

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP

CÂMPUS DE JABOTICABAL

**PROTOCOLO PARA USO DE DADOS LEGADOS NO
MAPEAMENTO DE SOLOS DO PLANALTO OCIDENTAL
PAULISTA**

Nélida Elizabet Quiñonez Silvero

Engenheira Agrônoma

2018

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP

CÂMPUS DE JABOTICABAL

**PROTOCOLO PARA USO DE DADOS LEGADOS NO
MAPEAMENTO DE SOLOS DO PLANALTO OCIDENTAL
PAULISTA**

Nélida Elizabet Quiñonez Silvero

Orientador: Prof. Dr. José Marques Júnior

Coorientador: Dr. Diego Silva Siqueira

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

2018

Silvero, Nélide Elizabet Quiñonez

S587p Protocolo para uso de dados legados no mapeamento de solos do Planalto Ocidental Paulista / Nélide Elizabet Quiñonez Silvero. -- Jaboticabal, 2018
xvi, 76 p. : il. ; 29 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2018

Orientador: José Marques Júnior

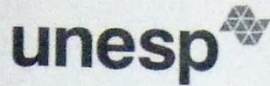
Banca examinadora: Ricardo Marques Coelho, Alan Rodrigo Panosso

Bibliografia

1. Solos - variabilidade espacial. 2. Pedometria. 3. Solos - classificação. 4. Pedodiversidade. 5. Solo-paisagem. I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 631.4

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



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

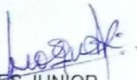
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: PROTOCOLO PARA USO DE DADOS LEGADOS NO MAPEAMENTO DE SOLOS DO PLANALTO OCIDENTAL PAULISTA

AUTORA: NÉLIDA ELIZABET QUIÑONEZ SILVERO

ORIENTADOR: JOSÉ MARQUES JUNIOR

COORIENTADOR: DIEGO SILVA SIQUEIRA

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em AGRONOMIA (CIÊNCIA DO SOLO), pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. JOSÉ MARQUES JUNIOR
Departamento de Solos e Adubos / FCAV / UNESP - Jaboticabal


Pesquisador Dr. RICARDO MARQUES COELHO
Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Solos e Recursos Ambientais / INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS


Prof. Dr. ALAN RODRIGO PANOSSO
Departamento de Matemática / Faculdade de Engenharia - UNESP - Ilha Solteira/SP

Jaboticabal, 20 de fevereiro de 2018

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

NELIDA ELIZABET QUIÑONEZ SILVERO – Nasceu em Carlos Antônio Lopez, Itapúa, Paraguai, em 12 de abril de 1992. Engenheira agrônoma pela Facultad de Ingeniería Agronómica da Universidad Nacional del Este (FIA – UNE), Minga Guazú, Paraguai. Formou-se em dezembro de 2015 e em março de 2016 começou os estudos de Mestrado Acadêmico em Agronomia (Ciência do Solo) na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da UNESP, Câmpus de Jaboticabal, sendo beneficiada com a “Beca de Postgrado en el exterior Don Carlos Antonio Lopez” do Governo do Paraguai. Foi voluntária no Projeto de Extensão “Juntos por Acaraymi”, da reitora da UNE, com ênfase em ensino de produção de hortaliças em comunidades indígenas. Participou em Jornadas de Jovens Pesquisadores, sendo ganhadora do Prêmio ao melhor trabalho científico (Título: “Caracterización de la Comunidad Indígena Acaray – Mi, parcialidad Ava Guaraní, del Distrito de Hernandarias – Alto Paraná”) na cidade de Valparaíso, no ano de 2014. Tem atuação na área de relação solo-paisagem, mineralogia do solo, modelagem matemática, análise multivariada, análise geoestatística e bacias hidrográficas. Atuou como gestora dos sites do Programa de Pós-graduação em Agronomia (Ciência do Solo) e do Grupo de Pesquisa CSME “Caracterização do Solo para Fins de Manejo Específico”, do qual forma parte desde o ano de 2016.

AGRADECIMENTOS

A meus pais, pelo apoio e consideração ao longo destes dois anos.

A meu orientador, Prof. José Marques Júnior pela orientação, direcionamento e acompanhamento durante o mestrado. A meu Co-Orientador, Diego Silva Siqueira, pela amizade, orientações e conversas.

Ao Pesquisador Ricardo Marques Coelho, Professor Igo Lepsch e Alan Panosso pelas valiosas contribuições como banca examinadora.

A Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, UNESP de Jaboticabal. Ao Programa de Bercas en el Exterior "Don Carlos Antonio López" pela concessão da bolsa de estudos.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro ao projeto temático "Geovariabilidade do Planalto Ocidental Paulista e sua relação com as mudanças climáticas e planejamento estratégico de uso e ocupação do solo" (Edital Universal 01/2016 - Faixa C, Proc.nº 402796/2016-0)

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, Proc. nº 149940) e a PROPE / UNESP (Pró-reitora de Pesquisa da Universidade Estadual Paulista, Edital Nº 15/2014) pelo apoio financeiro ao projeto de pesquisa de fronteira "Diffuse reflectance spectroscopy and soil erodibility in Western Plateau Paulista, the context of soil-landscape"

Aos colegas do Grupo CSME: Simone, Kathleen, Milene, Laércio, Romário, Danilo, Angélica e Angelina, Lívia e Renato, por terem me acolhido e brindado todas as orientações. Aos amigos, Katharine, Kamila, Lisa, Shayne, Miguel, Sergio, Helsi, Angel, e todos os demais.

A Domingos da Costa Ferreira Júnior, símbolo de perseverança, companheirismo e apoio.

A todas aquelas pessoas que de alguma ou outra forma contribuíram para que minha formação e estadia seja a melhor possível. A todos eles, muito obrigada!

“As nuvens mudam sempre de posição, mas são sempre nuvens no céu. Assim devemos ser todo dia, mutantes, porém leais com o que pensamos e sonhamos; lembre-se, tudo se desmancha no ar, menos os pensamentos”.

Paulo Beleki

A meus pais, Patrício e Yolanda, guerreiros da vida.

DEDICO

SUMÁRIO

Conteúdo	Página
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
LISTA DE ABREVIACÕES	xiii
LISTA DE TABELAS	xiv
LISTA DE FIGURAS	xv
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1. Pedodiversidade e variabilidade espacial dos atributos do solo.....	4
2.2. Modelos conceituais do delineamento de unidades de mapeamento e relação solo-paisagem.....	7
2.3. Utilização das informações auxiliares no mapeamento de solos.....	10
2.4. Técnicas de classificação.....	12
3. MATERIAL E MÉTODOS	16
3.1. Localização da área e amostragem.....	16
3.2. Atributos do solo.....	17
3.3. Análises de laboratório.....	19
3.4 Procedimento para mapeamento de solos.....	19
3.4.1 Concatenação das informações auxiliares.....	19
3.4.2 Caracterização dos atributos do solo em função das informações auxiliares.....	21
3.4.3 Análise multivariada.....	21
3.4.4 Análise geoestatística.....	22
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	24

4.1 Caracterização dos atributos do solo	24
4.2 Análise de agrupamentos.....	31
4.3 Análise geoestatística	41
5. CONCLUSÕES.....	48
6. LITERATURA CONSULTADA	49
APÊNDICE	

PROTOCOLO PARA USO DE DADOS LEGADOS NO MAPEAMENTO DE SOLOS DO PLANALTO OCIDENTAL PAULISTA

RESUMO - São escassas as informações a respeito do recurso solo em escala adequada. Tais informações subsidiariam o estabelecimento de políticas públicas de uso e manejo e também o aprimoramento dos próprios mapas de solos. O presente trabalho tem por objetivo estabelecer um protocolo para o mapeamento de solos a partir de informações auxiliares e médias dos atributos do solo (diagnósticos e não diagnósticos). Foram coletadas 553 amostras de solo na profundidade de 0-0,20 m ao longo das rodovias do Estado de São Paulo, dentro do domínio geológico do Planalto Ocidental Paulista. Utilizaram-se informações de geologia, dissecação, pedologia e mapa de formas da paisagem, com diferentes escalas. Foram avaliados o conteúdo de argila, a suscetibilidade magnética, o ferro ditionito e o ferro oxalato, a hematita e a goethita, a caulinita e a gibbsita para cada informação auxiliar e para a união dessas informações. A variabilidade dos atributos foi estudada a partir de suas amplitudes (valores mínimo e máximo), e as médias foram utilizadas para o estabelecimento do protocolo. As amostras que representaram a mesma geologia, dissecação, pedologia e forma da paisagem foram concatenadas, dando como resultado 96 grupos. As médias destes grupos foram submetidas à análise de agrupamentos, visando a observar a estrutura dos dados e a diminuir a quantidade final de grupos. Os grupos obtidos a partir da análise de agrupamentos foram submetidos à análise geoestatística para a obtenção do mapa dos padrões espaciais. Os resultados mostraram diferenças marcantes dos atributos, principalmente para as informações geológicas e pedológicas. A análise de agrupamentos revelou a influência de cada informação na separação dos grupos. Para a área toda, foram delineados 11 grupos ou corpos de solos, considerando a distância euclidiana de (08) oito. Estes corpos de solos, considerados semelhantes pela análise de agrupamento, podem auxiliar na determinação de melhores locais para abertura de trincheiras e conseqüente levantamentos de solos. Este delineamento dos corpos de solos, além de considerar informações auxiliares e variabilidade dos atributos do solo, pode ajudar a diminuir a subjetividade associada ao mapeamento tradicional de solos.

Palavras-chave: variabilidade espacial, pedometria, classificação de solos, pedodiversidade, relação solo-paisagem.

PROTOCOL FOR USING SOIL DATA LEGACY FOR THE SOIL MAPPING IN THE SÃO PAULO WEST PLATEAU

ABSTRACT - Information about the soil resource is scarce in an adequate scale. This information would support the establishment of public policies of its use and management and as well the improvement of the soil maps. This work aim to establish a protocol for the design of soil bodies from soil data legacy and average information of diagnostic and non-diagnostic soil attributes. It was collected 553 soil samples from 0-0.20 depth along the highways of São Paulo State, within the geological province of the Western Plateau of São Paulo. Data from geology, geomorphology, pedology and landform maps were used. Clay content, magnetic susceptibility, oxalate and dithionite iron, hematite and goethite, kaolinite and gibbsite were assessed for each auxiliary information and for the union of these data. The variability of the attributes was analyzed through their amplitude (maximum and minimum values) and the means were used for the establishment of the protocol. Samples that presented the same geology, dissection, pedology and landform were concatenated, leading to 96 groups. The means of these groups were submitted to cluster analysis to evaluate the data structure and reduce the final number of groups. The groups obtained from cluster analysis were submitted to geostatistical analysis for the creation of isoline maps. The results indicated remarkable difference between the attributes mainly for the geological and pedological data. Cluster analysis revealed the influence of each information on group separation. For the whole area, 11 groups or soil bodies were designed, considering the Euclidian distance of (08) eight. These soil bodies, considered similar by the cluster analysis might help on the determination of the best places to open trenches and consequently for soil data collection. This design of soil bodies, in addition to consider auxiliary information and variability of soil attributes, might help to decrease the subjectivity associated to the traditional soil mapping.

Keywords: spatial variability, pedometry, soil classification, pedodiversity, soil-landscape relationship.

LISTA DE ABREVIACOES

AR	Araçatuba
Cc	Forma cncava
CDI	Coberturas detríticas indiferenciadas
Ct	Caulinita
Cx	Forma convexa
DBC	Ditionito-citrato-bicarbonato
DCE	Depósito colúvio-eluvionar
Fe _d	Ferro extraído por DBC
Fe _o	Ferro extraído por oxalato de amônio
Gb	Gibbsita
Gt	Goethita
Hm	Hematita
IT	Itaquerí
LVaf	Latossolo Vermelho acriférrico
LVA _d	Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico
LV _d	Latossolo Vermelho distrófico
LV _d f	Latossolo Vermelho distroférrico
LVE _f	Latossolo Vermelho eutroférrico
MA	Marília
PI	Forma plana
POP	Planalto Ocidental Paulista
PP	Presidente Prudente
RP	Rio Paraná
AS	Santo Anastácio
SG	Serra Geral
SJRP	São José do Rio Preto
SM	Suscetibilidade magnética
ST	Soil Taxonomy
VRP	Vale do Rio do Peixe
UM	Unidade de mapeamento
WRB	World Reference Base for Soil Resources

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1.** Médias e desvio padrão para os atributos argila e suscetibilidade magnética em função da concatenação das informações auxiliares.... 32
- Tabela 2.** Médias e desvio padrão para cada uma dos corpos de solos delineados..... 44

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Índice global de Shannon e destaque para os índices do Brasil (Adaptado de MINASNY et al., 2010).....	5
Figura 2.	Distância euclidiana entre dois objetos medidos sobre duas variáveis X e Y.....	14
Figura 3.	Geologia (escala 1:200.000, modificado de Fernández, 1998). AR: Araçatuba, BO: Botucatu, CDI: Coberturas detríticas indiferenciadas, DA: Depósitos aluvionares DCE: Depósitos colúvio-eluvionares, IT: Itaquerí, MA: Marília, PP: Presidente Prudente, RP: Rio Paraná, AS: Santo Anastácio, SG: Serra Geral, SJRP: São Jose do Rio Preto, VRP: Vale do Rio do Peixe. b. Dissecação: Alta, Intermediária e baixa. c. Pedologia (escala 1:500.000, IAC): PV: Argissolo Vermelho, PVA: Argissolo Vermelho Amarelo, GX: Gleissolo Háplico, LA: Latossolo Amarelo, LV: Latossolo Vermelho, LVA: Latossolo Vermelho-Amarelo, NF: Neossolo Flúvico, NL: Neossolo Litólico, NQ: Neossolo Quartzarênico, NiV: Nitossolo Vermelho. d. Formas da paisagem: Cc: Côncavo, Cx: Convexo, Pl: Linear. e. Pontos amostrais.....	18
Figura 4.	Proposta de protocolo para delineamento de corpos de solos.....	20
Figura 5.	Médias e amplitudes de atributos do solo em função da formação geológica. Formações = AR: Araçatuba, BO: Botucatu, IT: Itaquerí, MA: Marília, PP: Presidente Prudente, RP: Rio Paraná, SA: Santo Anastácio, SG: Serra Geral, SJRP: São José do Rio Preto, VRP: Vale do Rio do Peixe. As relações $Hm/(Hm+Gt)$, $Ct/(Ct+Gb)$ e Feo/Fed são adimensionais.....	26
Figura 6.	Boxplots para atributos do solo em função da classe de solo. LVAd: Latossolo Vermelho Amarelo distrófico, LVaf: Latossolo Vermelho acriférico, LVd: Latossolo Vermelho distrófico, LVdf: Latossolo Vermelho distroférico, LVef: Latossolo Vermelho eutrófico, NiVef: Nitossolo Vermelho eutrófico, NLe: Neossolo Litólico eutrófico, PVAd: Argissolo Vermelho Amarelo distrófico, PVAe: Argissolo Vermelho Amarelo eutrófico, PVAea: Argissolo Vermelho Amarelo eutrófico abrupto, PVAed: Argissolo Vermelho Amarelo eutrófico-distrófico, PVd: Argissolo Vermelho distrófico, PVe: Argissolo Vermelho eutrófico.....	28

Figura 7.	Boxplots para atributos do solo em função da classe de solo. Hm: Hematita, Gt: Goethita, Ct: Caulinita, Gb: Gibbsita, LVAd: Latossolo Vermelho Amarelo distrófico, LVaf: Latossolo Vermelho acriférrico, LVd: Latossolo Vermelho distrófico, LVdf: Latossolo Vermelho distroférico, LVef: Latossolo Vermelho eutroférico, NiVef: Nitossolo Vermelho eutroférico, NLe: Neossolo Litólico eutrófico, PVAd: Argissolo Vermelho Amarelo distrófico, PVAe: Argissolo Vermelho Amarelo eutrófico, PVAea: Argissolo Vermelho Amarelo eutrófico abruptico, PVd: Argissolo Vermelho distrófico, PVe: Argissolo Vermelho eutrófico.....	30
Figura 8.	Dendrogramas para cada uma das informações auxiliares. A. Geologia, B. Dissecação, C. Pedologia, D. Forma da paisagem.....	37
Figura 9.	Dendrograma para a concatenação das informações secundárias.....	39
Figura 10.	Contribuição relativa dos atributos do solo para os dois primeiros componentes principais.....	40
Figura 11	Semivariograma ajustado para o conjunto de dados concatenados.....	41
Figura 12.	Mapa de isolinhas das principais unidades delineadas a partir dos grupos obtidos na análise de agrupamentos.....	42
Figura 13.	Variação vertical do atributo argila para cada uma das unidades delineadas. Dados coletados da base de dados SoilGrids	46

1. INTRODUÇÃO

A crescente preocupação dos gestores agrícolas e não agrícolas com a escassez de dados sobre os solos promoveu a realização de um Acórdão TC n. 1942/2015, fruto da Auditoria TC n.011.713/2015-1 conduzida pelo Tribunal de Contas da União (TCU). Este Acórdão promoveu o estabelecimento do Programa Nacional de Solos (PRONASOLOS), cujo objetivo principal é a realização de levantamentos pedológicos em caráter multiescalar (EMBRAPA, 2016). No Brasil, os levantamentos e mapeamentos de solos são conduzidos seguindo os princípios da escola russa e utilizando sistemas de classificação que são similares ao *Soil Taxonomy* (ST) da escola americana. Atualmente no Brasil somente 0,13% da área total está representada por mapas em escala $\geq 1:25.000$ (SANTOS et al., 2013).

Entre os principais problemas encontrados para a obtenção de mapas pedológicos ou mapas de atributos de forma tradicional, destacam-se as dificuldades financeiras e o tempo demandado para a condução do levantamento (SILVA et al., 2016). O método tradicional considera o delineamento de unidades de mapeamento a partir da utilização dos modelos conceituais da relação solo-paisagem (HUDSON, 1992), partindo do conhecimento e do estudo das diferentes feições da paisagem e o consequente delineamento dos corpos de solo com base nas observações de campo.

As relações solo-paisagem auxiliam no entendimento de como os processos pedogenéticos condicionam a variabilidade dos atributos (VASU et al., 2016), sendo os solos relacionados a suas paisagens por processos geomórficos com os quais eles coevoluem (BOCKHEIM et al., 2005). Estes modelos empíricos da relação solo-paisagem foram utilizados por muito tempo para prever a distribuição espacial das classes de solos, sendo que estas relações foram transmitidas a pedólogos menos experientes, principalmente a partir da educação e da prática (BUI; CORNER, 1999; BUI, 2004), com intenso trabalho de campo para reconhecer os padrões de variação dos solos na paisagem.

Na década de 1970, alguns autores já demonstraram que o mapeamento tradicional de solos era pouco eficiente, devido a sua subjetividade, principalmente no delineamento das unidades de mapeamento. Bie e Beckett (1973) observaram que existem muitas diferenças nas estratégias de mapeamento de diferentes pedólogos quando se trata de mapear o mesmo solo, diferindo consideravelmente a porcentagem de pureza dos mapas e os limites das unidades de mapeamento. Em anos recentes, Bazaglia Filho et al. (2013) ressaltaram a mesma questão, colocando em evidência as diferenças entre mapas de solos obtidos por diferentes pedólogos. Porém, vários são os esforços dos cientistas do solo ao redor do mundo para tentar melhorar as metodologias utilizadas no levantamento de solos. Desde o ano 2003, quando McBratney e colaboradores definiram o mapeamento digital de solos (MDS), foi muito grande o avanço na área da pedologia, e os esforços concentraram-se em procurar modelos que descrevessem melhor as relações solo-paisagem de uma determinada área, principalmente utilizando ferramentas matemáticas e estatísticas sofisticadas.

No entanto, como a descrição dos padrões espaciais é frequentemente restrita à variação espacial em toda a gama de valores de atributos (GOOVAERTS, 1999), que estão condicionados aos processos e fatores envolvidos na formação do solo (JENNY, 1941), a procura por melhores ferramentas matemáticas e estatísticas é insuficiente se estes padrões de variabilidade não forem primeiro bem conhecidos e interpretados.

Assim, levantamentos e mapeamentos podem ser executados com sucesso, seguindo os modelos da paisagem com a utilização de informações auxiliares, como a geomorfologia, a hidrologia e a estratigrafia (LEPSCH, 2013) e a utilização de técnicas matemáticas, fazendo do entendimento dos padrões de variabilidade do solo uma tarefa mais fácil. No Brasil, o Estado de São Paulo tem sido pioneiro na condução de estudos sobre os padrões de variabilidade dos solos a partir do estudo da paisagem (LEPSCH; BUOL; DANIELS, 1977; MARQUES JÚNIOR; LEPSCH, 2000) e com utilização de informações auxiliares, como geologia e geomorfologia, para a caracterização mineralógica dos solos (SILVA, 2016). Contudo, no âmbito

geológico-geomorfológico, ainda existem carências que impossibilitam as descobertas sobre os solos em grandes áreas (VIDAL-TORRADO et al., 2005).

No contexto mencionado acima, o desafio científico deste trabalho enquadra-se no estabelecimento de um protocolo de mapeamento de solos para o delineamento de corpos de solos, considerando informações auxiliares de geologia, dissecação, de pedologia e de formas da paisagem, além das médias dos atributos diagnósticos e não diagnósticos.

Assim, a hipótese do trabalho é que as médias dos atributos do solo e a relação solo-paisagem, estabelecida a partir da utilização de informações auxiliares, possibilitam a criação de um protocolo para o mapeamento de solos. Conseqüentemente, o objetivo do trabalho é o estabelecimento de um protocolo para o mapeamento de solos a partir da utilização das médias dos atributos do solo e de informações auxiliares.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Pedodiversidade e variabilidade espacial dos atributos do solo

A pedodiversidade define-se como sendo a variação dos atributos do solo ou das classes de solos dentro de uma área determinada (McBRATNEY; MINASNY, 2007). Na concepção de Ibañez et al. (2012), a pedodiversidade é conceitualmente definida como um inventário das várias entidades pedológicas discretas (e.g. táxon de solo) e a análise de seus padrões espaciais e temporais. Para Phillips (2001), a pedodiversidade e, portanto, a variabilidade dos atributos do solo pode estar vinculada com as variações observáveis e mensuráveis junto aos fatores ambientais que controlam a pedogênese. Este fato é muito importante para os levantamentos de solos quando a variabilidade espacial de atributos do solo, importantes para a classificação, é considerada.

Como medida de pedodiversidade, Minasny et al. (2010) estudaram a distância taxonômica entre grupos de solos a nível global e afirmaram que este índice constituía uma ferramenta importante para a medida da pedodiversidade de uma área. A média global da distância taxonômica, principalmente para as regiões tropicais, mostrou-se muito baixa, em comparação às regiões onde o clima temperado é predominante. A menor distância taxonômica é indicativo de menor pedodiversidade, como observaram Minasny et al. (2010) para as regiões tropicais e de clima mais chuvoso. Porém, existe relação entre a pedodiversidade de uma área e o detalhamento dos mapas existentes para essa área, demonstrando que a falta de informações de solos no Brasil pode ser um indicativo da baixa pedodiversidade.

Por outro lado, os mesmo autores estudaram outro índice de diversidade, o índice de Shannon, que mostrou um valor maior para as regiões tropicais, sendo este valor maior um indicativo de maior pedodiversidade existente na área (Figura 1).

O estudo da variabilidade dos solos durante os últimos anos tem-se centrado como um meio para quantificar melhor os conceitos pedogenéticos e a compreensão de quais são os fatores causais dos padrões de distribuição do solo (ARNOLD;

WILDING, 1991; WILDING; DRESS, 1983). Sendo assim, a variabilidade pode ser dividida em aleatória, atribuída a causas desconhecidas, e sistemática, quando a variabilidade pode ser prevista e sua causa for conhecida (SOUZA, 2006).

Os atributos do solo possuem diversas inter-relações e estão intimamente ligados ao controle de processos e de aspectos que causam variabilidade no espaço e no tempo (CARNEIRO et al., 2009). Essa variabilidade pode ser induzida naturalmente nos solos, a partir das relações estabelecidas principalmente entre o material de origem, a topografia e o tempo (COELHO, 2005), e quanto maior a variação desses fatores, maior será a heterogeneidade (SOUZA, 2006), tendo como consequência uma grande variedade de tipos de solos (JARAMILLO, 2012). Assim, a variabilidade ocorre desde a formação do solo e continua mesmo após o equilíbrio dinâmico ser alcançado (SOUZA et al., 2009).

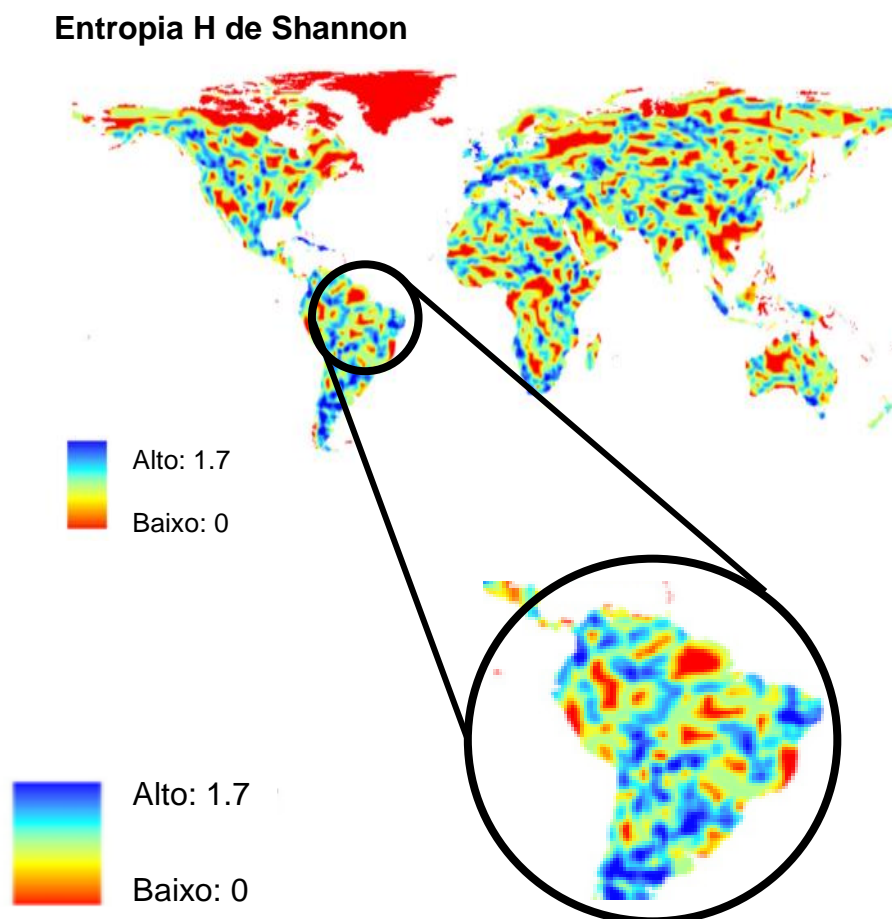


Figura 1. Índice global de Shannon e destaque para os índices do Brasil (Adaptado de MINASNY et al., 2010).

McBratney e Webster (1981) relataram a importância do conhecimento da distribuição espacial dos atributos do solo para o estabelecimento de classes, ressaltando que o mapa gerado sem esta consideração pode ser de pouca aplicação na prática. Em muitos mapas de solos, suas distribuições espaciais não são conhecidas mais do que o informado pelas indicações qualitativas que acompanham o informe (ODGERS et al., 2014).

No Brasil, a variabilidade espacial do solo foi pouco utilizada para o estabelecimento das classes pedológicas, sendo primeiramente delimitada a classe taxonômica, e sobre a base desses limites teóricos, as unidades de mapeamento foram estabelecidas (SIQUEIRA et al., 2015), observando-se como dificuldade a necessidade de informações mais detalhadas para aplicações no campo. Da Silva et al. (2013) relatam que o conhecimento da distribuição espacial dos principais atributos diagnósticos, como o teor de argila, a saturação por bases e a cor do solo, pode auxiliar, de forma simplificada, na caracterização dos solos.

Escassos ainda são os estudos que visam ao mapeamento de solos, considerando primeiro os atributos do solo. Nesse sentido, a utilização de atributos dos solos, não convencionais, como os óxidos de ferro (devido à sua abundância nas regiões tropicais), e a suscetibilidade magnética apresentam-se com grande potencial para auxiliar no estabelecimento de estratégias de mapeamento e detalhamento de solos. O conhecimento e o detalhamento desses mapas de solos, com base na informação sobre a variabilidade dos atributos, constituem-se poderosa ferramenta quanto às decisões em relação ao manejo, ao uso e à ocupação do solo, e às inferências a respeito do comportamento dos solos em áreas cuja variabilidade é considerada similar a áreas já conhecidas (DA SILVA et al., 2013; MINASNY; McBRATNEY, 2007).

Considerando o tempo e os recursos que são gastos em mapeamento de solos, McBratney et al. (2003) falam da necessidade de considerar as metodologias digitais e a utilização de modelos matemáticos para a avaliação do solo, visando à produção de mapas de atributos de qualidade. Por outro lado, alguns autores (JENNY, 1941; BOCKHEIM; GENNADIYEV, 2000) destacam a importância do conhecimento dos fatores de formação (clima, organismos, material parental, relevo

e tempo) na constituição e na variabilidade do solo. Dentre eles, o relevo cumpre um papel fundamental.

Bockheim e Gennadiyev (2000) relatam a importância do entendimento dos processos de formação do solo no estabelecimento de táxons dentro de um determinado sistema de classificação. Ainda, fazer a ligação de novas informações dos atributos junto com os processos envolvidos na gênese dos solos poderia ser um desafio para os cientistas do solo, e a necessidade por modelos pedológicos melhorados seria ainda maior (BREVIK et al., 2016).

No Brasil, mapas com nível mais detalhado são escassos, e muitas regiões possuem apenas informações muito generalizadas, o que impossibilita a adequada ocupação e o uso do solo (SILVA, 2012). Um maior detalhamento dos mapas pode favorecer uma produção mais sustentável (SIQUEIRA et al., 2015), fazendo uso dos mapas de zonas específicas de manejo previamente obtidos ou o remapeamento de áreas já conhecidas, em escala mais detalhada, que possibilita a identificação de novos indivíduos-solos e/ou o refinamento dos mapas de solos já existentes em outros novos (JENNY, 1941) e, com isso, a possibilidade do preenchimento do último nível categórico do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), o nível de série, sem desconsiderar a relação dos atributos do solo com pequenas variações no relevo (MARQUES JÚNIOR, 2009).

2.2. Modelos conceituais do delineamento de unidades de mapeamento e relação solo-paisagem

Nos primórdios do mapeamento de solos, a ideia básica era que os mapeadores deveriam ter a capacidade de ler uma paisagem (GRUNWALD, 2005), levando em consideração os fatores de formação estabelecidos na equação de Jenny (1941). Na concepção de Arnold (2005), isto faz referência a como nossos sentidos interpretam o cenário que se apresenta ao nosso redor. A partir do conhecimento da paisagem, conseqüentemente, os pedólogos eram capazes de delinear as unidades de solos.

Atualmente, a maioria dos delineamentos das unidades continua sendo elaborada a partir da observação dos solos no campo e do estabelecimento de relações entre esses e as características da paisagem (TESKE; GIASSON; GABATINNI, 2015). Hudson (1992) definiu esta relação como o “paradigma da relação solo-paisagem”. O modelo solo-paisagem abrange a relação que existe entre os solos em uma área determinada e as diferentes feições da paisagem, com o delineamento manual das unidades de diferentes solos ou a combinação de solos (ZHU et al., 2001). Nesse sentido, os mapas de solos resultantes são produto do conhecimento do mapeador sobre o objeto solo (McBRATNEY et al. 2003) e muito do trabalho envolvido no delineamento de unidades de mapeamento caracteriza-se por ser subjetivo (KUILENBURG et al., 1982), onde as propriedades do solo podem diferir consideravelmente do perfil modal (CAMPBELL, 1977).

Estes modelos conceituais servem como base para os modelos quantitativos que descrevem as paisagens de solos e que hoje estão envolvidos em complexos modelos quantitativos que utilizam técnicas matemáticas e estatísticas avançadas, capazes de processar grandes quantidades de dados (GRUNWALD, 2005). Uma unidade de mapeamento pode ser definida como uma área que apresenta propriedades do solo similares (SALAHAT et al., 2012). Estes delineamentos representam a porção mapeável da paisagem que contém um ou mais indivíduos de solo mais a inclusão de uma porcentagem de outros tipos de solos indefinidos, denominados de inclusões de solos (VALENTINE, 1981).

No caso do paradigma da relação solo-paisagem, Hudson (1992) menciona que, no delineamento de unidades de mapeamento, nada se fala a respeito de como os solos variam ou quais propriedades variam em diferentes climas. Sobre o exposto, muitos esforços têm sido conduzidos para dar uma solução a essa problemática. Como exemplo, já no século XVIII, segundo mencionado por Minasny e McBratney (2015), vários pesquisadores consideravam a ideia de estabelecer primeiro os atributos do solo e fazer o delineamento com base na similaridade desses atributos, para logo as classes de solos serem atribuídas. Infelizmente, essa ideia não teve muita aceitação na época e foi abandonada rapidamente.

Os estudos do solo formam um sistema de conhecimentos, e os mapas de solos e seus delineamentos representam a estrutura desse conhecimento no que diz respeito à distribuição dos solos na paisagem (BUI, 2004). Entretanto, este conhecimento estruturado, muitas vezes, é pouco acessível aos profissionais de outras áreas. Essa carência, ainda presente nos dias de hoje, mostra como o conhecimento tácito sobre as relações solo-paisagem se torna uma tarefa difícil de ser transferida a gerações de novos pedólogos.

O estabelecimento de limites nas classes pedológicas passa por uma questão subjetiva, onde pouco se considera sobre a variabilidade dos atributos do solo e a posição que determinado solo tem na paisagem. Devido a esse problema, faz-se necessária uma combinação do conhecimento pedológico tradicional e a vinculação dos atributos do solo com os controladores do meio ambiente (e.g. relevo), que podem ter uma participação na formação do solo (MINASNY; McBRATNEY, 2015) para o estabelecimento mais preciso deste limite com o correspondente auxílio de modelos matemáticos.

O Mapeamento Digital de Solos (MDS), conceituado por McBratney et al. (2003), constitui-se como uma ferramenta para enfrentar esse problema, com a utilização de variáveis que procuram proporcionar maior entendimento da relação que existe entre o solo e a geomorfologia de uma região, baseados principalmente no Modelo Digital de Elevação, e as informações geológicas disponíveis para conhecer tanto a variabilidade dentro das classes de solos como para a predição no contexto da relação solo-paisagem (CAMPOS et al., 2006; SILVA, 2012; ARRUDA, 2012).

As diferentes formas da paisagem têm influência marcante na distribuição espacial dos materiais e da energia (VASCONCELOS et al., 2012), e a geração de um complexo padrão do fluxo da água e do transporte de solutos (SOUZA et al., 2009) que, conseqüentemente, impacta nos processos pedogenéticos. Modelos de paisagem, como os de Troeh (1965), Daniels et al. (1971) e Dalrympe et al. (1968), como os de Milne, Ruhe e outros, permitem a predição de tipos de solos encontrados em qualquer parte da paisagem (BREVIK, et al. 2016). Estes modelos, junto a uma metodologia mais recente, a assinatura geomorfométrica (VASCONCELOS et al., 2012), demonstram um papel fundamental na avaliação da

relação entre a geomorfologia e as transformações que podem ocorrer nos solos. Siqueira et al. (2015) relatam sobre a importância de considerar um estudo multidisciplinar para o mapeamento detalhado dos solos, tendo como base a relação solo-paisagem.

Vários estudos que consideram a influência do relevo nas classes de solos vêm sendo desenvolvidos nos últimos anos, como os trabalhos de Demattê et al. (2014), que correlacionaram as características do relevo com as classes de solos, mostrando que subordens diferentes dentro das ordens ocorrem em posições mais altas ou baixas do relevo, como no caso dos Latossolos. Siqueira et al. (2015) estudaram o delineamento de unidades de mapeamento com base nas relações solo-relevo, na suscetibilidade magnética e na cor do solo. Teixeira (2015) estudou as incertezas no delineamento de unidades de mapeamento a partir do estudo da suscetibilidade magnética e da utilização de informações de geologia, geomorfologia e pedologia. Bui et al. (2017) estudaram as diferentes formas da paisagem com a utilização da lógica fuzzy para criar mapas de solos e mapas de fertilidade.

2.3. Utilização das informações auxiliares no mapeamento de solos

Desde o começo dos levantamentos de solos, os pedólogos utilizaram informações secundárias para auxiliar em seu mapeamento. Informações de fotografias aéreas e da topografia local caracterizaram-se por serem as primeiras a serem utilizadas.

No entanto, a condução de um levantamento e mapeamento de solos requer a disposição de tempo e orçamento suficientes para a obtenção dos mapas. Para contornar este problema, muitos dos levantamentos atuais são produtos da utilização conjunta de informações auxiliares e sua relação com os processos dos solos, seguindo os mesmos princípios dos primeiros levantamentos, nos quais relações solo-paisagem eram consideradas a partir do estudo das fotografias aéreas. Existem muitos tipos de dados que podem auxiliar na condução dos levantamentos, tanto qualitativos como quantitativos. Entre os principais, encontram-

-se os produtos do sensoriamento remoto, modelos digitais de elevação, variáveis geomorfométricas, mapas legados de solos (MENEZES et al., 2013), mapas de geologia, entre outros.

Poucos são os trabalhos que consideram a utilização de mapas de geologia (ou litologia) como covariáveis ambientais em mapeamentos digitais de solos, não atingindo 25% dos estudos (GRAY et al., 2014). A falta de utilização das informações geológicas, muitas vezes dá-se pela ausência destas informações dentro da área de estudo ou pela falta de entendimento das possíveis relações desta com a formação do solo (GRAY et al., 2014).

Por outro lado, a geologia, como reflexo do material parental do solo, forma a parte principal da equação da formação do solo, estabelecida por Jenny (1941). Cook et al. (1996) utilizaram informações de geologia obtidas a partir de radiação gama e concluíram que os dados gamma radiométricos podem proporcionar informação valiosa sobre a distribuição dos materiais que formam o solo. Porém, considerando as limitações desta técnica, os dados, provavelmente, serão mais úteis quando utilizados em conjunto com outras informações, tais como modelos de terreno ou fotografias aéreas.

Além da geologia, outras informações auxiliares têm sido utilizadas como covariáveis ambientais para o delineamento de corpos de solos. Exemplo clássico disso é a utilização dos modelos digitais de elevação e seus atributos derivados, como declividade, índice topográfico, entre outros. A utilização destas informações derivadas do MDE tem dado lugar a uma infinidade de trabalhos de mapeamento, com acurácia variável. Caten et al. (2011) utilizam o MDE junto com regressões logísticas para gerar mapas de probabilidade de classes de solos na paisagem. Carvalho Júnior et al. (2014) utilizaram os atributos do terreno derivados do MDE e não acharam boa concordância entre o mapa digital gerado e o mapa tradicional devido à falta de acurácia do MDE.

Muitos dos trabalhos seguem esta linha, e outros autores apostam na utilização de informações do relevo, como as superfícies geomórficas ou a forma da paisagem. No Planalto Ocidental Paulista (POP), vários são os trabalhos conduzidos

que visaram a estudar as relações do relevo com a ocorrência ou a formação dos solos ou a variabilidade dos atributos.

Também se destaca a utilização de informações pedológicas como informações auxiliares. Samuel e Joseph (2015) ressaltam a importância de utilizar estas informações pedológicas em conjunto com outras, em favor de técnicas modernas de interpolação para obterem mapas e informações dos solos com maior acurácia.

2.4. Técnicas de classificação

O delineamento das unidades de mapeamento é o passo inicial para o estabelecimento dos corpos do solo nas classes taxonômicas. Estas classes taxonômicas são abstratas, e, muitas vezes, os limites no campo não coincidem exatamente com o limite da classe dentro de um sistema de classificação. Segundo a definição de Buol et al. (1997), a classificação de solos consiste na “*categorização de solos dentro de grupos de diferentes níveis de generalização em acordo com suas propriedades morfológicas e/ou gênese*”, com o objetivo final de organizar o conhecimento adquirido sobre os solos. Um esquema de classificação pode representar simplesmente um método conveniente para organizar um extenso conjunto de dados para que a recuperação da informação seja mais eficiente (EVERITT, 1993).

No entanto, as principais limitações do estabelecimento desse conhecimento está ligada à incerteza quanto à colocação dos limites do solo sem considerar mecanismo para quantificar a variabilidade dos atributos envolvidos nos processos de pedogênese (ROGOWSKI; WOLF, 1994).

No mundo todo, existem vários sistemas de classificação. Países como China, Estados Unidos, Austrália e Brasil, só por mencionar alguns, têm colocado muito esforço em desenvolver sistemas de classificação que refletem a pedodiversidade existente em cada um desses países. No entanto, alguns esforços a mais têm-se concentrado em desenvolver um sistema de classificação universal.

Exemplo disso é a Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação (FAO), com a criação da Base de Referência Mundial para o Recurso Solo (WRB) (GOLDEN et al., 2010) e o Soil Taxonomy (ST) dos Estados Unidos (SOIL SURVEY STAFF, 1999).

O WRB (FAO, 2007) tenta abranger todos os tipos de solos existentes do mundo e caracteriza-se por ser de fácil uso e compreensão, com aproximadamente 32 ordens de solos. O Soil Taxonomy compreende 12 ordens de solos dentro das quais já foram descritas aproximadamente 23.000 séries nos EUA (LEPSCH, 2011), sendo este sistema utilizado em vários outros países ao redor do mundo.

Tradicionalmente, os delineamentos dos grupos de solos têm sido realizados pelo estudo ou caracterização morfológica de perfis de solos e sua relação com a paisagem. Como os atributos do solo não variam de forma independente (NORRIS, 1971), alguns esforços têm-se concentrado na utilização do enfoque multivariado para o estudo do solo, principalmente para fins de classificação. Arkley (1971) usou a análise de agrupamento em vários conjuntos de dados, utilizando vários atributos do solo para tentar estabelecer os grupos e sua comparação com os níveis taxonômicos do **Soil Taxonomy**.

A análise de agrupamento (hierárquico e não hierárquico) ou **Cluster Analysis** (CA) é a técnica mais conhecida dentro da aprendizagem não supervisionada (IZENMAN, 2008). Enquadra-se como técnica exploratória e consiste no estudo formal de métodos e algoritmos para agrupamento de objetos de acordo com a medida ou a percepção de características ou similaridades intrínsecas (KANTARDZIC, 2011). Foi introduzida por Driver e Crover em 1932, principalmente no estudo da arqueologia (KRIPPENDORFF, 1980).

Um **cluster** ou agrupamento geralmente é conceituado como um grupo de itens que são estes objetos ou pontos, no qual, cada item está “perto” de um item central do **cluster**, e os membros de diferentes **clusters** estão “longe” dos outros (IZENMAN, 2008). Em outras palavras, a análise de agrupamento caracteriza-se por ser utilizada para discriminar grupos considerados homogêneos a partir do estudo de mais de uma variável, que esteja necessariamente correlacionada. Este

procedimento é realizado a partir do entendimento de quão longe estão os objetos uns dos outros, ou quão semelhantes eles são (HAN et al., 2011). Assim, estatisticamente falando, a análise de agrupamento tenta minimizar a variabilidade dentro de cada grupo e maximizar a variabilidade entre os grupos que são distintos uns dos outros (YOUNG; HAMMER, 2000). A similaridade ou dissimilaridade entre os objetos é conhecida a partir do estudo da distância entre estes.

Existem várias medidas de distância, sendo a distância euclidiana uma das principais, também conhecida como distância em linha reta (HAIR et al., 2009). A distância euclidiana entre dois pontos é o comprimento da hipotenusa de um triângulo retângulo, conforme representado na Figura 2.

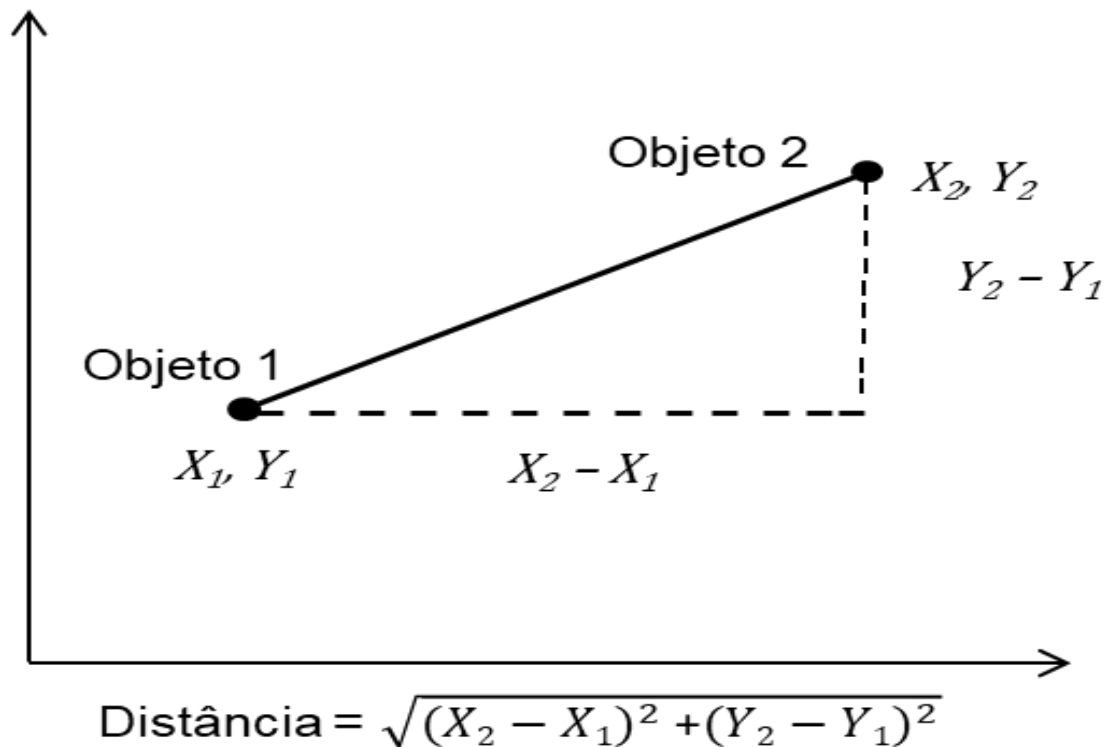


Figura 2. Distância euclidiana entre dois objetos medidos sobre duas variáveis X e Y.

No entanto, outras medidas de distância são úteis no entendimento das relações entre os objetos. A distância de Mahalanobis é outra medida de distância que explica as correlações entre as variáveis de tal modo que pondera igualmente cada uma delas. A distância de Manhattan também mede a distância entre dois

objetos, porém, diferente da distância euclidiana, ela emprega a soma das diferenças absolutas das variáveis (isto é, os dois lados de um triângulo retângulo em vez da hipotenusa) (HAIR et al., 2009).

A análise de agrupamento é considerada uma técnica exploratória. Os procedimentos exploratórios são muito úteis no entendimento de relações naturais multivariadas complexas (JOHNSON; WICHERN, 1992). Estes, ao contrário da análise confirmatória, não testam nem confirmam uma teoria predefinida (HAIR et al., 2009). O solo, como entidade complexa, apresenta inúmeras relações tanto entre seus atributos, como com o meio circundante. Apesar de a complexidade do solo ser reconhecida (PHILLIPS, 2017), poucos são os estudos que tentam estabelecer as relações entre os atributos do solo e o delineamento de grupos homogêneos a partir de atributos de interesse para a classificação.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Localização da área e amostragem

A área de estudo localiza-se no Estado de São Paulo, no domínio geomorfológico do Planalto Ocidental Paulista, representando aproximadamente 48% da superfície do estado (Figura 1). O relevo caracteriza-se por ser levemente ondulado, com predomínio de colinas amplas e baixas, com topos aplanados (ROSS; MOROZ, 1996), com uma altitude que varia de 357 a 610 m. A formação do Planalto Ocidental Paulista data de 88 a 65 milhões de anos atrás, no Cretáceo Superior (FERNANDES; COIMBRA, 2000). Segundo IPT (1981), “situa-se essencialmente sobre rochas do Grupo Bauru, que é constituído por diversas formações predominantemente areníticas”. Também apresenta rochas vulcânicas de composição básica e sequências sedimentares, psamíticas e, em alguns casos, piroclásticas (ETCHEBEHERE, 2000).

As principais formações geológicas no Planalto Ocidental Paulista são a Serra Geral (SG), constituída de basaltos, com 15% da área; Formação Vale do Rio do Peixe (VRP), com 57,1%, constituídos de arenitos, e outros 27,9% são ocupados por outras formações areníticas (FERNANDES et al., 2007) (Figura 3.A). As informações geológicas foram obtidas a partir de mapas do IBGE, utilizando a última atualização das formações geológicas estabelecida por Fernandes e Coimbra (2000), na escala 1:200.000.

O mapa de formas utilizado (Figura 3.D) foi obtido a partir da proposta metodológica de Vasconcelos et al. (2012), que classificaram as formas do terreno (côncavo, convexo e linear) a partir da utilização do Modelo Digital de Elevação (MDE) e atributos do terreno, como declividade e curvatura. A partir das informações das formas do terreno (côncavo, convexo e linear) na escala 1: 250.000, foi possível estabelecer o grau de dissecação da paisagem (alta dissecação; intermediária dissecação, e baixa dissecação). A dissecação da paisagem está relacionada à relação solo-paisagem, que por sua vez está relacionada com o balanço pedogênese (taxa de formação do solo)- geomorfogênese (taxa de evolução da

paisagem) (SILVA, 2016). Quanto mais alta for a dissecação da paisagem, menor é a formação do solo, sendo favorecida a geomorfogênese, e quanto mais baixa for a dissecação da paisagem, existirão solos mais profundos e bem formados. No Planalto Ocidental Paulista, predominam áreas com intermediária dissecação (Figura 3.B).

O clima da região, segundo a classificação climática de Thornthwaite (1948), é tropical com estação seca de inverno (C2rA'a'), clima temperado úmido com verão quente (B4rB'4a) e temperado úmido, com inverno seco e verão quente (B2rB'3a), para as regiões norte e noroeste, sul, este e sudeste, respectivamente. Predominam principalmente os Latossolos e Argissolos, sendo menos expressivos os Neossolos e Gleissolos (EMBRAPA, 2013) (Figura 3.C). O uso atual dos solos é constituído por cana-de-açúcar, pastagens, citros, entre outros.

Foram coletadas 553 amostras de solos ao longo das rodovias presentes no domínio geomorfológico do Planalto Ocidental Paulista (Figura 3.E). As amostras foram coletadas na profundidade de 0,00 a 0,20 m. Os pontos coletados representaram doze formações geológicas derivadas de arenito (Araçatuba (AR), Vale do Rio do Peixe (VRP), Rio Paraná (RP), Botucatu (BO), Presidente Prudente (PP), Depósitos colúvio-eluvionares (DCE), São José do Rio Preto (SJRP), Itaquerí (IT), Marília (MA), Depósitos aluvionares (DA), Coberturas detríticas indiferenciadas (CDI) e Santo Anastácio (SA)). A geologia de basalto foi representada pela formação SG.

3.2. Atributos do solo

Foram selecionados atributos diagnósticos e não diagnósticos do solo. Entre os diagnósticos, foi utilizado o conteúdo de argila (g kg^{-1}). Entre os atributos não diagnósticos, a suscetibilidade magnética ($10^{-6} \text{ kg m}^{-3}$), o ferro extraído por ditionito-citrato-bicarbonato (Fe_d) (g kg^{-1}), o ferro extraído por oxalato de amônio (Fe_o) (g kg^{-1}), a relação $\text{Hm}/(\text{Hm}+\text{Gt})$ e $\text{Ct}/(\text{Ct}+\text{Gb})$ foram utilizadas para o estabelecimento do protocolo.

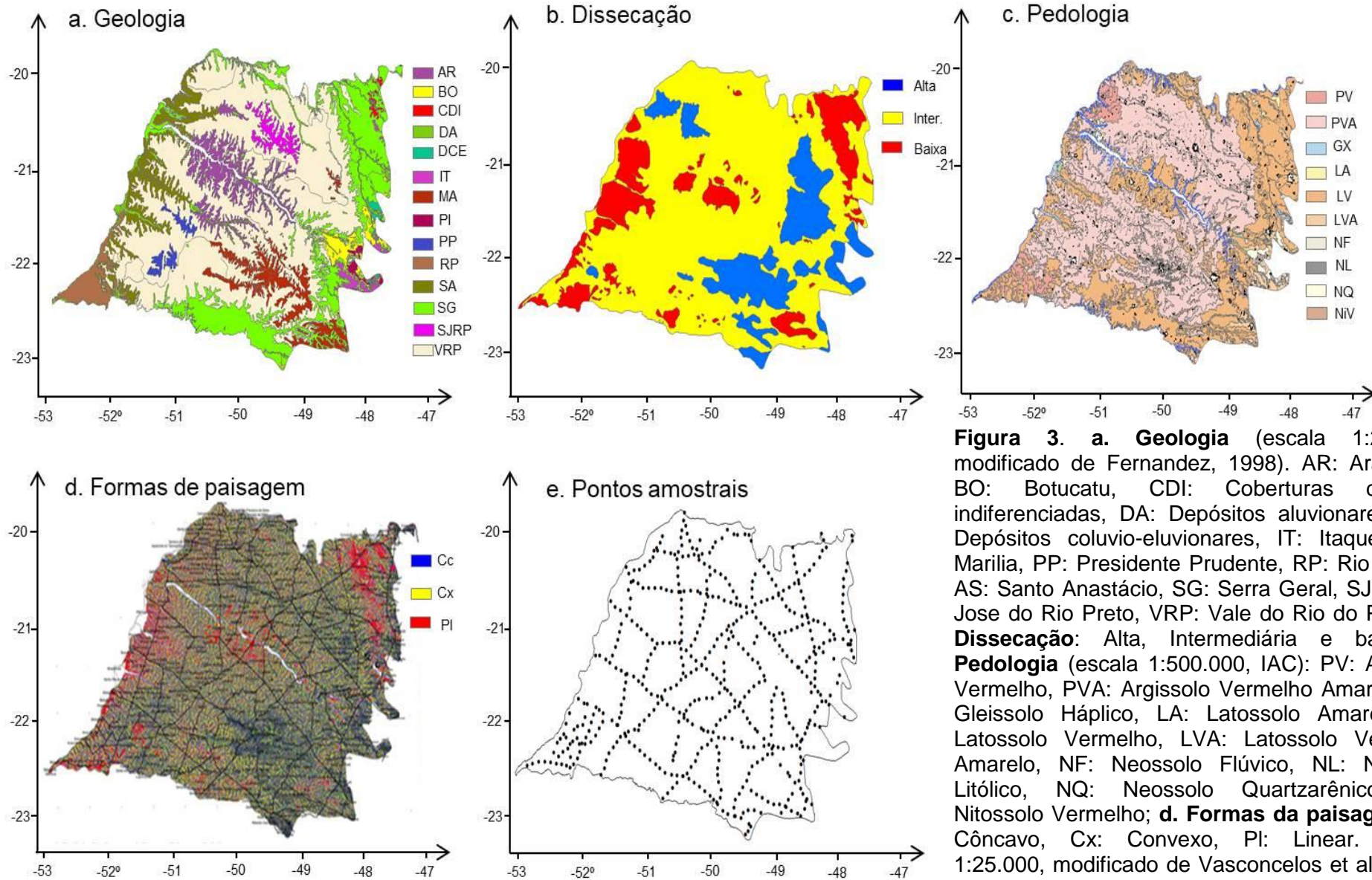


Figura 3. a. Geologia (escala 1:200.000, modificado de Fernandez, 1998). AR: Araçatuba, BO: Botucatu, CDI: Coberturas detriticas indiferenciadas, DA: Depósitos aluvionares DCE: Depósitos coluvio-eluvionares, IT: Itaquerí, MA: Marília, PP: Presidente Prudente, RP: Rio Paraná, AS: Santo Anastácio, SG: Serra Geral, SJRP: São Jose do Rio Preto, VRP: Vale do Rio do Peixe; **b. Dissecação:** Alta, Intermediária e baixa; **c. Pedologia** (escala 1:500.000, IAC): PV: Argissolo Vermelho, PVA: Argissolo Vermelho Amarelo, GX: Gleissolo Háplico, LA: Latossolo Amarelo, LV: Latossolo Vermelho, LVA: Latossolo Vermelho-Amarelo, NF: Neossolo Flúvico, NL: Neossolo Litólico, NQ: Neossolo Quartzarênico, NiV: Nitossolo Vermelho; **d. Formas da paisagem:** Cc: Côncavo, Cx: Convexo, PI: Linear. (escala 1:25.000, modificado de Vasconcelos et al., 2012); **e. Pontos amostrais.**

3.3. Análises de laboratório

As amostras foram submetidas às análises física, química e mineralógica. As análises granulométricas foram realizadas seguindo o método da pipeta (EMBRAPA, 1997), que consiste em agitação mecânica da amostra com solução de NaOH 0,1 M, durante 16 horas, em aparelho de baixa rotação, e sedimentação da solução em proveta, seguindo o princípio da Lei de Stokes, e posterior separação das frações. A extração dos óxidos de ferro pedogênicos de forma cristalina (Fe_d) foi feita com solução de ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (DCB), conforme Mehra e Jackson (1960); a extração dos óxidos de ferro pedogênicos de baixa cristalinidade (Fe_o) foi realizada com a solução de oxalato de amônio a $0,2 \text{ mol L}^{-1}$ a pH 3,0, no escuro, conforme Schwertmann (1964). Os teores de óxidos de ferro solubilizados foram determinados por absorvância no espectrofotômetro a 518 nm.

Os valores da relação $Hm/(Hm+Gt)$ foram obtidos de Silva (2016), que caracterizou estes minerais a partir da difratometria de raios-X. Os valores da relação $Ct/(Ct+Gb)$ foram obtidos de Fernandes (2017). A suscetibilidade magnética (SM) foi determinada a partir da pesagem de 10 g de terra fina seca ao ar (TFSA) e posterior leitura no equipamento Bartington MS2, acoplado ao sensor Bartington MS2B em baixa frequência (0,47 KHz) (DEARING, 1994; COSTA et al., 1999).

3.4 Procedimento para mapeamento de solos

3.4.1 Concatenação das informações auxiliares

Realizou-se a união das informações auxiliares na ordem: geologia-dissecação-pedologia-forma da paisagem e estudaram-se as distribuições dos atributos do solo em função desta junção. Por exemplo: considerou-se um ponto amostral que foi coletado na mesma geologia, dissecação, solo e forma da paisagem. Estas unidades obtidas foram nomeadas com algarismos para facilitar as análises quantitativas subsequentes.

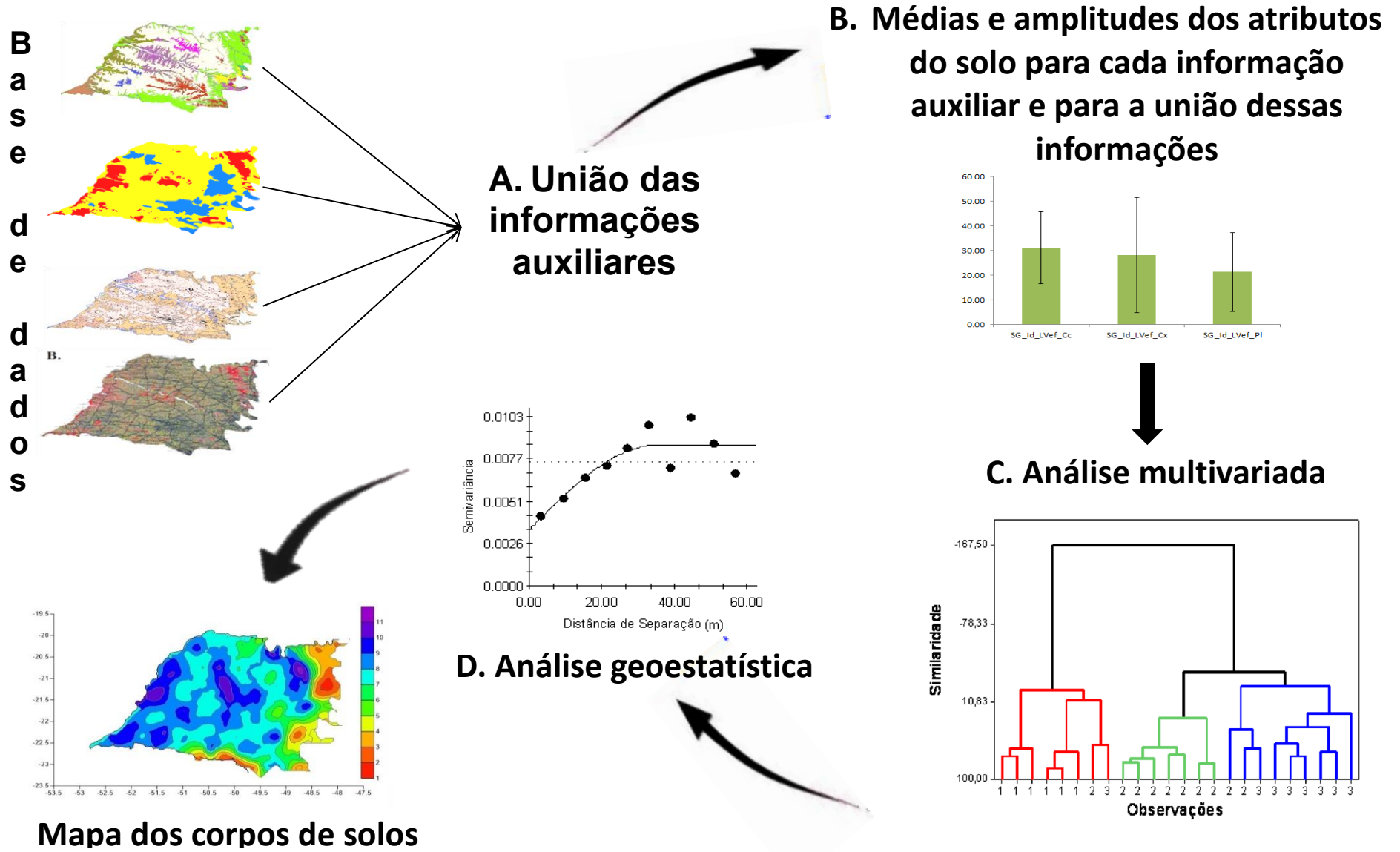


Figura 4. Proposta de protocolo para delineamento dos corpos de solos

3.4.2 Caracterização dos atributos do solo em função das informações auxiliares

Foram caracterizados os atributos do solo em função das informações geológicas e pedológicas. Para cada atributo do solo, foram obtidos gráficos de boxplots a fim de observar a distribuição dos dados em função das informações auxiliares (Figura 4.B).

3.4.3 Análise multivariada

Os grupos obtidos a partir da união das informações auxiliares foram submetidos à análise de agrupamento (Figura 4.C). A análise de agrupamentos ou **cluster analysis** é uma técnica exploratória que divide um conjunto de observações ou dados em grupos menores. O método utilizado neste trabalho é o agrupamento hierárquico, que consiste no agrupamento de objetos ou indivíduos em uma hierarquia ou “árvore” de grupos (HAN et al., 2011). O agrupamento hierárquico pode ser utilizado para objetivos de classificação no estabelecimento de taxonomias em relação ao suporte genético (WARD, 1963).

Para a separação desses possíveis grupos, são utilizadas medidas de similaridade entre dois ou mais objetos ou indivíduos, considerando a distância que existe entre eles. A similaridade representa o grau de correspondência entre objetos ao longo de todas as características utilizadas na análise (HAIR et al., 2009). No presente trabalho, foi utilizada a distância euclidiana, que é definida como:

$$d(i, j) = \sqrt{(x_{i1} - x_{j1})^2 + (x_{i2} - x_{j2})^2 + \dots + (x_{ip} - x_{jp})^2}.$$

em que, d é a distância entre os objetos ou indivíduos i e j no espaço euclidiano, e p são os atributos numéricos ou as variáveis estudadas.

O algoritmo de agrupamento utilizado foi aquele proposto por Ward (1963). Esta metodologia sugere que a decisão de quais pares de agrupamentos devem ser juntados, baseia-se no valor ótimo de uma função objetivo, sendo a variância

mínima ou erro quadrado mínimo exemplo de uma função objetivo. O método de Ward não considera unicamente a distância entre os grupos, também considera que a distância dentro de cada grupo deve ser minimizada (WARD, 1963). Em outras palavras, o método da mínima variância de Ward calcula a distância entre os objetos ou indivíduos do grupo e o centroide deste. O centroide de um agrupamento **A** pode ser definido como a soma de todos os pontos de **A** dividido pelo número de pontos existente no agrupamento **A** (STRAUSS; von MALTITZ, 2017). O cálculo da mínima variância de Ward é definido como (RENCHER, 2002):

$$I_{AB} = \frac{n_A n_B}{n_A + n_B} (\bar{a} - \bar{b})' (\bar{a} - \bar{b})$$

em que, I_{AB} é o incremento da soma do quadrado do erro entre os grupos A e B; \bar{a} e \bar{b} representam os centroides dos grupos A e B; n_A e n_B são os números de pontos em A e B, respectivamente.

Com o objetivo de observar a importância relativa dos atributos do solo e a contribuição de cada um deles na variabilidade espacial, foi conduzida uma análise de componentes principais (PCA), cujos resultados foram apresentados em um gráfico tipo *scree plot*. As análises multivariadas foram conduzidas no software STATISTICA 7.0.

3.4.4 Análise geoestatística

Para fins de espacialização dos grupos obtidos na análise de agrupamentos, foi conduzida a análise geoestatística (Figura 4.D) com base na hipótese intrínseca e principio das variáveis regionalizadas (ISAACS; SRIVASTAVA, 1989). O semivariograma experimental foi estimado utilizando a equação 1:

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

em que, $\gamma(h)$ é a semivariância; $N(h)$ é o número de pares de pontos que estão separados pela distância h ; $z(x_i)$ valor de z na posição x_i ; e $z(x_i + h)$ valor de z na

posição $x_i + h$. A interpolação dos dados obtidos a partir do semivariograma foi realizada com a krigagem ordinária, que é estimada como:

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

em que, $\hat{z}(x_0)$ é o estimador da krigagem no ponto x_0 ; $z(x_i)$ representa o valor medido no ponto x_i ; e λ_i é o peso da krigagem atribuído aos valores $z(x_i)$ mais próximos para estimar $\hat{z}(x_0)$. A análise geoestatística foi conduzida nos softwares Surfer 9.0 e GS+.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização dos atributos do solo

A Figura 3 apresenta a distribuição dos atributos do solo em função da formação geológica. Com exceção da relação Fe_o/Fe_d , todos os demais atributos apresentaram a melhor distribuição dos pontos dentro da formação SG, sem valores atípicos (outliers). O conteúdo de argila e a suscetibilidade magnética (Figura 5.A e 5.B1 e B2) seguem um padrão de variação semelhante, devido à correlação positiva entre estes atributos ($r=0,72$; $p<0,05$).

O conteúdo de argila e a suscetibilidade magnética foram consideravelmente maiores na formação SG, apresentando valores médios de $359,6 \text{ g kg}^{-1}$ e $27,5 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}$, respectivamente. A formação VRP apresentou valores atípicos para ambos os atributos. A distribuição da SM dentro da formação Marília foi muito variável, com valores atípicos consideráveis. A formação BO, derivada de rochas areníticas, apresentou média de $195,7 \text{ g kg}^{-1}$ de argila e $18,5 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}$ para a SM. Estes valores mais altos em solos derivados de arenito podem ser explicados por englobar amostras em locais de transição arenito-basalto. Os valores de SM para as formações derivadas de basalto (SG) foram, em média, cerca de 10 vezes maiores que os valores registrados para as formações derivadas de arenito.

A argila reflete a influência que o material de origem teve sobre os solos, evidenciado pelo maior conteúdo deste atributo em solos derivados de basalto, como na formação SG. As rochas basálticas são caracterizadas pela maior presença de componentes químicos, como ferro, magnésio e cálcio, e menor conteúdo de sílica (TEIXEIRA et al., 2009), em relação às rochas areníticas. Conseqüentemente, solos provenientes de rochas basálticas apresentam maior conteúdo de argila, como resultado de seu intemperismo. Entretanto, os solos derivados de rochas areníticas, por possuírem maior conteúdo de quartzo, são mais arenosos.

O material de origem é capaz de influenciar os valores da suscetibilidade magnética, proporcionando materiais magnéticos litogênicos ou proporcionando uma matriz que favorece a neoformação (HANESCH; SCHOLGER, 2005). A SM reflete o

conteúdo de minerais ferrimagnéticos no solo (MURDOCK; WILKIE; BROWN, 2013), que são produtos do intemperismo das rochas durante a pedogênese ou adicionado ao solo por atividades humanas (KANU et al., 2014). Este atributo caracteriza-se também por ser capaz de mostrar locais onde predominam materiais de origem com maior conteúdo nestes minerais. Além disso, a suscetibilidade magnética pode auxiliar na estimativa do conteúdo de argila e outros atributos importantes em levantamentos de solos (GRISON et al., 2016; MARQUES Jr. et al., 2014; SIQUEIRA et al., 2010).

A relação $Hm/(Hm+Gt)$ foi bastante variável para todas as formações, principalmente dentro da geologia arenítica. A formação SG e VRP mostraram as maiores amplitudes para esta relação. As formações RP e SA mostraram valores atípicos para valores baixos desta relação. A relação $Ct/(Ct+Gb)$ foi menos variável, mostrando valores maiores na geologia de arenito. A formação SG mostrou a maior amplitude, e a formação VRP apresentou muitos valores atípicos.

A ocorrência destes minerais secundários está diretamente relacionada, assim como os atributos anteriores, ao tipo de material que originou o solo. Os óxidos de ferro (hematita e goethita) são considerados pedoindicadores ambientais, por serem reflexo de seus ambientes de formação, sendo que as condições que favorecem a uma são desfavoráveis à outra. A formação da hematita ver-se-á favorecida quando grandes quantidades de ferro estiverem presentes na rocha original (COSTA; BIGHAM, 2009), como no caso de rochas basálticas, característica da formação SG. A caulinita é o principal mineral em solos desenvolvidos sob condições tropicais úmidas (MELO; WYPYCH, 2009), predominando em solos derivados de rochas basálticas, sendo este um produto de seu intemperismo (BRADY; WEIL, 2011).

A relação Fe_o/Fe_d foi bastante homogênea, com algumas exceções para a formação VRP, que apresentou vários outliers (Figuras 5.C, 5.D e 5.E). A relação Fe_o/Fe_o reflete as quantidades de minerais com estruturas cristalinas e pouco cristalinas que estão presentes no solo.

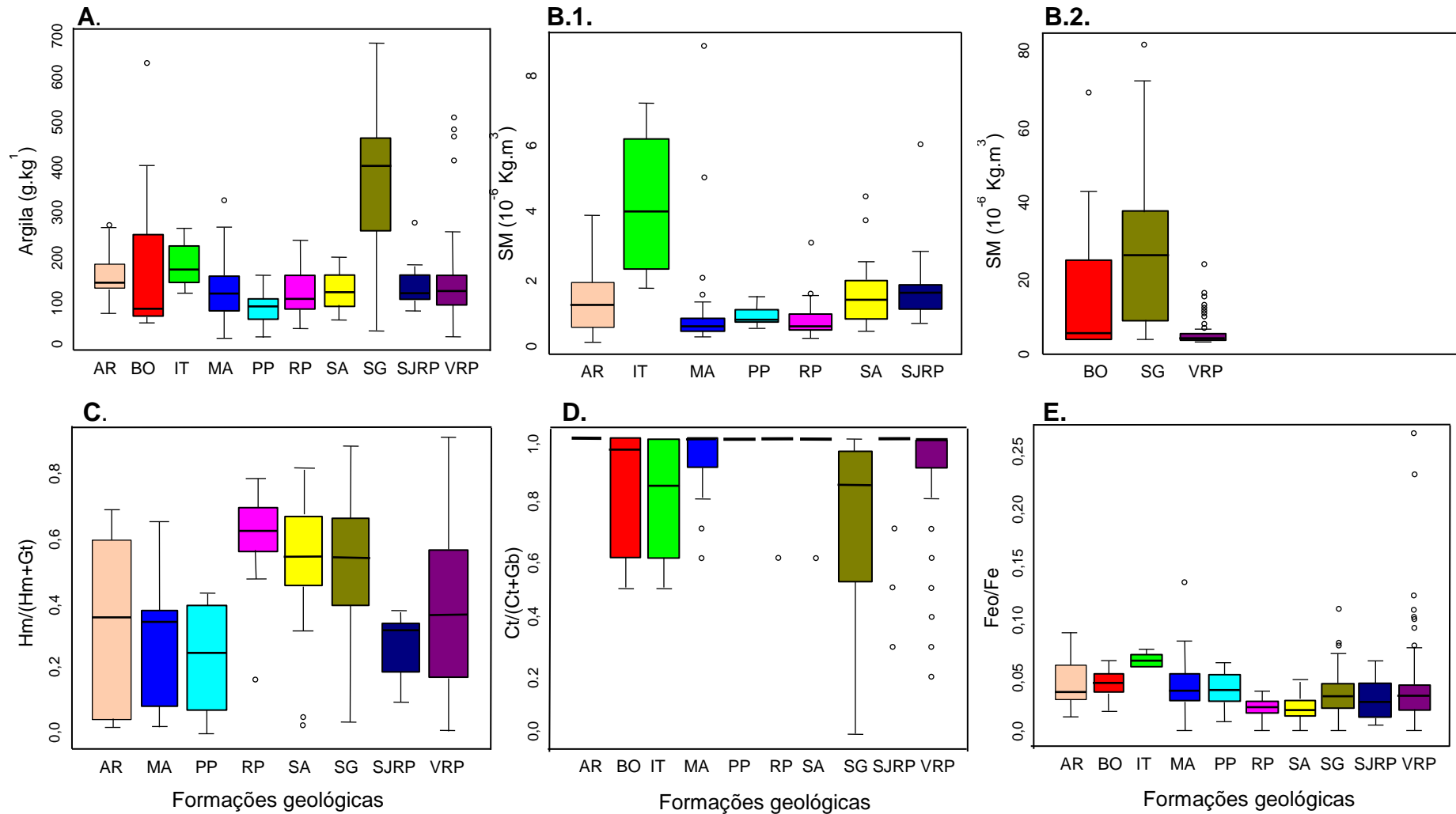


Figura 5. Médias e amplitudes de atributos do solo em função da formação geológica. Formações = AR: Araçatuba; BO: Botucatu; IT: Itaquerí; MA: Marília; PP: Presidente Prudente; RP: Rio Paraná; SA: Santo Anastácio; SG: Serra Geral; SJRP: São José do Rio Preto; VRP: Vale do Rio do Peixe. As relações Hm/(Hm+Gt), Ct/(Ct+Gb) e Feo/Fe são adimensionais.

Os atributos, quando classificados em função das classes pedológicas, também demonstram apresentar alta variação, com destaque para as altas amplitudes encontradas na classe dos Latossolos (Figura 6), apresentando alguns valores atípicos dentro da classe dos Latossolos Vermelhos distróficos (LVd) (Figura 6.A). Dentro da classe dos Argissolos, a argila apresentou-se menos variável, porém com mais presença de valores atípicos dentro das classes dos Argissolos Vermelho Amarelos eutróficos (PVAe), Argissolos Vermelho-Amarelos eutróficos abruptos (PVAea) e Argissolos Vermelhos distróficos (PVd) (Figura 6.B). Somente o Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (PVAd) apresentou uma distribuição que diferiu consideravelmente dos demais, mostrando valores de argila maiores que 200 g kg^{-1} .

O teor de argila é um atributo diagnóstico importante no sistema de classificação de solos do Brasil e em outros sistemas ao redor do mundo. A caracterização deste atributo está relacionada à direta influência que possui sobre as propriedades físicas, químicas e mineralógicas do solo (DOTTO et al., 2016). Sua importância para a caracterização dos solos e a facilidade de utilização conseguem inferir o comportamento de outros atributos. Como o teor de argila foi mais variável dentro da classe dos Latossolos, este pode estar muito relacionado com o material de origem, como foi observado na análise anterior.

A suscetibilidade magnética dentro da classe LVd e LVAd apresentou alguns valores atípicos, porém o tamanho dos boxplots foi bem pequeno, demonstrando uma concentração dos dados em torno de valores menores da SM. O LVdf foi o que apresentou a maior amplitude (Figura 6.B1). A classe PVAd apresentou a maior amplitude dentro da classe dos Argissolos, e a classe PVAe, junto com a PVAea, apresentou alguns valores atípicos. Para as demais classes a variação da SM foi bastante pequena (Figura 6.B2).

A suscetibilidade magnética caracteriza-se por ser um atributo sensível inclusive quando quantidades muito pequenas de óxidos de ferro se encontram presentes no solo (JORDANOVA, 2016) e ela tem demonstrado ser uma ferramenta útil na caracterização de solos tropicais.

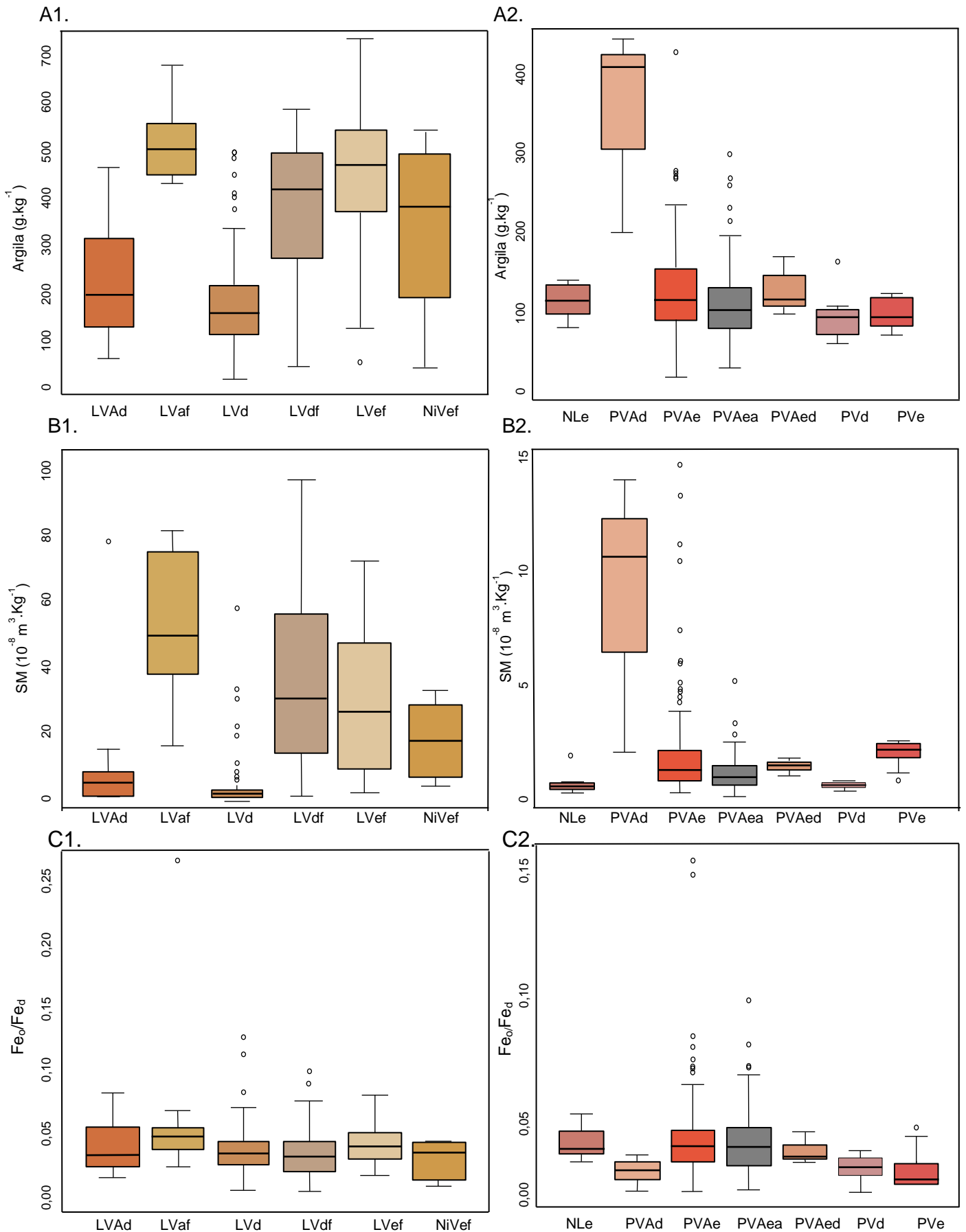


Figura 6. Boxplots para atributos do solo em função da classe de solo. SM: Suscetibilidade magnética; Fe₀: Fe oxalato; Fe_d: Ferro ditionito; LVAd: Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico; LVaf: Latossolo Vermelho acríferico; LVd: Latossolo Vermelho distrófico; LVdf: Latossolo Vermelho distroférico; LVef: Latossolo Vermelho eutroférico; NiVef: Nitossolo Vermelho eutroférico; NLe: Neossolo Litólico eutrófico; PVAd: Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico; PVAe: Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico; PVAea: Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico abruptico; PVAed: Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico-distrófico; PVd: Argissolo Vermelho distrófico; PVe: Argissolo Vermelho eutrófico.

Em estudo conduzido no Rio Grande do Sul, Ramos et al. (2017) observaram que é possível estabelecer pedoambientes a partir da utilização da SM. Hanesch e Scholger (2005) encontraram amplas diferenças nos valores de suscetibilidade magnética em diferentes tipos de solos tropicais. Pingguo Yang et al. (2016) estudaram o comportamento magnético de solos da China e concluíram que qualquer variação na SM do solo está relacionada à geologia, aos processos do solo e à contaminação industrial em escala regional.

Considerando a relação Fe_o/Fe_d , esta foi menos variável dentro da classe dos Latossolos (Figura 6.C1), com presença de alguns valores atípicos. O comportamento foi semelhante dentro da classe dos Argissolos, com valores atípicos nas classes PVAe e PVAea. Os baixos valores da relação Fe_o/Fe_d indicam maior presença de minerais bem cristalizados, com estrutura química mais bem definida. Ramos et al. (2017) mencionam que quanto mais bem cristalizados estiverem os minerais, mais intensa foi a influência dos processos pedogênicos neste ambiente.

Os atributos mineralógicos correspondentes às relações $Ct/(Ct+Gb)$ e $Hm/(Hm+Gb)$ apresentaram variações consideráveis (Figura 7). A relação $Hm/(Hm+Gt)$ foi variável para ambas as ordens (Argissolos e Latossolos), com predominância de maiores amplitudes para o PVAea e LVd (Figuras 7.A1 e 7.A2). A relação $Ct/(Ct+Gb)$ apresentou valores atípicos para ambas as ordens, sendo que, na ordem dos Latossolos, a variação foi maior, com destaque para o LVdf. A ordem PVAe foi a que apresentou maior quantidade de valores atípicos (Figuras 7.B1 e 7.B2).

Os óxidos de ferro, como a hematita e a goethita, são importantes constituintes da fração mineral do solo e possuem papel fundamental nas interações com os outros compartimentos do solo (JORDANOVA, 2016). Estes óxidos de ferro, junto com a caulinita e gibbsita, são principalmente pedogenéticos e são considerados indicadores de processos evolutivos dos solos (SILVA, 2016). Sua consideração, principalmente em solos tropicais, é de extrema importância para o delineamento de unidades de mapeamento e inclusão em níveis taxonômicos mais

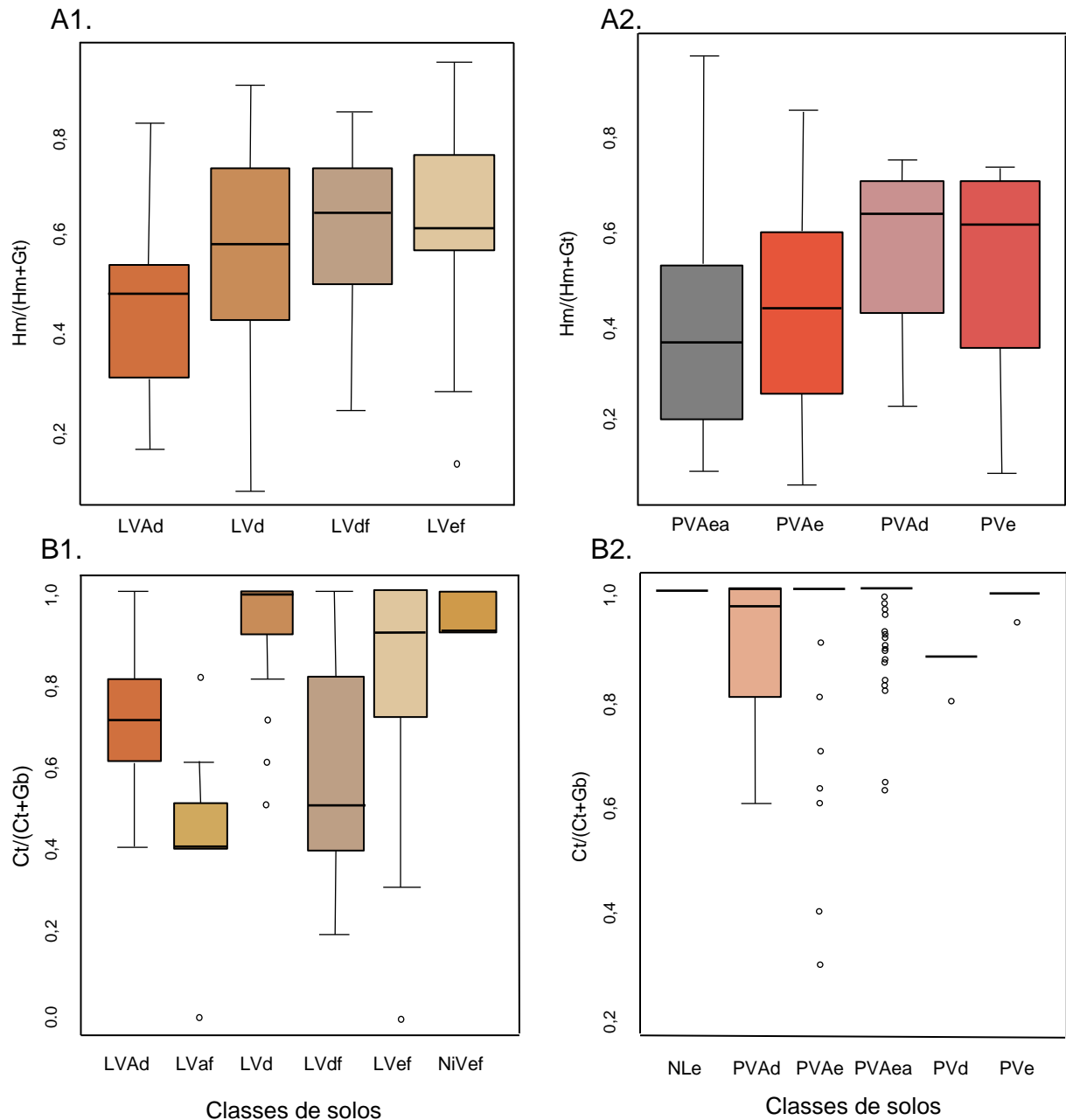


Figura 7: Boxplots para atributos do solo em função da classe de solo. Hm: Hematita; Gt: Goethita; Ct: Caulinita; Gb: Gibbsita; LVAd: Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico; LVaf: Latossolo Vermelho acriférrico; LVd: Latossolo Vermelho distrófico; LVdf: Latossolo Vermelho distroférico; LVef: Latossolo Vermelho eutrófico; NiVef: Nitossolo Vermelho eutrófico; NLe: Neossolo Litólico eutrófico; PVAd: Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico; PVAe: Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico; PVAea: Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico abrupto; PVd: Argissolo Vermelho distrófico; PVe: Argissolo Vermelho eutrófico.

baixos dos sistemas de classificação. Cabe ressaltar que tanto os óxidos de ferro como a caulinita e a gibbsita apresentam influência em questões de manejo do solo, tanto na adsorção de nutrientes, principalmente fósforo (FINK et al., 2016; CAMPOS et al., 2016) quanto na formação da estrutura dos solos (BRONIK; LAL, 2005).

Trabalhos como os de Camargo et al. (2008) mostraram que atributos mineralógicos como a gibbsita se correlacionam positivamente com os agregados do solo, ao contrário da caulinita que, por ser um mineral em placas, favorece a compactação do solo. Considerando a maior variação da relação $Ct/(Ct+Gb)$ em Latossolos, a utilização desta relação poderia ser útil no delineamento dos corpos de solos, para o estabelecimento de locais onde existe maior risco de compactação.

O estudo da variabilidade das informações concatenadas foi feito com dados de 425 pontos, devido à falta de alguns dados obtidos de Silva (2016) e Fernandes (2017). As médias para os grupos obtidos a partir da concatenação das informações auxiliares são apresentadas na Tabela 1. Quando se considera uma amostra que foi coletada dentro da mesma geologia, mesmo grau de dissecação e mesma classe de solo, com variação unicamente da forma da paisagem (i.e VRP_Id_PVAe_Cc e VRP_Id_PVAe_Cx), a variação dos atributos dentro da classe de solo pode ser observada, principalmente dentro dos Latossolos na geologia de basalto (SG). Esta maior variabilidade é observada principalmente para os atributos argila e SM. Como as classificações anteriores, a relação $Ct/(Ct+Gb)$ e Feo/Fed foi menos variável, como pode ser observado nos baixos valores do desvio-padrão da Tabela 1.

4.2 Análise de agrupamentos

Os grupos obtidos a partir da concatenação das informações poderiam ser considerados como corpos de solos, porém, como ainda a caracterização dos atributos não está incluída nesta etapa, ainda pode existir uma subjetividade associada à formação desses grupos. Por outro lado, como o mapeamento tradicional de solos apresenta alguma subjetividade, principalmente no estabelecimento dos limites das unidades de mapeamento, como demonstrado muitos anos antes por Bie e Becket (1973) e recentemente por Bazaglia Filho et al. (2013), toda a subjetividade associada aos mapas aqui utilizados não poderá ser eliminada. Portanto, com a utilização da análise de agrupamento, considerando os grupos obtidos a partir da concatenação das informações auxiliares e os atributos do solo estudados neste trabalho (Tabela 1), procura-se obter um número de grupos

Tabela 1: Médias e desvio-padrão para os atributos argila e suscetibilidade magnética em função da concatenação das informações auxiliares.

Unidades	N	SM ($10^{-6}m^3kg^{-1}$)	Argila ($g\ kg^{-1}$)	Hm/Hm+Gt	Ct/Ct+Gb	Fed/FeO
AR_Id_LVd_Cc	3	1,23±1,7	148,25±161,90	0,31±0,28	0,95±0,02	0,04±0,04
AR_Pd_LVd_Cx	1	1,12	178,00	0,65	1,00	0,03
AR_Pd_LVd_Pi	7	1,31±1,19	174,16±55,13	0,38±0,27	1,00	0,02±0,02
BO_Id_LVaf_Pi	2	76,59±21,50	628,00±159,45	0,91±0,004	0,57±0,05	0,01±0,01
DA_Ad_LVd_Cc	2	1,35±1,32	128,50±85,20	0,10±0,02	0,96±0,05	0,002±0,07
DCE_Pd_LVd_Cx	1	7,16	257,50	0,25	0,76	0,01
MA_Ad_LVAd_Pi	1	8,88	324,50	0,31	0,82	0,01
MA_Ad_LVd_Cx	2	0,78±0,24	104,00±21,23	0,45±0,01	1,00	0,04±0,02
MA_Ad_LVd_Pi	2	0,93±0,07	125,00±38,89	0,42±0,11	0,92±0,01	0,03±0,01
MA_Ad_NLe_Cx	2	0,53±0,18	120,00±20,50	0,14±0,25	0,96±0,06	0,02±0,02
MA_Ad_NLe_Pi	3	0,52±0,25	130,50±26,58	0,15±0,12	0,85±0,04	0,03±0,01
MA_Ad_PVAea_Cx	6	0,46±0,07	140,75±48,75	0,26±0,17	0,98±0,01	0,03±0,02
MA_Id_LVd_Cc	1	1,44	158,50	0,38	0,76	0,02
MA_Id_LVd_Pi	2	0,51±0,21	129,25±26,22	0,58±0,10	1,00	0,02±0,02
MA_Id_PVAd_Cc	1	1,970	192,00	0,11	0,64	0,008
PP_Id_PVAe_Cc	3	1,07±0,65	95,00±15,489	0,41±0,14	1,00	0,05±0,01
PP_Id_PVAe_Cx	7	0,60±0,15	52,50±11,26	0,44±0,05	1,00	0,02±0,001
PP_Id_PVAe_Pi	2	1,15±0,45	58,00±18,23	0,47±0,12	1,00	0,02±0,01
PP_Id_PVAea_Cx	2	0,46±0,14	84,00±25,35	0,20±0,08	1,00	0,007±0,001
RP_Id_LVd_Cx	2	0,90±0,24	199,25±98,25	0,65±0,07	1,00	0,01±0,001
RP_Id_LVd_Pi	1	0,800	108,00	0,75	1,00	0,02
RP_Id_PVd_Pi	2	0,47±0,12	94,00±24,36	0,65±0,21	1,00	0,02±0,01
RP_Pd_LVd_Cc	3	1,30±0,58	155,50±35,26	0,68±0,48	1,00	0,02±0,002

Geologia= AR: Araçatuba; BO: Botucatu; DA: Depósitos aluvionares; DCE: Depósitos colúvio-eluvionares; MA: Marília; PP: Presidente Prudente; RP: Rio Paraná. Dissecação= Ad: Alta dissecação; Id: Dissecação intermediária; Pd: Pouca dissecação; Pedologia= LVAd: Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico; LVd: Latossolo Vermelho distrófico; LVaf: Latossolo Vermelho acriférico; PVAd: Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico; PVAe: Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico; PVAea: Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico abrupto; PVd: Argissolo Vermelho distrófico; NLe: Neossolo Vermelho Litólico. Forma da paisagem= Pi: Forma plana; Cc: Forma côncava; Cx: Forma convexa.

Tabela 1: Continuação

Unidades	N	SM ($10^{-6}m^3kg^{-1}$)	Argila ($g\ kg^{-1}$)	Hm/(Hm+Gt)	Ct/(Ct+Gb)	Feo/Fed
RP_Pd_LVd_Cx	3	0,59±0,13	127,50±27,00	0,80±0,02	1,00	0,029±0,124
RP_Pd_LVd_PI	4	1,28±0,13	254,00±24,50	0,61±0,07	1,00	0,026±0,015
RP_Pd_PVd_Cc	1	0,28	98,50	0,22	1,00	0,022
RP_Pd_PVd_PI	1	0,52	101,00	0,74	1,00	0,029
SA_Ad_LVd_Cc	1	2,40	183,50	0,80	1,00	0,018
SA_Ad_PVe_Cx	2	0,91±0,18	94,00±9,00	0,09±0,008	1,00	0,042±0,025
SA_Ad_PVe_PI	1	2,19	88,00	0,69	0,61	0,008
SA_Id_LVd_Cx	1	1,27	194,00	0,56	1,00	0,033
SA_Id_PVAe_Cx	1	1,83	121,00	0,60	1,00	0,009
SA_Id_PVAe_PI	1	1,72	116,00	0,57	1,00	0,034
SA_Id_PVAea_PI	1	0,83	172,00	0,37	1,00	0,021
SA_Id_PVe_Cc	1	2,09	116,50	0,58	1,00	0,007
SA_Id_PVe_PI	1	1,92	77,00	0,69	1,00	0,007
SA_Pd_LVd_Cc	1	1,02	115,50	0,76	1,00	0,030
SA_Pd_LVd_Cx	2	1,64±0,23	139,50±36,50	0,77±0,09	1,00	0,027±0,016
SA_Pd_LVd_PI	2	0,86±0,52	129,25±19,25	0,51±0,54	1,00	0,020±0,015
SA_Pd_PVAe_Cx	1	4,37	158,00	0,83	1,00	0,013
SA_Pd_PVd_PI	1	0,63	156,50	0,61	1,00	0,012
SG_Ad_LVdf_Cc	1	25,40	361,00	0,71	0,45	0,016
SG_Ad_LVdf_PI	1	26,04	423,00	0,56	0,89	0,039
SG_Ad_LVef_PI	2	16,96±5,53	426,00±123,45	0,69±0,12	0,85±0,14	0,036±0,025
SG_Ad_PVAd_Cx	1	10,52	431,00	0,38	1,00	0,026
SG_Id_LVAd_Cc	1	5,87	267,00	0,52	0,72	0,019

Geologia= RP: Rio Paraná; SA: Santo Anastácio; SG: Serra Geral. Dissecação= Ad: Alta dissecação; Id: Dissecação intermediária; Pd: Pouca dissecação; Pedologia= LVAd: Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico; LVd: Latossolo Vermelho distrófico; LVdf: Latossolo Vermelho distroférico; LVef: Latossolo Vermelho eutrófico; PVAd: Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico; PVAe: Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico; PVAea: Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico abrupto; PVe: Argissolo Vermelho eutrófico; PVd: Argissolo Vermelho distrófico. Forma da paisagem= PI: Forma plana; Cc: Forma côncava; Cx: Forma convexa.

Tabela 1: Continuação

Unidades	N	SM ($10^{-6}m^3kg^{-1}$)	Argila ($g\ kg^{-1}$)	Hm/(Hm+Gt)	Ct/(Ct+Gb)	Feo/Fed
SG_Id_LVAd_Cx	1	0,60	136,00	0,15	0,94	0,02
SG_Id_LVd_Cc	1	58,90	463,50	0,45	0,87	0,06
SG_Id_LVd_Cx	5	1,88±1,32	204,00±86,32	0,26±0,14	1,00	0,00±0,001
SG_Id_LVd_PI	8	13,58±6,78	266,50±28,89	0,62±0,17	0,72±0,18	0,01±0,01
SG_Id_LVdf_Cc	3	19,62±2,39	420,50±38,00	0,60±0,03	0,67±0,08	0,01±0,01
SG_Id_LVdf_Cx	5	40,45±19,58	413,75±63,96	0,59±0,19	0,51±0,07	0,01±0,005
SG_Id_LVdf_PI	6	26,30±18,95	513,00±125,25	0,63±0,25	0,98±0,06	0,01±0,01
SG_Id_LVef_Cc	7	31,98±15,71	497,62±104,84	0,40±0,21	0,72±0,14	0,03±0,01
SG_Id_LVef_Cx	6	38,20±9,83	497,75±30,25	0,69±0,09	0,82±0,04	0,03±0,01
SG_Id_LVef_PI	17	27,82±20,28	422,16±132,88	0,68±0,18	0,88±0,07	0,03±0,02
SG_Pd_LVAd_Cc	1	15,77	304,00	0,46	0,59	0,01
SG_Pd_LVaf_PI	3	74,72±54,21	610,00±245,21	0,87±0,42	0,51±0,12	0,02±0,02
SG_Pd_LVd_Cx	1	2,08	125,00	0,63	1,00	0,02
SG_Pd_LVdf_Cc	1	40,47	491,50	0,68	0,47	0,03
SG_Pd_LVdf_PI	3	21,39±12,29	504,50±44,03	0,50±0,21	0,50±0,03	0,02±0,01
SJRP_Id_PVAea_Cc	1	1,49	100,00	0,15	1,00	0,01
SJRP_Id_PVAea_Cx	3	1,24±0,52	142,50±54,21	0,36±0,12	1,00	0,01±0,005
SJRP_Id_PVAea_PI	1	2,75	120,50	0,43	0,52	0,01
VRP_Ad_LVd_Cx	2	11,69±8,52	313,00±45,25	0,45±0,12	0,65±0,14	0,02±0,01
VRP_Ad_LVd_PI	3	1,09±0,03	153,50±12,52	0,30±0,19	0,85±0,12	0,02±0,01
VRP_Ad_LVef_PI	11	1,06±0,01	130,00±26,32	0,34±0,04	1,00	0,02±0,009
VRP_Ad_PVAe_Cc	3	2,38±0,52	261,50±49,58	0,13±0,01	0,85±0,02	0,03±0,01
VRP_Ad_PVAe_Cx	8	1,09±0,29	133,16±21,07	0,53±0,30	1,00	0,02±0,01

Geologia= SG: Serra Geral; SJRP: São José do Rio Preto; VRP: Vale do Rio do Peixe. Dissecação= Ad: Alta dissecação; Id: Dissecação intermediária; Pd: Pouca dissecação. Pedologia= LVAd: Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico; LVaf: Latossolo Vermelho acriférrico; LVd: Latossolo Vermelho distrófico; LVdf: Latossolo Vermelho distroférico; LVef: Latossolo Vermelho eutroférico. Forma da paisagem= PI: Forma plana; Cc: Forma côncava; Cx: Forma convexa.

Tabela 1: Continuação

Unidades	N	SM ($10^{-6}m^3kg^{-1}$)	Argila ($g kg^{-1}$)	Hm/(Hm+Gt)	Ct/(Ct+Gb)	Feo/Fed
VRP_Ad_PVAe_Pi	5	2,05±0,82	189,75±70,25	0,16±0,06	0,82±0,09	0,01±0,009
VRP_Ad_PVAea_Cc	7	1,04±0,21	148,50±15,26	0,27±0,012	1,00	0,06±0,02
VRP_Ad_PVAea_Cx	7	1,53±0,62	101,12±21,55	0,51±0,32	0,95±0,08	0,01±0,005
VRP_Ad_PVAea_Pi	7	0,94±0,11	101,00±22,1	0,38±0,19	0,92±0,06	0,02±0,01
VRP_Ad_PVe_Cx	1	2,35	112,00	0,58	1,00	0,01
VRP_Id_LVAd_Pi	1	2,14	120,50	0,80	0,96	0,02
VRP_Id_LVd_Cc	11	2,20±1,45	148,75±40,89	0,49±0,22	0,93±0,10	0,03±0,02
VRP_Id_LVd_Cx	20	3,81±3,01	175,64±48,74	0,49±0,27	0,88±0,08	0,02±0,01
VRP_Id_LVd_Pi	27	1,20±0,57	144,91±47,6	0,46±0,23	0,95±0,07	0,01±0,009
VRP_Id_LVef_Cx	1	2,01	65,00	0,55	1,00	0,01
VRP_Id_LVef_Pi	1	2,68	117,50	0,56	0,64	0,02
VRP_Id_PVAe_Cc	26	1,61±0,58	66,00±19,23	0,52±0,12	1,00	0,008±0,003
VRP_Id_PVAe_Cx	39	2,07±1,63	123,12±43,30	0,45±0,18	0,86±0,13	0,02±0,01
VRP_Id_PVAe_Pi	13	3,21±3,06	154,95±96,54	0,40±0,18	0,92±0,18	0,02±0,01
VRP_Id_PVAea_Cc	14	1,01±0,40	106,90±30,56	0,25±0,17	0,97±0,05	0,03±0,01
VRP_Id_PVAea_Cx	20	1,14±0,17	107,83±52,10	0,49±0,20	0,97±0,04	0,02±0,01
VRP_Id_PVAea_Pi	2	1,26±0,35	126,21±40,75	0,25±0,13	0,97±0,03	0,03±0,003
VRP_Id_PVe_Cc	1	2,49	115,00	0,72	1,00	0,009
VRP_Id_PVe_Pi	4	2,06±0,98	71,00±20,59	0,62±0,12	1,00	0,01±0,009
VRP_Pd_LVd_Cx	8	1,42±0,26	88,50±27,50	0,59±0,14	1,00	0,02±0,01
VRP_Pd_LVd_Pi	4	1,12±0,89	100,50±50,26	0,80±0,52	1,00	0,03±0,005
VRP_Pd_PVAe_Pi	1	1,13	96,50	0,26	1,00	0,03
VRP_Pd_PVAea_Cc	2	1,38±0,21	84,00±12,45	0,78±0,24	1,00	0,01±0,005
VRP_Pd_PVAea_Pi	15	0,92±0,33	100,87±12,79	0,52±0,16	0,78±0,21	0,03±0,02

Geologia= SG: Serra Geral; SJRP: São José do Rio Preto; VRP: Vale do Rio do Peixe. Dissecação= Ad: Alta dissecação; Id: Dissecação intermediária; Pd: Pouca dissecação. Pedologia= LVAd: Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico; LVaf: Latossolo Vermelho acriférrico; LVd: Latossolo Vermelho distrófico; LVdf: Latossolo Vermelho distroférrico; LVef: Latossolo Vermelho eutroférrico. Forma da paisagem= Pi: Forma plana; Cc: Forma côncava; Cx: Forma convexa.

que possa representar a variação da área e, conseqüentemente, o delineamento desses corpos de solos.

A análise de agrupamentos resultou na formação de 11 grupos (Figura 9), aqui denominados como corpos de solos. Os grupos obtidos, caracterizados pela maior ou menor distância euclidiana, dão a ideia de quanto os indivíduos são similares ou comparáveis entre si (HAN et al., 2012). Quanto maior a distância entre os indivíduos, mais estes diferem entre si. Ramos et al. (2017) mencionam que a utilização de modelos matemáticos para o estabelecimento de um protocolo de mapeamento, como a análise de agrupamentos, pode reduzir consideravelmente o erro interno associado às unidades de mapeamento definidas, pois os fatores e os processos de formação do solo são mais homogêneos dentro do grupo do que entre os compartimentos. Assim, partindo da premissa de que a análise de agrupamento é capaz de mostrar a estrutura de um conjunto de dados, o protocolo proposto caracteriza-se por considerar uma metodologia matemática, tentando diminuir, pelo menos em parte, a subjetividade comum aos levantamentos tradicionais de solos quando as unidades de mapeamento devem ser delineadas.

Na medida em que a distância euclidiana é menor, maior quantidade de grupos poderá ser obtida. Numa primeira análise, feita para cada informação auxiliar ressalta-se a definição de dois grandes grupos, separando claramente as unidades que pertencem à geologia de basalto e à geologia de arenito, com uma distância euclidiana de 40 (Figura 8.A). Diminuindo a distância euclidiana para 30 encontra-se a formação de três grandes grupos, que estariam relacionados à caracterização das unidades de dissecação da paisagem (pouco dissecado, intermediária dissecação e alta dissecação) (Figura 8.B). Na medida em que menores distâncias euclidianas são consideradas, estas podem ter relação com as demais informações auxiliares utilizadas, como pedologia (distância euclidiana de 10) e formas da paisagem (distância euclidiana de 6) (Figuras 8.C e 8.D).

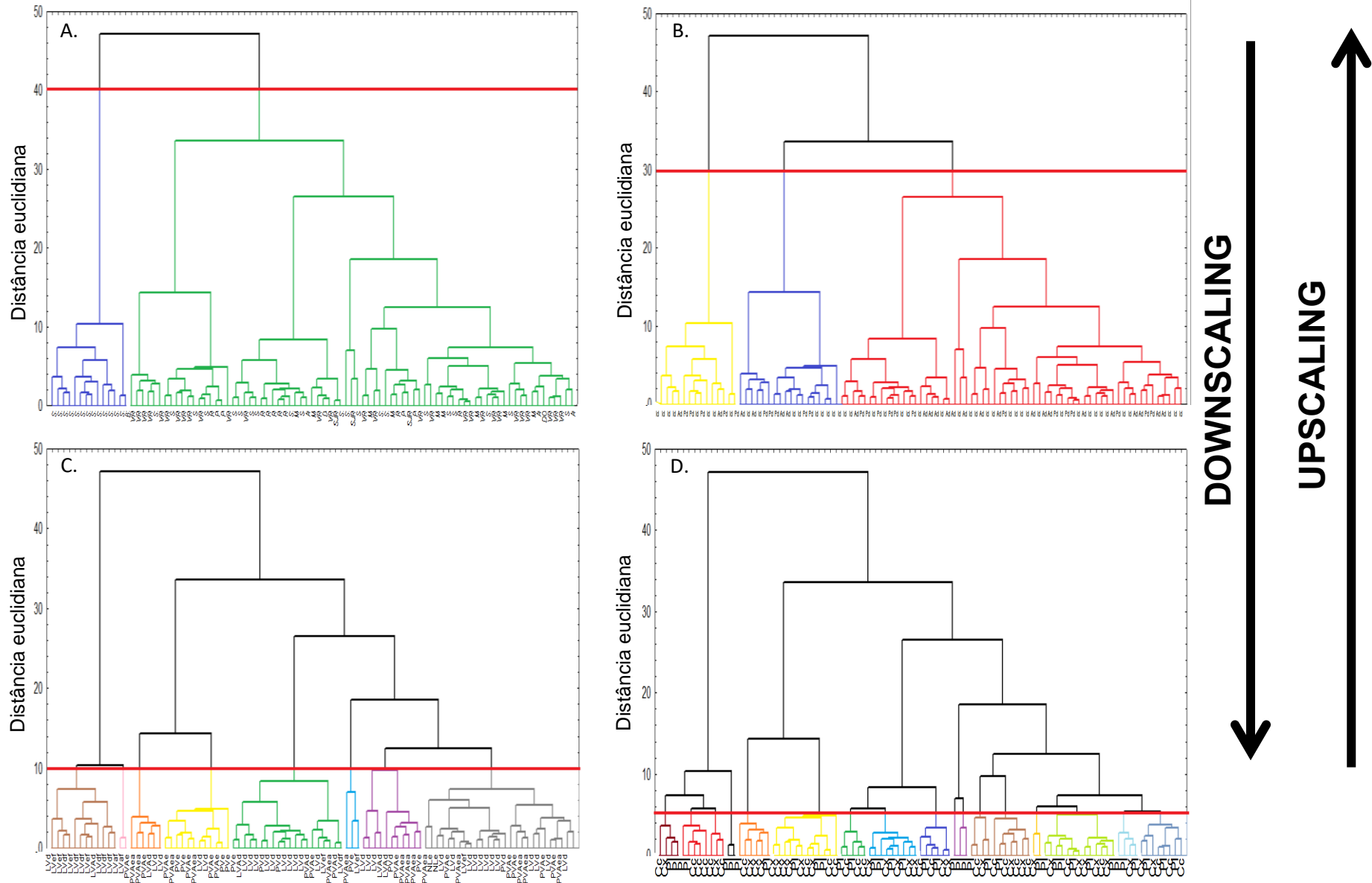


Figura 8. Dendrogramas para cada uma das informações auxiliares. A. Geologia; B. Dissecção; C. Pedologia; D. Forma da paisagem.

Os agrupamentos são úteis para proporcionar uma visão geral da estrutura dos dados e são capazes de auxiliar, mostrando a influência que cada informação tem na formação dos grupos, principalmente da geologia e da forma da paisagem seguindo os princípios de “downscaling” e “upscaling”, respectivamente. O primeiro caso permite a previsão de uma resolução espacial mais fina do que a imagem de entrada, supondo ou reconhecendo o caráter da variação espacial (ATKINSON, 2013). Isto poderia ser reconhecido para o mapa da geologia, que claramente define a variação espacial das classes de solo. Porém, ainda é uma tarefa desafiadora o detalhamento de mapas a partir de mapas de pequena escala (ROUDIER et al., 2017). No segundo caso, “upscaling”, encontra-se muito relacionada a ideia de diminuir a resolução espacial (ATKINSON; TATE, 2000) ou no presente estudo, partindo de informações mais detalhadas que explicam os padrões de variabilidade de mapas menos detalhados.

A utilização da geologia como informação auxiliar no delineamento das unidades tem sido bastante importante, estando os padrões de variabilidade observados muito relacionados à geologia da área. Assim, o delineamento de unidades para áreas extensas parece ser responsivo à utilização deste tipo de informação.

No entanto, apesar da influência dos compartimentos geomórficos no delineamento dos corpos de solos, estes são pouco úteis quando são considerados separadamente e quando grandes áreas são estudadas, como o caso aqui apresentado, em que a geologia apresentou maior influência. Para áreas pequenas, a consideração do relevo no delineamento dos corpos de solos é muito importante. Cunha et al. (2005), estudando as relações solo-paisagem em uma transição arenítico-basáltica no Planalto Ocidental Paulista, ressaltaram a importância de considerar as superfícies geomórficas no delineamento de corpos de solos. Arruda et al. (2013) também estudaram as superfícies geomórficas e os atributos do terreno como a declividade, para delinear corpos de solos e obtiveram resultados semelhantes aos descritos por Cunha et al. (2005).

Outros autores tentaram definir unidades de mapeamento a partir da utilização da análise de agrupamentos. Arkley (1976) detalhou os passos a seguir na

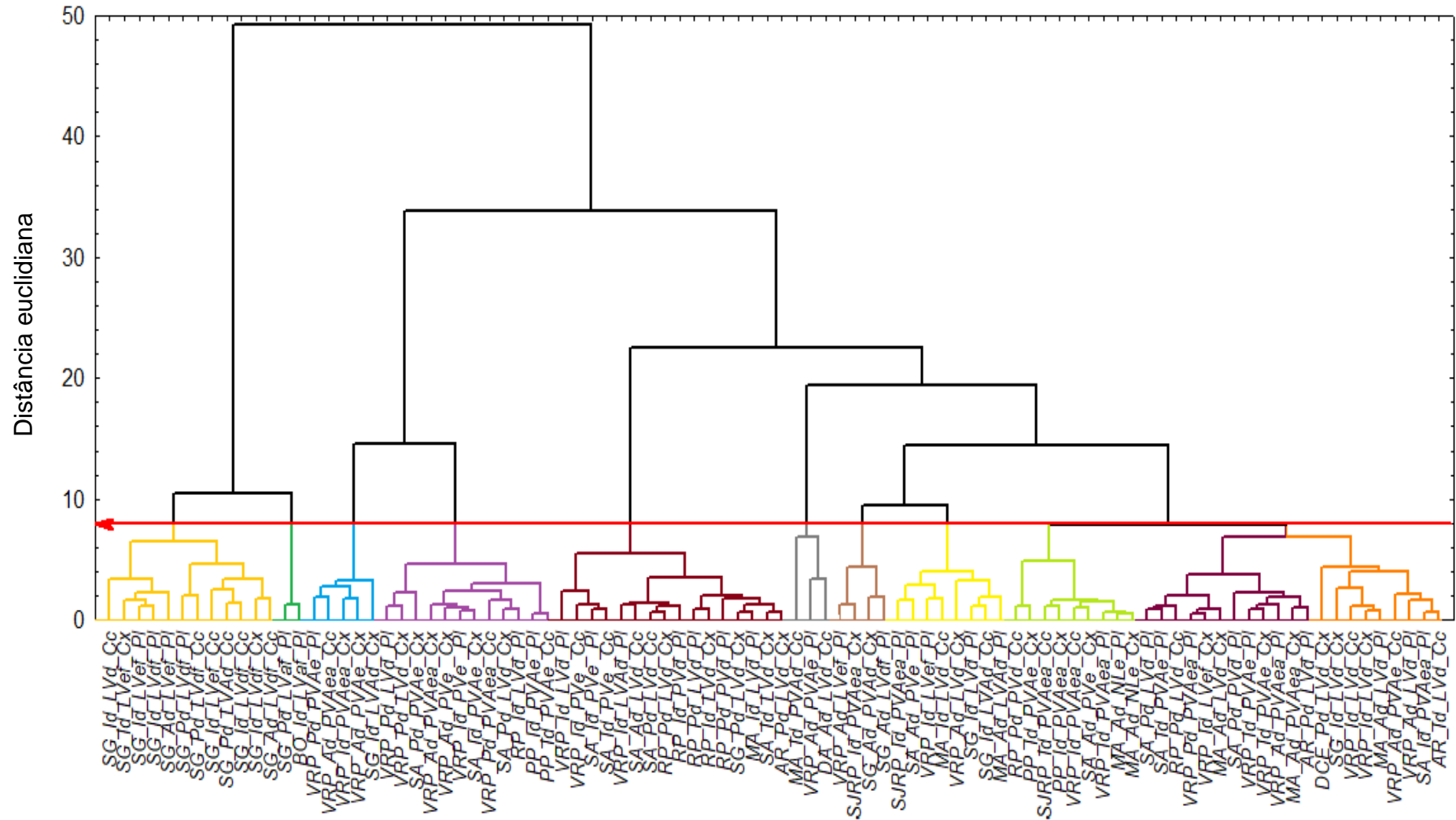


Figura 9. Dendrograma para a concatenação das informações secundárias. Formações geológicas=AR: Araçatuba; SA: Santo Anastácio; SG: Serra Geral; VRP: Vale do Rio do Peixe; BO: Botucatu; MA: Marília; SJRP: São José do Rio Preto; PP: Presidente Prudente; RP: Rio Paraná. Dissecação=Id: Intermediária dissecação; Ad: Alta dissecação; Pd: Pouca dissecação. Pedologia: LVd: Latossolo Vermelho distrófico, LVaf: Latossolo Vermelho acriférrico, LVef: Latossolo Vermelho eutrófico, LVdf: Latossolo Vermelho distroférrico; LVAd: Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico; PVAe: Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico; PVAea: Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico; PVe: Argissolo Vermelho eutrófico; PVAd: Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico; PVd: Argissolo Vermelho distrófico. Forma da paisagem=Cc: Côncava; Cx: Convexa; Pi: Plana.

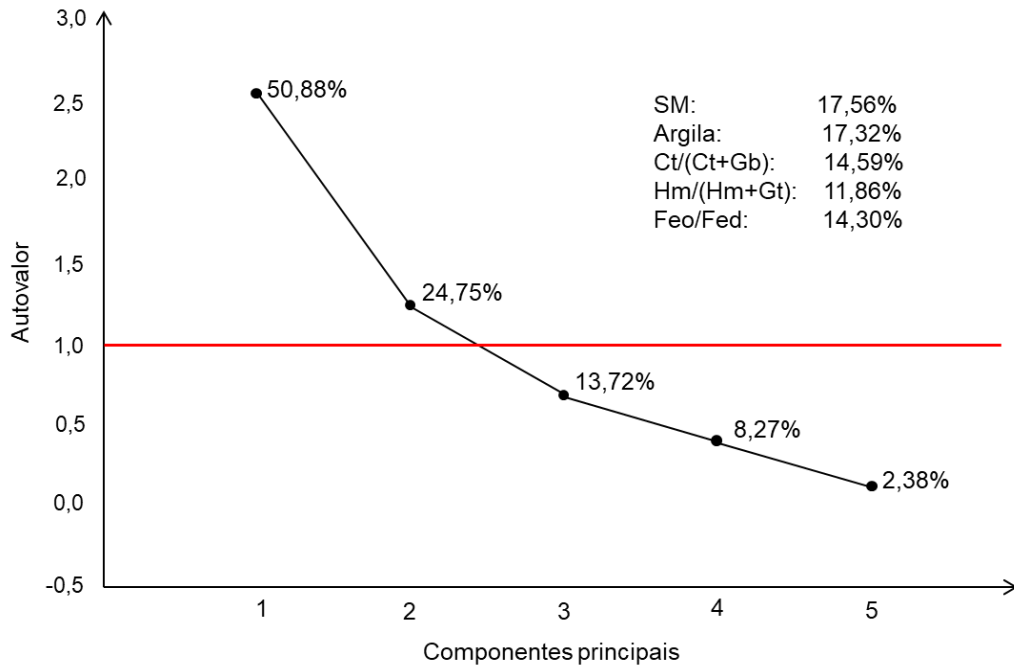


Figura 10. Contribuição relativa dos atributos do solo para os dois primeiros componentes principais.

análise de agrupamentos para definir grupos de solos e demonstrou isto através de vários exemplos com dados de solos. Campbell et al. (1970) observam que o uso da classificação numérica, que inclui a análise de agrupamento, pode evitar esquemas de classificação baseados em subdivisões lógicas ou chaves de classificação pela aplicação de procedimentos numéricos objetivos para avaliar a similaridade e a identificação subsequente de grupos de solos. Eles também comprovaram, por essa metodologia, como alguns atributos, a exemplo da textura, são importantes como atributos diagnósticos.

Em estudo conduzido nos E.E.U.U, Young e Hammer (2000) compararam as unidades obtidas a partir da classificação do *Soil Taxonomy* e aquelas unidades ou grupos obtidos a partir da análise de agrupamentos. Eles concluíram que a análise de agrupamentos é uma metodologia promissora para avaliar as relações entre o solo e os atributos da paisagem, tanto para uso de forma interpretativa como para fins de classificação. Han et al. (2011) utilizaram a análise de agrupamento para classificar solos da China, porém, ao invés de utilizarem atributos convencionais, eles utilizaram metais pesados como variáveis e conseguiram distinguir, com precisão, os dois tipos de solos existentes na área.

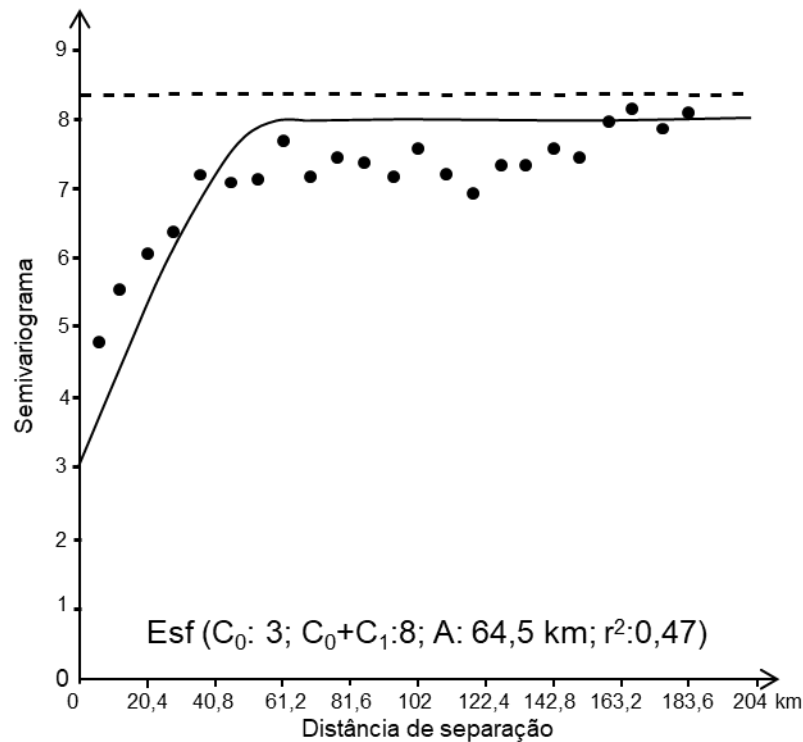


Figura 11. Semivariograma ajustado para o conjunto de dados concatenados. Esf: modelo esférico, C₀: efeito pepita, C₀+C₁: patamar; A: alcance.

A análise de componentes principais revelou a influência que cada atributo do solo estudado tem na variabilidade espacial (Figura 10). Foram consideradas as duas componentes principais, seguindo o critério estabelecido por Kaiser (1958), que menciona que somente as componentes com autovalores maiores que 1 são importantes na análise por possuírem informação relevante das variáveis originais. As primeiras duas componentes principais, explicaram 75,63% da variância total dos dados, com destaque para a suscetibilidade magnética e o conteúdo de argila, ambas com uma contribuição de pouco mais de 17%. Em alguns estudos conduzidos no POP, Siqueira et al. (2010) observaram que a suscetibilidade magnética foi o atributo que teve uma porcentagem maior de contribuição (25,5%), seguido do conteúdo de hematita (24,5%). Por outro lado, Silva (2016) descreve que somente 9,49% da variação foram explicadas pela suscetibilidade magnética.

4.3 Análise geoestatística

Os 11 grupos obtidos a partir da análise de agrupamentos, considerando a distância euclidiana de 08 (oito), foram submetidos à análise geoestatística, para

observar a distribuição destes grupos na área de estudo. Como os dados de entrada são qualitativos, as unidades foram nomeadas com algarismos (número de 1 a 11) para facilitar a análise. O semivariograma foi ajustado ao modelo esférico e observou-se o alcance de 64,5 km (Figura 11). O valor de alcance obtido reflete a distância até a qual os corpos de solos têm uma informação em comum ou apresentam descontinuidade no espaço.

O mapa mostra maior fragmentação na parte sudeste da área (Figura 12) onde predominam os basaltos. Esta maior fragmentação (ou variabilidade) dos corpos de solos em geologia de basalto, está em concordância com os resultados observados anteriormente, em que a maioria dos atributos mostrou maior variabilidade dentro da formação SG (derivada de basaltos).

Ressalta-se que o estudo da variabilidade dos atributos foi realizado até à profundidade de 20 cm, que corresponde ao estudo da variabilidade horizontal da área. O alcance obtido a partir da análise geoestatística pode auxiliar na determinação da separação dos locais de abertura de trincheiras no levantamento de solos dentro de cada unidade delineada. Para descrever cada corpo de solo obtido a partir da análise de agrupamentos, a Tabela 2 mostra as médias e os

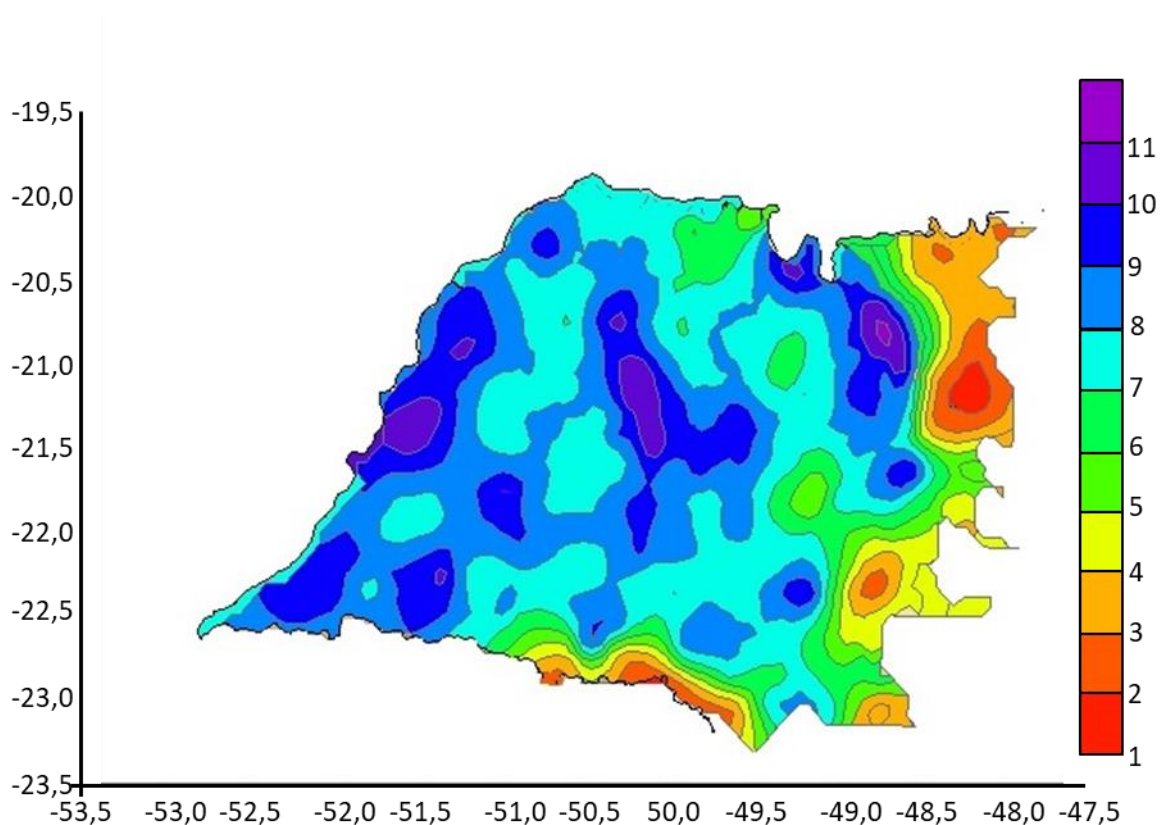


Figura 12. Proposta de corpos de solos com base no modelo híbrido multivariado.

desvios para cada um dos atributos do solo estudados.

As unidades 1 e 2 apresentam o basalto como geologia predominante, e a unidade 4 mostra uma transição arenito-basalto. Os valores médios dos atributos, principalmente argila e SM, foram os maiores para estas unidades, com valores acima de 250 g kg^{-1} . A unidade 2 foi a que apresentou o maior desvio-padrão para SM e argila. A relação Fe_o/Fe_d nestas unidades foi bastante homogênea. A relação $\text{Hm}/(\text{Hm}+\text{Gt})$ apresentou valores que não foram muito diferentes das demais unidades sobre geologia de arenito. A relação $\text{Ct}/(\text{Ct}+\text{Gb})$ foi menor nestas unidades que nas demais sobre geologia de arenito, porém os desvios foram maiores. Estas unidades (1, 2 e 4) representam apenas 8% da área e apresentam predominância de Latossolos.

Dentro das unidades que se encontram predominantemente sobre geologia de arenito, os valores médios dos atributos do solo foram bastante homogêneos. Para a SM, os valores médios não foram maiores do que $2,51 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$, seguido também de desvios baixos, com exceção das unidades 5 e 8, cujos desvios foram muito mais altos, inclusive maiores que os valores médios para estas unidades.

A relação Fe_o/Fe_d não mostrou muita variação para todas as unidades estudadas dentro da geologia de arenito. A argila mostrou valores menores de 200 g kg^{-1} e com alguns desvios altos, como o caso das unidades 3; 5; 8 e 11.

Dentre os atributos mineralógicos, a relação $\text{Hm}/(\text{Hm}+\text{Gt})$ apresentou desvios altos, com alguns valores superiores a 0,20. Na relação $\text{Ct}/(\text{Ct}+\text{Gb})$, observaram-se os maiores valores médios, em comparação com as unidades sobre geologia de basalto. No entanto, este atributo mostra desvios muito baixos. As unidades sobre geologia de arenito ocupam a maior porcentagem da área total. As unidades 7; 8 e 9 foram as que apresentaram maior área de ocupação, com predominância de Argissolos. Todas as demais unidades apresentam predominância de Latossolos.

Com o detalhamento e o conhecimento da variação dos atributos do solo, foi possível estabelecer os limites destes corpos de solos. Muitos dos trabalhos, tanto no passado como na atualidade, ainda não levam em consideração o estudo da variabilidade dos atributos do solo, que são um reflexo dos processos e dos fatores

Tabela 2. Médias e desvio-padrão para cada um dos corpos de solos delineados.

Corpos de solos	Geologia predominante	Classe predominante	Área (%)	SM ($10^{-6} \text{m}^3 \text{Kg}^{-1}$)	Feo/Fed	Argila (g.kg^{-1})	Hm/(Hm+Gt)	Ct/(Ct+Gb)
Corpo 1	Basalto	LVd	0,50	34,74±22,49	0,03±0,02	420,49±128,27	0,60±0,20	0,71±0,23
Corpo 2	Basalto	LVdf	2,64	30,66±34,19	0,04±0,01	303,37±263,66	0,44±0,02	0,73±0,28
Corpo 3	Arenito	LVdf	5,39	1,75±0,83	0,02±0,02	155,57±67,68	0,14±0,06	0,89±0,15
Corpo 4	Arenito-Basalto	LVef	4,95	6,27±9,6	0,03±0,01	251,29±173,06	0,42±0,10	0,97±0,04
Corpo 5	Arenito	LVd	5,21	2,81±4,51	0,04±0,10	169,80±86,14	0,46±0,21	0,89±0,14
Corpo 6	Arenito	LVd	8,31	1,05±0,74	0,03±0,02	112,40±55,68	0,22±0,14	0,98±0,03
Corpo 7	Arenito	PVAe	28,21	1,67±1,74	0,07±0,02	121,69±60,48	0,44±0,20	0,96±0,11
Corpo 8	Arenito	PVAe	27,46	2,35±6,31	0,02±0,01	147,98±74,19	0,67±0,10	0,97±0,07
Corpo 9	Arenito	PVAea	14,22	1,25±1,10	0,03±0,02	124,06±53,67	0,41±0,30	0,97±0,08
Corpo 10	Arenito	LVd	2,98	1,47±1,46	0,02±0,01	118,61±45,43	0,66±0,19	0,96±0,10
Corpo 11	Arenito	LVd	0,12	2,27±2,00	0,03±0,01	146,92±76,11	0,47±0,26	0,90±0,14

SM: suscetibilidade magnética; Fe_o: Ferro oxalato; Fe_d: Ferro ditionito; Hm: Hematita; Gt: Goethita; Ct: Caulinita; Gb: Gibbsita; LVd: Latossolo Vermelho distrófico; LVdf: Latossolo Vermelho distroférico; LVef: Latossolo Vermelho eutroférico; PVAe: Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico; PVAea: Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico abrupto.

que aconteceram há milhões de anos e que deram lugar à formação do solo.

Alguns esforços para estudar primeiro a variabilidade dos atributos e depois considerar as classes já foram conduzidos no século XVIII (MINASNY; McBRATNEY, 2015), ideia que teve pouca repercussão na época. Porém, nos anos recentes, alguns autores têm enfatizado a importância do estudo desta variabilidade para o delineamento dos corpos de solos. Da Silva et al. (2014) utilizaram a variabilidade dos atributos do solo e a simulação estocástica geoestatística junto com técnicas multivariadas para estabelecer um novo enfoque para classificar solos do Estado de São Paulo. Da Silva et al. (2013) estudaram a variabilidade espacial de três atributos diagnósticos principais (argila, cor do solo e saturação por bases) por meio da geoestatística, que foram sobrepostos para descrever os solos principais que ocorrem na área.

Como observado ao longo deste trabalho, o estudo da variabilidade dos atributos, junto com as informações auxiliares, tem sido útil na definição e delineamento dos corpos de solos, observando onde as maiores fragmentações acontecem, como descritas para as unidades que acontecem sobre geologia de basalto, dando como resultado maior número de corpos de solos nesta geologia.

Para fins de demonstração, algumas informações da base de dados internacional **Soil Grids** foram coletadas até à profundidade de 2,00 m. O teor de argila foi o atributo utilizado para observar a variação vertical dentro de cada corpo de solo delineado. Na Figura 13, são apresentadas as variações verticais para os três principais corpos de solos que são mais extensos dentro da área (corpos 7; 8 e 9) que, em conjunto, abarcam quase 70% do Planalto Ocidental Paulista. Para cada corpo, foram utilizados dez pontos amostrais que foram escolhidos aleatoriamente. Para os demais corpos delineados, a variação vertical detalha-se na Figura 1 do Apêndice.

A média geral da variação vertical desses corpos para este atributo foi de 9 a 11%, sendo o corpo de solo número nove o que apresentou a menor variação vertical. Porém, dentro deste corpo de solo, houve um ponto que apresentou variação vertical de quase 20%. Grauer-Gray e Hartemink (2018), estudando a varia-

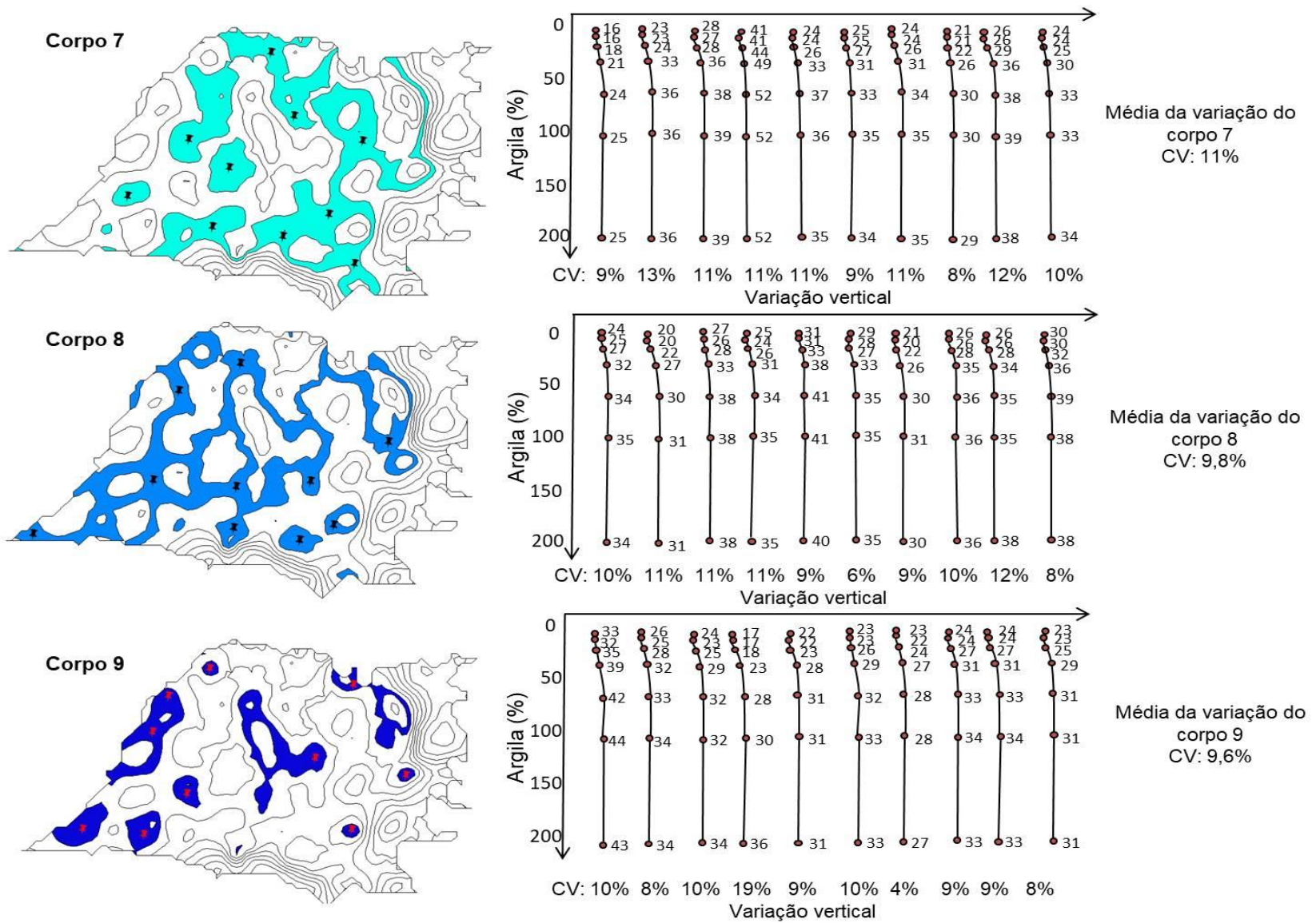


Figura 13. Variação vertical da argila em três corpos de solos do Planalto Ocidental Paulista. Dados obtidos da base de dados de solos internacional **SoilGrids**. Os pontos em preto e vermelho dentro dos mapas indicam os pontos onde foram extraídas as informações da argila.

ção vertical e lateral de perfis nos EUA, descreveram variação vertical de baixa a média (<20%) para as partículas do solo.

Estes resultados demonstram que, dentro da área, em alguns casos, sua variação vertical é pequena, sendo que esta variação pode ser associada ao erro a que irá incorrer o mapeador na descrição dos corpos de solos delineados a partir do protocolo aqui proposto.

Esta proposta segue a linha de trabalho de outras pesquisas dentro do Planalto Ocidental Paulista e pode orientar futuros trabalhos, indicando os possíveis locais para aberturas de trincheiras dentro da área ou para áreas com condições geoclimáticas similares, que irão auxiliar nos levantamentos posteriores de solos.

5. CONCLUSÕES

O protocolo híbrido integrando modelagem multivariada e geoestatística de dados legados da geologia, dissecação da paisagem e formas do relevo foi eficaz no mapeamento de solos do Planalto Ocidental Paulista.

O uso de informações da mineralogia do solo, expressas pela assinatura magnética, contribuiu para o desenvolvimento do protocolo de mapeamento dos solos e diferentes ambientes pedogenéticos.

Futuros trabalhos de mapeamento ou identificação de ambientes pedogenéticos em regiões geoclimáticas similares, podem utilizar as informações desta proposta para orientar planejamento de trincheiras pedológicas e escolha do atributo sensível as variações dos fatores e processos de formação em ambiente tropical.

6. LITERATURA CONSULTADA

ARKLEY, R. J. Factor analysis and numerical taxonomy of soils. **Proceedings of the Soil Science Society of America**, v. 35, p. 312-315, 1971.

ARKLEY, R. J. Statistical methods in soil classification reseach. **Advances in Agronomy**, v. 28, p. 37–70, 1976.

ARNOLD, R. W.; WILDING, L. P. **The need to quantify spatial variability. In: Spatial Variabilities of soils and landforms.** In: SSSA Special Publications 28. MAUSBACH, M. J.; WILDING, P. (Ed.). Madison: SSSA, 1991. p. 1-8.

ARNOLD, R. W. Soil survey and soil classification. In: **Environmental soil-landscape modeling: geographic information technologies and pedometrics.** Grunwald, S. (Ed.). p. 37-60, 2005.

ARRUDA, G. P. 2012. **Estratégias de mapeamento digital de solos por redes neurais artificias baseadas na relação solo-paisagem.** 2012, 104f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2012.

ARRUDA, G. P. DE; DEMATTÊ, J. A. M.; CHAGAS, C. D. S. Mapeamento Digital de solos por redes neurais artificias com base na relação solo-paisagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 327–338, 2013.

ATKINSON, P. M.; TATE, N. J. Spatial Scale Problems and Geostatistical Solutions: A Review*. **Professional Geographer**, v. 52, n. 4, p. 607–623, 2000.

ATKINSON, P. M. Downscaling in remote sensing. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, n. 22, p. 16–114, 2013.

BAZAGLIA FILHO, O.; RIZZO, R; LEPSCH, I. F.; GOMES, F. H.; MAZZA, J. A.; DEMATTE, J. A. M. Comparison between detailed digital and conventional soil maps of an area with complex geology. **Revista Brasileira de Ciência do Solo do Solo**, v. 37, n. 2, p. 1136–1148, 2013.

BIE, S. W.; BECKETT, P. H. T. Comparison of four independent soil surveys by air-photo interpretation, Paphos Area (CYPRUS). **Photogrammetria**, v. 29, p. 189–202, 1973.

BOCKHEIM, J. G.; GENNADIYEV, A. N. The role of soil-forming processes in the definition of taxa in Soil Taxonomy and the World Soil Reference Base. **Geoderma**, v. 95, n. 1–2, p. 53–72, 2000.

BOCKHEIM, J. G.; GENNADIYEV, A. N.; HAMMER, R. D.; TANDARICH, J. P. Historical development of key concepts in pedology. **Geoderma**, v. 124, n. 1–2, p. 23–36, 2005.

- BRADY, N.; WEIL, R. **Elementos da natureza e propriedades do solo**. Traduc. Igo Fernando Lespch. 3 ed. Porto Alegre: BOOKMAN, 2013, 686p.
- BREVIK, E. C.; CALZOLARI, C.; MILLER, B. A.; PEREIRA, P.; KABALA, C.; BAUMGARTEN, A.; JORDAN, A. Soil mapping, classification, and pedologic modeling: History and future directions. **Geoderma**, v. 264, p. 256–274, 2016.
- BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: A review. **Geoderma**, v. 124, n. 1–2, p. 3–22, 2005.
- BUI, E. N.; CORNER, R. J. Extracting soil-landscape rules from previous soil surveys. **Australian Journal of Soil Research**, n. 37, p. 495–508, 1999.
- BUI, E. N. Soil survey as a knowledge system. **Geoderma**, n. 120, p. 17–26, 2004.
- BUI, L. V.; STAHR, K.; CLEMENS, G. A fuzzy logic slope-form system for predictive soil mapping of a landscape-scale area with strong relief conditions. **Catena**, v. 155, p. 135–146, 2017.
- BUOL, S. W.; SOUTHARD, R. J.; GRAHAM, R. C.; McDANIEL, P. A. **Soil Genesis and classification**. Iowa: Iowa State University, 1997. 527 p.
- CAMARGO, L. A.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, D. S.; 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**, v. 32, n. 4, p. 2269–2277, 2008.
- CAMPBELL, N.; MULCAHY, M.; MCARTHUR, W. Numerical classification of soil profiles on the basis of field morphological properties. **Australian Journal of Soil Research**, v. 8, n. 1, p. 43, 1970.
- CAMPBELL, J. B. Spatial variation of sand content and pH within single contiguous delineations of two soil mapping units. **Soil Science Society of America Journal**, v. 42, n. 3, p. 460, 1977
- CAMPOS, M. C. C.; CARDOZO, N. P.; MARQUES JÚNIOR, J. Modelos de paisagem e sua utilização em levantamentos pedológicos. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 6, n. 1, p. 104–114, 2006.
- CAMPOS, M.; ANTONANGELO, J. A.; ALLEONI, L. R. F. Phosphorus sorption index in humid tropical soils. **Soil and Tillage Research**, v. 156, p. 110–118, 2016.
- CARNEIRO, M. A. C.; DE SOUZA, E. D.; DOS REIS, E. F.; PEREIRA, H. S.; DE AZEVEDO, W. R. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 1, p. 147–157, 2009.
- CARVALHO JÚNIOR, W.; LAGACHERIE, P.; CHAGAS, C. S.; CALDERANO FILHO, B.; BHERING, S. B. A regional-scale assessment of digital mapping of soil attributes in a tropical hillslope environment. **Geoderma**, v. 232–234, p. 479–486, 2014.

COELHO, A. M. Agricultura de precisão: manejo da variabilidade espacial e temporal dos solos e das culturas. **Documentos** 46, v. 3, p. 60, 2005.

COOK, S.; CORNER, R. J. ; GROVES, P. R.; GREALISH, G. J. Use of airborne gamma radiometric data for soil mapping. **Australian Journal of Soil Research**, v. 34, n. 1, p. 183-194, 1996.

COSTA, A. C. S.; BIGHAM, J. M.; RHOTON, F. E.; TRAINA, S. J. Quantification and characterization of maghemite in soils derived from volcanic rocks in southern Brazil. **Clays and Clay Minerals**, Aurora, v. 47, n. 4, p. 466-473, 1999.

COSTA, A.C.S, BIGHAM, J.M. **Óxidos de ferro**. In: Melo, V. F.; Alleoni, L. R. F. (Eds.). Química e Mineralogia do Solo. Parte I: Conceitos Básicos. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, 2009, pp.505-572.

CUNHA, P.; MARQUES JÚNIOR, J.; CURI, NILTON; PEREIRA, G. T.; LEPSCH, I. F. Superfícies geomórficas e atributos de Latossolos em uma sequencia arenítico-basáltica da região de Jaboticabal (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 2, p. 81–90, 2005.

DA SILVA, A. F.; HALMEMAN, R. J.; ZIMBACK, C. R. L. Dependência espacial de atributos diagnósticos para delimitação de classes de solos. **Geociências**, v. 32, n. 1, p. 93–100, 2013.

DA SILVA, A. F.; PEREIRA, M. J.; CARNEIRO, J. D.; ZIMBACK, C. R. L.; LANDIM, P. M. B.; SOARES, A. A new approach to soil classification mapping based on the spatial distribution of soil properties. **Geoderma**, v. 219–220, p. 106–116, 2014.

DANIELS, R. B.; GAMBLE, E. F.; CADY, J. G. The relation between geomorphology and soil morphology and genesis. **Advances in Agronomy**, Baltimore, v. 23, n. 1, p. 51-87, 1971.

DALRYMPLE, J.B., BLONG, R.J., CONACHER, A.J., 1968. A hypothetical nine unit land a surface model. **Z. Geomorphol.** 12, 60–76.

DEMATTÊ, J. A. M.; ALVES, M. R.; GALLO, B. C.; FONGARO, C. T. Detecção de limites de solos por dados espectrais e de relevo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 3, p. 718–729, 2014.

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

DOTTO, A. C.; DALMOLIM, R. S. D.; ten CATEN, A.; MOURA-BUENO, J. M. Potential of Spectroradiometry to Classify Soil Clay Content. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, p. 1–8, 2016.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212 p. (Série Manuais).

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 2013, 353 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Programa Nacional de Solos do Brasil (PronaSolos)**. Documentos 183. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2016. 54p.

ETCHEBEHERE, M. L. D. C. **Terraços neoquaternários no vale do Rio do Peixe, Planalto Ocidental Paulista: Implicações estratigráficas e tectônicas**. 2000. 121f. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2000.

EVERITT, B. S. **Cluster Analysis**. 3rd Edition. Arnold, London, 1993.

FERNANDES, L. A.; CASTRO, A. B.; BASILICI, G. Seismites in continental sand sea deposits of the Late Cretaceous Caiuá Desert, Bauru Basin, Brazil. **Sedimentary Geology**, Amsterdam, v. 199, n. 1–2, p. 51–64, 2007.

FERNANDES, L. A.; COIMBRA, A. M. Revisão estratigráfica da parte oriental da bacia Bauru (Neocretáceo). **Revista Brasileira de Geociências**, v. 30, n. 4, p. 717–728, 2000.

FERNANDES, K. L. **Estimativa da caulinita e gibbsita por técnicas de difração de Raios X e Espectroscopia de Reflectância Difusa dos solos do Planalto Ocidental Paulista**. 2017. 83 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2017.

FAO. 2007. **Base de Referencia Mundial para el Recurso Suelo**. Disponível em: <http://www.fao.org/docrep/011/a0510s/a0510s00.htm>. Acesso em: 24 de setembro de 2017.

FINK, J. R.; INDA, A. V.; BAVARESCO, J.; BARRON, V.; TORRENT, J.; BAYER, C. Research adsorption and desorption of phosphorus in subtropical soils as affected by management system and mineralogy. **Soil & Tillage Research**, v. 155, p. 62–68, 2016.

GOLDEN, M.; MICHELI, E.; DITZLER, C.; ESWARAN, H.; OWENS, P.; McBRATNEY, A.; HEMPEL, J.; MONTANARELLA, L.; SCHAD, P. **Time for a Universal Soil Classification System**. 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World. **Proceedings...2010**. Disponível em: <http://iuss.org/19th_WCSS/Symposium/pdf/0463.pdf>. Acesso em: 22 set. 2017.

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

GRAUER-GRAY, J.; HARTEMINK, A. E. Raster sampling of soil profiles. **Geoderma**, v. 318, p. 99–108, 2018.

GRAY, J.; BISHOP, T.; WILFORD, J. Lithology as a powerful covariate in digital soil mapping. In: ARROUAYS, D.; MCKENZIE, N.; HEMPEL, J.; FORGES, A. R.; MCBRATNEY, A. (Eds.) **GlobalSoilMap: Basis of the Global Spatial Soil Information System**. Leiden: CRC Press, 2014. p. 433–439.

GRISON, H.; PETROVSKY, E.; KAPICKA, A.; STEJSKALOVA, S. Magnetic and chemical parameters of andic soils and their relation to selected pedogenesis factors. **Catena**, v. 139, p. 179–190, 2016.

GRUNWALD, S. **Environmental Soil-Landscape Modeling: Geographic information technologies and pedometrics**. New York: CRC Press, 2005. 453pp.

HAIR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. **Análise multivariada de dados**. 6ed. São Paulo: Bookman, 2009, 687p.

HAN, J.; KAMBER, M.; PEI, J. **Data mining: concepts and techniques**. Waltham: Elsevier; 2012.

HAN, P.; WANG, J.; MA, Z.; LU, A.; GAO, M.; PAN, L. Application of fuzzy clustering analysis in classification of soil in Qinghai and Heilongjiang of China. **IFIP Advances in Information and Communication Technology**, v. 344 AICT, n. PART 1, p. 282–289, 2011.

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

HUDSON, H. D. The soil survey as paradigm-based science. **Soil Science Society of America Journal**, v. 3–4, n. 56, p. 836–841, 1992.

IBÁÑEZ, J. J.; KRASILNIKOV, P. V.; SALDAÑA, A. Archive and refugia of soil organisms: Applying a pedodiversity framework for the conservation of biological and non-biological heritages. **Journal of Applied Ecology**, v. 49, n. 6, p. 1267–1277, 2012.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. IPT. **Mapa geológico do Estado de São Paulo**. IPT, 1981. Escala 1:500.000

IZENMAN, A. J. **Modern Multivariate Statistical Techniques. Regression, Classification, and Manifold Learning**. Springer, New York, 2008.

JARAMILLO, D. F. Variabilidad espacial del suelo: Bases para su estudio. **Revista de la Facultad de Ciencias Universidad Nacional de Colombia**. v. 1, p. 73–87, 2012.

JENNY, H., **Factors of Soil Formation**, A System of Quantitative Pedology. McGraw-Hill, New York, 1941.

JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. **Applied Multivariate Statistical Analysis**. Prentice-Hall, New Jersey, 1992.

JORDANOVA, N. **Soil Magnetism Applications in Pedology , Environmental Science and Agriculture**. Elsevier, 2016.

KAISER, H. F. The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. **Psychometrika**, v. 23, p. 187-200, 1958.

KANU, M. O.; MELUDU, O. C.; ONIKU, S. A. Comparative study of top soil magnetic susceptibility variation based on some human activities. **Geofísica Internacional**, v. 53, p. 411–423, 2014.

KANTARDZIC, M. **Data Mining. Concepts, Models, Methods, and Algorithms**. IEEE, Wiley, New Jersey, 2011.

KRIPPENDORFF, K. **Clustering**. In P. R. Monge & J. N. Cappella (Eds.), *Multivariate techniques in human communication research*. New York, NY: Academic Press, 1980.

KUILENBURG, J. VAN; DE GRUJITER, J. J.; MARSMAN, B.A. BOUMA, J. Accuracy of spatial interpolation between point data on soil moisture supply capacity, compared with estimates from mapping units. **Geoderma** v. 27, p. 311–325, 1982.

LEPSCH, I. F.; BUOL, S. W.; DANIELS, R. B. Soil-landscape Relationships in the Occidental Plateau of Sao Paulo State, Brazil: I. Geomorphic Surfaces and Soil Mapping Units. **Soil Science Society American Journal**, v. 41, n. 1, p. 104–109, 1977.

LEPSCH, I. F. **19 Lições de pedologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 456p.

LEPSCH, I. F. As necessidades de efetuarmos levantamentos pedológicos detalhados no Brasil e de estabelecermos as séries de solos. **Revista Tamoios**, v. 9, n. 1, p. 3–15, 2013.

MARQUES JÚNIOR, J.; LEPSCH, I. F. Depósitos superficiais neoceno-zóicos, superfícies geomórficas e solos em Monte Alto, SP. **Geociências**, v. 19, n. 2, p. 265–282, 2000.

MARQUES JÚNIOR, J. **Caracterização de áreas de manejo específico no contexto das relações solo-relevo**. 110f. 2009. Tese (Livre-docencia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2009.

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

MEHRA, O. P.; JACKSON, M. L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. In: SWINEFORD, A. (Ed.). **National conference on clays and clay mineral**. Washington: Pergamon Press, 1960. p. 317– 342.

- MELO, V.F, WYPYCH, F. Caulinita e haloisita. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. **Química e Mineralogia do Solo**. Parte I: Conceitos Básicos. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, 2009. pp.427-504.
- MENEZES, M. D.; SILVA, S. H. G.; OWENS, P. R.; CURI, N. Digital soil mapping approach on fuzzy logic and field expert knowledge. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 37, n. 4, p. 287–298, 2013.
- MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B. Incorporating taxonomic distance into spatial prediction and digital mapping of soil classes. **Geoderma**, v. 142, n. 3-4, p. 285–293, 2007.
- MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B.; HARTEMINK, A. E. Global pedodiversity, taxonomic distance, and the World Reference Base. **Geoderma**, v. 155, n. 3–4, p. 132–139, 2010.
- MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B. Digital soil mapping: A brief history and some lessons. **Geoderma**, v. 264, p. 301–311, ago. 2015.
- McBRATNEY, A. B.; WEBSTER, R. Spatial dependence and classification of the soil along a transect in northeast Scotland. **Geoderma**, v.26, p. 63-82, 1981.
- McBRATNEY, A. B.; MENDONÇA SANTOS, M. L.; MINASNY, B. On digital soil mapping. **Geoderma**, v. 1-2, n. 117, p. 3–52, 2003.
- MCBRATNEY, A.; MINASNY, B. On measuring pedodiversity. **Geoderma**, v. 141, p. 149–154, 2007.
- MURDOCK, K. J.; WILKIE, K.; BROWN, L. L. Geoscientific instrumentation methods and data systems rock magnetic properties, magnetic susceptibility, and organic geochemistry comparison in core LZ1029-7 Lake El'gygytyn, Russia Far East. **Climate Past**, v. 9, p. 467–479, 2013.
- NORRIS, J. M. The application of multivariate analysis to soil studies. **Journal of Soil Science**, v. 22, n. 1, p. 69–80, 1971.
- ODGERS, N. P.; SUN, W.; McBRATNEY, A. B.; MINASNY, B.; CLIFFORD, D. Disaggregation and harmonisation of soil map units through resampled classification trees. **Geoderma**, v. 214, p. 91–100, 2014.
- PHILLIPS, J. D. The relative importance of intrinsic and extrinsic factors in pedodiversity. **Annals of the Association of American Geographers**, v. 91, n. 4, p. 609–621, 2001.
- PHILLIPS, J. D. Soil Complexity and Pedogenesis. **Soil Science**, v. 182, n. 4, p. 117–127, 2017.
- PINGGUO YANG; BYRNE, J. M.; YANG, M. Spatial variability of soil magnetic susceptibility , organic carbon and total nitrogen from farmland in northern China. **Catena**, v. 145, p. 92–98, 2016.

RAMOS, P. V., DALMOLIM, R. S. D., MARQUES JÚNIOR, J. SIQUEIRA, D. S., ALMEIDA, J. A. de, MOURA-BUENO, J. M. Magnetic susceptibility of soil to differentiate soil environments in Southern Brazil. **Revista Brasileira da Ciência do Solo**, v. 41, p. 1–13, 2017.

RENCHER, A. C. **Methods of Multivariate Analysis**. 2ed. Madison: John Wiley & Sons, 2002.

ROGOWSKI, A. S.; WOLF, J. K. Incorporating variability into soil map unit delineations. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, n. 1, p. 163, 1994.

ROSS, J. L. S.; MOROZ, I. C. Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo. **Revista do Departamento de Geografia**, Piracicaba, v. 10, p. 41-58, 1996.

ROUDIER, P.; MALONE, P.; HEDLEY, C. B.; MINASNY, B.; McBRATNEY, A. B. Comparison of regression methods for spatial downscaling of soil organic carbon stocks maps. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 142, p. 91–100, 2017.

SALAHAT, M.; MOHTAR, R. H.; BRAUDEAU, E.; SCHULZE, D. G.; ASSI, A. Toward delineating hydro-functional soil mapping units using the pedostructure concept: A case study. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 86, p. 15–25, 2012.

SAMUEL, G. S.; JOSEPH, K. X. An overview of soil survey and classification as a source of secondary information. **Journal Of Environment and Earth Science**, v. 5, n. 22, p. 5–10, 2015.

SANTOS, H. G.; AGLIO, M. L. D.; DART, R. O.; BREFFIN, M. L. M. S.; SOUZA, J. S.; MENDONÇA, L. R. **Distribuição espacial dos níveis de levantamento de solos no Brasil**. In: XXXIV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. **Anais**. Florianópolis, 2013. p.1-4.

SCHWERTMANN, U. The differentiation of iron oxide in soil by a photochemical extraction with acid ammonium oxalate. **Zeitschrift fuer Pflanzenernaehrung und Bodenkunde**, Weinheim, v. 105, p. 104–201, 1964.

SILVA, C. C. **Mapeamento digital de classes de Solo : Aplicação de metodologia na folha Botucatu (Sf-22-Z-B-IV-3) E Validação De Campo**. 117 f. 2012. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical). Instituto Agrônomo de Campinas, 2012.

SILVA, L. S. **Caracterização da mineralogia da fração argila dos solos do Planalto Ocidental Paulista**. 2016. 82 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2016

SILVA, S. H. G.; POGGERE, G. C.; MENEZES, M. D.; CARVALHO, G. S.; GUILHERME, L. R. G.; CURI, N. Proximal sensing and digital terrain models applied to digital soil mapping and modeling of Brazilian latosols (Oxisols). **Remote Sensing**, v. 8, n. 8, p. 614, 2016.

SIQUEIRA, D. S.; MARQUES JÚNIOR, 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**, v. 26, n. 4, p. 425–431, 2010.

SIQUEIRA, D. S.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; TEIXEIRA, D. B.; VASCONCELOS, V.; CARVALHO JUNIOR, O. A.; MARTINS, E. S. Detailed mapping unit design based on soil-landscape relation and spatial variability of magnetic susceptibility and soil color. **Catena**, v. 135, p149-162, 2015.

SOIL SURVEY STAFF. **SOIL TAXONOMY**. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. Washington: NCRS. 871p.

SOUZA, C. K. **Variabilidade espacial de atributos de solo e produtividade em área cultivada com café orgânico e convencional**. 65f. 2006. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2006.

SOUZA, Z. M.; MARQUES, J.; PEREIRA, G. T. Spatial variability of the physical and mineralogical properties of the soil from the areas with variation in landscape shapes. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 52, n. 2, p. 305–316, 2009.

STRAUSS, T.; von MALTITZ, M. J. Generalising Ward's method for use with Manhattan distances. **Plos One**, v. 12, n. 1, p. 1–21, 2017.

TEIXEIRA, W.; FAIRCHILD, T. R.; TOLEDO, M. C. M.; TAIOLI, F. 2009. **Descifrando a Terra**. 2da ed. Companhia Editora Nacional, São Paulo. Brasil. p.623.

TEIXEIRA, D. D. B. **Suscetibilidade magnética e análise de incertezas em mapeamento de solos**. 2015. 105 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2015.

ten CATEN, A.; DALMOLIM, R. S. D.; PEDRON, F. A.; MENDONÇA-SANTOS, M. L. Regressões logísticas múltiplas: Fatores que influenciam sua aplicação na predição de classes de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 1, p. 53–62, 2011.

TESKE, R.; GIASSON, E.; BAGATINI, T. Produção de um mapa pedológico associando técnicas comuns aos mapeamentos digitais de solos com delineamento manual de unidades de mapeamento. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 4, p. 950–959, ago. 2015.

TROEH, F.R. Landform equations fitted to contour maps. **Soil Science Society American Journal** v. 263, p. 616–627, 1965.

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

VALENTINE, K. W. G. How soil map units and delineations change with survey intensity and map scale? **Canadian Journal of Soil Science**. v. 61, p. 535–551, 1981.

VASU, D.; SINGH, S. K.; TIWARY, P.; CHANDRAN, P.; RAY, S. K.; DURAISAMI, V. P. Pedogenic processes and soil-landform relationships for identification of yields-limiting soil properties. **Soil Research**. v. 55, n. 3, p. 273-284, 2016.

VIDAL-TORRADO, P.; LEPSCH, I. F.; CASTRO, S. S. DE. Conceitos e aplicações das relações pedologia-geomorfologia em regiões tropicais úmidas. In: **Tópicos em Ciência do Solo**. v. 4, p. 145–192, 2005.

WARD, J. H. Hierarchical grouping to optimize an objective function. **Journal Of the American Statistical Association**, v. 58, p. 236–244, 1963.

WILDING, L.P.; DRESS, L.R. Spatial variability and pedology. In: **Pedogenesis and Soil Taxonomy**. Wilding, L.P., Smeck, N., Hall, G.F. (Eds.). Netherlands: Elsevier, 1983. p. 83–116.

YOUNG, F. J.; HAMMER, R. D. Defining geographic soil bodies by landscape position, Soil Taxonomy, and cluster analysis. **Soil Science America Journal**, v. 64, p. 989–998, 2000.

ZHU, A. X.; HUDSON, B.; BURT, J.; LUBICH, K.; SIMONSON, D. Soil mapping using GIS, expert knowledge, and fuzzy logic. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, p. 1463–1472, 2001.

APÊNDICE

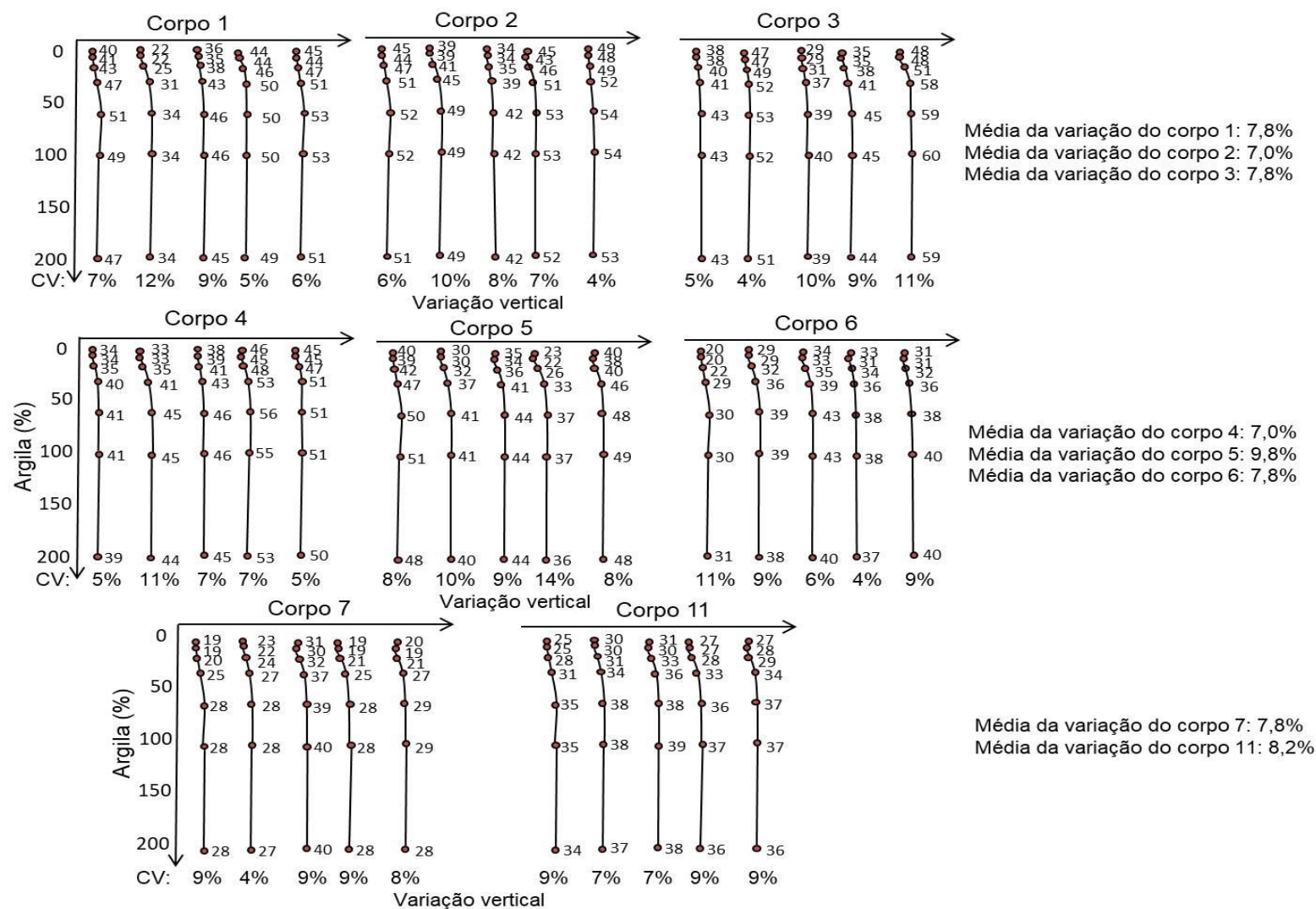


Figura 1. Variação vertical para argila nos corpos de solos delineados do Planalto Ocidental Paulista. Dados obtidos da base de dado internacional **SoilGrids**.