

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

**MAPEAMENTO DE ATRIBUTOS E PLANEJAMENTO
AMOSTRAL PARA LATOSSOLOS UTILIZANDO
SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA,
COR E RELAÇÃO SOLO-PAISAGEM**

Diego Silva Siqueira
Engenheiro Agrônomo

2013

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP

CÂMPUS DE JABOTICABAL

**MAPEAMENTO DE ATRIBUTOS E PLANEJAMENTO
AMOSTRAL PARA LATOSSOLOS UTILIZANDO
SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA,
COR E RELAÇÃO SOLO-PAISAGEM**

Diego Silva Siqueira

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).

2013

Siqueira, Diego Silva
S618d Mapeamento de atributos e planejamento amostral para Latossolos utilizando suscetibilidade magnética, cor e relação-paisagem / Diego Silva Siqueira. -- Jaboticabal, 2013
xix, 109 f. : il. ; 28 cm

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2013
Orientador: José Marques Júnior
Banca examinadora: Elpídio Inácio Fernandes Filho, José Alexandre Melo Demattê, Ricardo Simão Diniz Dalmolin, Zigomar Menezes de Souza

Bibliografia

1. Levantamento de solo. 2. Unidade de mapeamento. 3. Espectroscopia de reflectância difusa. 4. Geoestatística. 5. Mapeamento detalhado. 6. Manejo da 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

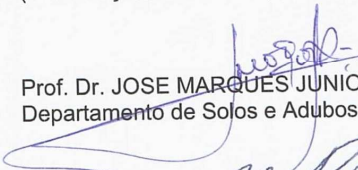
TÍTULO: MAPEAMENTO DE ATRIBUTOS E PLANEJAMENTO AMOSTRAL PARA LA
TOSSOLOS UTILIZANDO SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA, COR E RE
LAÇÃO SOLO-PAISAGEM

AUTOR: DIEGO SILVA SIQUEIRA

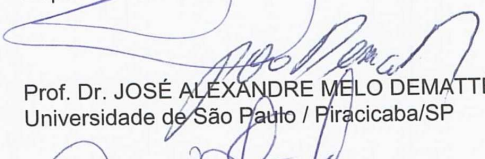
ORIENTADOR: Prof. Dr. JOSE MARQUES JUNIOR

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. GENER TADEU PEREIRA

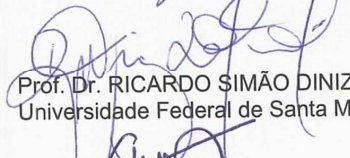
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de DOUTOR EM AGRONOMIA (PRODUÇÃO VEGETAL), pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. JOSE MARQUES JUNIOR

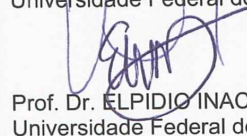
Departamento de Solos e Adubos / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal


Prof. Dr. JOSÉ ALEXANDRE MELO DEMATTÊ

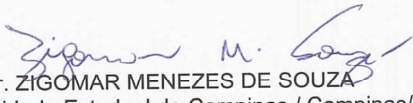
Universidade de São Paulo / Piracicaba/SP


Prof. Dr. RICARDO SIMÃO DINIZ DALMOLIN

Universidade Federal de Santa Maria / Santa Maria/RS


Prof. Dr. ELPIDIO INACIO FERNANDES FILHO

Universidade Federal de Viçosa / Viçosa/MG


Prof. Dr. ZIGOMAR MENEZES DE SOUZA

Universidade Estadual de Campinas / Campinas/SP

Data da realização: 22 de agosto de 2013.

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

DIEGO SILVA SIQUEIRA – Graduado em Engenharia Agrônômica pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (2007) (Título da monografia: Relação solo-relevo e a variabilidade do índice tecnológico da fruta cítrica, FAPESP Proc. n 04/09552-7) e mestrado em Agronomia (Produção Vegetal) pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (2010) (Título da Dissertação: Suscetibilidade magnética para a estimativa de atributos do solo e mapeamento de áreas sob cultivo de cana-de-açúcar, FAPESP Proc. n 2008/07693-3). Iniciou o doutorado em 2010 no curso de Pós-Graduação em Agronomia Produção Vegetal pela FCAV/UNESP Jaboticabal (Título do Projeto de Tese: Suscetibilidade magnética e espectroscopia de reflectância difusa na identificação de áreas de manejo específico para cana-de-açúcar, FAPESP Proc. n 2011/06053-3). Atua na área de Agronomia, com ênfase em Gênese, Morfologia, Classificação dos Solos, Pedometria e Agricultura de Precisão, trabalhando principalmente nos seguintes temas: geoestatística e análise multivariada, áreas de manejo específico, relação solo-paisagem, suscetibilidade magnética e espectroscopia de reflectância difusa. Participou da equipe técnica de 4 Projetos de Auxílio à Pesquisa, publicou 19 artigos, sendo as produções mais relevantes publicadas na Geoderma, Precision Agriculture e Soil Use And Management. Escreveu 2 capítulos de livro e participou do desenvolvimento de material didático ou instrucional de 12 aulas relacionadas ao tema “Geologia e mineralogia: conceitos e aplicações em ciências agrárias e ambientais” e 5 aulas relacionadas ao tema “Modelagem matemática aplicada a ciências agrárias e ambientais” disponíveis no Acervo Digital da UNESP. Participou da organização do 1º Encontro Paulista de Ciência do Solo (FAPESP Proc. 2012/19227-2). Desenvolveu atividades sem fins lucrativos relacionadas ao projeto de elaboração, atualização e manutenção do site do Grupo de Pesquisa “Caracterização do Solo para Fins de Manejo Específico-CSME” (www.csme.com.br) e do Núcleo Estadual São Paulo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (www.sbcssp.org.br). Membro do Grupo de Pesquisa Caracterização do Solo para fins de Manejo Específico (CSME) da UNESP, Câmpus de Jaboticabal, desde 2004, e Membro da Rede Brasileira de Mapeamento Digital de Solos (MDS).

*"A fé é o firme fundamento das coisas que se esperam,
e a prova das coisas que não se veem."*

HEBREUS 11

*"Nossas dúvidas são traidoras, e nos fazem perder
o bem que sempre poderemos ganhar,
por medo de tentar."*

WILLIAM SHAKESPEARE

Aos meus queridos avós
Joaquim Maria da Silva e
Luzia Ferreira da Silva

DEDICO

À minha Família

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela oportunidade da vida.

Aos meus pais, Lázaro Donizeti Siqueira e Rosângela Silva Siqueira, por me apoiarem em caminhos que nem mesmo eles conheciam, e por me ensinarem como é viver com honra, dignidade, humildade e compaixão com o próximo.

Aos Professores José Marques Júnior e Gener Tadeu Pereira, pelos anos de convívio, conselhos, troca de experiências e, principalmente, pela lapidação do caráter.

Aos especialistas membros da Banca de Qualificação, Glauco De Souza Rolim, Newton La Scala Júnior, Maurício dos Santos Simões e Carolina Fernandes, cujas críticas e sugestões contribuíram, de forma significativa, para a melhoria do presente estudo.

Aos professores da Banca de Defesa, Elpídio Inácio Fernandes Filho, José Alexandre Melo Demattê, Ricardo Simão Diniz Dalmolin e Zigomar Menezes de Souza, que disponibilizaram seu tempo para trocar experiências, mostrar seus pontos de vista sobre o tema e os resultados da pesquisa, pelas críticas e sugestões que contribuíram não somente para o enriquecimento do trabalho, mas principalmente pelo meu crescimento profissional.

Ao amigo Vinícius Vasconcelos, pelas conversas animadoras, sugestões e auxílio na realização da análise geomorfométrica.

Ao amigo Daniel De Bortoli Teixeira, pelos desabafos, por ser sempre verdadeiro em suas relações, pelas sugestões e pelo apoio nas análises geoestatísticas.

Aos Pesquisadores Igo Fernando Lepsch e Éder Martins que por meio da troca de ideias e conversas inspiradoras, provocaram em mim vários “insights” para a realização deste trabalho.

Aos coordenadores do curso de Pós-Graduação em Agronomia, Produção Vegetal, por acreditarem em meu potencial, por me ouvirem com paciência e imparcialidade durante a seleção do Programa de Pós-Graduação.

Ao amigo Alan Rodrigo Panosso, “irmão mais velho”, sempre com bons conselhos e ótimas parábolas. Obrigado pela amizade sincera e pelo respeito. Que nosso “círculo” permaneça sempre conectado!

Aos queridos amigos egressos do Grupo de Pesquisa CSME, Diogo Mazza Barbieri, Milton César Costa Campos e Rafael Montanari, pela participação no início da minha formação profissional, por todas as discussões e por me respeitarem como profissional e amigo.

Ao grande amigo Daniel Júnior de Andrade, pelo apoio nos momentos turbulentos nesses últimos 10 anos. Grande exemplo de perseverança!

A todos os companheiros e companheiras com quem convivi durante esses últimos 10 anos de FCAVJ e ao Grupo de Pesquisa CSME, especialmente aos mais novos, Frederico Luiz Siansi, Ana Beatriz Coelho França, Henrique Menezes Santos e Fábio Tiraboschi Leal, pelos quais me sinto responsável, como “irmão científico mais velho”.

Aos amigos Rafael Gonçalves Peluco, Lucas Aguilar Cortez e Ronny Sobreira Barbosa, pela amizade sincera, pela ajuda nos momentos difíceis e, principalmente, por acreditarem em minhas ideias.

Aos companheiros Rafael Camargo e Nicolas e aos queridos familiares Antônio Siqueira, Maria Celina Siqueira e Thiago Siqueira, “In Memoriam”. Obrigado pelas inesquecíveis histórias e lição de vida. A partida de vocês deixou saudades e mostrou-nos o quanto é importante compreender a expressão “viver para trabalhar ou trabalhar para viver?”

As Professoras Geciane Silveira Porto, Simone Galina e colegas da FEA-USP, por me acolherem gentilmente nas disciplinas “Inovação e Propriedade Intelectual” e “Administração de Pesquisa e Desenvolvimento na Empresa”. Obrigado pelas entusiasmadas e esclarecedoras discussões sobre temas tão pouco conhecidos no meio acadêmico e que muito influenciaram meu jeito de ver e encarar a pesquisa e o desenvolvimento.

Aos amigos e funcionários do Departamento de Ciências Exatas, Solos e Adubos, Biblioteca, U.A.D e FUNEP, pelo maravilhoso convívio e ajuda, especialmente: Zezé, Juliana, Shirley, Célia, Lin, Adalto e Wilson.

À minha companheira e esposa Juliana Cristina Lemos de Souza Marchesi, por acreditar em mim quando nem eu mesmo acreditava, por não deixar que eu perdesse a fé nas pessoas, por lapidar em mim virtudes como a paciência, a temperança e a resiliência.

À Usina São Martinho, por todo o apoio logístico e pela concessão da área experimental, e aos queridos amigos com quem tive a oportunidade de aprender, Fabiana Nascimento, Fernando Jurado da Silva, Luciano Cardoso de Oliveira e Paulo Shimitt.

Ao Professor Vítório Barato Neto, pela grande ajuda na correção gramatical, de acordo com as novas regras da Academia Brasileira de Letras.

Ao CNPq (Proc. nº 140265/2010-4) e a FAPESP (2011/06053-3), pela ajuda financeira e pelas bolsas concedidas.

SUMÁRIO

RESUMO.....	xviii
ABSTRACT	xix
1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	21
1.2 Introdução e Justificativas	21
1.3 Revisão de Literatura	23
1.3.1 Delineamento de unidade de solo.....	23
1.3.2 Ferramentas para auxiliar no delineamento das unidades de mapeamento	27
2.1 DELINEAMENTO DE UNIDADE DE MAPEAMENTO DETALHADO COM BASE NA RELAÇÃO SOLO-PAISAGEM E VARIABILIDADE ESPACIAL DA SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA E COR DO SOLO	39
2.2 Introdução.....	40
2.3 Material e métodos.....	43
2.3.1 Localização, caracterização da área e esquema de amostragem	43
2.3.2 Análise laboratorial	48
2.3.2.1 Caracterização do solo	48
2.3.2.2 Caracterização da planta.....	49
2.3.3 Análise dos dados	50
2.3.3.1 Análise bidimensional.....	50
2.3.3.2 Análise tridimensional.....	53
2.4 Resultados e discussão.....	55
2.5 Conclusão.....	70
3.1 DENSIDADE E PROPORÇÃO AMOSTRAL PARA A CARACTERIZAÇÃO DA VARIABILIDADE DE ATRIBUTOS DE LATOSSOLOS NA TRANSIÇÃO BASALTO, DEPÓSITO COLÚVIO-ELUVIONAR E DEPÓSITO ALUVIONAR.....	71
3.2 Introdução.....	72
3.3 Material e métodos.....	74
3.3.1 Localização, caracterização da área e esquema de amostragem	74
3.3.2 Análise laboratorial	76
3.3.3 Análise dos dados	77
3.4 Resultados e discussão.....	79
3.4.1 Amostragem: simples e composta	79
3.4.2 Densidade amostral	83
3.4.3 Proporção amostral: suscetibilidade magnética e teor de argila	89
4.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	93
5.1 LITERATURA CONSULTADA.....	94
ANEXOS	104

LISTA DE ABREVIACÕES

ART	Açúcares redutores totais
C ₀	Efeito pepita
C ₀ +C ₁	Patamar
CONSECANA	Conselho dos produtores de cana-de-açúcar, açúcar e álcool do Estado de São Paulo
Ct	Caulinita
CTC	Capacidade de troca de cátions
DA	Depósito Aluvionar
DCE	Depósito Colúvio-Eluvionar
DMC	Diâmetro médio do cristal
DP	Desvio-padrão
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ERD	Espectroscopia de reflectância difusa
Fe ₂ O ₃	Ferro total
FP	Funções de pedotransferência
Gb	Gibbsita
GDE	Grau de dependência espacial
Gt	Goetita
ha	Hectare
Hm	Hematita
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LVAdm	Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico textura média
LVdfarg	Latossolo Vermelho distroférrico textura argilosa
LVdm	Latossolo Vermelho distrófico textura média
LVefarg	Latossolo Vermelho eutroférrico textura argilosa
MDE	Modelo digital de elevação
NDVI	“Normalized Difference Vegetation Index”
Pol	Porcentagem em massa de sacarose aparente contida em uma solução
R ²	Coeficiente de determinação do modelo ajustado
RRMSE	Relative root mean square error
SG	Serra Geral
SiBCS	Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
SM	Suscebibilidade magnética
SMW	“Split Moving Windows”
SRTM	“Shuttle Radar Topography Mission”
TCH	Toneladas de colmos ha ⁻¹
TFSA	Terra fina seca ao ar
USDA	Departamento de Agricultura dos Estados Unidos
USDA-NRCS	“United States Department of Agriculture/Natural Resources Conservation Service”
V%	Saturação por bases

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 .Resultado do mapeamento de solos para sete municípios dos Estados Unidos (Modificado de IBÁÑEZ et al., 2009).....	26
Tabela 2.1 Parâmetros dos modelos de variogramas ajustados.	59
Tabela 2.2 Caracterização física, química, mineralógica e resposta da cultura nos polígonos delineados com base na variabilidade de campo.	68
Tabela 3.1 Parâmetros dos modelos de variogramas ajustados para os atributos com amostragem simples e composta (3 subamostras).	79
Tabela 3.2 Parâmetros dos modelos de variogramas ajustados para as diferentes densidades amostrais.	84

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1** Diagrama das etapas requeridas para a classificação taxonômica e elaboração do mapa de solos em diferentes níveis de detalhamento.24
- Figura 1.2** Comparação de diferentes modelos de paisagem que podem ser utilizados como ferramenta de campo para auxiliar no delineamento de unidades com diferentes padrões de variabilidade.29
- Figura 1.3** Etapas para a elaboração do mapa de variabilidade espacial para locais sem conhecimento prévio da variabilidade (a), planejamento amostral para locais com conhecimento prévio dos agentes causadores de variabilidade (b) e ambientes de formação do Estado de São Paulo (c).31
- Figura 1.4** Diagrama da organização de elétrons do elemento ferro nas celas unitárias do mineral e tipos de suscetibilidade magnética proveniente da rotação dos elétrons (a), intervalo de suscetibilidade magnética para óxidos de ferro puros e rochas (b) (Modificado de DEARING, 1994), variação da suscetibilidade magnética em função da forma e do tamanho do mineral (c) (Modificado de < http://www.irm.umn.edu/hg2m/hg2m_c/Image18.gif >, Universidade de Minnesota, Colégio de Ciência e Engenharia).34
- Figura 1.5** Diagrama do princípio de funcionamento do sensor de suscetibilidade magnética (a), foto da atração magnética utilizada como ferramenta qualitativa de campo (b).....35
- Figura 1.6** Diagrama da obtenção do Sistema de cor Munsell, utilizando a espectroscopia de reflectância difusa.37

Figura 2.1 Localização da área de estudo (a), modelo digital de elevação com as cotas altimétricas (b), simulação do fluxo superficial de água (c), mapa geológico na escala 1:500.000 (d) (SG – Serra Geral; DCE – Depósito Colúvio-Eluvionar; DA – Depósito Aluvionar); mapa de solos na escala 1:12.000 (e) (LVefarg – Latossolo Vermelho eutroférico textura argilosa; LVdfarg – Latossolo Vermelho distrófico textura argilosa; LVdm – Latossolo Vermelho distrófico textura média; LVAdm – Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico textura média), mapa de ambiente de produção para cana-de-açúcar (f) (A – produtividade esperada > 95 toneladas de colmos ha^{-1} ; B - produtividade esperada entre 90-95 toneladas de colmos ha^{-1} ; C - produtividade esperada entre 85-90 toneladas de colmos ha^{-1} ; D - produtividade esperada entre 85-80 toneladas de colmos ha^{-1}), compartimentos geomorfométricos (g) (RRc – Retilíneo-retilínio com concavidade; CxCv – Convexo-Côncavo; RR – Retilíneo-retilínio; Cx-Cx – Convexo-convexo; CxR – Convexo-retilíneo) e pontos amostrados (h) (86 pontos na transeção e 150 pontos na área de 380 ha).. 44

Figura 2.2 Caracterização da paisagem (a), perfil altimétrico, limites de campo reais e conceituais (b). 46

Figura 2.3 Esquema do funcionamento da análise “Split Moving Windows” (SMW) com uma “Janela” de 10 observações e intervalo de Mullion com 2 observações..... 51

Figura 2.4 Diagrama representando a integração dos limites matemáticos encontrados pela análise “Split Moving Windows” (SMW) e isolinhas dos mapas de variabilidade espacial..... 52

Figura 2.5 Diagrama da interação do modelo bidimensional (SMW) com modelo tridimensional. (a) validação dos limites conceituais de campo pelos limites matemáticos do “split moving windows” (SMW), ● - picos do SMW com maior representatividade, (b) definição da classe de variabilidade com base na interseção da isolinha com os picos do SMW, (c) sobreposição das isolinhas representativas dos diferentes atributos estudados, (d) seleção das isolinhas com maior continuidade espacial, (e) delineamento da unidade de mapeamento com controle da variabilidade.....54

Figura 2.6 Resultado da análise “Split Moving Windows” (SWM) e correlação entre os valores da Estatística t para altitude, suscetibilidade magnética (SM), saturação por bases (V%), matiz (determinado por espectroscopia de reflectância difusa), NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) para os anos de 2009, 2010 e 2011 ao longo da transeção com pontos espaçados a 30 m.....56

Figura 2.7 Mapas de distribuição espacial. MO – matéria orgânica, Pdis. – fósforo disponível, SB – soma de bases, CTC – capacidade de retenção de cátions, V – Saturação por bases, SM – suscetibilidade magnética, NDVI – “Normalized Difference Vegetation Index” (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada), (●) limites encontrados na análise split moving windows da SM, (—) Delineamento com base na intersecção entre os limites do “split moving windows - SMW” e isolinhas do mapa de variabilidade, (1°, 2°, 3°, 4°, 5°) Picos mais representativos do SMW.....63

Figura 2.8 Proposta de delineamento das unidades de mapeamento detalhado com base na validação de modelos conceituais de relação solo-paisagem utilizando “split moving windows”, geoestatística e suscetibilidade magnética.66

- Figura 3.1** Localização da área de estudo (a), modelo digital de elevação com as cotas altimétricas (b), mapa geológico na escala 1:500.000 (d) (SG – Serra Geral; DCE – Depósito Colúvio-Eluvionar; DA – Depósito Aluvionar); mapa de solos na escala 1:12.000 (e) (LVefarg – Latossolo Vermelho eutroférico textura argilosa; LVdfarg – Latossolo Vermelho distrófico textura argilosa; LVdm – Latossolo Vermelho distrófico textura média; LVAdm – Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico textura média), pontos amostrados com 3 subamostras (e.1, 150 ha), pontos amostrados em diferentes densidades (e.2, 380 ha). 75
- Figura 3.2** Mapas de distribuição espacial para teor de argila, V% – Saturação por bases, SM – suscetibilidade magnética (área de 150 ha, n=60). 82
- Figura 3.3** Índice de concordância (d) entre os mapas de variabilidade espacial elaborados com amostras simples e composta (3 subamostras). V% – Saturação por bases, SM – suscetibilidade magnética. (n= 4790). 83
- Figura 3.4** Mapas de distribuição espacial para as diferentes densidades amostrais (área de 380 ha). (—) Região com maior alteração das isolinhas no mapa de variabilidade. 86
- Figura 3.5** Correlação (n=4790) e valores de RRMSE (n = 40) do mapa de variabilidade na densidade de um ponto a cada 2,5 ha com os mapas das densidades de um ponto a cada 3;4;5;6;7;8 e 9 ha..... 88
- Figura 3.6** Índice de concordância (d) do mapa de suscetibilidade magnética na densidade de um ponto a cada 2,5 ha com os mapas de variabilidade espacial de argila nas densidades de 2,5; 3; 4; 5; 6; 7; 8 e 9 ha (n = 4790). 90
- Figura 3.7** Configuração amostral para suscetibilidade magnética (SM) (●) (a), teor de argila (●) (b), proporção amostral entre SM : teor de argila (c) e mapa geológico do Estado de São Paulo, indicando áreas com potencial de aplicação da densidade e proporção amostral sugeridas (d).....91

MAPEAMENTO DE ATRIBUTOS E PLANEJAMENTO AMOSTRAL PARA LATOSSOLOS UTILIZANDO SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA, COR E RELAÇÃO SOLO-PAISAGEM

RESUMO – O atual contexto nacional da agricultura e da ciência do solo demonstra a importância sobre desenvolvimento de protocolos para delineamento de unidades de mapeamento detalhado do solo e planejamento amostral estratificado. O presente trabalho tem como objetivo utilizar a suscetibilidade magnética (SM), cor do solo e relação solo-paisagem no mapeamento de atributos e planejamento amostral para Latossolos. Foram coletadas 86 amostras em intervalos regulares de 30 m em uma transeção. Nas laterais da transeção, foram coletadas 150 amostras em intervalos de 159 metros (densidade de um ponto a cada 2,5 ha) em 380 ha. Os atributos granulométricos, químicos, SM e cor do solo foram analisados juntamente com resultados de NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) para os anos de 2009, 2010 e 2011, além de dados da planta coletados em campo. Os resultados da análise “Split Moving Windows” para SM correlacionaram-se com teor de argila ($r=0,7$; $p<0,01$), matiz ($r=0,4$; $p<0,05$) e NDVI 2010 e 2011 ($r=-0,3$; $p<0,01$). Os resultados mostraram que as áreas de manejo específico definidas podem auxiliar no delineamento de unidades de mapeamento detalhado com base na relação solo-paisagem e variabilidade espacial da SM. Para o estudo do planejamento amostral, em parte da área (150 ha), foram coletadas 60 amostras na densidade de um ponto a cada 2,5 ha com amostragem simples e composta (3 subamostras). Diferentes densidades amostrais (um ponto a cada 3; 4; 5; 6; 7; 8 e 9 ha) foram obtidas na área de 380 ha, retirando-se pontos aleatoriamente. Os mapas de krigagem da SM, teor de argila e saturação por bases elaborados com amostragem simples e compostas tiveram índice de concordância (d) próximo de 1. A correlação dos mapas de krigagem nas densidades amostrais de um ponto a cada 2 a 7 ha foi de 0,9. Para as densidades de um ponto a cada 8 e 9 ha, foram encontradas correlações variando de 0,4 a 0,7. Houve concordância do mapa de krigagem do teor de argila na densidade de um ponto a cada 2,5 ha, com o mapa da SM na densidade de um ponto a cada 7 ha ($d = 0,9$). A SM pode ser utilizada para melhorar as estimativas de predição do teor de argila de Latossolos sob transição Serra Geral, Depósito Colúvio-Eluvionar e Depósito Aluvionar na proporção amostral de 3 pontos de SM para cada ponto de argila.

Palavras-chave: Levantamento de solo, Protocolo de mapeamento, Geofísica, Espectroscopia de reflectância difusa, Geoestatística.

ATTRIBUTES MAPPING AND SAMPLE PLANNING FOR OXISOLS USING MAGNETIC SUSCEPTIBILITY, COLOR AND SOIL-LANDSCAPE RELATIONSHIP

ABSTRACT - The current national context of agriculture and soil science demonstrates the importance of developing protocols for delineation of units of detailed mapping soil and stratified sampling. This paper aims to use the magnetic susceptibility (MS), soil color and soil-landscape relationship in mapping attributes and sample design for Oxisols. 86 samples were collected at regular intervals of 30 m on a transect. On the sides of the transect 150 samples were collected at intervals of 159 meters (density of one point every 2.5 ha) in 380 ha. The texture attributes, chemical, MS and color were considered together with the results of NDVI (Normalized Difference Vegetation) for the years 2009, 2010 and 2011, and plant data collected in the field. The results of analysis "Split Moving Windows" correlates to SM-RAM with clay content ($r = 0.7$, $p < 0.01$), hue ($r = 0.4$, $p < 0.05$) and NDVI 2010 and 2011 ($r = -0.3$, $p < 0.01$). The results showed that the specific management of areas can assist in the design of detailed mapping units based on soil-landscape relationship and spatial variability of MS. For the sample planning study, in part of the area (150 ha), 60 samples were collected at a density of one point every 2.5 ha with simple sampling and composite (3 subsample). Different sample densities (one point every 3; 4; 5; 6; 7; 8 and 9 h) were obtained in the area of 380 ha removing dots at random. The kriging maps of MS, clay content and base saturation made with simple sampling were composed at an index of agreement (d) close to 1. The correlation maps of kriging sampling densities of one point every 2 to 7 ha was 0.9. For the density of a point every 8 and 9 were found correlations ranging from 0.4 to 0.7. There was agreement of kriging map of clay content in the density of one point every 2.5 ha with the map of SM in the density of each point to 7 ha ($d = 0.9$). The SM can be used to improve estimates of spatial variability of clay content of the Oxisol under Transition Basalt - Alluvial - colluvial Deposits and Eluvial Deposits the sample proportion of SM 3 points for each point of clay.

Keywords: Soil survey, Mapping protocol, Geophysics, diffuse reflectance spectroscopy, Geostatistics.

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

1.2 Introdução e Justificativas

É cada vez maior a mobilização da comunidade científica brasileira e internacional para fornecer informações capazes de subsidiar novas trajetórias para o desenvolvimento agrícola e urbano.

Citemos como exemplo a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, a FAPESP, que em 2012 pagou R\$ 1,035 bilhão entre bolsas e auxílios. O Programa FAPESP de Pesquisa em Bioenergia (BIOEN), Programa de Pesquisas em Caracterização, Conservação, Recuperação e Uso Sustentável da Biodiversidade do Estado de São Paulo (BIOTA) e o Programa FAPESP de Pesquisa sobre Mudanças Climáticas Globais (PFPMCG) são uma prova do esforço da comunidade científica para fornecer subsídios à criação de novos índices. Esses programas têm por objetivo gerar resultados que balizem a implantação de métricas para trajetória sustentável do País e do mundo. Porém, mesmo com tamanho empenho e benefícios alcançados, nenhum dos programas vislumbra uma caracterização detalhada dos solos e seus atributos.

Quem nunca leu ou ouviu a frase “conhecemos mais sobre o espaço e os solos de Marte do que sobre o oceano e o solo embaixo de nossos pés”. A julgar pelo momento de decisão e planejamento de trajetórias em que vivemos, é inconcebível que exista tamanho déficit de informações sobre o recurso natural: solo. Uma das primeiras intervenções mundiais sobre o solo foi o Levantamento Mundial de Solos da FAO/UNESCO – “Food and Agriculture Organization of the United Nations” (Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação) em 1975. Esse mapa foi o que permitiu a muitos países assumirem novas posições mundiais na produção de alimento e desenvolverem os embriões de sua economia atual.

No Brasil, o maior conhecimento sobre os solos e seus atributos permitiu a expansão da produção de grãos para o Centro-Oeste. Cita-se como exemplo o Programa Federal POLOCENTRO (1975-1980), que viabilizou a incorporação efetiva de quase 2,5 milhões de hectares à agricultura e à pecuária. Dentre os projetos de infraestrutura estava o melhor conhecimento dos solos do Cerrado, especificamente

dos minerais na fração argila (hematita, goethita, gibbisia e caulinita). No caso específico da soja, a área cultivada passou de 82.000 hectares em 1975 para 520.000 hectares em 1980. No Sudeste, especificamente no Estado de São Paulo, o melhor detalhamento do solo promoveu, na década de 1980, a criação do conceito de ambientes de produção, mapas técnicos utilizados no planejamento das safras. Atualmente, a soja representa cerca de 20% do PIB da agropecuária brasileira, e o setor sucroalcooleiro é responsável por aproximadamente 2% do PIB nacional e por 8% do PIB da agricultura no Brasil, sendo o maior produtor e exportador de açúcar do mundo e o segundo maior produtor de etanol do mundo. Nesse contexto, é pertinente fazermos a seguinte pergunta : quanto da hegemonia atual desses dois setores é resultado do investimento no detalhamento do solo e de seus atributos?

O detalhamento do solo está relacionado com o conhecimento da variabilidade, conceito conhecido desde a década de 1950. Segundo Legros (2006), a inclusão da representatividade da variabilidade de campo na forma de mapas isopléticos, auxilia nos levantamentos de solos, facilitando o delineamento das unidades de mapeamento. O método isoplético é aplicável para fenômenos geográficos contínuos na natureza, tais como: médias, razões, proporções e medidas de dispersão, sempre envolvendo área, e as isolinhas mostram claramente em que direções os valores ou intensidades de um fenômeno crescem ou decrescem (ex.: teor de argila e fertilidade do solo). Burrough (1991) sugere que o conhecimento da variabilidade espacial seja utilizado para auxiliar na composição da unidade de mapeamento e planejamento amostral.

Porém, apesar das inúmeras propostas para detalhamento dos solos e planos de amostragem, são raras as que partem do conhecimento da variabilidade dos atributos no campo e da relação solo-paisagem. Diante da evidente necessidade de detalhamento das informações sobre os atributos dos solos e protocolo para planejamento amostral, este trabalho irá apresentar conceitos e aplicações úteis para melhorar o entendimento da importância dos estudos de relação pedologia-geomorfologia-variabilidade para auxiliar na composição das unidades de mapeamento detalhado e plano de amostragem com base na variabilidade espacial da suscetibilidade magnética e cor do solo. Esperamos, ainda, incentivar futuros trabalhos dedicados a novos estudos sobre o tema.

1.3 Revisão de Literatura

1.3.1 Delineamento de unidade de solo

Entende-se por delineamento de unidades de solo o esboço de um limite que separa locais no campo com diferentes características, como teor de argila, saturação por base e outros atributos do solo. Em grandes áreas como o Brasil, Rússia e China, a caracterização e o delineamento detalhado das unidades de mapeamento do solo são difíceis. Dentre as causas está a variabilidade natural dos fatores condicionantes da variabilidade do solo (geologia, formas da paisagem, dentre outros fatores) (LEGROS, 2006). A organização dos valores dos atributos saturação por bases e teor de argila, por exemplo, dentro de um delineamento, permite interpretações subseqüentes, resultando na classificação e no levantamento das classes de solos.

Segundo USDA/NRCS (2002), o que é mapeado no campo é o corpo natural solo e não as classes de solo (táxons), pois elas são conceituais. O USDA-NRCS recomenda que, nos trabalhos de mapeamento, os corpos naturais de solo devem ser delineados no campo, sem preocupação imediata com classes taxonômicas. Tal conceito foi definido por Hudson (1992) como paradigma solo-paisagem. Portanto, podemos inferir que, para o USDA-NRCS, a prioridade é dividir corpos naturais (classes de variabilidade dos atributos do solo) e, posteriormente, associar ou dar um nome à área identificada.

Contudo, uma vez efetuado o delineamento, é necessário dar um nome a ele, o qual deverá ser o do táxon dominante dentro do perímetro delineado. No caso do Sistema Brasileiro de Classificação de Solo (SiBCS), esse nome corresponde a Ordem, Subordem, Grande Grupo, SubGrupo, Família e, futuramente, a Série (Figura 1.1).

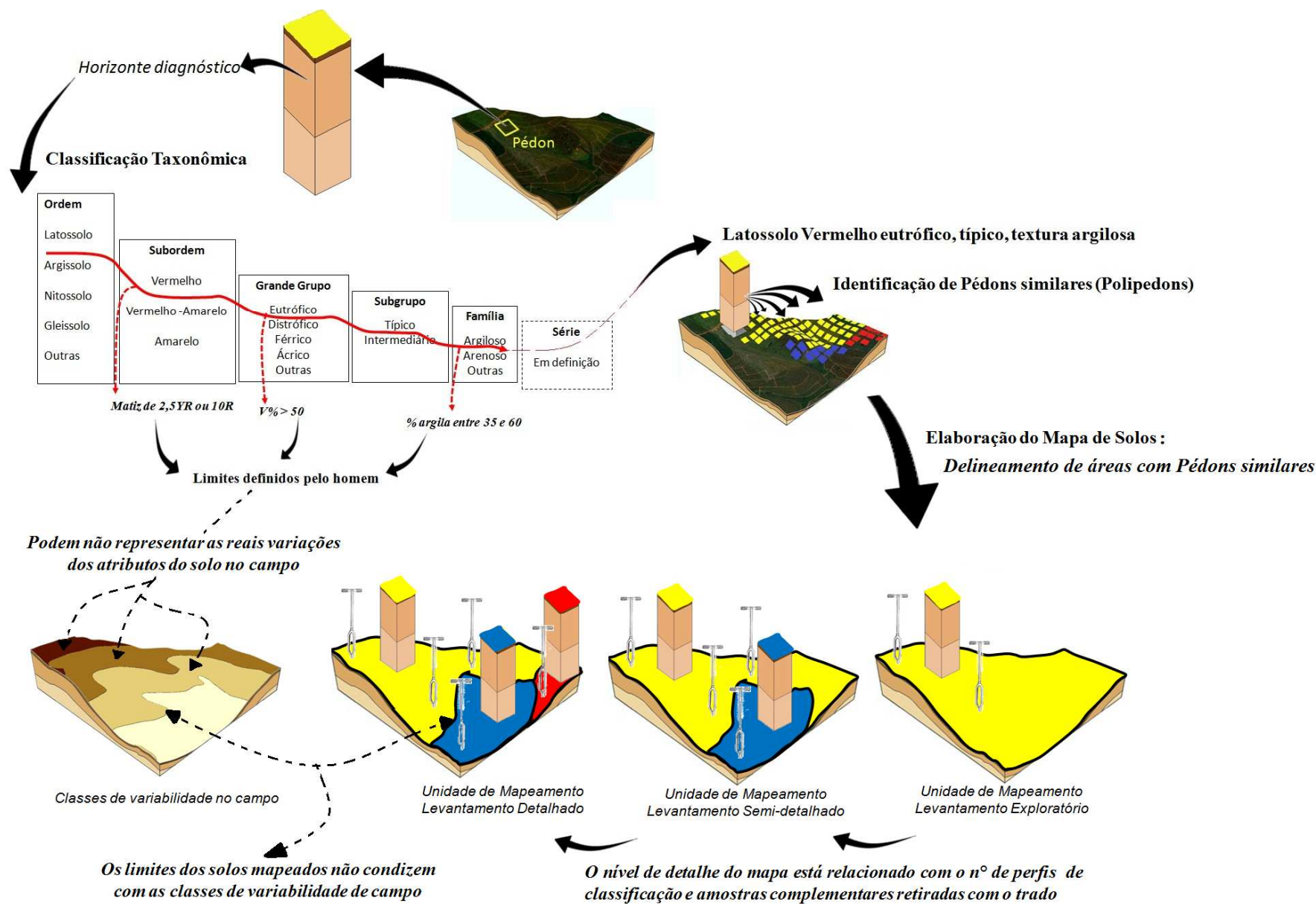


Figura 1.1 Diagrama das etapas requeridas para a classificação taxonômica e elaboração do mapa de solos em diferentes níveis de detalhamento.

No caso de um levantamento detalhado, segundo o “Soil Taxonomy” (EUA, 1999), o nome deve corresponder ao de uma série de solo. Segundo alguns autores (MONTANARI et al., 2005; MARQUES JR., 2009), os modelos conceituais da paisagem e ferramentas, como a geoestatística, podem ser utilizados para identificar de maneira detalhada áreas com diferentes padrões de variabilidade dos atributos do solo. Isso permite que se possam indicar os locais onde a amplitude dos atributos das unidades de mapeamento seja maior ou menor. Esse tipo de abordagem, que contempla a variabilidade espacial dos atributos do solo pode ser útil na identificação prévia de locais com tendência a terem os chamados “taxadjunts”, pédons que não se enquadram em um determinado táxon, mas têm características similares em morfologia, composição e nas recomendações de manejo. Dessa maneira, o mapa de variabilidade dos atributos do solo (mapa isoplético) pode auxiliar o mapeador na compreensão do *continuum* ao longo da paisagem. Como foi demonstrado na Figura 1.1, a elaboração do mapa de solos, com base no delineamento de pédons similares, pode gerar limites entre as unidades delineadas que não condizem com as classes de variabilidade, e também podem não representar as reais variações dos atributos do solo ao longo da paisagem.

Atualmente, pesquisadores da área de ciência do solo discutem os critérios para a estruturação do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) até o sexto e último nível, o de Série, passando naturalmente pelo quinto, o de família. A organização dos corpos de solos em categorias e táxons nada mais é do que seu reconhecimento por meio de atributos predeterminados. Cada táxon possui um conjunto de atributos do perfil do solo que auxiliam na classificação (Exemplo: Subordem: cor; Grande Grupo: saturação por bases) (EMBRAPA, 2006).

Conforme relatado por Ibáñez et al. (2009), existem muitas publicações sobre táxons, bem como classificação e mapeamento de solos, cujo foco é a gestão e a classificação das informações. Porém, publicações sobre o padrão dos táxons e suas relações no campo, bem como o padrão de variabilidade dentro de cada táxon são escassas. Esse tipo de informação é de grande importância, pois pode auxiliar os mapeadores na representação dos delineamentos das unidades de mapeamento no campo. Ibáñez et al. (2009) mostram que a natureza da taxonomia proposta pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) é fortemente ligada com

as práticas de levantamento de solos, e que ferramentas matemáticas podem ser utilizadas como elo entre taxonomia e mapeamento em diferentes escalas. Esses autores propõem o uso de ferramentas matemáticas para expressar a relação entre os táxons quando identificados no campo, para sete municípios dos Estados Unidos (Tabela 1.1). Observa-se que há uma proporção entre os táxons das diferentes cidades, sendo que a proporção média foi de 20 Séries encontradas no campo para cada Ordem. Possivelmente, a proporção de ocorrência dos táxons está associada ao potencial estratificador de cada compartimento (geológico, relevo e outros).

Tabela 1.1 .Resultado do mapeamento de solos para sete municípios dos Estados Unidos (Modificado de IBÁÑEZ et al., 2009).

Local	Número de táxons classificados ¹						Área mapeada (km ²) ²
	Ordem	Subordem	G.Grupo	Subgrupo	Família	Série	
Umatilla County Area, OR	6	14	22	35	39	68	8.368
Klamath County, OR, Southern Part	8	15	29	49	51	68	15.892
Nye County, NV, Northeast Part	4	10	20	55	62	108	47.032
Tama County, IA	4	10	13	24	28	41	1.870
Pocahontas County, IA	2	6	8	12	14	33	2.440
Jefferson County, AL	5	8	12	16	19	24	2.015
Windsor County, VT	4	11	15	33	34	50	2.528
Proporção de outros táxons encontrados no campo em relação a uma Ordem							
Umatilla County Area, OR		2	4	6	7	11	
Klamath County, OR, Southern Part		2	4	6	6	9	
Nye County, NV, Northeast Part		3	5	14	16	27	
Tama County, IA		3	3	6	7	10	
Pocahontas County, IA		3	4	6	7	17	
Jefferson County, AL		2	2	3	4	5	
Windsor County, VT		3	4	8	9	13	
Média ponderada pela área		2	4	11	12	20	

1 – polígonos delineados no campo com base na semelhança de polipédons; 2 – área estimada dos locais; G.Grupo – Grande Grupo

Outra proposta para auxiliar na compreensão do número de táxons em diferentes escalas de levantamento é a de Minasny e McBratney (2007). Esses autores propuseram um modelo global de pedodiversidade baseado na Energia de Entropia de Shannon. Tanto o modelo de Ibáñez et al. (2009) quanto o de Minasny e McBratney (2007) partem da variabilidade de campo. Assim, pode-se inferir que, em regiões tropicais, onde a Energia de Entropia de Shannon é maior, é esperado um número superior de Séries para cada Ordem. Isso indica que a variabilidade dos atributos destes solos é alta, o que reforça a necessidade de abordagens com foco na caracterização da variação espacial do teor de argila, fertilidade do solo e outros atributos covariativos dos fatores e processos de formação dos solos (mapa de atributos).

Nesse contexto, talvez tão interessante quanto estruturar os critérios do nível de Série do solo, seria a elaboração de um manual de campo para identificação e caracterização de locais com diferentes padrões de variabilidade e, por conseguinte, delineamento detalhado das unidades de solo com base em mapas de atributos.

1.3.2 Ferramentas para auxiliar no delineamento das unidades de mapeamento

A demanda por mapas detalhados capazes de fornecer informações de modo simples e dinâmico tem aumentado. O número de estudos que relatam sobre a necessidade em se caracterizar os solos e seus atributos antes de gerar recomendações adequadas de manejo (SHEPHERD; WALSH, 2007), bem como a necessidade de se desenvolver indicadores de impactos globais do uso e da ocupação do solo (ROCKSTROM et al., 2009) tem sido cada vez maior. Esses estudos são ainda mais necessários para áreas com alta pedodiversidade.

Nesse contexto, novas abordagens têm sido propostas para caracterizar os solos e seus atributos. Alguns pesquisadores (CUNHA et al., 2005; CAMPOS et al., 2008; CAMARGO et al., 2008a) utilizam, simultaneamente, métodos livres ou categóricos (podem utilizar conceitos da relação solo-paisagem), método clássico (observa a similaridade entre pédon e amostras extras) e métodos probabilísticos (geoestatística). A vantagem na união de diferentes métodos está relacionada com melhora no conhecimento da distribuição dos solos e seus atributos ao longo da paisa-

gem (variabilidade espacial), da precisão e da qualidade da informação (McBRATNEY et al., 2002).

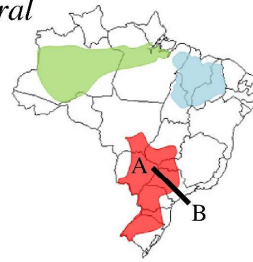
A utilização conjunta do método categórico com o determinístico tem sido utilizada com êxito na caracterização de atributos físicos, químicos e mineralógicos do solo (CAMARGO et al., 2008a,b); planejamento agrícola e implantação de sistemas de cultivo para cana-de-açúcar (CAMPOS et al., 2008); aplicação de insumos em taxa variada (BARBIERI et al., 2009); estudo da emissão de CO₂ (PANOSSO et al., 2008); adsorção de fósforo (BARBIERI et al., 2009); perda de solo e nutrientes por erosão (IZIDORIO et al., 2005; SANCHEZ et al., 2009); produção de café (SANCHEZ et al., 2012a) e cultivo de citros (SIQUEIRA et al., 2010a). Todos esses trabalhos partem da premissa de que é possível delinear uma unidade de mapeamento com base na variabilidade espacial dos atributos do solo.

Dentre as vantagens na utilização de modelos conceituais de paisagem, está a confiabilidade da representação das condições de campo (LEGROS, 2006). Contudo, muitas vezes, esse método é criticado por ser empírico e por requerer boa formação teórica e prática em relações solo-paisagem. Nos EUA, os cientistas do solo de campo, chamados de “field soil scientists”, recebem treinamento especial com cursos em geomorfologia e têm vários “feedbacks” com correlatores experientes antes de iniciarem seus trabalhos de levantamento.

A aplicação de modelos de paisagem, muito utilizados pelos geomorfólogos (ROSS, 1992), no mapeamento de solo, tem como objetivo auxiliar na descrição da ocorrência dos solos ao longo da paisagem. Nos Estados Unidos, esses modelos são utilizados como uma chave de mapeamento de campo, onde as fronteiras traçadas pela análise da paisagem permitem boa previsibilidade dos solos de uma unidade de mapeamento (ZINK, 1992).

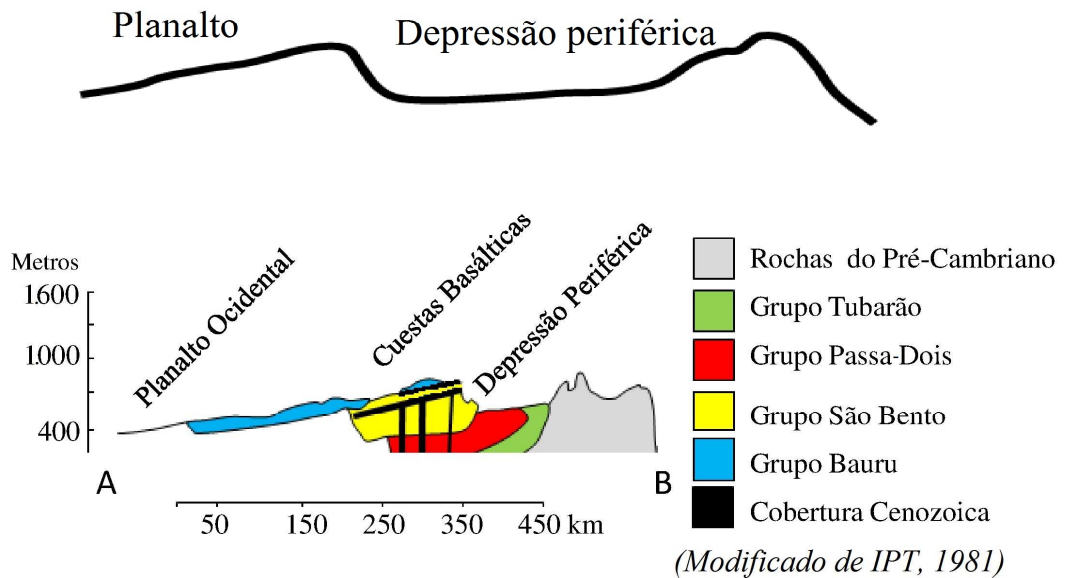
Alguns dos modelos conceituais de solo-paisagem mais utilizados no Brasil para delineamentos detalhados são: o de superfícies geomórficas (DANIELS et al., 1971), segmentos de vertente (DALRYMPLE et al., 1968) e curvaturas do relevo (TROEH, 1965) (Figura 1.2). Tão importante quanto a definição do modelo conceitual é conhecer sua aplicabilidade nas diferentes unidades (morfoestruturais, morfoes-culturais e, especialmente, a morfológica).

1° Táxon: *Unidade Morfoestrutural*
Preposição de Ross (1992)



Bacia do Amazonas
 Bacia do Parnaíba
 Bacia do Paraná
 (Modificado de IPT, 1981)

2° Táxon: *Unidade Morfoescultural*
Preposição de Ross (1992)



3° Táxon: *Unidade Morfológica ou padrões de formas semelhantes*
Preposição de Ross (1992)

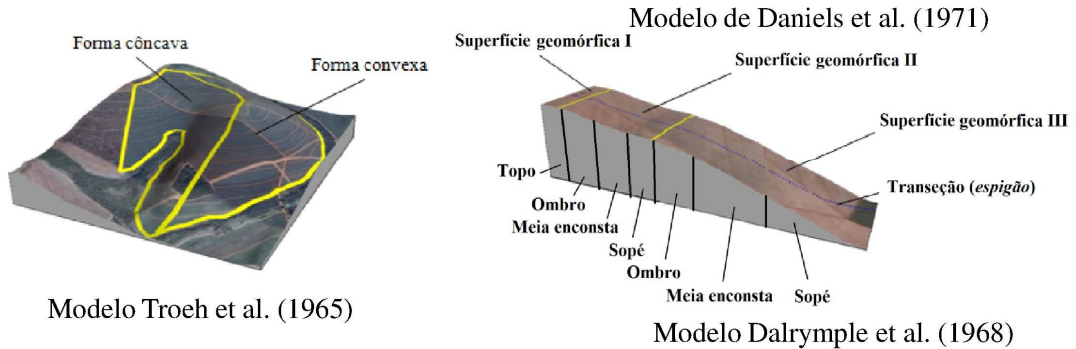
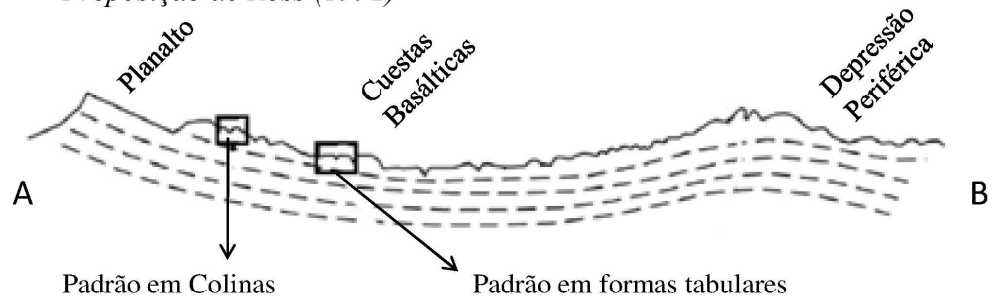


Figura 1.2 Comparação de diferentes modelos de paisagem que podem ser utilizados como ferramenta de campo para auxiliar no delineamento de unidades com diferentes padrões de variabilidade.

A subjetividade dos modelos conceituais de paisagem, bem como a definição dos limites para sua aplicação dentro das unidades morfológicas, pode ser diminuída com a utilização de ferramentas do Sistema de Informações Globais (SIG), como o modelo digital de elevação (MDE) e assinatura geomorfométrica (VASCONCELOS et al., 2012). Além de serem úteis para a identificação de limites no campo e, portanto, para o delineamento de unidades de mapeamento, os modelos de paisagem ainda podem ser utilizados como ferramentas qualitativas para identificação de áreas com diferentes variâncias dos atributos do solo (variabilidade) (SIQUEIRA et al., 2010a; CAMARGO, 2013).

Outra ferramenta que pode ser utilizada para diminuir a subjetividade dos modelos conceituais de solo-paisagem e proporcionar maior precisão e exatidão do limite das áreas delineadas é a geoestatística. Nesse caso, a utilização da geoestatística como ferramenta de análise exploratória da variabilidade, partindo de malhas de amostragem com espaçamento curto e regular entre as amostras, é o procedimento mais utilizado e recomendado (Figura 1.3a).

Esse procedimento pode ser resumido em amostragem, modelagem, interpolação e representação da variabilidade. Porém, talvez devido à falta de aplicação de conhecimentos básicos da geoestatística, muitas vezes o usuário se esquece de que, em locais onde já se conhece o padrão da variabilidade, a sequência das etapas desse procedimento deve ser alterada para promover maior dinamismo e operacionalidade. Nesse caso, a variabilidade pode ser inferida de diferentes maneiras. Em locais cujos solos são originados de Rochas Sedimentares, uma maneira prática é compartimentalizar com base nos ambientes de formação (fluvial, lacustre, eólica, glaciária).

Solos originados de Rochas Sedimentares, que se formaram em ambiente fluvial, tendem a apresentar um padrão de variabilidade mais complexo, sendo necessário um maior número de pontos a intervalos curtos e regulares para representar seus perímetros (Figura 1.3b). Partindo do princípio de que o delineamento de unidade de mapeamento deva contemplar a variabilidade de campo, quanto mais complexo for o padrão de variabilidade, maior será a quantidade de delineamentos.

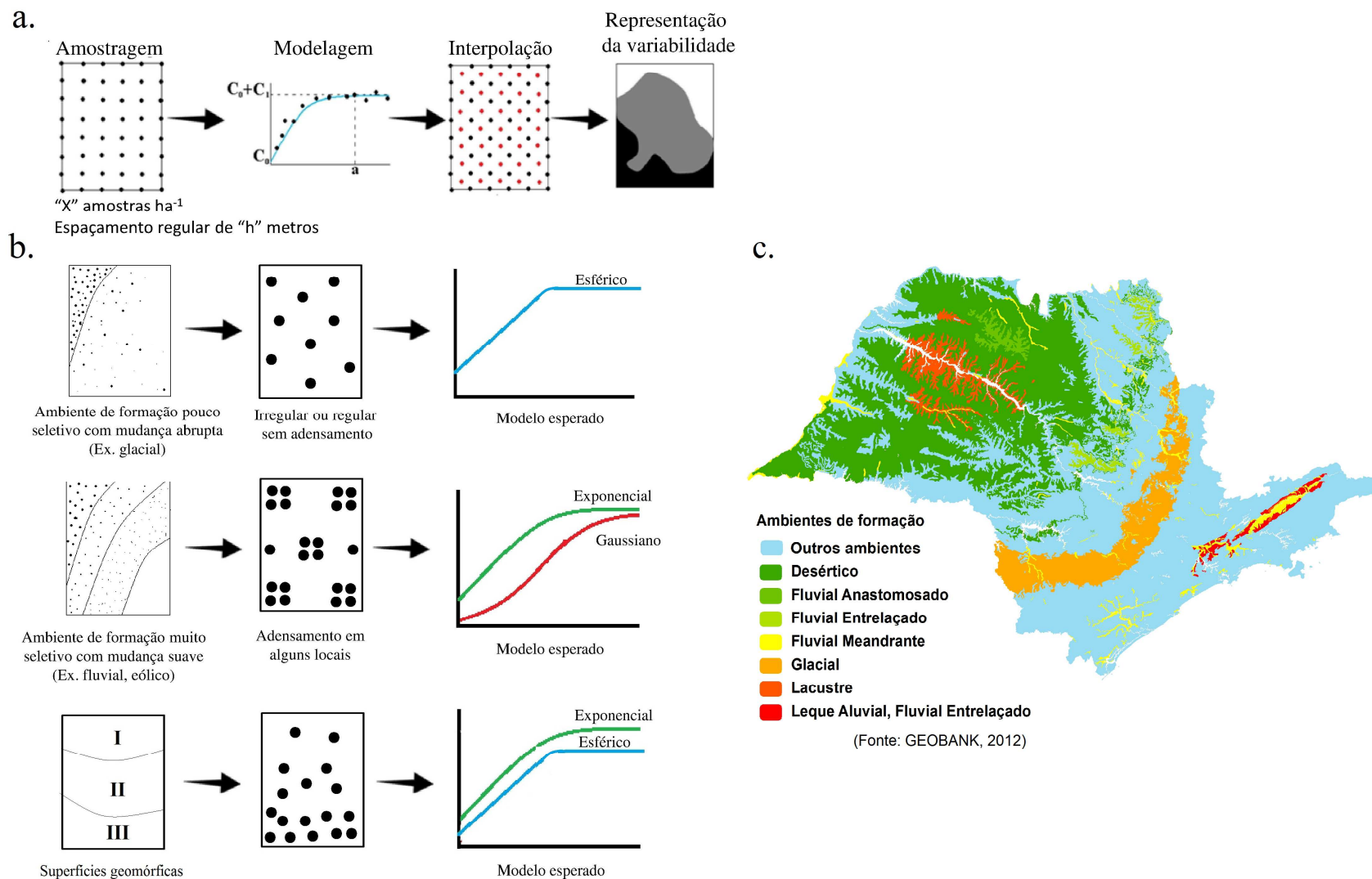


Figura 1.3 Etapas para a elaboração do mapa de variabilidade espacial para locais sem conhecimento prévio da variabilidade (a), planejamento amostral para locais com conhecimento prévio dos agentes causadores de variabilidade (b) e ambientes de formação do Estado de São Paulo (c).

A intensificação da amostragem de campo, associada à observação da paisagem com auxílio de informática, é interpretada como a 2ª fase histórica da evolução da pedologia (BOCQUIER, 1984). Alguns autores consideram que a 3ª fase da evolução da pedologia teve início na década de 1970, quando foram retomados pensamentos da 1ª fase (anterior à década de 1960) com enfoque na zonalidade, coleta de amostras indeformadas e associação a conceitos novos de análise espacial da cobertura pedológica.

A partir daí, várias ferramentas no campo da informática e análise de dados (árvore decisão, lógica fuzzy, redes neurais, entre outras) têm sido desenvolvidas para reduzir a subjetividade dos métodos qualitativos em avaliação de terras, incentivando a utilização de técnicas quantitativas (BURROUGH, 1986; TEN CATEN et al., 2012).

A evolução dessas ferramentas e de análises foi concomitante à evolução da ideia de se estudar o solo em um *continuum* na paisagem, com um propósito cartográfico que deveria ser representado mediante uma espacialização (ESPÍNDOLA, 2008).

Dessa maneira, o uso da geoestatística no estudo da distribuição espacial dos atributos, ao longo da paisagem, possibilita uma nova interpretação de complexas relações de causa e efeito, amparando diversas decisões estratégicas como efeitos ambientais (LA SCALA JR. et al., 2000; IZIDORIO et al., 2005), planejamento amostral (MONTANARI et al., 2005; MONTANARI et al., 2012) e produtividade das diferentes culturas (CAMPOS et al., 2008; SIQUEIRA et al., 2010a; SANCHEZ et al., 2012a, b). O número de pontos requeridos para a representação adequada da variabilidade de uma área sempre foi um dos maiores limitantes no uso e na difusão dessa ferramenta em diversas áreas.

Uma das propostas para amenizar a questão do elevado custo, tempo de coleta e análise, provocados pelo grande número de amostras na representação da variabilidade espacial, é a utilização de atributos que sejam mais fáceis, rápidos e baratos de serem quantificados no campo ou no laboratório. Outra preocupação é que estes atributos, quantificados de maneira rápida, também sejam covariativos de outros atributos do solo, permitindo sua utilização em funções de pedotransferência (FP). As FPs, inicialmente, foram desenvolvidas para estimar propriedades hidráulicas do solo, porém não se restringem a esse fim, podendo ser utilizadas para estimar atributos físicos, químicos e biológicos do solo (McBRATNEY et al., 2002).

Assim, a avaliação da condutividade elétrica (JOHNSON et al., 2001; BRENNING et al., 2008), a suscetibilidade magnética (GRIMLEY; VEPRASKAS, 2000) e a espectroscopia de reflectância difusa (TORRENT; BARRON, 1993; BARRÓN et al., 2000) têm sido utilizadas para viabilizar a caracterização da variabilidade espacial dos atributos do solo. A condutividade elétrica foi originalmente desenvolvida para regiões temperadas com baixa expressão dos óxidos de ferro. Wu et al. (2008) relatam que essa técnica sofre alterações em regiões com elevada presença de óxidos. Por este motivo, nos solos tropicais, a suscetibilidade magnética e a espectroscopia de reflectância difusa mostram ter melhor potencial no delineamento de unidades de mapeamento com diferentes padrões de variabilidade (CAMARGO, 2013). A SM origina-se das propriedades de rotação dos elétrons dos minerais presentes na rocha ou no solo (CRAIK, 1995) (Figura 1.4a). No ambiente natural, existem minerais de diferentes espécies e formatos, e nesse sentido o que é estimado na verdade é a SM resultante, que representa o mineral de maior expressão naquele ambiente.

São considerados 5 tipos básicos de comportamento magnético: diamagnetismo, paramagnetismo, ferromagnetismo, ferrimagnetismo e antiferromagnetismo. Nos minerais diamagnéticos, os átomos que compõem a cela unitária do mineral, possuem as camadas eletrônicas preenchidas. Assim, o número de “spins” eletrônicos alinhados numa direção é igual ao número de “spins” eletrônicos na direção oposta. (Exemplo: quartzo). Nos minerais paramagnéticos as camadas eletrônicas estão incompletas. A presença de um campo magnético externo faz com que os “spins” se alinhem, e mesmo após a retirada do campo magnético, alguns “spins” permanecem alinhados (Exemplo: olivina). Os minerais ferromagnéticos são um caso especial de paramagnetismo. Após a retirada do campo magnético os “spins” permanecem alinhados, fazendo com que o mineral possua um grande valor de magnetização remanescente (Exemplo: ferro e cobalto). Nos minerais ferrimagnéticos, os “spins” não estão emparelhados, assim prevalece o momento magnético do maior número de “spins” no mesmo sentido (Exemplo: magnetita). Os minerais antiferromagnéticos não apresentam propriedades magnéticas. Frequentemente, a SM é confundida com atração magnética. A atração magnética foi utilizada como ferramenta auxiliar de campo nos primeiros levantamentos de solos do Estado de São Paulo na década de 1960, para distinguir solos originados de rochas máficas de outros materiais de origem (REZENDE et al., 1988a,b).

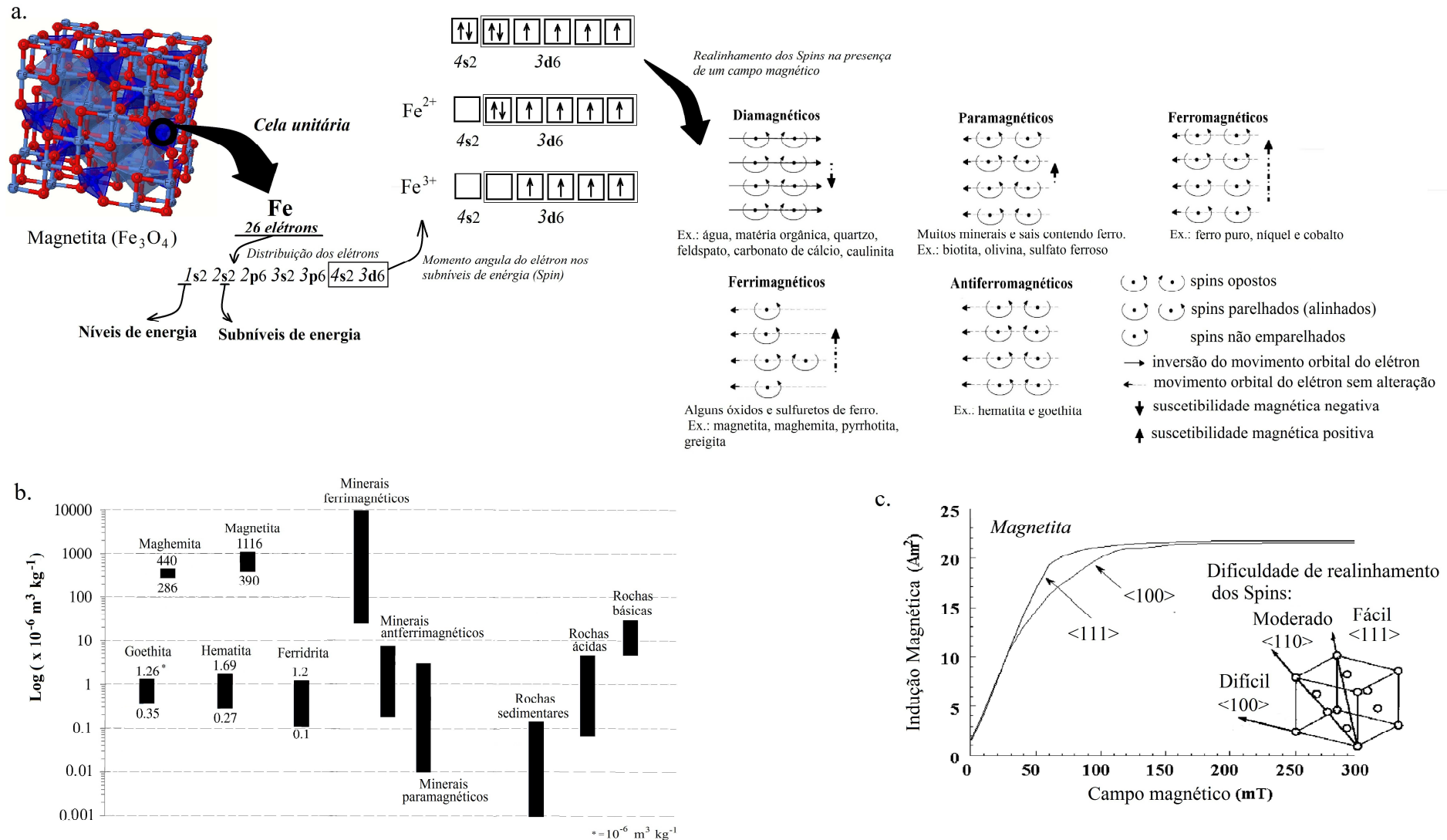


Figura 1.4 Diagrama da organização de elétrons do elemento ferro nas células unitárias do mineral e tipos de suscetibilidade magnética proveniente da rotação dos elétrons (a), intervalo de suscetibilidade magnética para óxidos de ferro puros e rochas (b) (Modificado de DEARING, 1994), variação da suscetibilidade magnética em função da forma e do tamanho do mineral (c) (Modificado de < http://www.irm.umn.edu/hg2m/hg2m_c/Image18.gif >, Universidade de Minnesota, Colégio de Ciência e Engenharia).

Nos solos originados de rochas máficas (ricos em magnetita e maghemita), quando um ímã qualquer é aproximado da superfície do solo, há atração entre suas partículas e o ímã, e o solo prende-se ao ímã. Portanto, a atração magnética pode ser interpretada como ferramenta qualitativa (Figura 1.5).

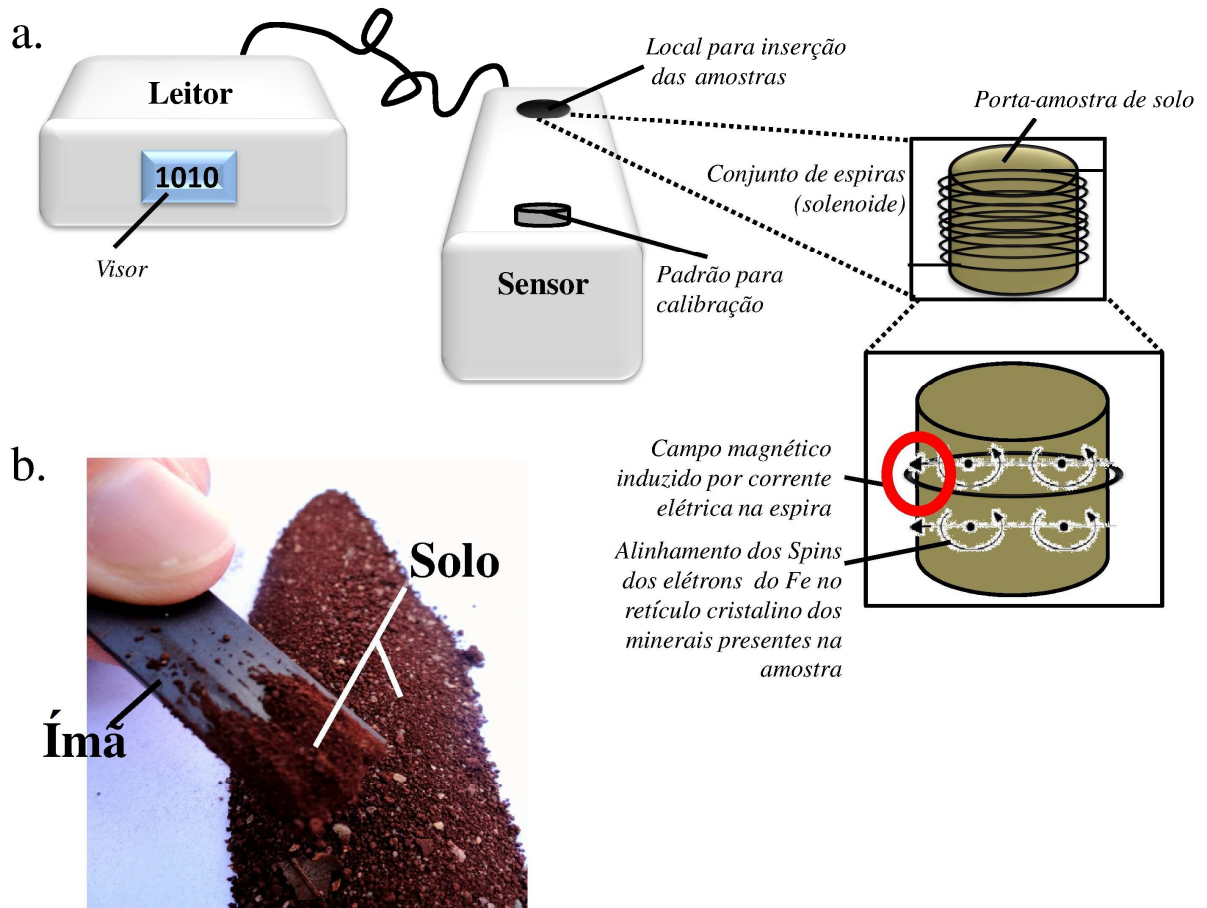
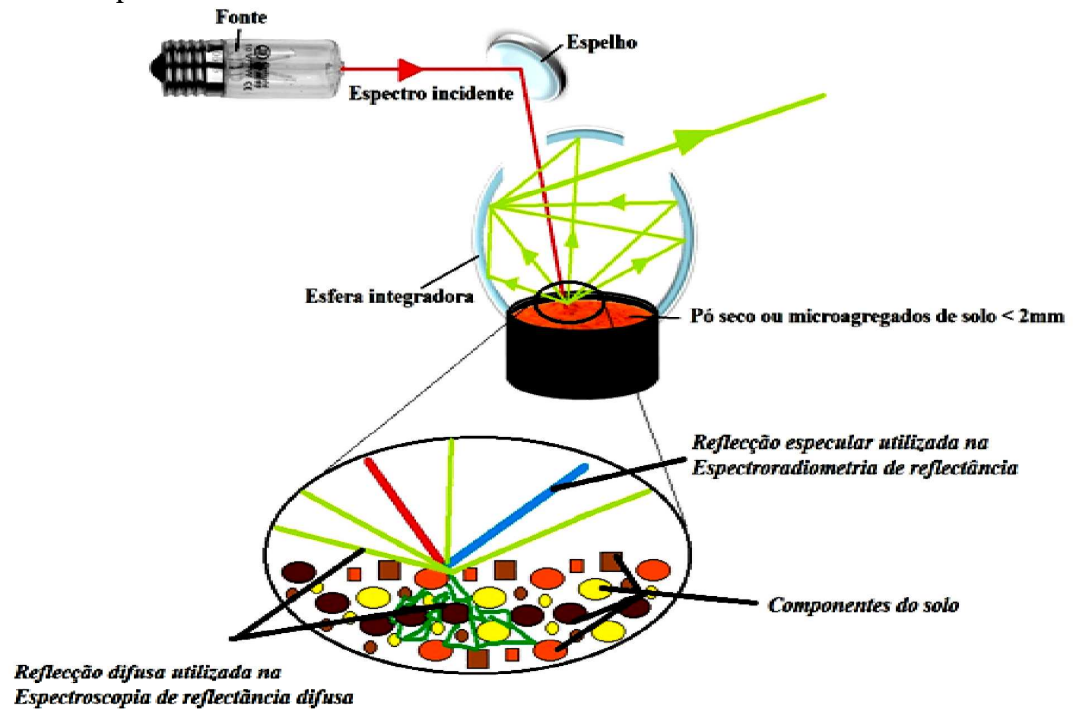


Figura 1.5 Diagrama do princípio de funcionamento do sensor de suscetibilidade magnética (a), foto da atração magnética utilizada como ferramenta qualitativa de campo (b).

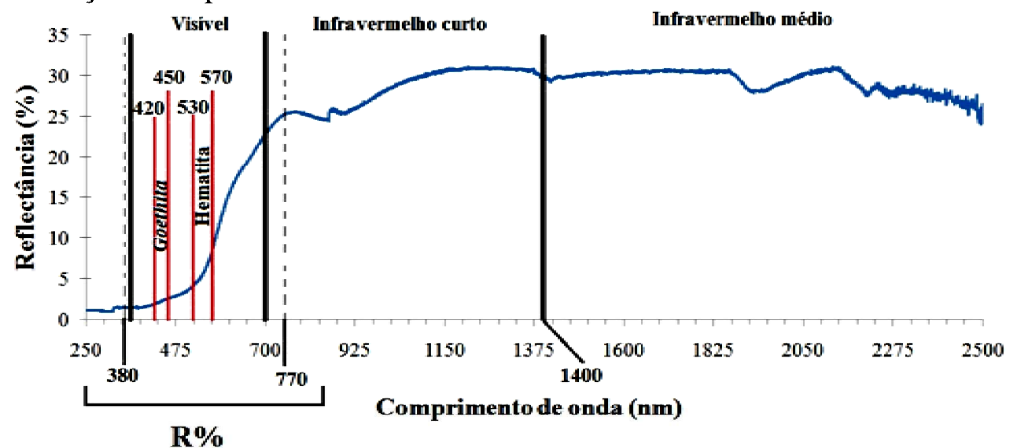
No campo, os mapeadores notaram que, mesmo tratando-se de um solo originado de uma rocha máfica, havia diferentes intensidades de atração magnética. Em alguns locais, a superfície do ímã ficava mais recoberta por partículas de solo e, em outros locais, menos recoberta. Isso inspirou a aplicação da atração magnética como ferramenta quantitativa. Porém, devido à dificuldade de reprodução dos resultados e à baixa exatidão entre os laboratórios para expressar as diferentes interações magnéticas das amostras de solo, a técnica caiu em desuso (REZENDE et al., 1988a,b). Com os avanços dos sensores e de técnicas alternativas na avaliação da interação magnética (CARNEIRO et al., 2003; PREETZ et al., 2008; SIQUEIRA et al., 2010b), o uso da SM como ferramenta auxiliar na caracterização quantitativa da variabilidade de campo (BARRIOS et al., 2012; SANTOS et al., 2013) ganha novas expectativas.

A cor é outro atributo de campo que, devido ao avanço de sensores e de técnicas mais refinadas de quantificação, ganha novas aplicações e perspectivas quanto à caracterização da variabilidade dos solos e de seus atributos. A cor do solo é um indicador seguro da presença de óxidos de Fe e de outras importantes propriedades do solo que covariam com ela (TORRENT; BARRÓN, 1993), bem como propriedades importantes, do ponto de vista pedológico e agrônomo (ALMEIDA et al., 2003; RIBEIRO et al., 2012). A cor pode ser obtida de diferentes maneiras. Em ciências agrárias, o método de obtenção mais comum utiliza a Caderneta de Munsell (MUNSELL COLOR COMPANY, 2000). Essa maneira de determinação da cor é mundialmente utilizada pelos pedólogos e pode causar equívocos na classificação dos solos (CAMPOS; DEMATTÊ, 2004). Neste contexto, o emprego da ERD na determinação dos espectros de cor tem-se mostrado útil para a caracterização qualitativa e mais precisa da cor dos solos (TORRENT; BARRÓN, 1993) (Figura 1.6).

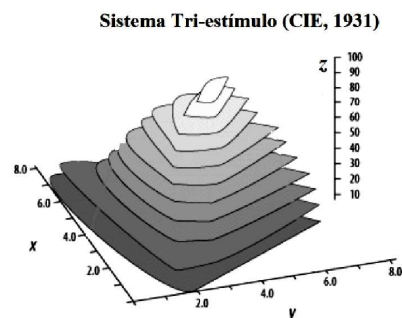
1º Etapa: análise espectral



2º Etapa: seleção do espectro na faixa do visível



3º Etapa: conversão da reflectância para o Sistema de cor Triestímulo (XYZ)



4º Etapa: conversão para o Sistema de cor Munsell

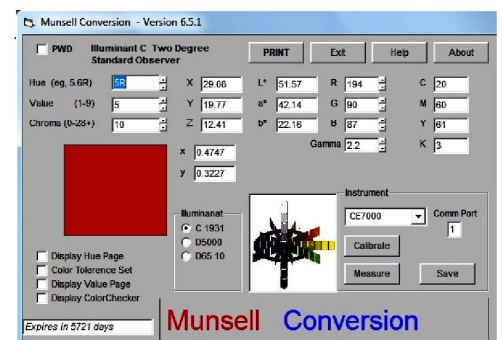


Figura 1.6 Diagrama da obtenção do Sistema de cor Munsell, utilizando a espectroscopia de reflectância difusa.

Independentemente da ferramenta utilizada no delineamento das unidades de mapeamento, cabe ao mapeador verificar quais as melhores opções para atender à demanda do usuário. Conforme relatado por Dalmolin et al. (2004), as informações contidas nos levantamentos de solos dependerão da escala e do objetivo para o qual serão confeccionados.

2.1 DELINEAMENTO DE UNIDADE DE MAPEAMENTO DETALHADO COM BASE NA RELAÇÃO SOLO-PAISAGEM E VARIABILIDADE ESPACIAL DA SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA E COR DO SOLO

Resumo

Diante da atual demanda por informações detalhadas do solo e pela carência de protocolos para identificação de áreas com base em seu padrão de variabilidade, este estudo tem por objetivo delinear unidades de mapeamento detalhado com base na relação solo-paisagem e na variabilidade espacial da suscetibilidade magnética e da cor do solo. A área de estudo tem 380 ha e localiza-se a nordeste do Estado de São Paulo. Foram coletadas 86 amostras em intervalos regulares de 30 m, em uma transeção. Nas laterais da transeção, foram coletadas 150 amostras em intervalos de 159 metros (densidade de um ponto a cada 2,5 ha). Os picos do modelo matemático “Split Moving Windows - SMW” da suscetibilidade magnética (SM), em ambas as profundidades (0,0-0,25 m e 0,25-0,50 m), apresentaram correlação com os picos do teor de argila ($r=0.7$; $P<0,01$), matiz (determinada por espectroscopia de reflectância difusa) (variando entre 0,37; $P<0,05$ a 0,61; $P<0,01$) e NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) para os anos de 2010 e 2011 (variando entre -0,25 a -0,35; $P<0,05$). Os erros dos mapas de variabilidade espacial da SM (6,22-11,85%) foram similares aos erros dos mapas do teor de argila (6,22-14,16%). A intersecção dos picos mais representativos (2° e 5° picos) da SMW com as isolinhas das classes de variabilidade auxiliou no delineamento de três unidades de mapeamento. A proposta de integração de modelos bidimensionais (SMW) e o modelo de paisagem conceitual com os mapas de variabilidade podem auxiliar no delineamento de unidades de mapeamento detalhado com base na relação solo-paisagem e na variabilidade espacial da suscetibilidade magnética.

Palavras-chave: Split Moving Windows, geoestatística, levantamento, série

2.2 Introdução

A demanda por informações detalhadas do solo para auxiliar na tomada de decisões agrícolas e políticas é cada vez maior (DELDEN et al., 2011). Informações detalhadas podem ser utilizadas para balizar a produção sustentável. Pesquisas atuais relatam sobre a necessidade de se desenvolver indicadores detalhados sobre impactos globais do uso e da ocupação do solo (ROCKSTRÖM et al., 2009).

A carência de pedólogos (mapeadores) experientes (DEMATTE et al., 2007), a falta de recursos governamentais (BAZAGLIA FILHO, 2012) e divergência entre mapas de solos propostos por diferentes mapeadores (DELARME LINDA, 2011) agravam o fornecimento deste tipo de informação. As informações sobre o solo, fornecidas por projetos pioneiros, como o RADAM BRASIL (BRASIL, 1981) e o antigo Serviço Brasileiro de Levantamento do Solo (BRASIL, 1960) atendem às necessidades de algumas regiões do Brasil. No entanto, no Estado de São Paulo, este nível de detalhamento não atende à demanda atual do setor agroindustrial. As previsões indicam um aumento nos 15,7% da atual oferta interna de energia brasileira, proveniente da biomassa da cana-de-açúcar (BRASIL, 2012). Isso demonstra a urgência no fornecimento de mapas mais detalhados para subsidiar melhores índices de produção.

Em grandes áreas como o Brasil, Rússia e China, a caracterização e o delineamento detalhado das unidades de mapeamento do solo (entende-se por delineamento o esboço de um limite que separa locais no campo com diferentes características) são difíceis. Dentre as causas está a variabilidade natural dos fatores condicionantes do solo (geologia, formas da paisagem e outros) (LEGROS, 2006). Com o intuito de amenizar esse problema, especialistas da Ciência do Solo articulam o conhecimento acumulado sobre os solos para abordar melhor a geovariabilidade e a pedodiversidade. O objetivo é propor uma alternativa para o déficit de informações detalhadas.

Nos Estados Unidos, foram delineadas as unidades de mapeamento do solo com base nas variações do campo e, posteriormente definidas as unidades taxonômicas (SOIL SURVEY STAFF, 1975). No Brasil, ocorreu o processo inverso. Primeiro, foram definidas as unidades taxonômicas, com limites teóricos para a classifica-

ção dos atributos diagnósticos (cor do solo, saturação por bases, teor de argila, entre outros). Posteriormente, foram feitos os delineamentos das unidades no campo com base nestes limites preestabelecidos. Isso faz com que a unidade taxonômica não coincida com a unidade de mapeamento. Este problema agrava-se em locais que requerem informações detalhadas (BUOL, 1990).

Estudos indicam que uma solução para a definição da unidade de mapeamento e de unidades taxonômicas está na avaliação previa da pedodiversidade (IBÁÑEZ et al., 2009; MINASNY; McBRATNEY, 2010). Outros partem da importância de modelos de classificação numérica (TRANGMAR et al., 1985; MINASNY; McBRATNEY, 2007). Neste caso, a distribuição espacial dos atributos do solo é considerada durante a identificação dos limites entre classes taxonômicas do solo e no fornecimento de informações detalhadas sobre a relação gênese do solo - evolução da paisagem (TRANGMAR et al., 1985; MINASNY; McBRATNEY, 2007). A pedologia denomina essa relação gênese – paisagem como paradigma solo-paisagem (MARCOS, 1982; HUDSON, 1992). A natureza tácita do conhecimento sobre modelos de paisagem, a falta de cursos e de treinamentos sobre o tema, estão dentre as maiores causas da pouca utilização desses modelos no mapa de solos ou atributos de maneira expressiva, como ocorre nos Estados Unidos.

Logo, a compreensão desse paradigma pode ser a base para o delineamento detalhado de unidades de solo (HUDSON, 1992; SWANSON, 1993). Portanto, é preciso que os modelos empíricos já existentes e baseados no conhecimento tácito sejam convertidos em modelos determinísticos, resultando no melhor entendimento das relações de causa e efeito. No Brasil, a antiga Comissão de Solos, do então Serviço Nacional de Levantamento e Conservação dos Solos (BRASIL, 1960), hoje Embrapa - Solos, já mencionava relações implícitas e explícitas entre solo e relevo (VIDAL-TORRADO et al., 2005).

Nesse contexto de evolução dos estudos pedológicos, com base na relação solo-paisagem, destaca-se a sistematização da proposta de trabalho multidisciplinar para estudos de ultradetalhe, denominada análise estrutural da cobertura pedológica. Essa proposta é implementada em duas fases: 1º- análise bidimensional (levantamentos pedológicos perpendiculares às curvas de nível), e 2º- análise tridimensional (utilizando curvas de isodiferenciação em uma dada área – mapas isopléticos)

(BOULET et al., 1982; RUELLAN et al., 1984; BOULET, 1988). Nossa hipótese foi fundamentada na variação da proposta de análise estrutural da cobertura pedológica. Associamos modelos bidimensionais, tanto conceituais (DALRYMPLE et al., 1968; DANIELS et al., 1971; DANIELS; HAMMER, 1992), quanto matemáticos (PEREIRA et al., 1996; CUNHA et al., 2005; MATIAS, 2010), utilizando observações e informações da transeção, aos modelos tridimensionais, conhecidos como modelo digital de elevação (MDE) (MONTGOMERY et al., 2003; HAMMER et al., 1995) e isolinhas dos mapas de krigagem (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989; ROSSI et al., 1992; VIEIRA, 2000).

Nesse tipo de proposta, são dois os fatores limites: computacional e o número de amostras requeridas. Muitos trabalhos são inviabilizados pelo número de amostras (McBRATNEY et al., 2002; DEMATTÊ et al., 2007). Assim, apesar da qualidade, apresenta elevado custo de tempo, recursos e equipe numerosa para sua realização (LAGACHERIE et al., 1995). Com o avanço computacional em Ciências do Solo (HASTIE et al., 2001; McBRATNEY et al., 2003) e a utilização da suscetibilidade magnética (SM) e a cor do solo, determinada por espectroscopia de reflectância difusa, algumas das limitações da integração de modelos bidimensionais e tridimensionais podem ser resolvidas. A SM e a cor são atributos covariativos dos fatores e dos processos de formação (MAHER; THOMPSON; 1999; TORRENT; BARRÓN, 1993) e com representatividade de atributos físicos, químicos e mineralógicos do solo (ex.: teor de argila, CTC e teor de hematita) (VEROSUB; ROBERTS, 1995; TORRENT et al., 2007; SIQUEIRA et al., 2010b).

Assim, este estudo tem por objetivo delinear unidades de mapeamento detalhado com base na relação solo-paisagem e na variabilidade espacial da suscetibilidade magnética e da cor do solo.

2.3 Material e métodos

2.3.1 Localização, caracterização da área e esquema de amostragem

A área de estudo tem 380 ha e localiza-se a nordeste do Estado de São Paulo, no Município de Guataporã (Figura 2.1a), com altitude máxima de 600 m. As coordenadas geográficas do centro da área são 21° 28' 40" S e 48° 01' 38" O. Segundo a classificação de THORNTHWAITE (1948), o clima local pode ser definido como B1rB'4a', Tipo Mesotérmico Úmido, com pequena deficiência hídrica, sendo a evapotranspiração de verão menor que 70% da evapotranspiração anual.

A vegetação natural era constituída por floresta tropical subcaducifolia. O uso atual é cultivo de cana-de-açúcar com sistema de colheita mecanizada, há mais de 10 anos. As variedades plantadas na área são SP87-365, SP83-2847 e RB 925345. A área está inserida na província geomorfológica do Planalto Ocidental Paulista. O material de origem está relacionado à transição Basalto do Grupo São Bento Formação Serra Geral, Depósito Colúvio-Eluvionar e Depósito Aluvionar (IPT, 1981; GEO-BANK, 2012) (Figura 2.1d). Foram feitas visitas técnicas na área para comprovar as informações geológicas. O mapa de solos da área está na escala 1:12.000 e registra a ocorrência do Latossolo Vermelho eutrófico (LVef), Latossolo Vermelho distrófico (LVdf), Latossolo Vermelho distrófico (LVd) e Latossolo Vermelho - Amarelo distrófico (LVAd) (Figura 2.1e). Os valores de Fe_2O_3 variaram de 200 a 20 g kg^{-1} do topo (590 m) até a parte mais baixa da encosta (520 m).

Foram identificados quatro ambientes de produção: A, B, C e D (Figura 2.1f). O mapa de ambiente de produção para cana-de-açúcar (considerado levantamento técnico) é elaborado com base no conhecimento das características inerentes a cada solo (levantamento taxonômico, Figura 2.1e). No mapeamento dos ambientes de produção, são levados em conta fatores edáficos e potencial de produção agrícola da cana-de-açúcar.

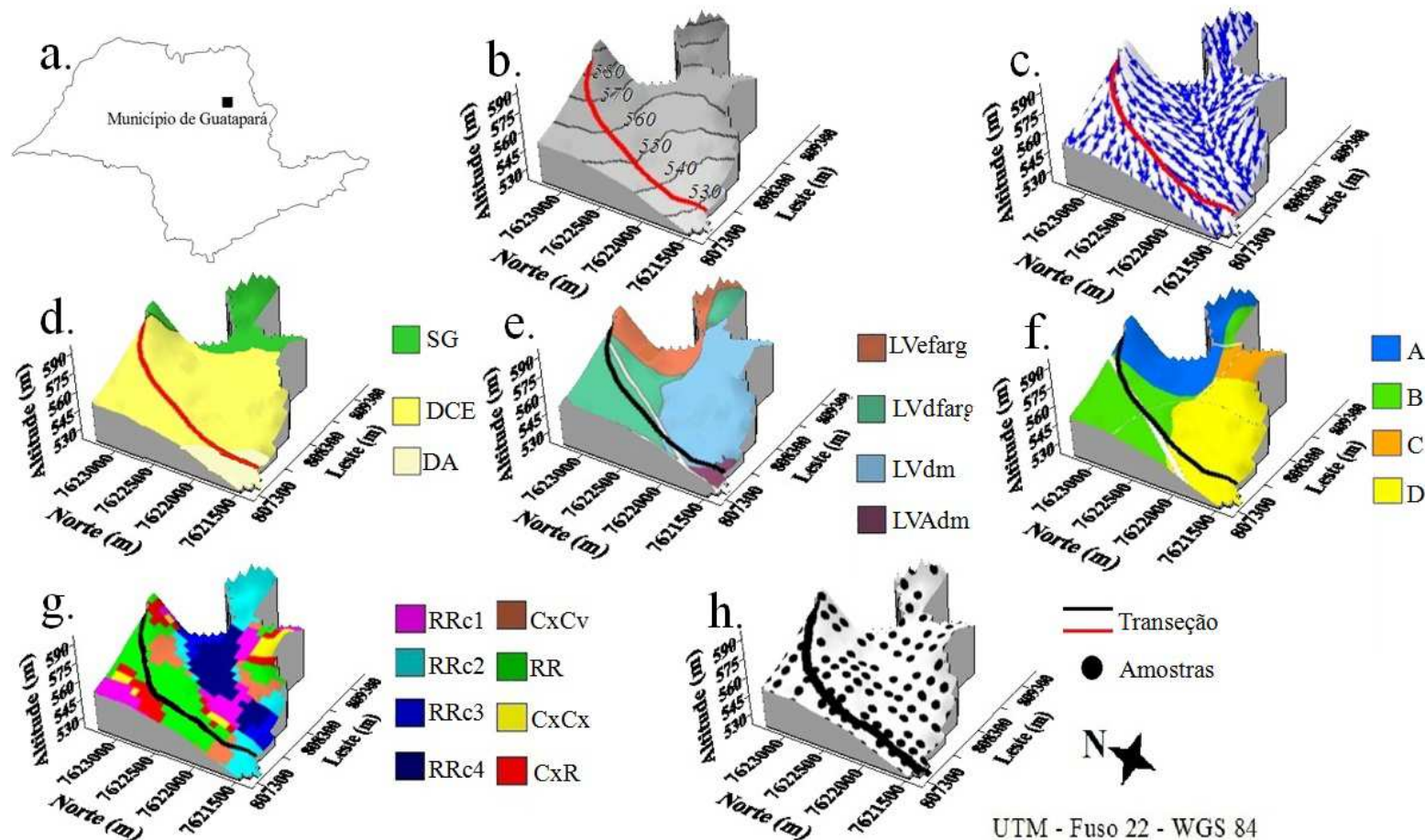


Figura 2.1 Localização da área de estudo (a), modelo digital de elevação com as cotas altimétricas (b), simulação do fluxo superficial de água (c), mapa geológico na escala 1:500.000 (d) (SG – Serra Geral; DCE – Depósito Colúvio-Eluvionar; DA – Depósito Aluvionar); mapa de solos na escala 1:12.000 (e) (LVefarg – Latossolo Vermelho eutroférico textura argilosa; LVdfarg – Latossolo Vermelho distroférico textura argilosa; LVdm – Latossolo Vermelho distrófico textura média; LVAdm – Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico textura média), mapa de ambiente de produção para cana-de-açúcar (f) (A – produtividade esperada > 95 toneladas de colmos ha^{-1} ; B - produtividade esperada entre 90-95 toneladas de colmos ha^{-1} ; C - produtividade esperada entre 85-90 toneladas de colmos ha^{-1} ; D - produtividade esperada entre 85-80 toneladas de colmos ha^{-1}), compartimentos geomorfométricos (g) (RRc – Retilíneo-retilíneo com concavidade; CxCv – Convexo-Côncavo; RR – Retilíneo-retilíneo; Cx-Cx – Convexo -convexo; CxR – Convexo-retilíneo) e pontos amostrados (h) (86 pontos na tranção e 150 pontos na área de 380 ha).

Foram identificados quatro ambientes de produção: A, B, C e D (Figura 2.1f) (A – produtividade esperada > 95 toneladas de colmos ha^{-1} ; B - produtividade esperada entre 90-95 toneladas de colmos ha^{-1} ; C - produtividade esperada entre 85-90 toneladas de colmos ha^{-1} ; D - produtividade esperada entre 85-80 toneladas de colmos ha^{-1}). O mapa de ambiente de produção para cana-de-açúcar (considerado levantamento técnico) foi elaborado com base no conhecimento das características inerentes a cada solo (levantamento taxonômico, Figura 2.1e). No mapeamento dos ambientes de produção, são levados em conta fatores edáficos e potencial de produção agrícola da cana-de-açúcar.

Com o auxílio do MDE (Figura 2.1b), simulação do fluxo superficial de água (Figura 2.1c) e observações de campo (Figura 2.2), foi identificada uma transeção de 2.508 metros a partir do topo da vertente, seguindo o espigão até o sopé, no sentido do decaimento mais suave do declive (Figura 2.1). Para a identificação dos limites conceituais de campo, foram feitas observações baseadas nas mudanças ao longo da vertente (DALRYMPLE et al., 1968) (Figura 2.2b). Foram identificados 6 compartimentos no campo: topo, meia-encosta, ombro, encosta, sopé de transporte e sopé de deposição.

Além dos compartimentos da paisagem identificados pelo modelo conceitual de Dalrymple et al. (1968), também foram identificados compartimentos geomorfológicos segundo método proposto por Vasconcelos et al. (2012) (Figura 2.1g). Este método tem por objetivo diminuir a subjetividade da identificação de compartimentos pelos modelos conceituais de paisagem, podendo ser aplicado em diversas escalas.

Foram utilizadas informações da missão “Shuttle Radar Topography Mission” (SRTM) com resolução horizontal de 90 metros e precisão vertical da ordem de 5 metros. Para detectar possíveis valores ruidosos nas informações SRTM, foi aplicado o filtro de mediana, subtração do resultado do filtro pelo dado original, retirada dos valores com variação de 10 m decorrente da falta de informação e interpolação pelo método Topogrid. A partir do SRTM, foram geradas seis imagens relativas às seguintes curvaturas de perfil: vertical, longitudinal, transversal, mínima e máxima. As formulações para a obtenção das curvaturas podem ser encontradas no trabalho de Vasconcelos et al. (2012). As 5 imagens de curvatura do terreno foram unidas, estabelecendo-se para cada célula um espectro geomorfométrico, que permitiu não

só caracterizar o ambiente em que está inserido, mas também a intensidade da forma (ex.: na Figura 2.1g, a intensidade da concavidade vai aumentando da forma RRc1 para RRc4).

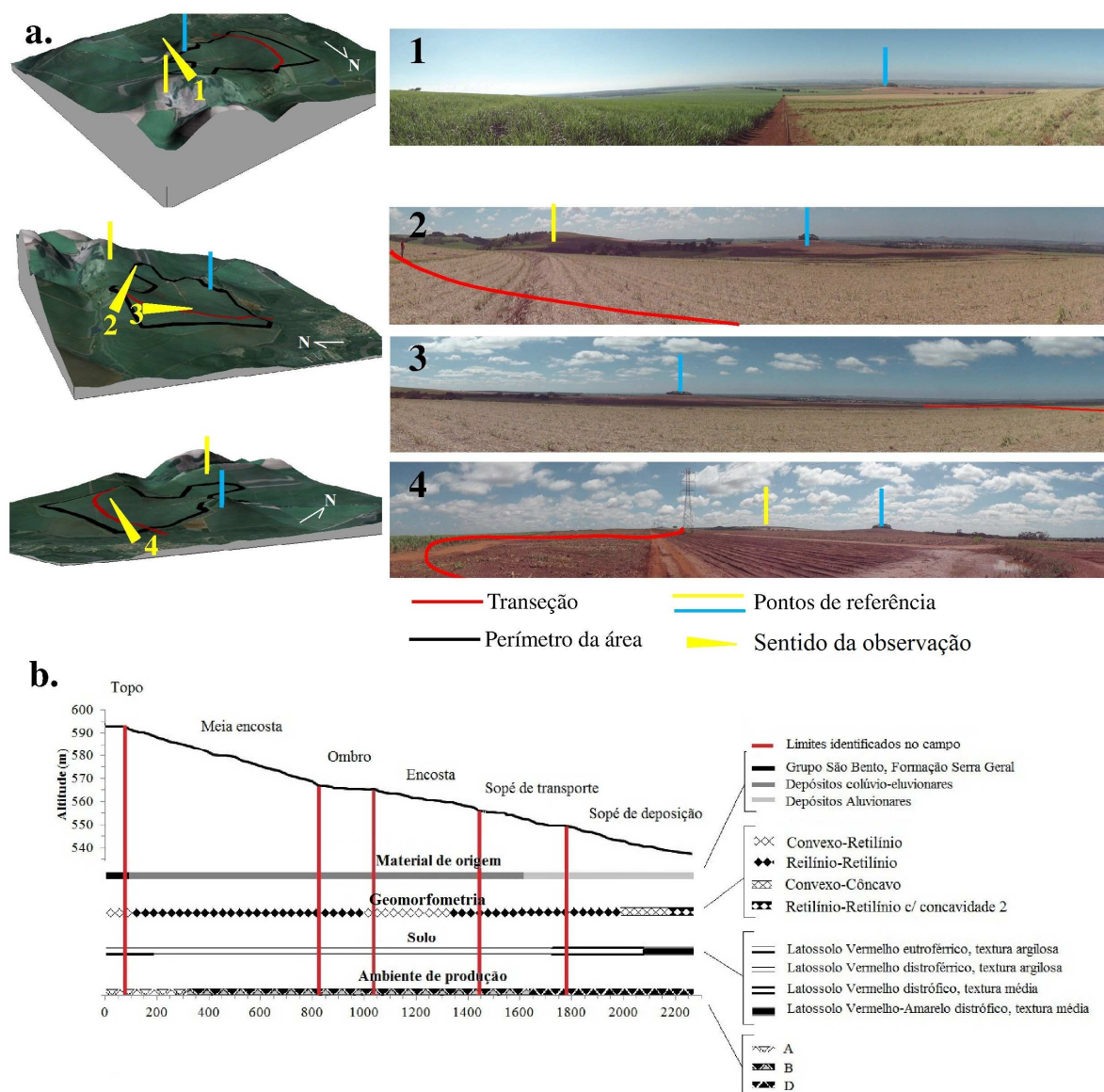


Figura 2.2 Caracterização da paisagem (a), perfil altimétrico, limites de campo reais e conceituais (b).

As assinaturas geomorfométricas foram normalizadas considerando a divisão pelo seu valor máximo absoluto para padronizar os intervalos entre -1 e 1. O resultado da normalização proporciona um maior contraste entre as curvas do terreno e um melhor fatiamento das classes: -1 a -0,6 côncavo -côncavo; -0,6 a -0,2 côncavo-

-retilíneo; -0,2 a 0,2 retilíneo-retilíneo; 0,2 a 0,6 convexo-retilíneo; 0,6 a 1 convexo-convexo.

Ao longo da transeção, locada sobre o espigão, foram coletadas 86 amostras em intervalos regulares de 30 m. Nas laterais da transeção foram coletadas 150 amostras em intervalos de 159 metros (densidade de um ponto a cada 2,5 ha) (Figura 2.1h). Nestes locais, foram coletadas amostras de solo com trado, nas profundidades de 0,00-0,25 e 0,25-0,50 m.

Essas são as profundidades utilizadas para o manejo do solo no setor sucroenergético paulista. Marques Jr. e Lepsch (2000) relatam que resultados baseados na variabilidade horizontal e vertical dos solos, até a profundidade de 0,8 m, podem ser utilizados como informação auxiliar para pedologia. Cunha et al. (2005) confirmam a representatividade dessa camada (0,0-0,8 m) para estudos de gênese de Latossolos sobre Basaltos do Grupo São Bento, Formação Serra Geral. Berquó et al. (2004), Matias (2006) e Camargo (2013) confirmam a baixa variabilidade vertical da suscetibilidade magnética e atributos físicos, químicos e mineralógicos em Latossolos provenientes do Basalto.

2.3.2 Análise laboratorial

2.3.2.1 Caracterização do solo

Nas amostras coletadas, foram determinadas a análise granulométrica pelo método da pipeta, utilizando uma solução de NaOH 0,1 mol L⁻¹ como dispersante químico, e agitação mecânica em aparato de baixa rotação, por 16 horas, seguindo metodologia preconizada pela EMBRAPA (1997).

O pH foi determinado potenciometricamente, utilizando-se da relação 1:2,5 de solo: água. Cálcio, magnésio, potássio e o fósforo disponível foram extraídos utilizando-se do método da resina trocadora de íons (RAIJ et al., 2001). A acidez trocável (Al³⁺) foi determinada seguindo a metodologia de Raij e Zullo (1977), e o carbono orgânico, segundo EMBRAPA (1997). A soma de bases (SB), a capacidade de troca de cátions do solo (CTC) e o V% foram calculados a partir dos valores das bases e H+Al.

O ferro total (Fe₂O₃) foi determinado após digestão com H₂SO₄ 1:1, para Al₂O₃ e Fe₂O₃, seguido de dissolução alcalina para SiO₂, segundo o método descrito pela EMBRAPA (1997). A caracterização da goethita e da hematita por meio da difração de raios-x (DRX) foi feita após tratamento da fração argila, segundo o procedimento descrito em Kämpf e Schwertmann (1982). O diâmetro médio do cristal (DMC) foi calculado a partir da largura à meia-altura (LMA) e da posição dos reflexos dos minerais, utilizando a equação de Scherrer (SCHULZE, 1984). A razão caulinita/(caulinita + gibbsita) – [Ct/(Ct + Gb)] foi calculada, empregando-se as áreas dos reflexos Ct (001) e Gb (002).

A suscetibilidade magnética (SM) foi determinada na TFSA (terra fina seca ao ar), no equipamento Bartington MS2, acoplado ao sensor Bartington MS2B. A avaliação foi feita em baixa frequência (0,47 kHz) (DEARING, 1994; COSTA et al., 1999). Segundo estes autores, as medições de dupla frequência (alta – 4,7 kHz e baixa) devem ser utilizadas em estudo de caráter qualitativo para indicar a presença de minerais magnéticos de domínio simples e múltiplos. No caso de única leitura, para obtenção de resultados mais precisos, é indicado o uso da baixa frequência (BARTINGTON, 2013).

Para a obtenção dos espectros de reflectância difusa, as avaliações foram feitas nas amostras da profundidade de 0,00-0,25 m utilizando o sensor de laboratório Lambda 950 com esfera integradora de 80 mm. Foi moída aproximadamente 0,5 g de TFSA em ágata até obtenção de coloração constante. O conteúdo foi colocado em porta-amostra com espaço cilíndrico de 16 mm. Os valores de reflectância foram determinados em espectrofotômetro equipado com esfera integradora de 80 mm, a cada 1 nm, com tempo de integração de 0,2 segundo e varredura no intervalo de 380 a 780 nm. Após a obtenção dos espectros, foram determinados os valores de triestímulo XYZ definidos pela Comisión Internacional de L'Eclairage-CIE (WYSZECKI; STILES, 1982). A partir das coordenadas XYZ, foram deduzidos os valores Munsell de matiz, valor e croma, utilizando o programa Munsell Conversion versão 6.4, conforme Barrón et al. (2000) e Viscarra Rossel et al. (2010) (Figura 1.6).

2.3.2.2 Caracterização da planta

Foi avaliado o histórico de 3 anos (2009, 2010 e 2011) da produção de cana-de-açúcar, expresso em toneladas de colmos ha^{-1} (TCH). Os açúcares redutores totais (ART) foram avaliados em 3 pontos (compostos por subamostras) representativos das unidades de mapeamento encontradas: a unidade de mapeamento I, composta por 6 subamostras representativas de 31,50 ha; a unidade II, por 13 subamostras representativas de 76,98 ha, e a unidade III, por 13 subamostras representativas de 185,05 ha. TCH e ART foram determinados segundo a metodologia proposta pelo CONSECAN (2003). Estes atributos da cana-de-açúcar têm grande importância no controle industrial da fabricação de açúcar e de álcool, principalmente no que se refere à melhoria da eficiência do processo industrial, ao pagamento da cana-de-açúcar em função do teor de sacarose e à avaliação do estado de maturação da cana.

O índice de vegetação foi determinado para cada ponto amostrado na transeção e na malha de amostragem, utilizando o cálculo de NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Os valores de NDVI foram calculados após transformação radiométrica (CHANDER; MARKHAM, 2003) e correção atmosférica (ZULLO JR., 1994). Foram utilizadas imagens do satélite LANDSAT 5 TM disponíveis gratuitamente no

site do INPE <<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>>. As imagens são referentes ao mês de março dos anos de 2009, 2010 e 2011, com resolução de 30 x 30 m. Para retirar o efeito da variabilidade temporal, de diferentes estádios de vegetação e de variedades de cana-de-açúcar foi feita a padronização das informações para o período dos 3 anos avaliados (equação 1).

$$NDVI_{iy} = (NDVI_{iy} - NDVI_{médio}) / \sigma, \quad (1)$$

em que, $NDVI_{iy}$ é o valor de NDVI para o ano i no o ponto y ; $NDVI_{médio}$ é valor médio de NDVI para os n anos no ponto y , e σ é o desvio-padrão do NDVI de n anos no ponto y . A análise dos dados de NDVI foi feita com os resíduos dos dados padronizados.

2.3.3 Análise dos dados

2.3.3.1 Análise bidimensional

Para validar os limites dos compartimentos da paisagem, identificados no campo com base no modelo conceitual de segmentos de vertente, foi feita a análise "Split Moving Windows" (SMW) (PEREIRA et al., 1996; CHOESINet al., 2001; CUNHA et al., 2005; MATIAS, 2010). O SMW foi feito a partir dos resultados do teor de argila, SM, V%, matiz determinado por ERD e NDVI das 86 amostras coletadas na transeção. Essa análise é baseada em cálculos estatísticos de dissimilaridades entre sequências de grupos de pontos amostrais coletados em sequência na transeção. Dessa maneira, são identificados com precisão os limites entre áreas com diferentes padrões de homogeneidade dos atributos do solo (WEBSTER, 1973). Primeiramente, é escolhido um conjunto com "n" pontos, denominado "Janela". Essa "Janela" é então "movimentada" consecutivamente, do início da transeção até o fim da transeção, ponto a ponto. Em cada nova posição da transeção, a "Janela" é dividida em duas parte, sendo calculadas e comparadas as médias das duas "Janelas". Essas comparações de médias são feitas usando-se a estatística t. O valor destes testes é colocado em um gráfico (valor da Estatística t versus distância) (Figura 2.3).

O comprimento da "Janela" pode ser determinado por meio da análise de autocorrelação, utilizando os atributos originais (WEBSTER, 1973, 1978). O outro

parâmetro é denominado Índice de Mullion (BERG, 1988). Consiste na distância prefixada entre as duas partes da "Janela". No gráfico gerado, os maiores picos correspondem a valores mais elevados da Estatística t, que indicam os limites matemáticos entre áreas com diferentes variações dos atributos do solo.

O cálculo da Estatística t é dado pela Equação (2):

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}, \quad (2)$$

em que, $\bar{x}_1$ e $\bar{x}_2$ são as médias amostrais das duas "Janela" (n_1 e n_2); S_p é a estimativa combinada do desvio-padrão comum, dado pela equação (3).

$$S_p = \frac{(n_1 - 1)S_1 + (n_2 - 1)S_2}{n_1 + n_2 - 2}, \quad (3)$$

em que, S_1 , S_2 , n_1 e n_2 são os desvios-padrão e os tamanhos amostrais das duas "Janela" previamente estabelecidas, respectivamente (Figura 2.3). Neste estudo, foram utilizadas "Janela" de 20 observações e Mullion de 2 observações. Para verificar o grau de associação dos resultados de SMW dos diferentes atributos, foi feita a correlações de Pearson.

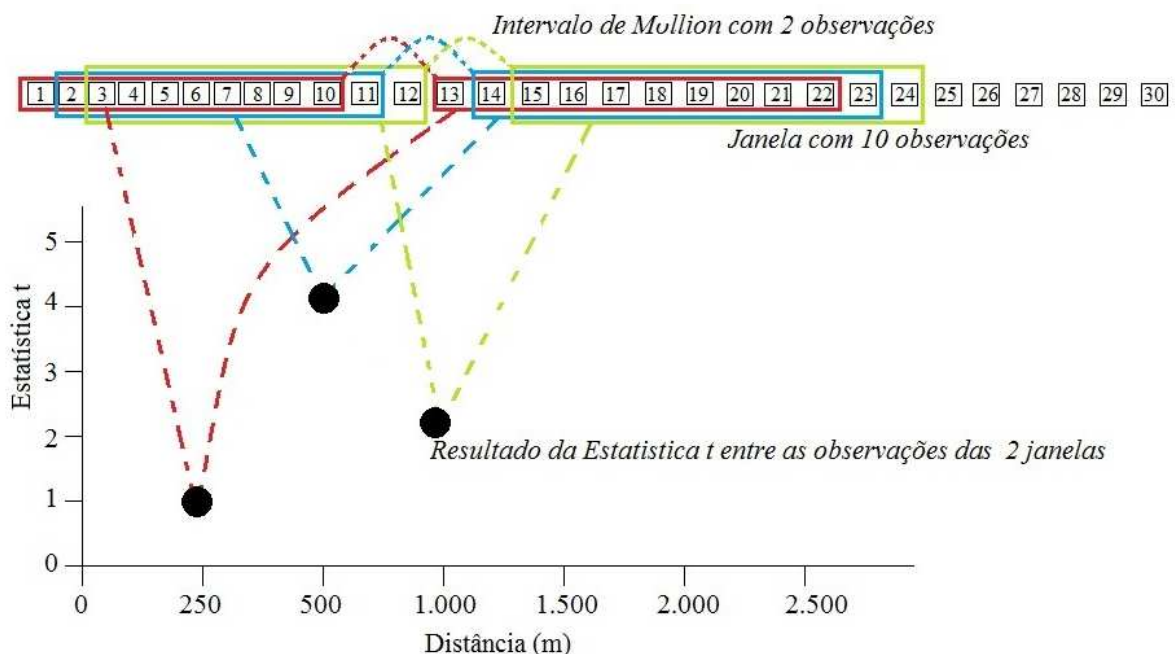


Figura 2.3 Esquema do funcionamento da análise "Split Moving Windows" (SMW) com uma "Janela" de 10 observações e intervalo de Mullion com 2 observações.

Este tipo de abordagem limita-se à compreensão bidimensional dos limites de campo. Para compreender a extensão destes limites na paisagem (bilateralidade), é necessário um enfoque tridimensional do *continuum* da pedosfera (HALL, 1983; GESSLER et al., 1996). Dessa maneira, a análise da cobertura pedológica ocorreu em duas fases: análise bidimensional (validação dos limites conceituais de campo pelo SMW) e análise tridimensional (extrapolação dos limites matemáticos do SMW para as laterais da transeção, utilizando as isolinhas dos mapas de variabilidade espacial) (Figura 2.4).

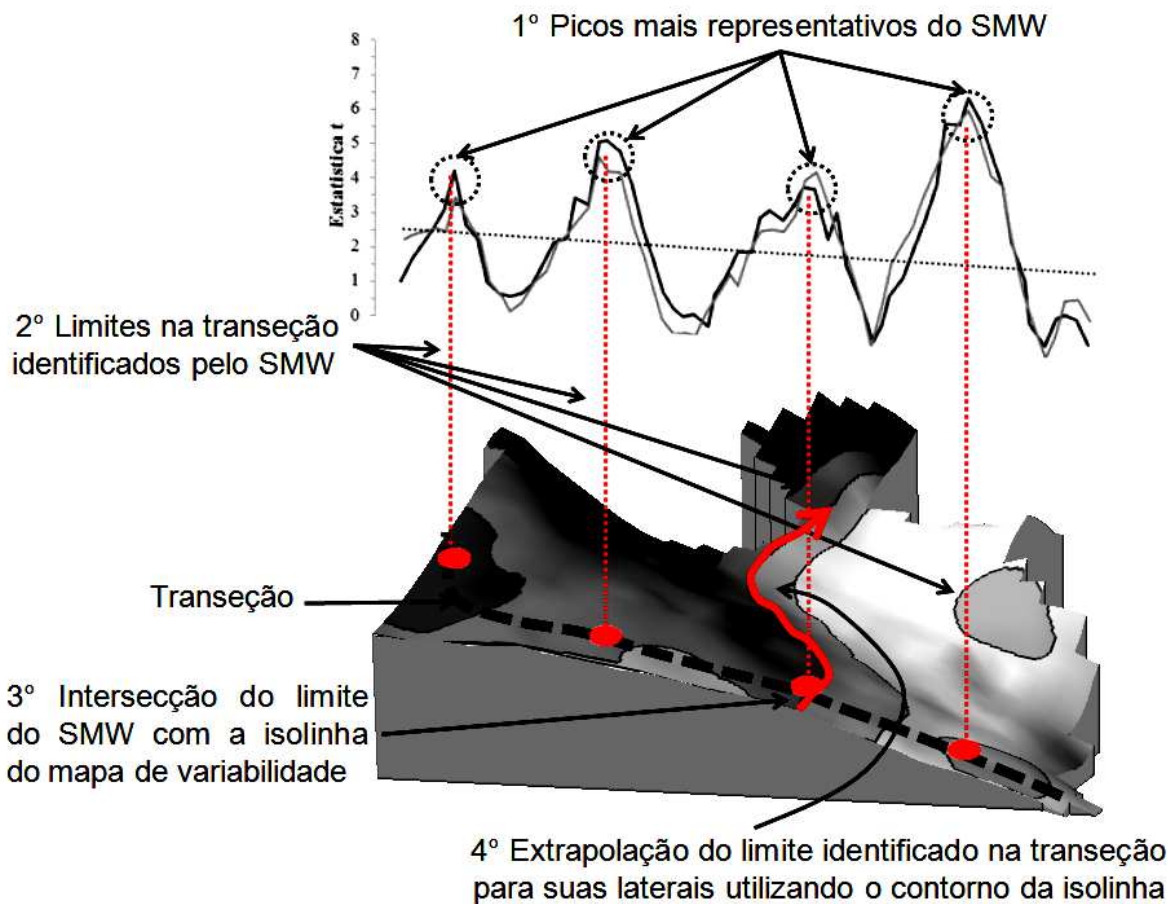


Figura 2.4 Diagrama representando a integração dos limites matemáticos encontrados pela análise "Split Moving Windows" (SMW) e isolinhas dos mapas de variabilidade espacial.

2.3.3.2 Análise tridimensional

Foram testadas diferentes classes de variabilidade (Figuras 2.5b1, 2.5b2, 2.5b3, 2.5b4) para comparação com os picos da SMW. Foram escolhidas as isolinhas com maior potencial de representação da variabilidade contínua ao longo da paisagem (Figura 2.5c).

Esse processo é repetido para diferentes atributos do solo. Após a escolha das isolinhas com maior representatividade (Figura 2.5d), foi feito o delineamento da unidade de mapeamento (Figura 2.5e). Ressalta-se que, durante a escolha da isolinha de maior representatividade dois pontos são importantes: a operacionalidade de execução do delineamento e a aplicabilidade para o usuário.

A modelagem do variograma experimental seguiu os princípios estabelecidos pela hipótese intrínseca (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989). O variograma experimental foi determinado por meio do cálculo da semivariância em função da distância de separação entre as 116 amostras coletadas na malha de amostragem (Equação 4).

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2, \quad (4)$$

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 .

A escolha do modelo ajustado aos variogramas foi baseada no coeficiente de determinação (R^2) e nos parâmetros, coeficientes linear (a) e angular (b), obtidos nos procedimentos de validação cruzada (VIEIRA, 2000). Na validação cruzada, cada valor observado é retirado e, posteriormente, estimado, utilizando os parâmetros do modelo ajustado e os valores observados nas amostras vizinhas.

O erro relativo dos mapas de distribuição espacial foi analisado por meio do “relative root mean square error” (RRMSE) (Equação 5) (LI; HEAP, 2008). A vantagem deste método está em sua praticidade de comparação dos mapas de diferentes atributos. A modelagem do variograma foi feita com 116 pontos e o cálculo do RRMSE com 40 pontos.

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

em que, n é o número de observações; p_i é o valor estimado para o ponto i , e o_i é o valor real do atributo no ponto i .

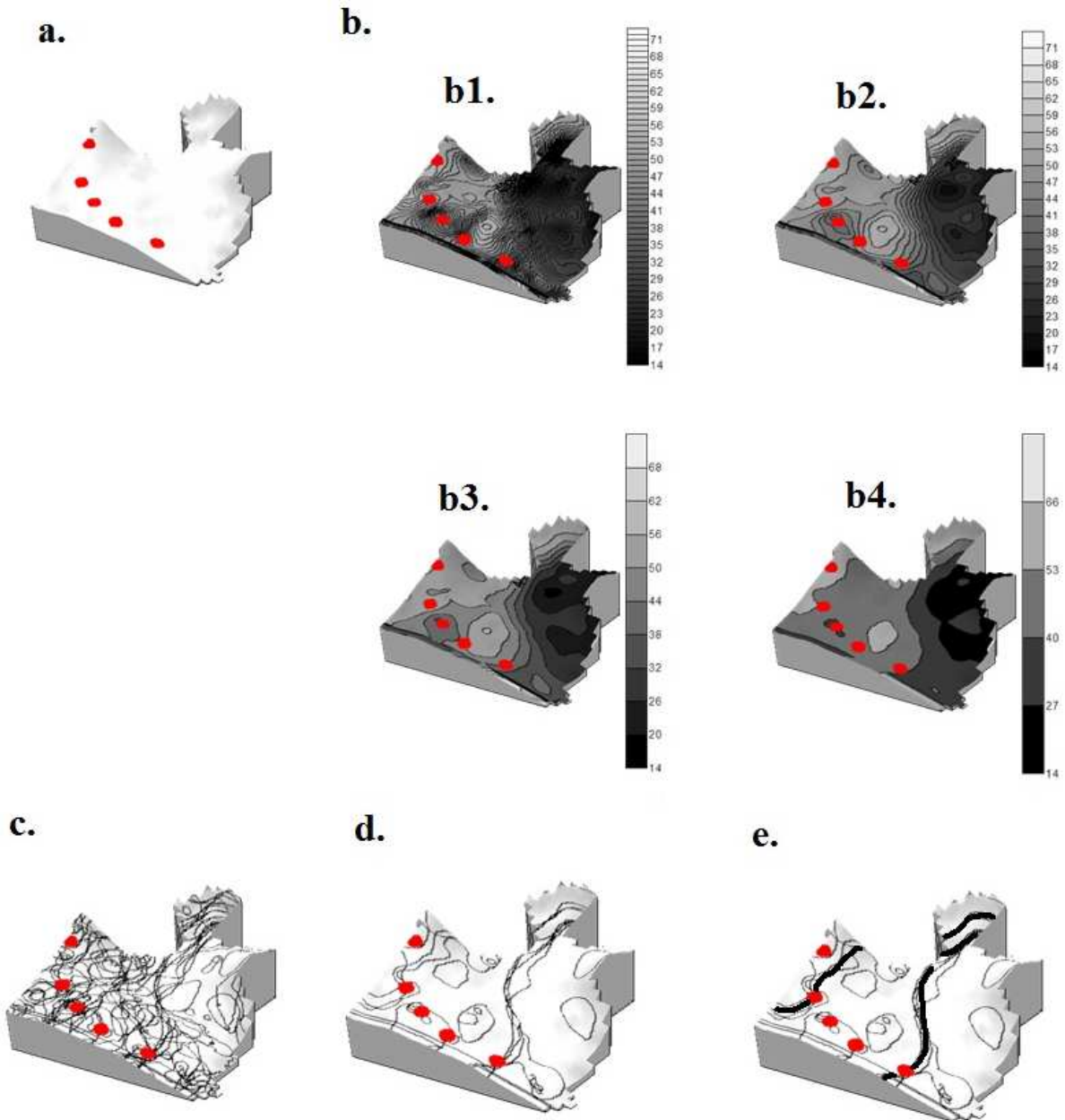


Figura 2.5 Diagrama da interação do modelo bidimensional (SMW) com modelo tridimensional. (a) validação dos limites conceituais de campo pelos limites matemáticos do “split moving windows” (SMW), ●- picos do SMW com maior representatividade, (b) definição da classe de variabilidade com base na interseção da isolinha com os picos do SMW, (c) sobreposição das isolinhas representativas dos diferentes atributos estudados, (d) seleção das isolinhas com maior continuidade espacial, (e) delineamento da unidade de mapeamento com controle da variabilidade.

2.4 Resultados e discussão

Os limites dos compartimentos identificados no campo, segundo o modelo conceitual, foram topo/meia-encosta aos 75 m, meia-encosta/ombro aos 825 m, ombro/encosta 1.025 m, encosta/sopé de transporte aos 1.440 m e sopé de transporte/sopé de deposição aos 1.775 m. O resultado do SMW mostra que existem cinco picos bem expressos: 1° a 150 m; 2° a 675 m; 3° a 1.075 m; 4° a 1.375 m e 5° a 1.825 m. Os resultados do SMW (2°, 3° e 4° pico) indicam a existência de diferentes compartimentos em locais considerados homogêneos, mesma classe de solo e mesmo ambiente de produção (Figura 2.6a). Isso denota a possibilidade de refinamento e atualização dos compartimentos já existentes. Boughton et al. (2006) observaram resultados semelhantes em uma paisagem considerada homogênea, confirmando que essa técnica é bastante segura, podendo ser utilizada para auxiliar na discriminação dos limites de processos pedogeomórficos e ambientais.

A correlação entre os resultados do SMW indica que existem diferentes graus de associações entre os atributos do solo, planta e relevo. Tiveram correlação com a altitude SM na profundidade de 0,00-0,25 m ($r=-0,29$; $P<0,05$) e saturação por bases em ambas as profundidades ($r=-0,30$; $P<0,05$). A SM, de ambas as profundidades, apresentou correlação com teor de argila ($r=0,7$; $P<0,01$), matiz (variando entre 0,37; $P<0,05$ a 0,61; $P<0,01$) e NDVI (variando entre -0,25; $P<0,05$ a -0,35; $P<0,05$). Isso mostra que existe uma concordância entre as causas de variação ao longo da vertente. E que os limites de campo do modelo conceitual e a SM, covariativa dos outros atributos estudados, são sensíveis a estas causas.

Comparando os picos do SMW com os compartimentos geológicos e geomorfométricos (Figura 2.6a), observamos que a transição geológica está próxima do 1° pico, enquanto as transições geomorfométricas estão próximas do 1°, 3° e 4° picos. A maior parte das pesquisas pedológicas só consegue elucidar adequadamente questões relacionadas à distribuição espacial dos solos a partir de uma prévia compreensão da paisagem como um todo, considerando os materiais geológicos e a paisagem (VIDAL-TORRADO et al., 2005).

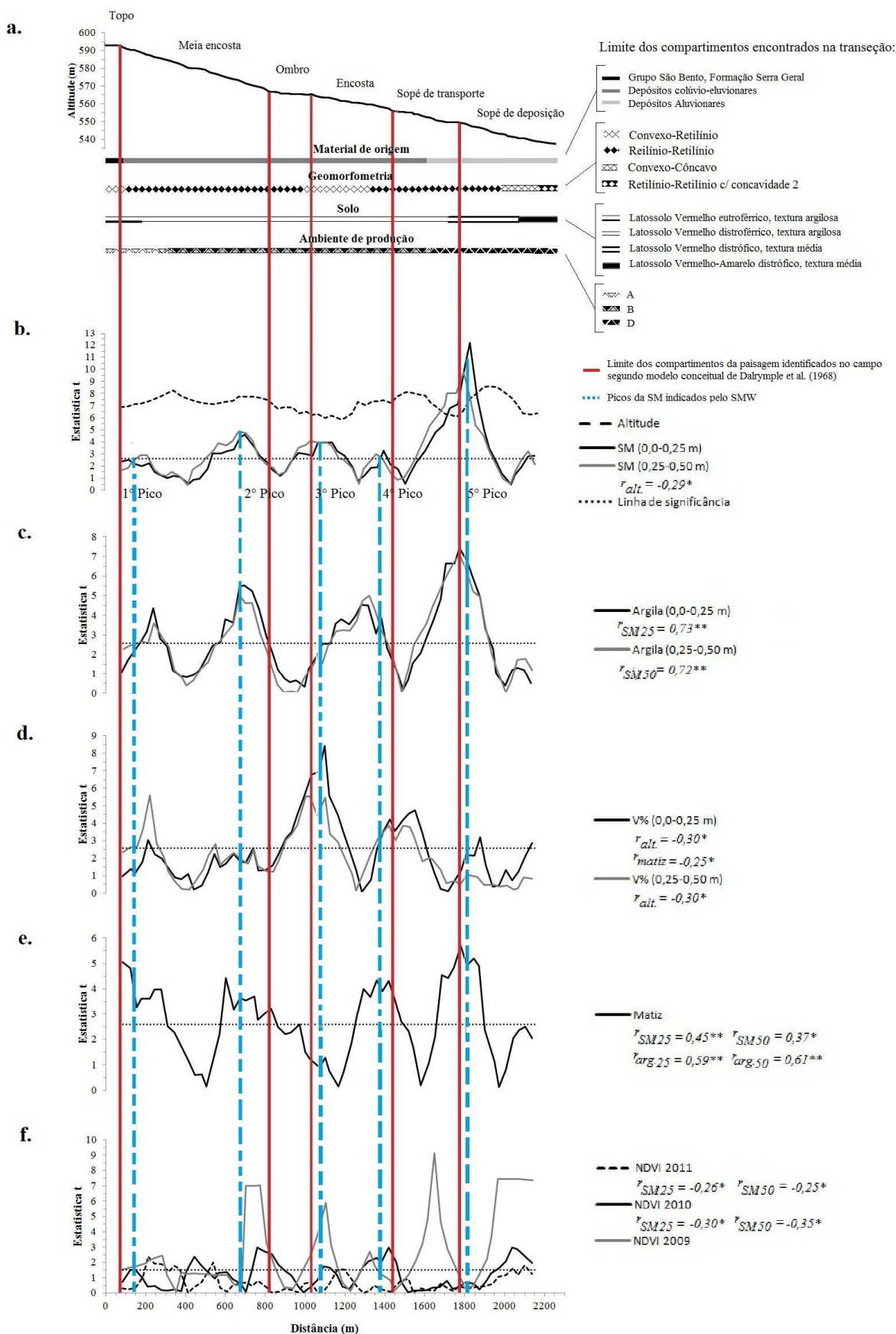


Figura 2.6 Resultado da análise “Split Moving Windows” (SWM) e correlação entre os valores da Estatística t para altitude, suscetibilidade magnética (SM), saturação por bases (V%), matiz (determinado por espectroscopia de reflectância difusa), NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) para os anos de 2009, 2010 e 2011 ao longo da transeção com pontos espaçados a 30 m.

A proximidade dos limites de campo com os picos da análise SMW indica que o modelo conceitual de Dalrymple et al. (1968) pode ser utilizado como ferramenta auxiliar na identificação dos limites entre áreas com diferentes padrões de variação. Apesar de os modelos conceituais (DALRYMPLE et al., 1968; DANIELS et al., 1971; DANIELS; HAMMER, 1992) serem úteis na explicação de processos atuantes ao longo da vertente, são pouco utilizados pelo caráter tácito (HUDSON, 1992; SWANSON, 1993).

Uma das soluções está relacionada com a boa formação dos mapeadores de campo em relações solo-paisagem (LEGROS, 2006). Dessa maneira, acreditamos que a matematização destes limites pelo SMW pode resolver algumas destas limitações. Isso pode fazer com que a união de modelos conceituais e matemáticos se torne uma ferramenta de campo útil, em estudos de gênese e mapeamento de solos. Mesmo em áreas planas de várzeas, as relações pedologia-geomorfologia existem e podem ser previsíveis pelos mapeadores de campo (BERG et al., 1987). Esse tipo de abordagem também foi utilizada na compreensão da interdependência de atributos físicos e mineralógicos em nível ultradetalhado (CAMARGO et al., 2008a, b).

Teor de argila (Figura 2.6c) e SM (Figura 2.6b) apresentaram picos com representatividade dos limites de campo para ambas as profundidades. Para região de 500 a 800 m e 1.400 a 1.600 m, 2° e 4° picos respectivamente, saturação por bases (Figura 2.6d) e matiz (Figura 2.6e) não apresentaram valores da estatística t que configurassem picos bem expressos. Com base na análise dos resultados, sugere-se que a compartimentalização do relevo, utilizando modelos conceituais, seja validada por atributos covariativos do material de origem ou relacionados com os processos de formação do solo na vertente, como a SM. Estudos de Curi (1983) e Santana (1984) informam que o uso da SM da fração argila indica com mais consistência a variação da gradação ao longo de uma topossequência, do que a cor e a mineralogia do solo. Goluchowska (2001) e Kapicka et al. (2001) relataram que a magnitude da SM medida no solo depende da variabilidade do material de origem e dos processos pedogenéticos.

A proximidade dos picos da SM com os limites dos compartimentos da paisagem, identificados previamente, mostra que a SM tem potencial para caracterização detalhada em ambiente hipoférricos (teores de $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 80 \text{ g kg}^{-1}$). Siqueira et al.

(2010b) também relatam sobre o potencial da SM na caracterização detalhada de ambientes com baixo teor de Fe_2O_3 ($< 40 \text{ g kg}^{-1}$). Camargo (2013), trabalhando com solos variando de 58 a 76 g kg^{-1} de Fe_2O_3 da transição Basalto, Formação Serra Geral - Arenito, Grupo Bauru, relata que a cor do solo, determinada por espectroscopia de reflectância difusa, e a SM têm potencial para serem utilizadas como atributos diagnósticos em níveis categóricos mais altos e mais baixos de classificação, respectivamente. Estes resultados sugerem que trabalhos realizados em ambientes semelhantes devam atentar-se a este fato para evitar equívocos.

No passado, pesquisadores concluíram em seus estudos que, embora a SM esteja muito associada aos teores de Fe_2O_3 e à cor do solo, sua aplicação não seria eficiente na separação entre Latossolos com baixos teores de Fe_2O_3 ($< 40 \text{ g kg}^{-1}$) e os amarelos, devendo ser utilizados outros critérios para validar a separação dos solos (RESENDE et al., 1988a). Porém, a sensibilidade dos sensores atuais e o caráter quantitativo da SM mostram que este atributo pode ser utilizado como critério para separação de solo e diferentes compartimentos da paisagem.

Quanto ao modelo conceitual de paisagem, os resultados da SMW indicam que, para a região do presente estudo, o modelo de Dalrymple et al. (1968) mostrou ser eficaz na identificação de limites no campo. Outros autores (CUNHA et al., 2005) utilizaram o SMW na validação do modelo conceitual de Daniels et al. (1971) para Latossolos sob a transição Basalto Formação Serra Geral-Arenito Grupo Bauru. A SM também foi utilizada na validação de limites de campo e no delineamento de unidades de mapeamento detalhado nessa mesma transição geológica (MATIAS, 2010). Esse tipo de relação entre o compartimento geológico e o modelo de paisagem mais apto é importante para a definição correta dos limites de campo.

Na segunda fase da proposta para a identificação dos limites e delineamento das unidades de mapeamento foi realizada a análise geoestatística. Na Tabela 2.1, são apresentados os parâmetros dos modelos de variogramas ajustados aos dados do solo e da planta.

Tabela 2.1 Parâmetros dos modelos de variogramas ajustados.

Propriedade	Modelo	C ₀	C ₀ +C ₁	GDE (%)	Alcance (m)	R ²	Validação cruzada		
							a	b	RRMSE (%)
0,00-0,25									
Argila	Esférico	14,2	86,2	16,0	930,0	1,0	0,0	1,1	14,2
Silte	Exponencial	9,4	32,1	29,0	1290,5	1,0	0,0	1,1	19,8
AT	Exponencial	18,1	156,0	12,0	1155,1	0,9	0,2	1,2	4,7
MO	Esférico	0,2	0,4	43,0	1410,8	0,9	-0,1	1,0	0,2
pH	Esférico	0,1	0,2	28,0	255,6	0,8	0,0	1,0	0,1
Pdis.	Esférico	0,2	0,3	67,0	548,3	0,7	8,1	0,8	0,6
H+Al	Gaussiano	0,6	1,6	39,0	1300,7	0,9	0,1	1,0	0,3
SB	Esférico	0,8	4,5	17,0	444,0	1,0	0,2	1,0	0,4
CTC	Exponencial	0,3	4,7	7,0	1080,1	1,0	-0,1	1,0	0,2
V%	Exponencial	38,2	218,1	18,0	437,3	0,9	-0,1	1,0	0,3
SM	Esférico	95,5 10 ³	1108 10 ³	9,0	1033,1	1,0	1,2	1,1	11,9
Matiz	Esférico	0,0	0,1	29,0	383,8	0,9	0,0	1,0	0,0
Valor	Esférico	0,0	0,1	40,0	376,4	0,8	0,1	1,0	0,1
Croma	Esférico	0,0	0,1	20,0	587,0	1,0	0,2	1,0	0,0
0,25-0,50									
Argila	Esférico	14,1	78,3	18,0	746,7	1,0	0,0	1,1	6,2
Silte	Esférico	6,9	29,1	24,0	622,9	1,0	0,1	1,0	2,4
AT	Esférico	28,5	158,5	18,0	792,2	1,0	-0,1	1,1	4,4
MO	Esférico	0,2	0,3	57,0	1267,2	0,9	0,1	1,0	0,2
pH	Esférico	0,0	0,0	0,0	381,6	0,8	2,0	0,6	0,1
Pdis.	Exponencial	0,2	0,4	54,0	574,2	0,9	0,6	1,0	0,9
H+Al	Gaussiano	0,6	1,1	55,0	1597,0	0,8	0,5	0,9	0,3
SB	Esférico	0,1	0,2	37,0	572,7	0,8	0,1	1,0	0,4
CTC	Esférico	0,9	3,1	29,0	818,6	0,9	0,0	1,0	0,2
V%	Esférico	113,6	188,0	60,0	469,2	0,9	4,8	0,9	0,3
SM	Esférico	77,14 10 ³	1136 10 ³	7,0	1027,3	1,0	6,0	1,1	4,4
Planta									
NDVI 2011	Esférico	0,0	0,0	39,0	1486,0	1,0	0,5	0,3	0,1
NDVI 2010	Exponencial	0,0	0,0	48,0	1698,0	0,8	0,3	0,2	0,1
NDVI 2009	Exponencial	0,0	0,0	48,0	1317,0	0,8	0,3	0,4	0,1

C₀- efeito pepita, C₀+C₁- patamar, GDE- grau de dependência espacial [C₀/ (C₀+C₁)] *100, R²- coeficiente de determinação do modelo ajustado, a - coeficiente linear da regressão, b - coeficiente angular da regressão, AT – areia total, MO – matéria orgânica, Pdis. – fósforo disponível, SB – soma de bases, CTC – capacidade de retenção de cátions, V% – Saturação por bases, SM – suscetibilidade magnética, NDVI – Normalized Difference Vegetation Index (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada)

O modelo de variograma mais observado foi o esférico, em 68% dos atributos estudados, seguido pelo exponencial (25% das observações) e gaussiano (7% das observações). O modelo esférico ajusta-se a atributos que apresentam variações abruptas ao longo da paisagem. Estas variações podem estar relacionadas aos tipos de material de origem (Figura 2.1d) (RAUCH, 2011), relevo (Figura 2.1b) (KRAVCHENKO; BULLOCK, 2002; SIQUEIRA et al., 2010a; CAMARGO et al., 2013) e solo (Figura 2.1e) (MONTANARI et al., 2012). Estas observações são os primeiros indícios de uma possível relação entre estes fatores e a caracterização detalhada e

ultradetalhada da variabilidade espacial e da definição de unidades de mapeamento (VIDAL-TORRADO et al., 2005).

Na profundidade de 0,00-0,25 m, os atributos que apresentaram grau de dependência espacial forte ($GDE < 25\%$) (CAMBARDELLA et al., 1994) foram a capacidade de troca de cátion (CTC), SM, areia total (AT), teor de argila, soma de bases (SB) e saturação por bases (V%). Os atributos pH, matiz, silte, H+Al, valor, matéria orgânica (MO) e fósforo disponível (Pdis.) apresentaram GDE moderado ($25\% < GDE < 75\%$). Na profundidade de 0,25-0,50 m, os atributos que apresentaram grau de dependência espacial forte foram o pH, SM, AT e silte.

Os atributos CTC, SB, Pdis., H+Al, MO e V% apresentaram GDE moderado. Os atributos da planta apresentaram GDE moderado nos 3 anos analisados. Os valores do GDE da SM e do matiz indicam que a SM tem maior influência dos compartimentos da paisagem do que o matiz do solo; logo, a SM apresenta maior potencial para refinamento dos limites de precisão. As variações dos parâmetros C_0 e $C_0 + C_1$ (ex.: C_0 da SM = $95,5 \cdot 10^3$) são provenientes da retirada de tendência e transformação logarítmica dos dados originais para ajuste do modelo de variograma.

Como as isolinhas dos mapas de variabilidade irão subsidiar a extrapolação dos limites indicados pelos picos do SMW, é imprescindível que os modelos de variograma sejam ajustados adequadamente. Esta etapa está estritamente relacionada à experiência do pesquisador (FRANZEN et al., 2006). A escolha do modelo de variograma, bem como o ajuste de seus parâmetros, tem um viés de subjetividade, assim como o modelo conceitual. Com o intuito de diminuir este tipo de interferência, são recomendados testes de verificação de ajuste. Os mais utilizados são: R^2 (GALLARDO et al., 2007; GUEDES FILHO et al., 2010) e validação cruzada (GUEDES FILHO et al., 2010; VIEIRA et al., 2010; LU et al., 2012). Com exceção do Pdis. (0,00-0,25 m), V% e SM (0,25-0,50 m), que apresentaram pequenos desvios do coeficiente angular, o restante dos atributos estudados apresentou bons ajustes, com coeficiente angular (a) e linear (b) próximos de 0 e 1, respectivamente.

Os resultados da validação cruzada são comumente expressos em termos de coeficiente linear e angular, obtidos a partir de uma regressão entre os valores observados e os previstos pelo variograma ajustado (VIEIRA et al., 2010). Atualmente,

uma das grandes preocupações na modelagem é a elaboração de índices que avaliam a acurácia (RRMSE) das estimativas (LI; HEAP, 2008).

A interpretação isolada dos parâmetros da validação cruzada (a e b) impossibilita ao pesquisador comparar quantitativamente a qualidade das predições obtidas para diferentes atributos. Isso pode gerar interpretações equivocadas sobre os limites reais das classes de variabilidade no campo. Esse equívoco ocorre devido às diferentes amplitudes (valores máximos e mínimos) e valores de coeficiente de variação dos atributos estudados. A utilização do índice RRMSE, além de diminuir este tipo de erro, propicia a comparação quantitativa da acurácia das predições entre os diferentes atributos. Dessa maneira, a tomada de decisão com base nos mapas de variabilidade torna-se mais confiável (LI; HEAP, 2008).

O RRMSE pode ser interpretado como um índice de exatidão e, por ser padronizado, permite comparações entre diferentes atributos. Essa característica é importante, pois o pesquisador pode escolher o atributo com melhor exatidão para representar a variabilidade de uma área. A SM possui um RRMSE (6,22-11,85%) similar ao teor de argila (6,22-14,16%). Comparando o RRMSE da SM com resultados da literatura (LI et al., 2008) para condutividade elétrica, outra técnica pedométrica (RRMSE de 34,61- 42,69%) (LI et al., 2007), a SM apresentou melhores desempenhos. Isso ocorre porque a condutividade elétrica foi originalmente desenvolvida para regiões temperadas com baixa expressão dos óxidos de ferro. Autores (WU et al., 2008) relatam que a condutividade elétrica sofre alterações em regiões com elevada presença de óxidos. Resultados de pesquisa mostram que a medição da condutividade elétrica com sensor de contato apresenta melhor desempenho no Latossolo Vermelho distroférico com menor teor de argila (MACHADO et al., 2006). Essa informação é importante para balizar futuros estudos em áreas com diferentes teores de óxidos de ferro do solo, bem como teor de ferro total (Fe_2O_3), ajudando o pesquisador a escolher a ferramenta de análise mais apropriada para estudo indireto da variabilidade dos atributos do solo.

Os valores de RRMSE do teor de argila (14,16% para 0,00-0,25 m e 6,22% para 0,25-0,50 m), pH (0,07% para ambas as profundidades), MO (0,16% para 0,00-0,25 m e 0,17% para 0,25-0,50 m) e Pdis. (0,55% para 0,00-0,25 m e 0,94% para 0,25-0,50 m) corroboram os valores da literatura. Schloeder et al.(2001), trabalhando

em uma área de 140.000 ha com 43 pontos, obtiveram RRMSE de 5,12% para teor de argila, 3,62% para pH, 102,16% para Pdis., 6,39% para MO. Voltz e Webster (1990), trabalhando em uma área de 3,2 ha com 107 pontos obtiveram RRMSE de 23,25% para teor de argila. BRUS et al (1996), obtiveram RRMSE de 61,72% para P disponível. em 4.800 ha, utilizando 188 pontos na modelagem.

Na Figura 2.7, é apresentada a integração dos mapas de variabilidade espacial e os picos mais representativos da análise SMW (Figura 2.6). Essa integração elucidou qual classe de variabilidade foi a mais representativa da unidade de mapeamento detalhado, também chamada de área de manejo específico (SIQUEIRA et al., 2010a; SANCHEZ et al., 2012b). Trangmar et al. (1985) e Minasny e McBratney (2007) ressaltam a importância da distribuição espacial dos atributos do solo para identificar os limites entre classes taxonômicas.

Observa-se no mapa de variabilidade espacial do teor de argila (Figura 2.7) que, na parte superior da paisagem, há uma variação de 380-740 g kg⁻¹ (0,00-0,25 m) e 440-640 g kg⁻¹ (0,25-0,50 m) que corresponde às classes texturais argilosa e muito argilosa. Segundo o mapa de solos da área (Figura 2.1e, escala 1:12.000, considerada detalhada, 1 ponto de observação a cada 5 ha), os solos do topo pertencem à classe de textura argilosa ($350 \leq \text{teor de argila} < 600 \text{ g kg}^{-1}$) e os solos da parte inferior pertencem à classe de textura média ($150 \leq \text{teor de argila} < 350 \text{ g kg}^{-1}$). Comparando estas informações, observamos que o mapa de solos da área (Figura 2.1e) não representa adequadamente as classes de variabilidade no campo. Isso ocorre porque os limites conceituais, criados para enquadrar os diferentes solos em táxon, não são representativos das classes de variabilidade dos atributos ao longo da paisagem, e dessa maneira a unidade taxonômica não coincide com a unidade de mapeamento.

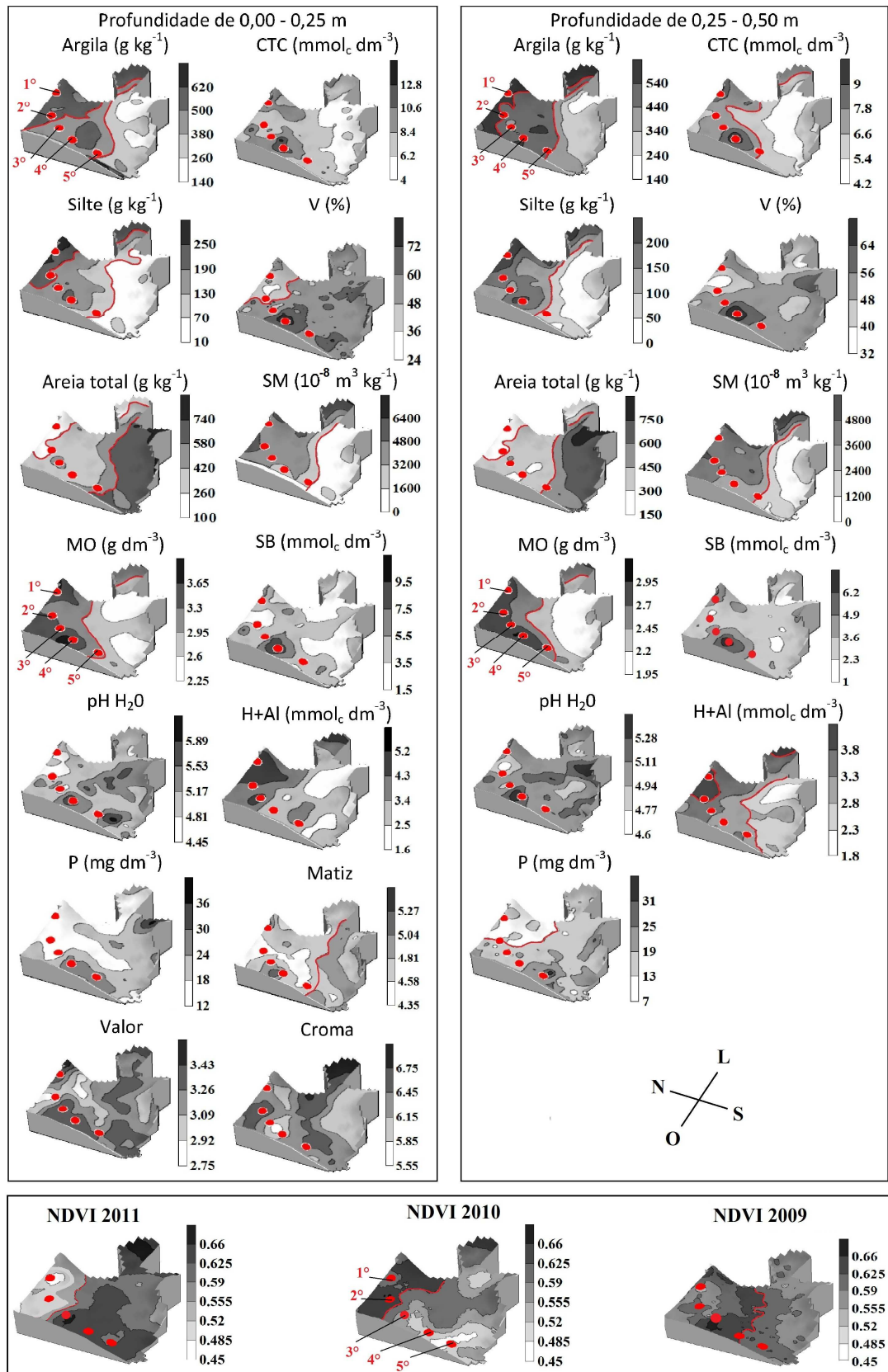


Figura 2.7 Mapas de distribuição espacial. MO – matéria orgânica, Pdis. – fósforo disponível, SB – soma de bases, CTC – capacidade de retenção de cátions, V – Saturação por bases, SM – suscetibilidade magnética, NDVI – “Normalized Difference Vegetation Index” (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada), (●) limites encontrados na análise split moving windows da SM, (—) Delineamento com base na intersecção entre os limites do “split moving windows - SMW” e isolinhas do mapa de variabilidade, (1°, 2°, 3°, 4°, 5°) Picos mais representativos do SMW.

O mesmo ocorre com o mapa técnico de ambiente de produção (Figura 2.1f). Os melhores ambientes de produção estão na parte superior da paisagem (ambientes A e B), enquanto os piores estão na parte inferior (C e D). A variabilidade espacial da cultura, representada pelos mapas de NDVI (Figura 2.7), tem um grau de associação maior com as classes de variabilidade do que com os ambientes de produção preconizados. Johnson e Richard (2005), estudando a caracterização detalhada da variabilidade espacial dos atributos do solo e da cana-de-açúcar, em dois locais, por 3 anos, relatam alta correlação espacial entre atributos do solo e da planta.

Nota-se que as isolinhas das classes de variabilidade são paralelas ao eixo leste-oeste, enquanto no mapa de ambiente de produção (Figura 2.1f) o sentido é norte-sul, acompanhando os limites do mapa de solos. Nos ambientes tropicais, a realidade da variabilidade dos solos foi mascarada pelos levantamentos de reconhecimento menos detalhados. Eles proporcionaram um falso sentido de uniformidade. Isso contribui para ampliar a distância entre pesquisadores que interpretavam os mapas, e os agricultores que queriam saber como era o solo que agricultavam (BUOL, 1990). Resultados da pedodiversidade global e elaboração da distância taxonômica com base em zonas climáticas (MINASNY; McBRATNEY, 2010) indicam que a área de nosso estudo é a que possui menor distância taxonômica (0,44). Isso denota a necessidade de maior detalhamento nestes locais para compreensão da variabilidade de campo.

Comparando os mapas de variabilidade espacial com o mapa de compartimentos geomorfométricos (Figura 2.1g), nota-se que as isolinhas das classes de variabilidade não apresentaram similaridade com os limites geomorfométricos. O método proposto por Vasconcelos et al.(2012) pode ser considerado uma evolução, tanto no sentido conceitual de abordagem tridimensional da paisagem, quanto na praticidade para caracterização de grandes áreas sem o viés da subjetividade para a nomeação dos compartimentos. Porém, não foi eficaz na compreensão das classes de variabilidade para a região do presente estudo. Com base em outras experiência sobre a variabilidade de diferentes atributos do solo e de modelos conceituais de paisagem (BARBIERI et al., 2008, 2009; MARTINS FILHO et al., 2009; SANCHEZ et al., 2009; SANCHEZ et al., 2012a,b; CAMARGO et al., 2010, 2013), é possível que o modelo de Vasconcelos et al.(2012) tenha grande potencial de aplicação para locais

sob o Arenito, Grupo Bauru, Formação Adamantina, onde o relevo seja o fator de maior relevância. Nestes locais, grande parte das classes de variabilidade dos atributos do solo é condicionada pelas formas da paisagem, as quais, conceitualmente, são caracterizadas pelo modelo de Troeh (1965).

Houve semelhança entre o sentido das isolinhas do mapa da SM com os demais atributos em ambas as profundidades. Em todos os mapas de variabilidade (Figura 2.7), as isolinhas são paralelas ao eixo lesto-oeste. Com base na semelhança do padrão espacial encontrada entre os atributos e valores da correlação do SMW da SM com o teor de argila ($r=0,7$; $P<0,01$), V% ($r=-0,3$; $P<0,05$), matiz ($r=0,4$; $P<0,01$), NDVI 2010 ($r=-0,3$; $P<0,05$) e NDVI 2011 ($r=-0,3$; $P<0,05$), pode-se inferir que a SM tem potencial para aplicação no mapeamento de atributos em áreas cujo teor de ferro total esteja entre 20 e 200 g kg⁻¹. Siqueira et al. (2010b), estudando funções de pedotranferência com SM em ambiente com baixo teor de ferro total ($\text{Fe}_2\text{O}_3 < 40 \text{ g kg}^{-1}$), encontraram boas correlações para teor de argila (0,68), saturação por bases (-0,69) e teor de hematita (0,81). Estes mesmos autores concluem que a SM tem potencial para auxiliar na caracterização da variabilidade dos atributos do solo em grandes áreas. Os minerais com capacidade magnética armazenam arquivos naturais contendo registros dos fatores e processos de formação do solo (MAHER; THOMPSON, 1999). Logo, pode ser considerado como um pedoindicador para diferentes locais ou unidades de mapeamento.

Na Figura 2.8, são apresentados os limites entre as unidades de mapeamento delineadas com base nas classes de variabilidade espacial confirmadas pelos picos mais representativos do SMW (2° e 5° pico) e limites conceituais de campo. Neste trabalho, denominamos unidade de mapeamento áreas cujo padrão de variabilidade dos atributos do solo é conhecido (sentido das isolinhas e amplitude dos teores dos atributos).

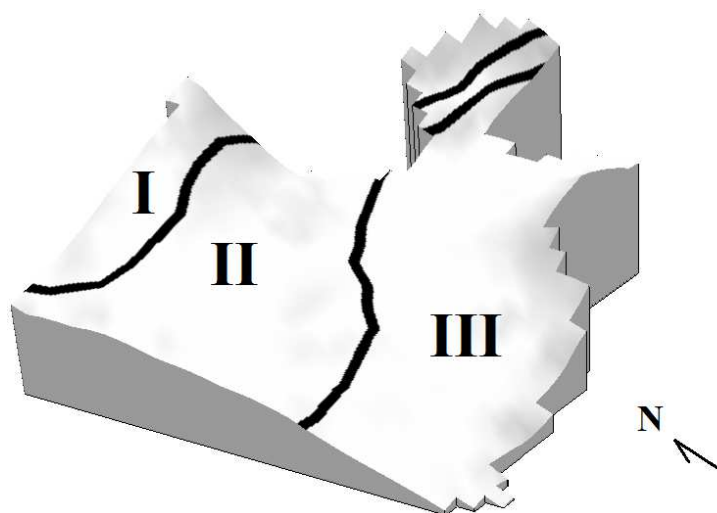


Figura 2.8 Proposta de delineamento das unidades de mapeamento detalhado com base na validação de modelos conceituais de relação solo-paisagem utilizando “split moving windows”, geoestatística e suscetibilidade magnética.

Delden et al. (2011) relatam que a escala do mapeamento deva ser estabelecida pensando na praticidade e na utilização do usuário final. Por este motivo, mesmo existindo subdivisões a serem consideradas, conforme indicado pelos picos 1°, 3° e 4° (Figura 2.7b), acredita-se que o delineamento proposto atenda melhor as necessidades do setor sucroenergético paulista por duas razões. A primeira é a facilidade de gerenciamento das informações requeridas em maiores quantidades. Dessa maneira, o planejamento das práticas agrícolas (plantio, adubação, colheita, entre outras), considerando as três unidades de mapeamento propostas, pode ser mais operacional e rentável do que o planejamento com base no mapa de ambiente de produção (Figura 2.1f). Conforme apresentado, as isolinhas do mapa de variabilidade do NDVI para os diferentes anos acompanham o sentido das isolinhas dos mapas de atributos do solo e não corrobora o mapa de ambientes de produção. Campos et al. (2008) trabalhando em uma área de 505 ha e Sanchez et al. (2012a), em uma área de 200 ha, ambas sob cultivo de cana-de-açúcar, demonstram que a utilização do delineamento com base no padrão de variabilidade pode ser aplicado no setor agrícola trazendo, grandes benefícios, dentre os quais eles o planejamento sustentável.

A segunda razão está relacionada à automação agrícola e ao dimensionamento das áreas de plantio de cana-de-açúcar. Atualmente, a menor unidade organizacional agrícola no setor sucroenergético paulista são os talhões. É esperado

que, dentro de um mesmo talhão, a variabilidade seja mínima, o que não ocorre, conforme mostra a comparação do mapa de ambiente de produção (Figure 2.1f) com os mapas de variabilidade de atributos do solo (Figura 2.7). O redimensionamento dos talhões com base na variabilidade pode aumentar a capacidade operacional, pois o talhão pode ser estendido no sentido da mínima variabilidade, proporcionando maior eficiência nas manobras e no tempo de percurso da máquina. A manobrabilidade é considerada um dos fatores de maior importância para a avaliação do desempenho das máquinas agrícolas (MIALHE, 1974; HUNT, 1995)

Na Tabela 2.2, são apresentados os limites (média $\pm$ desvio-padrão) das três unidades de mapeamento detalhado delineadas com base na variabilidade de campo. Nota-se que as áreas delineadas com maiores valores de SM (I e II) são os locais com maiores valores de TCH, ART e NDVI 2010. Trabalhando em Latossolos próximos à transição Basalto, Formação Serra Geral-Arenito Grupo Bauru, Siqueira (2010) encontrou correlação de 0,26 ($P < 0,01$) entre SM e TCH, e 0,53 ($P < 0,01$) entre SM e Pol (porcentagem em massa de sacarose aparente contida em uma solução).

Segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006), o polígono I enquadra-se na classe mesoférrica (teores de Fe_2O_3 variando de 80 a $< 180 \text{ g kg}^{-1}$), e os polígonos II e III, na classe hipoférrica (teores de $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 80 \text{ g kg}^{-1}$). Considerando a alta variação do Fe_2O_3 no Estado de São Paulo, a SM pode ser uma alternativa para viabilizar tanto o mapeamento de outros atributos do solo quanto o delineamento de unidades de mapeamento. Mesmo sem a precisão e a exatidão dos sensores atuais, Resende et al. (1988b) sugeriram a utilização da SM como critério de classificação de solos em virtude de sua simplicidade de determinação.

Com base nesses resultados e no caráter covariativo da SM com adsorção de P ($r=0,88$; $P < 0,01$) (CAMARGO, 2013), emissão de CO_2 do solo (BARRIOS et al., 2012), características quantitativas e qualitativas da produção de citros ($r=-0,3$; $P < 0,01$) (CORTEZ et al., 2011), risco de erosão ($r=-0,2$; $P < 0,01$) e erodibilidade do solo ($r=-0,3$; $P < 0,01$) (SANTOS et al., 2013), a SM é um atributo interessante para auxiliar no delineamento de áreas com diferentes potenciais agrícolas. Os valores de SM encontrados para ambas as profundidades (4.962 e

$399.610^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$, respectivamente) estão próximos dos valores de horizontes diagnósticos de Latossolos ($5.772 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$) provenientes de Basalto (COSTA et al., 1999).

Tabela 2.2 Caracterização física, química, mineralógica e resposta da cultura nos polígonos delineados com base na variabilidade de campo.

Atributos	Estatística	Polígonos delineados					
		I		II		III	
		0,00-0,25 m					
Teor de argila (g kg ⁻¹)	Média	52,90	a	49,66	a	29,02	b
	DP	10,35		6,12		9,89	
SM (10 ⁻⁸ m ³ kg ⁻¹)	Média	4962,00	a	3996,00	b	1273,00	c
	DP	993,00		979,00		1009,00	
Matiz (YR)	Média	4,62	b	4,65	b	4,84	a
	DP	0,30		0,22		0,28	
DMC Gt110 (nm)	Média	18,24	a	29,70	a	34,39	a
	DP	2,35		16,13		17,47	
DMC Hm110 (nm)	Média	27,19	c	38,23	b	49,99	a
	DP	3,93		5,90		9,47	
DMC Hm012 (nm)	Média	57,36	bc	68,07	ab	82,77	a
	DP	7,32		15,63		22,83	
Razão Gt/ (Gt+Hm)	Média	0,33	a	0,30	a	0,30	a
	DP	0,03		0,09		0,05	
Fe ₂ O ₃ (g kg ⁻¹)	Média	129,09	a	55,37	b	44,46	b
	DP	70,58		15,30		35,89	
Razão Ct/ (Ct+Gb)	Média	0,77	bc	0,81	ab	0,82	a
	DP	0,01		0,04		0,02	
		0,25-0,50 m					
Teor de argila (g kg ⁻¹)	Média	57,15	a	52,61	b	30,47	c
	DP	5,04		5,51		10,34	
SM (10 ⁻⁸ m ³ kg ⁻¹)	Média	5059,00	a	4115,00	b	1307,00	c
	DP	1320,00		990,00		978,00	
		Planta					
NDVI 2011	Média	0,51	c	0,53	b	0,56	a
	DP	0,05		0,06		0,05	
NDVI 2010	Média	0,60	a	0,57	b	0,54	c
	DP	0,03		0,05		0,04	
NDVI 2009	Média	0,58	b	0,61	a	0,58	a
	DP	0,06		0,04		0,04	
TCH	Média	85,22		85,98		78,71	
ART	Média	92,85		90,34		85,91	

DP – desvio-padrão; SM – suscetibilidade magnética; Matiz (YR) – calculado utilizando informações da espectroscopia de reflectância difusa; DMC – diâmetro médio do cristal; Hm – Hematita, Gt – Goetita; Ct – Caulinita, Gb – Gibbsita; NDVI – “Normalized Difference Vegetation Index”; TCH – toneladas de colmos ha^{-1} , ART – açúcares redutores totais. SM, Teor de argila, Matiz – 150 amostras; Razão, DMC, Fe_2O_3 – 16 amostras; NDVI – 70 amostras; TCH, ART – 3 amostras (polígono I composto por 6 subamostras representativas de 31,50 ha, polígono II por 13 subamostras representativas de 76,98 ha e polígono III por 13 subamostras representativas de 185,05 ha). Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.

Berquó et al. (2004) estudando a SM em locais sob Depósito Aluvionar, não observaram grandes variações de seus valores até a profundidade de 4-5 m. Ghidin et al. (2006), estudando Latossolos originados de rochas basálticas, também

não encontraram variação do teor de argila entre o horizonte superficial e o horizonte diagnóstico. O mesmo foi observado para Fe_2O_3 e DMC Hm 110, principalmente nos solos de caráter férrico (teores de Fe_2O_3 variando de 180 g kg^{-1} a $< 360 \text{ g kg}^{-1}$). Outros autores (MATIAS, 2010; CAMARGO, 2013) relatam que a variabilidade espacial da SM, nas profundidades de 0,00-0,20 m e 0,60-0,80 m, foi similar em uma área de 770 hectares. Com base na baixa variabilidade vertical dos resultados apresentados (COSTA et al., 1999; BERQUÓ et al., 2004; GHIDIN et al., 2006), especialmente os de SM, podemos inferir que os valores apresentados na Tabela 2.2, possuam, em parte, representatividade de horizontes pedológicos.

Houve aumento do matiz (calculado com ERD) da unidade de mapeamento I (4,62YR) para a unidade de mapeamento III (4,84YR), indicando mudança da coloração vermelha para amarela ao longo da transeção. Comparando os resultados de matiz da Tabela 2.2, para as três unidades de mapeamento delineadas, com o mapa de solos (Figura 2.1e), nota-se que a informação do matiz, quando calculado pela ERD, pode ser útil na readequação dos limites dos mapas de solos elaborados com base nas informações da carta de Munsell. Estudando medidas da cor de solos com a carta de Munsell e a colorimetria, Botelho et al. (2006) encontraram um mesmo valor de matiz na carta de Munsell (10YR) e variações de matiz quando utilizada a colorimetria (8,20YR, 8,46YR, 7,84YR, 7,72YR). Conforme apresentado para os mesmos valores de matiz encontrados na carta de Munsell, há variações em relação a técnicas mais acuradas.

O aumento da Razão $\text{Ct}/(\text{Ct}+\text{Gb})$ da unidade de mapeamento I (0,77) para a unidade de mapeamento III (0,82) indica que o teor de caulinita no solo diminui do topo para o sopé de deposição. Também foi observado aumento do DMC tanto para Hm quanto para Gt, da unidade I para unidade III. Por apresentar condições distintas de oxirredução, a unidade III proporciona melhor ambiente para cristalização dos óxidos de Ferro. Cunha (2000) e Camargo et al. (2008a) também observaram o mesmo comportamento para DMC da Hm e Gt. Sobre os maiores teores de caulinita encontrados na unidade III, contrastante com os menores teores de ferro total ($44,4 \text{ g kg}^{-1}$), Resende (1976) e Dick (1986) relatam que o ambiente pedogenético preferencial da caulinita é aquele com menor teor de ferro. Os resultados mineralógicos mostram que as unidades de mapeamento delineadas são três ambientes pedoge-

néticos distintos, e que a cultura da cana-de-açúcar responde a estas unidades de acordo com os resultados de NDVI de 2009, 2010 e 2011.

2.5 Conclusão

A SM foi mais eficiente na compartimentalização da paisagem (identificação de áreas com diferentes padrões de variabilidade) do que o matiz determinado por espectroscopia de reflectância difusa.

A suscetibilidade magnética e a relação solo-paisagem foram eficazes no delineamento de unidades de mapeamento detalhado. Devido à carência de protocolos para identificação de áreas com base em seu padrão de variabilidade, os resultados deste estudo podem servir como estratégia alternativa para elaboração de mapas de atributos do solo, identificação de áreas com diferentes padrões de variabilidade e balizar novas inferências sobre o tema.

3.1 DENSIDADE E PROPORÇÃO AMOSTRAL PARA A CARACTERIZAÇÃO DA VARIABILIDADE DE ATRIBUTOS DE LATOSSOLOS NA TRANSIÇÃO BASALTO, DEPÓSITO COLÚVIO-ELUVIONAR E DEPÓSITO ALUVIONAR

Resumo

O planejamento amostral é uma das etapas mais importantes para o fornecimento de informações detalhadas requeridas pela gestão sustentável do solo. Assim, este estudo tem por objetivo investigar a densidade e a proporção amostral para a caracterização da variabilidade de atributos de Latossolos da transição Basalto, Depósito Colúvio-Eluvionar e Depósito Aluvionar. A área de estudo localiza-se a nordeste do Estado de São Paulo, no Município de Guataporã, e tem 380 ha. Para avaliar o efeito da subamostragem na representação da variabilidade, em parte da área (150 ha), foram coletadas 60 amostras na densidade de um ponto a cada 2,5 ha, com amostragem simples e composta, com 3 subamostras. Em área total foram coletadas 150 amostras em intervalos irregulares, na densidade de um ponto a cada 2,5 ha. Diferentes densidades amostrais (3; 4; 5; 6; 7; 8 e um ponto a cada 9 ha) foram obtidas pela exclusão de pontos. Foram avaliados os atributos teor de argila, saturação por bases e suscetibilidade magnética (SM), nas profundidades de 0,00-0,25 m e 0,25 – 0,50 m. Não houve diferença entre os mapas de variabilidade espacial gerados com amostras compostas e amostra simples. Essa informação pode subsidiar uma mudança no sistema de amostragem do setor agroindustrial, reduzindo custos e tempo de amostragem. A densidade amostral mínima requerida para que não haja perda na representação da variabilidade espacial de atributos de Latossolos sob transição Serra Geral, Depósito Colúvio-Eluvionar e Depósito Aluvionar foi de um ponto a cada 7 ha. A SM pode ser utilizada para melhorar as estimativas de predição do teor de argila de Latossolos sob transição Serra Geral, Depósito Colúvio-Eluvionar e Depósito Aluvionar na proporção amostral de um ponto de SM a cada 2,5 ha, para um ponto de argila a cada 7 ha.

Palavras-chave: planejamento, suscetibilidade magnética, amostragem estratificada, índice de concordância.

3.2 Introdução

Informações sobre a variabilidade espacial de qualquer atributo do solo desempenham um papel significativo no planejamento, na avaliação de riscos e na tomada de decisão na gestão sustentável (LI; HEAP, 2008). Dentre as dificuldades em fornecer este tipo de informação, destacam-se o estabelecimento do nível de detalhe necessário (DELLEN et al., 2011) e os custos de execução (McBRATNEY et al., 2002; DEMATTÊ et al., 2007). Assim, é de suma importância o desenvolvimento de ferramentas que auxiliem no planejamento de amostragem com o intuito de diminuir os custos de execução e aumentar a precisão e a exatidão das classes de variabilidade identificadas.

Em alguns países da Europa, as informações sobre distribuição espacial auxiliam na avaliação do impacto da política agrícola (CCE, 2009) em diferentes níveis de detalhe, sendo que, para alguns locais, a resolução chega a 200 m (VAN DELDEN et al., 2010). Porém, para grandes áreas como o Brasil, Rússia e China, a alta variabilidade natural (geologia, formas da paisagem e outras) (LEGROS, 2006) resulta em alto potencial de pedovariabilidade (IBÁÑEZ et al., 2009; MINASNY; McBRATNEY, 2010), dificultando a execução de trabalhos que representem de maneira adequada e satisfatória a variabilidade real do campo.

Os planos de amostragem mais comuns para representar a variabilidade de campo são: malha irregular, regular e estratificada (DINKINS; JONESSOIL, 2008). O método de amostragem estratificada só é eficaz quando se conhece a variabilidade real de campo de cada compartimento (geológico, forma da paisagem, tipo de solo e outros), bem como seus limites (FRANZEN et al., 1998; FLEMING et al., 2000). Nos Estados Unidos, onde grande parte dos solos é conhecida em nível de detalhe satisfatório (SOIL SURVEY STAFF, 1975), a amostragem estratificada é orientada por unidades de mapeamento de solo disponíveis na escala 1:8.000 (correspondente à unidade taxonômica de série de solo) (DINKINS; JONESSOIL, 2008).

Na região tropical, a carência de trabalhos que abordam essa estratificação (IBÁÑEZ et al., 2009), bem como a falta de conhecimento sobre a relação multidisciplinar da pedologia e da geomorfologia (VIDAL-TORRADO et al., 2005), faz com que esse tipo de amostragem gere conclusões equivocadas. Nestes locais, o planeja-

mento amostral mais utilizado e que tem sido amplamente aceito, é a amostragem em malha regular (MATHERON, 1963; SIQUEIRA et al., 2010a). Esse tipo de amostragem pode subsidiar trabalhos sobre o cálculo do número de amostras em função do coeficiente de variação e do parâmetro alcance do variograma (MONTANARI et al., 2005; SOUZA et al., 2008), e a utilização de programas para planejamento amostral (MONTANARI et al., 2012).

Técnicas como a do variograma escalonado (VIEIRA et al., 1981; COMEGNA; BASILE, 1994; FERREYRA et al., 2002; CEDDIA et al., 2009) e a correlação entre mapas de variabilidade espacial (ROQUE et al., 2008) têm sido cada vez mais utilizadas em estudos para a determinação da densidade amostral ideal de áreas de diferentes tamanhos. Outra alternativa é utilização do variograma cruzado e da co-krigagem para definir a proporção amostral ideal entre diferentes atributos (TEIXEIRA et al., 2013). As estimativas de um atributo auxiliar (coletado em maior número) são utilizadas para melhorar as estimativas de um segundo atributo coletado em menor número (atributo principal). A limitação deste procedimento consiste no valor de correlação entre os dois atributos para conseguir ganhos significativos ($r \geq 0,4$, ASLI; MARCOTTE, 1995) e na facilidade de obtenção do atributo auxiliar.

Muitos trabalhos têm utilizado como atributo auxiliar, em estudos sobre a variabilidade, a resistividade elétrica e a condutividade eletromagnética (JOHNSON et al., 2001; BRENNING et al., 2008), por serem covariativos de atributos físicos e químicos do solo. Porém, as medições feitas por estas técnicas sofrem variações em função do teor de óxidos de ferro do solo (WU et al., 2008). Dessa maneira, alguns pesquisadores têm utilizado a suscetibilidade magnética (SM) (DEARING et al., 1996; GRIMLEY et al., 2004) como atributo auxiliar. Por ser covariativa do material de origem e de processos pedogenéticos (CURI, 1983; SANTANA, 1984; GOLUCHOWSKA, 2001; KAPICKA et al., 2001), a SM possui grande potencial para auxiliar na definição de diferentes compartimentos para amostragem estratificada, mesmo em áreas com baixo teor de ferro total no solo ($< 4\%$), conforme apresentado por Siqueira et al. (2010b). Assim, este estudo tem por objetivo investigar a densidade e a proporção amostral para a caracterização da variabilidade de atributos de Latossolos na transição Basalto, Depósito Colúvio-Eluvionar e Depósito Aluvionar, utilizando a SM.

3.3 Material e métodos

3.3.1 Localização, caracterização da área e esquema de amostragem

A área de estudo localiza-se a nordeste do Estado de São Paulo, no Município de Guataporã (Figura 3.1a), com altitude máxima de 600 m acima do nível do mar. As coordenadas geográficas do centro da área são 21° 28' 40" S e 48° 01' 38" O. Segundo a classificação de Thornthwaite (1948), o clima local pode ser definido como B1rB'4a', Tipo Mesotérmico Úmido, com pequena deficiência hídrica, sendo a evapotranspiração de verão menor que 70% da evapotranspiração anual.

A vegetação natural era constituída por floresta tropical subcaducifolia, sendo o uso atual cultivo de cana-de-açúcar com sistema de colheita mecanizada. A área está inserida na província geomorfológica do Planalto Ocidental Paulista. O material geológico está relacionado à transição Basalto do Grupo São Bento Formação Serra Geral, Depósito Colúvio-Eluvionar e Depósito Aluvionar (IPT, 1981; GEOBANK,2012) (Figura 3.1c).

O mapa de solos da área está na escala 1:12.000 e registra a ocorrência do Latossolo Vermelho eutroférico (LVef), Latossolo Vermelho distroférico (LVdf), Latossolo Vermelho distrófico (LVd) e Latossolo Vermelho - Amarelo distrófico (LVAd) (Figura 3.1e). Os valores de Fe_2O_3 variaram de 200 a 20 g kg^{-1} do topo (590 m) até a parte mais baixa da encosta (520 m).

A área total possui 380 ha (Figura 3.1e). Em parte da área (150 ha) (Figura 3.1e.1), foram coletadas 60 amostras simples e composta (3 subamostras), na densidade de um ponto a cada 2,5 ha. As subamostras foram coletadas em locais equidistantes de 15 m (Figura 3.1e.1). Em área total (380 ha) (Figura 3.1e.2), foram coletadas 150 amostras em intervalos irregulares, na densidade de um ponto a cada 2,5 ha.

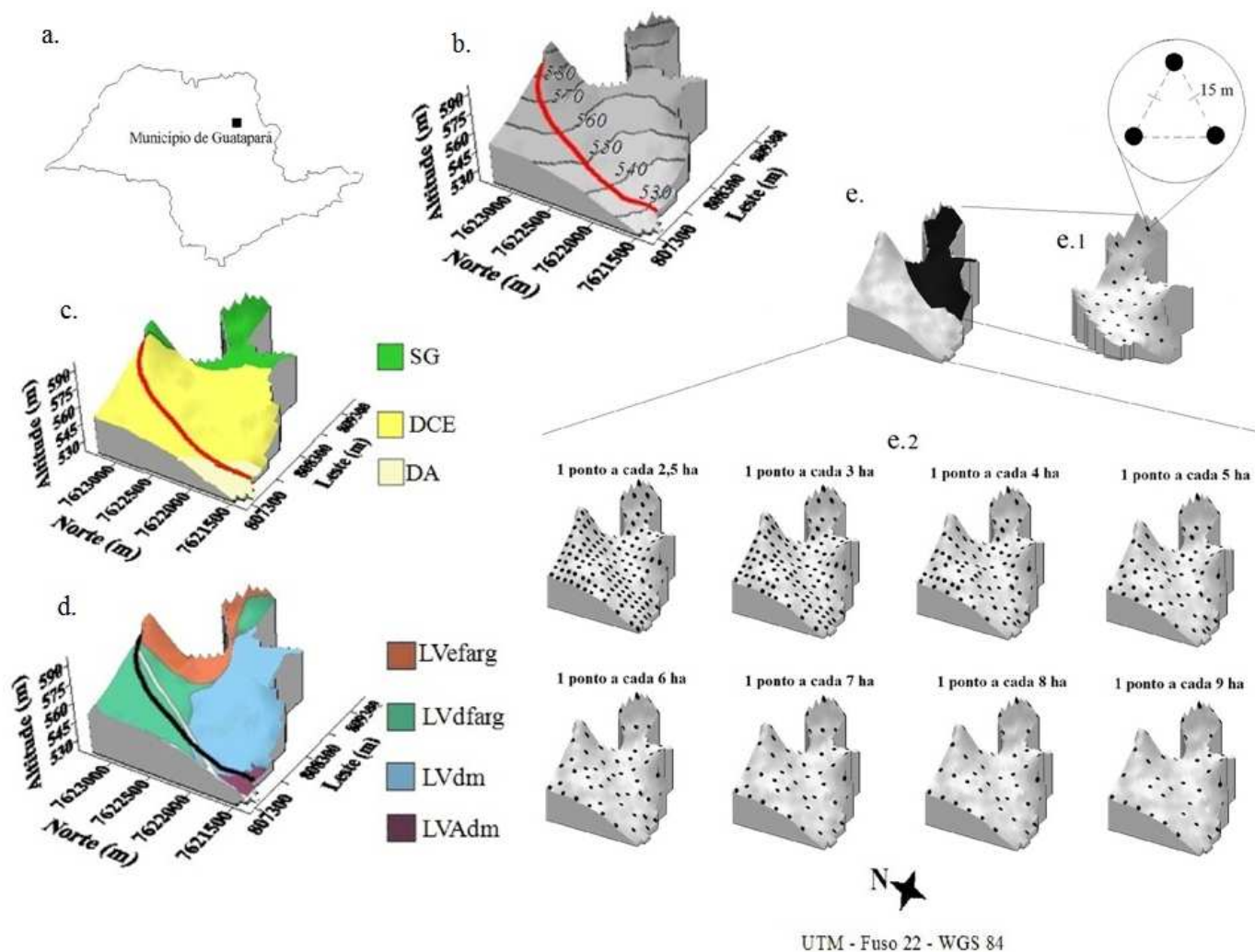


Figura 3.1 Localização da área de estudo (a), modelo digital de elevação com as cotas altimétricas (b), mapa geológico na escala 1:500.000 (d) (SG – Serra Geral; DCE – Depósito Colúvio-Eluvionar; DA – Depósito Aluvionar); mapa de solos na escala 1:12.000 (e) (LVefarg – Latossolo Vermelho eutrófico textura argilosa; LVdfarg – Latossolo Vermelho distrófico textura argilosa; LVdm – Latossolo Vermelho distrófico textura média; LVAdm – Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico textura média), pontos amostrados com 3 subamostras (e.1, 150 ha), pontos amostrados em diferentes densidades (e.2, 380 ha).

A partir do mapa de densidade de um ponto a cada 2,5 há, foram excluídos pontos aleatoriamente e construídos mapas nas densidades de um ponto a cada 3; 4; 5; 6; 7; 8 e 9 ha. Este mesmo procedimento foi utilizado por Teixeira et al. (2013) para verificar a proporção amostral entre diferentes atributos do solo. Nestes pontos, foram coletadas amostras de solo com trado, nas profundidades de 0,00-0,25 e 0,25-0,50 m. Estas são as profundidades utilizadas para manejo do solo no setor sucroenergético paulista. Na área, o teor de ferro total (Fe_2O_3) varia de 200 a 20 g kg^{-1} do topo para a encosta inferior.

3.3.2 Análise laboratorial

Nas amostras coletadas, foram determinados a análise granulométrica, pelo método da pipeta, utilizando uma solução de NaOH 0,1 mol L^{-1} como dispersante químico, e a agitação mecânica em aparato de baixa rotação, por 16 horas, seguindo metodologia preconizada pela EMBRAPA (1997). Cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K) trocáveis foram extraídos, utilizando-se do método da resina trocadora de íons (RAIJ et al., 2001). A acidez trocável (Al^{3+}) foi determinada seguindo a metodologia de Raij e Zullo (1977). A saturação por bases (V%) foi calculada a partir dos valores de Ca, Mg, K e H+Al. A suscetibilidade magnética (SM) foi determinada na TFSA (terra fina seca ao ar), no equipamento Bartington MS2, acoplado ao sensor Bartington MS2B. A avaliação foi feita em baixa frequência (0,47 kHz) (DEARING, 1994; COSTA et al., 1999). Segundo estes autores, as medições de dupla frequência (alta – 4,7 kHz e baixa) devem ser utilizadas em estudo de caráter qualitativo para indicar a presença de minerais magnéticos de domínio simples e múltiplos. No caso de única leitura, para obtenção de resultados mais precisos é indicado o uso da baixa frequência (BARTINGTON, 2013). Estes atributos foram escolhidos por serem covariativos de atributos físicos, químicos e mineralógicos do solo e pela sua aplicabilidade agrônômica e pedológica.

3.3.3 Análise dos dados

As análises descritas a seguir foram utilizadas na compreensão do efeito da amostragem composta, na definição da densidade amostral (n° pontos ha^{-1}) ideal para a transição dos compartimentos geológicos estudados e na definição da melhor proporção amostral entre SM e teor argila para representação da variabilidade espacial.

A modelagem do variograma experimental seguiu os princípios estabelecidos pela hipótese intrínseca (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989). O variograma experimental foi determinado por meio do cálculo da semivariância em função da distância de separação entre amostras (Equação 1). Na área de 150 ha, onde foi estudado o efeito da subamostragem, o variograma foi modelado com 47 pontos. Na área de 380 ha, onde foram estudadas a densidade e a proporção amostral, os variogramas foram modelados com 150; 127; 95; 76; 63; 54; 48 e 42 pontos.

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

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 .

A escolha do modelo ajustado aos variogramas baseou-se no coeficiente de determinação (R^2) e nos parâmetros, coeficientes linear (a) e angular (b), obtidos no procedimento de validação cruzada (VIEIRA, 2000). Na validação cruzada cada valor observado é retirado e, posteriormente, estimado, utilizando os parâmetros do modelo ajustado e os valores observados nas amostras vizinhas.

O erro relativo dos mapas de distribuição espacial foi analisado por meio do “relative root mean square error” (RRMSE) (Equação 2) (LI; HEAP, 2008). A vantagem deste método de cálculo do erro consiste em sua praticidade para comparar mapas de diferentes atributos sem a preocupação da escala. É importante ressaltar que, antes de iniciar o processo de modelagem do variograma, foram escolhidos, aleatoriamente, os pontos para cálculo do RRMSE. Esse procedimento, foi realizado para se evitar erros de retroalimentação na validação do modelo ajustado. Na área

de 150 ha o RRMSE foi calculado com 13 pontos e, na área de 380 ha, foi calculado considerando os valores da krigagem ($n=4790$).

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

em que, n é o número de observações; p_i é o valor estimado para o ponto i , e o_i é o valor real do atributo no ponto i .

Além do RRMSE, utilizou-se como avaliador da acurácia o índice de concordância (Agreement index of Willmott - d) (WILLMOTT, 1984) (Equação 3).

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (p_i - o_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|p'_i| + |o'_i|)^2} \right], 0 \leq d \leq 1 \quad (3)$$

em que, d é o índice de concordância; p_i é o valor estimado no ponto i ; o_i é o valor observado no ponto i ; p'_i é o valor estimado menos a média do observado no ponto i , ($p'_i = p_i - o_{\text{média}}$), e o'_i é o valor observado menos a média do observado ($o'_i = o_i - o_{\text{média}}$) no ponto i .

Diferentemente do índice Kappa, também conhecido como estatística K, normalmente utilizado como uma medida de concordância para dados nominais, o índice “ d ” é indicado para a avaliação da acurácia de dados numéricos.

Cada mapa de krigagem construído possui 4.790 pixels. As informações destes pixels foram utilizadas para a avaliação da precisão (R) e da acurácia (índice de concordância) dos mapas com e sem subamostras e nas diferentes densidades amostrais. Para verificar qual a proporção amostral entre SM e o teor de argila, foi comparado o índice de concordância entre o mapa de SM, na densidade de um ponto a cada 2,5 ha, com os mapas de variabilidade espacial de argila em todas as densidades amostrais estudadas, nas profundidade de 0,00-0,25 m e 0,25-0,50 m. Para evitar problemas com as diferentes grandezas de unidade entre SM e o teor de argila, foi feita a padronização dos valores interpolados antes do cálculo do índice de concordância. A padronização consiste em uma mudança de escala baseada na média e no desvio-padrão (Equação 4). Os resultados finais ficaram com média próxima de zero e variância próxima de 1.

$$Valor_{padronizado} = (Valor_{observado} - Média) / Variância \quad (4)$$

3.4 Resultados e discussão

3.4.1 Amostragem: simples e composta

O modelo esférico foi o que melhor se adequou aos dados analisados, decorrente das variações abruptas ao longo da paisagem (Tabela 3.1). Estas variações podem estar relacionadas aos tipos de material de origem (Figura 3.1c) (RAUCH, 2011), relevo (Figura 3.1b) (KRAVCHENKO; BULLOCK, 2002; SIQUEIRA et al., 2010a; CAMARGO et al., 2013) e solo (Figura 3.1d) (MONTANARI et al., 2012). Segundo Vidal-Torrado et al. (2005), associar o “input” de variabilidade dos atributos do solo aos diferentes compartimentos (geológico, relevo, dentre outros) é a primeira etapa para se compreender a relação entre estes fatores e a caracterização detalhada e ultradetalhada da variabilidade espacial.

Tabela 3.1 Parâmetros dos modelos de variogramas ajustados para os atributos com amostragem simples e composta (3 subamostras).

Atributos	Modelo	C ₀	C ₀ +C ₁	GDE (%)	Alcance (m)	R ²	Validação cruzada		
							a	b	RRMSE (%)
0,00-0,25 m									
Argila	Esférico	25,1	144,0	17,5	814,6	1,0	0,0	1,1	0,3
Argila sub.	Esférico	0,0	143,8	0,0	707,9	1,0	0,1	1,0	0,2
V%	Esférico	7,6	144,4	5,2	605,5	0,9	7,6	0,9	0,4
V% sub.	Esférico	0,0	93,8	0,0	628,1	0,9	4,1	0,9	0,4
SM	Esférico	100	2331,4 10 ³	0,0	833,0	0,9	27,4	1,1	1,1
SM sub.	Esférico	100,0	2470,6 10 ³	0,0	845,2	1,0	2,4	1,1	0,6
0,25-0,50 m									
Argila	Esférico	0,5	339,7	0,1	920,0	1,0	-2,1	1,1	0,2
Argila sub.	Esférico	0,5	325,6	0,1	881,0	1,0	-1,8	1,1	0,2
V%	Esférico	0,1	170,0	0,1	373,0	0,9	14,0	0,7	0,4
V% sub.	Esférico	11,6	56,9	20,1	534,4	1,0	7,2	0,9	0,3
SM	Esférico	100,0	3262,2 10 ³	0,0	861,4	1,0	-25,4	1,1	1,0
SM sub.	Esférico	100,0	2832,5 10 ³	0,0	811,7	1,0	-13,9	1,1	0,5

(N=60); C₀-Efeito pepita, C₀+C₁- Patamar; GDE- grau de dependência espacial $[C_0 / (C_0 + C_1)] * 100$; R²-coeficiente de regressão do modelo ajustado, a – coeficiente angular, b-coeficiente linear, RRMSE – “relative root mean square error”; V% – Saturação por bases, SM – suscetibilidade magnética, sub. – subamostra, média de 3 pontos.

Em ambas as profundidades, todos os atributos apresentaram grau de dependência espacial forte (GDE<25%) (CAMBARDELLA et al., 1994). Devido à perda de representatividade da variabilidade espacial, teoricamente, um dos resultados da

homogeneização seria a mudança do GDE de forte ($GDE < 25\%$) para moderado ($25\% \leq GDE < 75\%$) ou de moderado para fraco ($GDE \geq 75\%$). Valores altos de GDE podem indicar que a densidade amostral utilizada não foi satisfatória para captar a variabilidade ou, então, alta homogeneidade na área. Nesse caso, qualquer interpretação pode ser feita com base na média. Assim, interpretando somente o GDE, podemos dizer que mesmo com a homogeneização provocada pela subamostragem, não houve perda de informação da variabilidade de campo, pois não houve mudança nas classes de GDE.

Na prática, o alcance do variograma pode ser utilizado como indicador da homogeneidade do atributo estudado, além de auxiliar no planejamento amostral (MONTANARI et al., 2012). Em ambas as profundidades avaliadas, houve proximidade entre os valores de alcance da SM e do teor de argila. Pode-se inferir uma possível similaridade no planejamento amostral destes dois atributos. Com exceção do teor de argila (0,00-0,25 m) e saturação por bases (0,25-0,50 m), houve baixa variação do alcance em função da subamostragem para o restante dos atributos estudados.

Quanto aos parâmetros de ajuste da modelagem utilizados para diminuir o erro relacionado à experiência do pesquisador (FRANZEN et al., 2006; GALLARDO et al., 2007; GUEDES FILHO et al., 2010; VIEIRA et al., 2010; LU et al., 2012), nota-se que, na subamostragem, houve melhora do coeficiente angular (a) e linear (b), próximos de 0 e 1, respectivamente. Isso ocorre porque a subamostragem tende a suavizar as diferenças entre valores baixos e altos encontrados na área. Em locais com alta variabilidade natural, este tipo de resultado pode gerar conclusões precipitadas, interferindo nas classes de variabilidade e no delineamento dos limites reais de campo que irão definir as unidades de manejo.

Dessa forma, além da interpretação do GDE, é importante a análise de outros parâmetros, como o RRMSE. Nota-se que os valores de RRMSE para os resultados de amostra simples e subamostra são semelhantes. Isso indica que a amostragem simples pode fornecer a mesma compreensão da variabilidade do que a amostragem composta para área. Esse tipo de informação é importante, pois a representação da real variabilidade do campo é imprescindível para práticas agronômicas sustentáveis (CLAY et al., 2000; FROGBROOK; OLIVER, 2007).

O RRMSE pode ser interpretado como um índice de exatidão, e por ser padronizado permite comparações entre diferentes atributos. Essa característica é importante, pois o pesquisador pode escolher o atributo com melhor exatidão para representar a variabilidade de uma área. A SM, atributo com potencial para quantificação indireta nos solos tropicais, segundo Siqueira et al. (2010b), apresentou valores de RRMSE variando de 0,49 a 1,12%. Resultados da literatura (LI et al.; 2007) sobre condutividade elétrica, também utilizada na quantificação de atributos físicos e químicos dos solos tropicais e temperados (JOHNSON et al., 2001; BRENNING et al., 2008), indicam valores de RRMSE variando de 34,61- 42,69%. Isso ocorre porque a condutividade elétrica foi originalmente desenvolvida para regiões temperadas com baixa expressão dos óxidos de ferro. Nos solos tropicais, com alta concentração de óxidos de ferro, a condutividade elétrica pode sofrer alterações (WU et al., 2008). Resultados de pesquisa mostram que a medição da condutividade elétrica com sensor de contato apresenta melhor desempenho no Latossolo Vermelho distroférico com menor teor de argila (MACHADO et al., 2006). Essa informação é importante para balizar futuros estudos em áreas com diferentes teores de óxidos de ferro do solo e teor de ferro total (Fe_2O_3), ajudando o pesquisador a escolher a ferramenta de análise mais apropriada para estudo indireto da variabilidade dos atributos do solo.

Foi observado que a continuidade espacial, utilizando amostragem simples e composta, é similar em ambas as profundidades (Figura 3.2). A prática de subamostragem é comum em estudos da Ciência do Solo (CARVALHO et al., 2002) e no planejamento agrícola (DINKINS; JONESSOIL, 2008). Uma das justificativas apresentadas é a maior representatividade da variabilidade espacial (SCHLINDWEIN; ANGHINONI, 2002). Porém, como discutido anteriormente, esse tipo de interpretação pode gerar conclusões equivocadas sobre a real variabilidade de campo. Os resultados apresentados (Figura 3.1) indicam que algumas conclusões sobre o planejamento amostral, considerando a amostragem composta, devem ser revistas por dois motivos. O primeiro está relacionado à homogeneidade das classes de variabilidade com real representatividade das condições do campo, e o segundo, ao custo e ao tempo requeridos nesse tipo de amostragem.

Nossos resultados indicam que o mapa de krigagem elaborado com base na amostragem simples pode fornecer informações sobre a variabilidade espacial semelhante à dos mapas de krigagem elaborados com amostra composta.

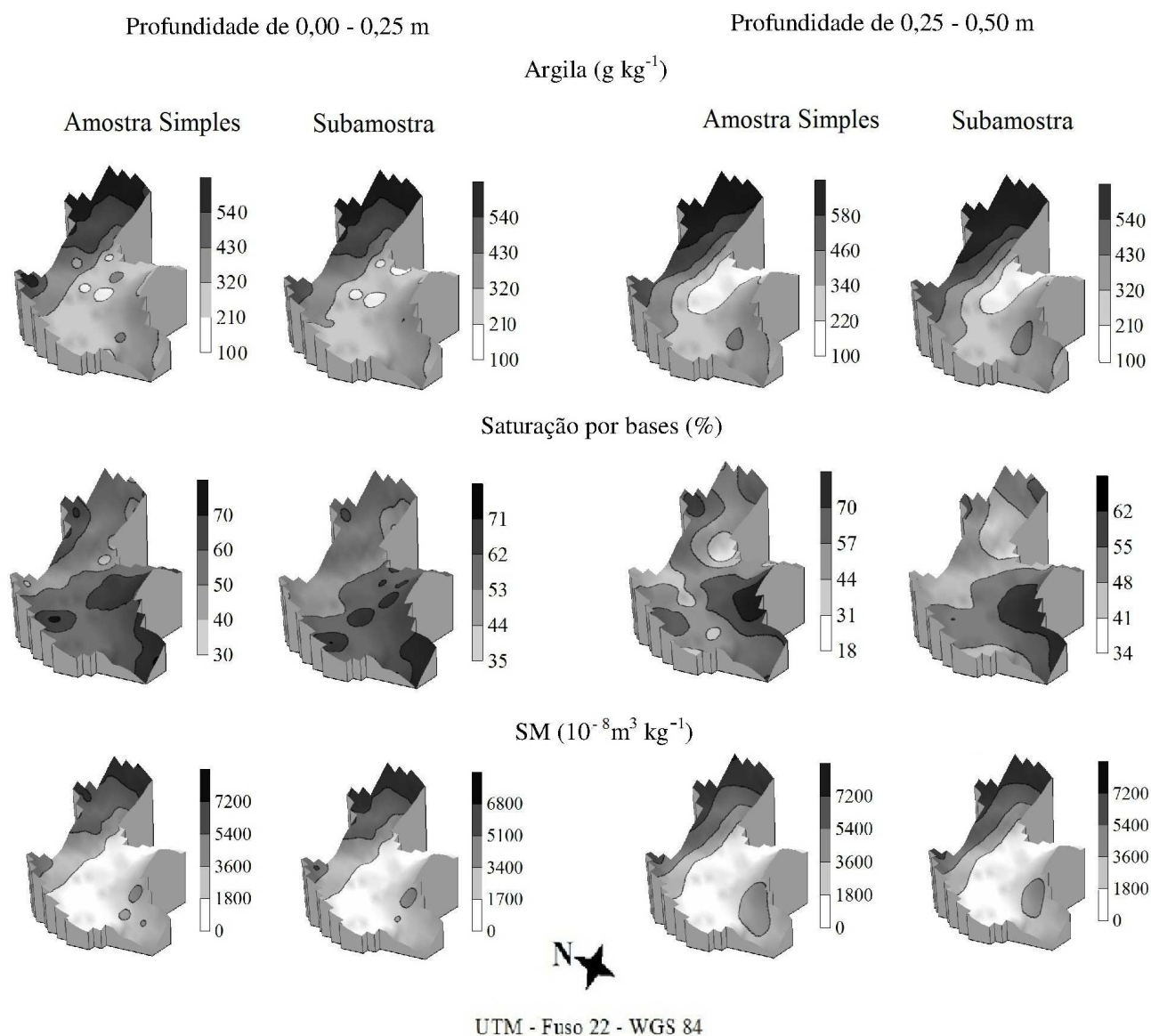


Figura 3.2 Mapas de distribuição espacial para teor de argila, V% – Saturação por bases, SM – suscetibilidade magnética (área de 150 ha, n=60).

Os índices de concordância entre os mapas de variabilidade espacial gerados com base na amostragem simples e composta variaram de 0,80 a 0,99 (Figura 3.3). Pode-se afirmar que a mudança no planejamento amostral de amostras compostas

para amostra simples, além de não afetar a compreensão da real variabilidade de campo, pode proporcionar menor custo e tempo de amostragem.

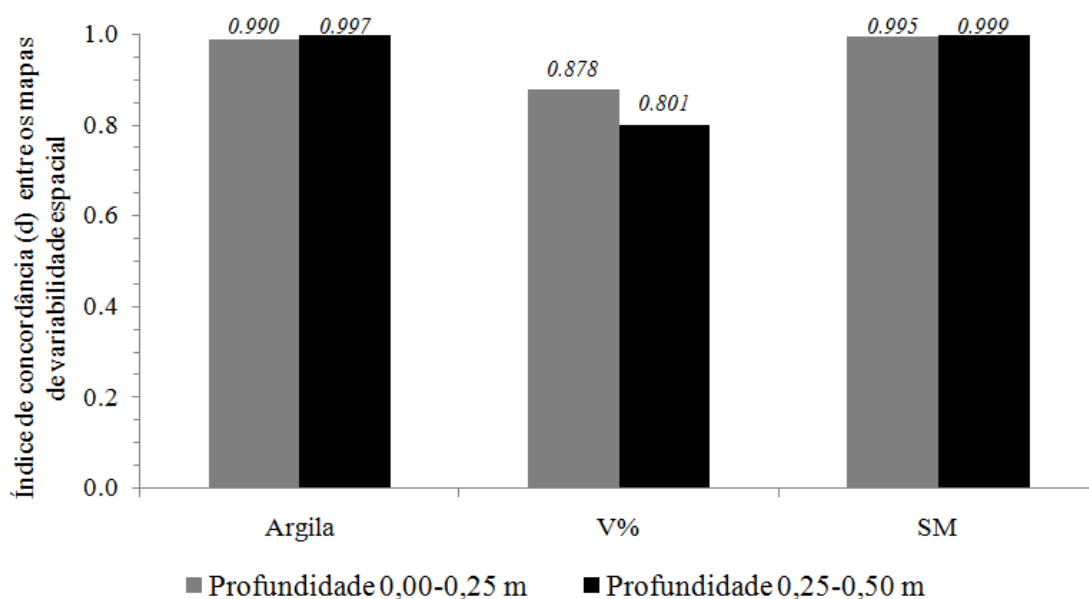


Figura 3.3 Índice de concordância (d) entre os mapas de variabilidade espacial elaborados com amostras simples e composta (3 subamostras). V% – Saturação por bases, SM – suscetibilidade magnética. (n= 4790).

3.4.2 Densidade amostral

Na Tabela 3.2, são apresentados parâmetros dos modelos de variogramas ajustados para teor de argila, saturação por bases (V%) e SM, nas diferentes densidades amostrais (um ponto a cada 2,5; 3; 4; 5; 6; 7; 8 e 9 ha).

Com exceção do V% nas densidades de um ponto a cada 2,5 e 4 ha, o modelo esférico foi o que melhor se adequou aos atributos estudados nas diferentes densidades amostrais. A mudança do modelo exponencial para o esférico está relacionada à representatividade de mudanças abruptas ao longo da paisagem.

Em curtas distâncias (densidade de um ponto a cada 2,5 ha, com espaçamento médio entre amostras de 158 m), a variação do V% é gradual, sendo que, a longas distâncias (densidade de um ponto a cada 9 ha, com espaçamento de 300 m), esta variação ocorre abruptamente. A SM e o teor de argila apresentaram mudanças abruptas, tanto em curta (158 m) quanto em longas distâncias (300 m).

Tabela 3.2 Parâmetros dos modelos de variogramas ajustados para as diferentes densidades amostrais.

Tabela 6.2 Parâmetros dos modelos de variogramas ajustados para as diferentes densidades amostrais.								
Atributos	Profundidade (m)	Modelo	C ₀	C ₀ +C ₁	Alcance (m)	R ²	Validação cruzada	
							a	b
1 ponto a cada 2,5 ha (n = 150)								
V%	0,00-0,25	Exponencial	85	188	597	0,94	1,04	0,98
	0,25-0,50	Exponencial	85	170	566	0,84	1,17	0,98
Argila	0,00-0,25	Esférico	10	106	805	0,97	0,01	1,04
	0,25-0,50	Esférico	15	110	1041	0,97	0,01	1,06
SM	0,00-0,25	Esférico	160000	1446000	798	0,97	-0,31	1,11
	0,25-0,50	Esférico	307000	1721000	753	0,99	-5,51	1,11
1 ponto a cada 3 ha (n = 127)								
V%	0,00-0,25	Exponencial	87	184	947	0,91	-0,66	1011,00
	0,25-0,50	Exponencial	83	173	665	0,88	-1,99	1048,00
Argila	0,00-0,25	Esférico	12	108	873	0,99	0,06	1069,00
	0,25-0,50	Esférico	19	113	982	0,98	0,00	1074,00
SM	0,00-0,25	Esférico	90000	1539000	748	0,99	1,43	1084,00
	0,25-0,50	Esférico	219000	1838000	727	0,99	-3,91	1073,00
1 ponto a cada 4 ha (n = 95)								
V%	0,00-0,25	Exponencial	56	193	662	0,89	4,31	0,91
	0,25-0,50	Exponencial	35	175	580	0,90	-0,80	1016,00
Argila	0,00-0,25	Esférico	10	125	843	0,96	0,04	1046,00
	0,25-0,50	Esférico	13	121	959	0,98	0,00	1032,00
SM	0,00-0,25	Esférico	118475	1759000	777	0,99	-0,97	1094,00
	0,25-0,50	Esférico	267000	1915000	786	0,97	-16,32	1116,00
1 ponto a cada 5 ha (n = 76)								
V%	0,00-0,25	Esférico	96	155	733	0,77	23,57	0,57
	0,25-0,50	Esférico	82	165	763	0,79	4,44	0,91
Argila	0,00-0,25	Esférico	0	119	877	0,99	-0,05	1013,00
	0,25-0,50	Esférico	16	125	1026	0,99	-0,02	1037,00
SM	0,00-0,25	Esférico	142000	1841000	884	0,99	7,09	1,13
	0,25-0,50	Esférico	168000	1974000	863	0,96	-4,38	1105,00
1 ponto a cada 6 ha (n = 63)								
V%	0,00-0,25	Esférico	75	164	1473	0,93	11,13	0,79
	0,25-0,50	Esférico	90	153	878	0,92	3,02	0,94
Argila	0,00-0,25	Esférico	0	125	817	0,98	0,16	1003,00
	0,25-0,50	Esférico	0	137	908	0,99	0,00	0,97
SM	0,00-0,25	Esférico	1000	2097000	872	0,99	-1,35	1046,00
	0,25-0,50	Esférico	1000	2095288	815	0,98	-0,11	1069,00
1 ponto a cada 7 ha (n = 54)								
V%	0,00-0,25	Esférico	86	172	1634	0,91	11,73	0,78
	0,25-0,50	Esférico	94	173	822	0,71	-1,12	1029,00
Argila	0,00-0,25	Esférico	0	119	802	0,98	0,16	0,99
	0,25-0,50	Esférico	0	141	916	0,97	0,08	1018,00
SM	0,00-0,25	Esférico	1000	2087000	847	0,98	7,10	1,12
	0,25-0,50	Esférico	1000	2011513	735	0,97	13,02	1174,00
1 ponto a cada 8 ha (n = 48)								
V%	0,00-0,25	Esférico	89	169	1426	0,80	21,36	0,60
	0,25-0,50	Esférico	49	169	582	0,77	24,29	0,52
Argila	0,00-0,25	Esférico	0	120	823	0,89	0,24	0,96
	0,25-0,50	Esférico	0	143	916	0,96	0,43	1029,00
SM	0,00-0,25	Esférico	1000	2242238	910	0,94	51,89	1132,00
	0,25-0,50	Esférico	1000	2204034	849	0,94	58,41	1153,00
1 ponto a cada 9 ha (n = 42)								
V%	0,00-0,25	Esférico	34	173	1570	0,85	9,46	0,81
	0,25-0,50	Esférico	54	178	576	0,69	25,04	0,51
Argila	0,00-0,25	Esférico	0	128	874	0,91	0,07	0,86
	0,25-0,50	Esférico	0	156	1063	0,99	-0,32	0,99
SM	0,00-0,25	Esférico	1000	2422979	910	0,91	32,63	1104,00
	0,25-0,50	Esférico	1000	2312008	776	0,93	69,57	1189,00

C₀-Efeito pepita, C₀+C₁- Patamar; R²-coeficiente de regressão do modelo ajustado, a – coeficiente angular, b-coeficiente linear, V% – Saturação por bases, SM – suscetibilidade magnética.

Com a diminuição da densidade amostral (menor número de pontos coletados por hectare), foram observadas maiores oscilações do C_0 para teor de argila e SM em ambas as profundidades. Como o teor de argila e a SM são atributos com pouca influência antrópica quando comparados ao V%, pode-se inferir que a diminuição do C_0 está relacionada ao número de pontos dentro de cada compartimento geológico. Dessa maneira, a diminuição dos valores de C_0 , a partir da densidade de um ponto a cada 4-5 ha, está sendo influenciada pelo maior número de pontos no compartimento do Depósito Colúvio – Eluvionar em relação aos outros compartimentos (Figuras 3.1c e 3.1e). Número de pontos insatisfatório para modelagem do variograma, erros de modelagem e homogeneidade da área são alguns fatores normalmente associados a altos valores do C_0 . Esse resultado pode balizar o planejamento amostral em áreas de transição, orientado para um mesmo número de pontos em compartimentos geológicos distintos ou alertando para falsas homogeneidades, como o caso em questão.

Na profundidade de 0,00-0,25 m, os valores de alcance aumentaram gradativamente em função da densidade amostral para V% e SM. Os coeficientes angular (a) e linear (b) da validação cruzada afastaram-se dos valores ideais (0 e 1, respectivamente), demonstrando que, com a menor densidade amostral, existe perda na representação das classes de variabilidade no campo.

Na Figura 3.4, são apresentados os mapas de variabilidade espacial para as diferentes densidades amostrais. Nota-se que, apesar da suavização das isolinhas e das classes de variabilidade, não foram observadas mudanças consideráveis no padrão de distribuição espacial. A diminuição no número de amostras coletadas afeta o cálculo da semivariância, principalmente em curtas distâncias (BOGAERT; D'OR, 2002), o que pode gerar resultados imprecisos. Porém, não foi observada essa perda de representatividade.

Na avaliação da representatividade das classes de variabilidade, a legenda de todos os atributos foi padronizada em 5 classes (Figura 3.4). As menores classes de argila variaram entre 100-140 g kg⁻¹, e as maiores classes, entre 580-680 g kg⁻¹. Para V%, as menores classes variaram entre 26-38%, e as maiores classes, entre 64-74 %.

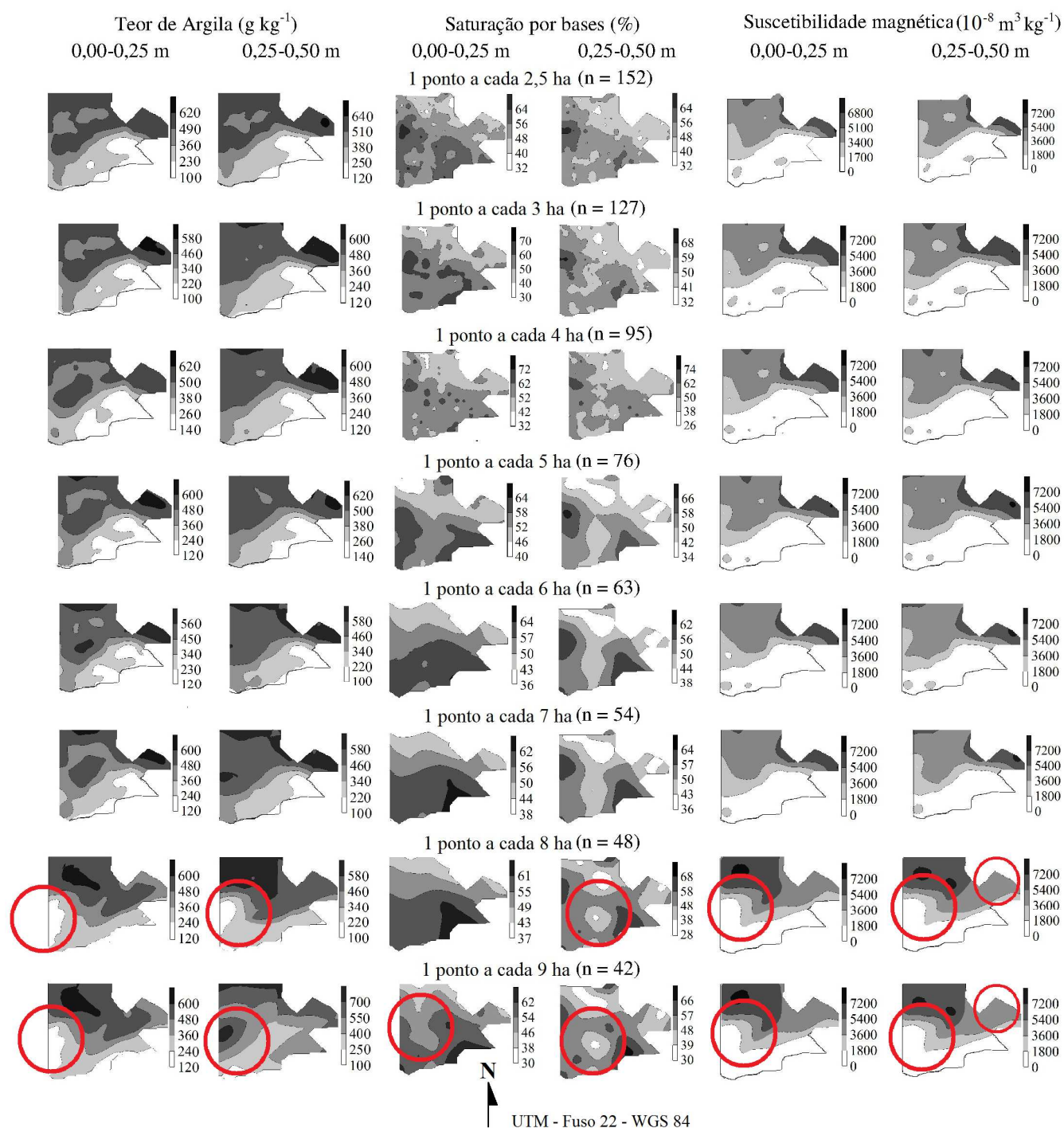


Figura 3.4 Mapas de distribuição espacial para as diferentes densidades amostrais (área de 380 ha). (—) Região com maior alteração das isolinhas no mapa de variabilidade.

A menor classe de SM foi zero, e as maiores classes variaram entre $6.800\text{--}7.200 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$. A variação das classes de variabilidade teve maior influência da localização da amostra do que do número de amostras coletadas. Dessa maneira,

ressaltamos a importância de se levar em conta a informação espacial (tipo de rocha, solo e outras) antes de se definir o plano de amostragem.

Na Figura 3.5, são apresentados os resultados da correlação e os valores de RRMSE do mapa de variabilidade, na densidade de um ponto a cada 2,5 ha, com os mapas das densidades de um ponto a cada 3; 4; 5; 6; 7; 8 e 9 ha. Os mapas de teor de argila apresentaram correlações variando de 0,99 (um ponto a cada 3 ha) a 0,43 (um ponto a cada 8 ha). Saturação por bases apresentou correlações variando de 0,96 (um ponto a cada 3 ha) a 0,57 (um ponto a cada 9 ha). SM apresentou correlações variando de 0,99 (um ponto a cada 3 ha) a 0,62 (um ponto a cada 8 ha). As correlações mais baixas, bem como os piores resultados de RRMSE foram encontrados para densidade de um ponto a cada 8 e 9 ha.

O valor da correlação (R) pode ser interpretado como um índice de precisão, e o RRMSE, como um índice de acurácia. Assim, para argila e SM em ambas as profundidades, não houve grandes variações na precisão (0,01-0,02%) e na acurácia (0,05-0,2%), nas densidades amostrais de um ponto a cada 2,5 a 7 ha. A SM e o teor de argila são atributos covariativos do material de origem e sofrem pouca influência antrópica. Estes dois atributos apresentam correlação com outros atributos de importância agronômica, como condutividade hidráulica (DOLINAR, 2009), potencial de adsorção de fósforo (CAMARGO et al., 2013) e outros. Baseado nessa correlação, pode-se inferir que as informações do adensamento amostral deste trabalho podem ser extrapoladas para estudos da caracterização da variabilidade espacial de atributos covariativos da SM e da argila. Para V%, atributo covariativo do material de origem, mas com influência antrópica, houve redução de 20% na precisão e 0,05% na acurácia do mapa elaborado com a densidade de um ponto a cada 7 ha, em relação à densidade de 2,5 ha.

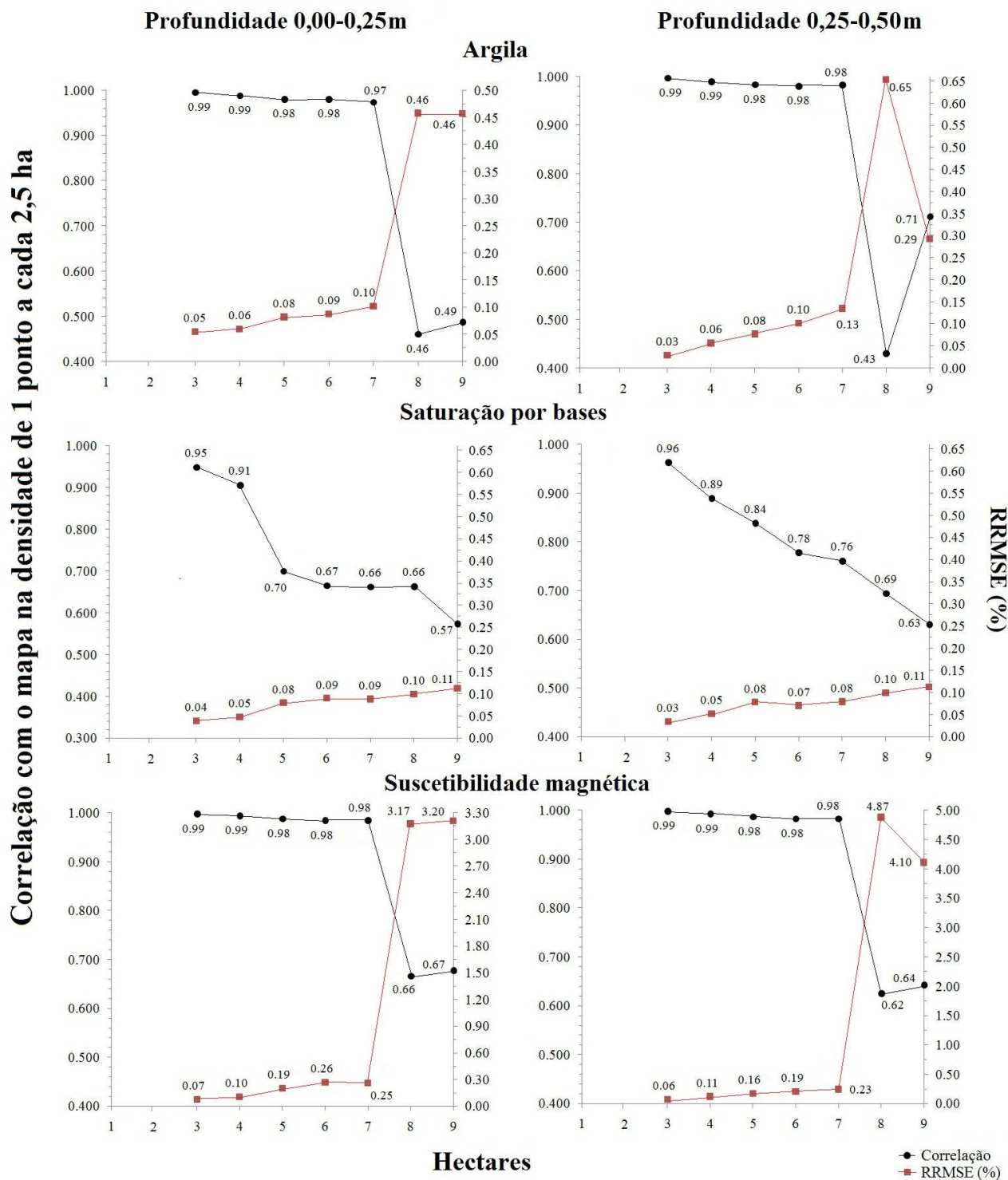


Figura 3.5 Correlação (n=4790) e valores de RRMSE (n = 40) do mapa de variabilidade na densidade de um ponto a cada 2,5 ha com os mapas das densidades de um ponto a cada 3;4;5;6;7;8 e 9 ha.

Apesar de existirem vários trabalhos em diferentes densidades amostrais (HENGL et al., 2006; IBÁÑEZ et al., 2009; NANNI et al., 2011; LIU et al., 2013) são escassos os estudos de definição da densidade amostral ideal para determinado

compartimento geológico e/ ou pedológico. Cerca de 80 a 85% do erro total das práticas de manejo do solo podem ser atribuídos à amostragem no campo e de 15 a 20% ao trabalho de laboratório (HAUSER, 1973). Cantarella et al. (2006) relatam que erros em laboratórios são comuns, e que, no Brasil, o erro de análises químicas está na faixa de 3 a 26%, e das análises granulométricas entre 15 e 32%. Dessa maneira, trabalhos como o proposto pelo presente estudo têm grande importância, pois podem direcionar a amostragem estratificada, aumentando a representatividade de campo, a precisão e a acurácia dos resultados. Nos Estados Unidos, os produtores são orientados a montarem o planejamento amostral estratificado por série de solo (menor unidade de manejo) (DINKINS; JONESSOIL, 2008). Admite-se que, nessa menor unidade de manejo, a variabilidade seja mínima; portanto, um único ponto de amostragem é suficiente para representar toda a área. Siqueira et al. (2010), nomearam como área de manejo específico o local com mínima variabilidade dentro de um perímetro.

3.4.3 Proporção amostral: suscetibilidade magnética e teor de argila

Os índices de concordância entre o mapa da SM e os mapas de variabilidade espacial do teor de argila variaram de 0,99 a 0,60 (Figura 3.6). Analisando os índices de concordância, nota-se que até à densidade de um ponto a cada 7 ha, os valores foram próximos do ideal (valor 1). Esse resultado confirma resultados (Figura 3.5), mostrando que os valores de campo para argila e SM, espaçados em até 256 m, possuem relação entre si neste tipo de transição geológica. O estudo do planejamento amostral é uma tarefa complexa, tanto pelo trabalho de campo, quanto pelo conhecimento geoestatístico requerido. Em solos sob transição de materiais de origem, como deste trabalho, este tipo de estudo é ainda mais complexo, pois nesse caso existem grandes chances de o solo ser alóctone (não é originado da própria rocha-matriz, mas sim do transporte de sedimentos de outras rochas) ou mistura de atributos de solos próximos, porém provenientes de rochas diferentes. Dessa maneira, tão importante quanto a caracterização da variabilidade para regiões mais homogêneas (mesmo compartimento geológico, solos autóctones, mistura de solos pro-

venientes de rochas distintas) é a caracterização da variabilidade em regiões com tendência à heterogeneidade.

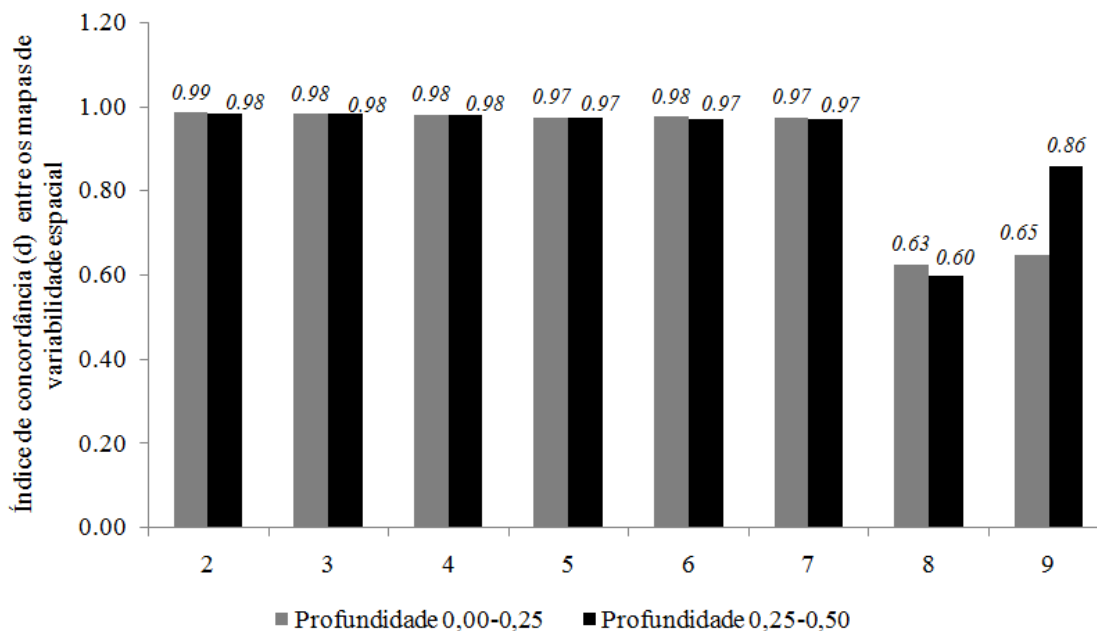


Figura 3.6 Índice de concordância (d) do mapa de suscetibilidade magnética na densidade de um ponto a cada 2,5 ha com os mapas de variabilidade espacial de argila nas densidades de 2,5; 3;4;5;6;7;8 e 9 ha (n = 4790).

Com base neste resultado, sugere-se a proporção amostral de um ponto de SM a cada 2,5 (Figura 3.7a) ha para um ponto de argila a cada 7 ha (Figura 3.7b) (proporção 3:1). Devido à carência de informações para subsidiar amostragem estratificada em grandes áreas, essa informação pode ser utilizada para auxiliar o planejamento amostral em Latossolos sob a transição Serra Geral, Depósito Colúvio-Eluvionar e Depósito Aluvionar (Figura 3.7d). Este tipo de transição representa cerca de 44.000 ha do Estado de São Paulo (IPT, 1981; GEOBANK,2012), abrangendo grande parte da área cultivada com cana-de-açúcar no estado (CONAB, 2013).

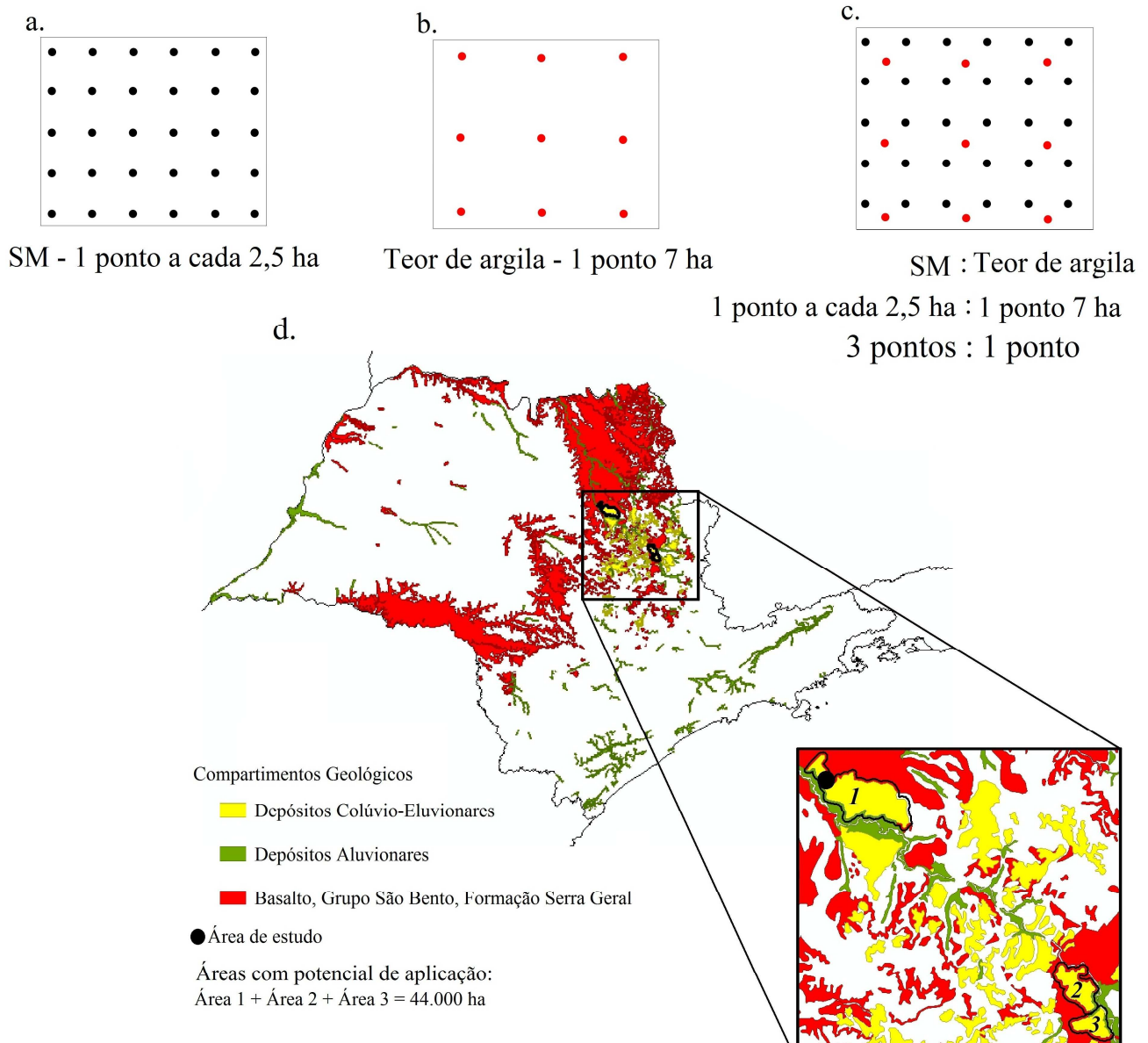


Figura 3.7 Configuração amostral para suscetibilidade magnética (SM) (●) (a), teor de argila (●) (b), proporção amostral entre SM : teor de argila (c) e mapa geológico do Estado de São Paulo, indicando áreas com potencial de aplicação da densidade e proporção amostral sugeridas (d).

A similaridade no padrão de distribuição espacial da SM e do teor de argila (Figura 3.4), bem como os resultados do índice de concordância (d) (Figura 3.6) sugerem que a SM tenha correlação com o teor de argila em ambientes com variação do teor de ferro total do solo (Fe_2O_3) entre 20 a 200g kg^{-1} . As correlações da SM com o teor de argila ($r = 0,68$; $P < 0,001$; $n = 37$), saturação por bases ($r = 0,76$; $P < 0,001$; $n = 38$) e teor de hematita ($r = 0,82$; $P < 0,001$; $n = 38$) encontradas por Siqueira et al. (2010b), em solos hipoférricos (teores de $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 80\text{ g kg}^{-1}$), e as cor-

relações com teor de argila ($r = 0,70$; $P < 0,001$; $n = 257$) encontradas por Matias (2010), também em solos hipoférricos, sugerem que SM tem potencial para ser utilizada em estudos de cokrigagem e proporção amostral em outras áreas com mesma variação do teor de ferro no solo.

3.5 Conclusões

Não houve diferença entre os mapas de variabilidade espacial dos atributos gerados com amostras compostas e amostras simples. Essa informação pode subsidiar uma mudança no sistema de amostragem do setor agroindustrial, reduzindo custos e tempo de amostragem.

A densidade amostral mínima requerida para que não haja perda na representação da variabilidade espacial do teor de argila, saturação por bases e suscetibilidade magnética de Latossolos sob transição Serra Geral, Depósito Colúvio-Eluvionar e Depósito Aluvionar é de um ponto a cada 7 ha;

A suscetibilidade magnética (SM) pode ser utilizada para melhorar as estimativas de predição do teor de argila de Latossolos (com variação do teor de ferro total entre 20 a 200g kg⁻¹) sob transição Serra Geral, Depósito Colúvio-Eluvionar e Depósito Aluvionar na proporção amostral de um ponto de SM a cada 2,5 ha para um ponto de argila a cada 7 ha (proporção 3:1).

4.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O atual contexto nacional da agricultura e da ciência do solo demonstra a importância sobre o desenvolvimento de protocolos para o delineamento de unidades de mapeamento detalhado do solo e para o planejamento amostral estratificado. Grande parte da carência desses protocolos está relacionada à falta de propostas multidisciplinares.

O Capítulo 2 retoma uma proposta de integração bi e tridimensional para composição de unidades de mapeamento. A evolução dessa proposta está relacionada com a matematização dos modelos conceituais de paisagem e com a aquisição de informações quantitativas do solo, utilizando suscetibilidade magnética e espectroscopia de refletância difusa. Pedologicamente, os resultados deste Capítulo podem balizar futuras propostas sobre desenvolvimento de protocolos para delineamento de unidades de mapeamento detalhado do solo e estratégias de identificação de áreas com diferentes padrões de variabilidade. No Brasil, um dos primeiros trabalhos a proporem esse tipo de abordagem, agrupando solos com base em modelos de paisagem, como o de superfícies geomórficas e modelagem matemática, foi o de Marques Jr. (1995) e Marques Jr. e Lepsch et al. (2000). Agronomicamente, os resultados deste Capítulo podem auxiliar no refinamento dos mapas técnicos do setor sucroenergético, os chamados ambientes de produção. Com base nas unidades delineadas, é possível fazer o melhor planejamento para alocação de variedades de cana-de-açúcar ou então prever características industriais da planta, como ART e porcentagem de fibra.

O Capítulo 3 traz resultados interessantes sobre o planejamento amostral. A criação dos primeiros cursos de geologia no Brasil, na década de 1950, e o surgimento da agricultura de precisão impulsionaram a introdução da geoestatística no Brasil, por volta de 1990. Porém, até hoje, o planejamento amostral é dúvida constante em discussões científicas e em setores relacionados a geociências. Futuros trabalhos podem utilizar as informações de proporção de densidade amostral apresentadas nesta Tese para aperfeiçoar suas amostragens ou para partirem de uma inferência estatística para proporem densidades amostrais a diferentes compartimentos geológicos, pedológicos e geomorfológicos.

5.1 LITERATURA CONSULTADA

- ALMEIDA, V. A.; TORRENT, J.; BARRÓN, V. Cor do solo, formas do fósforo e adsorção de fosfatos em Latossolos desenvolvidos de basalto do extremo sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa. v. 27, n. 6, p. 985–1.002, 2003.
- ASLI, M.; MARCOTTE, D. Comparison of approaches to spatial estimation in a bivariate context. **Mathematical Geology**, v.27, p.641– 658, 1995.
- BARBIERI, D. M. ET AL. Hillslope curvature, clay mineralogy, and phosphorus adsorption in an Alfisol cultivated with sugarcane. **Science. Agrícola**, Piracicaba, v. 66, n. 6, p. 819-826, 2009.
- BARBIERI, D. M.; MARQUES JR., J.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos químicos de um Argissolo para aplicação de insumos à taxa variável em diferentes formas de relevo. **Engenharia Agrícola**, v. 28, n. 4, p. 645-653, 2008.
- BARRIOS, M. R.; MARQUES JR., J.; PANOSSO, A. R.; SIQUEIRA, D. S.; SCALA JR., N. L. Magnetic susceptibility to identify landscape segment son a detailed scale in the region of Jaboticabal, São Paulo, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 1073-1082, 2012.
- BARRÓN, V.; MELLO, J. W. V.; TORRENT, J. Caracterização de óxidos de ferro em solos por espectroscopia de Reflectância Difusa. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H. ; SCHAEFER, C.E.G.R., eds. Tópicos em ciência do solo. Viçosa, **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 2000, v.1, p.139-162.
- BARTINGTON. **Operation Manual for MS2 Magnetic Susceptibility System** Disponível em: <<http://www.bartington.com/Literaturepdf/Operation%20Manuals/om0408%20MS2.pdf>>; Acessado em: 24 de jan. 2013.
- BAZAGLIA FILHO, O. **Comparação entre mapas de solos obtidos pelos métodos convencional e digital numa área complexa**. 2012. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.
- BERG, M. V. D. ; LEPSCH, I. F.; SAKAI, E. Solos de planícies aluviais do vale do Rio Ribeira de Iguaçu, SP. I- Padrões de distribuição. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, SP, v. 11, p. 315-321, 1987.
- BERG, M. V. D. **Transect.For, listagem na língua Fortran**. Piracicaba: ESALQ/USP, Departamento de Ciências do Solo, 1988, 3p.
- BERQUÓ, T.S.; THOMPSON, R.; PARTITI, C. S. M. Magnetic study of Brazilian peats from São Paulo state. **Geoderma**, 118: 233-243, 2004.
- BIE, S. W.; BECKETT, P.H.T Comparison of 4 independent soil surveys by airphoto interpretation, Paphosárea (Cyprus). **Photogrammetria**, v. 29, n. 6, p. 189-202, 1973.
- BOCQUIER, G. L'évolution des démarches en pédologie – De l'heritage de B. B. Dokuchaev à la diversité des démarches actuelles en pédologie. **Science du Sol**, p.113-221, 1984.
- BOTELHO, Márcio Ramos et al. Medida da cor em solos do Rio Grande do Sul com a carta de Munsell e por colorimetria. **Ciência Rural**, vol.36, n.4, p. 1179-1185, 2006.
- BOGAERT P.; D'OR, D. Estimating Soil Properties From Thematic Soil Maps: The Bayesian Maximum Entropy Approach. **Soil Science Society American Journal**, 66, p.1492-1500, 2002.
- BOUGHTON, et. al. Association of ecotones with relative elevation and fire in an upland Florida landscape. **Journal of Vegetation Science**, v. 17, p.361-368, 2006.
- BOULET, R. Análise estrutural da cobertura pedológica e cartografia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 25., Campinas, 1988. **Anais...** Campinas, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1988. p. 79-90.
- BOULET, R.; HUMBEL, F. X.; LUCAS, Y. **Analyse structurale et cartographie em pedologie**. I – Prise en compte l'organisation bidimensionnelle de la couberture pédologique: lês étude de toposéquenses et leurs principaux aport à la connaissance des sols. Cah. ORSTOM. Paris, França. Série Pédologie. v. XIX, n.4, p. 309-322, 1982.
- BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2012 – Ano base 2011: Resultados Preliminares** Rio de Janeiro: EPE, 2012. 51 p.: 18 il. Disponível em:

- http://www.lepten.ufsc.br/disciplinas/emc5489/arquivos/pdf/textos/2012/Resultados_Pre_BEN_2012.pdf; Acessado em: 18 de jan. 2013.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. Centro Nacional de Ensino e Pesquisas Agronômicas. Serviço Nacional de Pesquisas Agronômicas. Comissão de Solos. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado de São Paulo**: contribuição à carta de solos do Brasil. Rio de Janeiro, 1960. 634 p. (Brasil. Ministerio da Agricultura. SNPA. Boletim, 12).
- BRASIL. Ministério das Minas e Energia, Secretaria Geral. 1981. **PROJETO RADAM BRASIL**: Geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro.
- 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.
- BRUS, D.J. ET AL. The performance of spatial interpolation methods and choropleth maps to estimate properties at points: a soil survey case study. **Environmetrics**, v.7, p.1-16, 1996.
- BUOL, S. W. Suelos tropicales: clasificación y características. In: SALINAS, J. G.; GOULEY, L. M. **Sorgo para suelos ácidos**. Cali: CIAT, 1990. p. 49-62.
- BURROUGH, P. A. **Sampling Designs for Quantifying Map Unit Composition**. In: Spatial Variabilities of Soils and Landforms, Soil Science Society of America, SSSA Special Publication no. 28, p. 89-125, 1991.
- BURROUGH, P. A. **Principles of geographical information systems for land resources assessment**. Oxford: Claredon Press, 1986. 193p.
- 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) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2013.
- CAMARGO, L. A.; MARQUES JR., J.; PEREIRA, G. T.; HORVAT, R. A. Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de um Latossolo sob diferentes formas de relevo. I-Mineralogia da fração argila. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 2269-2277, 2008a.
- CAMARGO, L. A.; MARQUES JR., J.; PEREIRA, G. T.; HORVAT, R. A. Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de um latossolo sob diferentes formas do relevo: II - correlação espacial entre mineralogia e agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 6, p. 2279-2288, 2008b.
- CAMARGO, L. A.; MARQUES JR., J.; PEREIRA, G. T. Spatial variability of physical attributes of an Alfisol under different hillslope curvatures. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 617-630, 2010.
- CAMARGO, L. A.; MARQUES JR., J.; PEREIRA, G. T.; ALLEONI, L. R. F. Spatial correlation between the composition of the clay fraction and contents of available phosphorus of an Oxisol at hillslope scale. **Catena**, Cremlingen, v. 100, p. 100-106, 2013.
- CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994.
- CAMPOS M. C. C.; MARQUES JÚNIOR, 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**, v. 38, n. 4, p. 974-980, 2008.
- CAMPOS, R. C.; DEMATTÊ, J. A. M. Cor do solo: uma abordagem da forma convencional de obtenção em oposição à automatização do método para fins de classificação de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 853-863, 2004.
- CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; RAIJ, B. Van.; ABREU, M.F. Variability of soil analysis in commercial laboratories: implications for lime and fertilizer recommendations. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, London, v. 37, p. 2213-2225, 2006.
- CARNEIRO, A. A. O.; TOUSO, A. T.; BAFFA, O. Avaliação da suscetibilidade magnética usando uma balança analítica. **Química Nova**, v.26, p.952-956, 2003.

- CARVALHO, J.R.P.; SILVEIRA, P.M.; VIEIRA, S.R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.37, p.1151-1159, 2002.
- CEC, 2009. **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.
- CEDDIA, M. B.; VIEIRA, S. R.; VILLELA, A. L. O.; MOTA, L. S.; ANJOS, L. H. C.; CARVALHO, D. F. Topography and spatial variability of soil physical properties, **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 66, n. 3, p. 338-352, 2009.
- CHANDER, G.; MARKHAM, B. Revised Landsat-5 TM Radiometric Calibration Procedures and Post-calibration Dynamic Ranges. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, New York, v.41, n.11, p. 2.764 - 2.677, 2003.
- CHOESIN, D. N. Use of landscape ecological analysis to determine ecotone locations: an evaluation based on field data. **Journal of Mountain Science**, v. 6 n. 2, p. 91 – 99, 2001.
- CLAY, D. E., CHANG, J., CARLSON, C. G.; MALO, D.; CLAY, S. A.; ELLSBURY, M. Precision farming protocols. Part 2. Comparison of sampling approaches for precision phosphorus management. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**. v.31, p. 2969-2985, 2000.
- COMEGNA, V.; BASILE, A. Temporal stability of spatial patterns of soil water storage in a cultivated Vesubian soil, **Geoderma**, Amsterdam, v. 62, p. 299– 310, 1994.
- CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento de safra brasileira : cana-de-açúcar, primeiro levantamento, abril/2012** - Companhia Nacional de Abastecimento. – Brasília: Conab 2012. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/12_04_10_09_19_04_boletim_de_cana.pdf>; Acessado em: 23 jan. 2013.
- CONSECANA. Conselho dos Produtores de Cana-de-açúcar, açúcar e álcool do Estado de São Paulo. **Manual de instruções**. Piracicaba, 2003, 118 p.
- CORTEZ, L. A.; MARQUES JR., J.; PELUCO, R. G.; TEIXEIRA, D. B. T.; SIQUEIRA, D. S. Suscetibilidade magnética para identificação de áreas de manejo específico em citricultura. **Energia na Agricultura**, v. 26, p. 60-79, 2011.
- COSTA, A. C. S. et al. Quantification and characterization of maghemite in soils derived from volcanic rocks in southern Brazil. **Clays and Clays Minerals**, v. 4, p. 466-473, 1999.
- CRAIK, D. **Magnetism, Principles and Applications**. John Wiley and Sons, p.1-459, 1995.
- CUNHA, P. **Superfícies geomórficas e variabilidade de latossolos em uma vertente sobre arenito-basalto em Jaboticabal (SP)**. 2000. 176 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2000.
- CUNHA, P.; MARQUES JR, J.; CURI, N.; PEREIRA, G. T.; LEPSCH, I. F. Superfícies geomórficas e atributos de Latossolos em uma sequência Arenítico-Basáltica da região de Jaboticabal (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 1, p. 81-90. 2005.
- CURI, N. **Lithosequence and toposequence of oxisols from Goiás and Minas Gerais, Brazil**. 1983. 158 f. Tesis (Ph.D.). West Lafayette, Purdue University, 1983.
- DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; PEDRON, F. de A. et al. Relação entre as características e o uso das informações de levantamentos de solos de diferentes escalas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 5, p. 1479 – 1486, 2004.
- 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.
- DANIELS, R. B.; GAMBLE, E. F.; CADY, J. G. The relation between geomorphology and soil morphology and genesis. **Advances Agronomy**, San Diego, v. 23, n. 1, p. 51-87,1971.
- DANIELS, R.B. ; HAMMER, R.D. **Soil geomorphology**. New York, John Wiley & Sons, 1992. 236p.

- DEARING, J. A.; HAY, K. L.; BABAN, S. M. K.; HUDDLESTON, A. S.; WELLINGTON, E. M. H.; LOVELAND, P. J. Magnetic susceptibility of soil: an evaluation of conicting theories using a national data set. **Geophysical Journal International**, Oxford, v. 127, n. 3, p. 728–734, 1996.
- DEARING, J.A. **Environmental magnetic susceptibility**. Using the Bartington MS2 system. England: British Library, 1994, 104 p.
- DELARMELINDA, E. A.; WADT, P. G. S.; ANJOS, L. H. C.; MASUTTI, C. S. M.; SILVA, E. F.; SILVA, M. B.; COELHO, R. M.; SHIMIZU, S. H.; COUTO, W. H. Avaliação da aptidão agrícola de solos do Acre por diferentes especialistas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 6, p. 1841-1853, 2011.
- DELDEN, H. VAN.; VLIET, J. VAN.; RUTLEDGE, D. T.; KIRKBY, M. J. Comparison of scale and scaling issues in integrated land-use models for policy suport. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.142, p. 18– 28, 2011.
- DEMATTÊ, J. A. M.; GALDOS, M. V.; GUIMARÃES, R.; GENÚ, A. M.; NANNI, M. R.; ZULLO JR., J. Quantification of tropical soil attributes from ETM+/Landsat-7 data. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 8, n. 1, p. 3.813-3.829, 2007.
- DICK, D.P. **Caracterização de óxidos de ferro e adsorção de fósforo na fração argila de horizontes B Latossólicos**. Porto Alegre, 1986. 196p. Dissertação (Mestrado em Solos) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- DINKINS, D. P.; JONESSOIL, C. **Sampling Strategies. Agriculture and Natural Resources (Fertilizers)**. (2008). MT200803AG New 4/08. Disponível em: <<http://msuextension.org/publications/AgandNaturalResources/MT200803AG.pdf>>; Acessado em: 20 jan. 2013.
- DOLINAR, B. Predicting the hydraulic conductivity of saturated clays using plasticity-value correlations. **Applied Clay Science**, v. 45, p. 90-94, 2009.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**, 2. ed., Rio de Janeiro, 2006, p. 306.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro, 1997, 212p.
- ESPINDOLA, C. R. **Retrospectiva crítica sobre a pedologia**: um repasse bibliográfico. 1.ed. Campinas: Unicamp, 2008. 397p.
- EUA, SOIL SURVEY STAFF. **Soil Taxonomy**: A basic system of soil classification of making and interpreting soil surveys. 2.ed. Washington, USDA-Natural Resources Conservation Service, 1999. 869p. (USDA. Agriculture Handbook, 436).
- FERREYRA, R. A.; APEZTEGUÍA, H. P.; SERENO, R.; JONES, J. W. Reduction of soil water spatial sampling density using scaled semivariograms and simulated annealing. **Geoderma**, Amsterdam, v.110, p. 265– 289, 2002.
- FLEMING, K. L.; WESTFALL, D. G.; WIENS, D. W.; BRODAHL, M. C. Evaluating farmer defined management zone maps for variable rate fertilizer aplication. **Precision Agriculture**, v.2, p. 201-215, 2000.
- FRANZEN, D. W., NANNA, T.; NORVELL, W. A. A Survey of Soil Attributes in North Dakota by Landscape Position. **Agronomy Journal**, v.98, p. 1015-1022, 2006.
- FRANZEN, D. W.; CIHACEK, L. J.; HOFMAN, V. L.; SWENSON, L. J. Topography-based sampling compared with grid sampling in the Northern Great Plains. **Journal of Production Agriculture**, 11: 364-370, 1998.
- FROGBROOK, Z. L.; OLIVER, M. A. Identifying management zones in agricultural fields using spatially constrained classification of soil and ancillary data. **Soil Use And Management**, v. 23, p.40-51, 2007.
- GALLARDO, A.; PARAMÁ, R. Spatial variability of soil elements in two plant communities of NW Spain. **Geoderma**, v.139, p.199-208, 2007.

- GEOBANK. **Serviço Geológico do Brasil – CPRM**. Disponível em: <http://geobank.sa.cprm.gov.br/>; Acessado em: 10 out. 2012.
- GESSLER, P. E.; MCKENZIE, N. J.; HUTCHINSON, M. F. Progress in soil-landscape modeling and spatial prediction of soil attributes for environmental models. **INTERNATIONAL CONFERENCE/WORK ON INTEGRATION GIS AND ENVIRONMENTAL MODEL**, 3., **Anais...** CD-ROM Santa Bárbara, 1996. Proceedings. Santa Bárbara, National Center for Geographic Information and Analysis, 1996.
- GHIDIN, A.A.; MELO, V.F.; LIMA, V.C.; COSTA LIMA, J.M.J. Oxisol toposequences developed from basaltic rocks in Paraná State, Brazil: II - Relationship between clay fraction mineralogy and physical soil properties. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.345-357, 2006.
- GOLUCHOWSKA, B. J. Some factors affecting an increase in magnetic susceptibility of cement dusts. **Journal of Applied Geophysics**, Amsterdam, v. 48, n. 1, p. 103–112, 2001.
- GRIMLEY, D. A., ARRUDA, N. K.; BRAMSTEDT, M. W. Using magnetic susceptibility to facilitate more rapid, reproducible, and precise delineation of hydric soils in the midwestern USA. **Catena**, Amsterdam, v. 58, p. 183–213, 2004.
- GRIMLEY, D. A.; VEPRASKAS, M. J. Magnetic susceptibility for use in delineating hydric soils. **Soil Science Society American Journal**, 64:2174-2180, 2000.
- GUEDES FILHO, O.; VIEIRA, S.R.; CHIBA, M.K.; NAGUMO, C.H.; DECHEN, S.C.F. Spatial and temporal variability of crop yield and some Rhodic Hapludox properties under no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p.1-14, 2010.
- HALL, G. F. Pedology and geomorphology. In: HALL, G.F., ed. **Pedogenesis and soil taxonomy. Concepts and interactions**. New York, Elsevier Science Publication, p. 117-140, 1983.
- HAMMER, R. D.; YOUNG, N. C.; WOLENHAUPT, T. L.; BARNEY T. L.; HAITHCOATE, T. W. Slope Class Maps Form Soil Survey and Digital Elevation Models. **Soil Science Society American Journal**. Madison, v.59, p.509-519, 1995.
- HASTIE, T.; TIBSHIRANI, R.; FRIEDMAN, J. **The elements of statistical learning: data mining, inference and prediction**. Springer Series in Statistics. Springer-Verlag, New York, 2001.
- HAUSER, G.F. **The calibration of soil tests for fertilizer recommendation**. Roma, FAO, 1973. 71p. (Soil Bull., 18)
- HENGL, T. Finding the right pixel size. **Computers & Geosciences**. v.32, n.9, p.1283–1298, 2006.
- HUDSON, B. D. The Soil Survey as Paradigm-Based Science. **Soil Science Society American Journal**, v.56, p. 836-841, 1992.
- HUNT, D.R. **Farm power and machinery management**. 9.ed. Ames: Iowa University Press, 1995. 365 p.
- IBÁÑEZ, J. J.; ARNOLD, R. W.; AHRENS, R. J. The fractal mind of pedologists (soil taxonomists and soil surveyors). **Journal: Ecological Complexity - ECOL COMPLEX**, v. 6, n. 3, p. 286-293, 2009.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT), **Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo**, 94p., 1981.
- ISAAKS, E.H.; SRIVASTAVA, R.M. **Applied geostatistics**. Nova York: Oxford University Press. 561p., 1989.
- IZIDORIO, R.; MARTINS FILHO, M. V.; MARQUES JÚNIOR, J.; SOUZA, Z. M.; PEREIRA, G. T. Perdas de nutrientes por erosão e sua distribuição espacial em área sob cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 3, p. 660-670, 2005.
- JOHNSON, C.K.; DORAN, J. W.; DUKE, H. R.; WIENHOLD, B. J.; ESKRIDGE, K. M.; SHANAHAN, J. F. Field-scale electrical conductivity mapping for delineating soil condition. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, p. 1829–1837, 2001.
- JOHNSON, R. M.; RICHARD, E. P. JR. Sugarcane Yield, Sugarcane Quality, and Soil Variability in Louisiana. **Agronomy Journal**, v. 97, p. 760–771, 2005.

- KAPICKA, A.; JORDANOVA, N.; PETROVSKÝ, E.; USTJAK, S. Effect of different soil conditions on magnetic parameters of power-plant fly ashes. **Journal of Applied Geophysics**, Amsterdam, v. 48, n. 1, p. 93–102, 2001.
- KÄMPF, N.; SCHWERTMANN, U. Goethite and hematite in a climosequence in Southern Brazil and their application in classification of kaolinitic Soils. **Geoderma**, v.29, p.27-39, 1982.
- KRAVCHENKO, A.N.; D.G. BULLOCK. Correlation of corn and soybean yield with topography and soil properties. **Agronomy Journal**, v.75, p.75-83, 2002.
- LA SCALA JR, N.; MARQUES JR., J.; PEREIRA G. T.; CORÁ J. E. Short-term temporal changes in the spatial variability model of CO₂ emissions from a Brazilian bare soil. **Soil Biology & Biochemistry**, v.32, p.1459-1462, 2000.
- LAGACHERIE, P.; LEGROS, J. P.; BURROUGH, P. A. A soil survey procedure using the knowledge of soil patterns established on a previously mapped reference area. **Geoderma**, p. 283-301, 1995.
- LEGROS, J.-P. **Mapping of the soil**, 411 p., 2006.
- LI, Y.; SHI, Z.; WU, C.; LI, H.; LI, F. Improved prediction and reduction of sampling density for soil salinity by different geostatistical methods. **Agricultural Science in China**, v.6, n.7, p. 832-841, 2007.
- LI, J.; HEAP, A. D. **A Review of Spatial Interpolation Methods for Environmental Scientists**. Geoscience Australia, Record 2008/23, 2008, 137 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**. p 450-451:108-119, 2013.
- LU, A.; J., WANG, X.; QIN, K.; WANG, P. H.; ZHANG, S. Multivariate and geostatistical analyses of the spatial distribution and origin of heavy metals in the agricultural soils in Shunyi, Beijing, Science in China, **Total Environment**, v. 425, p.66-74, 2012.
- MACHADO, P.L.O.A.; BERNARDI, A.C.C.; VALENCIA, L.I.O.; MOLIN, J.P.; GIMENEZ, L.M.; SILVA, C.A.; ANDRADE, A.G.A.; MADARI, B.E.; MEIRELLES, M.S.P.M. Mapeamento da condutividade elétrica e relação com a argila de Latossolo sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, p.1023-1031, 2006.
- MAHER, B. A.; THOMPSON, R. **Palaeomonsoons I: the magnetic record of palaeoclimate in the terrestrial loess and palaeosol sequences, in quaternary climates, environments and magnetism**, Cambridge: University Press, 1999. p. 81–125.
- MARCOS, Z. Z. **Ensaio sobre epistemologia pedológica**. Cah. Pédol. ORSTOM, v.19, p.5-28, 1982.
- MARQUES JR., J.; LEPSCH, I. F. Depósitos superficiais neocenoicos, superfícies geomórficas e solos em Monte Alto, SP. **Geociências**, São Paulo, v.19, p.90-106, 2000.
- MARQUES JR., J. **Distribuição e atributos dos solos em relação à forma e evolução de uma vertente em Monte Alto, SP**. 1995. 226f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.
- MARQUES JR., J. **Caracterização de áreas de manejo específico no contexto das relações solo-relevo**. 2009. 113f. Tese (Livre-Docência) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2009.
- MARTINS FILHO, M. V. et al. Perdas de solo e nutrientes por erosão num Argissolo com resíduos vegetais de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**. v. 29, n. 1, p. 8-18, 2009.
- MATHERON, G. Principles of geostatistics. **Economic Geology**, v.58, p. 1246–1266, 1963
- MATIAS, S. S. R. **Suscetibilidade magnética e sua associação com atributos do solo e do relevo em uma topossequência de latossolos**. 125 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2010. Disponível em: < http://www.athena.biblioteca.unesp.br/exlibris/bd/bja/33004102001P4/2010/matias_ssr_dr_jabo.pdf >; Acessado em: 12 maio 2013.
- McBRATNEY, A.; MYNASHY, B.; STEPHEN R. CATTLE, R. WILLEM VERVOORT. From pedotransfer functions to soil inference systems. **Geoderma**, Amsterdam. v. 109, p. 41-73. 2002.

- McBRATNEY, A. B.; SANTOS, M. L. M.; MINASNY, B. On digital soilmapping. **Geoderma**, v. 117, n. 1-2, p. 3-52, 2003.
- MIALHE, L.G. **Manual de mecanização agrícola**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1974. 301 p.
- MINASNY, B.; McBRATNEY, A. B. Estimating the Water Retention Shape Parameter from Sand and Clay Content. **Soil Science Society of America**, Madison, v. 71, n. 4, p. 1.105-1.110, 2007.
- MINASNY, B.; ALEX, B.; McBRATNEY, A. B.; HARTEMINK, A. E. Global pedodiversity, taxonomic distance, and the World Reference Base. **Geoderma**, v.155,p.132–139, 2010.
- MONTANARI, R.; MARQUES JR, J.; PEREIRA, G. T.; SOUZA, Z. M. Forma da paisagem como critério para otimização amostral de Latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 2005, v. 40, n. 1, p. 69-77, 2005.
- MONTANARI, R. ; SOUZA, G. S. A. ; PEREIRA, G. T. ; MARQUES JR., J. ; SIQUEIRA, D. S. ; SIQUEIRA, G. M. The use of scaled semivariograms to plan soil sampling in sugarcane fields. **Precision Agriculture** , v. 13, p. 01-11, 2012.
- MONTGOMERY, D. R. Predicting landscape erosion rates using digital elevation models. **Comptes Rendus Geoscience**, Paris, v. 335, p. 1121–1130, 2003.
- MUNSELL COLOR COMPANY. **Munsell color soil charts**. Baltimore, 2000.
- NANNI, M. R. ; POVH, F. P. ; DEMATTÊ, J. A. MELO ; O., RONEY B. de ; CHICATI, M. L. ; CEZAR, E. ; NANNI, M. R. Optimum size in grid soil sampling for variable rate application in site-specific management. **Scientia Agrícola**,v. 68, p. 386-392, 2011.
- PANOSSO, A. R.; PEREIRA, G. T.; MARQUES JR., J.; LA SCALA JR., N. Variabilidade espacial da emissão de CO₂ em Latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar em diferentes sistemas de manejo. **Engenharia Agrícola**, v.28, p.227-236, 2008.
- PEREIRA, G. T. et al.. JEM 1.0: programa computacional para localização de limites de superfícies geomórficas de solos através de dados de uma transeção; caso univariado. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO, 13, 1996. **Anais...**Águas de Lindoia, 1996, CD-ROM.
- PREETZ, H.; ALTFELDER, S.; IGEL, J. Tropical Soils and Landmine Detection – An Approach for a Classification System. **Soil Science Society of America Journal**, v.72, p.151-159, 2008.
- RAIJ, B. VAN; ZULLO, M. A. T. **Métodos de análises de solo**. Campinas: Instituto Agronômico, 16p. (Circular, 63), 1977.
- RAIJ, B. VAN. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas, Instituto Agronômico, 285p., 2001.
- RAUCH, J. N. Global distributions of Fe, Al, Cu, and Zn contained in Earth's derma layers. **Journal of Geochemical Exploration**,. v.110, p.193–201, 2011.
- RESENDE, M. **Minerology, chemistry, morphology and geomorphology of some soils of the Central Plateau of Brazil**. Purdue, 1976. Thesis (PhD.) - Purdue University.
- RESENDE, M.; SANTANA, D. P.; REZENDE, S. B. Susceptibilidade magnética em Latossolo do sudeste e sul do Brasil. In: REUNIÃO DE CLASSIFICAÇÃO, CORRELAÇÃO DE SOLOS E INTERPRETAÇÃO DE APTIDÃO AGRÍCOLA. 3, 1988, Rio de Janeiro: **Anais...**, Rio de Janeiro, EMBRAPA-SNLCS/SBCS, 1988a, p 233–258.
- RESENDE, M. et al. Magnetic properties of Brazilian Oxisols. In: INTERNATIONAL SOIL CLASSIFICATION WORKSHOP,8., 1998, Rio de Janeiro, RJ. **Proceedings...** Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1988b. p.78-108.
- RIBEIRO, M. R.; OLIVEIRA, L. B.; ARAÚJO FILHO, J. C. Caracterização morfológica do solo. In: KER, J. C.; CURI, N.; SCHAEFER, C. E.; VIDAL-TORRADO, P. **Pedologia**: fundamentos. Viçosa-MG, SBCS,p.47-80, 2012.
- ROCKSTROM, J.A. Safe operating space for humanity. **Nature**, v. 461, p.472-475, 2009.
- ROQUE, M. W.; MATSURAI, E. E.; SOUZA, Z. M. S; BIZARI, D. R.; SOUZA, A. L. Correlação linear e espacial entre a resistência do solo ao penetrômetro e a produtividade do feijoeiro irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 5, p. 1827-1835, 2008.

- ROSS, J. L. S. Registro cartográfico dos fatos geomorfológicos e a questão da taxonomia do relevo. **Revista do Departamento de Geografia**. p.17-29. São Paulo, IG-USP, 1992.
- ROSSI, R. E.; MULLA, D. J.; JOURNAL, A. G.; FRANZ, E. H. Geostatistical Tools for Modeling and Interpreting Ecological Spatial Dependence. **Ecological Monographs**, v.62,n.2, p. 277-314, 1992.
- RUELLAN, A.; DOSSO, M.; FRITSH, E. L'analys structurale de lacouverture pédologique. **Soil Science**, v.27, n.3, p.19-334, 1984.
- SANCHEZ, R. B.; MARQUES JR., J.; PEREIRA, G. T.; SOUZA, Z. M.; MARTINS FILHO, M. V. Variabilidade espacial de atributos do solo e de fatores de erosão em diferentes pedoformas. **Bragantia**, v. 68, p. 873-884, 2009.
- SANCHEZ, R. B.; MARQUES JR., J.; PEREIRA, G. T.; NETO, J. B.; SIQUEIRA, D. S.; SOUZA, Z. M. Mapeamento das formas do relevo para estimativa de custos de fertilização em cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, v. 32, p. 280-292, 2012a.
- SANCHEZ, M. G. B. ; MARQUES JR., J.; SIQUEIRA, D. S.; CAMARGO, L. A. ; PEREIRA, G. T. Delineation of specific management areas for coffee cultivation based on the soil relief relationship and numerical classification. **Precision Agriculture**, v.14, p. 201-214, 2012b.
- SANTANA, D. P. **Soil formation in a toposequence of oxisols from Patos de Minas Region, Minas Gerais State, Brazil**. 129 f. Thesis (Ph.D), West Lafayette, Purdue University, 1984.
- SANTOS, H. L.; MARQUES JR., J.; MATIAS, S. S. R. ; SIQUEIRA, D. S.; PEREIRA, G. T. Erosion factors and magnetic susceptibility in differet compartments of a slope in Gilbués-PI, Brazil. **Engenharia Agrícola**, v. 33, p. 64-74, 2013.
- SCHLINDWEIN, J.A.; ANGHINONI, I. Tamanho da subamostra e representatividade da fertilidade do solo no sistema plantio direto. **Ciência Rural**, v.32, p.963-968, 2002.
- SCHLOEDER, C. A.; ZIMMERMAN, N. E.; JACOBS, M. J. Comparison of methods for interpolating soil properties using limited data. **Soil Science Society of American Journal**, v.65, p.470-479, 2001.
- SCHULZE, D.G. The influence of aluminium on iron oxides VIII. Unit-cel dimension of Al-substituted of goethites and estimation of Al from them. **Clays Clay Miner.**, v.32, p.36- 44, 1984.
- SHEPHERD, K. D. ; WALSH, M.G. Infrared spectroscopy – enabling an evidence based diagnostic surveillance approach to agricultural and environmental management in developing countries. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, v.15,p.1-19, 2007.
- SIQUEIRA, D. S. **Suscetibilidade magnética para a estimativa de atributos do solo e mapeamento de áreas sob cultivo de cana-de-açúcar**. 76 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2010. Disponível em: http://www.athena.biblioteca.unesp.br/exlibris/bd/bja/33004102001P4/2010/siqueira_ds_me_jabo.pdf
- SIQUEIRA, D. S., MARQUES JR., J., PEREIRA, G. T. The use of landforms to predict the variability of soil and orange attributes. **Geoderma**, v. 155,p.55-66, 2010a.
- SIQUEIRA, D. S.; MARQUES JR., J.; MATIAS, S. S. R.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; BAFFA, O.; OLIVEIRA, L. C. Correlation of properties of Brazilian Haplustalfs with magnetic susceptibility measurements. **Soil, Use and Management**, Oxford, v. 26, n. 4, p. 425-431, 2010b.
- SOIL SURVEY STAFF (SOIL TAXONOMY): **A basic system of soil classification of making and interpreting soil surveys**. 1st ed. Washington, (USDA. Agriculture Handbook, 436) USDA-Natural Resources Conservation Service, 869p, 1975. Disponível em: <ftp://ftp-fc.sc.egov.usda.gov/NSSC/Soil_Taxonomy/tax.pdf> ; Acessado em: 10 abr. 2013.
- SOUZA, Z. M.; MARQUES JR., J.; PEREIRA, G. T.; MONTANARI, R. Otimização amostral de atributos de Latossolos considerando aspectos solo-relevo. **Ciência Rural**, v. 36, n. 3, p. 829-836, 2008.
- SWANSON, D. K. COMMENTS AND LETTERS TO THE EDITOR: Comments on "The Soil Survey as Paradigm-Based Science". **Soil Science Society of America Journal**, v.57, p. 1164. 1993.
- TEN CATEN, A. ; DALMOLIN, R. S. D. ; RUIZ, L. F. C. . Digital soil mapping: strategy for data pre-processing. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 1083-1092, 2012.

- 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**, v. 70, p. 195-203, 2013.
- THORNTHWAITE, C. W. An approach towards a rational classification of climate. **Geographical Review**, London, v. 38, p. 55-94, 1948.
- TORRENT, J.; LIU, Q. S.; BLOEMENDAL, J.; BARRÓN, V. Magnetic enhancement and iron oxides in the upper Luochuan loess–paleosol sequence, Chinese Loess Plateau. **Soil Science Society of America Journal**, v.71, p.1–9, 2007.
- TORRENT, J.; BARRÓN, V. Laboratory measurements of soil color: theory and practice. In: BIGHAM, J. M.; CIOLKOSZ, E. J. (Ed) Soil Color. **Soil Science Society of America**, Special Publication, 1993. p. 21-33.
- TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial of soil properties. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 38, n. 1, p. 45-94, 1985.
- TROEH, F. R. Landform equations fitted to contour maps. **Soil Science Society of American Journal**, New York, v. 263, p. 616-27, 1965.
- USDA-NRCS. Field indicators of hydric soils in the United States. In: HURT, G.W.; WHITED, P. M.; PRINGLE, R. F., eds. **USDA-NRCS in cooperation with the National Technical Committee for Hydric Soils**, 2002.
- VAN DELDEN, H.; STUCZYNSKI, T.; CIAIAN, P.; PARACCHINI, M. L.; HURKENS, J.; LOPATKA, A.; SHI, Y.; GOMEZ PRIETO, O.; CALVO, S.; VAN VLIET, J.; VANHOUT, R. Integrated assessment of agricultural policies with dynamic land use change modelling. **Ecological Modelling**, v. 221, n. 18, p. 2153–2166, 2010.
- VASCONCELOS, V.; CARVALHO JUNIOR, O. A.; MARTINS, E. S.; COUTO JÚNIOR, A. F.; GUIMARAES, R. F.; GOMES, R. A. T. Sistema de classificação geomorfométrica baseada em uma arquitetura sequencial em duas etapas: árvore de decisão e classificador espectral, no Parque Nacional da Serra da Canastra. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 13, p. 171-186, 2012.
- VEROSUB, K.L., ROBERTS, A.P. Environmental magnetism: past, present and future. **Journal of Geophysical Research**, v.100, p.2175–2192, 1995.
- VIDAL-TORRADO, P.; LEPSCH, I. F.; CASTRO, S. S. Conceitos e Aplicações das Relações Pedologia Geomorfologia em Regiões Tropicais Úmidas. In: P. VIDAL-TORRADO; LUIZ R. FERRACIU; M. COOPER; ELKE J. CARDOSO; LUIZ I. PROCHONOW. (Org.). **Tópicos em Ciência do Solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 2005, v. 4, p. 145-192.
- VIEIRA, S. R.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Spatial variability of field - measured infiltration rate. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 45, n. 6, p.1040-1048, 1981.
- VIEIRA, S.R. **Geoestatística em estudo da variabilidade espacial do solo**. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 1, p. 1-54, 2000.
- VIEIRA, S. R., CARVALHO, J. R. P.; PAZ-GONZÁLEZ, A. Jack knifing for semivariogram validation. **Bragantia**, 69:97-105, 2010.
- VISCARRA ROSSEL, R. A.; BUI, E. N.; CARITAT, P. de; MCKENZIE, N. J.. Mapping iron oxides and the color of Australian soil using visible–near-infrared reflectance spectra, **Journal of Geophysical Research**, Disponível em: < doi:10.1029/2009JF001645>, 2010.
- VOLTZ, M. AND WEBSTER, R. A comparison of kriging, cubic splines and classification for predicting soil properties from sample information. **Journal of Soil Science**, v.41, p.473-490, 1990.
- WEBSTER, R. Automatic soil-boundary location from transect data. **Mathematical Geology**, v.5, p.27-37, 1973.
- WEBSTER, R. Optimally partitioning soil transects. **Soil Science Society American Journal**, v.29, p.388-402, 1978.

- WILLMOTT, C.J. On the evaluation of model performance in physical geography. In: G. L. GAILE; WILLMOTT, C. J. (eds.). **Spatial Statistics and Models**. Dordrecht, Holland: D. Reidel, 443-460, 1984.
- 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**, v. 95, p. 154–167, 2008.
- WYSZECKI, G.; STILES, W.S. Color science: concepts and methods, quantitative data and formulae (2^a ed.). John Wiley & Sons. New York, 1982, 976 p.
- ZINCK, J. A. Soil Survey: Perspectives and Strategies for the 21st Century. In: **An international workshop for heads of national soil survey organizations**. Disponível em: <http://books.google.com.br/books?id=tXWm_PBOE_cC&lpg=PA77&ots=mQiJKdPyc1&dq=Zinck%2C%20J.A.%2C%201988&hl=pt-BR&pg=P1#v=onepage&q=Zinck%2C%20J.A.%2C%201988&f=false>; Acessado em: 02 maio 2013.
- ZULLO JR., J. **Correção atmosférica de imagens de satélite e aplicações**. 189 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1994.

ANEXOS

Anexo 1. Atributos do solo na profundidade de 0,00-0,25 m coletados na transeção.

Ponto	X	Y	Argila (g kg ⁻¹)	Ferro total (g kg ⁻¹)	SM (10 ⁻⁸ m ³ kg ⁻¹)	Matiz (YR)	Valor	Croma	DMC Gt(110) (nm)	DMC Hm(110) (nm)	DMC (Hm)012 (nm)	Gt/(Gt+Hm)	Ct/(Ct + Gb)
T01	808259	7623307	574,5	199,2	4302,0	4,72	3,42	6,48	21,29	25,34	52,14	0,33	0,77
T05	808147	7623263	575,5	209,3	3891,0	5,19	3,23	6,00	19,34	26,38	55,34	0,33	0,79
T07	808091	7623238	589,3	93,9	4148,0	4,72	3,42	6,48	14,90	22,53	49,46	0,36	0,77
T10	808009	7623209	576,3	90,3	4177,0	4,75	3,47	6,33	18,10	28,72	63,24	0,34	0,78
T20	807755	7623077	496,4	52,7	4128,0	4,47	3,04	6,34	17,58	32,98	66,63	0,29	0,76
T30	807568	7622884	458,4	33,2	3321,0	4,59	3,44	6,60	15,45	35,66	60,38	0,41	0,75
T50	807376	7622352	519,4	57,3	3136,0	4,67	3,62	6,22	43,28	45,52	54,43	0,21	0,84
T56	807364	7622165	515,6	74,4	3185,0	4,53	3,17	6,33	44,05	39,96	90,14	0,26	0,85
T60	807397	7622053	505,6	22,8	3035,0	4,73	3,24	6,46	51,88	49,43	109,09	0,27	0,80
T65	807397	7621912	403,6	26,9	1436,0	4,71	3,42	6,54	60,30	52,56	114,23	0,23	0,80
T75	807379	7621636	351,5	88,1	2351,0	4,71	2,99	6,26	19,78	51,28	64,58	0,34	0,84
T80	807367	7621484	433,7	77,3	1612,0	4,58	3,26	6,48	30,96	38,96	74,16	0,27	0,84

SM – suscetibilidade magnética; Matiz, Valor e Croma – componentes da cor determinados por espectroscopia de reflectância difusa; DMC – diâmetro médio do cristal; Gt – goethita; Hm – Hematita; Ct – caulinita; Gb – Gibbsita (coordenadas UTM, Fuso 22).

Anexo 2. Atributos do solo coletados nas laterais da transeção (área com 380 ha). V% - saturação por bases; SM – suscetibilidade magnética. (coordenadas UTM, Fuso 22).

Ponto	X	Y	Profundidade 0,00-0,25 m				Profundidade 0,25-0,50 m		
			V%	Argila (g kg ⁻¹)	SM (10 ⁻⁸ m ³ kg ⁻¹)	Matiz(YR)	V%	Argila (g kg ⁻¹)	SM (10 ⁻⁸ m ³ kg ⁻¹)
1	807197	7621302	66,3	344	1050	5,5	63,7	371	1047
2	807197	7621444	52,7	226	420	5,3	55,2	228	477
3	807339	7621444	62,8	344	1545	4,8	53,0	399	1503
4	807481	7621444	47,4	379	1264	4,9	44,8	332	1178
5	807623	7621444	54,7	311	869	5,1	46,7	319	747
6	807765	7621444	47,2	328	970	5,1	60,8	345	1740
7	807907	7621444	40,3	246	874	5,1	39,2	277	828
8	807197	7621586	52,1	270	628	4,7	47,9	295	652
9	807339	7621586	62,7	425	2301	4,6	56,6	456	2340
10	807481	7621586	39,6	348	1807	4,4	34,8	373	1813
11	807623	7621586	63,7	274	1045	4,7	61,0	305	1108
12	807765	7621586	48,0	249	2261	4,8	53,4	438	2777
13	807907	7621586	47,6	321	788	4,9	29,7	247	672
14	807339	7621728	64,1	315	1100	5,2	52,3	334	1063
15	807481	7621728	84,6	430	2186	4,4	68,3	466	2211
16	807623	7621728	71,0	306	660	4,8	63,5	256	682
17	807765	7621728	57,2	230	556	4,6	50,0	244	620
18	807907	7621728	50,4	229	520	4,8	66,9	233	505
19	807197	7621870	57,3	295	1201	5,1	46,2	387	1222
20	807339	7621870	63,7	370	1219	4,9	49,9	423	1520
21	807481	7621870	37,9	367	1229	4,8	33,8	373	1568
22	807623	7621870	32,4	344	1400	4,8	39,0	356	1774
23	807765	7621870	63,6	334	1008	4,8	32,9	319	1244
24	807907	7621870	45,4	286	689	5,0	43,4	287	688
25	807197	7622012	43,7	236	2430	4,6	39,8	458	2491
26	807481	7622012	49,0	461	2431	4,6	43,1	470	2525
27	807623	7622012	50,8	456	1880	4,7	50,2	454	1942
28	807765	7622012	46,2	427	1707	4,6	56,7	426	1732
29	807197	7622154	52,0	390	3636	4,7	57,5	567	3396
30	807339	7622154	57,3	560	3293	4,5	47,8	566	3315
31	807481	7622154	61,0	521	3074	4,6	75,6	469	3218
32	807623	7622154	42,5	455	3237	4,5	56,1	540	3591
33	807765	7622154	75,4	513	2545	4,5	49,2	493	3521
34	807907	7622154	46,1	463	1452	4,8	54,6	378	1660
35	807197	7622296	67,3	359	3090	4,6	63,8	454	3212
36	807339	7622296	63,4	534	1145	4,9	59,8	544	3806
37	807623	7622296	60,3	562	4053	-	55,9	511	4120
38	807765	7622296	53,8	563	4455	4,5	41,5	590	4676

Continua...

Ponto	X	Y	Profundidade 0,00-0,25 m				Profundidade 0,25-0,50 m		
			V%	Argila (g kg ⁻¹)	SM (10 ⁻⁸ m ³ kg ⁻¹)	Matiz(YR)	V%	Argila (g kg ⁻¹)	SM (10 ⁻⁸ m ³ kg ⁻¹)
39	807907	7622296	48,4	460	3425	4,6	48,7	506	3325
40	808049	7622296	41,7	474	2571	4,9	53,6	451	2488
41	807197	7622438	64,4	417	3133	4,7	61,8	586	2974
42	807339	7622438	74,3	513	3150	4,5	61,6	625	3234
43	807481	7622438	72,6	538	3263	4,5	35,3	566	3607
44	807623	7622438	52,6	582	3930	4,4	53,7	577	4404
45	807765	7622438	76,9	570	4838	4,5	42,9	555	5237
46	807907	7622438	57,9	567	4471	4,6	48,1	557	4508
47	807197	7622580	55,0	500	3122	4,9	79,0	540	3232
48	807339	7622580	79,4	488	2884	5,7	81,0	521	3056
49	807481	7622580	77,6	462	3750	4,9	71,6	559	3790
50	807765	7622580	64,3	429	2929	4,8	70,6	402	2995
51	807907	7622580	54,6	451	4518	4,3	45,4	488	4737
52	808049	7622580	48,7	518	4704	4,3	56,6	603	4844
53	807197	7622722	47,3	579	3404	-	71,3	520	3313
54	807339	7622704	73,3	464	2974	4,8	67,6	482	2854
55	807481	7622722	55,6	359	3807	4,9	53,1	460	3255
56	807623	7622722	39,0	449	4943	4,5	44,4	501	4426
57	807765	7622722	53,7	504	4346	4,4	39,6	488	4415
58	807907	7622722	52,2	547	4168	4,9	48,3	520	4939
59	808049	7622722	40,0	491	3708	4,9	40,1	522	3550
60	808191	7622722	47,6	486	3801	4,7	29,6	532	4224
61	807197	7622864	51,6	496	4053	4,8	45,8	584	3692
62	807339	7622864	49,4	483	3985	4,7	46,8	546	4115
63	807481	7622864	67,7	370	4390	4,9	51,4	483	4057
64	807623	7622864	71,2	517	3300	4,7	61,3	415	3482
65	807788	7622858	45,4	497	4034	4,6	52,8	534	4023
66	807907	7622864	48,4	386	3863	-	42,1	519	968
67	808049	7622864	55,4	505	2827	-	45,4	417	2696
68	808191	7622864	63,0	514	4314	-	55,5	511	4275
69	808333	7622864	63,0	481	4986	-	55,8	546	5750
70	807197	7623006	64,6	522	3892	-	57,7	536	3960
71	807339	7623006	56,4	527	4830	-	62,7	525	5007
72	807481	7623006	53,9	502	4413	-	45,7	554	4941
73	807623	7623006	56,0	455	4451	-	56,0	561	4294
74	807765	7623006	29,1	531	3987	-	62,7	489	4190
75	807907	7623006	19,4	480	4196	4,7	31,4	577	4475
76	808049	7623006	56,7	390	3871	4,4	19,6	505	4275
77	808191	7623006	43,9	528	3485	4,7	58,9	413	4116
78	808333	7623006	44,1	381	3273	4,8	49,0	460	3424
79	807197	7623148	55,7	478	3920	4,5	44,9	540	4961

Continua...

Ponto	X	Y	Profundidade 0,00-0,25 m				Profundidade 0,25-0,50 m		
			V%	Argila (g kg ⁻¹)	SM (10 ⁻⁸ m ³ kg ⁻¹)	Matiz(YR)	V%	Argila (g kg ⁻¹)	SM (10 ⁻⁸ m ³ kg ⁻¹)
80	807339	7623148	35,3	484	4602	4,5	29,6	544	4124
81	807481	7623148	82,5	541	4683	4,6	74,6	560	3099
82	807623	7623148	43,8	581	5525	4,3	36,6	627	5305
83	807765	7623148	32,5	479	4730	4,4	40,8	461	4066
84	807920	7623145	24,5	465	4441	-	42,0	543	4486
85	808049	7623148	51,3	520	4329	4,4	29,4	520	4290
86	808191	7623148	38,5	539	4112	4,5	40,7	538	3992
87	808333	7623148	43,8	534	5060	4,2	40,5	607	5156
88	808475	7623148	16,3	564	5313	4,4	38,4	586	7246
89	807197	7623290	37,0	535	4352	4,5	43,6	537	5230
90	807339	7623290	58,9	515	4003	4,5	56,2	527	4080
91	807481	7623290	39,5	492	5032	4,3	43,3	535	4195
92	807623	7623290	28,8	596	5235	4,3	27,1	607	5184
93	807765	7623290	33,7	564	5367	4,5	38,6	622	6075
94	807902	7623290	46,7	547	4952	4,4	57,8	591	4613
95	808049	7623290	47,5	578	4093	5,0	55,8	580	3905
96	808191	7623290	68,2	575	3883	5,3	66,3	534	3780
97	808333	7623290	45,1	560	5153	4,7	42,0	561	5802
98	808475	7623290	22,2	83	5673	4,3	39,1	580	5865
99	808333	7623432	87,7	546	3920	5,3	77,3	577	3930
100	808109	7621531	69,7	251	1384	4,7	61,6	260	1190
101	808285	7621531	71,9	152	414	5,4	54,7	182	505
102	808459	7621531	68,1	101	168	5,9	60,7	110	178
103	808111	7621705	55,1	261	1384	4,8	49,3	286	1470
104	808285	7621705	58,3	314	1900	4,5	49,4	318	2136
105	808459	7621705	67,4	208	968	4,9	65,4	197	1055
106	808111	7621879	56,2	159	200	4,9	49,6	246	663
107	808285	7621879	50,5	349	2165	4,5	24,9	371	2253
108	808459	7621879	56,5	302	2310	4,9	78,7	334	2526
109	808633	7621879	59,3	171	837	4,8	53,0	262	920
110	808807	7621879	66,3	160	510	5,0	72,9	143	462
111	808981	7621879	50,5	210	791	4,8	43,3	251	850
112	809155	7621879	70,1	235	720	4,9	45,9	253	923
113	809329	7621879	63,5	211	687	4,6	60,4	224	588
114	807937	7622053	42,7	275	788	4,9	29,6	298	894
115	808111	7622053	59,4	276	840	5,0	46,2	276	800
116	808285	7622053	55,8	273	782	4,8	39,4	278	815
117	808459	7622053	34,9	278	1254	4,5	51,0	323	1426
118	808633	7622053	62,3	269	1578	4,6	72,2	314	1481
119	808807	7622053	65,8	279	1131	4,4	51,5	269	1200
120	808981	7622053	52,6	217	645	4,5	41,6	221	604

Continua...

Ponto	X	Y	Profundidade 0,00-0,25 m				Profundidade 0,25-0,50 m		
			V%	Argila (g kg ⁻¹)	SM (10 ⁻⁸ m ³ kg ⁻¹)	Matiz(YR)	V%	Argila (g kg ⁻¹)	SM (10 ⁻⁸ m ³ kg ⁻¹)
121	809155	7622053	59,9	123	196	5,6	52,4	128	250
122	808111	7622227	76,6	280	915	5,1	57,2	297	630
123	808285	7622227	63,9	249	765	4,9	54,1	253	746
124	808459	7622227	73,9	211	652	4,9	58,8	228	597
125	808633	7622227	67,5	123	313	5,1	65,6	128	242
126	808807	7622227	65,2	377	246	5,1	58,0	155	220
127	808981	7622227	51,8	226	581	-	48,0	106	180
128	808109	7622456	36,4	515	4341	4,6	50,6	429	4560
129	808285	7622401	73,1	316	1255	4,7	64,0	381	1527
130	808459	7622401	62,1	239	780	4,7	34,3	242	892
131	808633	7622401	57,8	171	405	4,9	57,4	167	380
132	808807	7622401	53,1	168	358	4,8	51,0	173	406
133	808981	7622401	34,3	175	494	5,1	18,2	183	485
134	809155	7622401	32,0	245	1000	5,0	32,4	269	885
135	809329	7622401	45,1	483	3589	4,6	36,0	464	3076
136	809503	7622401	21,4	586	6151	4,6	41,4	536	5598
137	809677	7622401	60,9	535	6518	4,8	55,3	571	5880
138	808285	7622575	39,0	497	3492	4,6	32,4	564	4322
139	808459	7622575	51,1	429	2127	4,7	52,1	406	2320
140	808633	7622575	46,1	383	2625	4,7	39,2	349	1976
141	808807	7622575	46,5	300	3210	4,3	48,4	472	3526
142	808981	7622575	46,3	534	4091	4,6	34,2	541	4025
143	809155	7622575	47,3	533	4050	4,6	39,1	580	4126
144	809329	7622575	42,2	609	5610	4,6	49,9	617	5729
145	809503	7622575	43,5	594	5869	4,7	47,1	639	5962
146	809677	7622575	38,0	559	7458	4,9	57,0	605	6197
147	808285	7622749	49,4	537	5027	4,6	41,1	524	4390
148	808459	7622749	38,9	620	5323	4,6	37,6	485	5504
149	808633	7622749	36,6	564	6305	4,7	47,5	589	6145
150	808981	7622749	67,0	593	5850	4,7	50,7	636	6546
151	809155	7622749	61,8	588	5547	4,8	64,5	596	5758
152	809329	7622749	41,9	598	5626	4,7	42,1	624	5760
153	809503	7622749	41,6	612	6530	4,8	25,4	656	7695
154	808459	7622923	44,4	482	6289	4,8	44,8	587	6370