites entre as unidades de mapeamento de solos são indícios de que a continuidade espacial dos atributos do solo deva ser considerada (Siqueira et al., 2015), e podem auxiliar no refinamento do limite destas unidades. Entretanto, abordagens mais refinadas e robustas, tais como as análises geoestatísticas, devem ser preferidas para a incorporação dessas informações nos mapas de solos (Silva et al., 2014).

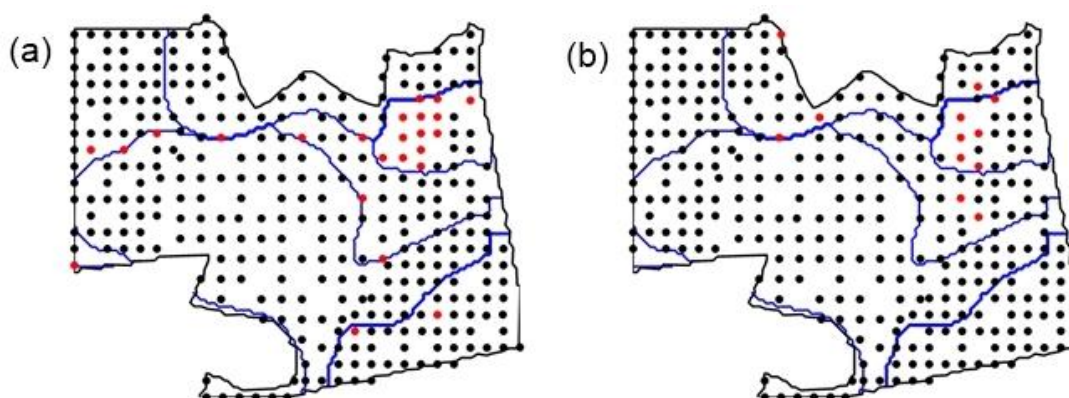


Figura 3. Identificação de amostras *outliers* em função da classe de solo. (a) valores *outliers* para a suscetibilidade magnética; (b) valores *outliers* para o teor de argila.

As estimativas dos parâmetros e modelos de variogramas ajustados aos valores de SM e teor de argila foram semelhantes (Figura 4). A semelhança entre os variogramas reflete o alto valor de correlação ($r=0,92$; $p<0,01$) encontrada para os atributos e relatada por outros autores (Siqueira et al., 2010). Os modelos esféricos, ajustados a ambos os variogramas experimentais, são utilizados para propriedades com mudanças abruptas no espaço (Isaaks & Srivastava, 1989), sendo este o principal modelo utilizado para descrever a distribuição espacial dos atributos do solo (Cambardella et al., 1994).

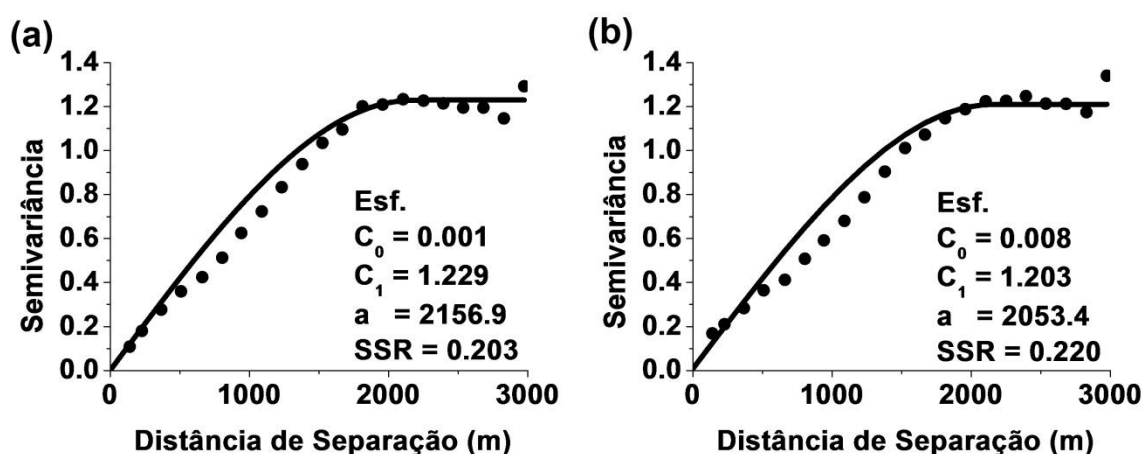


Figura 4. Modelos e parâmetros dos variogramas da suscetibilidade magnética (SM) (a) e teor de argila (b). (Esf. = modelo esférico; C_0 = efeito pepita; C_1 = contribuição; a = alcance (m); SSR = soma de quadrado dos resíduos).

As estimativas dos parâmetros dos modelos indicam, que embora pequenos, o valor de C_0 para SM ($C_0=0,001$) foi cerca de 8 vezes menor que o encontrado para o teor de argila ($C_0=0,008$). Os valores de C_0 consistem na soma das variabilidades devido a erros de medida e daquela existente em escala menor que a avaliada (Isaaks e Srivastava, 1989). Assim, o maior C_0 para o teor de argila, pode estar relacionado aos erros nos procedimentos de análises granulométricas, os quais podem variar de 15 a 32% em laboratórios brasileiros (Cambardella et al., 2006). Entretanto, ao estimarmos o grau de dependência espacial ($GDE = C_0/(C_0+C_1)$), nota-se que ambos apresentam forte dependência espacial ($GDE \leq 0,25$) (Cambardella et al., 1994), a qual está associada à fatores intrínsecos como material de origem, clima e relevo.

Os valores de alcance estimados para a SM e teor de argila foram de 2156,9 e 2053,4 m, respectivamente. Os valores de alcance indicam a máxima distância em que as amostras apresentam dependência espacial (Isaaks & Srivastava, 1989) e são utilizados como indicativos do espaçamento mínimo para futuras amostragens (Montanari et al., 2012; Marques Jr et al., 2015). Desta forma, configurações espaciais para a captação da SM e teor de argila que contemplem a componente espacial devem ser semelhantes (Siqueira et al., 2014).

Os padrões espaciais das estimativas médias (*E-type*) da SM e teor de argila, bem como as incertezas presentes nestas estimativas são apresentados na Figura 5. Novamente, verifica-se semelhança ($r=0,92$; $p<0,001$) entre os padrões espaciais da SM (Figura 5a) e teor de argila (Figura 5b). Em ambos os atributos, os maiores valores apresentam-se na porção superior direita da área em estudo, localizada principalmente sobre a geologia SG e superfície convexa. Em contrapartida, na região central da área, localizada sobre a geologia AD e formas côncavas e convexas, verifica-se que os maiores valores tendem a ser encontrados sobre a forma côncava.

Conforme discutido anteriormente, o material de origem é o principal fator influente nos valores de SM e teor de argila, entretanto quando não há variação do material de origem, as formas da paisagem passam a controlar os valores destes atributos (Hanesch e Scholger, 2005). Desta forma, é possível observar a transição entre a influência dos compartimentos em escala pouco detalhada para compartimentos em escala mais detalhadas (Miller et al., 2015). Modelos desenvolvidos em escala pouco detalhadas envolvem variações climáticas e geológicas, enquanto modelos para escalas mais detalhadas envolvem principalmente informações geomorfológicas (Fürst et al., 2010). O sentido das isolinhas dos padrões espaciais da SM e teor de argila reforça a influência da geologia e geomorfologia em mapeamento detalhados. Nota-se que tanto o valor médio quanto a incerteza são paralelos ao limite geológico com o basalto (porção superior da área). Em ambientes geológicos similares (AD-ECD) as isolinhas de variabilidade invertem o sentido ficando perpendiculares a transição geológica com basalto, mas paralelas as formas Cc e Cx (porção central da área). Esse efeito

evidência que mesmo informações geológicas pouco detalhadas, podem auxiliar na compreensão da variabilidade de maneira detalhada em regiões de transição.

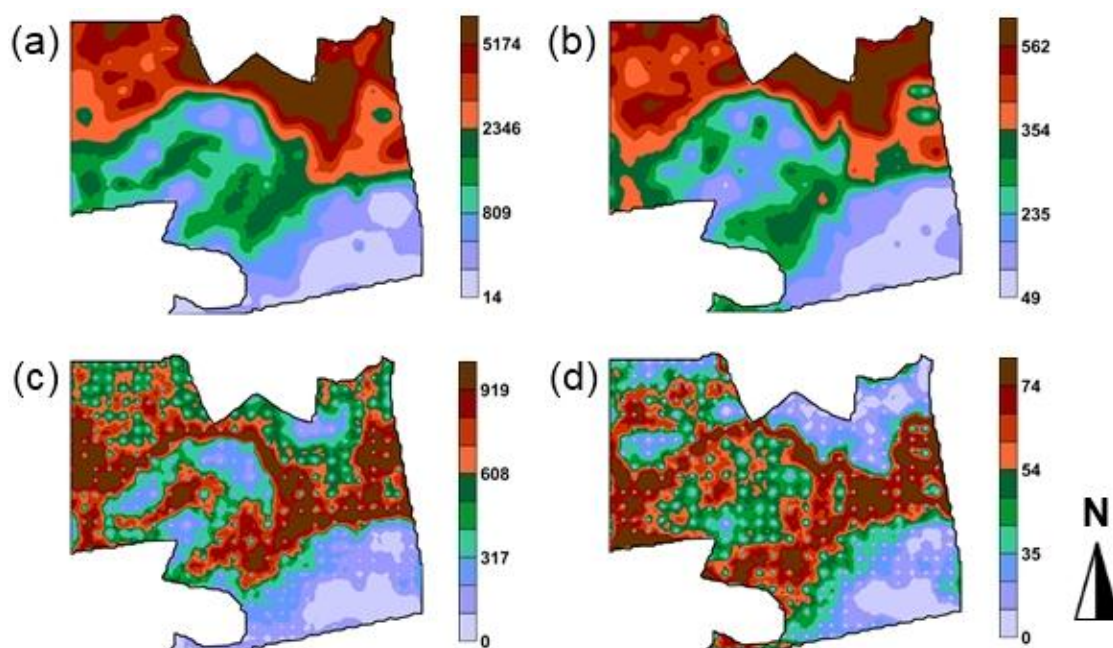


Figura 5. Padrão espacial das estimativas médias (*E-type*) da suscetibilidade magnética ($\times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$) (a) e teor de argila (g kg^{-1}) (b); e padrão espacial das incertezas expressas pelo desvio padrão das estimativas da suscetibilidade magnética ($\times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$) (c) e teor de argila (g kg^{-1}) (d)

As incertezas presentes nas estimativas da SM (Figura 5c) apresentam valores de correlação positiva ($r=0,35$; $p<0,001$) com as estimativas espaciais dos valores de SM (Figura 5a). Por outro lado, não houve correlação ($r=0,05$) observada entre as incertezas do teor de argila (Figura 5d) e suas estimativas (Figura 5b). A presença desta fraca correlação para a SM está relacionada à forte assimetria positiva observada para a variável, enquanto a ausência de correlação para o teor de argila pode ser explicada pela distribuição da variável próxima a normal (Figura 2) (Castrignanò et al., 2008). A relação entre a incerteza e a assimetria das variáveis deve-se a pouca probabilidade (alta incerteza) de se obter altos (assimetria positiva) ou baixos (assimetria negativa) valores estimados.

Outro fator que influencia os valores de incerteza é a densidade amostral utilizada (Grunwald et al., 2007). Assim, espera-se que locais com menor densidade amostral apresentem maior incerteza nas estimativas realizadas (Delbari et al., 2009; Teixeira et al., 2012). Embora, neste estudo, tenha sido utilizada uma amostragem

irregular com espaçamento ligeiramente superior na porção central da área (173 m) em relação às laterais (150 m), o efeito da amostragem não foi verificado. Desta forma um terceiro fator influente nas incertezas espaciais (presença de transições entre compartimentos com distintas variabilidades) deve ser o predominante na área em estudo.

Diferentes geologias (Hanesch et al., 2007; Preetz et al., 2008), formas da paisagem (Siqueira et al., 2010; Camargo et al., 2014) e unidades de solos (Hanesch e Scholger, 2005; Hanesch et al., 2007; Siqueira et al., 2014) apresentam diferentes valores médios com distintos potenciais de variação dos atributos do solo, principalmente para aqueles atributos covariativos dos fatores e processos de formação do solo, como a SM e o teor de argila. Assim, é de se esperar, que ao estudar as incertezas em uma área com diferentes compartimentos, cada um apresente uma incerteza global distinta, relacionada à sua variabilidade natural (Castrignanò et al., 2008). Entretanto, em regiões com transições abruptas entre materiais de origem, formas da paisagem e/ou unidades de solo contrastantes, como no caso em estudo, espera-se que haja uma maior incerteza nas estimativas da região de intersecção destes compartimentos. Assim, os compartimentos presentes na área e, principalmente, a transição entre eles contemplam o terceiro fator de influência nas incertezas espaciais.

Os padrões espaciais das incertezas da SM e teor de argila apresentaram alta correlação positiva ($r=0,706$; $p<0,001$), demonstrando que fatores comuns (transição entre compartimentos) são responsáveis pela intensidade das incertezas em ambos atributos. Esta associação pode ser atribuída a intemperização do solo e a presença de ferro na constituição do material de origem, o que favorece a formação conjunta da fração argila e dos óxidos de ferro com potencial de expressão magnética (Hanesch e Scholger, 2005). Para ambos os atributos, as regiões de maiores incertezas foram aquelas em que se observaram as transições entre as geologias e formas do relevo. Estas regiões coincidem com a região de transição entre as unidades de solo (Figura 1d). Este é um primeiro indício de que as incertezas de atributos covariativos dos fatores e processo de formação do solo podem ser utilizadas na identificação dos limites entre unidades de mapeamento (Odgers et al., 2015).

Os valores médios (*E-type*) e das incertezas (desvio padrão) das estimativas na transeção delineada na área são apresentados na Figura 6. A presença de valores de picos das incertezas da SM (Figura 6a) e teor de argila (Figura 6b) em locais próximos a região de transição entre as unidades de mapeamento, confirma a hipótese de que os mapas das incertezas espaciais podem ser utilizados no delineamento destas unidades. Por outro lado, no geral, não são observadas mudanças nos valores médios dos atributos do solo próximo as estas transições. Embora o teor de argila seja utilizado como atributo diagnóstico do solo, os limites utilizados para a definição das unidades são arbitrários (Phillips, 2013), não apresentando nenhuma relação com a variabilidade de cada classe ou continuidade espacial do atributo. Por outro lado, os limites das incertezas incorporam a variabilidade inerente em cada unidade de mapeamento delineada (Odgers et al., 2015). Em adição, observa-se a presença de outros picos (Figura 6), além dos representativos da transição entre unidades de solo, os quais poderiam ser utilizados para refinar o mapa de unidades de solo previamente elaborado e não somente promover uma readequação de seus limites.

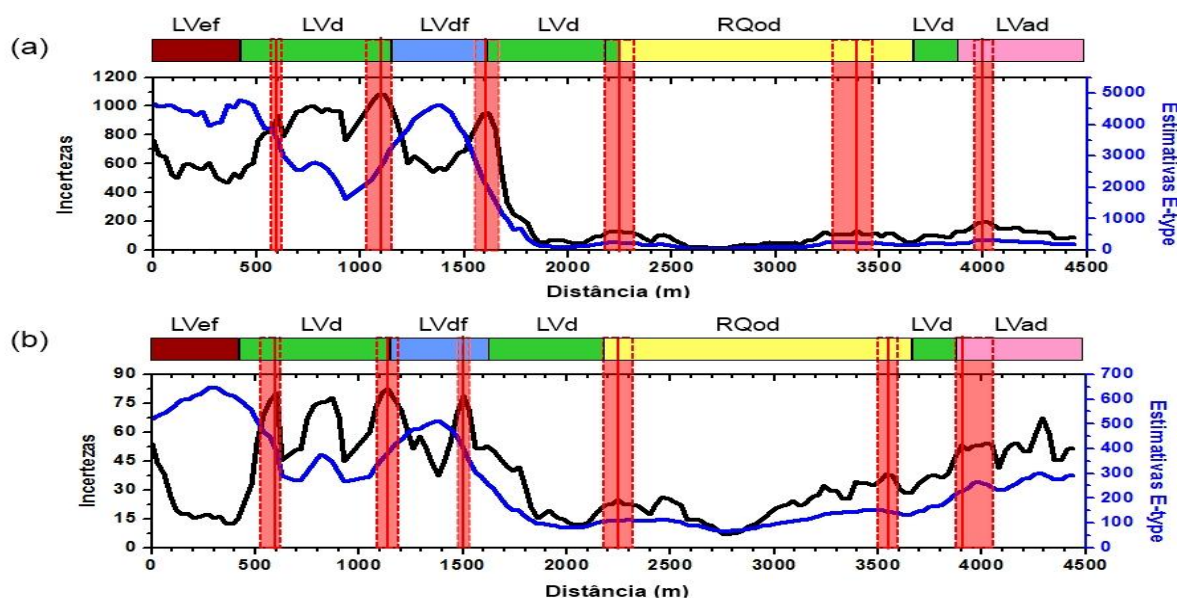


Figura 6. Valores de incertezas (desvio padrão) (—) e das estimativas E-type (médias) (—) ao longo da transeção amostral para a suscetibilidade magnética (SM) ($\times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$) (a) e teor de argila (g kg^{-1}) (b). A linha vermelha contínua (—) indica o limite entre unidades de mapeamento identificados por meio das incertezas, enquanto a linha vermelha tracejada (---) e a região demarcada em vermelho identificam a zona de incertezas.

Os valores de incerteza, expressos pelo desvio padrão dos valores estimados, entre as zonas de incerteza representam a incerteza inerente de cada unidade de mapeamento. Unidades com maior incerteza necessitam de maior número de amostras para a sua correta caracterização e/ou compreensão do fenômeno em estudo (Cambule et al., 2014; Viscarra et al., 2014; Silva et al., 2015; Odgers et al., 2015). Os teores de argila apresentam uma maior variação das incertezas dentro de cada unidade, quando comparado a SM.

A amplitude das zonas de incerteza encontradas para a SM foram de 45 m (LVef / LVd), 130 m (LVd / LVdf), 90 m (LVdf / LVd), 100 m (LVd / RQod), 210 m (RQod / LVd) e 100 m (LVd / LVAd). Para o teor de argila as amplitudes das zonas de incerteza foram de 70 m (LVef / LVd), 100 m (LVd / LVdf), 60 m (LVdf / LVd), 130 m (LVd / RQod), 90 m (RQod / LVd) e 170 m (LVd / LVAd) (Figura 6 a,b). Entretanto, para ambos os atributos estudados, estas amplitudes apresentam variação lateral (Figura 7). Regiões com maior amplitude de incertezas apresentam maior probabilidade de equívoco no delineamento do perímetro e ocorrência do “*taxadjunt*”. Regiões com transições geológicas e geomorfológicas apresentam uma maior amplitude, devido a maior complexidade do ambiente. Estas regiões contemplam as principais diferenças entre os mapas de unidade de mapeamento e zonas de incerteza proposto com base na SM e no teor de argila.

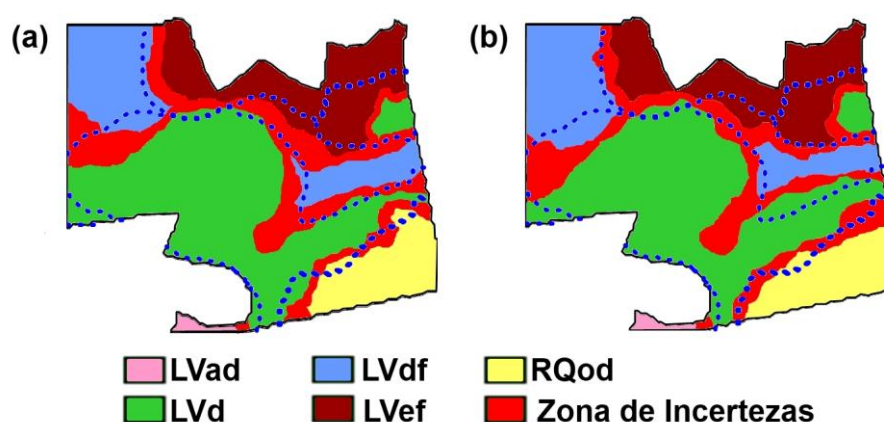


Figura 7. Mapa das unidades de mapeamento propostas com base nas incertezas da suscetibilidade magnética (a) e teor de argila (b). A linha tracejada (---) indica os limites entre as unidades previamente delineadas de forma convencional.

As zonas de incerteza identificadas com base na SM (Figura 6a) contemplam 03 das 06 transições das unidades de solo, sendo duas (LVd / LVdf e LVdf / LVd) presentes em solos sob basalto. As zonas de incerteza baseadas no teor de argila também contemplam três transições entre as unidades de solo, sendo duas (LVd / RQod e LVd / LVad) presentes em solos sobre material de origem deposicional (Deposito Aluvionar). Desta forma, em regiões sobre o domínio do basalto, a SM capta melhor as transições entre as unidades de solo, enquanto em regiões cujo solo apresenta origem deposicional o teor de argila apresenta resultados mais próximos aos delineados pelo mapeador. O teor de argila expressa a quantidade presente da fração argila, enquanto a SM pode ser considerada uma medida da qualidade da fração argila, uma vez que é resultante principalmente dos minerais presentes nessa fração (Siqueira et al., 2014).

Ao se comparar as zonas de incertezas de ambos os atributos, verifica-se que estas se sobrepõem. Assim, ambos os atributos podem ser utilizados para a redefinição ou identificação dos limites das unidades de mapeamento do solo. Entretanto, devido a SM ser de fácil e rápida obtenção e de não gerar resíduos químicos durante sua determinação (Dearing, 1994), esta se apresenta como principal opção na determinação das unidades de mapeamento segundo as incertezas espaciais das estimativas.

As zonas de transição extrapoladas lateralmente seguem a mesma orientação dos limites identificados previamente pelo mapa de unidades de solo (Figura 7). As principais diferenças identificadas concentram-se no aumento da área da unidade LVef em detrimento a redução da unidade de solo LVd (porção superior do mapa) e, na redução da área representada pela unidade de solo LVad. Estas mudanças estão de acordo com a presença de valores *outliers* identificados em cada unidade de solo (Figura 3). Assim, nota-se que com a readequação dos limites propostos com base nas incertezas, as amostras de solo que apresentavam valores *outliers* passaram a integrar as unidades de solo adjacentes ou a zona de incerteza.

A delimitação das unidades de mapeamento com base nas incertezas permite a identificação de solos com maior ou menor incerteza auxiliando em futuros estudos sobre o planejamento estratificado de amostras de solos (Siqueira et al., 2014). Regiões com alta amplitude da zona de incerteza podem ser amostradas

intensamente visando à diminuição da mesma. Entretanto, vale ressaltar que mesmo após a re-amostragem sempre haverá uma zona de incerteza devido à complexidade do ambiente nas regiões de transição entre unidades de solos, conforme relatado por Bazaglia Filho et al. (2013) e Nanni et al. (2014). O conhecimento das incertezas dos atributos do solo também pode ser utilizado para o delineamento de zonas de manejo, sendo as áreas pertencentes à zona de incertezas utilizadas como áreas de tráfego de veículos e manobras, evitando assim a necessidade da determinação de manejos em regiões altamente variáveis. A redefinição dos talhões com base na variabilidade e delineamento das faixas de incerteza pode aumentar a capacidade operacional, uma vez que o talhão pode ser estendido no sentido da mínima variabilidade e mínima incerteza, proporcionando maior eficiência nas manobras e diminuição no tempo de percurso da máquina.

O protocolo desenvolvido neste estudo demonstra a utilização das incertezas para a readequação das unidades de mapeamento, uma vez que parte-se do conhecimento prévio sobre uma primeira aproximação do mapa de unidades de solo delineado de forma convencional. Entretanto, este protocolo também pode ser utilizado para a identificação das unidades de mapeamento em áreas em que não haja conhecimento prévio. Para tal, após a determinação das incertezas presentes nas estimativas espaciais, o mapeador experiente definiria as linhas de incerteza correspondentes às zonas de transição entre as unidades de mapeamento (Odgers et al., 2015). Uma vez delineadas, torna-se possível a identificação de locais para a definição dos pédonos modais referentes a cada unidade de mapeamento. Este tipo de abordagem possibilita a economia de tempo e recursos (Bazaglia Filho et al., 2013), muitas vezes viabilizando o mapeamento de grandes áreas.

Outra vantagem da delimitação das unidades de mapeamento utilizando as incertezas espaciais dos atributos do solo é a incorporação da variabilidade espacial dos atributos do solo no mapa final (Odgers et al., 2015; Silva et al., 2015). Em adição, ao mesmo tempo em que os mapas de solos apresentam uma carência de informações sobre a variabilidade espacial dos atributos do solo, estes também apresentam uma carência de informações sobre a variabilidade temporal dos mesmos (Rogowski & Wolf, 1994; Grunwald et al., 2011). Neste sentido a escolha do

atributo para a delimitação das unidades de mapeamento pode auxiliar nesta demanda.

A SM além de apresentar variabilidade espacial, também apresenta variabilidade temporal (Maher et al., 2003). A componente temporal está relacionada a dois períodos (Hanesch e Scholger, 2005): (i) curto período, no qual é influenciada pelo transporte de partículas do solo devido à erosão ou lessivagem e pelo manejo do solo que pode influenciar a neoformação de minerais; e, (ii) em longo período, sendo influenciada pelas características do ambiente devido a dinâmica da água no sistema que influencia os processos de oxidação e redução. Por outro lado, o teor de argila apresenta apenas uma componente temporal de curto período devido ao carreamento de partículas. Assim, pode-se afirmar que a incorporação das incertezas dos mapas da SM no delineamento das unidades de mapeamento do solo podem suprir as necessidades atuais da área de pesquisa (Brevik et al., 2015), incorporando informações sobre as variabilidades espaciais e temporais dos atributos do solo no delineamento das unidades de mapeamento.

3.4 Conclusões

A incorporação das informações dos mapas das incertezas da SM e teor de argila no delineamento de unidades de mapeamento permite a incorporação das informações sobre a variabilidade espacial dos atributos do solo ao mapa delineado. A utilização das incertezas de ambos os atributos resultam em unidades de mapeamento similares, entretanto a facilidade, rapidez e baixo custo na obtenção da suscetibilidade magnética faz com que esta seja a principal alternativa para a incorporação das incertezas espaciais nos mapas de unidades de mapeamento.

O protocolo desenvolvido neste estudo, além de possibilitar a incorporação dos componentes espaciais no delineamento das unidades de mapeamento, permite a identificação das regiões mais adequadas para a determinação do pédon modal, regiões com maior necessidade de amostragem e definição de zonas de manejo identificando as áreas mais adequadas à utilização para tráfego de veículos e manobras de máquinas agrícolas.

3.5 Referências

- Batjes, N.H., 2002. Soil parameter estimates for the soil types of the world for use in global and regional modeling. ISRIC Report 2002/02c, Version 2.1. 52 p.
- Bazaglia Filho, O., Rizzo, R., Lepsch, I.F., Prado, H., Gomes, F.H., Mazza, J.A., Demattê, J.A.M., 2013. Comparison between detailed digital and conventional soil maps of an area with complex geology. *R. Bras. Ci. Solo* 37, 1136-1148.
- Brevik, E.C.; Calzolari, C.; Miller, B.A.; Pereira, P.; Kabala, C.; Baumgarten, A.; Jordán, A. Soil mapping, classification, and pedologic modeling: History and future directions. *Geoderma*, 2015. (In press).
- Camargo, L.A., Marques Jr, J., Pereira, G.T, Bahia, A.S.R.S., 2014. Clay mineralogy and magnetic susceptibility of Oxisols in geomorphic surfaces. *Sci. Agric.* 71, 244-256.
- Cambardella, C.A., Moorman, T.B., Novak, J.M., Parkin, T.B., Karlen, D.L., Turco, R.F., Konopka, A.E., 1994. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58, 1501-1511.
- Cambule, A.H., Rossiter, D.G., Stoorvogel, J.J., Smaling, E.M.A., 2014. Soil organic carbon stocks in the Limpopo National Park, Mozambique: Amount, spatial distribution and uncertainty. *Geoderma* 213, 46-56.
- Cantarella, H., Quaggio, J.A., van Raij, B., Abreu, M.F., 2006. Variability of soil analysis in commercial laboratories: implications for lime and fertilizer recommendations. *Commun. Soil Sci Plan.* 37, 2213-2225.
- Castrignano, A., Buttafuoco, G., Canu, A., Zucca, C., Madrau, S., 2008. Modelling spatial uncertainty of soil erodibility factor using joint stochastic simulation. *Land Degrad. Develop.* 19, 198-213.
- Costa, A.C.S., Bigham, J.M., Rhoton, F.E., Traina, S.J., 1999. Quantification and characterization of maghemite in soils derived from volcanic rocks in southern Brazil. *Clay. Clay. Miner.* 4, 466-473.
- Dearing, J.A., 1994. Environmental magnetic susceptibility. Using the Bartington MS2 System, British Library, England (104 pp.).

- Delbari, M., Afrasiab, P., Loiskandl, W., 2009. Using sequential Gaussian simulation to assess the field-scale spatial uncertainty of soil water content. *Catena* 79, 163-169.
- Deutsch, C.V., Journel, A.G. 1998. *GSLIB: Geostatistical Software Library: and User's Guide*, second ed. Oxford University Press, New York. 369 p.
- EMBRAPA, 1995. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Normative Procedures for Soil Surveys. Embrapa, Brasília. (in Portuguese)
- EMBRAPA, 1997. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual of soil analysis methods. Embrapa, Rio de Janeiro. (in Portuguese)
- Fürst, C., Zirlewagen, D., Lorz, C., 2010. Regionalization of Magnetic Susceptibility Measurements Based on a Multiple Regression Approach. *Water Air Soil Poll.* 208, 129–151.
- GEOBANK, 2014. Serviço Geológico do Brasil – CPRM. Available in <http://geobank.sa.cprm.gov.br/> (Accessed at: 04/15/2014. (in Portuguese))
- Grunwald, S., Thompson, J.A., Boettinger, J.L., 2011. Digital Soil Mapping and Modeling at Continental Scales: Finding Solutions for Global Issues. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 75, 1201-1213.
- Grunwald, S., Reddy, K.R., Prenger, J.P., Fisher, M.M., 2007. Modeling of the spatial variability of biogeochemical soil properties in a freshwater ecosystem. *Ecol. Model.* 201, 521-535.
- Hanesch, M., Rantitsch, G., Hemetsberger, S., Scholger, R., 2007. Lithological and pedological influences on the magnetic susceptibility of soil: Their consideration in magnetic pollution mapping. *Sci. Total Environ* 382, 351-363.
- Hanesch, M., Scholger, R., 2005. The influence of soil type on the magnetic susceptibility measured throughout soil profiles. *Geophys. J. Int.* 161, 50–56.
- Hengl, T., Jesus, J.M., Macmillan, R.A., Batjes, N.H., Heuvelink, G.B.M., Ribeiro, E., Samuel-Rosa, A., Kempen, B., Leenaars, J.G.B., Walsh, M.G., Gonzalez, M.R., 2014. SoilGrids1km — Global Soil Information Based on Automated Mapping. *PLoS ONE* 9(8), e105992. doi:10.1371/journal.pone.0105992

- Hudson, B.D., 1992. The Soil Survey as Paradigm-Based Science. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56, 836-841.
- Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), 1981. Geomorphological Map of the State of São Paulo (94 pp. (in Portuguese))
- Isaaks, E.H., Srivastava, R.M., 1989. Applied geostatistics. Nova York: Oxford University Press. 561 p.
- Jong, E., Nestor, P.A., Pennock, D.J., 1998. The use of magnetic susceptibility to measure long-term soil redistribution. *Catena* 32, 23-35.
- Jong, E., Pennock, D.J., Nestor, P.A., 2000. Magnetic susceptibility of soils in different slope positions in Saskatchewan, Canada. *Catena* 40, 291–305.
- Legros, J.P., 2006. Mapping of the soil (411 pp.)
- Maher, B.A., Alekseev, A., Alekseeva, T., 2003. Magnetic mineralogy of soils across the Russian Steppe: climatic dependence of pedogenic magnetite formation. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol.* 201, 321-341.
- Marques Jr., J., Siqueira, D.S., Camargo, L.A., Teixeira, D.D.B., Barron, V., Torrent, J., 2014. Magnetic susceptibility and diffuse reflectance spectroscopy to characterize the spatial variability of soil properties in a Brazilian Haplustalf. *Geoderma* 219-220, 63-71.
- Marques Jr., J., Alleoni, L.R.F., Teixeira, D.D.B., Siqueira, D.S., Pereira, G.T., 2015. Sampling planning of micronutrients and aluminium of the soils of São Paulo, Brazil. *Geoderma Regional* 4, 91-99.
- Matias, S.S.R., Marques Jr., J., Siqueira, D.S., Pereira, G.T., 2014. Outlining precision boundaries among areas with different variability standards using magnetic susceptibility and geomorphic surfaces. *Eng. Agric.* 34, 695-706.
- Miller, B.A., Koszinski, S., Wehrhan, M., Sommer, M., 2015. Impact of multi-scale predictor selection for modeling soil properties. *Geoderma* 239-240, 97-106.
- Montanari, R., Souza, G.S.A., Pereira, G.T., Marques Jr., J., Siqueira, D.S., Siqueira, G.M. 2012. The use of scaled semivariograms to plan soil sampling in sugarcane fields. *Precis. Agric.* 13, 01-11.
- Nanni, M.R., Dematte, J.A.M., Silva Jr., C.A., Romagnoli, F., Silva, A.A., Cezar, E., Gasparotto, A.C., 2014. Soil Mapping by laboratory and orbital spectral sensing compared with a traditional method in a detailed level. *J. Agron.* 13, 100-109.

- Odgers, N.P., McBratney, A.B., Minasny, B., 2015. Digital soil property mapping and uncertainty estimation using soil class probability rasters. *Geoderma* 237-238, 190-198.
- Phillips, J.D., 2013. Evaluating taxonomic adjacency as a source of soil map uncertainty. *Eur. J. Soil Sci.* 64, 391-400.
- Prado, H., 2013. *Pedology – Applications for Tropical Soils*. Piracicaba: Produção independente. 284 p. (in Portuguese)
- Preetz, H., Altfelder, S., Igel, J., 2008. Tropical Soils and Landmine Detection – An Approach for a Classification System. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72, 151-159.
- Rogowski, A.S., Wolf, J.K. 1994. Incorporating Variability into Soil Map Unit Delineations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58,163-174.
- Schwertmann, U. 1985. The effect of environments on iron oxide minerals. *Adv. Soil Sci.* 1, 172-200.
- Silva, A.F., Pereira, M.J., Carneiro, J.D., Zimback, C.R.L., Landim, P.M.B., Soares, A., 2014. A new approach to soil classification mapping based on the spatial distribution of soil properties. *Geoderma* 219–220, 106–116.
- Silva, A.F., Pereira, M.J., Zimback, C.R.L., Landim, P.M.B., Soares, A., 2015. Sequential simulation of diagnostic soil attributes. *R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental* 19, 418-425. (in Portuguese)
- Siqueira, D.S., Marques Jr, J., Matias, S.S.R., Barrón, V., Torrent, J., Baffa, O., Oliveira, L.C., 2010. Correlation of properties of Brazilian Haplustalfs with magnetic susceptibility measurements. *Soil Use Manage.* 26, 425–431.
- Siqueira, D.S., Marques Jr, J., Pereira, G.T., Teixeira, D.D.B., Vasconcellos, V., Carvalho Jr., O., Martins, E., 2015. Detailed mapping unit design based on soil-landscape relation and spatial variability of magnetic susceptibility and soil color. *Catena* (In Press).
- Siqueira, D.S., Marques Jr., J., Pereira, G.T., Barbosa, R.S., Teixeira, D.D.B., Peluco, R.G., 2014. Sampling density and proportion for the characterization of the variability of Oxisol attributes on different materials. *Geoderma* 232–234, 172–182.

- Teixeira, D.D.B., Bicalho, E.S., Panosso, A.R., Perillo, L.I., Iamaguti, J.L., Pereira, G.T., La Scala Jr., N., 2012. Uncertainties in the prediction of spatial variability of soil CO₂ emissions and related properties. *R. Bras. Ci. Solo* 36, 1466-1475.
- USDA, Soil Survey Staff., 1999. *Soil Taxonomy: A basic system of soil classification of making and interpreting soil surveys*. 2.ed. Washington, USDA-Natural Resources Conservation Service, 869p.
- Vasconcelos, V., Carvalho Jr, O.A., Martins, E.S., Couto Jr., A.F., Guimaraes, R.F., Gomes, R.A.T., 2012. Geomorphometric classification system based on a two-stage sequential architecture: decision tree and spectral classifier, in the Serra da Canastra national park. *Rev. Bras. Geomorf.* 13, 171-186. (in Portuguese)
- Viscarra-Rossel, R.A., Webster, R., Bui, E.N., Baldock, J.A., 2014. Baseline map of organic carbon in Australian soil to support national carbon accounting and monitoring under climate change. *Glob. Change Biol.* 20, 2953–2970.
- Zhu, A.X., 1997. Measuring uncertainty in class assignment for natural resource maps under Fuzzy logic. *Photogramm. Eng. Rem. S.* 63, 1195-1202.

CAPÍTULO 4 – Considerações finais

Nos capítulos anteriores são discutidas e apresentadas técnicas de mapeamento híbrido. Estas consistem na união de mapeamentos livres, categóricos e por similaridade entre pédonos, com os mapeamentos utilizando-se técnicas matemáticas como as análises geoestatísticas e lógica Fuzzy.

No segundo capítulo, foram utilizadas informações categóricas (geologia, geomorfologia e pedologia) para auxiliar na determinação do planejamento amostral de atributos do solo, com base nas análises geoestatísticas. Embora o estudo do planejamento amostral seja amplamente conduzido por diversos trabalhos, a evolução da proposta está relacionada à utilização de informações prévias disponibilizadas gratuitamente para a redução da densidade amostral requerida para a caracterização espacial dos atributos do solo. Apesar dos excelentes resultados encontrados por meio do uso dos mapas geológicos e geomorfológicos, verificou-se que os mapas de solos não contribuíram para a diminuição da densidade amostral requerida. Tais resultados foram explicados devido aos mapas de solo não contemplarem informações sobre a variabilidade espacial dos atributos do solo. Assim, estes resultados nos motivaram a desenvolver o terceiro capítulo.

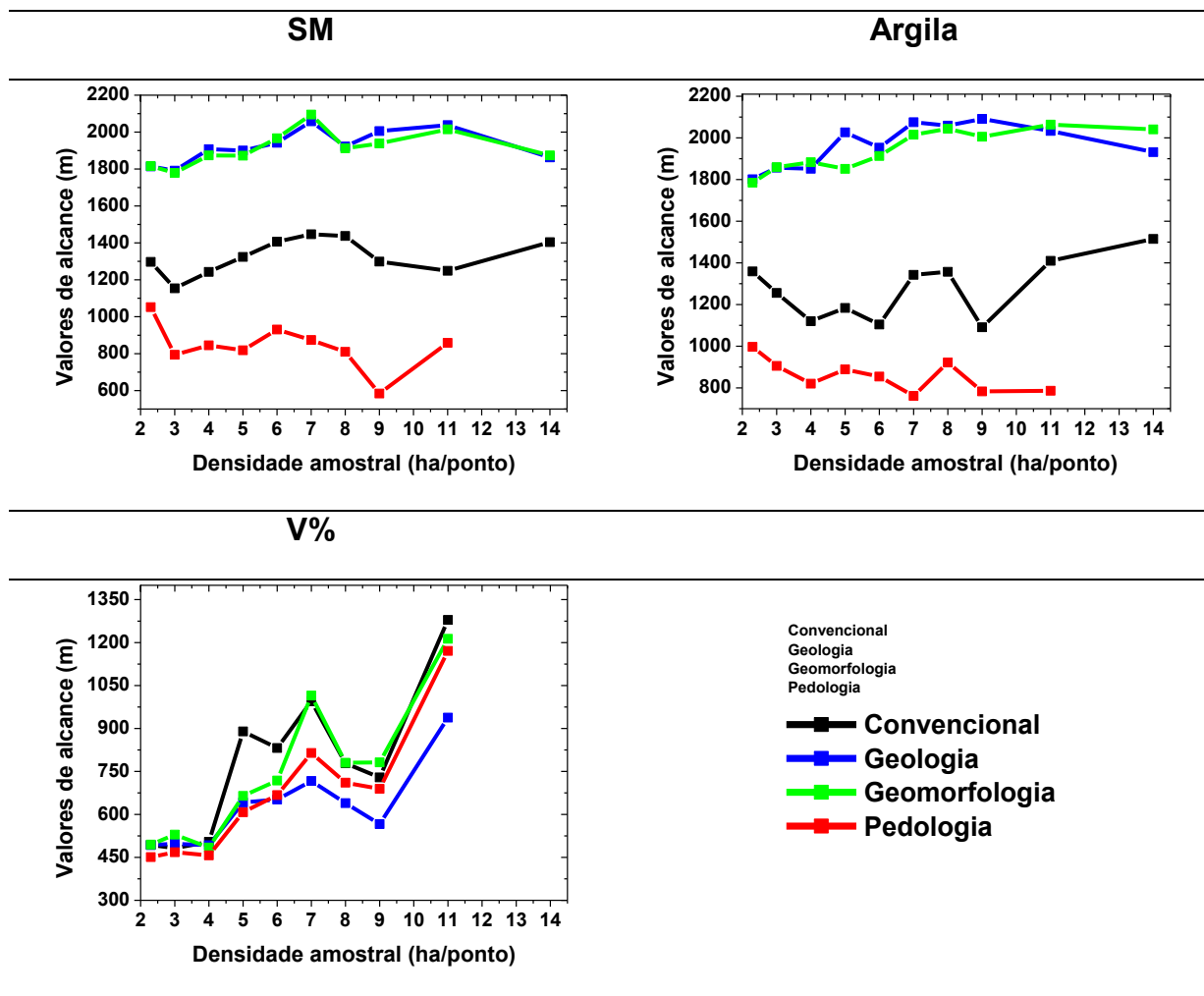
No terceiro capítulo é proposta a incorporação das informações da variabilidade espacial dos atributos do solo aliado a suas incertezas para a readequação e delineamento das unidades de mapeamento. Agronomicamente, os resultados obtidos neste capítulo podem auxiliar no refinamento dos mapas de ambientes de produção, utilizados pela indústria sucroenergética. Pedologicamente, a metodologia proposta pode indicar os locais mais adequados para a determinação dos pédonos modais e das amostragens para a caracterização dos solos.

Assim, ambos os capítulos mencionados acima, demonstram que a utilização conjunta das técnicas de mapeamento possibilitam a obtenção de resultados inovadores. No geral, as técnicas de mapeamento híbrido são empregadas visando apenas a obtenção de mapa de atributos detalhados utilizando conhecimentos sobre a relação solo-paisagem. Entretanto, o caminho inverso também pode ser conduzido conforme discutido no terceiro capítulo. Esta abordagem além de possibilitar a readequação de mapas categóricos e definição de unidades de mapeamento

também pode ser utilizada para auxiliar no planejamento agrícola e industrial de matrizes sucroenergéticas.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Valores de alcance dos variogramas (m) em função da densidade amostral e da utilização das informações secundárias (geologia, geomorfologia, pedologia).



4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14

Densidade amostral (ha/ponto)

APÊNDICE B – Padrão espacial dos atributos do solo em função das densidades amostrais e da utilização das informações secundárias geológicas, geomorfológicas e pedológicas.

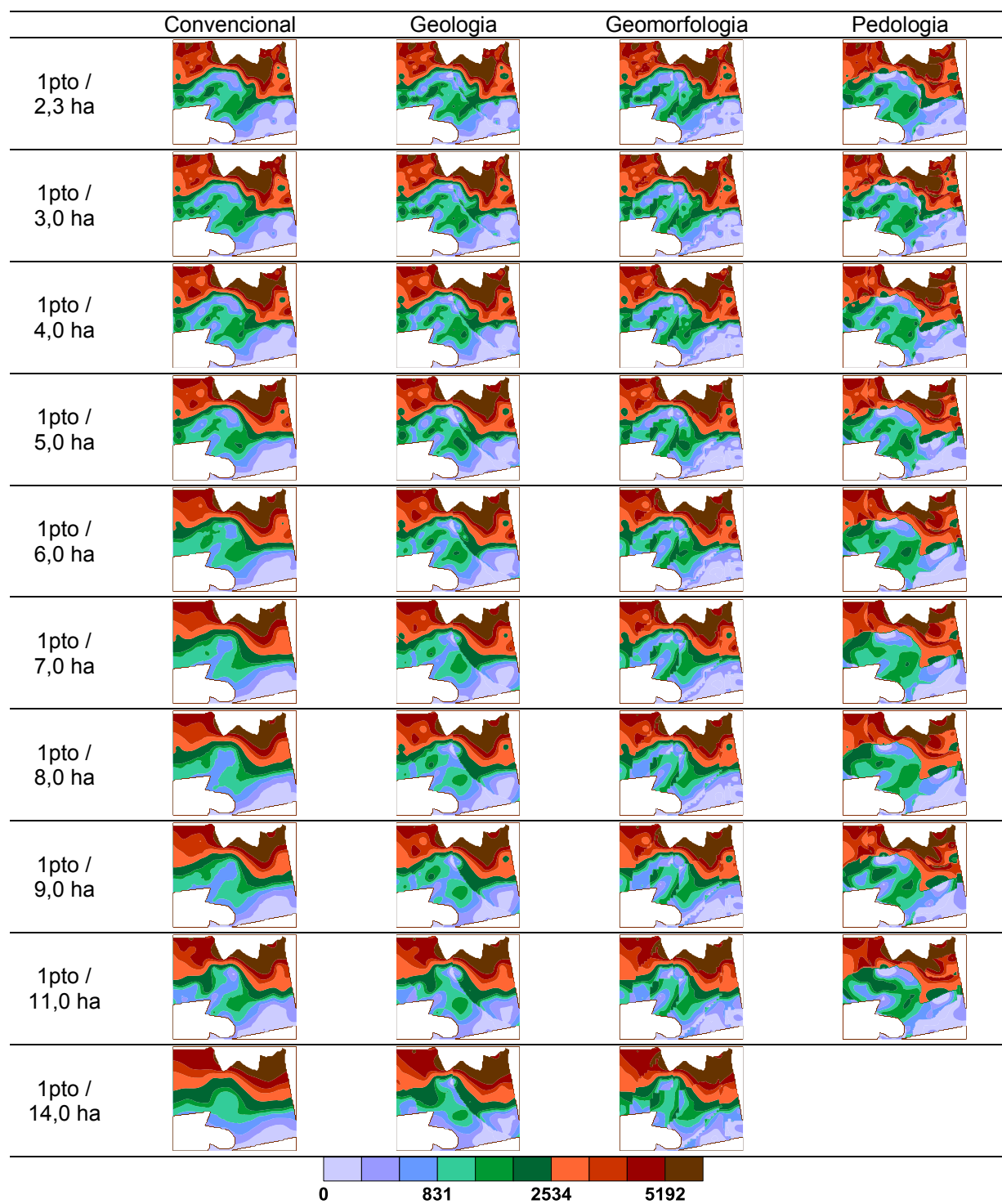


Figura 1. Padrão espacial da suscetibilidade magnética ($\times 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$).

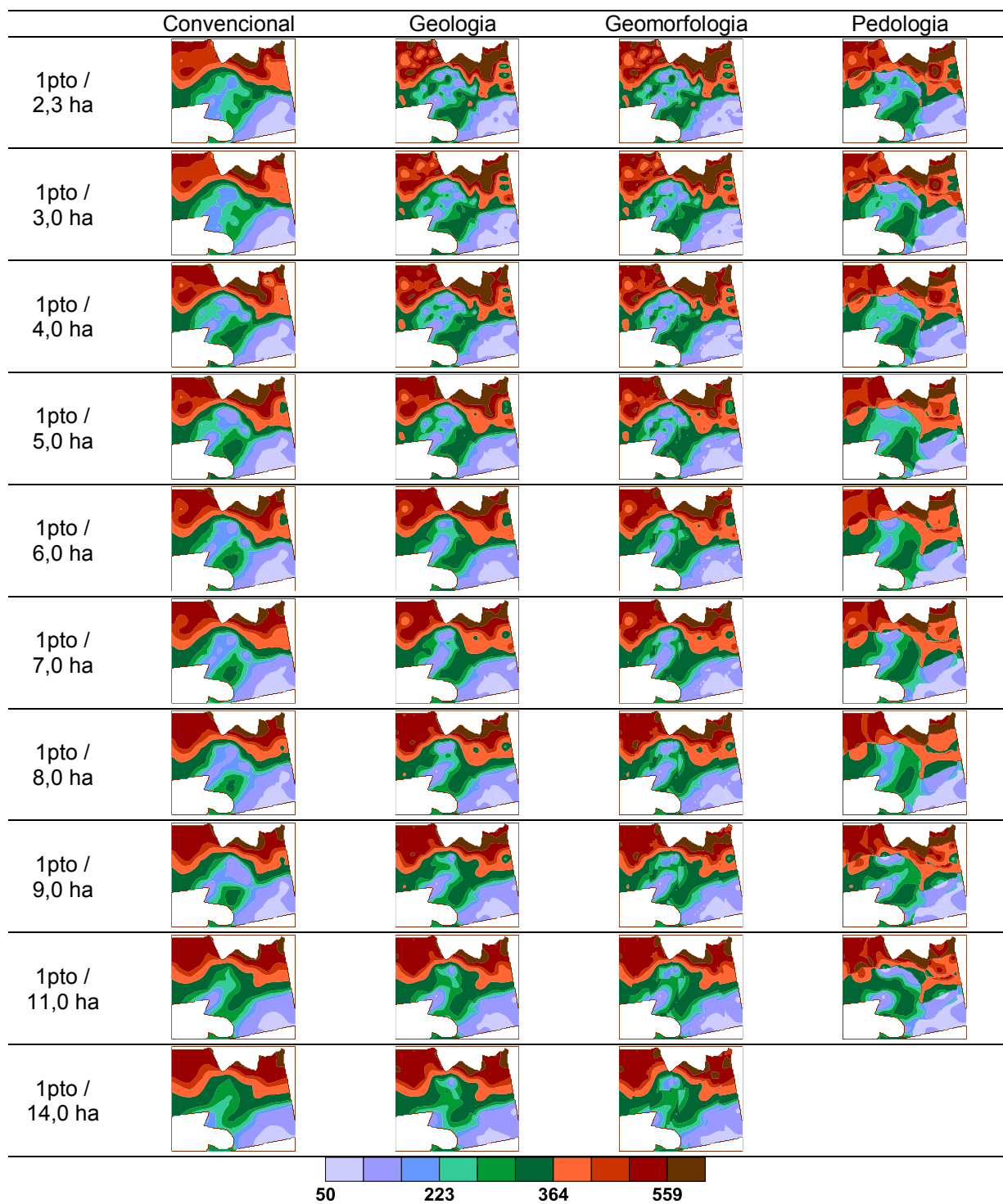


Figura 2. Padrão espacial do teor de argila (g kg^{-1}).

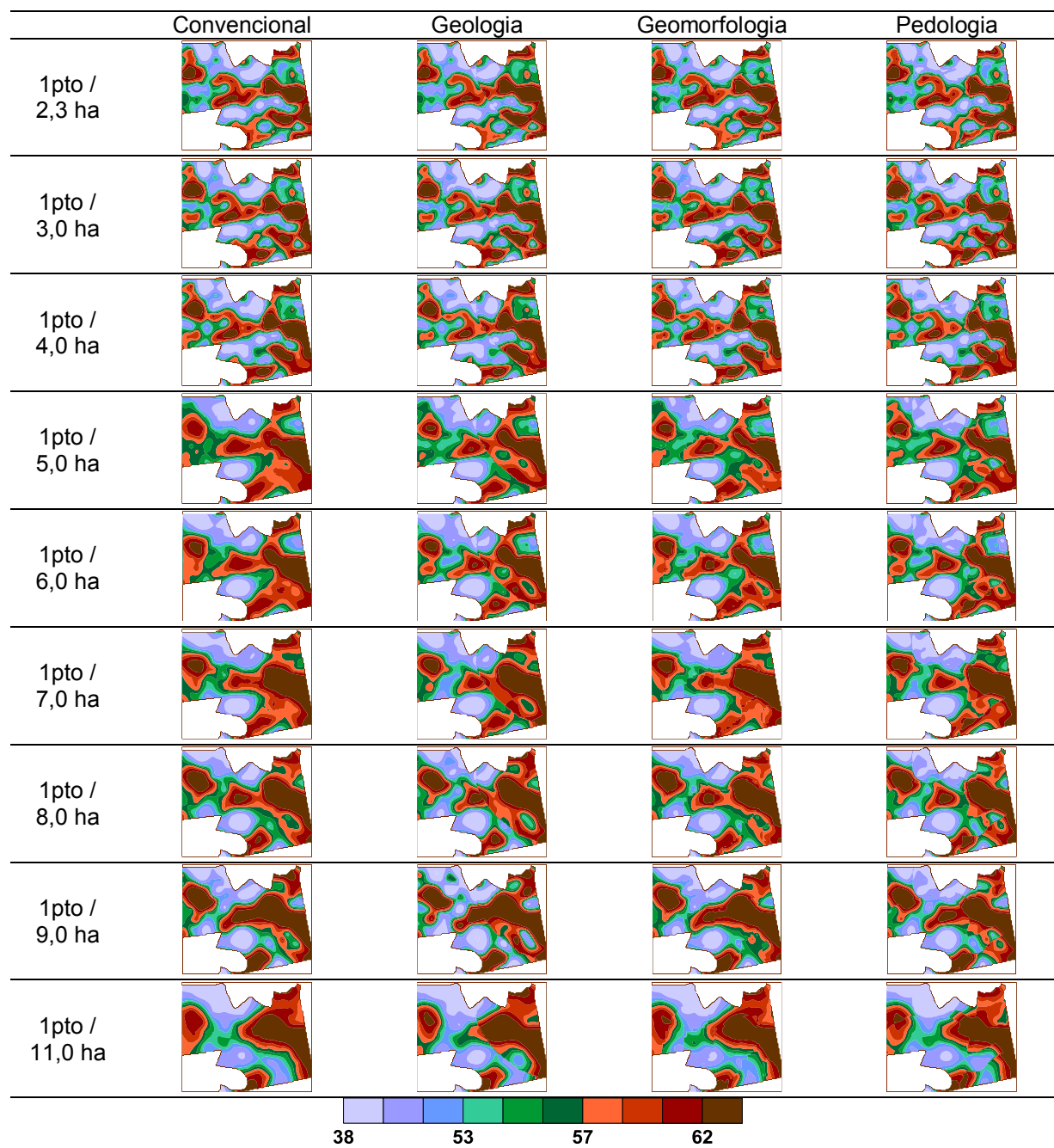


Figura 3. Padrão espacial da saturação por bases (%).