

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Segmentação geomorfométrica associada com tipos de solos via
geotecnologias**

Karina Patrícia Prazeres Marques

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestra em Ciências. Área de concentração: Solos e
Nutrição de Plantas

**Piracicaba
2016**

Karina Patrícia Prazeres Marques
Bacharela em Geografia

**Segmentação geomorfométrica associada com tipos de solos via
geotecnologias**

Orientador:
Prof. Dr. **JOSÉ ALEXANDRE MELO DEMATTÊ**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestra em Ciências. Área de concentração: Solos e
Nutrição de Plantas

**Piracicaba
2016**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Marques, Karina Patrícia Prazeres

Segmentação geomorfométrica associada com tipos de solos via geotecnologias/Karina Patrícia Prazeres Marques. - - Piracicaba, 2016.

132 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Relação solo-paisagem 2. Geomorfometria 3. Análise de similaridade 4. Mapeamento de solos L. . I. Título

A Jorge Sanz Mateos, por ser minha espada, meu escudo e não deixar que nada me
faça mal.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais por sempre apoiarem minhas decisões e por me guiarem por um caminho melhor; a minha avó Iraci Prazeres e tia Sueli Prazeres, pelo abraço carinhoso a cada chegada e a cada partida; a meus irmãos por fazerem que os momentos sufocantes fossem suavizados com demonstrações de afeto; a família Prazeres & Marques pelo carinho e pensamentos positivos; a família Sanz & Mateos pelo apoio incondicional nessa trajetória e pelas vibrações a cada vitória; e a Filó e Xui por alimentarem minhas forças na luta de um mundo melhor.

Ao Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo pela oportunidade em realizar um dos meus sonhos, o curso de mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Processo 2015/16172-0) por conceder a bolsa de estudo no primeiro e segundo ano do curso, respectivamente, sem a qual não seria possível (sobre)viver em Piracicaba (SP).

À meu orientador José Alexandre M. Demattê por me guiar na investigação científica e pelas oportunidades concedidas.

À meu co-orientador Igo F. Lepsch por ser muito mais do que “Lepsch, I. F.” e por ser uma pessoa incrível que sempre gostaríamos de ter por perto, meu sincero agradecimento!

Ao Professor Pablo Vidal-Torrado pelo apoio em todas as fases do curso e por me fascinar ao incorporar ‘todos juntos em um só’.

Aos professores do Departamento de Ciência do Solo da ESALQ/USP, em especial a Antônio Azevedo e Tiago Osório, por todas as conversas construtivas e contribuições nessa jornada.

À Bradley A. Miller pela troca de experiências que me auxiliaram guiar esse trabalho e a “Santista” pelo apoio nos trabalhos de campo e diálogos ‘geomorfológicos’.

À Ceres Almeida e Brivaldo Almeida pelo incentivo e carinho durante toda minha ‘vida’ acadêmica.

À Dorival Grisotto, José Lucas Safanelli, Alisson Domingos e Caio Troula Fongaro pelo (imenso) apoio nas atividades de campo.

À Luiz A. Silva, Ednéia C. S. Mondoni (Néia), Ramon Gabriel, Manuella Padilha, Alisson Domingos e Natasha Valadares pelo auxílio nas análises de laboratório.

Aos integrantes do Grupo de Geotecnologias em Ciência do Solo, especialmente a Clécia C. B. Guimarães e Veridiana M. Sayão pela companhia diária, ajuda em todos os momentos e pelo carinho especial, e ao Rodnei Rizzo pelas sugestões e auxílio nas análises estatísticas.

À Twane Xavier por sempre estar presente, mesmo quando eu estou ausente; a Amanda Romão e Carol Robertoni por me receberam com o coração palpitando em São Paulo; e a Bárbara Siqueira pelo carinho imensurável durante todos esses anos.

À todos aqueles que contribuíram para a realização desse trabalho.

Epígrafe

“Caminhamos ao encontro do amor e do desejo. Não buscamos lições, nem a amarga filosofia que se exige da grandeza. Além do sol, dos beijos e dos perfumes selvagens, tudo o mais nos parece fútil. Quando a mim, não procuro estar sozinho nesse lugar. Muitas vezes estive aqui com aqueles que amava, e discernia em seus traços o claro sorriso que neles tomava a face do amor. Deixo a outros a ordem e a medida. Domina-me por completo a grande libertinagem da natureza e do mar.”

Albert Camus

SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	7
RESUMO.....	9
ABSTRACT	10
LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE TABELAS	16
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	18
1. INTRODUÇÃO	19
REFERÊNCIAS.....	21
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1. IMPORTÂNCIA DO SOLO E SUA REPRESENTAÇÃO ESPACIAL.....	23
2.2. MAPEAMENTOS TRADICIONAIS DE SOLOS	24
2.3. RELAÇÃO SOLO-PAISAGEM NOS MAPEAMENTOS DE SOLOS.....	25
2.4. ANÁLISE DIGITAL DO TERRENO (GEOMORFOMETRIA)	26
2.5. SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO DE UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS.....	28
2.6. ELEMENTOS DA ENCOSTA E SUAS RELAÇÕES COM ATRIBUTOS DO SOLO	30
2.7. RESOLUÇÃO DO MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO VERSUS ESCALA DE ANÁLISE	33
2.8. ESPECTROSCOPIA NO ESTUDO DE SOLOS	34
REFERÊNCIAS.....	37
3. SEGMENTAÇÃO DIGITAL DOS ELEMENTOS DA ENCOSTA E SUAS RELAÇÕES COM TIPOS DE SOLOS	43
RESUMO	43
ABSTRACT	44
3.1. INTRODUÇÃO.....	44
3.2. MATERIAL E MÉTODOS	46
3.2.1. <i>Localização da área de estudo e caracterização do meio físico.....</i>	46
3.2.2. <i>Modelo Digital do Terreno e parâmetros geomorfológicos</i>	50
3.2.3. <i>Segmentação digital dos elementos da encosta em nível detalhado utilizando uma árvore de decisão</i>	51
3.2.4. <i>Coletas de amostras de solo</i>	53
3.2.5. <i>Análises espectral, química e granulométrica das amostras de solo</i>	54
3.2.6. <i>Processamento e análise dos dados.....</i>	56
3.2.6.1. <i>Análise multivariada de variância (MANOVA) da topossequência 2.....</i>	56
3.2.6.2. <i>Análise de similaridade das amostras de solo coletadas nas topossequências</i>	56
3.2.6.3. <i>Análise de similaridade das amostras de solo coletadas aleatoriamente na área total de estudo</i>	58
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	58
3.3.1. <i>Segmentação geomorfológica dos elementos da encosta e sua validação pela análise de concordância</i>	58
3.3.2. <i>Relação dos elementos da encosta com atributos e classes dos solos das topossequências estudadas</i>	63
3.3.2.1. <i>Topossequência 1</i>	63
3.3.2.2. <i>Topossequência 2</i>	68
3.3.3. <i>Interpretação dos pesos (loadings) gerados na Análise de Componentes Principais</i>	73
3.3.4. <i>Análise multivariada de variância (MANOVA) da topossequência 2</i>	77
3.3.5. <i>Análise de similaridade pela distância pedológica das amostras de solo coletadas nas topossequências estudadas</i>	78
3.3.5.1. <i>Topossequência 1</i>	78
3.3.5.1.1. <i>Análises espectrais (6 primeiros componentes principais)</i>	79
3.3.5.1.2. <i>Análises convencionais (químicas e granulométrica)</i>	88

3.3.5.1.3. Análises espectrais + Análises convencionais	94
3.3.5.2. Toposequência 2.....	97
3.3.5.2.1. Análises espectrais (6 primeiros componentes principais).....	98
3.3.5.2.2. Análises convencionais (químicas e granulométrica).....	107
3.3.5.2.3. Análises espectrais + Análises convencionais	114
<i>3.3.6. Análise de similaridade pela distância pedológica das amostras de solo coletadas aleatoriamente na área total de estudo</i>	<i>118</i>
3.3.6.1. Análises espectrais (6 primeiros componentes principais).....	118
3.3.6.2. Análises convencionais (químicas e granulométrica)	121
3.3.6.3. Análises espectrais + Análises convencionais.....	123
<i>3.3.7. Comparação do mapa detalhado de elementos da encosta com semidetalhado de solos</i>	<i>125</i>
3.4. CONCLUSÕES	127
REFERÊNCIAS	129

RESUMO

Segmentação geomorfométrica associada com tipos de solos via geotecnologias

Os solos são vitais para todos os ecossistemas terrestres e deles depende a maior parte dos recursos para a manutenção dos seres vivos. Seu uso é importante para a agricultura e, para assim serem usados, é necessário conhecê-los, tanto como são como onde estão na paisagem. Esse conhecimento pode ser adquirido através de levantamentos de solos para os quais existem muitas limitações, como alta demanda financeira, elevado tempo para sua execução e subjetividade associada ao conhecimento tácito dos pedólogos. Por isso, são necessárias novas estratégias que auxiliem a execução de mapas de solos. Uma abordagem promissora é a identificação de unidades naturais do relevo em nível de detalhe, uma vez que é possível prever a ocorrência de atributos e tipos de solos na paisagem quando associando as feições dos seus perfis com as de sua superfície. Diante disto, este trabalho objetiva testar procedimentos digitais para segmentação detalhada de elementos das encostas e relacioná-los com os atributos e classes taxonômicas de solos. Em uma área de estudo de 2.500 ha, situada na região de Piracicaba (SP), parâmetros geomorfométricos organizados hierarquicamente em regras em uma árvore de decisão foram utilizados para classificar, em escala detalhada (1:10.000), os cinco elementos da encosta (topo, ombro, meia-encosta, sopé coluvial e sopé colúvio-aluvial). Avaliou-se uma estratégia de análise de similaridade visando à identificação de agrupamentos de amostras de solos da mesma classe, a partir de diferentes conjuntos de variáveis. Essa segmentação digital mostrou que é possível explicitar a localização de cada um dos elementos da encosta e que neles dominam perfis de solos que se assemelham. Na maioria dos casos, essa semelhança pode ser comprovada com o uso tanto de análises convencionais como espectrais das amostras de solo coletadas até 1 m de profundidade. Essa classificação digital dos elementos da encosta pode auxiliar no mapeamento de solos detalhados e ultradetalhados (escalas 20.000 ou maiores).

Palavras-chave: Relação solo-paisagem; Geomorfometria; Análise de similaridade; Mapeamento de solos

ABSTRACT

Geomorphometric segmentation associated with soils types via geotechnologies

Soils are vital for all terrestrial ecosystems and the majority of resources for maintenance of human beings depend on them. Their use is important for agriculture and, in order to be used in this manner, it is essential to know them, as well as how they are and where they are located in the landscape. This knowledge can be acquired through soil surveys, that have several limitations, such as high financial demand, time-consuming execution and subjectivity associated with the pedologists tacit knowledge. Considering this, new strategies are needed to support the elaboration of soil maps. One promising approach is the identification of detailed natural units of relief, since it is possible to predict the occurrence of attributes and types of soils in the landscape when associating the features of their profiles with those of their surface. Therefore, this research aims to test digital procedures for detailed segmentation of hillslope elements and to relate them to soil attributes and taxonomic classes. In a study area of 2,500 ha located in the Piracicaba (SP) region, geomorphometric parameters hierarchically organized into rules in a decision tree were used in order to classify, in a detailed scale (1:10,000), five hillslope elements (summit, shoulder, backslope, footslope and toeslope). A similarity analysis strategy was used to identify groupings of soil samples from the same class, from different sets of variables. This digital segmentation showed that it is possible to make explicit the location of each one of the hillslope elements, where similar soil profiles are dominant. In most cases, this similarity can be verified with the use of both conventional and spectral analyses of soil samples collected up to a depth of 1 m. This digital classification of hillslope elements can support 1st and 2nd order soil survey (scales 1:36,680 or greater).

Keywords: Soil-landscape relationship; Geomorphometry; Similarity analysis; Soil mapping

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Relação entre níveis categóricos do sistema de classificação de geoforma e atributos topográficos (Adaptado: Zinck, 2016).....	28
Figura 2. Diagrama dimensional da encosta simples <i>versus</i> encosta complexa baseado no modelo de segmentação proposto por Ruhe (1975) (Adaptado: Wysocki et al., 2011). SU: <i>Summit</i> , SH: <i>Shoulder</i> , BS: <i>Backslope</i> , FS: <i>Footslope</i> e TS: <i>Toeslope</i>	31
Figura 3. Foto aérea e localização da área de estudo	47
Figura 4. Localização geomorfológica da área de estudo. Fonte: IPT (1981)	48
Figura 5. Coluna estratigráfica da depressão periférica paulista. Fonte: Perinoto & Zaine (1996), modificado de Soares & Landim (1975).	49
Figura 6. Mapa geológico da área de estudo (Adaptado: Vidal-Torrado, 1994).....	50
Figura 7. Árvore de decisão utilizada para segmentar os elementos da encosta através de parâmetros geomorfométricos.	52
Figura 8. Foto aérea e localização dos pontos de coleta de amostras de solo tanto aleatoriamente distribuídos em toda área de estudo como nas topossequências 1 (à direita) e 2 (à esquerda).	54
Figura 9. Elementos da análise de similaridade entre dois perfis de solo utilizando a distância pedológica pelo algoritmo <i>outil statistique d'aide à la cartogénèse automatique</i> - OSACA (Adaptado: Carré & Jacobson, 2009).....	57
Figura 10. Mapa digital dos elementos da encosta (Ruhe, 1975) obtidos pela segmentação geomorfométrica utilizando uma árvore de decisão.....	59
Figura 11. Observações no campo de pontos concordantes e discordantes dos elementos da encosta obtidos pelo modelo digital de segmentação geomorfométrica por árvore de decisão. SU: <i>Summit</i> , SH: <i>Shoulder</i> e BS: <i>Backslope</i>	60
Figura 12. Mapa digital dos elementos da encosta indicando as alternâncias do <i>shoulder</i> e <i>footslope</i> na área de estudo.	61
Figura 13. Distribuição dos pontos de coleta de amostras de solo em uma faixa que engloba todos os segmentos da encosta da topossequência 1	64
Figura 14. Corte topográfico transversal contrastando os elementos da encosta da topossequência 1, segundo os elementos propostos por Ruhe (1975), e formação geológica de seu substrato. SU: <i>Summit</i> , SH: <i>Shoulder</i> , BS: <i>Backslope</i> , FS: <i>Footslope</i> , TS: <i>Toeslope</i> e CPi: formação Itararé.	65
Figura 15. Média (barras mais largas) e desvio padrão (barras mais estreitas) dos atributos do horizonte superficial e subsuperficial dos solos situados nos oito elementos da encosta da topossequência 1. SU: <i>Summit</i> , SH: <i>Shoulder</i> , BS: <i>Backslope</i> , FS: <i>Footslope</i> , TS: <i>Toeslope</i> , Hz: horizonte, V: Saturação por bases e T: Capacidade de Troca Catiônica.	66

- Figura 16. Distribuição dos pontos de coleta de amostras de solo dentro dos segmentos da encosta na topossequência 2. A porção inferior desta topossequência (que corresponde a superfícies geomórficas mais recentes sob materiais de origem muito diversificados) está representada em escala maior, à direita. 69
- Figura 17. Corte topográfico transversal contrastando a segmentação dos elementos da encosta da topossequência 2, segundo os elementos propostos por Ruhe (1975), e formação geológica de seu substrato. SU: *Summit*, SH: *Shoulder*, BS: *Backslope*, FS: *Footslope*, TS: *Toeslope*, CC: Cobertura Cenozóica, Pti: formação Tatuí (membro inferior) e CPIar: formação Itararé (membro arenoso). 70
- Figura 18. Média (barras mais largas) e desvio padrão (barras mais estreitas) dos atributos do horizonte superficial e subsuperficial dos solos situados nos seis elementos da encosta da topossequência 2. SU: *Summit*, SH: *Shoulder*, BS: *Backslope*, FS: *Footslope*, TS: *Toeslope*, Hz: horizonte, V: Saturação por bases e T: Capacidade de Troca Catiônica. 71
- Figura 19. Representação dos elementos da encosta a partir de observações de campo da topossequência 2. SH: *Shoulder*, BS: *Backslope* e FS: *Footslope*. 73
- Figura 20. Pesos de cada banda espectral do (a) Componente Principal 1, (b) Componente Principal 2, (c) Componente Principal 3, (d) Componente Principal 4, (e) Componente Principal 5 e (f) Componente Principal 6 obtidos através da Análise de Componentes Principais segundo os espectros de todas as amostras de solos coletadas. 75
- Figura 21. Análise de correlação de Pearson entre atributos do solo e componentes principais de todas as amostras de solo coletadas na camada superficial e subsuperficial. SB: Saturação por bases, B: Capacidade de Troca Catiônica, m: saturação por alumínio, CP: Componente Principal. 76
- Figura 22. Relação dos valores da distância euclidiana média entre cada ponto de amostragem de solo e o centro do grupo ao qual ele está ligado (Din) pela média das distâncias euclidianas que separam os centros do grupo (Dex) e os grupos criados a partir da análise de similaridade das amostras de solo coletadas na topossequência 1. 79
- Figura 23. Gráfico de coordenadas principais obtido com os dados das análises espectrais das amostras dos solos da topossequência 1 (escores dos 6 primeiros Componentes Principais). GX: Gleissolo Háplico, PVA: Argissolo Vermelho-Amarelo, RL: Neossolo Litólico, RR: Neossolo Regolítico, CX: Cambissolo Háplico. 80
- Figura 24. Distribuição espacial dos grupos criados pelo OSACA baseado nas análises espectrais das amostras de solos coletadas na topossequência 1 por elementos da encosta. 81
- Figura 25. Curvas espectrais das amostras do horizonte superficial e subsuperficial dos solos coletados nos pontos: (a) T1, (b) T4, (c) P1, (d) P2, (e) P3, (f) P4, (g) P5, (h) P6, (i) P7 e (j) P8 localizadas na topossequência 1. 85
- Figura 26. Curvas espectrais das amostras do horizonte superficial e subsuperficial dos solos coletados nos pontos: (a) P9, (b) P10, (c) P11, (d) P12, (e) P13, (f) P14, (g) P15, (h) P16, (i) P17, (j) P18 e (j) P19 localizadas na topossequência 1. 86

- Figura 27. Curvas espectrais das amostras do horizonte superficial e subsuperficial dos solos coletados nos pontos: (a) P20, (b) P21, (c) P22, (d) P23, (e) P24, (f) P25, (g) P26, (h) P27, (i) P28 e (j) P29 localizadas na topossequência 1.87
- Figura 28. Curvas espectrais das amostras do horizonte superficial e subsuperficial dos solos coletados nos pontos: (a) P30, (b) P31, (c) P32, (d) P33, (e) P34, (f) P35, (g) P36 e (h) P37 localizadas na topossequência 1.88
- Figura 29. Gráfico de coordenadas principais obtido com os dados das análises convencionais das amostras dos solos da topossequência 1 (pH em KCl, soma de bases, saturação por bases, saturação por alumínio, capacidade de troca catiônica, argila, areia total, silte e argila). GX: Gleissolo Háplico, PVA: Argissolo Vermelho-Amarelo, RL: Neossolo Litólico, RR: Neossolo Regolítico, CX: Cambissolo Háplico 89
- Figura 30. Distribuição espacial dos grupos criados pelo OSACA baseado nas análises convencionais (químicas e granulométrica) das amostras de solos coletadas na topossequência 1 segundo seus elementos da encosta.90
- Figura 31. Gráfico de coordenadas principais obtido com os dados das análises espectrais + análises convencionais das amostras dos solos da topossequência 1 (6 primeiros Componentes Principais, pH em KCl, soma de bases, saturação por bases, saturação por alumínio, capacidade de troca catiônica, argila, areia total, silte e argila). GX: Gleissolo Háplico, PVA: Argissolo Vermelho-Amarelo, RL: Neossolo Litólico, RR: Neossolo Regolítico, CX: Cambissolo Háplico.....95
- Figura 32. Distribuição espacial dos grupos criados pelo OSACA baseado nas análises espectrais + análises convencionais (químicas e granulométrica) das amostras de solos coletadas na topossequência 1 segundo seus elementos da encosta.....96
- Figura 33. Relação dos valores da distância euclidiana média entre cada ponto de amostragem de solo e o centro do grupo ao qual ele está ligado (Din) pela média das distâncias euclidianas que separam os centros do grupo (Dex) e os grupos criados a partir da análise de similaridade das amostras de solo coletadas na topossequência 2.98
- Figura 34. Gráfico de coordenadas principais obtido com os dados das análises espectrais das amostras dos solos da topossequência 2 (escores dos 6 primeiros Componentes Principais). LV: Latossolo Vermelho, PV: Argissolo Vermelho, RL: Neossolo Litólico e CX: Cambissolo Háplico.....99
- Figura 35. Distribuição espacial dos grupos criados pelo OSACA baseado nas análises espectrais das amostras de solos coletadas na topossequência 2 segundo seus elementos da encosta..... 100
- Figura 36. Curvas espectrais das amostras do horizonte superficial e subsuperficial dos solos coletadas nos pontos: (a) T15, (b) T16, (c) T19, (d) T20, (e) N1, (f) N2, (g) N3, (h) N4, (i) N5 e (j) N6 localizadas na topossequência 2..... 102
- Figura 37. Curvas espectrais das amostras do horizonte superficial e subsuperficial dos solos coletadas nos pontos: (a) N7, (b) N8, (c) N9, (d) N10, (e) N11, (f) N12, (g) N13, (h) N14, (i) N15 e (j) N16 localizadas na topossequência 2..... 103
- Figura 38. Curvas espectrais das amostras do horizonte subsuperficial dos solos coletados nos pontos: (a) N17, (b) N18, (c) N19, (d) N20, (e) N21, (f) N22, (g) N23, (h) N24, (i) N25 e (j) N26 localizadas na topossequência 2. 104

- Figura 39. Curvas espectrais das amostras do horizonte superficial e subsuperficial dos solos coletadas nos pontos: (a) N27, (b) N28, (c) N29, (d) N30, (e) N31, (f) N32, (g) N33, (h) N34, (i) N35 e (j) N36 localizadas na topossequência 2..... 105
- Figura 40. Curvas espectrais das amostras do horizonte superficial e subsuperficial dos solos coletadas nos pontos: (a) N37, (b) N38, (c) N40, (d) N41, (e) N42, (f) N43, (g) N44, (h) N45, (i) N46 e (j) N47 localizadas na topossequência 2..... 106
- Figura 41. Curvas espectrais das amostras do horizonte subsuperficial dos solos coletadas nos pontos: (a) N48, (b) N49, (c) N50, (d) N51, (e) N52, (f) N53, (g) N54, (h) N55 e (i) N56 localizadas na topossequência 2. 107
- Figura 42. Gráfico de coordenadas principais obtido com os dados das análises convencionais das amostras dos solos da topossequência 1 (pH em KCl, soma de bases, saturação por bases, saturação por alumínio, capacidade de troca catiônica, argila, areia total, silte e argila). LV: Latossolo Vermelho, PV: Argissolo Vermelho, RL: Neossolo Litólico e CX: Cambissolo Háplico..... 108
- Figura 43. Distribuição espacial dos grupos criados pelo OSACA baseado nas análises convencionais (químicas e granulométrica) das amostras de solos coletadas na topossequência 2 segundo seus elementos da encosta..... 109
- Figura 44. Gráfico de coordenadas principais obtido com os dados das análises espectrais + análises convencionais das amostras dos solos da topossequência 2 (6 primeiros componentes principais, pH em KCl, soma de bases, saturação por bases, saturação por alumínio, capacidade de troca catiônica, argila, areia total, silte e argila). LV: Latossolo Vermelho, PV: Argissolo Vermelho, RL: Neossolo Litólico e CX: Cambissolo Háplico 115
- Figura 45. Distribuição espacial dos grupos criados pelo OSACA baseado nas análises espectrais + análises convencionais (químicas e granulométrica) das amostras de solos coletadas na topossequência 2 segundo seus elementos da encosta. 116
- Figura 46. Relação dos valores da distância euclidiana média entre cada ponto de amostragem de solo e o centro do grupo ao qual está ligado (Din) pela média das distâncias euclidianas que separam os centros do grupo (Dex) e os grupos criados a partir da análise de similaridade das amostras aleatoriamente coletadas na área total..... 118
- Figura 47. Gráfico de coordenadas principais obtidos a partir das análises espectrais (escores dos 6 primeiros Componentes Principais) das amostras de solos aleatoriamente coletadas na área total. LV: Latossolo Vermelho, GX: Gleissolo Háplico, RR: Neossolo Regolítico, PA: Argissolo Amarelo, RL: Neossolo Litólico, PVA: Argissolo Vermelho-Amarelo, CX: Cambissolo Háplico e PV: Argissolo Vermelho. 120
- Figura 48. Gráfico de coordenadas principais obtido a partir das análises convencionais (químicas e granulométrica) das amostras de solos aleatoriamente coletadas na área total. LV: Latossolo Vermelho, GX: Gleissolo Háplico, RR: Neossolo Regolítico, PA: Argissolo Amarelo, RL: Neossolo Litólico, PVA: Argissolo Vermelho-Amarelo, CX: Cambissolo Háplico e PV: Argissolo Vermelho..... 122
- Figura 49. Gráfico de coordenadas principais obtidos a partir das análises espectrais + análises convencionais das amostras de solos aleatoriamente coletadas na área total. LV: Latossolo Vermelho, GX: Gleissolo Háplico, RR: Neossolo Regolítico, PA:

Argissolo Amarelo, RL: Neossolo Litólico, PVA: Argissolo Vermelho-Amarelo, CX: Cambissolo Háptico e PV: Argissolo Vermelho. 124

Figura 50. Mapa digital dos elementos da encosta e suas relações com as unidades de mapeamento de um mapa semidetalhado de solos elaborado por Vidal-Torrado (1994). A nomenclatura utilizada segue a proposta de Camargo et al. (1987)..... 126

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Síntese do sistema de classificação de geoformas (Adaptado: Zinck, 1988)	29
Tabela 2. Descrição morfodinâmica dos elementos da encosta (Adaptado: Ruhe, 1975).....	30
Tabela 3. Valores do índice Kappa para avaliação do grau de concordância (Landis & Koch, 1977).....	53
Tabela 4. Tabela de contingência da validação do modelo digital de segmentação dos elementos da encosta (Kappa=0,7 e erro padrão=0,04).....	59
Tabela 5. Testes estatísticos multivariados dos atributos do solo e escores dos componentes principais em relação aos elementos da encosta da topossequência 2	77
Tabela 6. Contribuição dos atributos do solo e dos escores da Análise de Componentes Principais na análise multivariada de variância da topossequência	278
Tabela 7. Análises químicas e granulométrica das amostras de solos coletadas nos pontos T01, T4, P01, P02, P03, P04, P05, P06, P07, P08, P09, P10 e P11 localizados na topossequência 1	91
Tabela 8. Análises químicas e granulométrica das amostras de solos coletadas nos pontos P12, P13, P15, P16, P17, P18, P19, P20, P21, P22, P23, P24 e P25 localizados na topossequência 1	92
Tabela 9. Análises químicas e granulométrica das amostras de solos coletadas nos pontos P26, P27, P28, P29, P30, P31, P32, P33, P34, P35, P36 e P37 localizados na topossequência 1	93
Tabela 10. Análises químicas e granulométrica das amostras de solos coletadas nos pontos T15, T16, T20, N01, N02, N03, N04, N05, N06, N17, N08, N09, N10, N11, N12 e N13 localizados na topossequência 2	110
Tabela 11. Análises químicas e granulométrica das amostras de solos coletadas nos pontos N14, N15, N16, N17, N18, N19, N20, N21, N22, N23, N24, N25, N26, N27, N28, N29, N30, N31, N32, N33, N34 e N35 localizados na topossequência 2.....	111
Tabela 12. Análises químicas e granulométrica das amostras de solos coletadas nos pontos N36, N37, N38, N40, N41, N42, N43, N44, N45, N46, N47, N48, N49, N50, N51, N52, N53, N54, N55 e N56 localizados na topossequência 2	112
Tabela 13. Tabela de contingência dos grupos criados pelo OSACA baseado nas análises espectrais e as classes de solos das amostras coletadas aleatoriamente da área total. CX: Cambissolo Háplico, GX: Gleissolo Háplico, LV: Latossolo Vermelho, PA: Argissolo Amarelo, PV: Argissolo Vermelho, PVA: Argissolo Vermelho-Amarelo, RL: Neossolo Litólico e R: Neossolo Regolítico	121
Tabela 14. Tabela de contingência dos grupos criados pelo OSACA baseado nas análises convencionais (químicas e granulométrica) e as classes de solos das amostras coletadas aleatoriamente da área total. CX: Cambissolo Háplico, GX: Gleissolo Háplico, LV: Latossolo Vermelho, PA: Argissolo Amarelo, PV: Argissolo	

Vermelho, PVA: Argissolo Vermelho-Amarelo, RL: Neossolo Litólico e R: Neossolo Regolítico 123

Tabela 15. Tabela de contingência dos grupos criados pelo OSACA baseado nas análises espectrais + análises convencionais (químicas e granulométrica) e as classes de solos das amostras coletadas aleatoriamente da área total. CX: Cambissolo Háplico, GX: Gleissolo Háplico, LV: Latossolo Vermelho, PA: Argissolo Amarelo, PV: Argissolo Vermelho, PVA: Argissolo Vermelho-Amarelo, RL: Neossolo Litólico e R: Neossolo Regolítico..... 125

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACP- Análise de Componentes Principais
AP- Acurácia do produtor
AU- Acurácia do usuário
BS- *Backslope*
Bt- Horizonte B textural
CC- Cobertura Cenozóica
CP- Componente Principal
Cpi- Formação Itararé
Cpi_{ar}- Formação Itararé (membro arenoso)
CX- Cambissolo Háplico
Dped- Distância pedológica
FS- *Footslope*
GRASS- *Geographic Resources Analysis Support System*
GX- Gleissolo Háplico
LV- Latossolo Vermelho
MANOVA- Análise de variância multivariada
MDE- Modelo Digital de Elevação
MDS- Mapeamento Digital de Solos
MDT- Modelo Digital do Terreno
NIR- Infravermelho próximo
Pti- Formação Tatuí (membro inferior)
PVA- Argissolo Vermelho-Amarelo
RL- Neossolo Litólico
RR- Neossolo Regolítico
SH- *Shoulder*
SU- *Summit*
SWIR- Infravermelho de ondas curtas
T1- Topossequência 1
T2- Topossequência 2
TS- *Toeslope*
Vis- Visível

1. INTRODUÇÃO

Os solos fornecem serviços ecossistêmicos vitais que suportam as necessidades humanas com alimentos, fibras e combustíveis. As suas utilizações inadequadas aumentam seus riscos de degradação e reduzem a sua conservação para as civilizações futuras (Carvalho et al., 2015; Grealish et al., 2015). O conhecimento do solo fornece um papel de ligação eficaz para o desenvolvimento sustentável e as questões relacionadas com as terras (Bouma, 2014). Para isso, os conhecimentos da distribuição dos seus atributos e dos seus tipos na paisagem são necessários em nível detalhado (Viscarra Rossel & Bouma, 2016). Essas informações podem ser representadas em mapas de solos. Entretanto, apenas 0,25% do território brasileiro está mapeado no nível adequado para sua utilização prática (Mendonça-Santos & Santos, 2007).

O mapeamento tradicional de solos pelo método categórico é o mais comumente usado (Legros, 2006). Ele se inicia com uma avaliação de trabalhos relacionados à geologia, geomorfologia, clima, entre outros, da área a ser mapeada. Posteriormente, envolve a observação dos aspectos geomórficos, estratigráficos, hidrológicos e ecológicos e o desenvolvimento de um modelo conceitual da relação do interior do solo (aspectos do perfil) com seu exterior (paisagem). Esse modelo, que na maioria das vezes não é documentado, é aplicado em áreas onde se deseja mapear visando delinear os diferentes tipos de solo na paisagem (Cook et al., 1996). Tal método é essencialmente baseado na experiência do pedólogo (conhecimento tácito), o que gera várias limitações, tais como a dificuldade na transmissão do conhecimento para outros pedólogos e na reprodução do modelo mental criado. Essa abordagem é essencialmente qualitativa, o que dificulta a transferência do modelo para outras áreas, requer elevado tempo de execução e aumenta a demanda financeira (MacMillan et al., 2000).

Uma nova abordagem vem se destacando com o intuito de minimizar as limitações do mapeamento tradicional de solos, conhecida como Mapeamento Digital de Solos (MDS). Tal método emprega um conjunto de procedimentos automáticos, quantitativos e objetivos (Shi et al., 2009; McBratney et al., 2003) que fazem o uso de técnicas estatísticas e geoestatísticas, imagens de satélite, árvores de regressão e classificação, redes neurais e outras técnicas que permitem o rápido processamento e extrapolação dos dados (Carvalho et al., 2015). O MDS baseia-se

principalmente na transferência do conhecimento tácito para explícito em que regras quantitativas da distribuição espacial de tipos de solos são armazenadas em ambiente de Sistema de Informação Geográfica e utilizadas na predição dos tipos de solos em áreas semelhantes (Behrens et al., 2013; McBratney et al., 2003). Contudo, essa abordagem é limitada na descrição da variação vertical do solo e no entendimento da relação solo-paisagem, pois muitas vezes não é considerada a influência de fatores intrínsecos que condicionam os processos de formação do solo (Shi et al., 2009; Burrough et al., 2000).

Para que os MDS apresentem elevado potencial de predição de atributos e tipo de solos na paisagem é necessário considerar a relação estratigrafia-geomorfologia-hidrologia com a distribuição espacial dos diversos tipos de solos existentes. Tal relação frequentemente pode ser melhor compreendida quando se faz uma segmentação das várias facetas da encosta (Daniels et al., 1971), uma vez que a distribuição dos atributos do solo está intimamente relacionada com as unidades do relevo (Minár & Evans, 2008; Pennock & Veldkamp, 2006; Thompson et al., 2006; Park et al., 2001). Por isso, para um bom desempenho dos processos de MDS é bastante útil fazer uma segmentação digital do relevo segundo suas diversas feições. Esta segmentação digital, quando feita em escala detalhada, é promissora para o MDS por várias razões, dentre elas: (a) seleção de locais mais representativos para descrição morfológica e coleta de amostras de solo (Drăguț & Dornik, 2016; Yang et al., 2012; Zhu et al., 2010; Park & Van De Giesen, 2004), (b) delimitação de unidades de mapeamento (Moravej et al., 2012), (c) desagregação de mapas de solos existentes, melhorando a escala e com isso sua aplicabilidade (Miller & Schaetzl, 2015) e (d) auxílio na extrapolação de informações para áreas que apresentam similaridade dos fatores de formação do solo, destacando-se o material de origem e o relevo (Pennock & Corre, 2001; MacMillan et al., 2000).

Atualmente, o aparecimento de novas geotecnologias, como sensores remotos e sistemas de informações geográficas, permitem a utilização de processos automáticos para segmentação do relevo e com isso, o entendimento da superfície do solo. Portanto, estudos que contribuam com metodologias automatizadas são bem oportunos para otimizar os mapeamentos de solos, visto que esses estão em emergentes demandas.

REFERÊNCIAS

- Behrens, T., Schmidt, K., Ramirez-Lopez, L., Gallant, J., Zhu, A.-X., Scholten, T., 2013. Hyper-scale digital soil mapping and soil formation analysis. *Geoderma* 213, 578–588. doi:10.1016/j.geoderma.2013.07.031
- Bouma, J., 2014. Soil science contributions towards Sustainable Development Goals and their implementation: Linking soil functions with ecosystem services. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 177, 111–120. doi:10.1002/jpln.201300646
- Burrough, P.A., van Gaans, P.F.M., MacMillan, R.A., 2000. High-resolution landform classification using fuzzy k-means. *Fuzzy Sets Syst.* 113, 37–52. doi:10.1016/S0165-0114(99)00011-1
- Carvalho, C.C.N., Nunes, F.C., Antunes, M.A.H., Nolasco, M.C., 2015. Soil Surveys in Brazil and Perspectives in Soil Digital Mapping. *Soil Horizons* 56, 1–9. doi:10.2136/sh14-01-0002
- Cook, S.E., Corner, R.J., Grealish, G., Gessler, P.E., Chartres, C.J., 1996. A Rule-based System to Map Soil Properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60, 1893–1900.
- Daniels, R.R., Gamble, E.E., Cady, J.G., 1971. The relation between geomorphology and soil morphology and genesis. *Advances in Agronomy* 23, 51-88.
- Drăguț, L., Dornik, A., 2016. Land-surface segmentation as a method to create strata for spatial sampling and its potential for digital soil mapping. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.* 30, 1359–1376. doi:10.1080/13658816.2015.1131828
- Grealish, G.J., Fitzpatrick, R.W., Hutson, J.L., 2015. Soil survey data rescued by means of user friendly soil identification keys and toposequence models to deliver soil information for improved land management. *GeoResJ* 6, 81–91. doi:10.1016/j.grj.2015.02.006
- Legros, J. P., 2006. Mapping of the soil. Science Publishers, Enfield.
- MacMillan, R.A., Pettapiece, W.W., Nolan, S.C., Goddard, T.W., 2000. A generic procedure for automatically segmenting landforms into landform elements using DEMs, heuristic rules and fuzzy logic. *Fuzzy Sets Syst.* 113, 81–109. doi:10.1016/S0165-0114(99)00014-7
- McBratney, A.B., Mendonça-Santos, M.L., Minasny, B., 2003. On digital soil mapping, *Geoderma* 117, 3-52. doi:10.1016/S0016-7061(03)00223-4
- Mendonça-Santos, M.L., Santos, H.G., 2007. The state of the art of Brazilian soil mapping and prospects for digital soil mapping, in: Lagacherie, P., McBratney, A.B., Voltz, M. (Eds.), *Digital soil mapping: An introductory perspective*. Elsevier, Amsterdam, pp. 39-55.
- Miller, B.A., Schaetzl, R.J., 2015. Digital classification of hillslope position. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 79, 132-145. doi:10.2136/sssaj2014.07.0287
- Minár, J., Evans, I.S., 2008. Elementary forms for land surface segmentation: The theoretical basis of terrain analysis and geomorphological mapping. *Geomorphology* 95, 236–259. doi:10.1016/j.geomorph.2007.06.003
- Moravej, K., Eghbal, M.K., Toomanian, N., Mahmoodi, S., 2012. Comparison of automated and manual landform delineation in semi detailed soil survey procedure. *African J. Agric. Res.* 7, 2592–2600. doi:10.5897/AJAR11.728
- Park, S.J., McSweeney, K.K., Lowery, B.B., 2001. Identification of the spatial distribution of soils using a process-based terrain characterization. *Geoderma* 103, 249–272. doi:10.1016/S0016-7061(01)00042-8

- Park, S.J., Van De Giesen, N., 2004. Soil-landscape delineation to define spatial sampling domains for hillslope hydrology. *J. Hydrol.* 295, 28–46. doi:10.1016/j.jhydrol.2004.02.022
- Pennock, D.J., Corre, M.D., 2001. Development and application of landform segmentation procedures. *Soil Tillage Res.* 58, 151–162. doi:10.1016/S0167-1987(00)00165-3
- Pennock, D.J., Veldkamp, A., 2006. Advances in landscape-scale soil research. *Geoderma* 133, 1–5. doi:10.1016/j.geoderma.2006.03.032
- Shi, X., Long, R., Dekett, R., Philippe, J., 2009. Integrating Different Types of Knowledge for Digital Soil Mapping. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73, 1682-1692. doi:10.2136/sssaj2007.0158
- Thompson, J.A., Pena-Yewtukhiw, E.M., Grove, J.H., 2006. Soil-landscape modeling across a physiographic region: Topographic patterns and model transportability. *Geoderma* 133, 57–70. doi:10.1016/j.geoderma.2006.03.037
- Viscarra Rossel, R.A., Bouma, J., 2016. Soil sensing: A new paradigm for agriculture. *Agric. Syst.* 148, 71–74. doi:10.1016/j.agry.2016.07.001
- Yang, L., Zhu, A.-X., Qi, F., Qin, C.-Z., Li, B., Pei, T., 2012. An integrative hierarchical stepwise sampling strategy for spatial sampling and its application in digital soil mapping. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.* 27, 1–23. doi:10.1080/13658816.2012.658053
- Zhu, A.X., Qi, F., Moore, A., Burt, J.E., 2010. Prediction of soil properties using fuzzy membership values. *Geoderma* 158, 199–206. doi:10.1016/j.geoderma.2010.05.001

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Importância do solo e sua representação espacial

Os solos são usados para muitos propósitos, que vão desde agricultura à engenharia civil, e fornecem uma ampla variedade de benefícios aos ecossistemas. No entanto, eles muitas vezes recebem menos consideração e atenção do que outros componentes da natureza, como as águas e as florestas, apesar de, quando usados pelo homem, estarem mais expostos à degradação por várias causas, tais como a erosão, salinização, desertificação, compactação e poluição (Zinck et al., 2016; Blum, 2013; Dumanski & Peiretti, 2013; Maqsood et al., 2013). São necessários séculos ou até mesmo milênios para formar alguns centímetros de solo (Alexandrovskiy, 2007), enquanto bilhões de toneladas de terras aráveis são erodidas a cada ano. Muitas vezes isso ocorre porque o solo permanece em grande parte desconhecido no nível adequado por aqueles que dele fazem uso.

Para proteger os solos é necessário conhecê-los, tanto como se formaram, como são constituídos e onde se localizam os seus diferentes tipos. Para saber onde ocorrem é necessário que eles sejam retratados em mapas de solos. Tais mapas ilustram áreas onde existe uma predominância de pedons similares no que diz respeito a sua gênese, morfologia, constituição e comportamento face a várias práticas de manejo (Grealish et al., 2015).

No Brasil apenas uma visão generalizada das grandes áreas dos diversos solos é mostrada em mapas do tipo exploratório ou de reconhecimento (escalas 1:500.000 ou menores), que cobrem 76% do País, mas pela sua pequena escala não são úteis em nível de propriedades agrícolas. Apenas 0,25% do território brasileiro está coberto por mapas de solos em níveis semidetalhados e detalhados ($\geq 1:50.000$) (Mendonça-Santos & Santos, 2007). Isto é pouco quando comparado, por exemplo, com os EUA, onde o *National Research Conservation Service* do *United States Department of Agriculture* (NRCS/USDA) já mapeou em detalhe (escala próxima de 1:30.000) os solos de quase todos os municípios, identificando as unidades de mapeamento a nível de série (Lepsch, 2013). Portanto, no Brasil existe uma premente necessidade de desenvolver métodos que facilitem os mapeamentos detalhados de solos.

2.2. Mapeamentos tradicionais de solos

Em essência, o método tradicional de mapeamento de solos envolve três operações: observações em campo, desenvolvimento de um modelo conceitual para relacionar as observações dos perfis de solos com a variação das feições da paisagem e aplicação desse modelo no mapeamento de solos de uma área visando prever os seus tipos onde seu perfil ainda não foi observado com prospecções *in loco* (Cook et al., 1996).

Tradicionalmente, os mapas de solo são realizados em levantamentos sistemáticos organizados por agências governamentais nacionais, como a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Lepsch, 2013). Entretanto, na última década estes levantamentos diminuíram consideravelmente por causa da falta de suporte governamental e da tendência de planejadores a desconsiderar informações sobre o solo. A multiplicação de desastres naturais, como deslizamentos de terra e inundações, e usos da terra para alimentos e biocombustíveis têm contribuído para criar a consciência pública sobre o papel relevante que os solos desempenham nos ambientes naturais e antrópicos e isso têm aumentado à demanda de mapas detalhados de solos (Zinck et al., 2016).

Levantamentos tradicionais de solo são dispendiosos e os países menos desenvolvidos não dispõem de recursos humanos e financeiros para realizá-los em todos os seus territórios. Além de ser dispendioso em tempo e custo, principalmente em análises laboratoriais subsequentes (McBratney et al., 2003; Scull et al., 2003), o método tradicional de mapeamento de solos é essencialmente baseado no conhecimento tácito de pedólogos com muitos anos de experiência em trabalhos de campo. Neste método os conhecimentos são implícitos, não documentados e intuitivos e, por isso, difíceis de serem reproduzidos (Shi et al., 2004; Hudson, 1992). Sobre isso, Hudson (1992) argumentou que os levantamentos de solos são deficientes no sentido de que não documentam o conhecimento científico usado para o delineamento das suas unidades de mapeamento de um modo formal e sistemático.

Para fazer levantamentos de solos de uma forma rentável e rápida, inovações tecnológicas e metodológicas para obtenção de dados e conversão em informações estão sendo desenvolvidas através de uma maior utilização de tecnologia da informação, usando técnicas de sensoriamento remoto, sistemas de

informações geográficas, modelagem e estatística espacial (Carvalho et al., 2015). Estes avanços tecnológicos têm facilitado o desenvolvimento de métodos para a manipulação computadorizada de diversas informações da paisagem que quando associadas as do solo permitem o seu mapeamento. Essa nova abordagem é conhecida como Mapeamento Digital de Solos (MDS) (McBratney et al., 2003).

2.3. Relação solo-paisagem nos mapeamentos de solos

A elaboração e documentação do modelo conceitual solo-paisagem, com o qual é possível compreender a distribuição espacial dos tipos de solos para facilitar seu mapeamento, requer a integração dos estudos pedológicos com outros ramos do conhecimento, principalmente dos relacionados à geomorfologia. O uso da geomorfologia integrado com a pedologia tem permitido acelerar e melhorar a qualidade do inventário dos solos, pois estes dois ramos do conhecimento são conceitualmente relacionados (Gerrard, 1992). As formas do relevo (geoformas) costumam ser as que mais auxiliam no delineamento de unidades de mapeamento de solos, enquanto que as descrições dos perfis de solos e as análises laboratoriais de seus constituintes subsidiam a sua caracterização e identificação segundo um sistema de classificação formalmente estruturado (Sarmadian et al., 2014).

As geoformas fornecem informações sobre três dos cinco fatores de formação do solo contidos na equação de Jenny (1941), são eles: relevo, material de origem e idade relativa dos corpos de solo (tempo). O relevo corresponde ao componente epígeo das geoformas, que pertence inerentemente ao domínio da geomorfologia, o material de origem é parcialmente geomórfico e geológico e o tempo é um fator de duas vias: a idade do material de origem (por exemplo, a idade absoluta ou relativa de um sedimento) ou a idade da geoforma como um todo (por exemplo, idade relativa de um terraço) que informa sobre a provável idade do solo (Zinck et al., 2016). Assim, a combinação da geomorfologia com a pedologia é benéfica para a compreensão da formação dos solos e para seu mapeamento.

O desenvolvimento dos estudos da relação pedologia-geomorfologia esteve intimamente relacionado com o período áureo dos levantamentos de solo durante a segunda metade do século XX, particularmente em países emergentes, pois estes precisavam das informações da distribuição espacial de solos em várias escalas para projetos de desenvolvimento e de irrigação agrícola (Miller & Schaetzl, 2015a). Em meados do século XX, o uso sistemático da fotointerpretação revolucionou o

processo de levantamento de solos e contribuiu para a mediação com a geomorfologia ser útil para identificar e delinear as unidades de mapeamento de solos na paisagem (Zinck et al., 2016). Nesse mesmo século, os países germânicos fizeram as primeiras tentativas de caracterização quantitativa do relevo (geomorfometria), já que antes era essencialmente qualitativa (Cook et al., 1996), e por isso, difícil de ser replicada e com custo elevado (MacMillan et al., 2000). No entanto, foi somente após a segunda guerra mundial que o uso sistemático de técnicas geomorfométricas começou a ser mais empregado para descrever características topográficas, parâmetros da rede e densidade de drenagem e outros atributos mensuráveis do relevo (Pike et al., 2009).

2.4. Análise digital do terreno (geomorfometria)

Nas últimas décadas, a tecnologia dos Modelos Digitais de Elevação (MDE) promoveu um novo impulso na extração automática de informações da superfície do terreno e na quantificação dos vários aspectos das formas do relevo (Drăguț & Blaschke, 2006; Burrough et al., 2000). Os estudos da geomorfometria, definida como a ciência da análise quantitativa da superfície do terreno (Pike, 2000), foram ampliados e centram-se em duas orientações: a específica, que analisa as características discretas da superfície do terreno (por exemplo, forma do terreno), e a geral, que enfoca nas superfícies contínuas (por exemplo, declividade) (Evans, 1972).

Há tentativas de classificar automaticamente as formas de relevo usando muitos parâmetros morfométricos da superfície do terreno, como declividade (inclinação), plano e perfil de curvatura, elevação relativa, orientação da vertente, índices de umidade e luminosidade, distância até o canal de drenagem, entre outros (Drăguț & Dornik, 2016; Vannamettee et al., 2014; MacMillan et al., 2003). Entretanto, o uso de muitas variáveis quantitativas provoca o efeito de multicolinearidade, ou seja, em razão da alta correlação entre algumas das variáveis, os modelos de classificação do relevo não são consistentes com a paisagem real (Iwahashi & Pike, 2007). Muitos trabalhos enfatizam que a elevação, declividade e perfil de curvatura estão entre os parâmetros do terreno mais fundamentais utilizados para categorizar as formas do terreno (Miller & Schaetzl, 2015b; Vannamettee et al., 2014; MacMillan et al., 2000), em razão destes estarem associados a posição e forma das feições do relevo na paisagem.

A implementação de algoritmos automatizados facilitou o mapeamento de unidades de relevo (Drăguț & Dornik, 2016; Jasiewicz & Stepinski, 2013; Etzelmüller et al., 2007; Iwahashi & Pike, 2007; MacMillan et al., 2003, Meybeck et al., 2001; Burrough et al., 2000; MacMillan et al., 2000), em razão dos métodos manuais demandarem muito tempo para a sua execução e intensos trabalhos de campo (Seijmonsbergen et al., 2011; Adediran et al., 2004) e são influenciados pela experiência do indivíduo na interpretação da paisagem, o que pode tendenciar a sua categorização e não ser reproduzível (Williams et al., 2012; Drăguț & Blaschke, 2006). Devido a isso, métodos de classificação automática do relevo se destacam em razão de possibilitar uma redução de tempo, dos custos e da subjetividade associada ao procedimento manual. Ventura & Irvin (2000) analisaram diferentes métodos automatizados de classificação de formas do terreno para estudos de solo-paisagem utilizando os modelos clássicos de Ruhe (1975) e Conacher & Dalrymple (1977), enquanto que Miller & Schaetzl (2015b) calibraram um modelo de classificação de elementos da encosta baseados em parâmetros geomorfométricos e observações realizadas no campo por pedólogos experientes.

O uso de parâmetros quantitativos do relevo permite descrever explicitamente variações contínuas das suas características com o apoio de várias técnicas, entre as quais se destacam as lógicas *fuzzy*, regras heurísticas, árvores de decisão, dentre outras (Miller, 2014; Drăguț & Blaschke, 2006; Burrough et al., 2000; MacMillan et al., 2000). No entanto, o uso de técnicas com limites discretos, como as do tipo *fuzzy*, pode ser menos eficiente na identificação de características diferenciadoras de geofomas quando elas têm limites abruptos, como é frequente em elementos da encosta. Por isso, em algumas vezes o mais indicado é o uso de técnicas com limites específicos, como é caso das árvores de decisão (Miller, 2014; Iwahashi & Pike, 2007; Sirtoli et al., 2008), por ter limites definidos e ser simples, o que facilita a sua reprodutibilidade.

A análise baseada em MDE permite interpretar as características gerais do relevo e caracterizar quantitativamente a superfície do terreno, mas esta é limitada na classificação de formas do terreno no sentido estreito do conceito, em razão do MDE conter apenas informações de elevação. Assim, é necessário utilizar variáveis do terreno que expressem a posição e a forma das feições do relevo. Apesar da classificação de elementos do relevo pela forma não transmitir informações sobre a sua origem, ela permite formular hipóteses sobre sua origem e idade das superfícies

geomórficas, informações estas que, por um longo período, mereceram pouca atenção nos estudos de gênese e classificação de solos (Daniels et al., 1971).

2.5. Sistema de classificação de unidades geomorfológicas

A classificação do relevo baseada em sua forma pode ser organizada hierarquicamente para refletir seu nível de adesão à paisagem geomorfológica. Por exemplo, um dique marginal de um rio é um membro de um terraço, que por sua vez é um membro de um vale. Portanto, dique, terraço e vale são colocados em categorias diferentes em um sistema hierárquico, porque correspondem a diferentes níveis de abstração (Zinck et al., 2016). Da mesma forma, Topo (*Summit*), Ombro (*Shoulder*), Meia-encosta (*Backslope*), Sopé coluvial (*Footslope*) e Sopé colúvio-aluvial (*Toeslope*) são elementos de uma encosta, que é um membro de um tipo de relevo de colinas (*hillland*) da paisagem (Figura 1). Assim, a alteração da escala de percepção não só muda o grau de detalhe, mas, de forma mais significativa, a natureza do objeto observado.

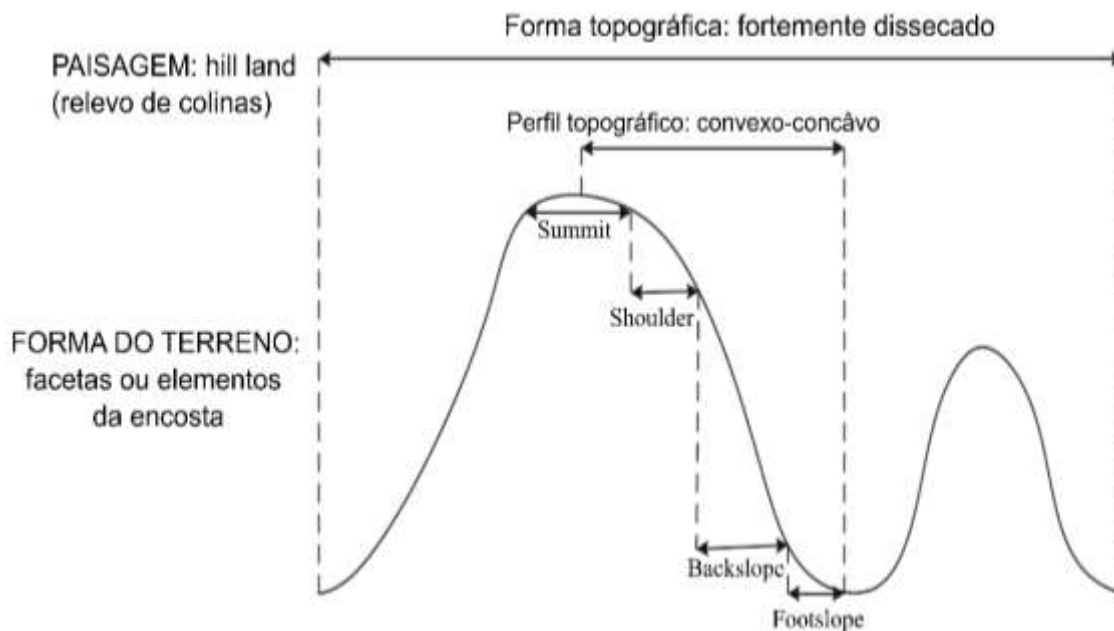


Figura 1. Relação entre níveis categóricos do sistema de classificação de geoforma e atributos topográficos (Adaptado: Zinck, 2016).

Ao contrário de outros ramos da ciência, a geomorfologia ainda carece de um sistema taxonômico formalmente hierarquizado para classificar as geoformas. Contudo, há um consenso para agrupá-las de acordo com os processos que operam

em determinado substrato geológico ou em determinadas zonas bioclimáticas (Zinck et al., 2016). A despeito disso, Zinck (1988), por exemplo, propôs um sistema hierárquico de classificação de geoformas que é disposto de acordo com a percepção de escala geográfica (Tabela 1). Nesse sistema considera-se forma da terra/terreno como um conceito genérico do nível mais baixo do sistema, que corresponde à unidade elementar geomorfológica cujas variações menores, tanto internas como externas, são sinalizadas por fases.

Tabela 1. Síntese do sistema de classificação de geoformas (Adaptado: Zinck, 1988)

Categoria	Conceito genérico	Breve definição
Ordem	Geoestrutura	Grande parte continental caracterizado por um dado tipo de macroestrutura geológica (cordilheira, geossinclinal, escudo)
Subordem	Ambiente morfogênico	Tipo amplo de ambiente biofísico originado e controlado por um estilo de geodinâmica interna e/ou externa (estrutural, deposicional, erosional, etc.)
Grupo	Paisagem geomórfica	Grande parte da terra/terreno caracterizado por dadas características fisiográficas: corresponde a uma repetição de tipos de relevo/modelagem semelhantes ou uma associação de tipos de relevo/modelagem diferentes (vale, platô, montanha, etc.)
Subgrupo	Relevo/modelagem	Tipo de relevo originado por uma dada combinação de estrutura topográfica e geológica (cuesta, <i>horst</i> , etc.)
Família	Litologia/fáceis	Tipo de modelagem determinada por condições morfoclimáticas específicas e/ou processos morfogenéticos (glaciais, terraço, delta, etc.)
Subfamília	Forma da terra/terreno	Tipo de geoforma básica caracterizada por uma combinação única de geometria, dinâmica e história

Percebe-se, assim, que o relevo não é essencialmente caótico, mas sim estruturado devido à história de processos geológicos e geomorfológicos que produziram a paisagem visível no momento e a sua forma pode ser principalmente descrita baseada em dois modos, (a) apenas na geometria e (b) na semântica, que captura e expressa à subjetividade do modelo mental utilizado para a identificação dos seus elementos (Dehn et al., 2001).

A segmentação de uma encosta em elementos interligados costuma ser considerada como o critério mais conveniente para subdividir um relevo acidentado, pois tem uma alta importância geométrica em termo de caracterização de vários tipos de paisagem (Dehn et al., 2001). No entanto, a deficiência de mapas base suficientemente detalhados – em razão da falta de dados ou adequada tecnologia para desenvolvê-los - tem restringido o uso de elementos da encosta como guia da paisagem nos mapeamentos de solos em grandes áreas e em escala detalhada (Carvalho et al., 2015; Miller & Schaetzl, 2015b). Além disso, superfícies erosionais, que são as mais comuns de ocorrerem, requerem uma base de dados em escalas grandes para poder representar o detalhe necessário, como um mapa planialtimétrico com equidistância pequena entre as curvas de nível (Daniels et al., 1971) ou um MDE obtido com radar (LiDAR) (Miller & Schaetzl, 2015b).

Os modelos de tipos de segmentos de encosta mais conhecidos são as nove unidades hipotéticas de Conacher & Dalrymple (1977) e os cinco elementos da encosta de Ruhe (1975). Esses modelos permitem subdividir a encosta em elementos (Tabela 2) e, ao mesmo tempo, integram os componentes considerando fluxo de água e sedimentos na paisagem (Gerrard, 1992).

Tabela 2. Descrição morfodinâmica dos elementos da encosta (Adaptado: Ruhe, 1975)

Elementos da encosta	Perfil topográfico	Morfodinâmica dominante
<i>Summit</i> ¹	Plano/Convexo	Ablação/erosão
<i>Shoulder</i> ²	Convexo	Erosão
<i>Backslope</i> ³	Retilínio/inclinado	Material em trânsito
<i>Footslope</i> ⁴	Côncavo	Acumulação lateral
<i>Toeslope</i> ⁵	Côncavo/plano	Acumulação longitudinal

¹Topo; ²Ombro; ³Meia-encosta; ⁴Sopé coluvial; ⁵Sopé colúvio-aluvial (Vidal-Torrado et al., 2005).

2.6. Elementos da encosta e suas relações com atributos do solo

Os princípios básicos de segmentação da encosta baseiam-se na hipótese de que seu perfil transversal possa ser caracterizado por mudanças (quebras) na inclinação ao longo dela (Miller & Schaetzl, 2015b) (Figura 2). Diferentemente de áreas planas, nas declivosas as relações entre geoformas e solos costumam ser bastante complexas. A translocação lateral das substâncias solúveis, partículas coloidais, fragmentos mais grossos na superfície do terreno e dentro do perfil do solo ao longo da encosta devem-se principalmente ao efeito do relevo sobre a hidrologia

A segmentação da paisagem em unidades que são topograficamente relacionadas, tais como os elementos de encosta, fornece uma base sólida para modelos de transferências espaciais dos atributos do solo (Pennock & Corre, 2001), uma vez que diferentes elementos da paisagem têm diferentes histórias e influenciam e são influenciadas de modo distinto pelos fatores de formação do solo (Daniels et al., 1971). Essa proposta é promissora para o mapeamento de solos, pois o uso dos segmentos do relevo podem orientar a amostragem de solo de forma que a diminuição do número de suas amostras não reduza a acurácia da representação da sua variabilidade espacial (Drăguț & Dornik, 2016). Além disso, em uma transeção feita do *summit* ao *toeslope* os delineamentos podem se repetir em encostas adjacentes, resultando em um padrão preditivo de solos (Zinck et al., 2016). Ainda, os mapas de geofomas em nível detalhado são muito bons mapas base, pois podem ser utilizados para facilitar a desagregação das unidades de solos atualmente mapeadas como complexos, bem como a identificação de inclusões que são associadas principalmente à variação do relevo (Miller & Schaetzl, 2015b). No entanto, este modelo idealizado não é aplicável em todas as paisagens, por isso, deve-se analisar previamente a área a ser mapeada antes da sua aplicação.

A implementação de critérios geomorfológicos no levantamento de solos melhora a identificação e o delineamento de unidades de mapeamento, uma vez que quando associados à estratigrafia e a história geomórfica da paisagem permite também interpretar a distribuição de solos na paisagem e sua relação com seus atributos físicos e químicos (Shary et al., 2002; Daniels et al., 1971). Ao mesmo tempo, a racionalidade da abordagem geopedológica contribui para compensar ou substituir parcialmente o que Hudson (1992) chamou de aquisição de conhecimento tácito para a aplicação do paradigma solo-paisagem. Os modelos de solo-paisagem idealizados por pedólogos são baseados em seus conhecimentos dos solos em locais onde eles realizaram trabalhos de campo ao longo de anos (Shi et al., 2012). Assim, a análise geopedológica integrada facilita a leitura da paisagem, porque o contexto geomórfico controla, em grande proporção, os tipos de solo que são encontrados associados a uma determinada posição na paisagem (MacMillan et al., 2004), como a sequência de *summit~shoulder~backslope~footslope~toeslope* ao longo de uma encosta.

O uso de modelos de paisagem tem mostrado que o relevo controla uma grande parte da variabilidade espacial não-aleatória dos solos (Thompson et al.,

2006; Gobin et al., 2001; Gessler et al., 1995). Wilding & Drees (1983) enfatizaram a importância das unidades de relevo (formas e elementos) para reconhecer e explicar as variações sistemáticas nos padrões de solo. Enquanto Olson (1997) observou que os padrões ou modelos de solo-geomorfologia podem ser aplicados de uma forma consistente e previsível no mapeamento de solos e considera que o pedólogo deve adquirir a capacidade de usar os padrões de distribuição de pedoformas para interpolar dentro de uma área de estudo ou extrapolar para áreas geográficas semelhantes (Zinck et al., 2016). Assim, a integração geoforma-solo facilita a extrapolação das informações obtidas em uma determinada área para áreas não visitadas ou de difícil acesso, utilizando, por exemplo, redes neurais artificiais, árvores de decisão, entre outras técnicas de estatística espacial (Brungard et al., 2015; Poggio et al., 2013; Grinand et al., 2008; MacMillan et al., 2000).

2.7. Resolução do modelo digital de elevação *versus* escala de análise

Para que um modelo de segmentos da encosta seja consistente com a realidade da paisagem é necessário que a escala de análise, ou seja, a combinação da resolução da célula (pixel) e o número de células incorporadas na análise de seus vizinhos (tamanho de janela) seja representativa (Albani et al., 2004), pois padrões observados em uma escala de análise frequentemente não são observados em outras (Miller & Schaetzl, 2015b). Um MDE de resolução espacial “grossa” ou um tamanho de janela inadequado limita a sua aplicação na classificação automática de feições detalhadas da paisagem (MacMillan et al., 2003), como os elementos da encosta.

Vários autores argumentam que a resolução espacial do MDE nem sempre é apropriada para caracterização dos elementos da paisagem, ou seja, pode não representar o fenômeno estudado (Darnell et al., 2008; Hengl, 2006; Holmes et al., 2000; Thompson et al., 2001; Zhu & Scott Mackay, 2001). Uma alternativa é calcular os parâmetros do terreno com MDE de diferentes resoluções (Behrens et al., 2010; Arrell et al., 2007; Florinsky & Kuryakova, 2000) ou com diferentes tamanhos de janela (Miller, 2014; Schmidt & Andrew, 2005; Fisher et al., 2004). Tecnicamente, isto significa que o procedimento normalmente usado para obter parâmetros do terreno, por exemplo, a aplicação de uma janela de 3x3 em um MDE a uma dada resolução, pode não ser representativo das características da paisagem (Drăguț et al., 2009), isso porque a escala de análise dependerá apenas da resolução do MDE

(Miller, 2014; Shi et al., 2012). Por exemplo, os valores de curvatura são tipicamente calculados dentro de uma janela 3x3, mas vários autores, tais como Drăguț et al. (2009), Schmidt et al., (2003) e Dikau (1989) demonstraram claras vantagens na computação desse parâmetro utilizando uma vizinhança maior. Por outro lado, para a declividade, Miller (2014) indica que esta deve ser calculada utilizando uma janela 3x3, pois representa a escala de análise geralmente utilizada pelo pedólogo no campo, e Shi et al. (2007) enfatizaram que um menor tamanho de janela é mais acurado para calcular esse parâmetro do terreno.

O tamanho da janela determinado pela resolução do MDE também pode acarretar problemas de incompatibilidade dos valores dos parâmetros do terreno obtidos no campo pela interpretação humana e por cálculo em computador, uma vez que os pedólogos que se dedicam ao mapeamento de solos sempre têm suas próprias escalas de medição. Essa incompatibilidade tornou-se uma importante fonte de erros no MDS baseado em extrapolações de dados de áreas mapeadas tradicionalmente usando conhecimento tácito (Shi et al., 2009) para áreas não mapeadas. Para compensar isso, Miller (2014) capturou a escala de análise usada por pedólogos experientes para as variáveis declividade, elevação relativa e perfil de curvatura e as utilizou em um modelo baseado em árvore de decisão para segmentar os elementos da encosta com o intuito de transformar o conhecimento tácito em explícito.

2.8. Espectroscopia no estudo de solos

Os mapeamentos de solos são dispendiosos, principalmente em relação à elevada quantidade de análises físicas e químicas das amostras de solo coletadas em campo que demandam tempo para que sejam finalizadas (Soriano-Disla et al., 2014). Métodos que otimizem essas análises são necessários, visando reduzir os custos e o tempo dessa etapa do mapeamento de solos. Dentre esses, o sensoriamento remoto tem sido considerado uma alternativa para minimizar essa defasagem (Mouazen et al., 2005), por ser uma técnica que permite que as medições das amostras sejam realizadas em apenas alguns segundos e vários atributos possam ser estimados a partir de uma única leitura (Terhoeven-Urselmans et al., 2008), como composição granulométrica, mineralogia, teor de matéria orgânica e ferro total (Stenberg et al., 2010)

O sensoriamento remoto proximal usando espectrorradiômetro que operam na região do visível, infravermelho próximo e de ondas curtas (Vis-NIR-SWIR: 350-2500 nm) é uma técnica promissora por não ser destrutiva, requerer pouca preparação da amostra e não envolver o uso de substâncias químicas (Viscarra Rossel et al., 2006). Os espectros de reflectância nessa região são resultado das interações entre a energia radiante e os átomos e moléculas dos constituintes do solo. Na região dos comprimentos de onda da luz visível (Vis), a alta energia de radiação, que corresponde a menores comprimentos de onda, provoca transições de elétrons entre órbitas atômicas com diferentes níveis de energia (Madeira Netto & Baptista, 2000). Com menor energia de radiação, associado a maiores comprimentos de onda correspondendo a região do NIR-SWIR, a absorção de energia ocorre em razão de vibrações das ligações moleculares, em que podem ser *overtones* (frequência pura) ou *combination tones* (resultante de duas ou mais frequências puras) (Viscarra Rossel & Behrens, 2010; Brown et al., 2006). Os quanta de energia absorvidos pela amostra são específicos das suas ligações atômicas e, por isso, são afetados pela sua composição química e propriedades físicas, como o tipo de grupo funcional, moléculas vizinhas, ligações de hidrogênio, estrutura da superfície, tamanho de partículas, entre outros (Cierniewski & Kuśnierek, 2010).

A região espectral do Vis-NIR-SWIR pode fornecer informações sobre os constituintes orgânicos e inorgânicos do solo, como matéria orgânica e tipos de argilominerais, e são apresentadas na forma de bandas ou feições de absorção no espectro eletromagnético. As feições relacionadas a esses constituintes foram estudadas por diversos autores (Viscarra Rossel et al., 2011; Brown et al., 2006) e as suas ocorrências são associadas a específicos comprimentos de onda do espectro eletromagnético. As feições de absorção na região visível, por exemplo, são principalmente associadas com minerais contendo ferro em sua estrutura, tais como hematita e goethita. A presença desses minerais no solo é evidenciada por fortes bandas de absorção próximo a 404, 444, 529 e 880 nm para hematita e próximo a 434, 480, 650 e 920 nm para goethita (Sherman & Waite, 1985). Enquanto que, as feições de absorção por argilominerais na região NIR-SWIR estão relacionadas principalmente com água estrutural e ligações de Mg, Al e Fe-OH na rede cristalina dos minerais (Soriano-Disla et al., 2014). Por exemplo, a esmectita tem uma banda de absorção próxima de 1900 nm em razão da combinação de vibrações de água ligadas na sua intercamada e água adsorvida na superfície das

partículas (Weidong et al., 2002). Enquanto que, as bandas de absorção em 2200 e 2500 nm são associadas a vibrações de combinação envolvendo o alongamento de O-H e curvatura de metal-OH e são evidentes para vários minerais com picos ligeiramente diferentes para cada um deles (Stenberg et al., 2010).

Assim, a partir da interpretação da curva espectral em relação à sua intensidade de reflectância, forma e feições de absorção é possível identificar alguns atributos dos solos e com isso, diferenciá-los (Demattê et al., 2014).

REFERÊNCIAS

- Adediran, A.O., Parcharidis, I., Poscolieri, M., Pavlopoulos, K., 2004. Computer-assisted discrimination of morphological units on north-central Crete (Greece) by applying multivariate statistics to local relief gradients. *Geomorphology* 58, 357–370. doi:10.1016/j.geomorph.2003.07.024
- Albani, M., Klinkenberg, B., Andison, D.W., Kimmins, J.P., 2004. The choice of window size in approximating topographic surfaces from Digital Elevation Models. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.* 18, 577–593. doi:10.1080/13658810410001701987
- Alexandrovskiy, A.L., 2007. Rates of soil-forming processes in three main models of pedogenesis. *Rev. Mex. Ciencias Geol.* 24, 283–292.
- Anderson, M.G., Burt, T.P., Speight, J.G., 1978. The role of topography in controlling throughflow generation. *Earth Surf. Process.* 3, 187–195. doi:10.1002/esp.3290030402
- Arrell, K.E., Fisher, P.F., Tate, N.J., Bastin, L., 2007. A fuzzy c-means classification of elevation derivatives to extract the morphometric classification of landforms in Snowdonia, Wales. *Comput. Geosci.* 33, 1366–1381. doi:10.1016/j.cageo.2007.05.005
- Behrens, T., Zhu, A.-X., Schmidt, K., Scholten, T., 2010. Multi-scale digital terrain analysis and feature selection for digital soil mapping. *Geoderma* 155, 175–185. doi:10.1016/j.geoderma.2009.07.010
- Birkeland, P.W., 1999. *Soils and geomorphology*. Oxford University Press, New York.
- Blum, W.E.H., 2013. Soil and Land Resources for Agricultural Production: General Trends and Future Scenarios-A Worldwide Perspective. *Int. Soil Water Conserv. Res.* 1, 1–14. doi:10.1016/S2095-6339(15)30026-5
- Brown, D.J., Shepherd, K.D., Walsh, M.G., Dewayne Mays, M., Reinsch, T.G., 2006. Global soil characterization with VNIR diffuse reflectance spectroscopy. *Geoderma* 132, 273–290. doi:10.1016/j.geoderma.2005.04.025
- Brungard, C.W., Boettinger, J.L., Duniway, M.C., Wills, S.A., Edwards, T.C., 2015. Machine learning for predicting soil classes in three semi-arid landscapes. *Geoderma* 239, 68–83. doi:10.1016/j.geoderma.2014.09.019
- Burrough, P.A., van Gaans, P.F.M., MacMillan, R.A., 2000. High-resolution landform classification using fuzzy k-means. *Fuzzy Sets Syst.* 113, 37–52. doi:10.1016/S0165-0114(99)00011-1
- Carvalho, C.C.N., Nunes, F.C., Antunes, M.A.H., Nolasco, M.C., 2015. Soil Surveys in Brazil and Perspectives in Soil Digital Mapping. *Soil Horizons* 56, 1–9. doi:10.2136/sh14-01-0002
- Cierniewski, J., Kuśnierek, K., 2010. Influence of several soil properties on soil surface reflectance. *Quaest. Geogr.* 29, 13–25. doi:10.2478/v10117-010-0002-9.A
- Conacher, A.J., Dalrymple, J.B., 1977. The nine unit landsurface model and pedogeomorphic research. *Geoderma* 18, 127-144. doi:10.1016/0016-7061(77)90087-8
- Cook, S.E., Corner, R.J., Grealish, G., Gessler, P.E., Chartres, C.J., 1996. A rule-based system to map soil properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60, 1893–1900.
- Daniels, R.R., Gamble, E.E., Cady, J.G., 1971. The relation between geomorphology and soil morphology and genesis. *Advances in Agronomy* 23, 51-88.

- Darnell, A.R., Tate, N.J., Brunson, C., 2008. Improving user assessment of error implications in digital elevation models. *Comput. Environ. Urban Syst.* 32, 268–277. doi:10.1016/j.compenvurbsys.2008.02.003
- Dehn, M., Gärtner, H., Dikau, R., 2001. Principles of semantic modeling of landform structures. *Comput. Geosci.* 27, 1005–1010. doi:10.1016/S0098-3004(00)00138-2
- Demattê, J.A.M., Bellinaso, H., Romero, D.J., Fongaro, C.T., 2014. Morphological Interpretation of Reflectance Spectrum (MIRS) using libraries looking towards soil classification. *Sci. Agric.* 71, 509–520. doi:10.1590/0103-9016-2013-0365
- Dikau, R., 1989. The application of a digital relief model to landform analysis, in: Raper, J. F. (Ed.), *Three Dimensional Applications in Geographical Information Systems*. Taylor & Francis, London, pp. 51–77.
- Drăguț, L., Dornik, A., 2016. Land-surface segmentation as a method to create strata for spatial sampling and its potential for digital soil mapping. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.* 30, 1359–1376. doi:10.1080/13658816.2015.1131828
- Drăguț, L., Schauppenlehner, T., Muhar, A., Strobl, J., Blaschke, T., 2009. Optimization of scale and parametrization for terrain segmentation: An application to soil-landscape modeling. *Comput. Geosci.* 35, 1875–1883. doi:10.1016/j.cageo.2008.10.008
- Drăguț, L., Blaschke, T., 2006. Automated classification of landform elements using object-based image analysis. *Geomorphology* 81, 330–344. doi:10.1016/j.geomorph.2006.04.013
- Dumanski, J., Peiretti, R., 2013. Modern concepts of soil conservation. *Int. Soil Water Conserv. Res.* 1, 19–23. doi:10.1016/S2095-6339(15)30046-0
- Etzelmüller, B., Romstad, B., Fjellanger, J., 2007. Automatic regional classification of topography in Norway. *Nor. J. Geol.* 87, 167–180.
- Evans I.S., 1972. General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics, in: Chorley R.J. (Ed.), *Spatial Analysis in Geomorphology*. Methuen, London, pp. 17–90.
- Fisher, P., Wood, J., Cheng, T., 2004. Where is Helvellyn? Fuzziness of multi-scale landscape morphometry. *Trans. Inst. Br. Geogr.* 29, 106–128. doi:10.1111/j.0020-2754.2004.00117.x
- Florinsky, I. V., Kuryakova, G.A., 2000. Determination of grid size for digital terrain modelling in landscape investigations—exemplified by soil moisture distribution at a micro-scale. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.* 14, 8015–832. doi:10.1080/13658816.2014.908472
- Gerrard, J., 1992. *Soil Geomorphology: An Integration of Pedology and Geomorphology*. Chapman and Hall, London.
- Gessler, P.E., Moore, I.D., McKenzie, N.J.J., Ryan, P.J., 1995. Soil-landscape modelling and spatial prediction of soil attributes. *Int. J. Geogr. Inf. Syst.* 9, 421–432. doi:10.1080/02693799508902047
- Gobin, A., Campling, P., Feyen, J., 2001. Soil-landscape modelling to quantify spatial variability of soil texture. *Phys. Chem. Earth, Part B: Hydrol. Ocean. Atmos.* 26, 41–45. doi:10.1016/S1464-1909(01)85012-7
- Grealish, G.J., Fitzpatrick, R.W., Hutson, J.L., 2015. Soil survey data rescued by means of user friendly soil identification keys and toposequence models to deliver soil information for improved land management. *GeoResJ* 6, 81–91. doi:10.1016/j.grj.2015.02.006

- Grinand, C., Arrouays, D., Laroche, B., Martin, M.P., 2008. Extrapolating regional soil landscapes from an existing soil map: Sampling intensity, validation procedures, and integration of spatial context. *Geoderma* 143, 180–190. doi:10.1016/j.geoderma.2007.11.004
- Hengl, T., 2006. Finding the right pixel size. *Comput. Geosci.* 32, 1283–1298. doi:10.1016/j.cageo.2005.11.008
- Holmes, K.W., Chadwick, O.A., Kyriakidis, P.C., 2000. Error in a USGS 30-meter digital elevation model and its impact on terrain modeling. *J. Hydrol.* 233, 154–173. doi:10.1016/S0022-1694(00)00229-8
- Hudson, B.D., 1992. The soil survey as paradigm-based science. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56, 836–841.
- Iwahashi, J., Pike, R.J., 2007. Automated classifications of topography from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature. *Geomorphology* 86, 409–440. doi:10.1016/j.geomorph.2006.09.012
- Jasiewicz, J., Stepinski, T.F., 2013. Geomorphons—a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms. *Geomorphology* 182, 147–156. doi:10.1016/j.geomorph.2012.11.005
- Jenny H., 1941. *Factors of Soil Formation*. McGraw-Hill, New York.
- Kagabo, D.M., Stroosnijder, L., Visser, S.M., Moore, I.D., 2013. Soil erosion, soil fertility and crop yield on slow-forming terraces in the highlands of Buberuka, Rwanda. *Soil Tillage Res.* 128, 23–29. doi:10.1016/j.still.2012.11.002
- Korobova, E., Romanov, S., 2011. Experience of mapping spatial structure of Cs-137 in natural landscape and patterns of its distribution in soil toposequence. *J. Geochemical Explor.* 109, 139–145. doi:10.1016/j.gexplo.2011.02.006
- Lepsch, I.F., 2013. Status of Soil Surveys and Demand for Soil Series Descriptions in Brazil. *Soil Horizons* 54, 1–5. doi:10.2136/sh2013-54-2-gc
- Lu, N., Kaya, B.S., Godt, J.W., 2011. Direction of unsaturated flow in a homogeneous and isotropic hillslope. *Water Resour. Res.* 47, 1–15. doi:10.1029/2010WR010003
- Madeira Netto, J.S., Baptista, G.M.M., 2000. *Reflectância espectral de solos*. Planaltina, Embrapa Cerrados.
- MacMillan, R.A., Jones, R.K., McNabb, D.H., 2004. Defining a hierarchy of spatial entities for environmental analysis and modeling using digital elevation models (DEMs). *Comput. Environ. Urban Syst.* 28, 175–200. doi:10.1016/S0198-9715(03)00019-X
- MacMillan, R.A., Martin, T.C., Earle, T.J., McNabb, D.H., 2003. Automated analysis and classification of landforms using high-resolution digital elevation data: Applications and issues. *Can. J. Remote Sens.* 29, 592–606. doi:10.5589/m03-031
- MacMillan, R.A., Pettapiece, W.W., Nolan, S.C., Goddard, T.W., 2000. A generic procedure for automatically segmenting landforms into landform elements using DEMs, heuristic rules and fuzzy logic. *Fuzzy Sets Syst.* 113, 81–109. doi:10.1016/S0165-0114(99)00014-7
- Malo, D.D., Worcester, B.K., Cassel, D.K., Matzdorf, K.D., 1974. Soil-landscape relationships in a closed drainage system. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 38, 813–818. doi:10.2136/sssaj1974.385813x
- Maqsood, M.A., Hussain, S., Aziz, T., Ashraf, M., 2013. Sustainable agriculture through integrated soil fertility management on degraded lands, in: Shahid, S.A., Abdelfattah, M.A., Taha, F.K. (Eds.), *Developments in Soil Salinity Assessment and Reclamation*. Springer, Netherlands, pp 759-768.

- McBratney, A.B., Mendonça-Santos, M.L., Minasny, B., 2003. On digital soil mapping. *Geoderma* 117, 3-52. doi:10.1016/S0016-7061(03)00223-4
- Mendonça-Santos, M.L., Santos, H.G., 2007. The state of the art of Brazilian soil mapping and prospects for digital soil mapping, in: Lagacherie, P., McBratney, A.B., Voltz, M. (Eds.), *Digital soil mapping: An introductory perspective*. Elsevier, Amsterdam, pp. 39-55.
- Meybeck, M., Green, P., Vörösmarty, C., 2001. A new typology for mountains and other relief classes: an application to global continental water resources and population distribution. *Mt. Res. Dev.* 21, 34–45.
- Miller, B.A., 2014. Semantic calibration of digital terrain analysis scale. *Cartogr. Geogr. Inf. Sci.* 41, 166–176. doi:10.1080/15230406.2014.883488
- Miller, B.A., Schaetzl, R.J., 2015a. History of soil geography in the context of scale. *Geoderma* 264, 284-300. doi:10.1016/j.geoderma.2015.08.041
- Miller, B.A., Schaetzl, R.J., 2015b. Digital classification of hillslope position. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 79, 132-145. doi:10.2136/sssaj2014.07.0287
- Mouazen, A.M., Karoui, R., Baerdemaeker, J., Ramon, H., 2005. Classification of soil texture classes by using soil visual near infrared spectroscopy and factorial discriminant analysis techniques. *Near Infrared Spectrosc.* 13, 231–240.
- Olson, C.G., 1997. Systematic soil-geomorphic investigations: contributions of RV Ruhe to pedologic interpretation, in: Yaalon, D.H., Berkowicz, S. (Eds.), *History of Soil Science*. Catena Verlag, Germany, pp. 415–438.
- Pennock, D.J., Corre, M.D., 2001. Development and application of landform segmentation procedures. *Soil Tillage Res.* 58, 151–162. doi:10.1016/S0167-1987(00)00165-3
- Pike, R.J., Evans, I.S., Hengl, T., 2009. Geomorphometry: A brief guide, in: Hengl, T., Reuter, H.I. (Eds.), *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*. Elsevier, Amsterdam, pp. 1-28.
- Pike, R.J., 2000. Geomorphometry - diversity in quantitative surface analysis. *Prog. Phys. Geogr.* 1, 1–20. doi:10.1191/030913300674449511
- Poggio, L., Gimona, A., Brewer, M.J., 2013. Regional scale mapping of soil properties and their uncertainty with a large number of satellite-derived covariates. *Geoderma* 209–210, 1–14. doi:10.1016/j.geoderma.2013.05.029
- Ruhe, R. V., 1975. Climatic geomorphology and fully developed slopes. *Catena* 2, 309–320. doi:10.1016/S0341-8162(75)80019-1
- Sarmadian, F., Mousavi, S.R., Iqbal, M., Keshavarzi, A., Sadeghnejad, M., 2014. Investigation the variation of soil mapping units using geopedological approach. *Acta Adv. Agric. Sci.* 2, 1–9.
- Schmidt, J., Andrew, R., 2005. Multi-scale landform characterization. *Area* 37, 341–350. doi:10.1111/j.1475-4762.2005.00638.x
- Schmidt, J., Evans, I.S., Brinkmann, J., 2003. Comparison of polynomial models for land surface curvature calculation. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.* 17, 797–814. doi:10.1080/13658810310001596058
- Scull, P., Franklin, J., Chadwick, O. a., McArthur, D., 2003. Predictive soil mapping: a review. *Prog. Phys. Geogr.* 27, 171–197. doi:10.1191/0309133303pp366ra
- Seijmonsbergen, A.C., Hengl, T., Anders, N.S., 2011. Semi-automated identification and extraction of geomorphological features using digital elevation data, in: Smith, M.J., Paron, P., Griffiths, J. S. (Eds.), *Geomorphological Mapping Methods and Applications*. Elsevier, Amsterdam. doi:10.1016/B978-0-444-53446-0.00010-0

- Shary, P.A., Sharaya, L.S., Mitusov, A. V., 2002. Fundamental quantitative methods of land surface analysis. *Geoderma* 107, 1–32. doi:10.1016/S0016-7061(01)00136-7
- Sherman, D.M., Waite, T.D., 1985. Electronic spectra of Fe³⁺ oxides and oxide hydroxides in the near IR to near UV. *Am. Mineral.* 70, 1262–1269. doi:12-1262\$02.00
- Shi, X., Girod, L., Long, R., DeKett, R., Philippe, J., Burke, T., 2012. A comparison of LiDAR-based DEMs and USGS-sourced DEMs in terrain analysis for knowledge-based digital soil mapping. *Geoderma* 170, 217–226. doi:10.1016/j.geoderma.2011.11.020
- Shi, X., Long, R., Dekett, R., Philippe, J., 2009. Integrating Different Types of Knowledge for Digital Soil Mapping. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73, 1682-1692. doi:10.2136/sssaj2007.0158
- Shi, X., Zhu, A., Burt, J.E., Choi, W., Wang, R., Pei, T., Li, B., Qin, C., 2007. An experiment using a circular neighborhood to calculate slope gradient from a DEM. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 73, 143–154. doi:10.14358/PERS.73.2.143
- Shi, X., Zhu, A.-X., Burt, J.E., Qi, F., Simonson, D., 2004. A case-based reasoning approach to fuzzy soil mapping. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68, 885–894.
- Sinai, G., Dirksen, C., 2006. Experimental evidence of lateral flow in unsaturated homogeneous isotropic sloping soil due to rainfall. *Water Resour. Res.* 42, 1–12. doi:10.1029/2005WR004617
- Sirtoli, A.E., Silveira, C.T., Mantovani, L.E., Oka-Fiori, C., 2008. Atributos do relevo derivados de modelo digital de elevação e suas relações com solos. *Sci. Agrar.* 9, 317–329.
- Soriano-Disla, J.M., Janik, L.J., Viscarra Rossel, R.A., Macdonald, L.M., McLaughlin, M.J., 2014. The Performance of Visible, Near-, and Mid-Infrared Reflectance Spectroscopy for Prediction of Soil Physical, Chemical, and Biological Properties. *Appl. Spectrosc. Rev.* 49, 139–186. doi:10.1080/05704928.2013.811081
- Stenberg, B., Viscarra Rossel, R.A., Mouazen, A.M., Wetterlind, J., 2010. Visible and Near Infrared Spectroscopy in Soil Science, in: Sparks, D.L. (Ed.), *Advances in Agronomy*. Academic Press, Burlington, pp. 163-215. doi: 10.1016/S0065-2113(10)07005-7
- Terhoeven-Urselmans, T., Schmidt, H., Georg Joergensen, R., Ludwig, B., 2008. Usefulness of near-infrared spectroscopy to determine biological and chemical soil properties: Importance of sample pre-treatment. *Soil Biol. Biochem.* 40, 1178–1188. doi:10.1016/j.soilbio.2007.12.011
- Thompson, J.A., Pena-Yewtukhiw, E.M., Grove, J.H., 2006. Soil-landscape modeling across a physiographic region: Topographic patterns and model transportability. *Geoderma* 133, 57–70. doi:10.1016/j.geoderma.2006.03.037
- Thompson, J.A., Bell, J.C., Butler, C.A., 2001. Digital elevation model resolution effects on terrain attribute calculation and quantitative soil-landscape modeling. *Geoderma* 100, 67–89. doi:10.1016/S0016-7061(00)00081-1
- Tsatskin, A., Sandler, A., Porat, N., 2013. Toposequence of sandy soils in the northern coastal plain of Israel: Polygenesis and complexity of pedogeomorphic development. *Geoderma* 197–198, 87–97. doi:10.1016/j.geoderma.2013.01.001

- Vannamettee, E., Babel, L. V., Hendriks, M.R., Schuur, J., Jong, S.M., Bierkens, M.F.P., Karssenbergh, D., 2014. Semi-automated mapping of landforms using multiple point geostatistics. *Geomorphology* 221, 298–319. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.05.032>
- Ventura, S.J., Irvin, B.J., 2000. Landform classification for soil landscape studies, in: Wilson, J.C., Gallant, J.C. (Eds.), *Terrain analysis - principles and application*. Wiley, New York, pp. 267-294.
- Vidal-Torrado, P., Lepsch, I. F., Castro, S. S., 2005. Conceitos e aplicações das relações pedologia-geomorfologia em regiões tropicais úmidas, in: Vidal-Torrado, P., Alleoni, L. R. F., Cooper, M., Silva, A. P., Cardoso, E. J., Prochnow, L. I. (Eds.), *Tópicos em Ciência do Solo*. SBSCS, Viçosa, pp.145-192.
- Viscarra Rossel, R.A., Adamchuk, V.I., Sudduth, K.A., McKenzie, N.J., Lobsey, C., 2011. Proximal Soil Sensing. An Effective Approach for Soil Measurements in Space and Time, in: Sparks, D. (Ed.), *Advances in Agronomy*. Burlington, Academic Press, pp. 237-282. doi:10.1016/B978-0-12-386473-4.00010-5
- Viscarra Rossel, R.A., Behrens, T., 2010. Using data mining to model and interpret soil diffuse reflectance spectra. *Geoderma* 158, 46–54. doi:10.1016/j.geoderma.2009.12.025
- Viscarra Rossel, R.A., Walvoort, D.J.J., McBratney, A.B., Janik, L.J., Skjemstad, J.O., 2006. Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. *Geoderma* 131, 59–75. doi:10.1016/j.geoderma.2005.03.007
- Weidong, L., Baret, F., Xingfa, G., Qingxi, T., Lanfen, Z., Bing, Z., 2002. Relating soil surface moisture to reflectance. *Remote Sens. Environ.* 81, 238–246. doi:10.1016/S0034-4257(01)00347-9
- Wilding, L.P., Drees, L.R., 1983. Spatial variability and pedology, in: Wilding, L.P., Smeck, N.E., Hall, G.F. (Eds.), *Pedogenesis and Soil Taxonomy: 1. Concepts and Interactions*. Elsevier, Amsterdam, pp.83-116.
- Williams, M., Kuhn, W., Painho, M., 2012. The influence of landscape variation on landform categorization. *J. Spat. Inf. Sci.* 5, 51–73. doi:10.5311/JOSIS.2012.5.107
- Wysocki, D.A., Schoenberger, P. J., Hirmas, D. R., LaGarry, H.E., 2011. Geomorphology of soil landscapes, in: Huang, P. M., Li, Y., Summer, M.E. (Eds.), *Handbook of soil science*. CRC Press, Boca Raton, pp. 969-994.
- Zinck, J. A., 1988. *Physiography and soils*. Lecture notes. Enschede, The Netherlands: International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC).
- Zinck, J.A., Metternicht, G., Bocco, G., Del Valle, H. F., 2016. *Geopedology: an integration of geomorphology and pedology for soil and landscapes studies*. Springer, London.
- Zhu, A.-X., Scott Mackay, D., 2001. Effects of spatial detail of soil information on watershed modeling. *J. Hydrol.* 248, 54–77. doi:10.1016/S0022-1694(01)00390-0

3. SEGMENTAÇÃO DIGITAL DOS ELEMENTOS DA ENCOSTA E SUAS RELAÇÕES COM TIPOS DE SOLOS

Resumo

Os conhecimentos das relações solo-paisagem têm sido tradicionalmente usados como guia para mapeamentos de solos. Eles têm sido aplicados na forma de conhecimentos tácitos dos pedólogos com muitos anos de experiência. Desta forma, eles são pouco explícitos e de difícil quantificação. Sua explicitação e quantificação – em especial a segmentação das unidades do relevo – podem ser úteis nos mapeamentos de solos. Os objetivos desse trabalho são (a) segmentar os elementos das encostas em nível detalhado utilizando uma árvore de decisão, (b) analisar a relação desses elementos com os tipos de solos e (c) avaliar o uso de um algoritmo de similaridade para agrupar classes de solos com base em suas análises espectrais, convencionais e a associação delas. Os parâmetros declividade, perfil de curvatura e elevação relativa foram hierarquizados em uma árvore de decisão para identificar e mapear os elementos das encostas. A partir desse mapa associado a um mapa geológico pré-existente, amostras de solos foram coletadas na área total e em duas topossequências. Essas foram analisadas no laboratório e em um espectrorradiômetro (350-2500 nm). Seus resultados foram usados para classificar os solos e avaliar a similaridade das suas amostras, baseado em três conjuntos de variáveis (análises espectrais, convencionais e associação delas). A segmentação dos elementos da encosta em nível detalhado (área mínima mapeável de 0,05 ha) apresentou alta concordância com as observações de campo, com elevado Kappa e baixo erro. O topo (*summit*), meia-encosta (*backslope*) e sopé colúvio-aluvial (*toeslope*) estão entre os elementos que melhor foram identificados pelo modelo digital. Para o ombro (*shoulder*) e o sopé coluvial (*footslope*), houve discrepâncias associadas possivelmente a erros no modelo digital de elevação, gerado pelas curvas de nível obtidas de mapas planialtimétricos. A topossequência com uma superfície geomórfica mais recente apresentou menores variações nos atributos e tipos de solo ao invés da mais antiga. A análise de similaridade baseada nas análises espectrais associadas às convencionais agrupou melhor as classes de solos semelhantes do que os outros conjuntos de variáveis, quando analisados nas topossequências. Para as amostras de solo da área total, todos os conjuntos de variáveis agruparam classes de solo distintas. A classificação digital dos segmentos da encosta prestou-se como útil para o mapeamento de solos digital ou convencional (detalhado ou ultradetalhado).

Palavras-chave: Geomorfologia quantitativa; Análises convencionais de solo; Espectroscopia; Análise de agrupamento

Abstract

The knowledge of soil-landscape relationships has been traditionally used as a guide for soil mapping. They have been applied using the tacit knowledge of field experienced pedologists. Thus, they are not explicit and difficult to quantify. Their explicitness and quantification, especially the segmentation of relief units, can be useful in soils mappings. The goals of this research are (a) to segment the hillslope elements in detailed level using one decision tree, (b) analyze the relation of these elements with soils types and (c) evaluate the use of a similarity algorithm to group soils classes based on their spectral and conventional analyses and an association of them. Parameters such as slope, curvature profile and relative elevation were hierarchized in a decision tree in order to identify and map hillslope elements. Soil samples were collected in the total area and in two toposequences based from this map associated with a preexisting geological map. They were analyzed in the laboratory and in a spectroradiometer (350-2500 nm). Their results were used to classify soils and to evaluate the similarity of their samples, based on three sets of variables (spectral and conventional analyses and an association of them). The segmentation of hillslope elements in detailed level (minimum mappable area of 0.05 ha) presented high agreement with the field observations, with high Kappa and low error. The summit, backslope and toeslope are among the elements that were best identified by the digital model. There were discrepancies for the shoulder and footslope, possibly associated with errors in the digital elevation model, generated by the contour lines obtained from planialtimetric maps. The toposequence with a more recent geomorphic surface presented smaller variations in soil attributes and types instead of the oldest one. The similarity analysis based on spectral analysis associated to conventional ones grouped similar soil classes better than the other sets of variables when analyzed in toposequences. For soil samples from the total area, all sets of variables grouped distinct soil classes. The digital classification of hillslope elements was found to be useful for digital or conventional 1st and 2nd order soil surveys.

Keywords: Quantitative geomorphology; Soil conventional analyses; Spectroscopy; Cluster analysis

3.1. Introdução

Segundo Whitehead (citado por Buol et al., 2011) o desenvolvimento de um ramo do conhecimento científico deve passar por três fases distintas: (a) descritiva, (b) quantitativa e (c) preditiva. No que se refere a levantamentos de solos é de se notar que estas três fases estão bem desenvolvidas em relação aos perfis de solos ou pedons, pois eles são descritos com muitos detalhes, amostras são analisadas no

laboratório para quantificar seus atributos e análises espaciais são muitas vezes realizadas para prever atributos em locais não amostrados. Contudo, o mesmo não é verdadeiro para os atributos da superfície do solo (pedopaisagem). Tanto as descrições como a quantificação das várias feições da superfície do solo geralmente são negligenciadas nos levantamentos de solos efetuados no Brasil.

Uma forma de compensar isso seria explicitando e documentando as feições das paisagens, utilizando os conhecimentos tácitos adquiridos ao longo dos anos pelos pedólogos que mapeiam solos (Bathgate & Duram, 2003). Esses conhecimentos, por serem implícitos, são difíceis de serem documentados e reproduzidos (Shi et al., 2009). Frente a isso, uma abordagem quantitativa permitirá gerar e armazenar informações das características da paisagem úteis aos mapeamentos de solos, de forma consistente, atualizável, quantificável e reproduzível.

Muitos pesquisadores enfatizam a importância do relevo no estudo da distribuição espacial dos tipos de solo na paisagem. Entretanto, há poucos estudos que realizaram o mapeamento digital de feições detalhadas do relevo e as relacionaram com atributos e tipos de solos (Miller & Schaetzl, 2015; Drăguț & Blaschke, 2006; MacMillan et al., 2005; Bathgate & Duram, 2003; Burrough et al., 2000; MacMillan et al., 2000). No Brasil, vários trabalhos identificaram as feições do relevo e as relacionaram com atributos e tipos do solo (Guadagnin & Trentin, 2014; Barrios et al., 2012; Siqueira et al., 2010; Sirtoli et al., 2008; Marques Júnior & Lepsch, 2000; Lepsch & Coelho, 1994).

Dentre as feições detalhadas do relevo, os elementos da encosta têm um considerável potencial na predição de tipos de solos, em razão de integrarem os elementos considerando fluxos de água e sedimentos na paisagem (Gerrard, 1992; Ruhe, 1975). A suposição básica dos modelos solo-paisagem é que os solos são homogêneos em cada tipo de feição do relevo.

Ruhe (1975) propôs a segmentação das encostas em cinco elementos, são eles: o topo (*summit*) e ombro (*shoulder*) que estão localizados na parte mais alta da paisagem e perdem materiais que transitam na parte mais inclinada da encosta (*backslope*) para as partes mais baixas, onde estão situados o sopé coluvial (*footslope*) e sopé colúvio-aluvial (*toeslope*) (Zinck et al., 2016; Vidal-Torrado et al., 2005). Essa dinâmica tende a refletir claras relações entre posição na paisagem e atributos do solo. Em condições de intensa erosão (geológica e antrópica) os

elementos da encosta podem estar ausentes e/ou ocorrem em alternância, como, por exemplo, um *footslope* logo após um *summit*, faltando um *backslope* (Wysocki et al., 2011).

Com isso, as hipóteses do presente trabalho são: (a) a segmentação detalhada de elementos da encosta pode ser automatizada através de técnicas digitais; (b) há diferenças nos tipos de solos presentes em diferentes segmentos da encosta mesmo quando sobre o mesmo material de origem; (c) elementos da encosta semelhantes e sobre o mesmo material de origem apresentam homogeneidade nos atributos do solo e com isso, nos tipos de solos; e (d) é possível agrupar tipos de solos utilizando suas características numéricas e estes grupos correspondem a diferentes elementos da encosta.

Considerando a carência de estudos na segmentação digital de elementos da encosta em nível detalhado e sua aplicação em mapeamentos de solos, este trabalho tem como objetivos: (a) segmentar automaticamente os elementos da encosta em nível detalhado utilizando uma árvore de decisão, (b) analisar a relação dos elementos da encosta com tipos de solos e (c) avaliar o uso de um algoritmo de similaridade para agrupar tipos de solos baseado em suas análises espectrais, análises convencionais e a associação delas. Com isso, espera-se que a segmentação dos elementos da encosta apresente, dentro dos seus diversos segmentos, homogeneidade de tipos de solos e que, entre eles, exista heterogeneidade.

3.2. Material e métodos

3.2.1. Localização da área de estudo e caracterização do meio físico

A área de estudo está situada no limite dos municípios de Piracicaba e Santa Bárbara d'Oeste (estado de São Paulo), a maior parte incluída no distrito piracicabano de Tupi, e abrange 2.500 ha (Figura 3).



Figura 3. Foto aérea e localização da área de estudo

Segundo Köppen (1948), o clima é classificado como Cwa, sendo este caracterizado como mesotérmico subtropical úmido com um inverno seco que compreende os meses de junho a agosto, e um verão chuvoso entre novembro e janeiro. A área apresenta-se em sua maior parte cultivada com cana-de-açúcar, havendo alguns resquícios de vegetação nativa e espécies exóticas como Pinus e Eucalipto, localizados principalmente no Horto Florestal de Tupi.

Está inserida geomorfologicamente na Depressão Periférica Paulista, que tem uma área com aproximadamente 100 km de largura e 400 km de extensão (Penteado, 1969; Bigarella et al., 1965). Esta depressão é esculpida por eventos erosionais-tectônicos e apresenta um formato de "meia-lua", localizada entre o Planalto Atlântico do Pré-Cambriano e as Cuestas Arenítico-Basálticas (Figura 4).



Figura 4. Localização geomorfológica da área de estudo. Fonte: IPT (1981)

Durante os períodos Terciário Superior e Quaternário (Figura 5), sedimentos argilosos foram depositados, sendo estes interpretados como material retrabalhado que foram sujeitos a ciclos anteriores de pedogênese e transporte que ocorreram durante as fases semiáridas, coincidentes com os quatro períodos glaciais do Quaternário da América do Norte (Wisconsin, Illinoian, Kansas e Nebraska) (Penteado, 1969). Esses depósitos superficiais têm idade Cenozóica e estão localizados nos topos quase planos de colinas, na cota dos 600-630 metros (Penteado, 1976). Esses depósitos correspondem a deposições espessas (de cinco a dez metros) tendo principalmente solos classificados como Latossolos que variam em cor e no teor de ferro de acordo com a distância dos diques de diabásio (Vidal-Torrado et al., 1999).

ERA	PERÍODOS	GRUPO	FORMAÇÃO	LITOLOGIA	Espes. Aprox. (metros)	DESCRIÇÃO SUCINTA	AMBIENTE DE DEPOSIÇÃO	
CENOZÓICA	QUATERNÁRIO		RIO CLARO		30	arenitos pouco consolidados com lentes de argilas e níveis conglomeráticos na base (Arenitos = reservatório de água subterrânea em poços rasos da região de Rio Claro)	Continental: Planície aluvial e lacustre, Colúviões	
	TERCIÁRIO		ITAQUERI		100	arenitos conglomeráticos e arenitos silicificados / ferricretes	Continental: Leques aluviais, Fluvial e lacustre	
MESOZÓICA	CRETÁCEO	SÃO BENTO	SERRA GERAL		100	derrames de basaltos com lentes de arenito na base, Diques e soleiras de diabásio (Basalto e diabásio = matéria-prima para brita)	Magmatismo Fissural	
			BOTUCATU		100	arenitos bem selecionados com grãos bem arredondados e bem esféricos, pouca argila	Continental: Desértico	
	JURÁSSICO		TRIÁSSICO	PIRAMBÓIA		150	arenitos com grãos arredondados e esféricos, Diversos níveis de lamitas	Continental: Fluvial e Desértico
				CORUMBATAÍ		100	siltitos contendo lentes de arenitos finos argilitos, siltitos, arenitos finos, níveis de calcários dolomíticos e coquinas (Argilitos = matéria-prima para a indústria cerâmica da região de Rio Claro)	Continental: Lacustre Transicional: Planície de Maré
PALEOZÓICA	PERMIANO	PASSA DOIS	IRATI <small>Mb. Assistência Mb. Taquaral</small>		40	folhelhos, siltitos, folhelhos pirobetuminosos, calcários dolomíticos (pedreiras de calcário na região de Assistência, Ipeuna e Piracicaba/Saltinho)	Transicional: Laguna Marinho Raso: Plataforma	
			TATUÍ		50	siltitos e siltitos arenosos	Transicional: Planície Costeira Marinho Raso: Plataforma	
		ITARARÉ	CARBONÍFERO	Grupo ITARARÉ <small>(membro no Estado de São Paulo)</small>		900	arenitos, siltitos, varvitos e diamictitos (alguns verdadeiros filitos) (Arenitos = reservatórios de água subterrânea em poços profundos da região)	Continental (Glacial): Aluvial - Leques e Fluvial; Lacustre Transicional: Deltas Marinho (glácio-marinho): Plataformal
				EMBASAMENTO			granitos, migmatitos, gnaisses, xistos, quartzitos	

Figura 5. Coluna estratigráfica da Depressão Periférica Paulista. Fonte: Perinoto & Zaine (1996), modificado de Soares & Landim (1975).

Além desses depósitos argilosos inconsolidados correspondentes a Cobertura Cenozóica, ocorrem argilitos laminados da Formação Irati (membro Taquaral), siltitos arenosos e siltitos argilosos maciços com níveis de arenito da Formação Tatuí (membro inferior), siltitos arenosos maciços e argilitos da Formação Tatuí (membro superior) e, em maior ocorrência, há diamictitos com matriz argilo-arenosa ou areno-argilosa e siltitos da Formação Itararé e, no seu membro arenoso, arenitos e diamictitos arenosos (Figura 6) (Vidal-Torrado, 1994).

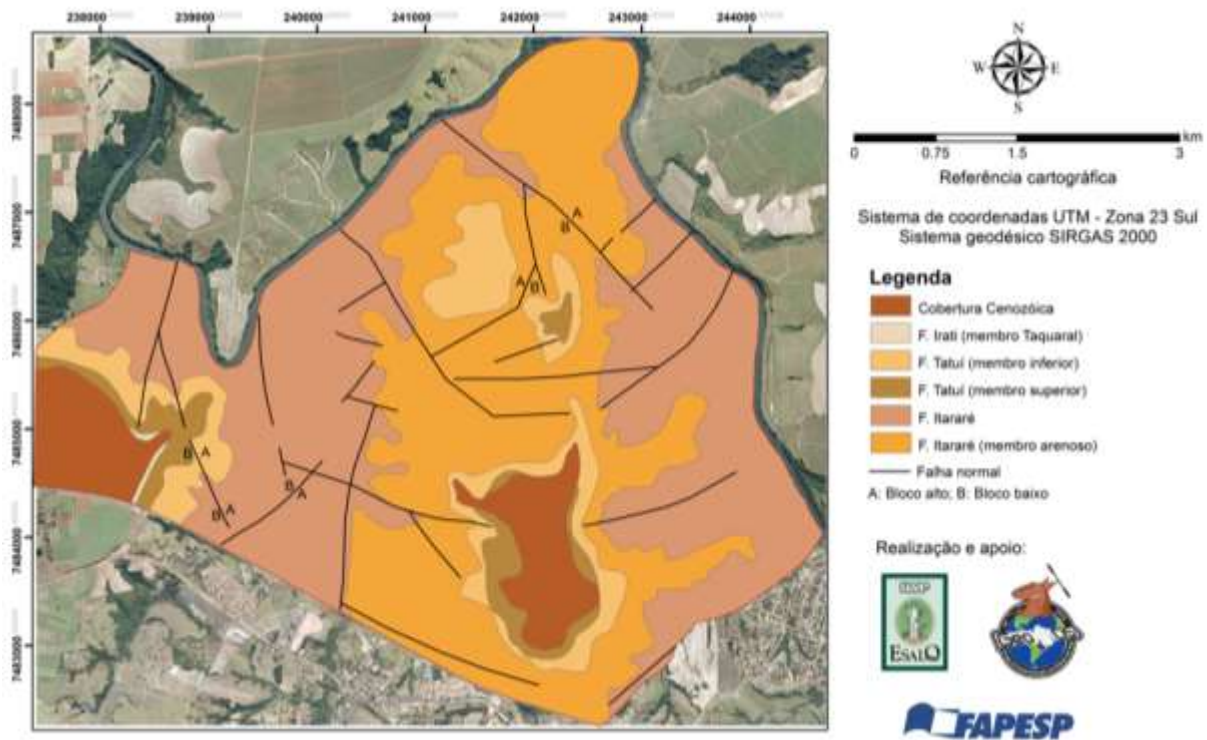


Figura 6. Mapa geológico da área de estudo (Adaptado: Vidal-Torrado, 1994).

3.2.2. Modelo Digital do Terreno e parâmetros geomorfométricos

Curvas de nível com equidistância de 5 metros e pontos cotados foram digitalizados de cartas planialtimétricas na escala de 1:10.000 (IGC, 1979). Estes foram interpolados para obtenção de um Modelo Digital do Terreno (MDT), com resolução espacial de 5 metros, no programa *Geographic Resources Analysis Support System* (GRASS) 7.0.4 (GRASS, 2015). O método de interpolação usado foi o *Regularised Spline with Tension*, por ser o mais adequado para dados vetoriais (Neteler & Mitášová, 2008; Mitášová & Hofierka, 1993).

O MDT foi utilizado para obter os parâmetros geomorfométricos: declividade e perfil de curvatura com tamanho de janela de 3x3 e 13x13, respectivamente (Miller, 2014), utilizando o programa GRASS 7.0.4. A elevação relativa foi calculada com um tamanho de janela de 87x87 utilizando o programa ArcGIS 10.3, segundo equação proposta por Miller & Schatzl (2015). Esses parâmetros foram selecionados e utilizados em razão das suas capacidades de fornecerem uma classificação dos elementos da encosta baseada em sua geometria e semântica, ou seja, expressa tanto à forma e a posição desses elementos na paisagem quanto à subjetividade do modelo mental do pedólogo (Miller & Schatzl, 2015; Miller, 2014).

3.2.3. Segmentação digital dos elementos da encosta em nível detalhado utilizando uma árvore de decisão

A segmentação dos elementos da encosta empregada segue a proposta de Miller & Schaetzl (2015), em que regras hierarquizadas em uma árvore de decisão utilizando parâmetros geomorfométricos foram utilizadas. Tais regras são consideradas por estes autores como estando próximas das usadas em modelos idealizados pelos pedólogos no campo.

As regras estabelecidas na árvore de decisão basearam-se inicialmente na declividade, subdividindo-a em: alta ($> 6,4^\circ$), média ($1,4^\circ-6,4^\circ$) ou baixa ($<1,4^\circ$). Posteriormente, a declividade média foi subdividida, considerando a forma da encosta, em: convexa (valores positivos) ou côncava (valores negativos). Do mesmo modo, a declividade baixa foi subdividida em relação à elevação relativa em: alta (valores positivos) ou baixa (valores negativos) (Figura 7). De acordo com Miller & Schaetzl (2015) esta sequência pode não corresponder, necessariamente, a todos os campos do processo de pensamento do pedólogo, pois muitos podem determinar a posição dos elementos da encosta mais por intuição do que por um processo de decisão passo a passo. Entretanto, esses autores observaram que esse método foi o que melhor previu a classificação dos elementos da encosta por pedólogos experientes em três diferentes paisagens, satisfazendo o que King (1957) abordou como a natureza uniformitária das encostas (*the uniformitarian nature of hillslopes*).

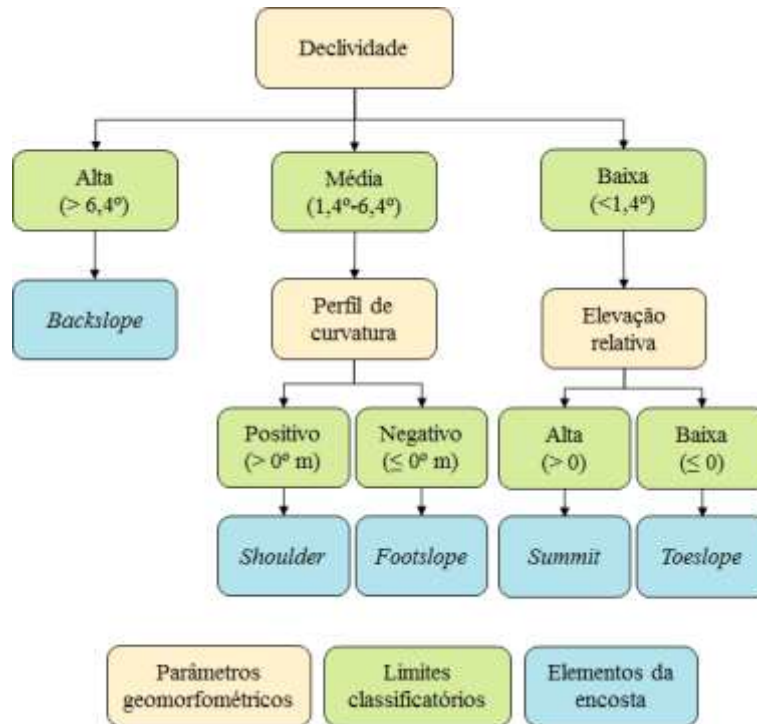


Figura 7. Árvore de decisão utilizada para segmentar os elementos da encosta através de parâmetros geomorfométricos.

A validação da segmentação digital dos elementos da encosta foi realizada através da análise de concordância, na qual inclui a estatística Kappa (K) (Eq. 1) e seu erro padrão, e a tabela de contingência, que inclui a exatidão global, acurácia do produtor e do usuário.

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_{i+} * x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (x_{i+} * x_{+i})} \quad \text{Eq. 1}$$

Sendo: N é o número total de observações, r é o número de linhas na matriz, x_{ii} é o número de observações na linha i e coluna i, respectivamente, e x_{i+} e x_{+i} são as quantidades totais na linha i e coluna i, respectivamente.

A estatística Kappa é uma medida de concordância inter-observador que mede o grau de concordância além do que seria esperado tão somente pelo acaso. Esta medida tem como valor máximo 1, onde este representa total concordância, e valores mínimos próximos e até abaixo de 0, que indicam nenhuma concordância ou que esta foi exatamente esperada pelo acaso (Tabela 3) (Agrestini, 2007; Landis &

Koch, 1977). Um total de 191 observações de campo foram obtidas para realizar essa validação.

Tabela 3. Valores do índice Kappa para avaliação do grau de concordância (Landis & Koch, 1977).

Índice Kappa	Grau de concordância
<0,00	Péssima
0,00 – 0,20	Fraca
0,21 – 0,40	Razoável
0,41 – 0,60	Moderada
0,61 – 0,80	Substancial
0,81 – 1,00	Quase perfeita

3.2.4. Coletas de amostras de solo

A partir de um mapa geológico pré-existente e do mapa digital dos elementos da encosta, amostras de solo foram coletadas com um trado holandês em locais aleatoriamente distribuídos em toda área de estudo e em duas topossequências (Figura 8), visando abranger sequencialmente os cinco elementos da encosta (Ruhe, 1975) e as diferentes litologias presentes na área estudada.

As amostras de solo foram coletadas a cada 20 cm de profundidade até um metro em 129 pontos, totalizando 408 amostras, e descritas conforme recomendações de Santos et al. (2015). Em alguns pontos não foi possível coletar amostras até um metro, em razão da pouca espessura do solo, enquanto que em outros as amostras não seguiram o intervalo de 20 cm, em razão da mudança na morfologia do solo, sendo coletadas de acordo com a diferenciação dos atributos morfológicos do solo identificados em campo. Ainda, em alguns pontos foram amostradas apenas uma ou duas camadas, devido à homogeneidade morfológica do solo, como os classificados como Latossolos presentes na porção mais elevada da área, e segundo informações disponíveis em trabalhos anteriores realizados na área de estudo (Vidal-Torrado, 1994).



Figura 8. Foto aérea e localização dos pontos de coleta de amostras de solo tanto aleatoriamente distribuídos em toda área de estudo como nas topossequências 1 (à direita) e 2 (à esquerda).

3.2.5. Análises espectral, química e granulométrica das amostras de solo

As amostras de solo coletadas foram secas a ar, destorroadas e peneiradas em malha de 2 mm (TFSA). Os dados espectrais de todas elas foram obtidos em laboratório usando um espectrorradiômetro FieldSpec Pro (*Analytical Spectral Devices*, Boulder, Colo.), na região do Vis-NIR-SWIR (350-2500 nm). Esse sensor possui uma fibra ótica com resolução espectral de 1 nm entre 350 e 1100 nm e 2 nm entre 1100 e 2500 nm, com capacidade de mais de 30 leituras por segundo. Cada amostra correspondeu a aproximadamente 15 cm³ de TFSA que foi disposta em uma placa de petri para determinar a sua reflectância. As mensurações foram feitas em triplicata, visando promover o aumento da superfície de terra escaneada pelo sensor. Este foi colocado em posição vertical a 8 cm da amostra, onde a luz refletida

foi mensurada de uma área de aproximadamente 2 cm² a partir do centro da amostra. Duas lâmpadas halógenas de 50 W com feixe não-colimado ao ângulo de visada, posicionadas a 35 cm da amostra e com 30° de ângulo zenital foram utilizadas como fonte de luz. Uma placa branca de sulfato de bário que reflete 100% foi usada como padrão de referência.

Devido à análise espectral gerar uma grande quantidade de dados (2150 bandas espectrais) foi aplicada a Análise de Componentes Principais (ACP) para sumariá-los em um novo conjunto de variáveis, com remoção de informações redundantes, mas mantendo a variabilidade original dos dados (Varmuza & Filzmoser, 2009). Esse processamento foi realizado através do programa ParLes (Viscarra Rossel, 2008). Esse novo conjunto de dados é composto pelos pesos (*loadings*) de cada banda espectral e pelos escores (*scores*) de cada observação de solo (Shaw, 2009). Os pesos foram interpretados e denominados, e os escores foram utilizados como atributos quantitativos na análise de similaridade entre as amostras de solo.

As análises químicas e granulométrica foram realizadas apenas nas amostras de solo das camadas mais representativas dos locais coletados, em muitos casos na profundidade de 0-20 e 80-100 cm. As análises químicas consistiram de pH em água e KCl (1: 2,5), cátions trocáveis (Al³⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺) extraídos com solução de KCl 1 mol L⁻¹, em que Ca²⁺ e Mg²⁺ foram quantificados por espectrofotometria de absorção atômica e Al³⁺ por titulação com solução de NaOH 0,025 mol L⁻¹, Na⁺ e K⁺ foram extraídos por Mehlich-1 e quantificados por fotometria de chama e acidez potencial (H + Al) que foi extraída com solução de acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹ a pH 7 e determinada por titulação com solução de NaOH 0,025 mol L⁻¹ (EMBRAPA, 2011). A partir dos resultados dessas análises foram calculadas a saturação por bases (V), saturação por alumínio (m) e capacidade de troca catiônica (CTC). Para a análise granulométrica, a fração de argila (<0,002 mm) foi medida pelo densímetro, a areia total (2-0,05 mm) foi peneirada e pesada, e o silte (0,05-0,002 mm) foi obtido por diferença (Gee & Or, 2002).

A partir da descrição morfológica, análises químicas e granulométrica das amostras de solo coletadas e tomando como base o mapa semidetalhado de solos realizado por Vidal-Torrado (1994) foi estimada a classificação dos perfis de amostras do solo até o 3º ou 4º nível categórico, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2013).

3.2.6. Processamento e análise dos dados

3.2.6.1. Análise multivariada de variância (MANOVA) da topossequência 2

A análise multivariada de variância (MANOVA) foi aplicada nos dados obtidos da camada subsuperficial do solo coletada na topossequência 2 (Figura 8) a fim de avaliar se existiam diferenças significativas entre os atributos do solo e os escores gerados na ACP nos diversos elementos da encosta. Essa estatística foi utilizada em razão de proceder à comparação entre as médias de grupos para diversas variáveis respostas simultaneamente. Essa análise só pôde ser realizada na T2, em razão da T1 possuir poucos pontos amostrais em cada elemento da encosta, o que inviabilizava sua análise.

3.2.6.2. Análise de similaridade das amostras de solo coletadas nas topossequências

Para verificar a similaridade entre as amostras de solo coletadas nas topossequências foi realizado um agrupamento baseado em suas características numéricas padronizadas através do programa OSACA (*Outil Statistique d'Aide à la Cartogénèse Automatique*) (Carré & Jacobson, 2009). Esse programa utiliza uma métrica para calcular a "distância" entre pares de perfis observados baseado nas características quantitativas das amostras das camadas ou dos horizontes de solo. A partir das "distâncias" calculadas, é realizado o agrupamento de perfis de solo de acordo com quão similares são uns dos outros, ou seja, perfis de solos são enquadrados em um mesmo grupo por terem uma "distância" menor do que aqueles menos similares.

A "distância" entre os centroides de dois pontos amostrais de solo foi calculada usando a distância euclidiana. Esta foi calculada com a média da distância entre os horizontes de cada perfil em sequência, por isso, é conhecida como distância pedológica (Dped). No caso de um perfil ter mais horizontes do que outro, o último horizonte do "menor" perfil é usado repetidamente (Figura 9). A Dped considera a sucessão de camadas/horizontes do solo ao invés da sua profundidade. Carré & Jacobson (2009) encontraram melhores resultados quando utilizaram essa

“distância” para agrupar perfis de solo ao invés de outra que usava apenas a espessura dos seus horizontes.

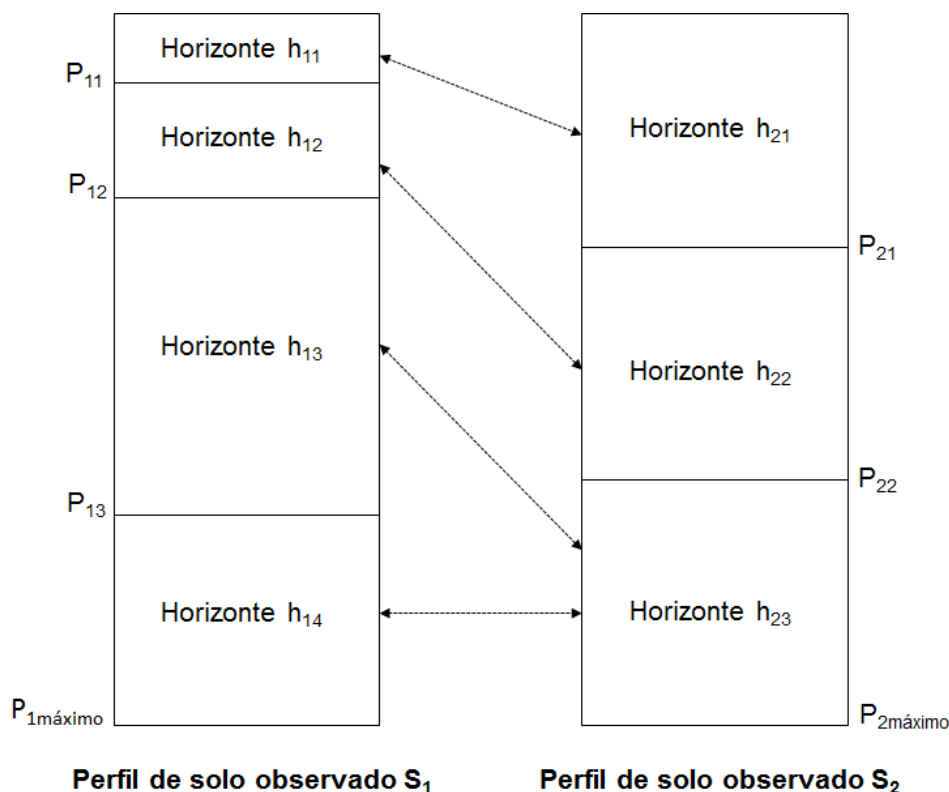


Figura 9. Elementos da análise de similaridade entre dois perfis de solo utilizando a distância pedológica pelo algoritmo Outil Statistique d’Aide à la Cartogénèse Automatique - OSACA (Adaptado: Carré & Jacobson, 2009).

O agrupamento das amostras de solos coletadas foi baseado em *k-means*. Esse método objetiva dividir n observações dentre k grupos e cada observação pertence ao grupo mais próximo da média dele. O OSACA utiliza a métrica Din/Dex como um meio de determinar como os dados são classificados pelo agrupamento. O Din é a distância média entre cada ponto e o centro do grupo ao qual ele está ligado e o Dex é a média das distâncias que separam os centros do grupo. O valor Din/Dex varia de acordo com o número de grupos: poucos grupos conduzem geralmente a valores altos, enquanto muitos grupos a valores baixos. O número de grupos é escolhido quando a métrica Din/Dex apresenta valores constantes (Carré & Jacobson, 2009).

Três conjuntos de variáveis foram utilizados para avaliar suas influências no agrupamento das amostras de solos, são eles: (a) escores dos seis primeiros CP (análises espectrais), em que esses explicaram > 99% da variância total dos dados

originais, (b) análises químicas e granulométrica (análises convencionais) e (c) escores dos seis primeiros CP, análises químicas e granulométrica (análises espectrais + análises convencionais).

A Análise de Coordenadas Principais foi utilizada para representar os autovalores extraídos da matriz de distância euclidiana (Shaw, 2009) obtida pelo algoritmo OSACA a partir dos diferentes conjuntos de variáveis.

3.2.6.3. Análise de similaridade das amostras de solo coletadas aleatoriamente na área total de estudo

A análise de similaridade das amostras de solo coletadas aleatoriamente na área total foi realizada com os mesmos conjuntos de variáveis utilizados nas topossequências (análises espectrais, análises convencionais e análises espectrais + análises convencionais). Essa análise foi realizada para avaliar: (a) se através do OSACA é possível agrupar tipos de solos semelhantes de um conjunto maior de dados e (b) a influência dos conjuntos de variáveis nesse agrupamento.

3.3. Resultados e discussão

3.3.1. Segmentação geomorfométrica dos elementos da encosta e sua validação pela análise de concordância

A segmentação digital dos elementos da encosta (Ruhe, 1975) apresentou uma alta concordância com as observações de campo (Figura 10), com um Kappa de 0,7, classificado como substancial (Landis & Koch, 1977), e uma exatidão global de 77% (Tabela 4). Miller & Schaetzl (2015), utilizando um modelo similar para segmentar os elementos das encostas de Ottawa (Canadá), obtiveram um Kappa de 0,49. Esses autores argumentaram que as possíveis discordâncias entre a predição do modelo e as observações de campo podem estar relacionadas à combinação de erros no MDE, incerteza posicional e subjetividade associada com a interpretação tácita acerca dos elementos da encosta. Sobre isso, Dikau (1989) e Williams et al. (2012) também afirmaram que a categorização tácita e manual de unidades do relevo é influenciada pela experiência do indivíduo na interpretação da paisagem.

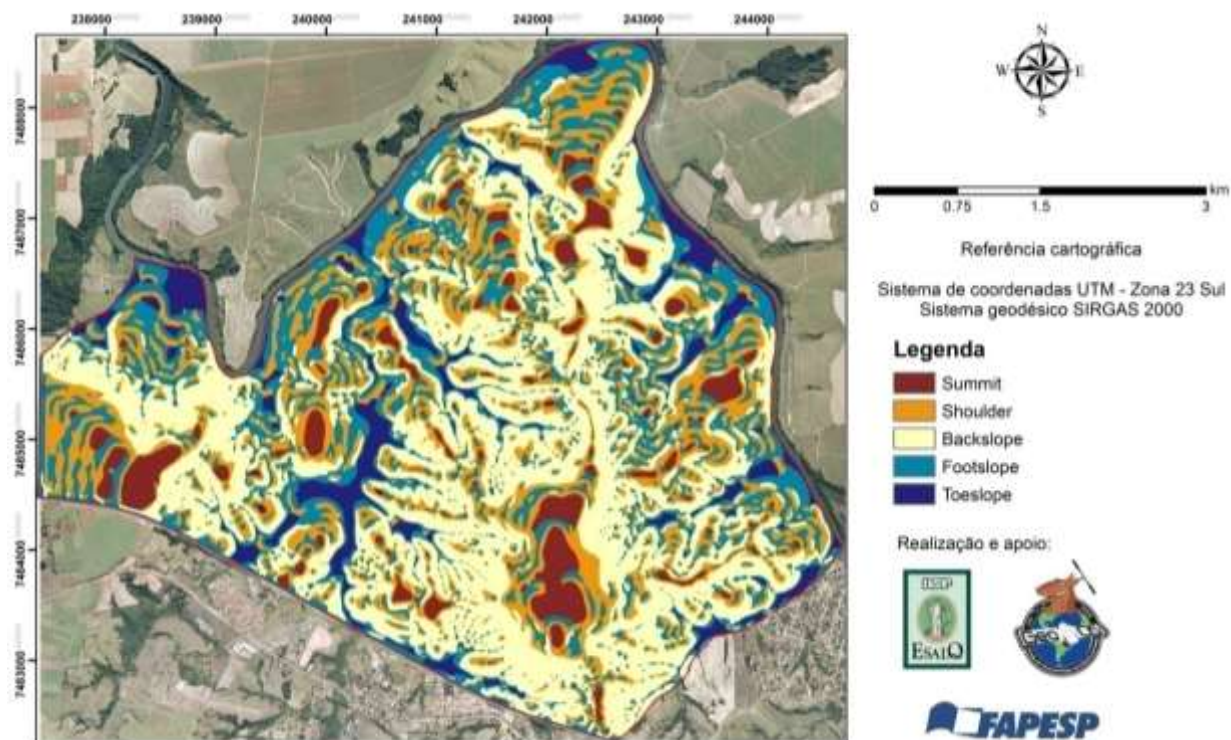


Figura 10. Mapa digital dos elementos da encosta (Ruhe, 1975) obtidos pela segmentação geomorfométrica utilizando uma árvore de decisão.

Tabela 4. Tabela de contingência da validação do modelo digital de segmentação dos elementos da encosta ($Kappa=0,7$ e erro padrão= $0,04$)

Elementos da encosta		Observações de campo					Acurácia do usuário (%)
		SU	SH	BS	FS	TS	
Modelo digital	<i>Summit</i>	52	1	0	1	0	96
	<i>Shoulder</i>	12	33	3	7	0	60
	<i>Backslope</i>	0	0	38	4	0	90
	<i>Footslope</i>	5	7	0	14	3	48
	<i>Toeslope</i>	0	0	0	1	10	91
Acurácia do produtor (%)		75	80	93	52	77	
Exatidão global (%)		77					

SU: *Summit*, SH: *Shoulder*, BS: *Backslope*, FS: *Footslope* e TS: *Toeslope*

Em alguns locais ocorreram discrepâncias na classificação (Figura 11), o que deve estar associado com a fonte de dados que gerou o MDT, neste caso, a imprecisão das curvas de nível que foram obtidas de antigos mapas planialtimétricos elaborados por processos de restituição aerofotogramétrica. Nesses processos podem ter havidos erros quando a superfície do solo estava coberta por alguma vegetação mais densa e alta. Nesses locais, a mudança de cota representada pelas curvas de nível pode ter promovido erros na geração do MDT, que

consequentemente, influenciou em uma errônea classificação da declividade, em razão desta ser obtida através dele. Por exemplo, onde existem dois *summits* (SU) extensos e quase planos (Figura 11) o MDT, ao gerar a declividade, considerou erroneamente uma parte deles com declividades maiores que $1,4^\circ$, em razão das diferenças de 5-15 m das cotas mais elevadas (Figura 11). Esse fato fez com que o modelo classificasse parte dessas áreas como *shoulders* (SH) ou *footslopes* (FS), uma vez que dependeu da forma da encosta (côncavo ou convexo) segundo a regra da árvore de decisão (Figura 7).

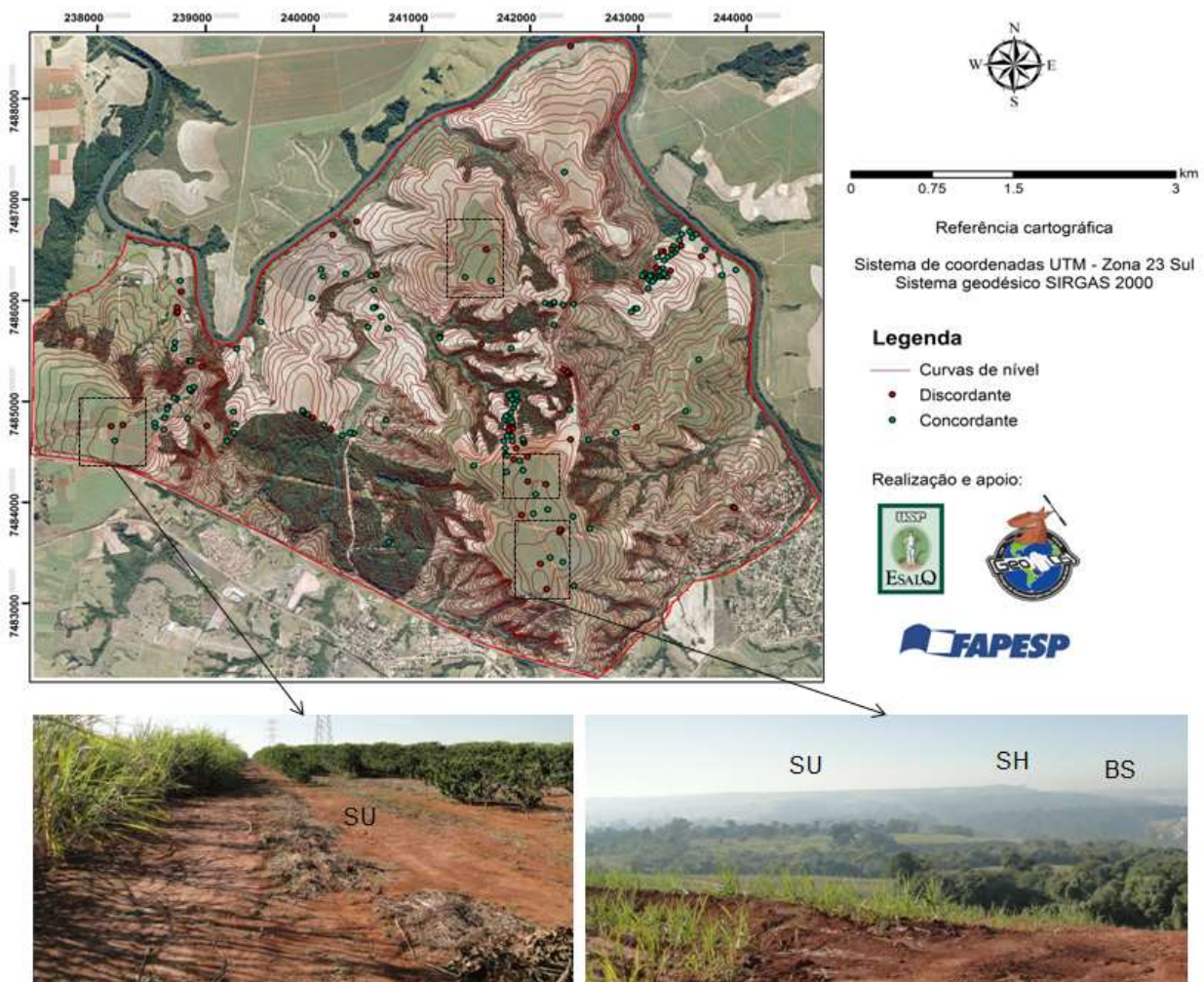


Figura 11. Observações no campo de pontos concordantes e discordantes dos elementos da encosta obtidos pelo modelo digital de segmentação geomorfométrica por árvore de decisão. SU: *Summit*, SH: *Shoulder* e BS: *Backslope*.

A qualidade do MDE depende principalmente dos dados utilizados para sua geração (Hutchinson & Gallant, 2000). Por exemplo, Miller (2014) quando utilizou dados de LiDAR (com resolução espacial de 3 m) para análise digital do terreno encontrou muitos “ruídos” no MDE devido a algumas influências da superfície, tais

como a da orientação em listras, o que ele associou ao padrão da disposição de culturas agrícolas. Portanto, mesmo utilizando um MDE obtido de outras fontes e com maior resolução espacial podem haver inconsistências na obtenção de parâmetros do terreno a partir dele.

O modelo digital de elementos da encosta classificou algumas partes da área de estudo como sendo alternâncias de SH e FS (Figura 12), o que não pôde ser confirmado em campo. Estas partes podem ser genericamente identificadas como sendo de 'relevo suave ondulado' com declividades entre 1,4 e 6,4°. Essas alternâncias de pequenos SH seguidos de FS ocorreram porque foi satisfeito o primeiro critério da árvore de decisão, que é declividade média (1,4 e 6,4°). Ao satisfazer esse critério, o segundo foi baseado na forma da encosta, em côncava para o FS e convexa para o SH (Figura 7). No modelo de segmentação da encosta preconizado por Ruhe (1975) os elementos são interconectados e expressam o processo dominante que atuam sobre cada um deles, portanto, não há neste modelo um elemento que corresponda a 'relevo suave ondulado', já que o critério utilizado para essa identificação é apenas a declividade, desconsiderando a geometria tridimensional das encostas (Santos et al., 2015; Young, 1980).

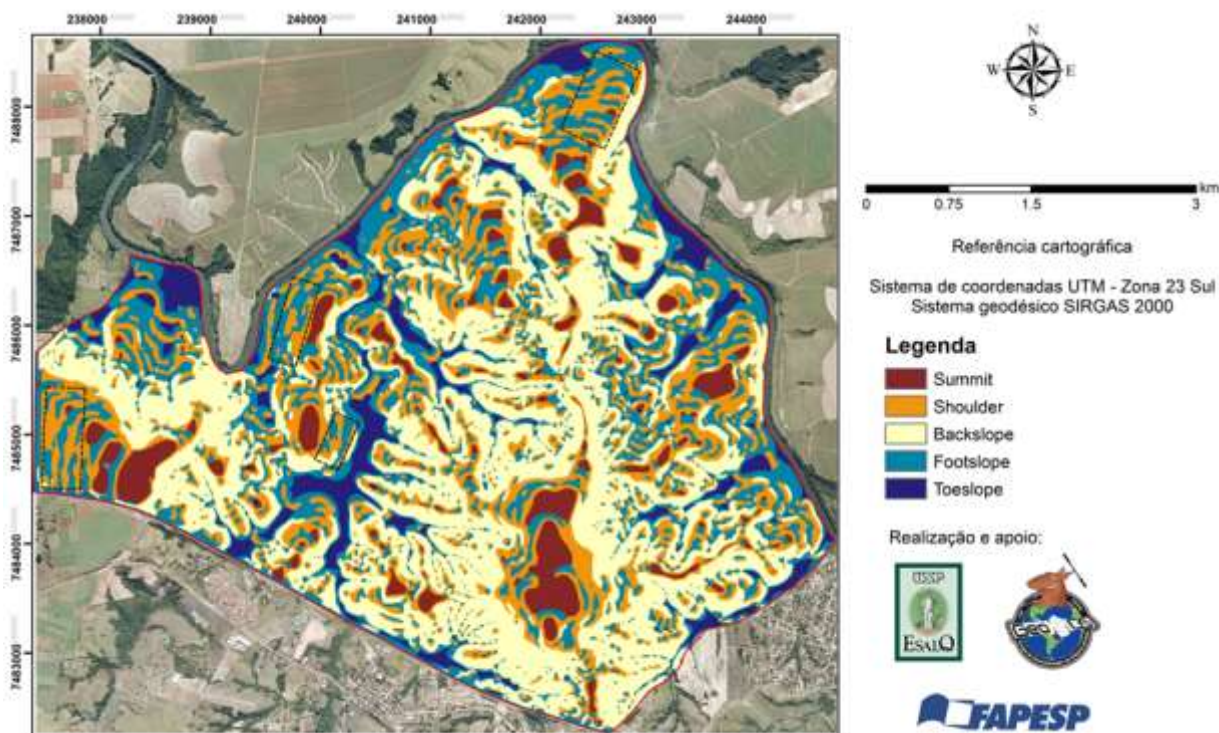


Figura 12. Mapa digital dos elementos da encosta indicando as alternâncias do *shoulder* e *footslope* na área de estudo.

A acurácia do usuário (AU) consiste na inclusão de uma área dentro de uma classe à qual ela não pertence na realidade, em que quanto maior o valor, menor inclusão em uma classe indevida. Valores de AU acima de 90% para *summit* (SU), *backslope* (BS) e *toeslope* (TO) foram obtidos (Tabela 4), o que demonstra que o modelo tem uma boa capacidade em separar elementos da encosta contrastantes. Entretanto, para a identificação das feições de SH, a AU foi de 60% e para o FS de 48%, em razão de erros de classificação desses elementos, principalmente por os ter confundido com SU e SH, respectivamente. O modelo tendeu a classificar mais locais como SH e FS do que o observado no campo. Isso deve estar associado ao perfil de curvatura, já que esse parâmetro subdivide esses dois elementos baseado em sua forma (Figura 7). Miller & Schaetzl (2015) obtiveram uma AU de 33% e 8% para SH e FS, respectivamente, o que demonstra que eles também obtiveram inconsistências na classificação digital desses elementos. Entretanto, para os outros elementos, eles obtiveram 92% para SU, 42% para BS e 82% para TS, valores de AU melhores, mas ainda inferiores aos encontrados nesse trabalho (inclusive para o SU).

A acurácia do produtor (AP) consiste na exclusão de uma área da classe que deveria de fato ser enquadrada, em que quanto menor o valor, maior é esta exclusão. Os menores valores - 75% e 52% - foram obtidos para o SU e FS, respectivamente (Tabela 4). Entretanto, o valor de 75% para SU não pode ser considerado um valor baixo, apesar de, no campo, terem sido classificadas mais áreas como SU do que o modelo pode detectar. Por isso, algumas vezes esse elemento foi erroneamente identificado no modelo como SH. Essas discrepâncias podem estar relacionadas à dificuldade de separá-los - tanto pelo método manual quanto pelo digital - quando eles apresentam limites graduais na paisagem (Bathgate & Duram, 2003). Para o FS, houve uma menor AP, em razão desse elemento frequentemente ter sido classificado como SH. Esse fato foi discutido anteriormente, ao esclarecer que as alternâncias de SH e FS na área de estudo podem estar associadas ao perfil de curvatura obtido pelo MDT. O BS foi o elemento que apresentou maior AP, com 93% (Tabela 4). Valores semelhantes foram encontrados para a AU, o que permite elucidar a boa capacidade do modelo em separar elementos contrastantes da encosta. Miller & Schaetzl (2015) obtiveram um AP de 85% para o BS, sendo este superior aos valores encontrados para os outros

elementos da encosta que eles estudaram. Entretanto, esses autores encontram os menores valores de AP para o SH e FS, 24% e 40%, respectivamente. Assim, o modelo utilizado por eles também teve limitações para separar esses elementos da encosta. Apesar de serem muito utilizadas, as observações pontuais para validação de mapas são passíveis de maiores erros quando são realizadas próximas de transições de uma classe para outra.

3.3.2. Relação dos elementos da encosta com atributos e classes dos solos das topossequências estudadas

As médias dos atributos obtidos com as análises convencionais (químicas e granulométrica) das amostras de solos provenientes das duas topossequências (T1 e T2) foram calculadas e ilustradas em gráficos de barras (Figuras 15 e 18), acompanhadas de seus respectivos desvios padrões. O objetivo foi verificar se a variabilidade dos solos dentro dos segmentos das encostas era menor que entre eles. Como esta variabilidade apresentou consideráveis diferenças entre as duas topossequências, os dados foram discutidos separadamente para cada uma delas.

3.3.2.1. Topossequência 1

A topossequência 1 (T1) apresentou todos os elementos da encosta, havendo repetição de alguns deles, como SH, BS e FS (Figura 13), o que a caracteriza como complexa (Wysocki et al., 2011; Ruhe, 1975).

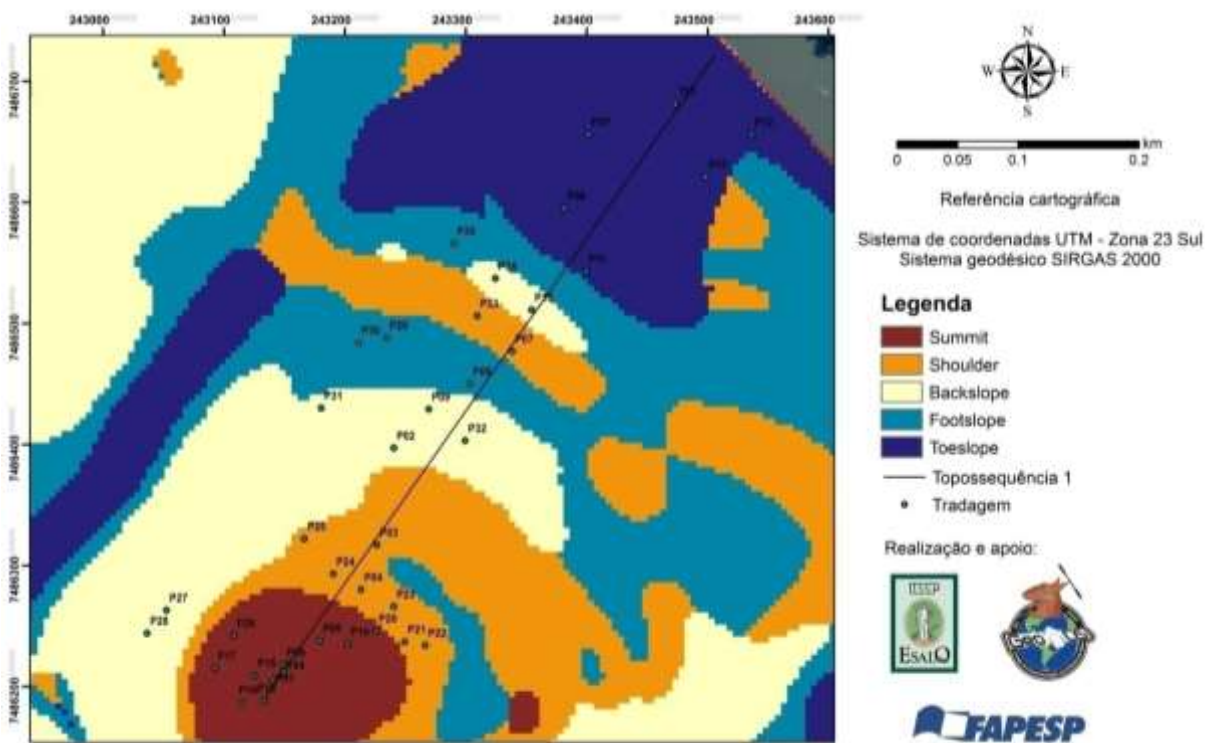


Figura 13. Distribuição dos pontos de coleta de amostras de solo em uma faixa que engloba todos os segmentos da encosta da topossequência 1

Os solos dessa topossequência desenvolveram-se sobre diamictitos com matriz argilo-arenosa ou areno-argilosa e siltitos da Formação Itararé (Figura 6 e 14). De acordo com Vidal-Torrado (1994), ocorrem nessa faixa solos classificados como Argissolos Vermelho-Amarelos (por ele referido como Podzólicos Vermelho-Amarelos) álicos ou distróficos, com argila de atividade baixa (Tb), horizonte A moderado e textura arenosa ou média, sendo esses pouco profundos ou não, associados à Neossolos Litólicos indiscriminados.

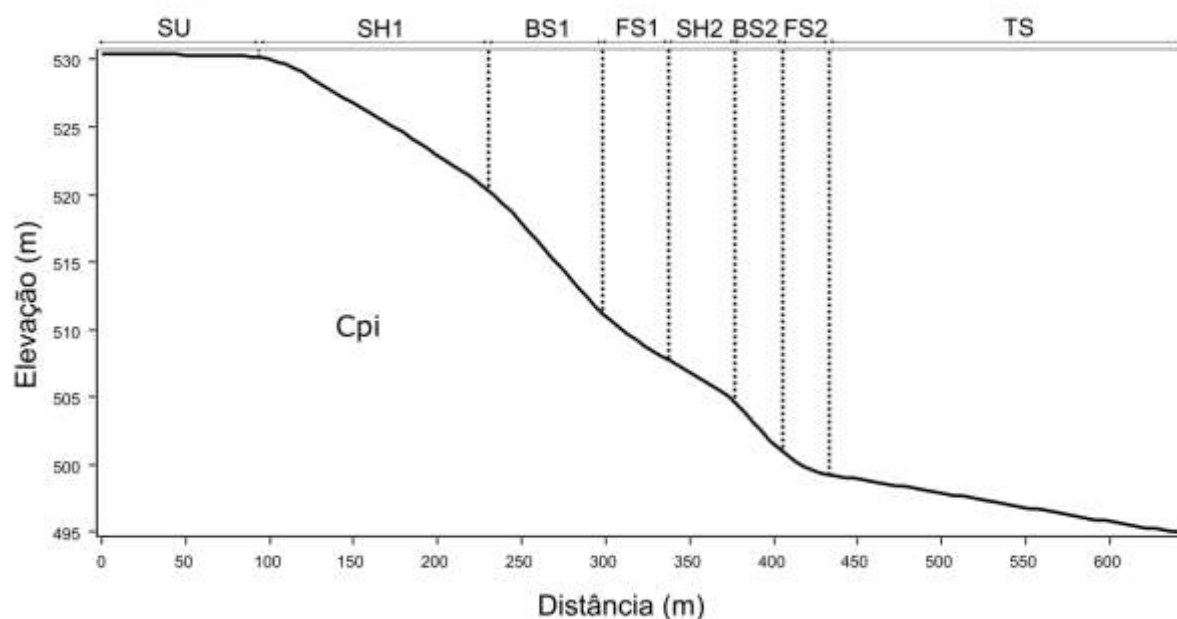


Figura 14. Corte topográfico transversal contrastando os elementos da encosta da topossequência 1, segundo os elementos propostos por Ruhe (1975), e formação geológica de seu substrato. SU: *Summit*, SH: *Shoulder*, BS: *Backslope*, FS: *Footslope*, TS: *Toeslope* e Cpi: Formação Itararé.

Na maioria dos solos coletados no SU houve predomínio de camadas com textura arenosa ou média até a profundidade de 1 m (Figura 15b e f). Vidal-Torrado (1994), ao estudar uma topossequência próxima e sob o mesmo material de origem, relatou que no SU predominaram Argissolos Vermelho-Amarelos em que seus horizontes A e E somavam 1,7 m de espessura e que o horizonte B textural (Bt) se iniciava abaixo dessa profundidade. Apesar de não se ter coletado amostras de solo do horizonte Bt no SU da T1, em razão de ser muito profundo, sua presença pode ser confirmada em um dos locais amostrados (P20) (Figura 13), onde o horizonte Bt se iniciava perto de 1 m de profundidade. Os Argissolos que ocorrem nesse segmento da encosta são Eutróficos ou Distróficos (Figura 15c) e espessarênicos (Figura 15b).

No limite entre o SU e o SH1 foi comum a ocorrência do horizonte Bt em uma profundidade menor, uma vez que é uma área de transição, com menor declividade e quase plana (SU) gradando para uma de maior declividade e convexa (SH), o que deve facilitar a erosão e a exposição do horizonte Bt a uma profundidade menor (Figura 14). A ocorrência de solos com horizonte A+E espesso no SU está relacionado ao fato desse ser quase plano e com maior capacidade de infiltração de água ao invés de movimentação lateral (Hall, 1983). Isto desfavorece a

erosão e favorece a maior atuação do intemperismo, e possivelmente, maior atuação da ferrólise, ou seja, destruição das argilas no topo do horizonte Bt por hidromorfismo temporário, promovendo maior espessamento do horizonte E (Van Ranst & Coninck, 2002; Vidal-Torrado et al., 1999).

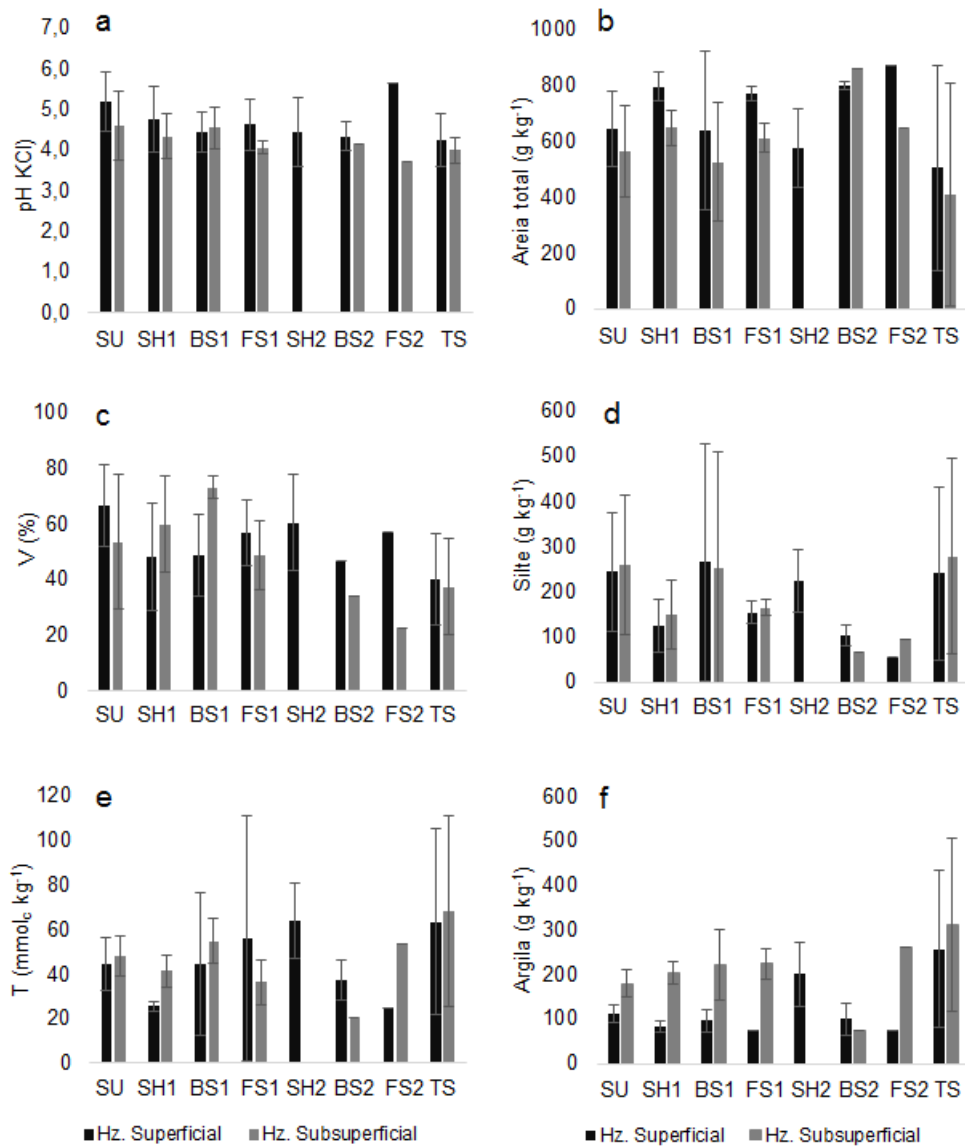


Figura 15. Média (barras mais largas) e desvio padrão (barras mais estreitas) dos atributos do horizonte superficial e subsuperficial dos solos situados nos oito elementos da encosta da topossequência 1. SU: *Summit*, SH: *Shoulder*, BS: *Backslope*, FS: *Footslope*, TS: *Toeslope*, Hz: horizonte, V: Saturação por bases e T: Capacidade de Troca Catiônica.

No SH1 e BS1 predominaram Argissolos Vermelho-Amarelos (PVA) com alta saturação por bases (Figura 15c), com exceção do ponto 27 e 28, em que o solo foi classificado como Cambissolo Háplico (CX) Ta Eutrófico. Nessas posições desta

encosta, os PVA diferem dos encontrados no SU, em razão da menor espessura do horizonte A+E, o que permitiu amostrar o horizonte Bt dentro de 1 m (Figura 15f). A excepcional diferença do tipo de solo encontrado nos pontos P27 e P28 está relacionada com a mudança abrupta do SH1 para o BS1 no sentido oeste da encosta ao invés da mudança gradual, como ocorre no sentido norte (Figura 13). Essa mudança abrupta provavelmente promoveu uma maior velocidade da água em superfície e, conseqüentemente, uma menor infiltração, o que favoreceu a ocorrência de Cambissolos ao invés de Argissolos.

No FS1 também predominou PVA, neste caso, com maior incremento de argila em profundidade (Figura 15f). Esse elemento caracteriza-se por ser côncavo e receber água e sedimentos das partes mais elevadas da paisagem (Shaetzl, 2013). Entretanto, na porção mais estreita desse FS ocorreu um Neossolo Litólico (RL), que deve estar associado a um afloramento de uma rocha cimentada mais resistente (diamictito), como foi observado em campo. No SH2, em dois pontos de amostragem, também foram encontrados RL, similar ao existente no FS1, anteriormente comentado. Estas observações comprovam a complexidade do substrato litológico da T1, apesar de estar sobre uma mesma formação geológica (Figura 14).

No BS2 foi encontrado um solo com textura arenosa até 1 m de profundidade, com um teor de areia total maior do que os do SU (Figura 15b). Acredita-se que as camadas com textura arenosa até 1 m nos pontos localizados nesse BS2 (P10 e P34) podem coincidir com o horizonte A+E de um Argissolo ou ser um Neossolo Regolítico ou Quartzarênico (RR ou RQ). Tal local deve corresponder a um antigo nível de terraço do Rio Piracicaba, atualmente reafeiçoado, como também foi observado por Vidal-Torrado (1994).

No TS há uma maior variabilidade de solos em razão de ser parte de uma planície de inundação do Rio Piracicaba, onde ocorre uma maior variação de sedimentos fluviais (Shaetzl, 2013; Hall, 1983). De fato, a média de alguns atributos dos solos que ocorreram nesse segmento apresentaram os maiores desvios padrões para quase todos os seus atributos (Figura 15b, 15e e f). Nesse TS foi encontrado Neossolos Regolítico (RR) e Gleissolo Háptico (GX) com saturação por bases alta ou baixa (Figura 15c). O RR situa-se no dique marginal, que é uma faixa com baixa declividade que acompanha trechos do leito do rio entre as margens da bacia de decantação da planície de inundação, situando-se alguns metros acima desta. Por

ser uma área de deposição de sedimentos mais grosseiros, seus solos têm textura predominantemente arenosa. Enquanto que o GX está associado à bacia de decantação, que é caracterizada pelas deposições recentes de sedimentos finos associados à dinâmica de inundações sazonais. A ocorrência de Gleissolos foi confirmada pela presença de feições redoximórficas observadas em campo a partir de 40 cm de profundidade e pela textura predominantemente argilosa (Figura 15f). O Neossolo foi enquadrado como Regolítico baseado na suposição que suas areias contêm minerais facilmente intemperizáveis trazidos pelas torrentes do Rio Piracicaba.

Comparando-se os atributos dos solos da T1 (Figura 15) e desconsiderando o BS2, FS2 e TS (por fazerem parte de terraços e planície de inundação, respectivamente), nota-se que existe certa similaridade entre os diversos elementos da encosta. Por exemplo, a argila variou de 180 a 225 g kg⁻¹ (Figura 15f), o pH de 4,1 a 4,6 (Figura 15a) e a saturação por bases, que variou um pouco mais, de 48,8 a 73,2% (Figura 15c). Essa relativa similaridade entre os solos dos diversos segmentos provavelmente deve estar associada à superfície geomórfica recente, como abordada por Vidal-Torrado (1994), onde é de se esperar solos muito dependentes do seu material originário. Essa faixa apresenta alternância dos seus estratos litológicos que ora são menos cimentados ora mais, apesar de pertencerem a mesma formação geológica. Esses últimos – por serem mais resistentes aos agentes de erosão geológica – tendem a formar pontos de inflexão que são interpretados como mudanças nos elementos encosta.

3.3.2.2. Topossequência 2

A topossequência 2 (T2) apresentou todos os elementos de encosta, exceto o TS, havendo predomínio de SU, SH e BS. Entretanto, como foi discutido na validação dos elementos da encosta (tópico 3.3.1), em alguns locais ocorreram discrepâncias quando a classificação digital foi comparada com as observações de campo, isso ocorreu em uma parte do SU e do SH1 (Figura 11). Nessas áreas, esses elementos deveriam ter uma área maior, como foi observado em campo e em trabalhos anteriores realizados na mesma área (Vidal-Torrado & Lepsch, 1999; Vidal-Torrado et al., 1999). A alternância de SH → FS não ocorreu; trata-se de um SH extenso que grada para um BS, similar ao SH situado ao leste dessa topossequência (Figura 16). Devido às inconsistências na classificação digital de

uma parte dos elementos da encosta dessa faixa, os pontos amostrados no 'FS' (N07 e N23), por se situarem em áreas com declividades maiores de $1,4^\circ$, foram considerados como ocorrentes no SH1 e os pontos N18, N01, T20, N21 e N04, por se situarem em inclinações menores que $1,4^\circ$, no SU (Figura 16).

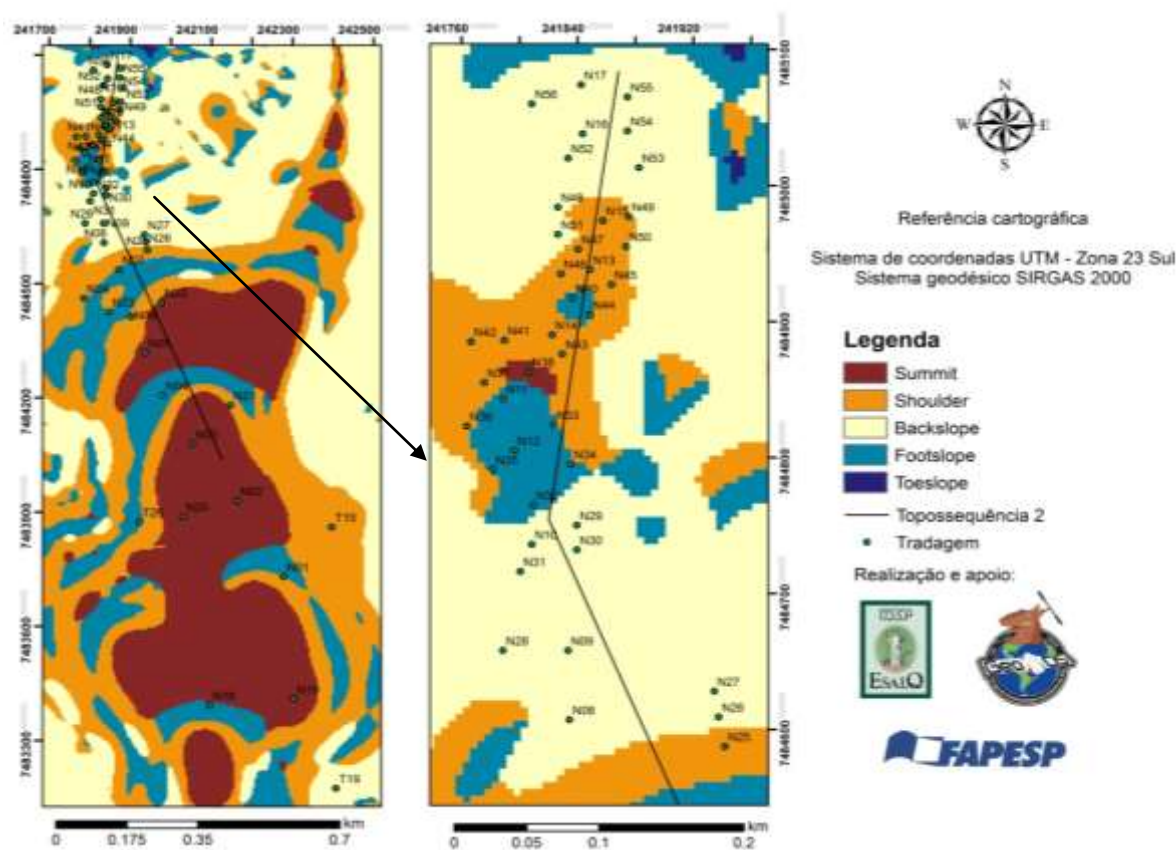


Figura 16. Distribuição dos pontos de coleta de amostras de solo dentro dos segmentos da encosta na topossequência 2. A porção inferior desta topossequência (que corresponde a superfícies geomórficas mais recentes sob materiais de origem muito diversificados) está representada em escala maior, à direita.

Na extensa área quase plana do SU predominam solos classificados como Latossolos Vermelhos (LV) Distróficos de textura argilosa a muito argilosa (Vidal-Torrado et al., 1999). Esses solos foram desenvolvidos a partir de sedimentos retrabalhados pertencentes a Cobertura Cenozóica (Figura 6 e 17), que segundo Penteadó (1969) corresponde à Formação Rio Claro.

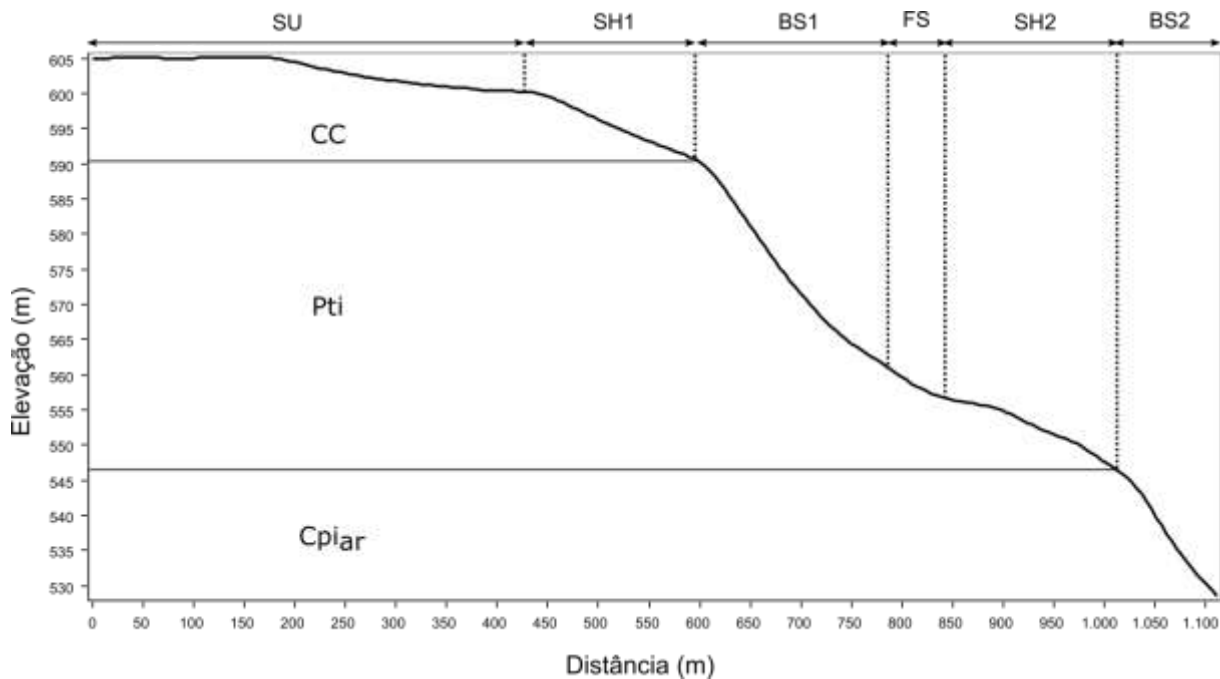


Figura 17. Corte topográfico transversal contrastando a segmentação dos elementos da encosta da toposseqüência 2, segundo os elementos propostos por Ruhe (1975), e formação geológica de seu substrato. SU: *Summit*, SH: *Shoulder*, BS: *Backslope*, FS: *Footslope*, TS: *Toeslope*, CC: Cobertura Cenozóica, Pti: Formação Tatuí (membro inferior) e Cpiar: Formação Itararé (membro arenoso).

Sob o mesmo material de origem do SU, no seu SH adjacente, ocorreram solos classificados como Argissolos Vermelhos (PV). Suas amostras apresentaram valor e croma maior (matiz 10R 4/8, úmida) do que as do LV (matiz 10R 3/6, úmida) do SU adjacente. Apesar de não se ter coletado amostras na camada superficial para cálculo da relação textural e confirmação da ocorrência dessa classe, trabalhos realizados nessa área por Vidal-Torrado et al. (1999) afirmam a ocorrência de Argissolos Vermelhos (que eles denominaram Podzólicos Vermelho-Escuros latossólicos). A análise das amostras coletadas no horizonte superficial e subsuperficial de uma tradagem (T15), realizada na porção leste deste SH1, confirmou a ocorrência dessa classe, pois apresentou relação textural de 1,8. As diferenças dos tipos de solos do SU quando comparado ao SH1 estão intimamente relacionadas com a posição do relevo, em razão de estarem sobre mesmo material de origem. O SU apresenta uma declividade baixa ($< 1,4^\circ$), o que favorece a maior infiltração vertical de água, e o SH1 uma declividade maior (1,4 a $6,4^\circ$), desfavorecendo a infiltração e promovendo a maior movimentação lateral da água. Com isso, os solos amostrados no SU apresentam menor pH (KCl), que está associado a estágios mais avançados de intemperismo, e menores teores de

saturação por bases e silte, que evidenciam solos mais intemperizados do que aqueles presentes no SH1 (Figura 18a, c e d, respectivamente).

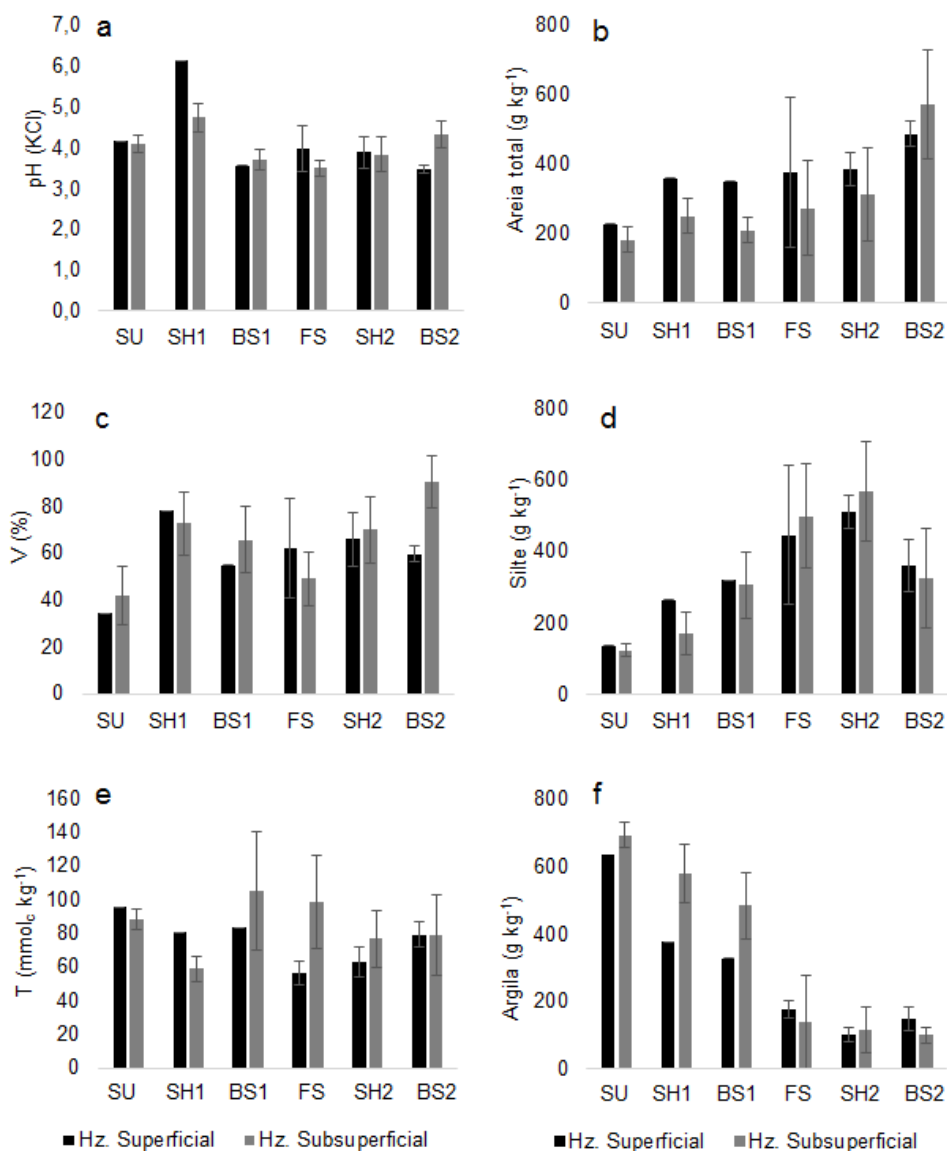


Figura 18. Média Média (barras mais largas) e desvio padrão (barras mais estreitas) dos atributos do horizonte superficial e subsuperficial dos solos situados nos seis elementos da encosta da topossequência 2. SU: *Summit*, SH: *Shoulder*, BS: *Backslope*, FS: *Footslope*, TS: *Toeslope*, Hz: horizonte, V: Saturação por bases e T: Capacidade de Troca Catiônica.

O perfil transversal desta encosta é caracterizado por mudanças ('quebras') ao longo da sua inclinação, sendo que as porções mais inferiores (BS1, FS, SH2 e BS2) correspondem a pontos de inflexão coincidentes com descontinuidades litológicas (Figura 17) (Minár & Evans, 2008). Os pontos de inflexão estão associados a variações do material de origem, principalmente, ou a maior ou menor resistência do mesmo a sofrer processos de superfície, como erosão geológica

(denundação), como ocorreu na T1. Essas mudanças por discontinuidades litológicas – BS1, FS, SH2 – ocorreram abaixo da Cobertura Cenozóica, onde predominaram siltitos arenosos e argilosos maciços pertencentes ao membro inferior da Formação Tatuí (Pti). Enquanto que o BS2 há outro ponto de inflexão, associado a mudança do material de origem para arenitos e diamictitos arenosos da Formação Itararé (CPI_{ar}) (Figura 6 e 17).

A alternância do material de origem de textura muito argilosa (SU/SH1) para textura mais variada (BS1/FS/SH2) associada com a mudança da posição e forma da encosta explica a mudança do tipo de solo existente no BS1 para Cambissolos Háplicos (CX) com predomínio de solos com alta capacidade de troca catiônica (Figura 18e).

No FS subjacente à Formação geológica Tatuí (membro inferior), ocorreram associações de Cambissolos Háplicos (CX), Neossolos Litólicos (RL) e Argissolos Vermelho-Amarelos (PVA), nos quais os solos PVA apresentam menor ocorrência. O FS recebe maior quantidade de água e sedimentos enriquecidos de bases do SH1 e BS1 sobrejacentes, em razão de ter uma forma côncava (Figura 19); com isso, é esperada uma maior heterogeneidade dos tipos de solos, o que de fato foi confirmado pelo maior desvio padrão da média dos atributos do solo (Figura 18). Enquanto que no SH2 subsequente, não ocorre PVA, sendo maior a ocorrência de RL, em razão da sua forma convexa. A grande maioria dos solos que ocorreram sob a Formação Tatuí (membro inferior) apresentaram altos teores de silte (Figura 15d), o que os diferenciam dos encontrados nos SU e SH1, pois nestes segmentos predominaram solos com altos teores de argila (Figura 15f).

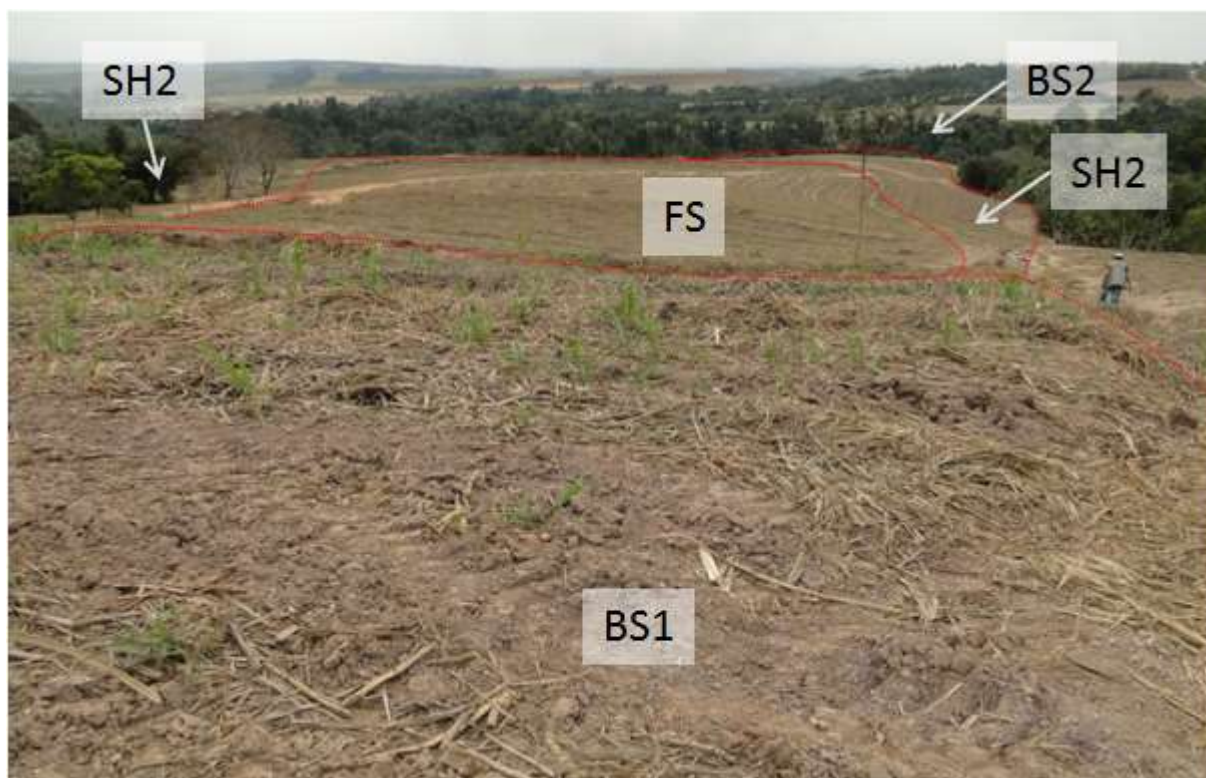


Figura 19. Representação dos elementos da encosta a partir de observações de campo da topossequência 2. SH: *Shoulder*, BS: *Backslope* e FS: *Footslope*.

No BS2 sob arenitos e diamictitos arenosos da Formação Itararé (CPiar), ocorreram apenas RL com elevada quantidade de areia total (Figura 15b) e alta saturação por bases (Figura 15c). Afloramentos de arenito dessa formação geológica foram observados no campo.

Diferente da T1, a T2 apresenta superfícies geomórfica mais antigas e a variabilidade dos solos é controlada tanto pelo material de origem quanto pelo relevo. Em razão disso, nota-se maior variabilidade dos atributos e tipos de solos entre os diversos segmentos da encosta, como adiante confirmado pela análise multivariada de variância – MANOVA (Tabela 5 e 6).

3.3.3. Interpretação dos pesos (*loadings*) gerados na Análise de Componentes Principais

O valor dos pesos na ACP indica a contribuição de cada uma das bandas espectrais (neste caso, o valor de reflectância em cada comprimento de onda) para os diferentes componentes principais (CP). Quanto mais próximo de zero é esse valor, menor a contribuição para um determinado CP. Da mesma forma, pesos maiores (tanto com sinais positivos quanto negativos) indicam maior contribuição

para o CP. Desta maneira, é possível identificar quais bandas são influenciadas pelo comportamento espectral dos solos e as quais atributos essas se referem.

O CP 1 apresentou apenas valores positivos e foi influenciada em toda a curva espectral (Figura 20a), portanto esse CP está associado à intensidade de reflectância. De acordo com Stenberg et al. (2010), a intensidade de reflectância está principalmente relacionada com o teor de matéria orgânica, ferro total, granulometria e mineralogia do solo. Em parte, isso pode ser confirmado pela significativa correlação do teor de argila com os escores desse CP, apresentando -0,63 (Figura 21). Enquanto que o CP 2 (Figura 20b) apresentou valores negativos em toda região do visível (Vis) (350-700 nm) e em uma parte na região do infravermelho próximo e de ondas curtas (NIR-SWIR) (700-1800 nm) e valores positivos a partir de 1800 nm. Esse CP está relacionado aos óxidos de ferro (goethita e hematita) e caulinita, devido apresentar fortes feições entre 400-780 nm e em 2200 nm, respectivamente, conforme Stenberg et al. (2010) e Mortimore et al. (2004). Para os escores do CP2, obteve-se uma correlação de 0,46 com a argila (Figura 21), o que pode confirmar sua relação com esse atributo do solo.

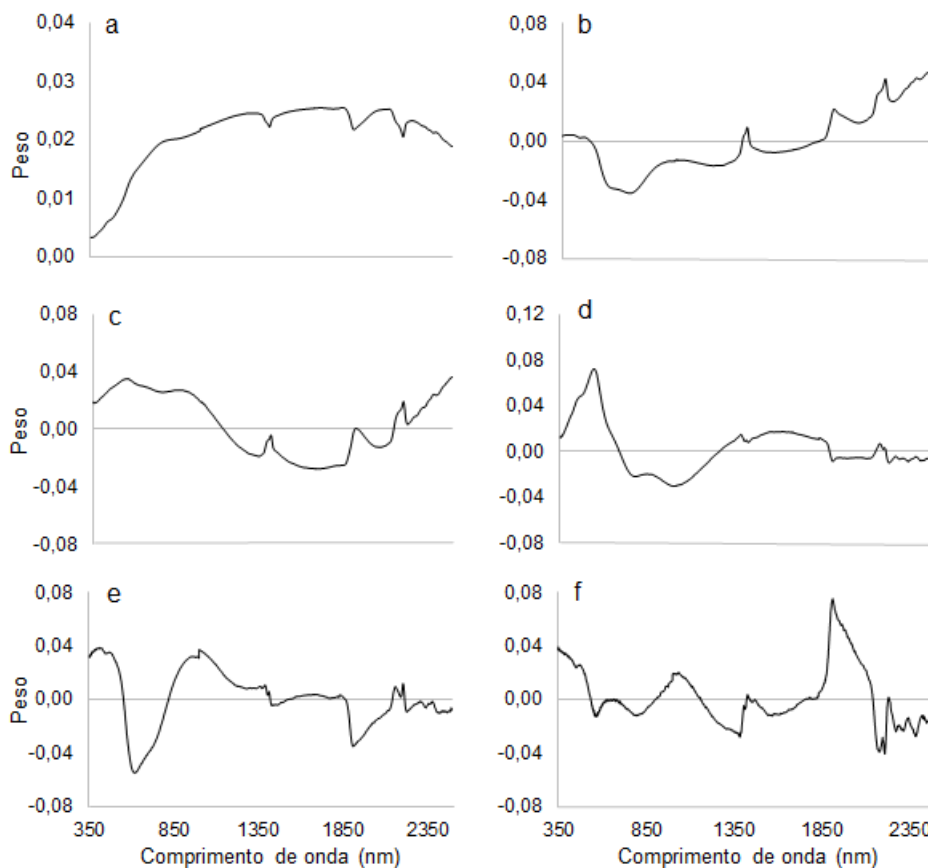


Figura 20. Pesos de cada banda espectral do (a) componente principal 1, (b) componente principal 2, (c) componente principal 3, (d) componente principal 4, (e) componente principal 5 e (f) componente principal 6 obtidos através da Análise de Componentes Principais segundo os espectros de todas as amostras de solos coletadas.

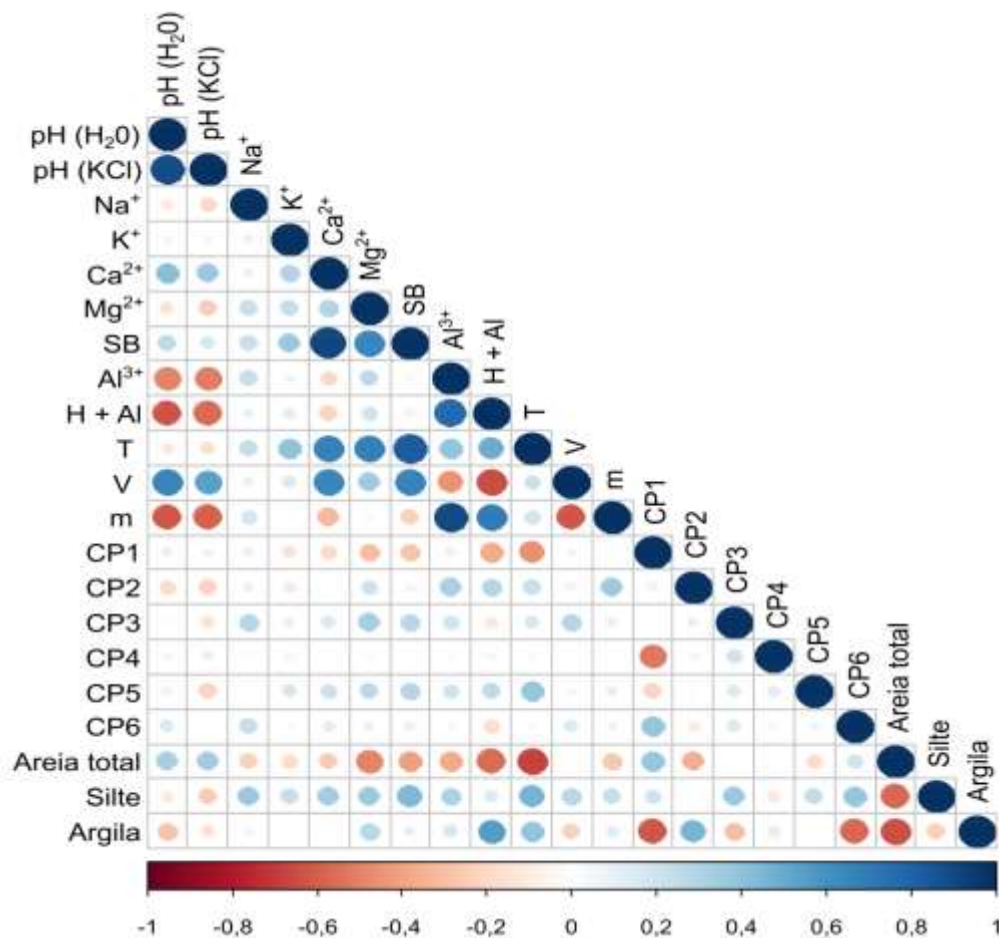


Figura 21. Análise de correlação de Pearson entre atributos do solo e componentes principais de todas as amostras de solo coletadas na camada superficial e subsuperficial. SB: Saturação por bases, T: Capacidade de troca catiônica, m: Saturação por alumínio, CP: Componente Principal.

O CP 3 apresentou maiores valores positivos entre 350-1100 nm e maiores negativos entre 1100-2000 nm (Figura 20c). Enquanto que o CP4 apresentou os maiores valores positivos entre 350-700 nm e os menores negativos situados entre 700-1200 nm (Figura 20d). Esses CP destacaram-se pela forte influência de óxidos de ferro na região do visível, provavelmente associado a presença hematita e/ou goethita (Stenberg et al., 2010; Brown, 2006), apesar dos escores desses CP apresentarem baixa correlação com a argila (Figura 21). O CP 5, além de apresentar uma forte feição negativa a 650 nm indicativa de goethita, apresenta outra destacada feição a 1900 nm, que está associada a presença de H₂O e grupos OH⁻ (Figura 20e). A presença de H₂O e grupos OH⁻ também pode ser evidenciada nas feições em 1400 e 1900 nm no CP 6 (Fig. 20f). Essas feições nos CP5 e 6 podem estar relacionadas com presença de minerais 2:1 no solo (Stenberg et al., 2010; Weidong et al., 2002).

Todos os escores dos CP apresentaram baixa correlação com os atributos químicos do solo, como já foi observado em outros trabalhos (Bonett et al., 2016; Gholizade et al., 2013). Entretanto, por apresentarem uma alta correlação com a cor, textura e mineralogia do solo, como evidenciado em outros estudos (Soriano-Disla et al., 2014; Viscarra Rossel et al., 2010), é esperado que as informações obtidas através dos espectros permitam diferenciar tipos de solos.

3.3.4. Análise multivariada de variância (MANOVA) da topossequência 2

Em todos os testes estatísticos utilizados encontrou-se uma diferença significativa ($p < 0,0001$) entre os atributos do solo e os escores dos CP quando analisados por elementos da encosta da topossequência 2 (Tabela 5). Isso confirma a vantagem de utilizar os elementos da encosta como guia na seleção de locais para coleta de amostras de solo, no auxílio ao delineamento de unidades de mapeamento e na desagregação de mapas de solo pré-existentes (Drăguț & Dornik, 2016; Miller & Schaetzl, 2015).

Tabela 5. Testes estatísticos multivariados dos atributos do solo e escores dos componentes principais em relação aos elementos da encosta da topossequência 2

Teste	Valor	Valor F	GL	Den DF	Pr > F
Análises químicas e granulométrica					
Lambda de Willks	0,03	12,9	40	190,2	<0,0001
Traço de Pillai	2,9	8,3	40	235,0	<0,0001
Maior Raiz de Roy	13,4	79,0	8	47,0	<0,0001
Traço de Hotelling-Lawley	18,6	19,3	40	207,0	<0,0001
Escore dos componentes principais					
Lambda de Willks	0,005	13,6	35	187,5	<0,001
Traço de Pillai	2,5	7,1	35	240,0	<0,001
Maior Raiz de Roy	17,8	122,0	7	48,0	<0,001
Traço de Hotelling-Lawley	21,7	26,3	35	212,0	<0,001

Todos os atributos do solo e componentes principais foram significativos ($< 0,01$), quando analisados segundo os elementos da encosta, o que corrobora as suas capacidades em discriminar os solos estudados (Tabela 6).

Tabela 6. Contribuição dos atributos do solo e dos escores da análise de componentes principais na análise multivariada de variância da topossequência 2

Variáveis	F value	Pr (>F)
Atributos do solo		
pH (KCl)	10,4	<0,01
Soma de bases	3,6	<0,01
Capacidade de troca catiônica	4,2	<0,01
Saturação por bases	14,1	<0,01
Saturação por alumínio	11,4	<0,01
Areia total	16,4	<0,01
Silte	25,7	<0,01
Argila	109,	<0,01
Escores dos Componentes Principais		
CP1	15,4	<0,01
CP2	19,4	<0,01
CP3	23,2	<0,01
CP4	1,4	<0,01
CP5	4,7	<0,01
CP6	25,7	<0,01

3.3.5. Análise de similaridade pela distância pedológica das amostras de solo coletadas nas topossequências estudadas

3.3.5.1. Topossequência 1

Na T1 os valores da distância euclidiana média entre cada ponto de amostragem de solo e o centro do grupo ao qual ele está ligado (Din) pela média das distâncias euclidianas que separam os centros do grupo (Dex) apresentaram valores constantes com 9 grupos, quando os solos foram avaliados pelas suas análises químicas e granulométrica (análises convencionais). Tanto quando a análise baseou-se nos dados espectrais como tomando por base o conjunto de variáveis das análises espectrais associada as convencionais foram encontrados valores constantes em 10 grupos (Figura 22).

Os grupos formados pelo OSACA diferenciam-se pelas características quantitativas dos seus indivíduos (pontos onde foram coletadas amostras de solo), ou seja, os indivíduos de um mesmo grupo apresentam características semelhantes e, por isso, uma menor distância euclidiana entre eles (Carré & Jacobson, 2009). Essa distância está ilustrada pelo gráfico de coordenadas principais, na qual as amostras de solo mais similares estão representadas mais próximas umas das outras do que as menos similares. Ainda, os grupos criados pelo OSACA foram

representados espacialmente para avaliar a influência dos conjuntos de variáveis no agrupamento de classes similares que ocorreram nos diversos segmentos da encosta.

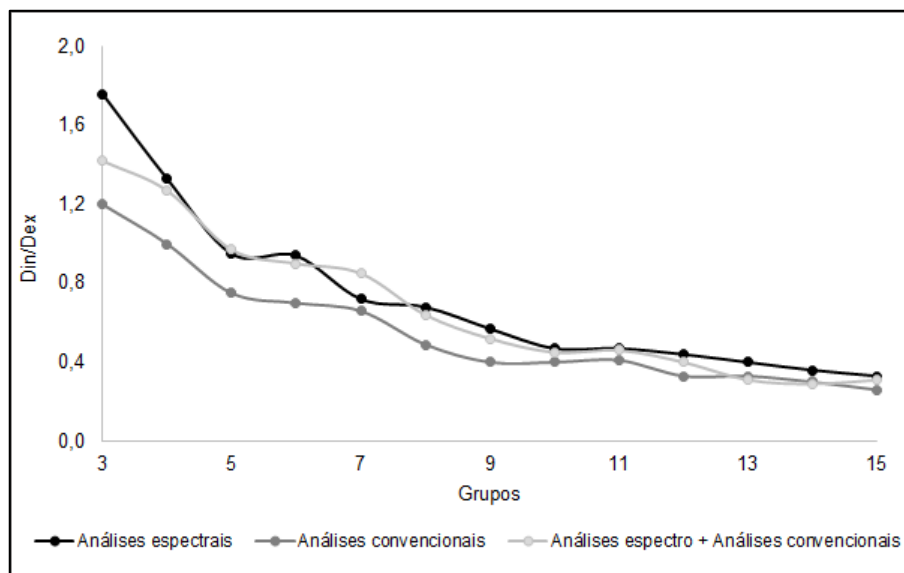


Figura 22. Relação dos valores da distância euclidiana média entre cada ponto de amostragem de solo e o centro do grupo ao qual ele está ligado (Din) pela média das distâncias euclidianas que separam os centros do grupo (Dex) e os grupos criados a partir da análise de similaridade das amostras de solo coletadas na topossequência 1.

3.3.5.1.1. Análises espectrais (6 primeiros componentes principais)

Os CP1 e CP2 obtidos pelas análises espectrais das amostras de solo coletadas na T1 explicaram 49% da variância total dos dados originais (Figura 23). Baseado neles, os pontos identificados como Neossolos Litólicos (RL) apresentaram uma maior distância euclidiana dos identificados como correspondentes a outras classes de solo, e foram enquadrados no mesmo grupo (G5). As amostras de solo dos pontos P08 e P33 presentes nesse grupo (G5) apresentaram características espectrais semelhantes (Figura 25j e 28d), com baixa intensidade de reflectância, semelhança na forma da curva tanto da amostra da camada superficial como na subsuperficial e feições de absorção bem pouco evidenciadas, que estão relacionadas a solos menos intemperizados (Viscarra Rossel et al., 2016). Nesses pontos, localizados no FS1 e SH2, estão associadas amostras de solos com rocha a pouca profundidade e alguns afloramentos (Figura 24).

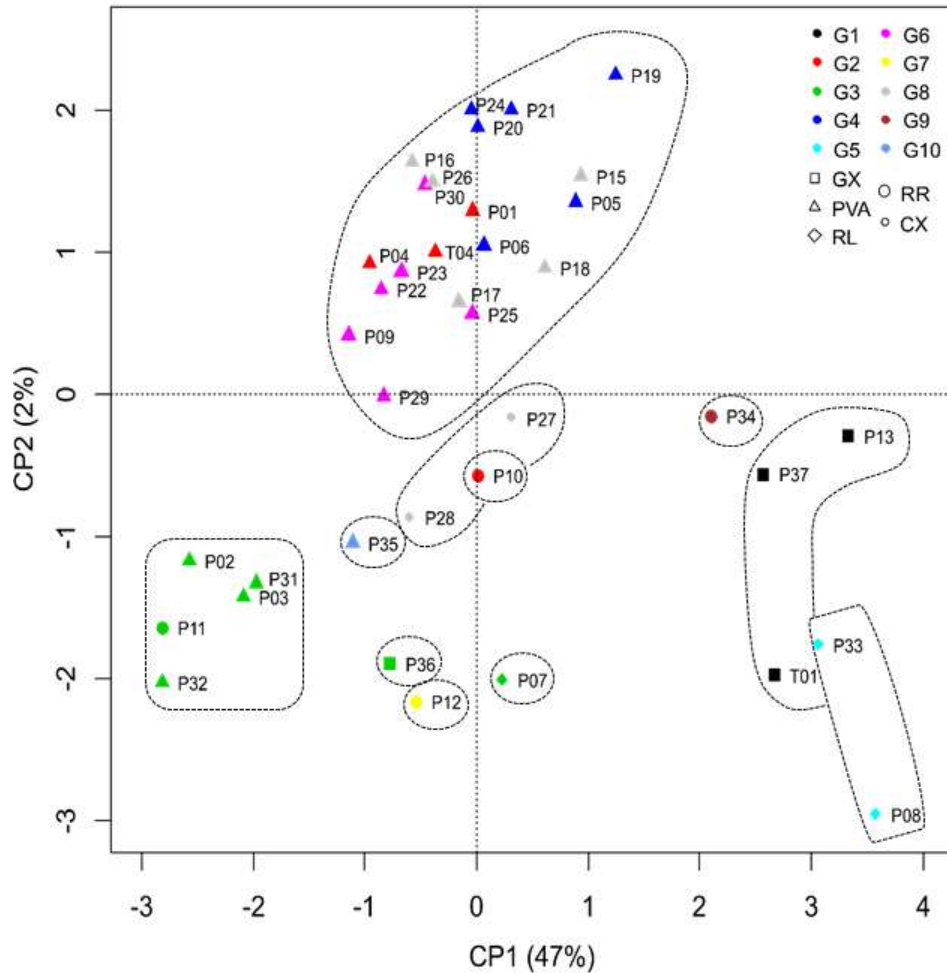


Figura 23. Gráfico de coordenadas principais obtido com os dados das análises espectrais das amostras dos solos da topossequência 1 (escores dos 6 primeiros componentes principais). GX: Gleissolo Háplico, PVA: Argissolo Vermelho-Amarelo, RL: Neossolo Litólico, RR: Neossolo Regolítico, CX: Cambissolo Háplico.

As amostras de solo classificadas como Gleissolos Háplicos (GX) também foram enquadradas em um mesmo grupo (G1) e apresentaram uma menor interdistância (Figura 23). Essas amostras foram coletadas na planície de inundação do TS (Figura 24). Entretanto, a do P36, que também corresponde a um GX, apresentou uma distância euclidiana maior dos outros indivíduos que foram identificados na mesma classe de solo (G1) e por isso, foi inserida em outro grupo (G3), mesmo estando localizada no mesmo elemento da encosta (TS). Tal fato demonstra que, apesar de ser oriunda de um solo da mesma classe, o seu espectro difere das amostras dos indivíduos pertencentes ao G1 (Figura 28h). De fato, o espectro da amostra da camada subsuperficial do P36 (80-100 cm) apresentou menor intensidade de reflectância do que da camada superficial (0-20 cm), enquanto que para as amostras dos outros indivíduos incluídos nessa classe de solo ocorreu o

inverso (Figura 25a, 26e e 28i). A intensidade de reflectância está relacionada à textura do solo, em que camadas mais arenosas tendem a apresentar uma maior refletância do que camadas argilosas (Stenberg et al., 2010). Assim, baseado no espectro das amostras do P36, pode-se inferir que há diferenciação textural e que esta amostra apresenta cores claras, em razão da presença de feições pouco acentuadas de óxidos de ferro na região espectral do visível (Vis). De fato, esse solo apresenta um horizonte de acúmulo de argila (Bt) abaixo de um horizonte glei e, por isso, foi inserido no grupo onde dominaram PVA, que ocorreram principalmente no BS (Figura 24). Esse ponto não apresentou uma distância euclidiana próxima dos indivíduos pertencentes ao grupo no qual ele foi enquadrado (G3), em razão das diferenças na curva espectral das amostras classificadas como PVA e GX (P36) (Figura 25d, 25d, 26c, 28b, 28c e 28h). Isso confirma o potencial dos dados espectrais para separar solos enquadrados na mesma classe taxonômica, mas com atributos diferentes, principalmente os relacionados à textura, matéria orgânica, ferro total e mineralogia, uma vez que eles apresentam uma alta correlação com o espectro (Stenberg et al., 2010).

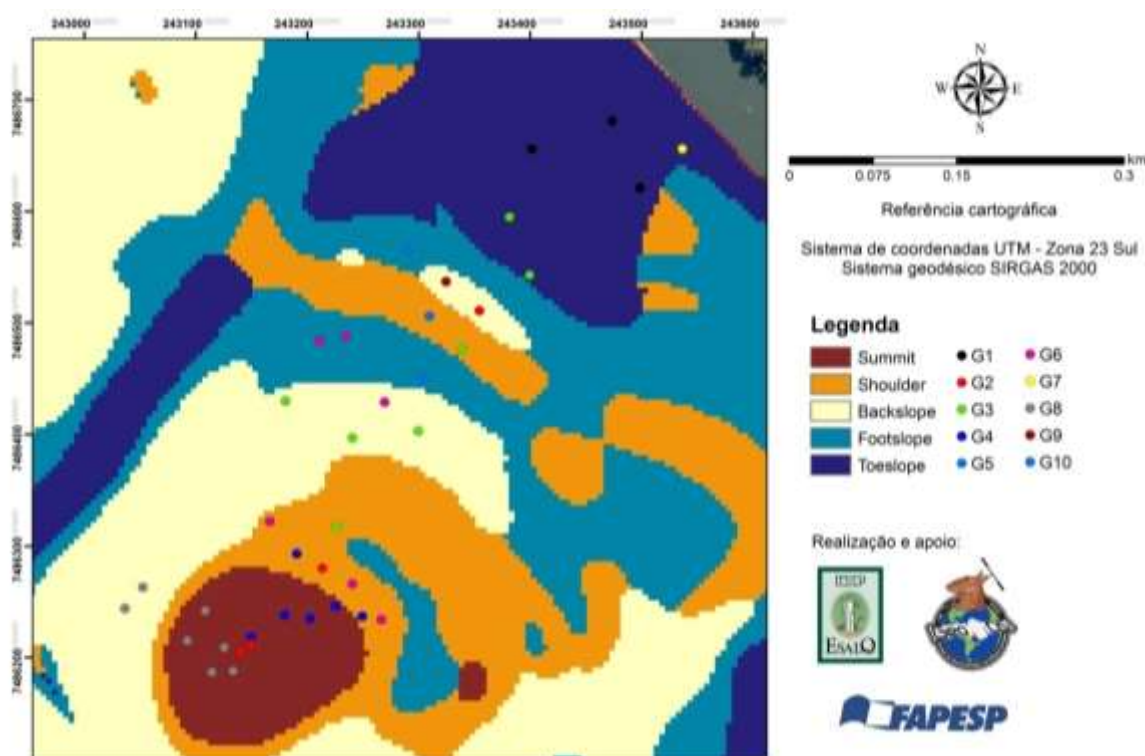


Figura 24. Distribuição espacial dos grupos criados pelo OSACA baseado nas análises espectrais das amostras de solos coletadas na topossequência 1 por elementos da encosta.

O P11 também foi inserido no G3, mas seu solo foi classificado como *Nessolo Regolítico (RR)* (Figura 23). Os espectros das amostras de solo do P11 apresentaram uma curva similar aos do P36, entretanto a camada subsuperficial desse solo (P11) apresentou uma maior intensidade de reflectância do que a superficial, o que evidencia que ele não tem um horizonte Bt. Entretanto, as feições de absorção presentes na curva espectral das suas amostras são similares e, por isso, ocorreu o seu enquadramento nesse grupo. Contudo, esperava-se que o P11 e o P36 não fossem enquadrados no G3, em razão dos seus solos não apresentarem similaridade na curva espectral com os dos outros solos desse grupo, identificados como PVA. Os espectros dos solos classificados como PVA incluídos no G3 apresentaram fortes feições de absorção, indicativas de óxidos de ferro (Vis), e inversão da curva na região do SWIR. A inversão da curva nessa região espectral evidencia uma mudança textural (Demattê et al., 2014). Tal fato não ocorreu nas amostras de solo dos pontos P11 e P36, que foram enquadradas em outra classe de solo. O P07 também pertence ao G3, mas este apresenta uma distância euclidiana maior do que os outros indivíduos do seu grupo, inclusive do P36, o que permite inferir que os espectros das suas amostras apresentam características distintas dos demais. Tal fato pode ser confirmado pela menor intensidade de reflectância e feições menos pronunciadas ao longo do espectro (Figura 25i). Contudo, ele apresenta similaridades com os demais indivíduos do grupo, principalmente em relação aos CP e, por isso, foi inserido no G3 e não no grupo onde os indivíduos são da mesma classe de solo que ele (G5). Solos de classes distintas, como PVA, RR e RL foram inseridos no G3, em razão disso, não houve uma boa discriminação dos indivíduos pertencentes ao G3 a partir das suas análises espectrais utilizando o OSACA, uma vez que foram enquadrados solos contrastantes de diferentes classes no mesmo grupo.

No G7 houve apenas um indivíduo (P12), cujo solo foi classificado como RR. Ele está localizado no dique marginal da TS (Figura 24), por isso, é de se supor que tenha uma gênese diferente dos demais localizados nessa topossequência. Suas amostras apresentaram uma resposta espectral distinta (Figura 26d), com uma alta reflectância (0,6) e feições pouco pronunciadas ao longo da curva espectral, o que é característico de solos com textura arenosa (Conforti et al., 2015; Mouazen et al., 2005). O solo do P34, pertencente ao G9, apesar de também ser classificado como RR, como os do P10, P11 e P12, apresenta uma maior amplitude na curva espectral

da amostra da sua camada superficial e subsuperficial (~0,3), que difere das amostras de solo dos outros indivíduos enquadrados na mesma classe (Figura 28f). Por apresentar uma resposta espectral diferente, ele não foi agrupado com os outros RR.

O G10 também possui apenas um indivíduo (P35), classificado como PVA. Suas amostras apresentaram uma curva espectral semelhante as do PVA pertencentes ao G3, mas difere por apresentar feições mais acentuadas em 1400, 1900 e 2200 nm, características de OH⁻ e H₂O, que geralmente estão associadas a presença de minerais 2:1 (Viscarra Rossel et al., 2006; Ben-Dor, 2002). Esse solo situa-se em um FS (Figura 24), que é uma área que recebe água e sedimentos das partes mais elevadas da paisagem (Miller & Schaetzl, 2015). Assim, foi confirmado um comportamento espectral diferente da amostra de solo que foi coletada nesse elemento da encosta, principalmente associado a bandas de absorção indicativa da mineralogia do solo (Zinck et al., 2016).

Dois pontos pertencentes ao G8 (P27 e P28) correspondem a solos classificados como Cambissolos Háplicos (CX), os únicos dessa classe que ocorreram nessa topossequência - localizados no BS (Figura 24). Entretanto, esses pontos foram enquadrados no mesmo grupo dos indivíduos classificados como PVA, o que não era esperado, em razão deles não apresentarem incremento significativo de argila em profundidade (horizonte Bt), como ocorre nos PVA. Apesar disso, esses pontos (P27 e P28) apresentaram uma maior distância euclidiana dos indivíduos pertencentes a esse grupo (Figura 23), o que evidencia que entres eles há diferenças espectrais das suas amostras de solo, embora não tenha sido suficiente para o algoritmo enquadrá-los em outro grupo.

Os indivíduos do G4 tiveram um comportamento distinto, em razão da menor distância com os do G2, G6 e G8. Como foi discutido no tópico 3.3.2.1., no SU houve predomínio de PVA com horizonte A+E maior que 1,7 m (esessarênicos). Então, esperava-se que o espectro das amostras de solo diferenciasses esses solos daqueles que apresentaram um horizonte Bt dentro de 1 m, em razão da diferença no teor de argila, uma vez que o CP1 e 6 apresentaram uma alta correlação com esse atributo (Figura 21). Entretanto, as curvas espectrais das amostras desses indivíduos foram similares, não permitindo tal discriminação.

Em resumo, os grupos formados pelo OSACA utilizando apenas as variáveis espectrais das amostras de solo não discriminaram tão bem os tipos de solos

encontrados nessa topossequência, pois era esperado que os PVA espessarênicos localizados no SU fossem discriminados daqueles localizados no SH, BS e FS que apresentaram o horizonte Bt dentro de 1 m (Figura 24). Também esperava-se que os solos classificados como CX fossem discriminados, mas isso não ocorreu, pois esses foram agrupados com os solos que apresentaram um horizonte Bt (PVA). Apesar disso, os GX e o RR localizado no dique marginal do TS foram discriminados dos outros solos.

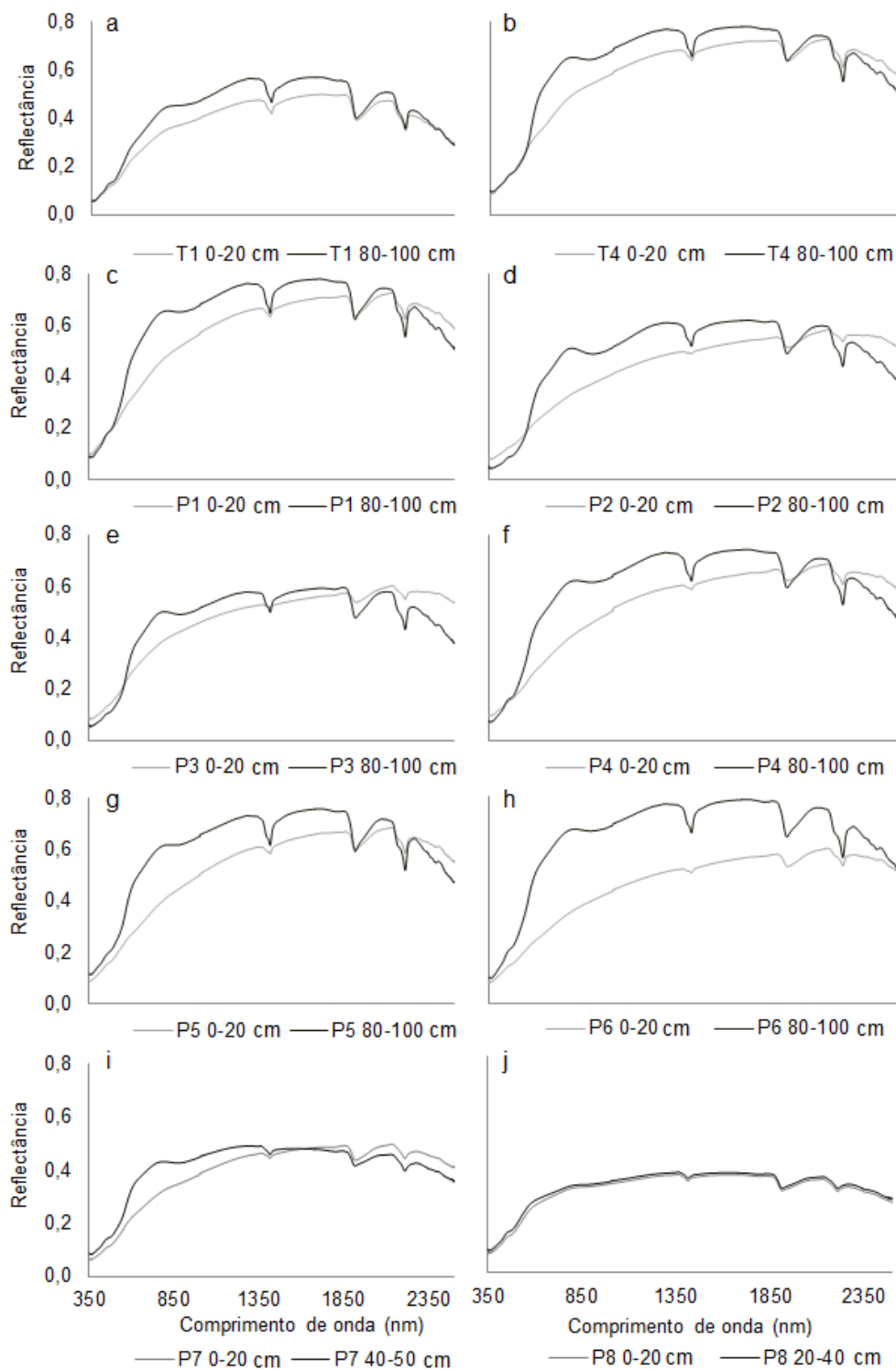


Figura 25. Curvas espectrais das amostras do horizonte superficial e subsuperficial dos solos coletados nos pontos: (a) T1, (b) T4, (c) P1, (d) P2, (e) P3, (f) P4, (g) P5, (h) P6, (i) P7 e (j) P8 localizadas na topossequência 1.

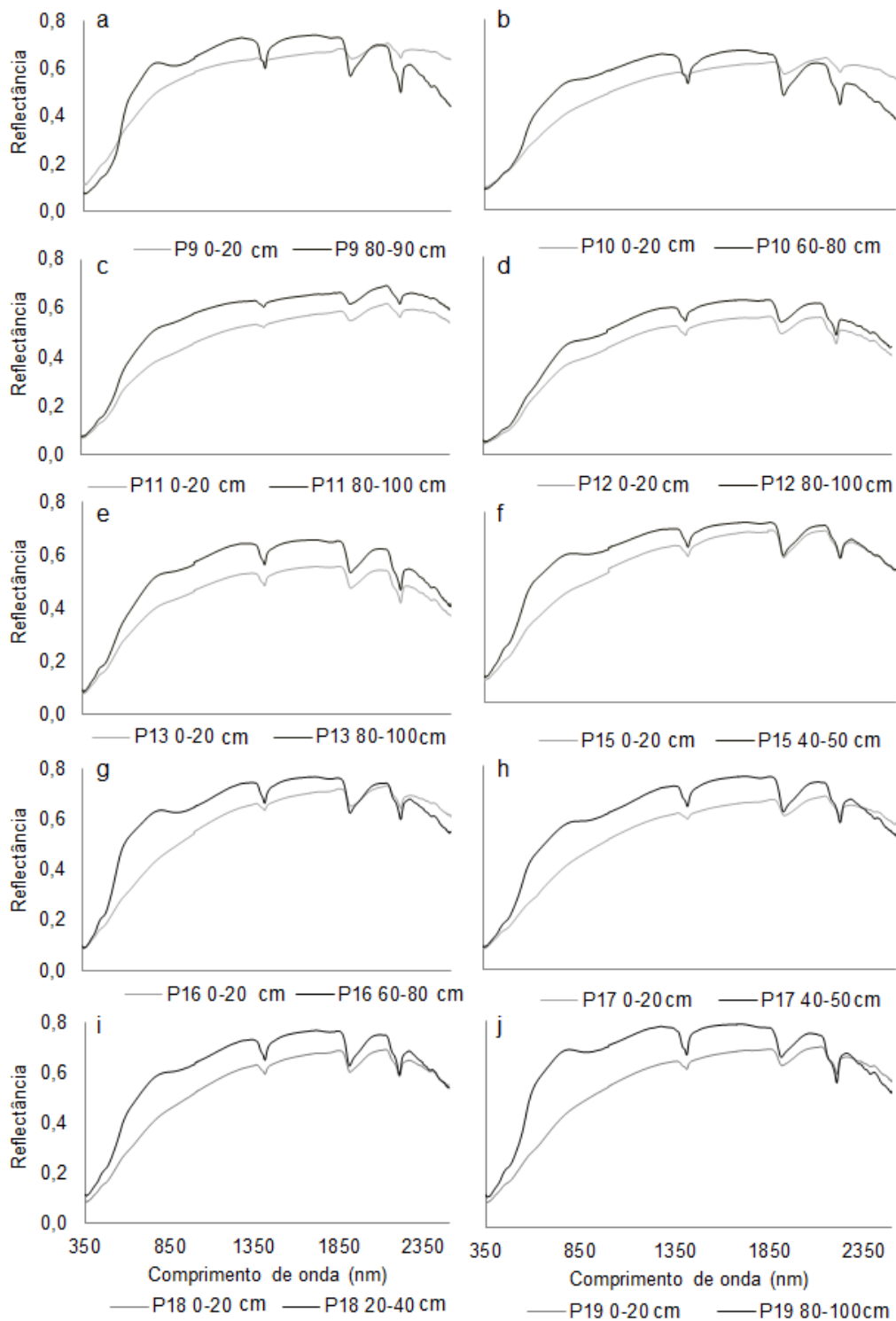


Figura 26. Curvas espectrais das amostras do horizonte superficial e subsuperficial dos solos coletados nos pontos: (a) P9, (b) P10, (c) P11, (d) P12, (e) P13, (f) P14, (g) P15, (h) P16, (i) P17, (j) P18 e (j) P19 localizadas na topossequência 1.

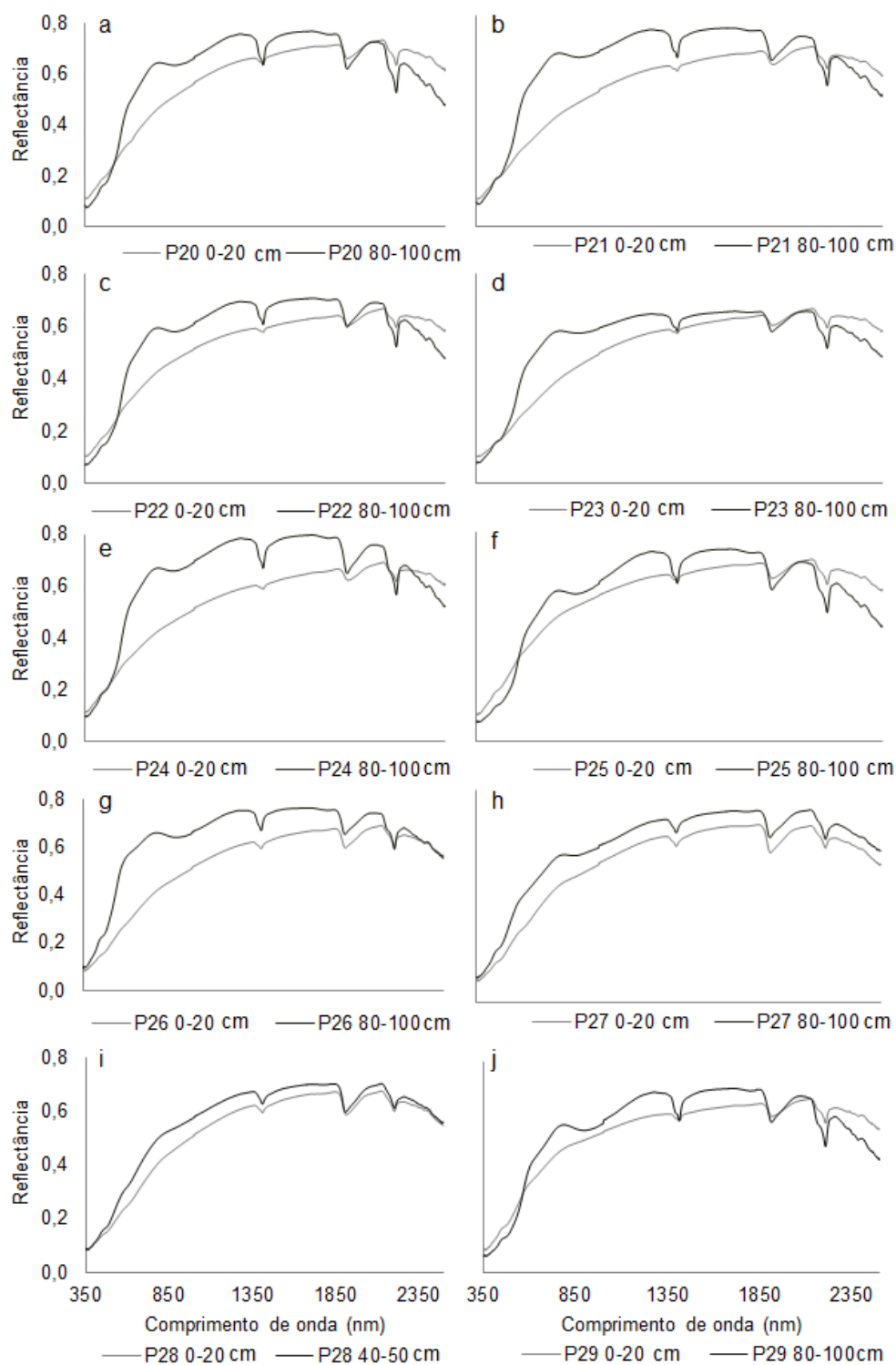


Figura 27. Curvas espectrais das amostras do horizonte superficial e subsuperficial dos solos coletados nos pontos: (a) P20, (b) P21, (c) P22, (d) P23, (e) P24, (f) P25, (g) P26, (h) P27, (i) P28 e (j) P29 localizadas na toposequência 1.

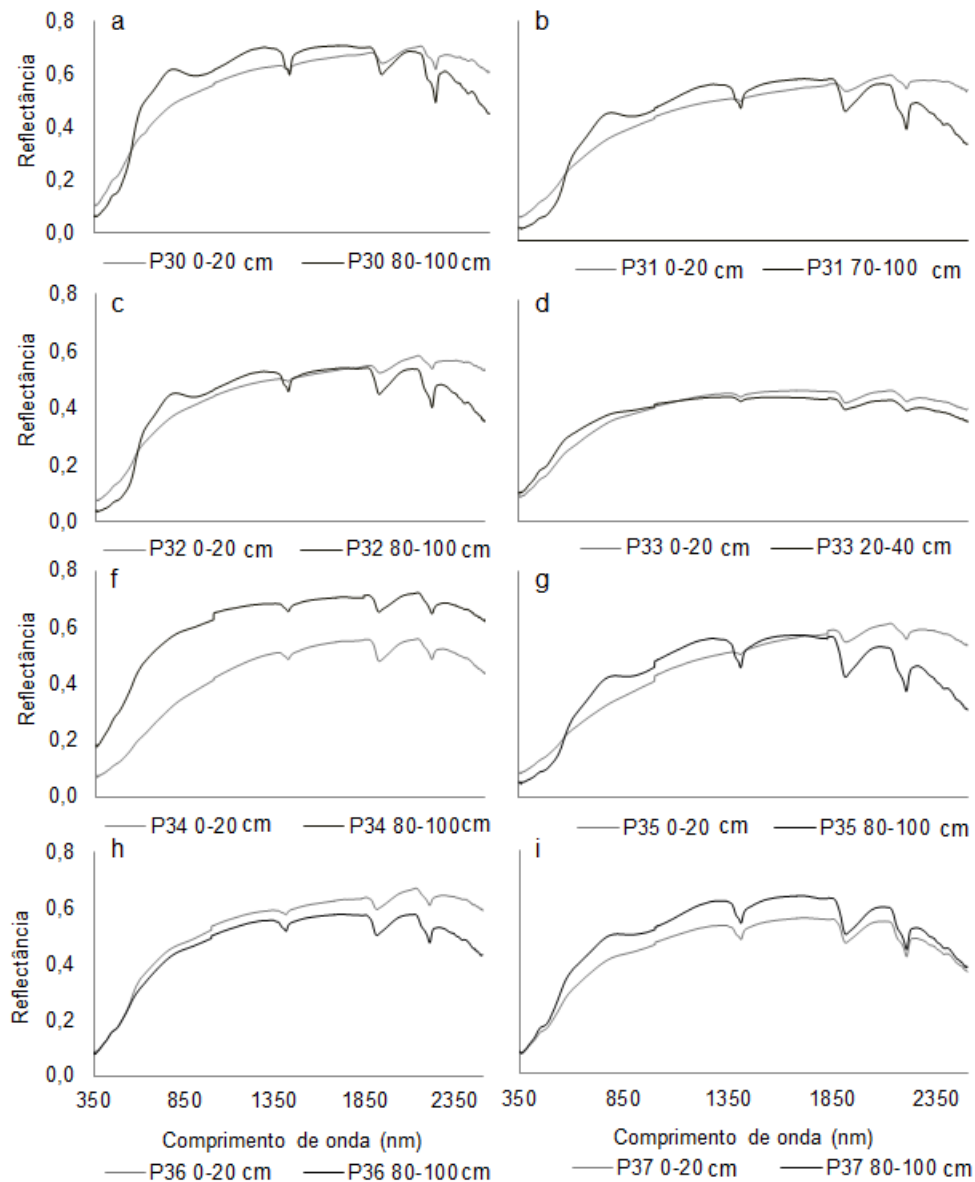


Figura 28. Curvas espectrais das amostras do horizonte superficial e subsuperficial dos solos coletados nos pontos: (a) P30, (b) P31, (c) P32, (d) P33, (e) P34, (f) P35, (g) P36 e (h) P37 localizadas na topossequência 1.

3.3.5.1.2. Análises convencionais (químicas e granulométrica)

Os CP1 e CP2 obtidos através dos dados das análises convencionais (químicas e granulométrica) explicaram 63% da variância total dos dados originais (Figura 29), valor superior ao encontrado para as análises espectrais (Figura 23).

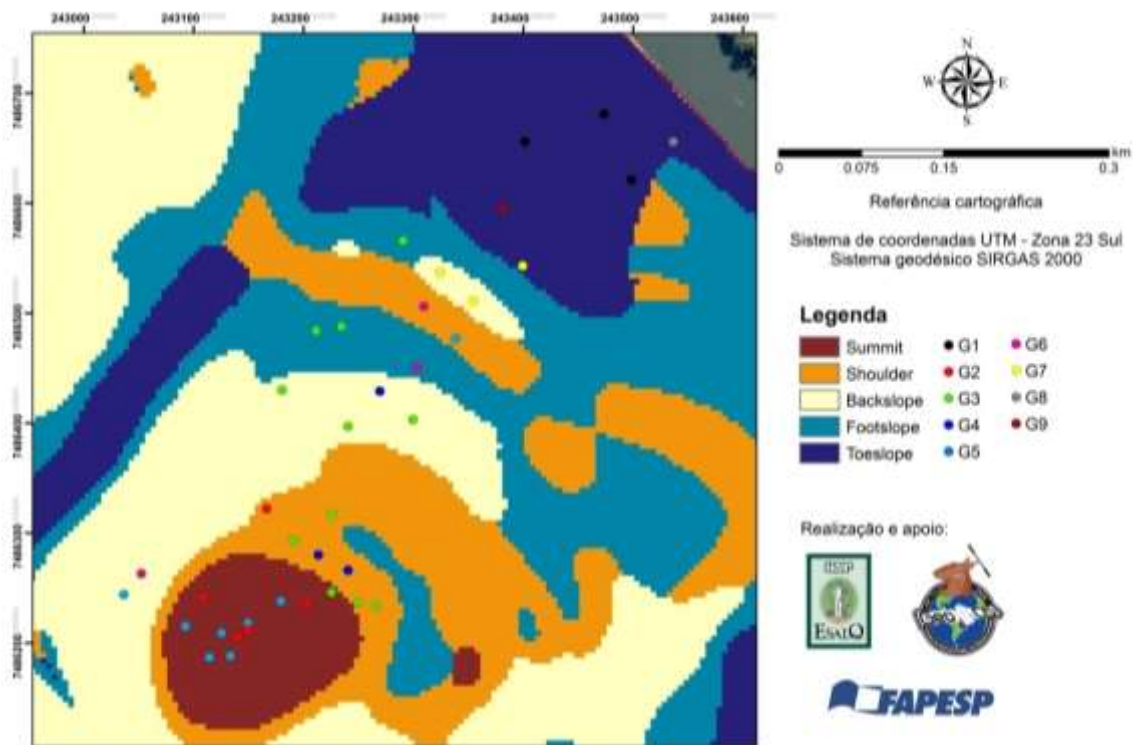


Figura 30. Distribuição espacial dos grupos criados pelo OSACA baseado nas análises convencionais (químicas e granulométrica) das amostras de solos coletadas na topossequência 1 segundo seus elementos da encosta.

O P12, que teve seu solo classificado como RR, localizado no dique marginal da TS (Figura 30), também foi discriminado dos demais RR, como também pelas análises espectrais (Figura 29). Os outros RR (P10, P11 e P34) foram enquadrados em um mesmo grupo (G7), apesar de apresentarem uma distância euclidiana próxima dos solos classificados como PVA. Isso foi discutido no tópico 3.3.2.1., que foi abordado que esses solos (RR) podem ser PVA espessarênicos, apesar de apresentarem um teor de areia total superior aos encontrados nos PVA localizados no SU (Tabela 7 e 8). Assim, as análises convencionais dos atributos do solo se destacaram em discriminar esses indivíduos frente as análises espectrais.

Tabela 7. Análises químicas e granulométrica das amostras de solos coletadas nos pontos T01, T04, P01, P02, P03, P04, P05, P06, P07, P08, P09, P10 e P11 localizados na topossequência 1

Tradagem	Prof. ¹ cm	pH KCl	SB ²	T ³	V ⁴	m ⁵	Areia total	Silte	Argila
			----- mmol _c kg ⁻¹ -----	----- % -----	----- g kg ⁻¹ -----	----- g kg ⁻¹ -----	----- g kg ⁻¹ -----		
T01	0-20	4,0	41,7	97,1	42,9	13,9	245	375	379
	80-100	3,8	20,3	88,1	23,0	38,5	173	370	457
T04	0-20	6,6	33,7	39,5	85,3	0,0	613	261	125
	80-100	4,1	20,1	51,1	39,3	37,6	525	298	177
P01	0-20	4,9	33,0	46,0	71,8	0,6	614	238	148
	80-100	4,0	19,7	53,5	36,9	34,4	561	267	172
P02	0-20	5,0	21,1	35,5	59,4	0,9	835	65	99
	80-100	5,0	38,5	50,1	76,6	0,6	601	148	252
P03	0-20	5,1	14,3	23,5	60,8	1,2	846	54	100
	80-100	3,9	37,5	48,9	76,7	0,0	656	96	248
P04	0-20	3,9	4,8	25,8	18,6	15,5	819	105	75
	80-100	5,0	28,0	40,4	69,3	0,7	688	112	200
P05	0-20	4,8	30,0	46,2	65,0	0,6	629	272	100
	80-100	6,0	34,1	40,7	83,8	0,0	786	90	125
P06	0-20	4,7	30,4	52,4	58,0	0,6	634	241	125
	80-100	4,8	41,7	56,5	73,8	1,2	478	350	173
P07	0-20	5,1	37,6	51,8	72,6	0,0	675	176	150
	40-50	4,9	67,8	86,6	78,3	0,4	532	219	249
P08	0-20	4,0	82,2	119,4	68,8	6,2	-	-	-
	20-40	4,0	87,3	119,4	73,2	5,2	-	-	-
P09	0-20	4,1	4,5	19,1	23,6	13,1	844	81	74
	80-90	4,4	40,9	55,3	74,0	2,9	702	148	150
P10	0-20	4,6	14,5	31,1	46,6	2,9	806	120	74
	60-80	4,0	20,5	31,5	65,1	9,5	930	20	50
P11	0-20	5,4	14,1	23,5	60,0	0,0	873	27	100
	80-100	4,6	3,8	7,6	49,8	4,0	929	34	37

¹Profundidade, ²Soma de bases, ³Capacidade de Troca Catiônica, ⁴Saturação por bases e ⁵Saturação por alumínio.

Tabela 8. Análises químicas e granulométrica das amostras de solos coletadas nos pontos P12, P13, P15, P16, P17, P18, P19, P20, P21, P22, P23, P24 e P25 localizados na topossequência 1

Tradagem	Prof. ¹ cm	pH KCl	SB ²	T ³	V ⁴	m ⁵	Areia total	Silte	Argila
			----- mmol _c kg ⁻¹ -----	----- % -----	----- g kg ⁻¹ -----				
P12	0-20	3,9	4,2	34,8	12,0	32,5	776	99	125
	80-100	3,9	2,3	22,5	10,3	33,7	892	21	87
P13	0-20	3,8	31,3	94,5	33,1	26,2	242	380	379
	80-100	3,7	37,0	99,8	37,1	29,8	305	240	455
P15	0-20	5,9	51,5	62,3	82,7	0,0	422	478	100
	40-50	6,2	59,3	65,1	91,1	0,0	320	579	101
P16	0-20	5,8	25,3	35,3	71,7	0,0	710	190	100
	60-80	4,0	41,0	68,6	59,8	18,2	459	391	151
P17	0-20	4,1	14,2	38,6	36,8	9,1	666	259	75
	40-50	5,8	42,8	50,6	84,6	0,0	538	362	100
P18	0-20	5,8	44,5	52,5	84,8	0,0	608	266	126
	20-40	5,9	50,7	55,9	90,7	0,0	708	155	137
P19	0-20	4,7	18,4	33,6	54,8	2,1	861	30	109
	80-100	4,1	12,8	36,8	34,7	37,5	636	176	188
P20	0-20	5,1	13,9	24,5	56,7	0,0	855	45	100
	80-100	5,5	31,8	40,2	79,1	0,0	675	100	225
P21	0-20	4,9	16,8	26,2	64,1	1,2	802	98	100
	80-100	4,2	19,0	34,6	54,8	11,9	704	71	225
P22	0-20	4,5	12,2	28,8	42,3	2,4	782	143	75
	80-100	4,1	24,7	43,5	56,8	10,8	658	142	200
P23	0-20	4,1	6,7	22,9	29,2	8,7	814	111	75
	80-100	5,2	21,7	30,3	71,6	0,0	697	128	175
P24	0-20	6,3	18,0	25,0	72,0	0,0	802	122	76
	80-100	4,2	28,7	43,9	65,4	4,6	605	197	198
P25	0-20	4,6	14,2	28,2	50,4	2,5	683	242	75
	80-100	3,9	12,3	49,3	24,9	54,6	525	300	175

¹Profundidade, ²Soma de bases, ³Capacidade de troca catiônica, ⁴Saturação por bases e ⁵Saturação por alumínio.

Tabela 9. Análises químicas e granulométrica das amostras de solos coletadas nos pontos P26, P27, P28, P29, P30, P31, P32, P33, P34, P35, P36 e P37 localizados na topossequência 1

Tradagem	Prof. ¹ cm	pH KCl	SB ²	T ³	V ⁴	m ⁵	Areia total	Silte	Argila
			----- mmol _c kg ⁻¹ -----	-----	----- % -----	----- g kg ⁻¹ -----			
P26	0-20	4,6	41,0	61,4	66,8	1,1	475	400	125
	80-100	3,8	15,6	58,2	26,8	49,8	270	530	200
P27	0-20	4,1	67,8	101,6	66,7	4,2	202	673	125
	80-100	4,0	54,0	72,4	74,6	4,2	162	713	125
P28	0-20	4,0	30,8	63,0	48,9	11,3	354	521	125
	40-50	4,1	37,0	60,8	60,8	8,1	447	427	125
P29	0-20	5,2	15,6	28,0	55,8	1,1	753	172	75
	80-100	4,2	25,0	43,4	57,6	8,3	573	177	249
P30	0-20	4,7	9,6	21,2	45,2	1,4	789	136	75
	80-100	4,0	11,7	29,3	40,0	24,9	646	154	200
P31	0-20	5,1	12,3	26,3	46,8	1,1	792	133	75
	70-100	4,1	33,0	50,0	66,0	4,4	559	140	302
P32	0-20	4,4	10,7	22,7	47,1	3,1	808	117	75
	80-100	5,2	35,1	46,9	74,8	0,0	603	121	276
P33	0-20	3,8	36,7	75,9	48,3	11,3	475	274	252
	20-40	4,3	95,0	120,4	78,9	2,5	351	321	328
P34	0-20	4,1	20,5	43,9	46,7	5,9	789	86	125
	80-100	4,1	6,9	20,3	34,1	15,2	860	65	75
P35	0-20	5,7	14,3	25,1	56,9	1,2	871	55	75
	80-100	3,7	11,9	53,7	22,2	40,6	645	95	260
P36	0-20	4,6	9,4	20,4	46,0	1,5	841	84	75
	80-100	3,8	56,4	110,0	51,3	11,7	87	509	404
P37	0-20	3,9	51,3	111,3	46,1	13,6	41	478	481
	80-100	4,2	43,5	83,1	52,3	5,3	72	495	433

¹Profundidade, ²Soma de bases, ³Capacidade de troca catiônica, ⁴Saturação por bases e ⁵Saturação por alumínio.

Os solos classificados como CX (P27 e P28) da T1 foram enquadrados em grupos distintos. O P27 no G6, juntamente com RL, por apresentar alta saturação por bases e capacidade de troca catiônica. Enquanto que o ponto P28 enquadrou-se no G5, juntamente com outros identificados como PVA, apesar de estar distante dos indivíduos desse grupo. Entretanto, o CX do P28 foi inserido no G5 por apresentar similaridade em relação ao teor de areia total e saturação por bases (Tabela 9). No G6, além do P27, foram inseridos os P08 e P33, também agrupados nas análises pelos espectros.

O G5 é composto por solos classificados como PVA espessarênicos. Todas as suas amostras se localizaram no SU, exceto as do P07 e P28, que se situaram no SH e no BS (Figura 30), respectivamente, e pertencem a outra classe taxonômica (Figura 29). As análises espectrais, ao contrário das convencionais, não discriminaram bem os solos identificados como PVA espessarênico daqueles que apresentaram o horizonte Bt dentro de 1 m (Figura 24). Além do G5, o G2 também agrupou PVA espessarênicos que ocorreram no SU, com exceção do P25, que é não espessarênico e está localizado no SH (Figura 30). Ele foi enquadrado no G3 por seu solo apresentar baixa saturação por bases e CTC, como os outros indivíduos que ocorreram nesse grupo (G2). Assim, os indivíduos presentes no G2 e G5 foram predominantemente identificados como PVA espessarênico e estão localizados no SU (Figura 30). Esses grupos se diferenciaram por seus solos apresentarem altos (G2) e baixos (G5) valores de SB e V%.

No G3 e G4 foram inseridos solos identificados como PVA não espessarênicos, situados no SH, BS e FS (Figura 29 e 30). Apesar de estarem localizados em diferentes posições da encosta, os solos desses pontos foram discriminados dos espessarênicos (Figura 30), o que – neste caso – demonstra o potencial das análises convencionais em separá-los frente às análises espectrais.

3.3.5.1.3. Análises espectrais + Análises convencionais

Similarmente ao resultado obtido utilizando as análises espectrais, os CP1 e CP2, baseados nas análises espectrais associadas as convencionais, explicaram 49% da variância total dos dados originais (Figura 31). Esse conjunto de variáveis agrupou solos considerados mais daqueles menos similares na classe taxonômica bem melhor do que os outros conjuntos. Todos eles agruparam os solos

classificados como GX (G1), diferenciando o identificado como RR (P12), situado no dique marginal (Figura 31 e 32). Entretanto, o conjunto de variáveis baseado nas análises espectrais associadas as convencionais enquadrou os CX no mesmo grupo (G8). Tal fato não ocorreu com os outros conjuntos de variáveis, pois neles os CX (P27 e P28) foram agrupados com outras classes de solo (RL e PVA). Ainda, para este conjunto de variáveis, o P36 foi discriminado, enquadrando-o no G10.

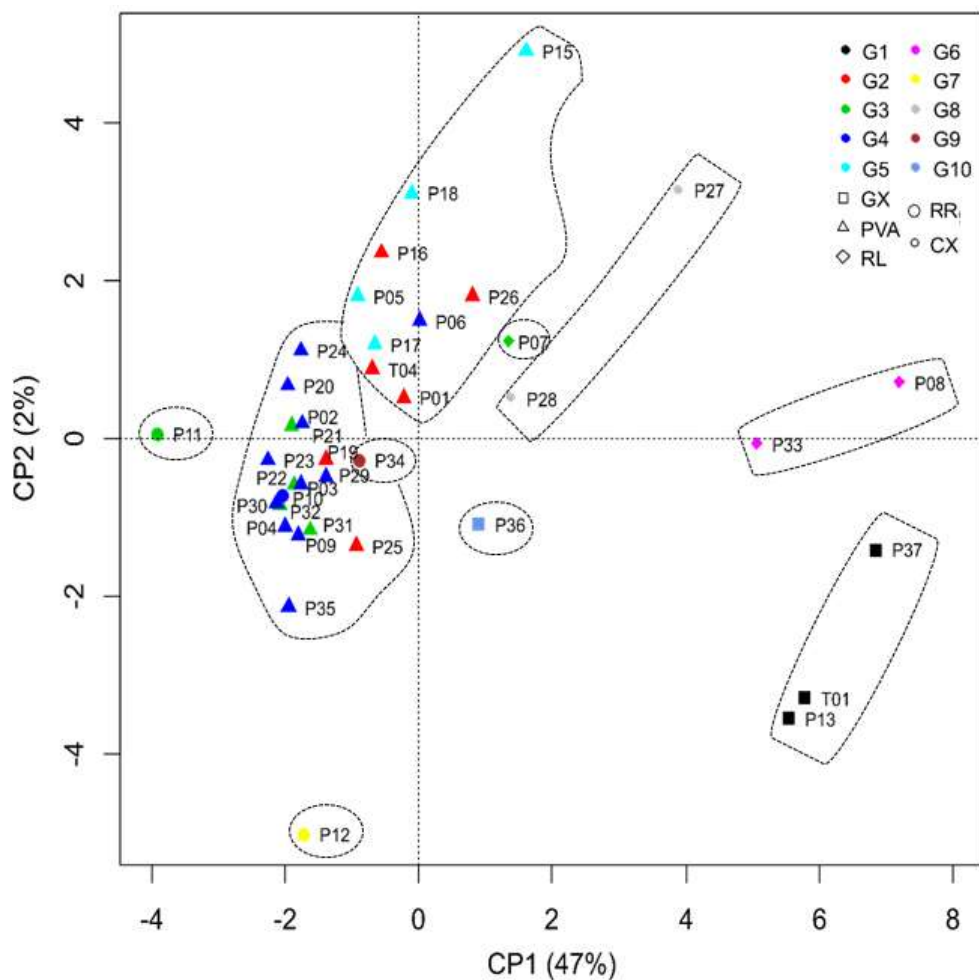


Figura 31. Gráfico de coordenadas principais obtido com os dados das análises espectrais + análises convencionais das amostras dos solos da topossequência 1 (6 primeiros componentes principais, pH em KCl, soma de bases, saturação por bases, saturação por alumínio, capacidade de troca catiônica, argila, areia total, silte e argila). GX: Gleissolo Háptico, PVA: Argissolo Vermelho-Amarelo, RL: Neossolo Litólico, RR: Neossolo Regolítico, CX: Cambissolo Háptico.

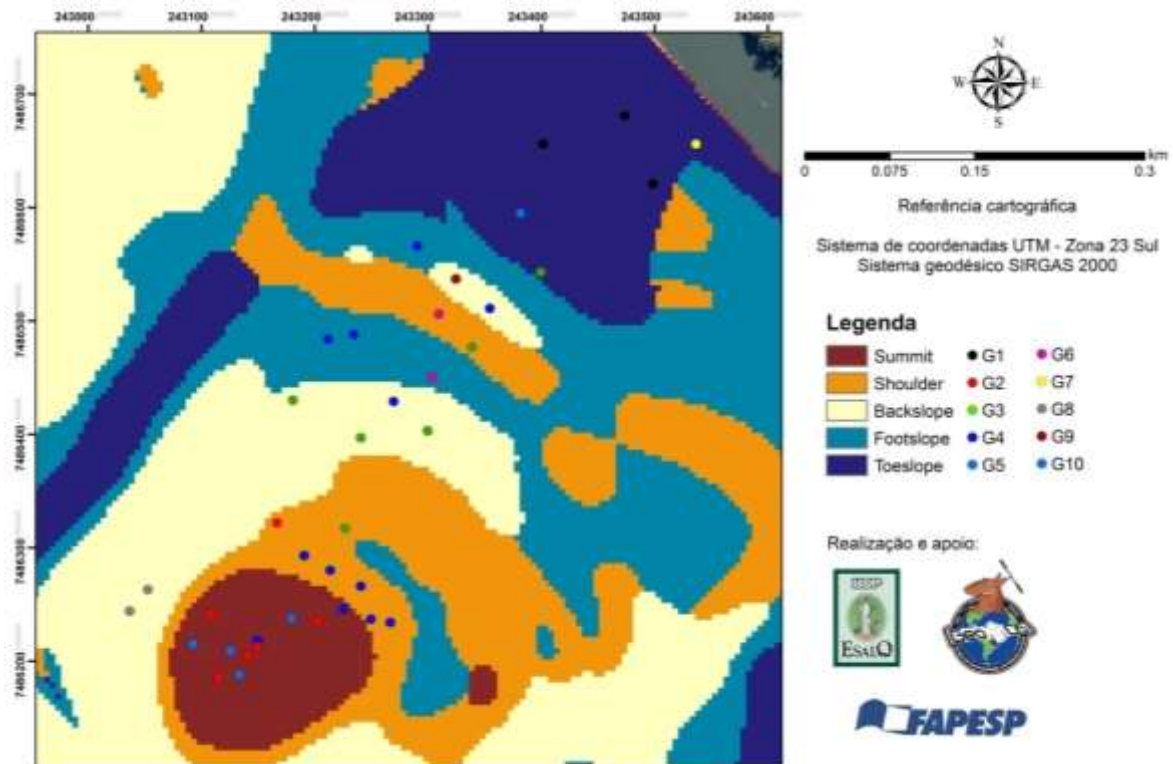


Figura 32. Distribuição espacial dos grupos criados pelo OSACA baseado nas análises espectrais + análises convencionais (químicas e granulométrica) das amostras de solos coletadas na topossequência 1 segundo seus elementos da encosta.

Como ocorrido com as análises espectrais, o conjunto de variáveis das análises espectrais associadas as convencionais agruparam os pontos correspondentes aos solos classificados como RL (P33 e P08), no G6. As suas amostras de solo apresentaram similaridade tanto na curva espectral como nos atributos químicos, como discutido nos tópicos anteriores. O solo do P07, apesar de ser classificado como RL, apresentou uma curva espectral distinta, com uma maior intensidade de reflectância, associada ao maior teor de areia total, e feições acentuadas de óxido de ferro na região do Vis. Além disso, ele apresentou alto valor para pH (KCl) e baixos para os demais atributos químicos do solo, por isso, ele não foi agrupado com os outros indivíduos da mesma classe.

Os pontos que tiverem seus solos classificados como RR (P10, P11 e P34) foram enquadrados em grupos distintos (G4, G3 e G9, respectivamente). Essas amostras se diferenciaram em relação as suas curvas espectrais e nos valores dos atributos químicos, mas apresentam similaridades na composição granulométrica. O P34 foi inserido sozinho no G9, o que demonstra que o conjunto de variáveis análises espectrais associadas as convencionais promoveu sua discriminação, o que

também ocorreu para apenas as análises espectrais. Assim, baseado nos espectros das suas amostras eles são distintos, mas em relação às análises convencionais eles se assemelham aos classificados como PVA. Apesar do solo desse ponto (P34) ser discriminado dos demais, ele é muito próximo dos PVA. Tal fato pode estar associado ao que foi discutido anteriormente, que esses solos identificados como RR (P10, P11 e P34) podem ser PVA espessarênicos, por isso apresentaram uma distância tão próxima dos indivíduos dessa classe (Figura 31).

No G2 e G5 foram inseridos os pontos que tiveram seus solos classificados como PVA espessarênicos e se localizaram no SU, exceto o P25, identificado como PVA não espessarênico, localizado no SH (Figura 32). Enquanto que os indivíduos do G3 e G4 foram classificados como PVA não espessarênico e localizam-se no SH, BS e FS. Um agrupamento similar foi observado para as análises convencionais (Figura 30), diferentemente para as análises espectrais (Figura 24), que não promoveram tal agrupamento. Com isso, nota-se para essa topossequência ao utilizar as análises espectrais associadas as convencionais foi possível agrupar melhor os tipos de solos semelhantes ao invés dos outros conjuntos de variáveis.

3.3.5.2. Topossequência 2

Na T2 os valores de Din/Dex apresentaram valores constantes com 6 grupos para as análises espectrais, 7 para as convencionais e 10 quando associando as análises espectrais as convencionais (Figura 33). Apesar dessa topossequência ser mais extensa (1,100 metros) do que a T2 (650 metros), ela apresenta maior homogeneidade nos tipos de solos, onde todos eles foram enquadrados em apenas 4 classes.

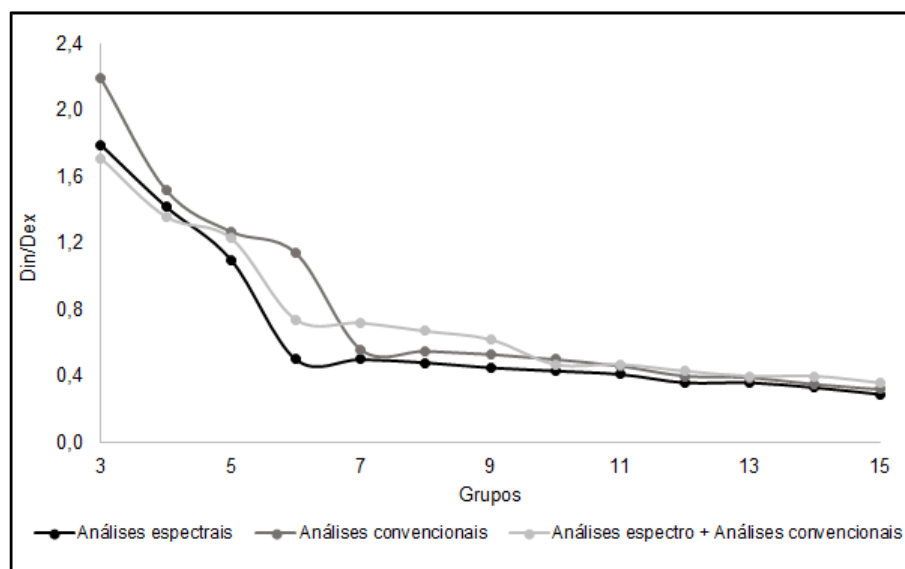


Figura 33. Relação dos valores da distância euclidiana média entre cada ponto de amostragem de solo e o centro do grupo ao qual ele está ligado (Din) pela média das distâncias euclidianas que separam os centros do grupo (Dex) e os grupos criados a partir da análise de similaridade das amostras de solo coletadas na topossequência 2.

3.3.5.2.1. Análises espectrais (6 primeiros componentes principais)

Os CP1 e CP2 obtidos pelas análises espectrais das amostras de solo coletadas na T2 explicaram 66% da variância total dos dados originais (Figura 34). Baseado nesses CP, os solos classificados como Argissolo Vermelho (PV) foram enquadrados no G1, tendo suas amostras coletadas predominantemente no SH1 (parte mais elevada) (Figura 35). Entretanto, nesse grupo também foi inserido um ponto (P30) onde seu solo foi coletado no BS1 e ele foi classificado como CX (Figura 35). Ele apresentou uma maior distância euclidiana dos indivíduos pertencentes a esse grupo (G1) e uma menor dos que tiverem seu solo classificado como CX, presentes no G4 (Figura 34). Isso demonstra que o espectro da sua amostra possui características mais similares ao dos indivíduos do G4. Tal fato pode ser confirmado observando-se o espectro da amostra da camada subsuperficial (40-60 cm) do solo (P30), que apresentou feições menos pronunciadas na região do Vis (Figura 36d), associadas a menor presença de óxidos de ferro. Isso difere das feições encontradas na curva espectral das amostras de solo dos indivíduos pertencentes ao grupo que ele foi enquadrado (G1), no qual as feições nessa região do espectro foram mais acentuadas (Figura 36a, 36j, 37a, 38g, 38h, 38i).

camadas do solo, apenas a sucessão dessas, o algoritmo agrupou os CX com RL ao utilizar esse conjunto de variáveis (análises espectrais). Além disso, apenas a cor do solo pode ser avaliada pelo espectro, o que de fato não permite confirmar se as amostras de solo correspondem à classe dos Cambissolos avaliando apenas o espectro, uma vez que a estrutura não pode ser observada.

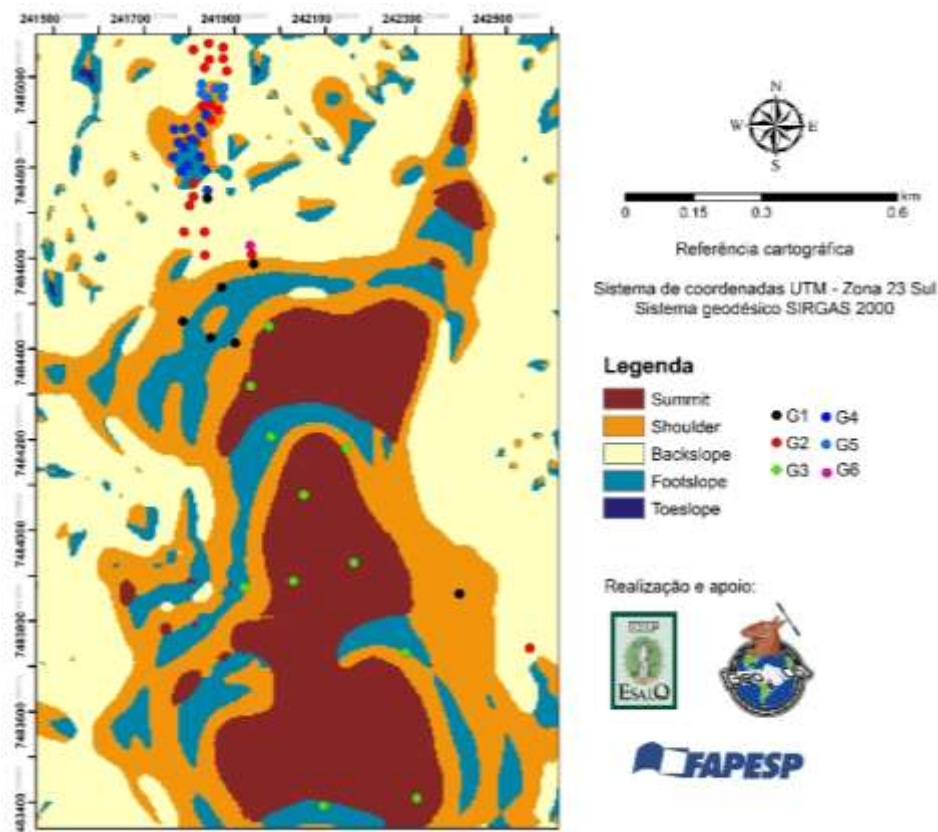


Figura 35. Distribuição espacial dos grupos criados pelo OSACA baseado nas análises espectrais das amostras de solos coletadas na topossequência 2 segundo seus elementos da encosta.

Todas as amostras de solos identificadas como Latossolos Vermelhos (LV) ocorrentes nessa topossequência foram inseridas em um mesmo grupo (G3). Os seus espectros apresentaram baixa intensidade de reflectância (0,3), associada à textura argilosa do solo (Demattê et al., 2014), e feições acentuadas, principalmente na região do Vis, devido a presença de hematita, e em 2200 nm, associada caulinita (Viscarra et al., 2006). Com isso, a partir dos dados espectrais foi possível separar solos com horizonte Bt (G1) daqueles que não apresentam esse horizonte (G3), como os Latossolos.

No G4 também foram enquadrados solos classificados como RL e CX. Entretanto, os espectros das suas amostras apresentaram maior intensidade de reflectância, o que promoveu a discriminação desses solos dos que foram inseridos no G2. Entretanto, esperava-se que as amostras de solo coletadas no BS2 (Figura 35) fossem diferenciadas das amostradas nos outros segmentos, em razão da maior quantidade de areia total (Figura 18b), o que deveria influenciar na maior intensidade de reflectância (Stenberg, 2010).

Os espectros das amostras de solo que foram enquadradas no G5 apresentaram alta intensidade de reflectância (0,7) e fortes feições de absorção, principalmente em 1900 nm, que pode estar relacionada à presença de água na intercamada dos minerais (Weidong et al., 2002). Os indivíduos classificados como RL presentes no G4 apresentaram feições menos pronunciadas em 1900 nm, o que permitiu sua diferenciação dos que foram inseridos no G5 (Figura 34), apesar das suas curvas espectrais também apresentarem alta intensidade de reflectância (0,7). Os solos do G5 foram coletados em uma área transicional, em relação à litologia e a posição na encosta (Figura 35), por isso, possivelmente, se diferenciaram dos demais.

Apenas um indivíduo foi inserido no G6, o N27. O espectro da sua amostra foi contrastante com os demais (Figura 39a), em razão da sua curva espectral apresentar forma plana na região do Vis, o que indica baixos teores (ou ausência) de óxido de ferro nessa amostra de solo (Stenberg et al., 2010). Por apresentar uma resposta espectral diferente dos demais solos, ele foi discriminado dos outros indivíduos, apesar de também ser classificado como Cambissolo.

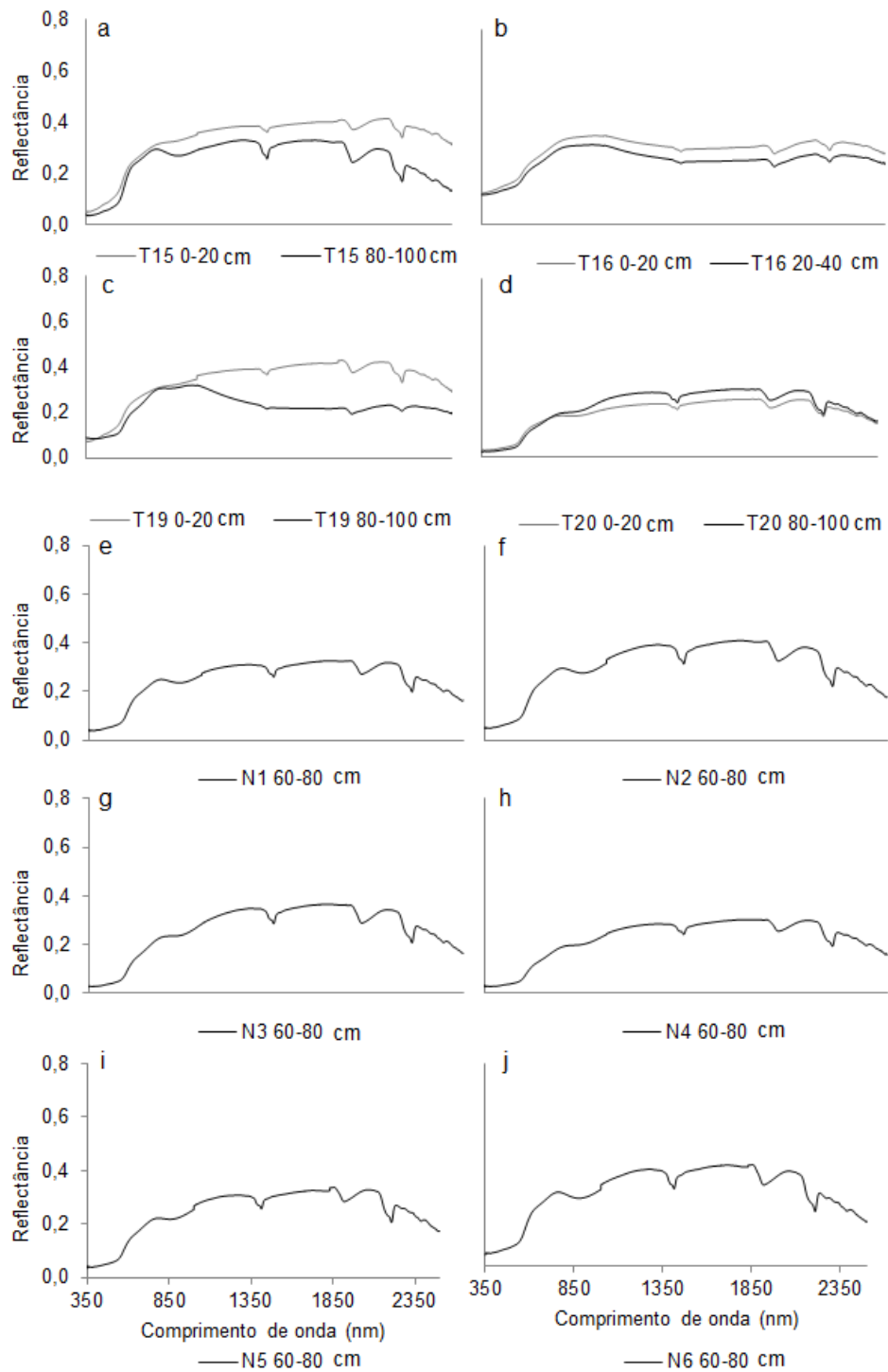


Figura 36. Curvas espectrais das amostras do horizonte superficial e subsuperficial dos solos coletadas nos pontos: (a) T15, (b) T16, (c) T19, (d) T20, (e) N1, (f) N2, (g) N3, (h) N4, (i) N5 e (j) N6 localizadas na topossequência 2.

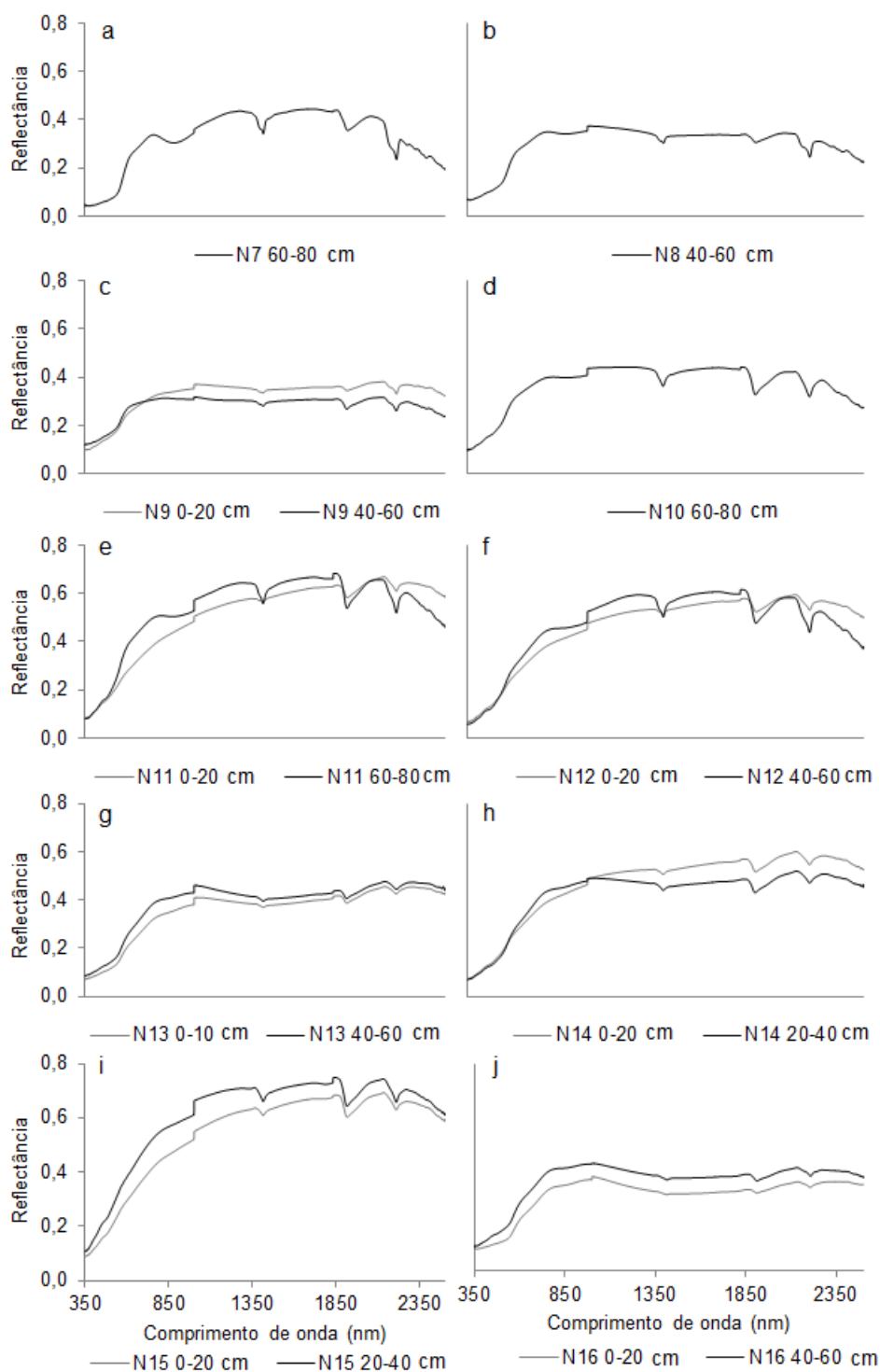


Figura 37. Curvas espectrais das amostras do horizonte superficial e subsuperficial dos solos coletadas nos pontos: (a) N7, (b) N8, (c) N9, (d) N10, (e) N11, (f) N12, (g) N13, (h) N14, (i) N15 e (j) N16 localizadas na topossequência 2.

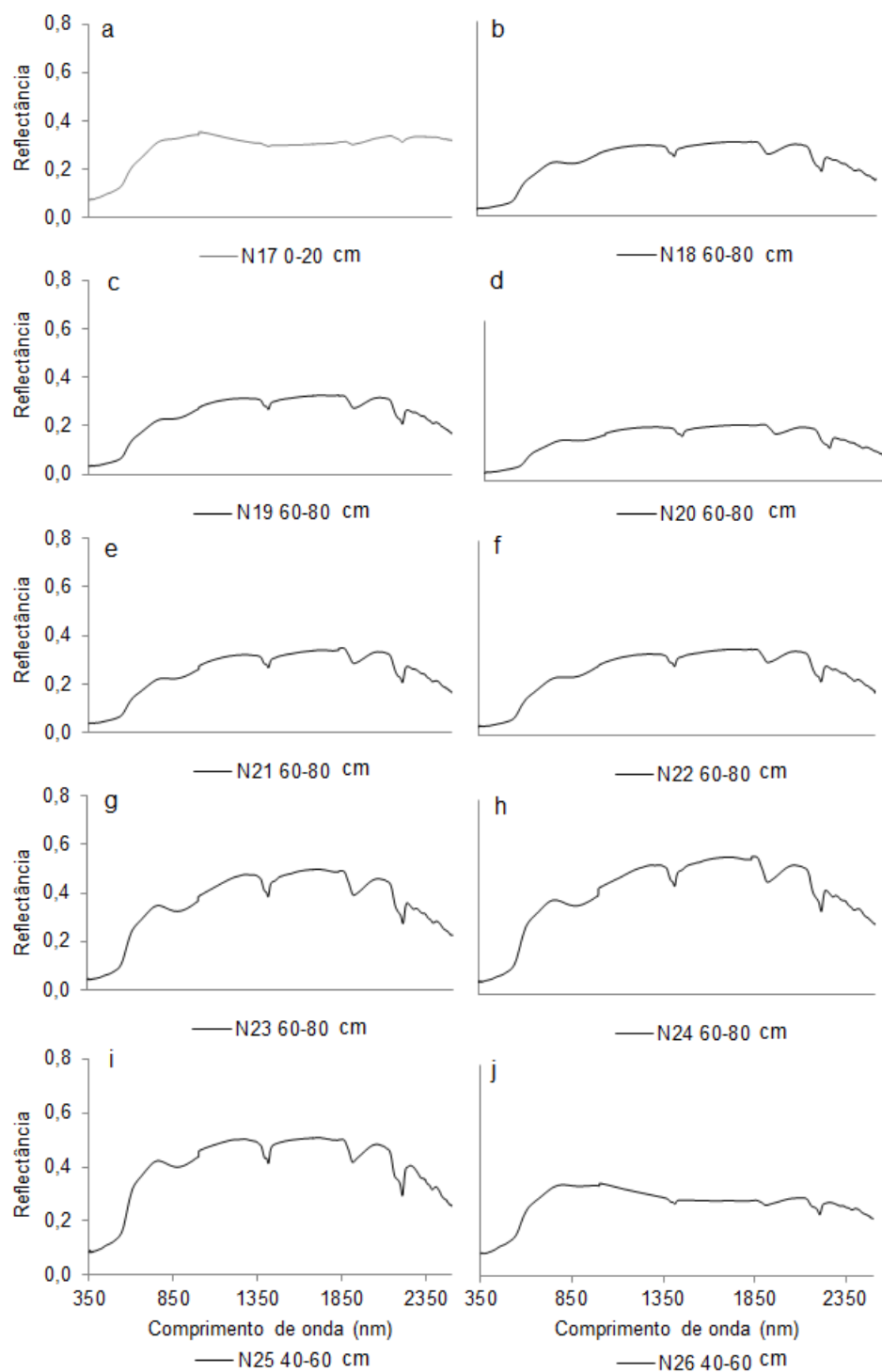


Figura 38. Curvas espectrais das amostras do horizonte subsuperficial dos solos coletados nos pontos: (a) N17, (b) N18, (c) N19, (d) N20, (e) N21, (f) N22, (g) N23, (h) N24, (i) N25 e (j) N26 localizadas na toposequência 2.

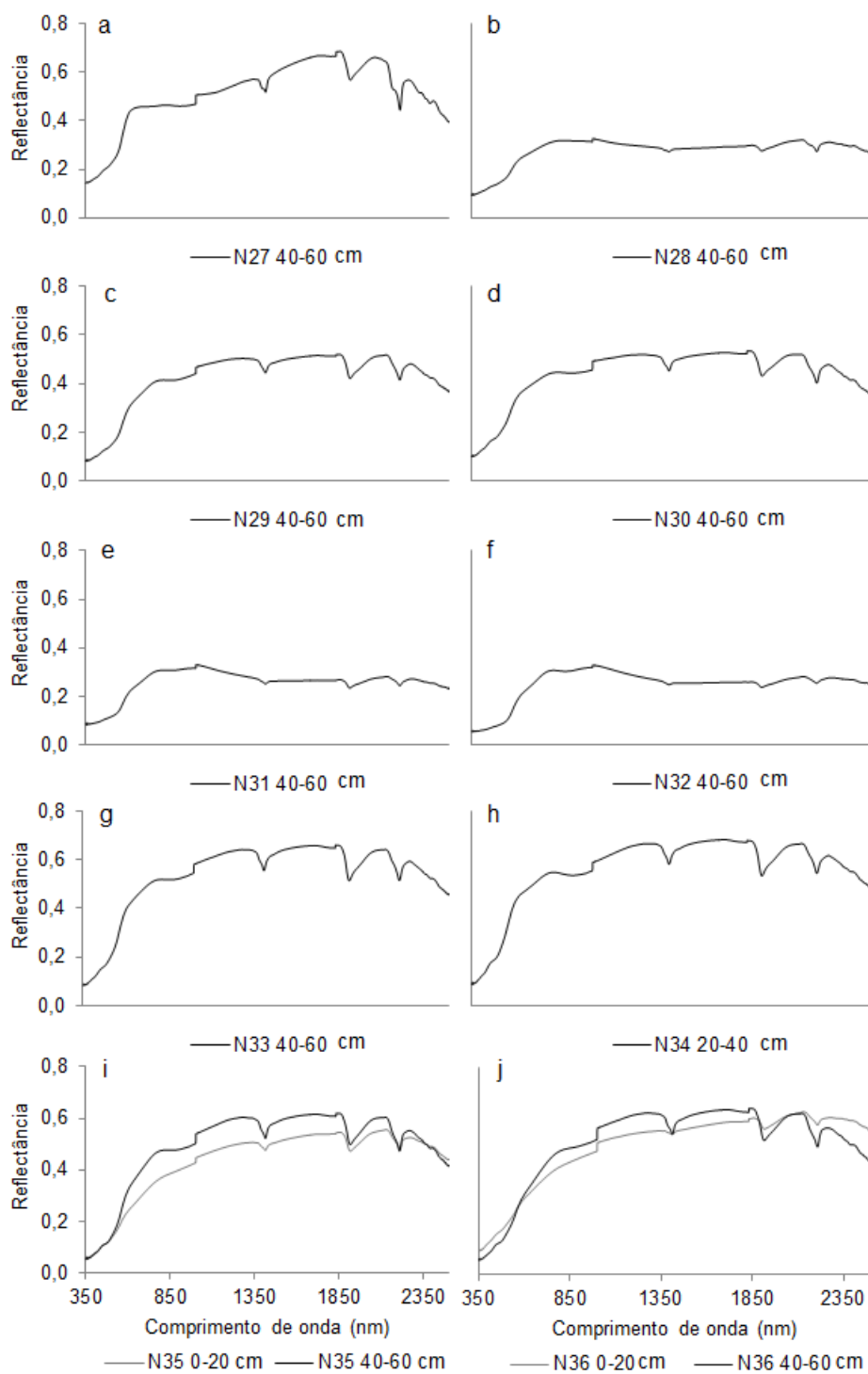


Figura 39. Curvas espectrais das amostras do horizonte superficial e subsuperficial dos solos coletadas nos pontos: (a) N27, (b) N28, (c) N29, (d) N30, (e) N31, (f) N32, (g) N33, (h) N34, (i) N35 e (j) N36 localizadas na topossequência 2.

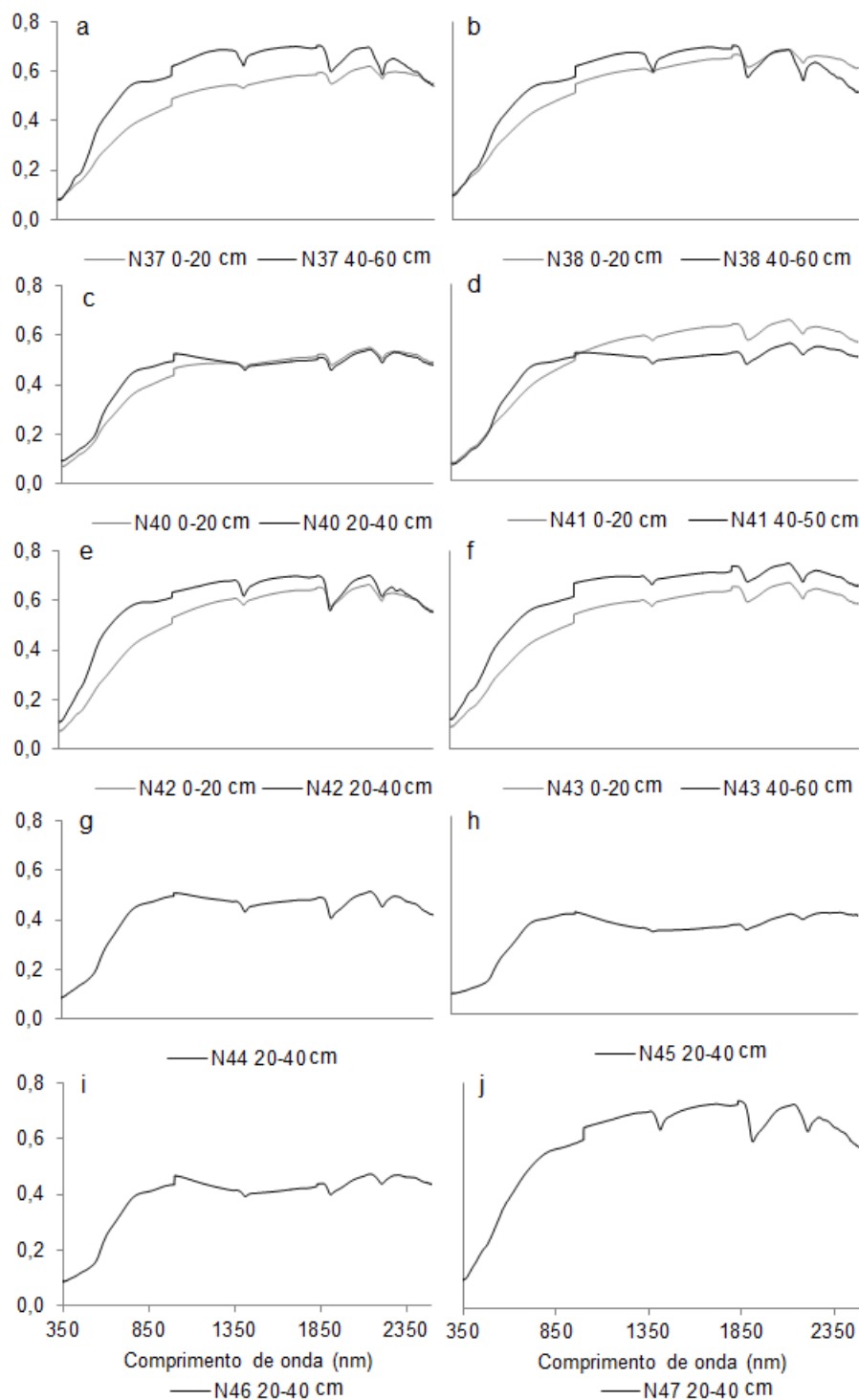


Figura 40. Curvas espectrais das amostras do horizonte superficial e subsuperficial dos solos coletadas nos pontos: (a) N37, (b) N38, (c) N40, (d) N41, (e) N42, (f) N43, (g) N44, (h) N45, (i) N46 e (j) N47 localizadas na topossequência 2.

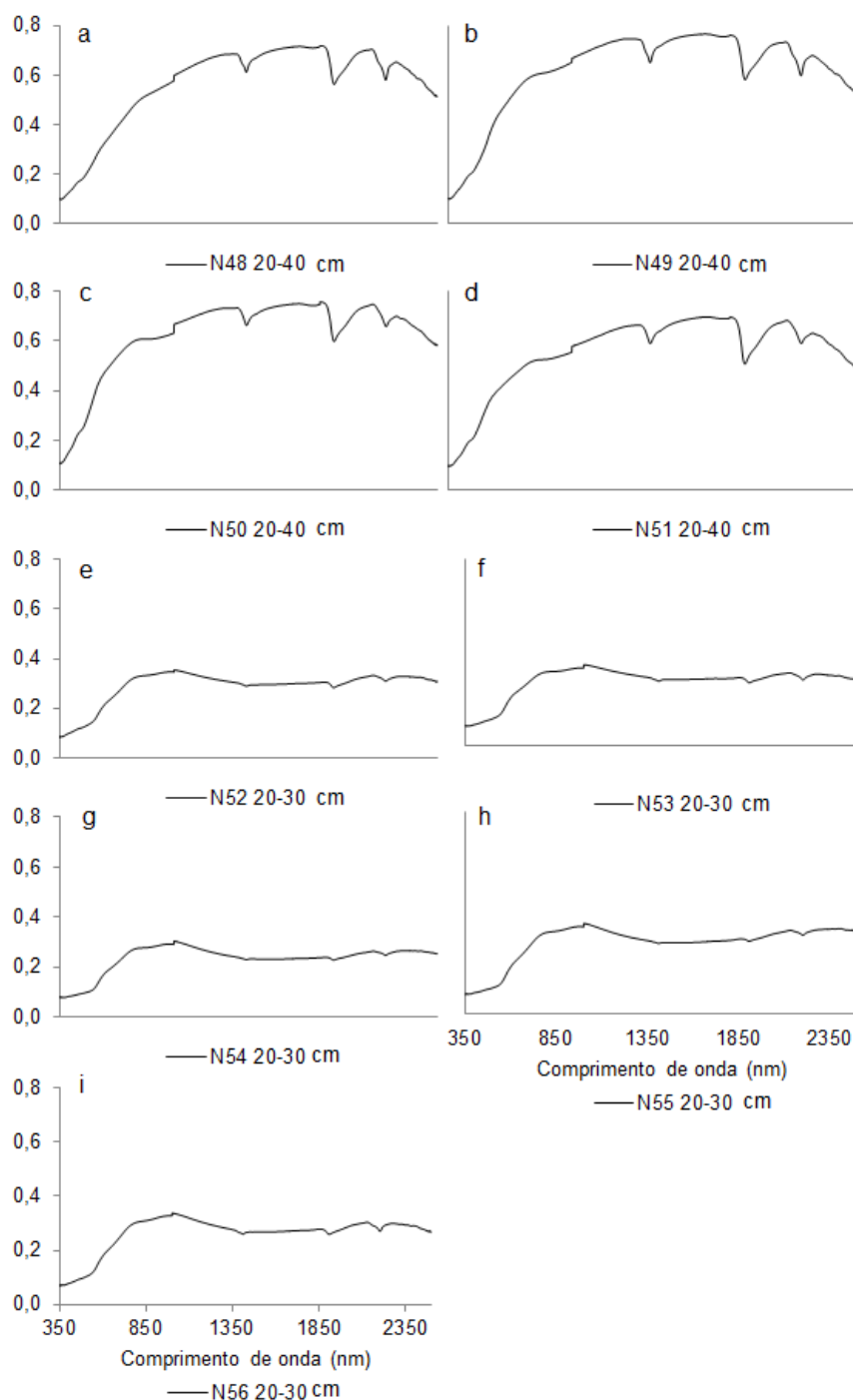


Figura 41. Curvas espectrais das amostras do horizonte subsuperficial dos solos coletadas nos pontos: (a) N48, (b) N49, (c) N50, (d) N51, (e) N52, (f) N53, (g) N54, (h) N55 e (i) N56 localizadas na topossequência 2.

3.3.5.2.2. Análises convencionais (químicas e granulométrica)

Os CP1 e CP2 baseados nas análises convencionais (químicas e granulométrica) das amostras de solos coletadas na T2 explicaram 58% da variância total dos dados originais (Figura 42), valores inferiores aos encontrados ao utilizar as análises espectrais (Figura 34). Na T1 ocorreu o inverso, os CP1 e CP2 baseados

nas análises convencionais (Figura 29) explicaram mais a variância dos dados originais do que quando utilizado as análises espectrais (Figura 23).

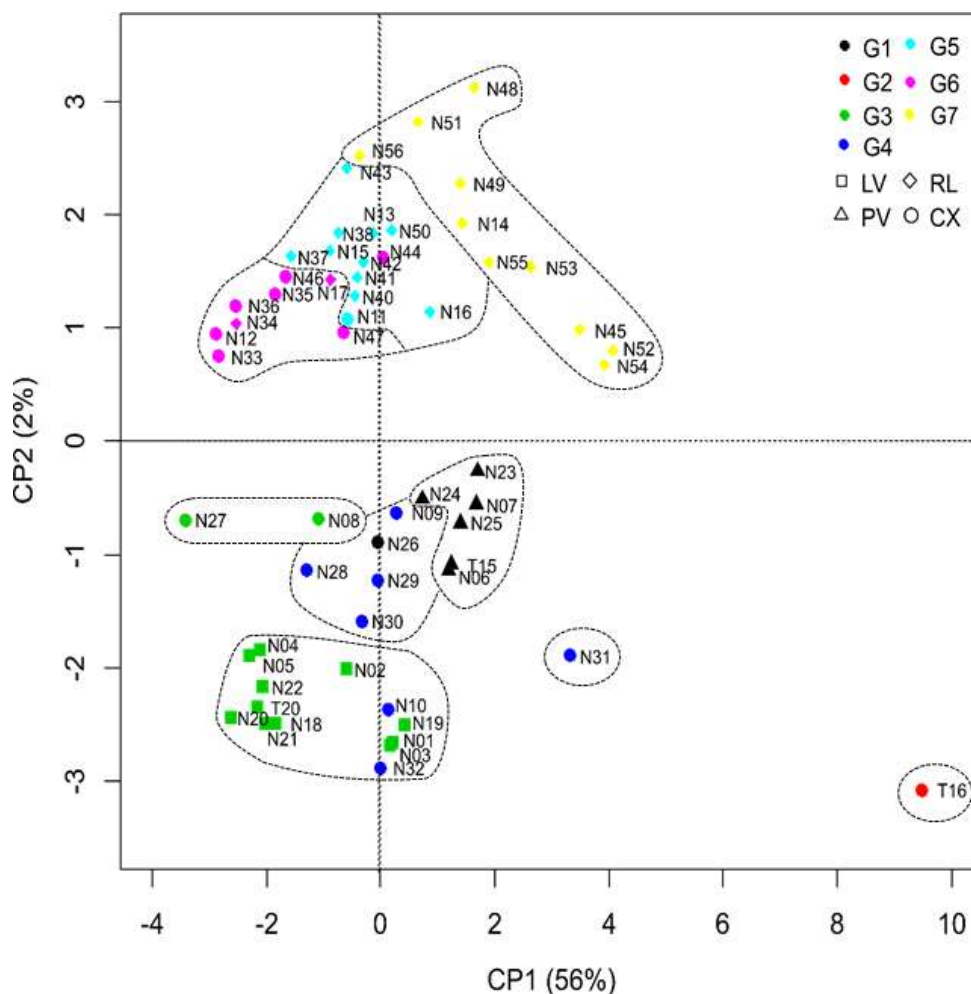


Figura 42. Gráfico de coordenadas principais obtido com os dados das análises convencionais das amostras dos solos da topossequência 1 (pH em KCl, soma de bases, saturação por bases, saturação por alumínio, capacidade de troca catiônica, argila, areia total, silte e argila). LV: Latossolo Vermelho, PV: Argissolo Vermelho, RL: Neossolo Litólico e CX: Cambissolo Háptico.

Similar as análises espectrais, todos os solos classificados como PV foram enquadrados em um mesmo grupo, nesse caso, também no G1 (Figura 42). Entretanto, nesse grupo, o ponto em que o solo foi classificado como CX foi o N26 e não o N30, como ocorreu anteriormente. A amostra de solo do N26 foi coletada na zona de transição do SH para o BS (Figura 43). Apesar de não ter apresentado características que evidencie a presença de um horizonte Bt, por ser uma zona de transição, pode apresentar algumas similaridades, em razão dos solos ocorrerem de forma gradual na paisagem. O N26, apesar de ser enquadrado no G1, apresentou uma distância maior dos indivíduos pertencentes a esse grupo e uma menor dos

presentes no G4, em que tiveram seus solos classificados como CX. Os solos do G1 apresentam predominantemente alto teor de argila e saturação por bases, e valores de pH (KCl) inferiores a 6,0 (Tabela 9 e 10).

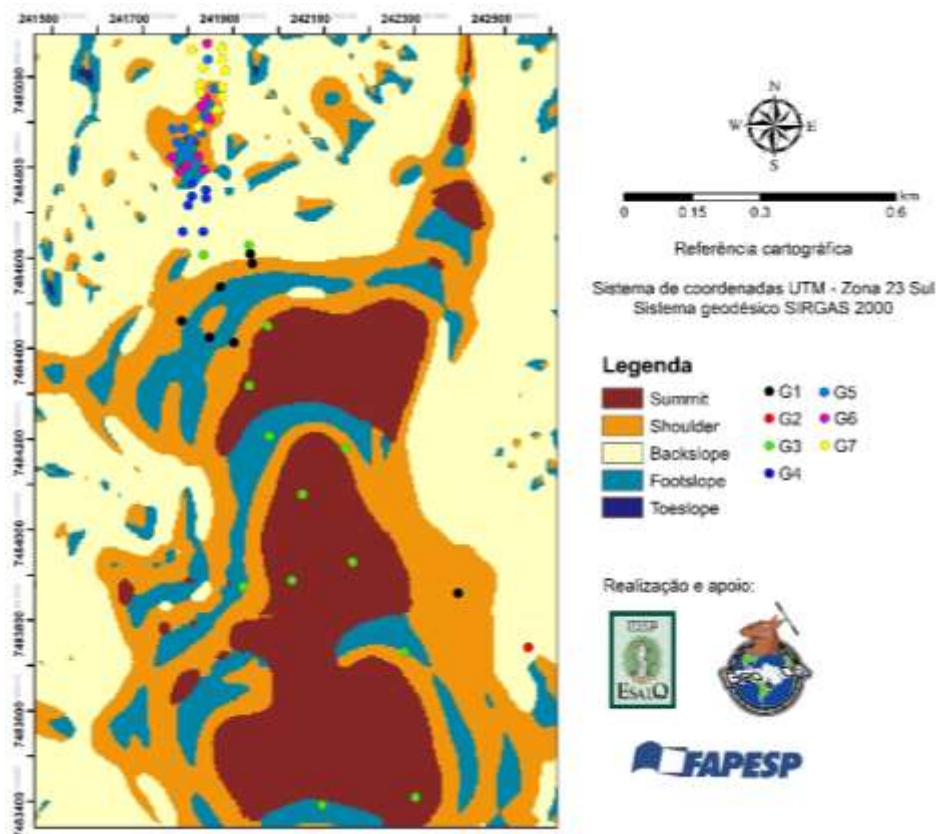


Figura 43. Distribuição espacial dos grupos criados pelo OSACA baseado nas análises convencionais (químicas e granulométrica) das amostras de solos coletadas na topossequência 2 segundo seus elementos da encosta.

Tabela 10. Análises químicas e granulométrica das amostras de solos coletadas nos pontos T15, T16, T20, N01, N02, N03, N04, N05, N06, N17, N08, N09, N10, N11, N12 e N13 localizados na topossequência 2

Tradagem	Prof. (cm) cm	pH KCl	SB ----- mmol _c kg ⁻¹ -----	T	V% ----- % -----	m%	Areia total	Silte g kg ⁻¹ -----	Argila
T15	0-20	6,1	63,1	80,7	78,2	0,0	358	265	377
	80-100	5,0	34,1	57,1	59,7	0,5	187	132	682
T16	0-20	7,1	159,3	160,7	99,1	0,0	-	-	-
	20-40	6,2	156,7	174,4	89,8	0,0	462	361	177
T20	0-20	4,2	32,7	95,7	34,2	6,2	227	137	636
	80-100	4,1	17,9	89,3	20,0	15,4	204	106	690
N01	60-80	4,4	57,8	94,4	61,2	1,7	127	136	736
N02	60-80	4,3	44,2	76,0	58,2	2,5	130	160	710
N03	60-80	4,5	54,2	97,2	55,8	1,9	160	126	714
N04	60-80	4,0	31,0	86,4	35,9	14,5	224	141	635
	80-100	4,0	28,7	82,5	34,8	14,1	245	122	633
N05	60-80	3,9	29,1	82,7	35,2	14,8	212	132	657
N06	60-80	4,6	43,8	69,8	62,8	1,7	215	128	657
N07	60-80	5,0	39,9	48,5	82,3	0,6	276	121	603
N08	40-60	4,0	40,0	63,8	62,7	9,1	252	167	580
N09	0-20	3,6	45,7	83,5	54,7	12,3	351	321	328
	40-60	3,7	109,6	143,4	76,4	14,2	198	445	357
N10	60-80	3,5	83,9	142,9	58,7	34,6	233	285	482
	0-20	4,6	39,8	48,6	81,9	0,6	125	674	201
N11	40-60	3,9	59,7	90,9	65,7	12,2	433	466	101
	60-80	3,7	53,5	89,9	59,5	26,7	105	718	176
N12	0-20	3,6	23,4	59,2	39,6	28,4	503	346	151
	40-60	3,5	32,3	86,9	37,1	41,3	324	348	328
N13	0-10	4,3	57,9	67,9	85,3	2,1	381	543	76
	40-60	3,8	45,0	74,8	60,2	37,3	238	687	76

¹Profundidade, ²Soma de bases, ³Capacidade de troca catiônica, ⁴Saturação por bases e ⁵Saturação por alumínio.

Tabela 11. Análises químicas e granulométrica das amostras de solos coletadas nos pontos N14, N15, N16, N17, N18, N19, N20, N21, N22, N23, N24, N25, N26, N27, N28, N29, N30, N31, N32, N33, N34 e N35 localizados na topossequência 2

Tradagem	Prof. (cm) cm	pH KCl	SB	T	V%	m%	Areia total	Silte	Argila
			----- mmol _c kg ⁻¹ -----	----- % -----	----- g kg ⁻¹ -----	-----	-----	-----	
N14	0-20	4,7	49,0	59,0	83,0	0,0	412	487	100
	20-40	4,5	62,7	73,3	85,5	1,5	470	430	101
N15	0-20	3,6	36,5	71,5	51,1	26,2	366	534	100
	20-40	4,0	49,6	66,2	74,9	6,5	308	591	100
N16	0-20	3,4	48,4	84,4	57,3	31,0	461	412	126
	40-60	4,2	102,2	105,2	97,2	1,2	363	536	101
N17	0-20	3,5	45,8	74,0	61,9	20,4	515	309	176
N18	60-80	3,9	35,8	87,8	40,8	12,1	152	107	741
N19	60-80	4,5	57,8	98,2	58,9	1,1	188	126	686
N20	60-80	3,9	26,9	84,1	32,0	18,0	154	107	739
N21	60-80	3,9	34,0	92,8	36,6	14,4	171	118	712
N22	60-80	3,9	31,6	86,8	36,4	13,8	206	108	686
N23	60-80	4,9	44,1	54,1	81,5	0,7	273	274	454
N24	60-80	4,1	35,0	59,4	58,9	10,4	323	172	504
N25	40-60	4,9	58,1	64,1	90,6	0,6	225	193	582
N26	40-60	4,3	48,1	58,1	82,8	4,3	141	201	658
N27	40-60	3,7	29,1	69,1	42,1	46,2	178	293	530
N28	40-60	3,7	53,6	99,4	53,9	32,6	214	326	460
N29	40-60	3,6	72,2	109,6	65,9	23,9	191	378	431
N30	40-60	3,5	71,0	111,8	63,5	26,0	233	258	510
N31	40-60	3,6	128,0	149,0	85,9	6,8	239	403	359
N32	40-60	3,3	90,9	159,5	57,0	39,7	69	469	462
N33	40-60	3,5	38,4	95,4	40,2	56,26	310	562	127
N34	20-40	3,3	41,5	90,3	46,0	48,5	276	623	101
N35	0-20	3,8	39,9	61,9	64,5	7,8	502	322	176
	40-60	3,4	29,2	75,2	38,8	43,3	388	310	302

¹Profundidade, ²Soma de bases, ³Capacidade de troca catiônica, ⁴Saturação por bases e ⁵Saturação por alumínio.

Tabela 12. Análises químicas e granulométrica das amostras de solos coletadas nos pontos N36, N37, N38, N40, N41, N42, N43, N44, N45, N46, N47, N48, N49, N50, N51, N52, N53, N54, N55 e N56 localizados na topossequência 2

Tradagem	Prof. (cm) cm	pH KCl	SB	T	V%	m%	Areia total	Silte	Argila
			----- mmol _c kg ⁻¹ -----	----- % -----	----- g kg ⁻¹ -----	-----	-----		
N36	0-20	3,4	28,4	56,0	50,7	13,2	402	473	125
	40-60	3,3	33,5	84,9	39,5	33,2	271	426	303
N37	0-20	3,6	38,3	64,3	59,6	7,5	399	501	100
	40-60	3,4	38,2	68,0	56,2	27,5	289	511	200
N38	0-20	3,9	29,8	44,8	66,5	6,3	439	486	75
	40-60	3,8	53,9	74,3	72,6	12,7	256	519	226
N40	0-20	3,7	48,8	78,6	62,1	7,8	270	605	125
	20-40	3,6	57,5	83,7	68,7	15,5	219	706	76
N41	0-20	3,9	39,8	61,0	65,2	4,4	426	449	125
	40-50	3,6	64,4	91,6	70,3	14,3	171	678	152
N42	0-20	3,9	43,4	64,2	67,6	5,3	402	473	125
	20-40	3,5	68,7	96,1	71,5	21,3	243	682	76
N43	0-20	4,1	41,3	60,7	68,0	2,0	365	559	75
	40-60	3,9	28,4	38,4	74,0	15,4	388	537	75
N44	20-40	3,6	57,3	84,7	67,7	22,8	633	267	101
N45	20-40	4,5	96,6	100,2	96,4	0,4	344	601	56
N46	20-40	3,6	44,2	83,2	53,1	39,6	387	538	75
N47	20-40	3,6	58,0	94,2	61,6	30,6	237	687	75
N48	20-40	4,3	48,5	49,7	97,6	0,8	777	148	75
N49	20-40	4,6	52,5	60,7	86,5	0,7	487	442	70
N50	20-40	4,3	44,3	53,3	83,1	2,4	88	811	101
N51	20-40	4,0	47,6	53,4	89,1	6,2	594	331	75
N52	20-30	4,3	107,9	109,7	98,4	0,4	569	330	101
N53	20-30	4,5	74,7	80,3	93,0	0,5	575	299	126
N54	20-30	4,9	96,9	100,5	96,4	0,4	470	404	126
N55	20-30	4,5	64,7	72,7	89,0	0,6	432	442	126
N56	20-30	3,8	40,4	62,2	64,9	22,2	808	117	75

¹Profundidade, ²Soma de bases, ³Capacidade de troca catiônica, ⁴Saturação por bases e ⁵Saturação por alumínio.

As amostras de solo enquadradas no G4 apresentaram valores de pH (KCl) inferiores a 4, capacidade de troca catiônica (T) em torno de $100 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$, saturação por bases inferior a 60% e teor de argila em torno de 40% (Tabela 10 e 11). As amostras inseridas no G3 que tiveram seus solos classificados como CX, apresentaram similaridades com os que foram inseridos no G4. Entretanto, as do G3 apresentaram valores de T inferiores a $60 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$ e de argila em torno de 55%, e de pH similares (<4). Contudo, os outros indivíduos pertencentes ao G3 tiveram seus solos classificados como LV. Nesse grupo (G3) foram inseridos solos classificados como LV e CX, apesar de apresentarem uma distância maior. Entretanto, não era esperado que fossem agrupados solos classificados como LV e CX, pois os seus atributos diferem em relação ao teor de argila, T e pH (Tabela 10 e 11).

O G2 possui apenas um indivíduo, o T16 (Figura 42). Ele está localizado no leste do BS1 onde as amostras de solos foram coletadas (Figura 43). Esse ponto apresentou uma maior distância dos outros indivíduos em razão das suas amostras de solo apresentarem os valores mais elevados de pH (KCl) dentre as que foram coletados nessa topossequência, apresentando 6,2 (Tabela 10). Além disso, altos valores de T e V% e baixos de saturação por alumínio (m%). Isso pode estar associado a intensas práticas agrícolas nessa porção da área.

Todos os indivíduos do G4 e G6 apesar de apresentarem uma distância maior entre eles, a maioria dos seus solos foram classificados como CX. A partir das análises convencionais foi possível discriminar os indivíduos pertencentes ao G4 dos do G6, pois estes se diferenciaram principalmente em razão dos valores de T e o teor de argila, em que o G6 apresentou maiores valores para esses atributos do solo.

No G5 e G7 predominaram solos classificados como RL. Entretanto, os solos enquadrados no G7 apresentaram teores elevados de soma de bases, saturação por bases e areia total, e baixos de saturação por alumínio e de silte, o que difere dos solos do G5, que apresentaram o oposto. Os indivíduos do G7 se localizaram no final do SH2 e começo do BS2 sob a Formação Itararé, que apresenta material de origem de textura arenosa (Figura 17 e 43). Enquanto que os indivíduos do G5 se localizaram predominantemente no SH sob a Formação Tatuí, que apresenta rochas com teores elevados de silte. Assim, esse conjunto de variáveis discriminou melhor essas classes de solos (CX e RL) do que o baseado

apenas em dados espectrais, em razão de agruparem solos similares que ocorreram nas mesmas posições da encosta (Figura 43).

3.3.5.2.3. Análises espectrais + Análises convencionais

Os CP1 e CP2 a partir das análises espectrais associadas as convencionais explicaram 52% da variância total dos dados originais (Figura 44), valores inferiores aos encontrados para os outros dois conjuntos de variáveis (Figura 34 e 43). Os solos classificados como PV foram inseridos no mesmo grupo (G1), o que já era esperado, pois ao utilizar os dados baseados no espectro e nas análises convencionais também ocorreu isso. Entretanto, nesse grupo não foi enquadrado nenhum ponto em que teve seu solo classificado como CX, como ocorreram nos outros conjuntos de variáveis. Assim, nesse grupo foram inseridos solos que foram coletados no SH (Figura 45) sobrejacente a Cobertura Cenozóica (Figura 6) e tiveram seus solos classificados como PV.

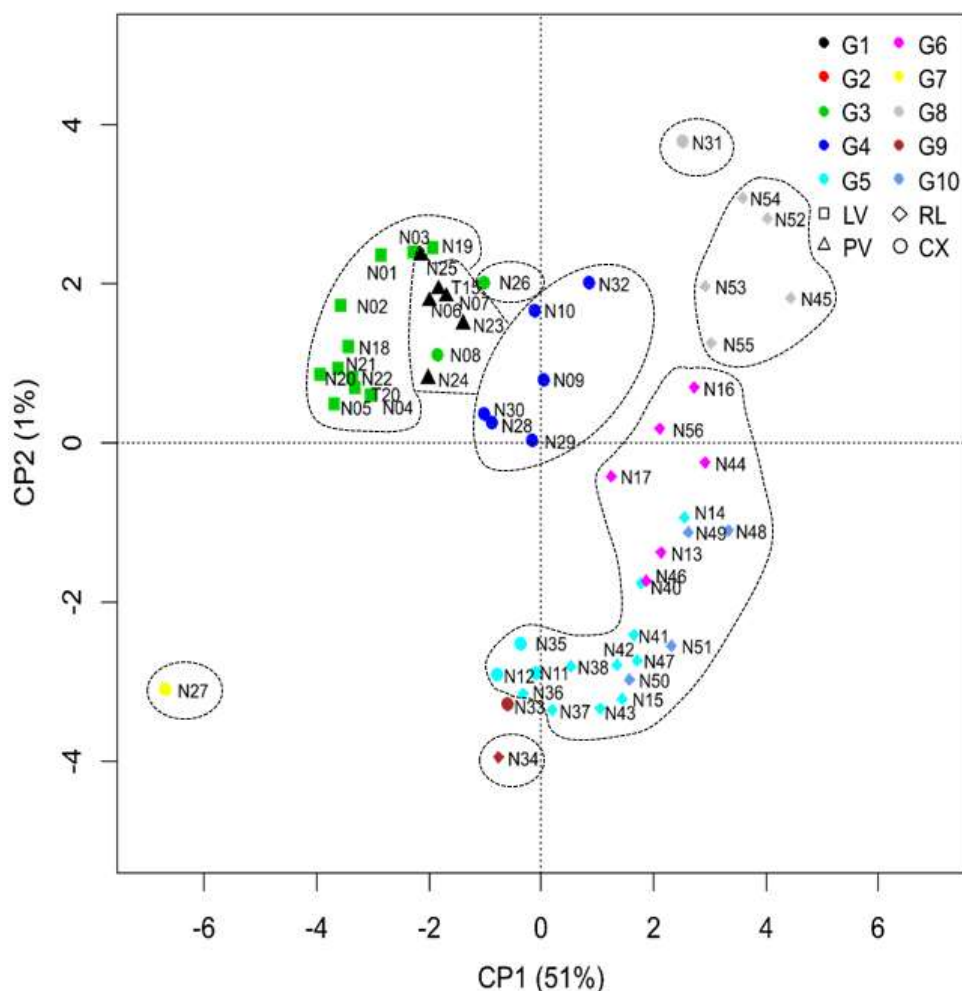


Figura 44. Gráfico de coordenadas principais obtido com os dados das análises espectrais + análises convencionais das amostras dos solos da topossequência 2 (6 primeiros componentes principais, pH em KCl, soma de bases, saturação por bases, saturação por alumínio, capacidade de troca catiônica, argila, areia total, silte e argila). LV: Latossolo Vermelho, PV: Argissolo Vermelho, RL: Neossolo Litólico e CX: Cambissolo Háplico.

Similar ao resultado encontrado para os dados baseados nas análises convencionais, no grupo em que foram inseridos os LV (G3) enquadraram-se dois indivíduos que tiveram seus solos classificados como CX (N08 e N26). De fato, baseado em suas análises convencionais, os solos desses pontos se assemelham aos LV. Entretanto, em relação às características espectrais e morfológicas observados em campo, notou-se que seus horizontes subsuperficiais não expressam intensa atuação de processos pedogenéticos, como para os solos classificados como LV. Para as análises espectrais, os LV foram inseridos em um mesmo grupo (Figura 34). Por isso, nesse caso, os dados espectrais apresentaram um melhor resultado no agrupamento desses solos.

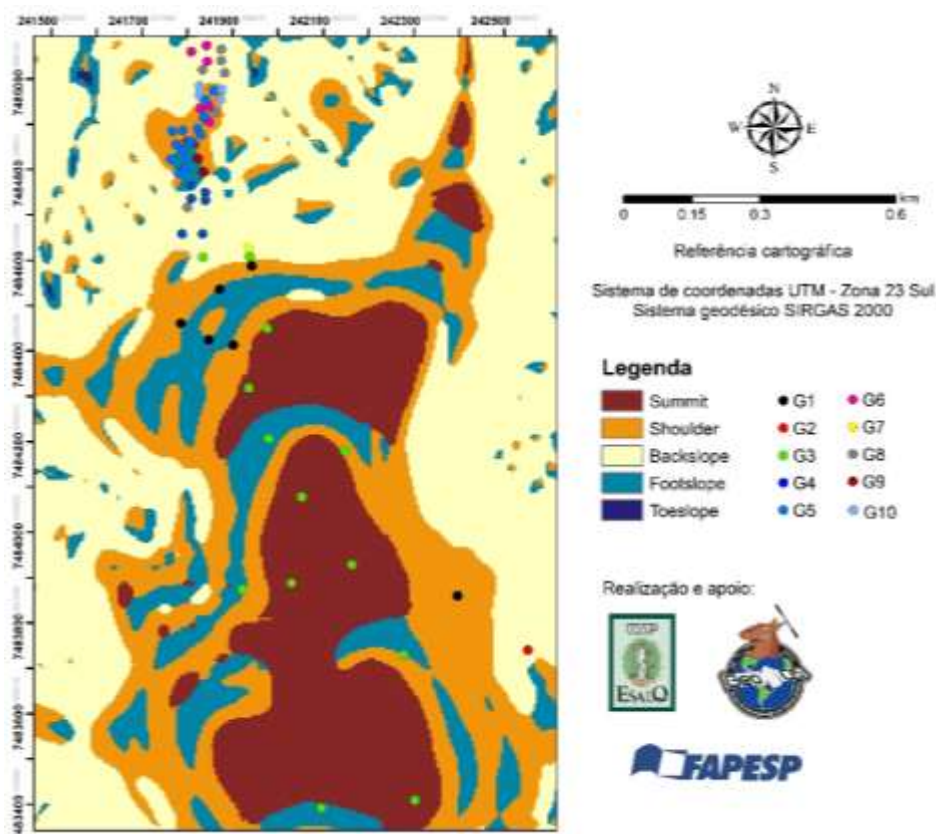


Figura 45. Distribuição espacial dos grupos criados pelo OSACA baseado nas análises espectrais + análises convencionais (químicas e granulométrica) das amostras de solos coletadas na topossequência 2 segundo seus elementos da encosta.

As amostras de solo enquadrados no G4 foram classificadas como CX e ocorreram predominantemente no BS1 (Figura 45). Esses solos apresentaram homogeneidade nos seus atributos químicos, com teor elevado de capacidade de troca catiônica, saturação por bases e argila em torno de 40 g kg^{-1} , mas alta variabilidade nas suas características espectrais. De fato, apenas baseado nas suas análises espectrais, houve um agrupamento dos solos que ocorreram no BS1 sobre a Formação Tatuí (membro inferior) diferente daquele sobre a Formação Itararé (membro arenoso). Mesmo localizados na mesma posição da encosta, os solos encontrados nesses segmentos foram de classes diferentes (CX e RL, respectivamente) (Figura 44 e 45). Assim, o conjunto de variáveis de análises convencionais e análises convencionais associadas as espectrais agruparam melhor as classes solos do que o apenas as análises espectrais.

No G5 foram inseridos solos classificados como CX e RL, apesar de predominarem os RL. Esses apresentaram maiores semelhanças em relação as suas análises espectrais do que as convencionais. Enquanto no G7, houve apenas

um indivíduo (N27) que teve seu solo classificado como CX, situado no BS1 (Figura 45).

Os indivíduos do G8 ocorreram predominantemente no BS2 sob o membro arenoso da Formação Itararé (Figura 17). Alguns indivíduos inseridos nesse grupo (N31 e N45) apresentaram semelhanças espectrais, mas não em relação ao teor de areia total, que foi menor do que os outros indivíduos que ocorrem no BS1, sobre a Formação Tatuí (Figura 17 e 45). A partir dos dados espectrais não foi possível discriminar os solos classificados como CX dos RL, pelo fato discutido anteriormente. Ao utilizar as análises convencionais foi possível discriminá-los melhor do que quando associando elas as análises espectrais.

No G9 foram enquadrados dois indivíduos, um que teve seu solo classificado como CX e outro como RL (Figura 34). Eles ocorreram muito associados na paisagem e de fato apresentaram similaridade em relação às variáveis espectrais e analíticas. Entretanto, o critério que os diferenciam é a espessura do solo: o RL ocorreu em 40 cm e o CX 60 cm. Como foi discutido anteriormente, a Dped considera a sucessão de camadas, não a sua espessura.

Os indivíduos do G10 apresentaram uma distância euclidiana muito próxima daqueles do G5 e G6. De fato, eles também ocorreram associados na paisagem (Figura 35). Isso pode estar relacionado ao fato de que os solos amostrados no FS e SH2 apresentaram maior heterogeneidade, e por isso, nenhum conjunto de variáveis os discriminaram bem, uma vez que não houve predominância de solos de uma classe, mas ocorrência de alguns deles associados, como PVA, CX e RL. Entretanto, os solos que ocorreram no SU e no SH, classificados como LV e PV, respectivamente, puderam ser melhor discriminados quando foi utilizado o conjunto de variáveis baseadas nas análises espectrais e posteriormente, associando elas as convencionais. Entretanto, o conjunto de variáveis baseadas no espectro não discriminou tão bem os solos que ocorrem nos diferentes *backslopes* dessa topossequência, se destacando o conjunto de variáveis baseados nas análises convencionais e em seguida, associando elas as espectrais.

3.3.6. Análise de similaridade pela distância pedológica das amostras de solo coletadas aleatoriamente na área total de estudo

Na área total os valores de Din/Dex apresentaram valores constantes com 9 grupos quando as amostras de solos foram avaliadas pelas suas análises espectrais, 10 grupos pelas suas análises químicas e granulométrica (análises convencionais) e 12 grupos quando a avaliação foi baseada pelas análises espectrais associadas as convencionais (Figura 46).

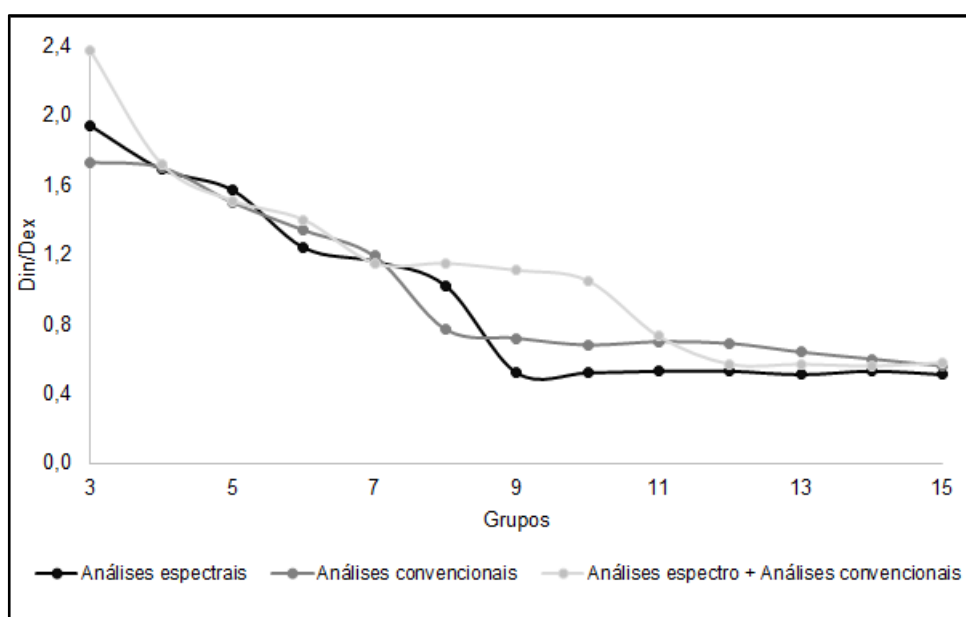


Figura 46. Relação dos valores da distância euclidiana média entre cada ponto de amostragem de solo e o centro do grupo ao qual está ligado (Din) pela média das distâncias euclidianas que separam os centros do grupo (Dex) e os grupos criados a partir da análise de similaridade das amostras aleatoriamente coletadas na área total.

3.3.6.1. Análises espectrais (6 primeiros componentes principais)

Os CP1 e CP2 obtidos pelas análises espectrais das amostras de solo aleatoriamente coletadas na área de estudo explicaram 54% da variância total dos dados originais (Figura 47). Ao utilizar esse conjunto de variáveis houve tendências de agrupamento por classes de solos, como os classificados como GX (G1), LV (G5) e PV (G7). Contudo, houve discriminação de uma mesma classe em diferentes grupos, como RL e CX, o que já era esperado, já que os solos dessas classes são muito heterogêneos em relação aos seus atributos, que tendem a refletir no seu espectro (Figura 47).

Os indivíduos do G5 da classe dos Latossolos Vermelhos (LV) apresentaram uma distância menor dos inseridos no G7, que apresentaram predomínio de solos da classe dos Argissolos Vermelhos (PV), mas pertenceram a grupos diferentes. Isso pode ter ocorrido em razão de ambas as classes de solos apresentam: presença de óxidos de ferro, que pode ser evidenciada através de fortes feições de absorção na curva espectral na região do visível (Vis), e textura argilosa ou muito argilosa, que reflete na menor intensidade de reflectância. Em decorrência disso, a partir dos dados espectrais foi possível discriminar indivíduos de classes diferentes em grupos distintos (Figura 47).

Pode-se observar uma tendência de agrupamento, na parte superior do gráfico, de pontos em que seus solos apresentam maior desenvolvimento pedogenético: no lado direito estão presentes os que apresentaram cores mais vermelhas (LV e PV) e ao lado esquerdo os que exibiam cores mais vermelho-amarela a claras (PVA e GX). Enquanto que na parte inferior do gráfico, há predomínio de pontos que seus solos apresentaram um menor desenvolvimento pedogenético, como os CX e RL. Esses solos apresentam alta heterogeneidade nos seus atributos, em razão disso não pode ser observada nenhuma tendência de agrupamento, a não ser pelos grupos criados pelo OSACA. De qualquer forma, houveram discrepâncias na discriminação de classes de solos por grupo, uma vez que classes de solos contrastantes foram enquadradas em um mesmo grupo.

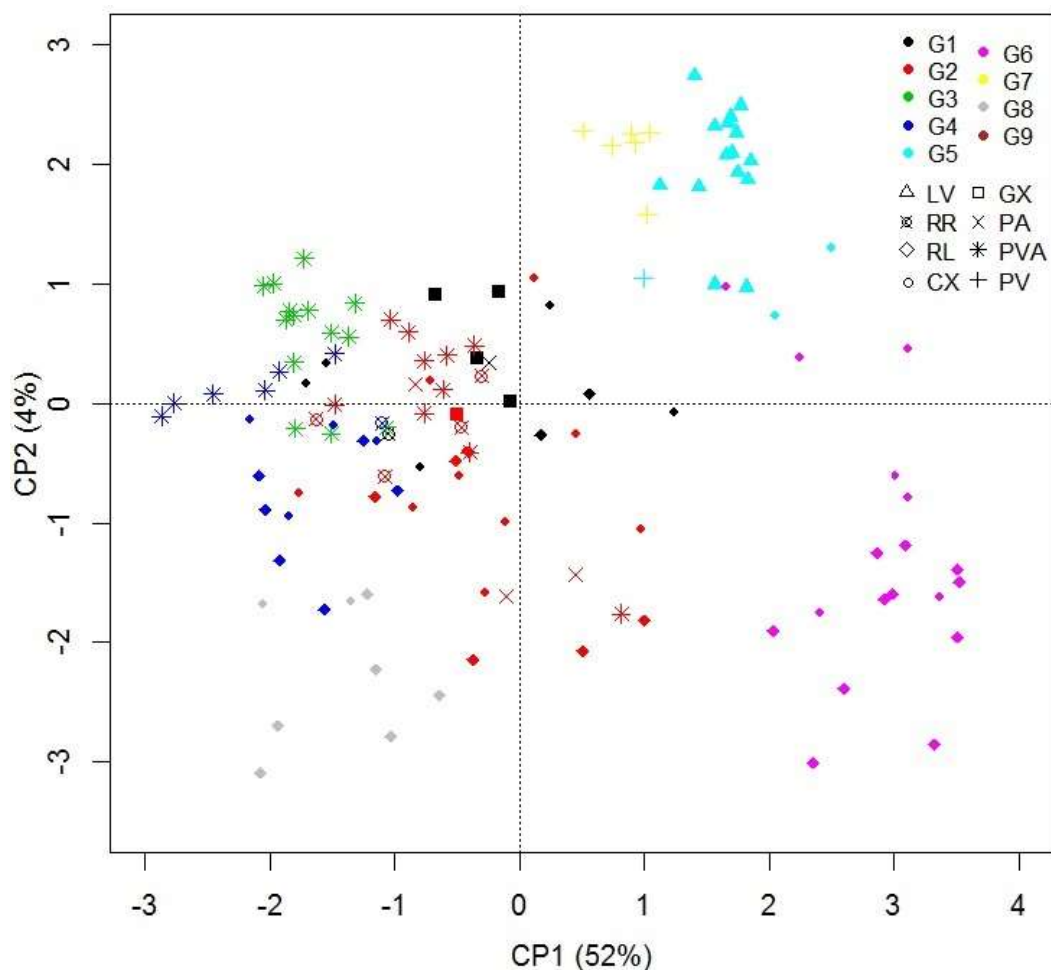


Figura 47. Gráfico de coordenadas principais obtidos a partir das análises espectrais (escores dos 6 primeiros componentes principais) das amostras de solos aleatoriamente coletadas na área total. LV: Latossolo Vermelho, GX: Gleissolo Háplico, RR: Neossolo Regolítico, PA: Argissolo Amarelo, RL: Neossolo Litólico, PVA: Argissolo Vermelho-Amarelo, CX: Cambissolo Háplico e PV: Argissolo Vermelho.

Poucos grupos criados pelo OSACA apresentaram predomínio de solos da mesma classe, como o G3, G7 e G9 (Tabela 13). O G6 e G8 enquadraram solos classificados como CX e RL. Isso deve ter ocorrido porque a distância pedológica, que foi utilizada para agrupar as amostras de solo, não leva em consideração a espessura da camada de solo, apenas sua sucessão. Os dados espectrais dessas classes são de fato similares, em razão da presença de feições pouco evidenciadas na região do visível. Entretanto, os Cambissolos apresentam maior desenvolvimento pedogenético quando comparado aos Nossolos, e por isso, era esperado sua discriminação. Os demais grupos enquadraram solos contrastantes, como o G1, que agrupou solos classificados como CX, GX, PA, RL e RR (Tabela 13). Isso ocorreu para os demais grupos, em que, baseado apenas nas análises espectrais, o OSACA não se mostrou eficiente para discriminar indivíduos pertencentes a distintas classes

de solo (Tabela 13), uma vez que na análise visual dos espectros é possível observar diferenças em relação aos aspectos das curvas espectrais.

Tabela 13. Tabela de contingência dos grupos criados pelo OSACA baseado nas análises espectrais e as classes de solos das amostras coletadas aleatoriamente da área total. CX: Cambissolo Háplico, GX: Gleissolo Háplico, LV: Latossolo Vermelho, PA: Argissolo Amarelo, PV: Argissolo Vermelho, PVA: Argissolo Vermelho-Amarelo, RL: Neossolo Litólico e RR: Neossolo Regolítico

Classe de solo	Grupo OSACA								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
CX	5	10	0	4	2	7	0	2	1
GX	4	1	0	0	0	0	0	0	0
LV	0	0	0	0	15	0	0	0	0
PA	1	3	0	0	0	0	0	0	0
PV	0	0	0	0	1	0	6	0	0
PVA	0	10	14	6	0	0	0	0	0
RL	2	6	0	6	0	11	0	6	0
RR	1	4	0	1	0	0	0	0	0

3.3.6.2. Análises convencionais (químicas e granulométrica)

Os CP1 e CP2 obtidos do conjunto de variáveis baseados nas análises convencionais explicaram 56% da variância total dos dados originais (Figura 48), valor similar ao encontrado para as análises espectrais (Figura 47). Apesar de apresentarem valores iguais para a variância explicada pelos CP1 e CP2, as análises espectrais mostraram maior poder de agrupamento dos solos enquadrados na mesma classe, uma vez a partir deles foi observada tendência de agrupamento de indivíduos da mesma classe em um mesmo grupo (Tabela 13). A tendência de agrupamento do gráfico de coordenadas principais, discutida anteriormente, não foi observada quando utilizado apenas as análises convencionais, em razão de no lado direito do gráfico ter indivíduos de classes distintas, como PV, LV, GX, CX e RL (Figura 48).

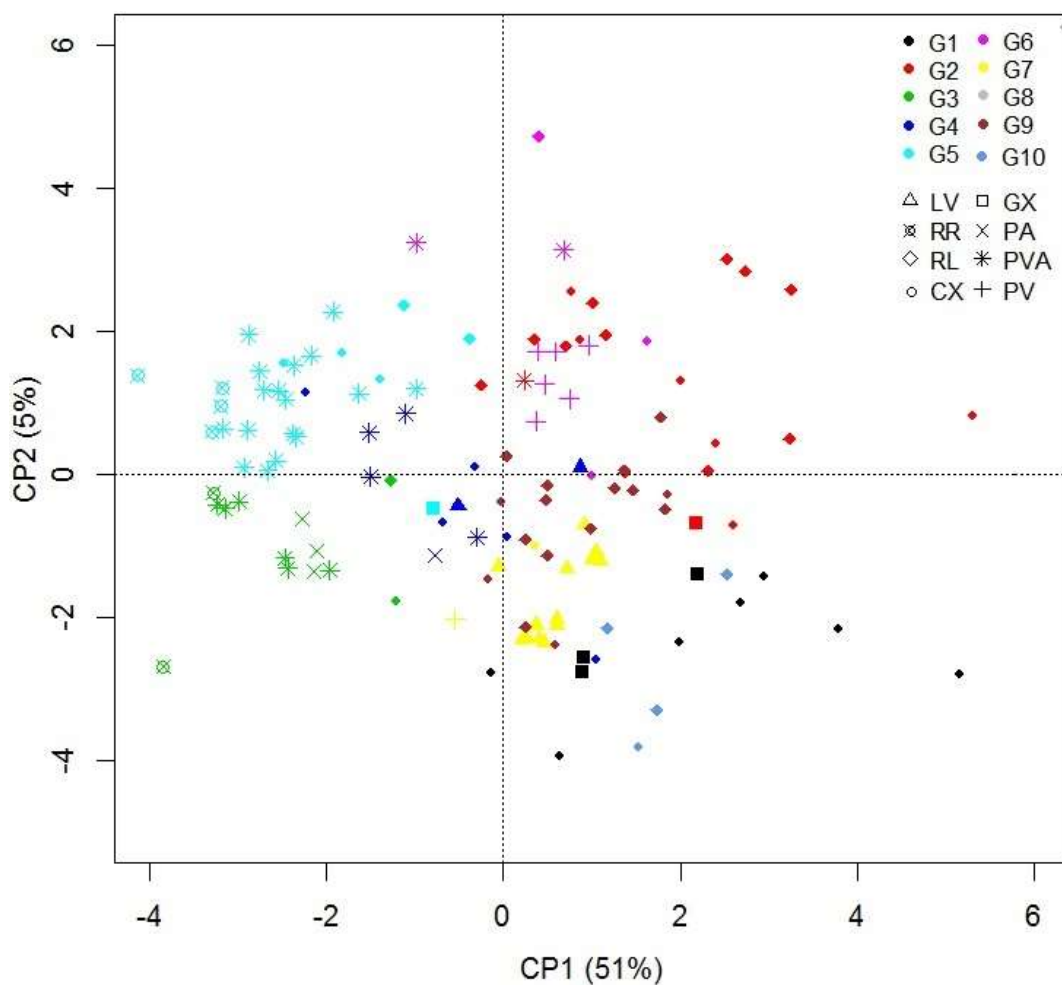


Figura 48. Gráfico de coordenadas principais obtido a partir das análises convencionais (químicas e granulométrica) das amostras de solos aleatoriamente coletadas na área total. LV: Latossolo Vermelho, GX: Gleissolo Háptico, RR: Neossolo Regolítico, PA: Argissolo Amarelo, RL: Neossolo Litólico, PVA: Argissolo Vermelho-Amarelo, CX: Cambissolo Háptico e PV: Argissolo Vermelho.

Baseado nas análises convencionais das amostras de solos coletadas na área total, nenhum grupo enquadrou os indivíduos de uma mesma classe de solo (Tabela 14), como para as análises espectrais (Tabela 13). Tanto nas análises espectrais como nas convencionais houve o agrupamento de indivíduos da classe do CX com RL. De fato, esses solos podem ocorrer associados na paisagem. Entretanto, geralmente se diferenciam em relação aos seus atributos. Para esse conjunto de variáveis, o OSACA agrupou os indivíduos dessas classes no G2, G8, G9 e G10 (Tabela 14). Em relação aos outros grupos formados, por exemplo, houve um agrupamento de CX, PVA e LV (G4), o que não era esperado, uma vez que o PVA apresenta incremento significativo de argila em profundidade, o que não ocorre para o CX e LV. Isso pode ser evidenciado pela diferença na intensidade de reflectância da curva espectral e pela inversão dela na região do SWIR (Demattê et

al., 2014; Stenberg et al., 2010). Com isso, as análises espectrais mostraram maior poder de discriminação de classes de solo do que as convencionais.

Tabela 14. Tabela de contingência dos grupos criados pelo OSACA baseado nas análises convencionais (químicas e granulométrica) e as classes de solos das amostras coletadas aleatoriamente da área total. CX: Cambissolo Háplico, GX: Gleissolo Háplico, LV: Latossolo Vermelho, PA: Argissolo Amarelo, PV: Argissolo Vermelho, PVA: Argissolo Vermelho-Amarelo, RL: Neossolo Litólico e RR: Neossolo Regolítico

Classe de solo	Grupo OSACA									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CX	7	6	1	5	3	2	1	1	4	1
GX	3	1	0	0	1	0	0	0	0	0
LV	0	0	0	2	0	0	13	0	0	0
PA	0	0	3	1	0	0	0	0	0	0
PV	0	0	0	0	0	6	1	0	0	0
PVA	0	1	6	4	17	2	0	0	0	0
RL	0	11	1	0	2	1	0	1	12	3
RR	0	0	2	0	4	0	0	0	0	0

3.3.6.3. Análises espectrais + Análises convencionais

A variância total dos dados originais teve uma menor explicação ao utilizar o conjunto de variáveis baseados nas análises espectrais associadas as convencionais, apresentando um valor de 44% (Figura 49).

Como ocorreram para as análises espectrais, os LV apresentaram uma distância menor dos PV, mas pertenceram a grupos diferentes. Os PVA apresentaram uma menor distância entre eles, quando utilizado esse conjunto de variáveis, e foram enquadrados predominantemente no G3 e G5 (Figura 49).

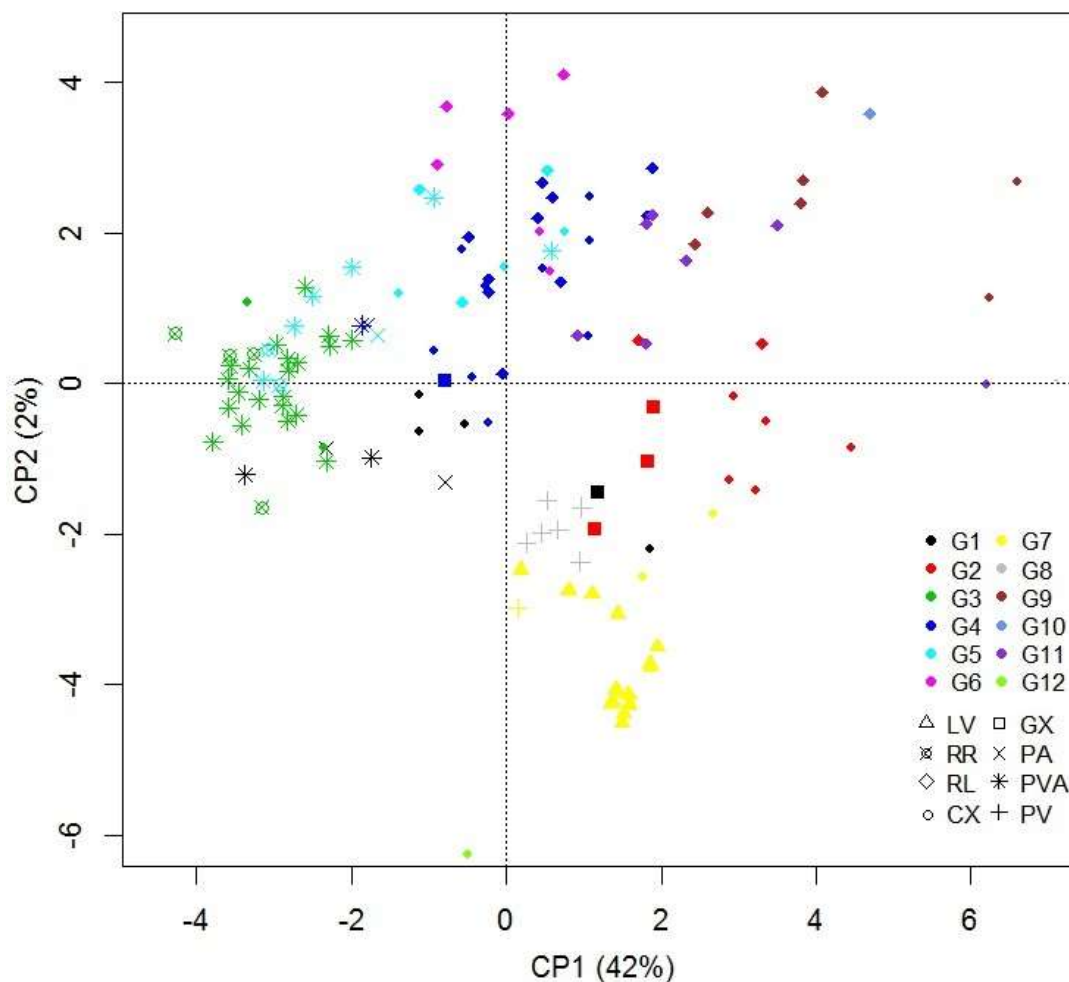


Figura 49. Gráfico de coordenadas principais obtidos a partir das análises espectrais + análises convencionais das amostras de solos aleatoriamente coletadas na área total. LV: Latossolo Vermelho, GX: Gleissolo Háplico, RR: Neossolo Regolítico, PA: Argissolo Amarelo, RL: Neossolo Litólico, PVA: Argissolo Vermelho-Amarelo, CX: Cambissolo Háplico e PV: Argissolo Vermelho.

Similar como ocorreu ao utilizar os outros conjuntos de variáveis, o OSACA não discriminou bem classes de solos distintas (Tabela 15). O algoritmo agrupou classes contrastantes, como PVA, RR, RL, PA e CX, no G5. Isso também ocorreu para a maioria dos outros grupos criados. Alguns grupos enquadraram os indivíduos classificados como RL e CX, o que era esperado, em razão disso ter ocorrido para os outros conjuntos de variáveis (Tabela 15).

Com isso, nota-se que o algoritmo utilizado para agrupar indivíduos que apresentaram classes de solos semelhantes apresentou limitações para um conjunto de dados maior, em razão de agrupar indivíduos com características contrastantes, por exemplo, os PVA, RL e CX. Isso pode ter ocorrido devido à elevada variabilidade dos dados, em razão de se ter analisado as amostras de solos coletadas em toda a área de estudo.

Tabela 15. Tabela de contingência dos grupos criados pelo OSACA baseado nas análises espectrais + análises convencionais (químicas e granulométrica) e as classes de solos das amostras coletadas aleatoriamente da área total. CX: Cambissolo Háplico, GX: Gleissolo Háplico, LV: Latossolo Vermelho, PA: Argissolo Amarelo, PV: Argissolo Vermelho, PVA: Argissolo Vermelho-Amarelo, RL: Neossolo Litólico e RR: Neossolo Regolítico

Classe de solo	Grupo OSACA											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
CX	4	5	2	9	3	2	2	0	2	0	1	1
GX	1	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
LV	0	0	0	0	0	0	15	0	0	0	0	0
PA	2	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
PV	0	0	0	0	0	0	1	6	0	0	0	0
PVA	2	0	21	1	6	0	0	0	0	0	0	0
RL	0	2	0	10	3	4	0	0	5	1	6	0
RR	0	0	4	0	2	0	0	0	0	0	0	0

3.3.7. Comparação do mapa detalhado de elementos da encosta com semidetalhado de solos

No mapa semidetalhado de solos (escala 1:25.000) apresentado por Vidal-Torrado (1994) a área mínima mapeável é de 4,3 ha, enquanto que no mapa detalhado de elementos da encosta (escala 1:10.000) é de 0,05 ha. Portanto, o nível de detalhe dos delineamentos dos elementos da encosta é muito maior, o que explica sua multiplicidade (Figura 50).

No mapa semidetalhado de solos quatro unidades de mapeamento (Li, PV1 e PV3) correspondem a 81% da área total e são unidades compostas (associações de solos) (Figura 50) (Vidal-Torrado, 1994).

Segundo Miller & Schaetzl (2015), os mapas digitais detalhados de elementos da encosta são úteis para desagregar unidades de mapeamento complexas e inclusões de solo, quando essas são relacionadas com variações do relevo. Comparando-se o mapa de solos com o de elementos da encosta verifica-se que nas unidades identificadas como associações de solos o número de delineamentos do relevo é muito maior (Figura 50). Provavelmente muitos dos delineamentos dos segmentos das encostas auxiliariam nas desagregações de unidades de solos, o que permitiria aperfeiçoá-lo, caso esse fosse elaborado para representar áreas mínimas mapeáveis de 0,05 ha. A multiplicidade de delineamentos que foi obtida com o nível de detalhe usado para mapear os segmentos de encosta (análise baseada em pixels de 5m) indica que o método não é aplicável para

levantamentos de solos do tipo semidetalhado ou de reconhecimento, mas pode ser bastante útil para a elaboração de mapas de solos detalhados e ultradetalhados ou detalhamento de antigos mapas de solos semidetalhados, como o exemplificado nesse estudo (Figura 50).

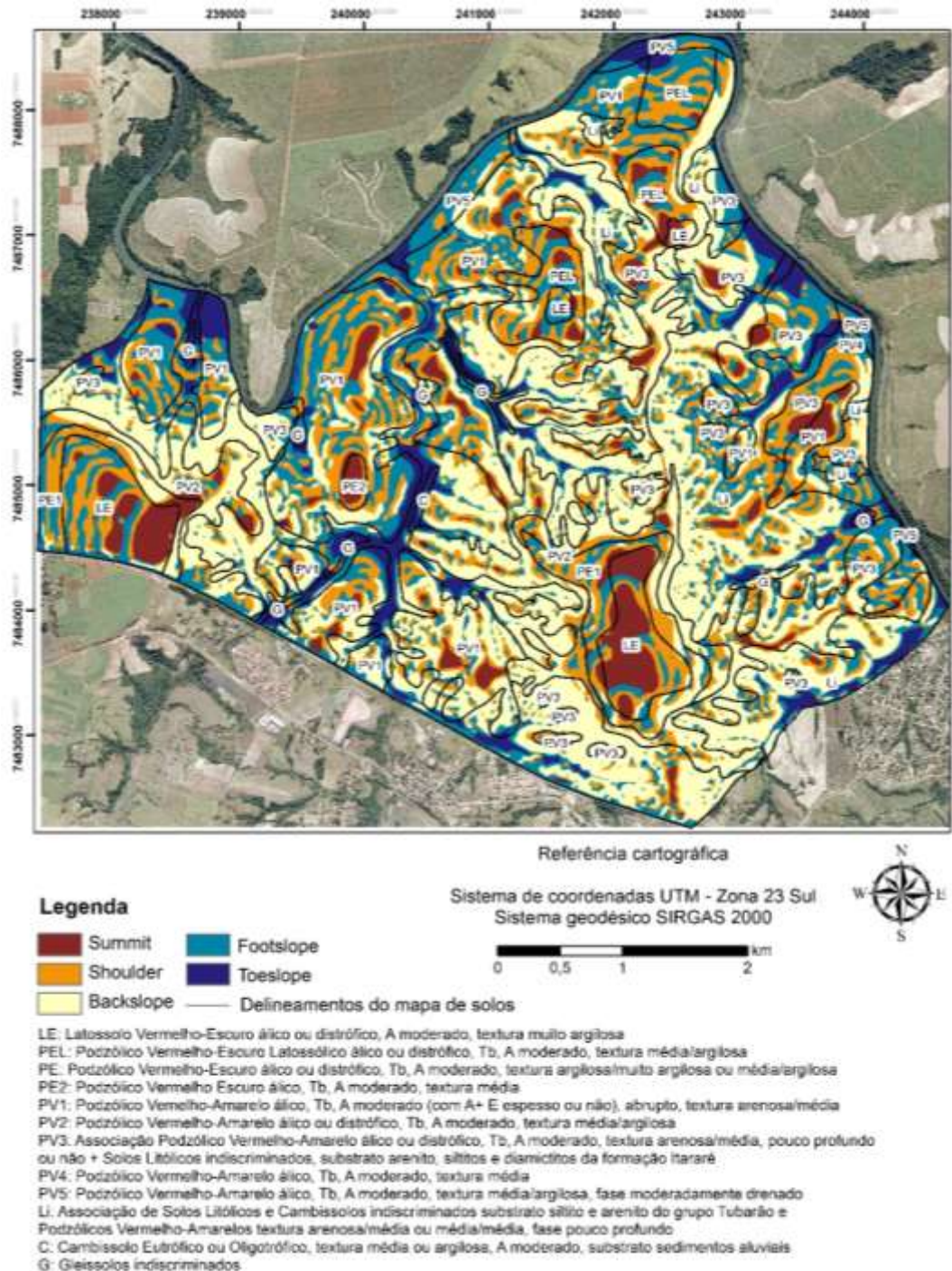


Figura 50. Mapa digital dos elementos da encosta e suas relações com as unidades de mapeamento de um mapa semidetalhado de solos elaborado por Vidal-Torrado (1994). A nomenclatura utilizada segue a proposta de Camargo et al. (1987).

Com isso, espera-se que o mapa detalhado de elementos da encosta permita tanto atualizar um mapa de solos pré-existente elaborados por métodos tradicionais como auxiliar na desagregação de unidades de mapeamento identificadas como associações ou complexos.

3.4. Conclusões

A utilização de um modelo com parâmetros geomorfométricos, hierarquizados em uma árvore de decisão, permitiu segmentar os elementos da encosta em nível detalhado (área mínima mapeável de um ha ou menos) com elevada acurácia (Kappa de 0,79) e baixo erro (0,04). O topo (*summit*), meia-encosta (*basckslope*) e sopé colúvio-aluvial (*toeslope*) foram os elementos melhor identificados pelo método usado. Entretanto, houve discrepâncias na classificação do ombro (*shoulder*) e do sopé coluvial (*footslope*). Essas provavelmente estão associadas ao modelo digital do terreno gerado pelas curvas de nível obtidas de mapas planialtimétricos pouco precisos, em razão dele promover uma errônea classificação da declividade associada a pequenas mudanças na elevação.

A topossequência 1, situada em uma superfície geomórfica mais recente e uma mesma formação geológica, apresentou menores variações nos atributos e tipos de solo quando comparada a topossequência 2, que está localizada em uma superfície mais antiga sobre várias formações geológicas. Isso em razão dos solos da topossequência 1 estarem mais controlados pelo material de origem do que pela associação dele com o relevo, como ocorreu para a topossequência 2.

O conjunto de variáveis baseados nas análises espectrais associadas as convencionais permitiu agrupar melhor classes solos similares situados na topossequência 1, enquanto que na topossequência 2, os dados convencionais apresentaram melhores resultados no agrupamento delas. Entretanto, ao utilizar as amostras de solos coletadas na área total, todos os grupos criados pelos diferentes conjuntos de variáveis agruparam classes de solos contrastantes. O que demonstra que o algoritmo utilizado não mostrou potencial para agrupar solos das mesmas classes taxonômicas de um conjunto maior de dados.

O mapa de elementos da encosta mostrou-se muito útil para, como mapa base, delinear as unidades de mapeamento de solos, desagregar unidades de

compostas (associações e complexos) e identificar as inclusões associadas a sutis variações do relevo.

REFERÊNCIAS

- Agresti, A., 2007. *An Introduction to Categorical Data Analysis*. John Wiley & Sons, New York.
- Barrios, M.R., Marques Junior, J., Panosso, A.R., Siqueira, D.S., Siqueira, D.S., La Sala Junior, N., 2012. Magnetic susceptibility to identify landscape segments on a detailed scale in the region of Jaboticabal, São Paulo, Brazil. *R. Bras. Ci. Solo* 36, 1073-1082.
- Bathgate, J.D., Duram, L.A., 2003. A geographic information systems based landscape classification model to enhance soil survey: A southern Illinois case study. *J. Soil Water Conserv.* 58, 119–127.
- Ben-Dor, E., 2002. Quantitative remote sensing of soil properties. *Adv. Agron.* 75, 173–243. doi:10.1016/S0065-2113(02)75005-0
- Bigarella, J. J., Mousinho, M. R., Silva, J. X., 1965. Pediplanos, pedimentos e seus depósitos correlativos no Brasil. *Boletim paranaense de Geografia* 16/17, 117-151.
- Bonett, J., Camacho-Tamayo, J.H., Vélez-Sánchez, J.E., 2016. Estimating soil properties with Mid-Infrared spectroscopy. *Rev. U.D.C.A Actual. Divulg. Científica* 19, 55–66.
- Brown, D.J., Shepherd, K.D., Walsh, M.G., Dewayne Mays, M., Reinsch, T.G., 2006. Global soil characterization with VNIR diffuse reflectance spectroscopy. *Geoderma* 132, 273–290. doi:10.1016/j.geoderma.2005.04.025
- Buol, S.W., Southard, R.J., Graham, R.C., McDaniel, P.A., 2011. *Soil genesis and classification*. Wiley-Blackwel, Nova Jersey.
- Burrough, P.A., van Gaans, P.F.M., MacMillan, R.A., 2000. High-resolution landform classification using fuzzy k-means. *Fuzzy Sets Syst.* 113, 37–52. doi:10.1016/S0165-0114(99)00011-1
- Camargo, M.N., Klamt, E.; Kauffman, J.H., 1987. Classificação de solos usado em levantamentos pedológicos no Brasil. *Boletim Informativo da Sociedade Brasileira do Solo* 12, 11-33.
- Carré, F., Jacobson, M., 2009. Numerical classification of soil profile data using distance metrics. *Geoderma* 148, 336–345. doi:10.1016/j.geoderma.2008.11.008
- Conforti, M., Froio, R., Matteucci, G., Buttafuoco, G., 2015. Visible and near infrared spectroscopy for predicting texture in forest soil: an application in southern Italy. *iForest - Biogeosciences For.* 8, 339–347. doi:10.3832/ifor1221-007
- Demattê, J.A.M., Bellinaso, H., Romero, D.J., Fongaro, C.T., 2014. Morphological Interpretation of Reflectance Spectrum (MIRS) using libraries looking towards soil classification. *Sci. Agric.* 71, 509–520. doi:10.1590/0103-9016-2013-0365
- Dikau, R., 1989. The application of a digital relief model to landform analysis. In: Raper, J.F. (Ed.), *Three dimensional applications in Geographical Information Systems*. Taylor and Francis, London, pp. 51–77.
- Drăguț, L., Dornik, A., 2016. Land-surface segmentation as a method to create strata for spatial sampling and its potential for digital soil mapping. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.* 30, 1359–1376. doi:10.1080/13658816.2015.1131828
- Drăguț, L., Blaschke, T., 2006. Automated classification of landform elements using object-based image analysis. *Geomorphology* 81, 330–344. doi:10.1016/j.geomorph.2006.04.013

- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2013. Sistema brasileiro de classificação de solos. Embrapa Solos, Rio de Janeiro.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2011. Manual de métodos de análises de solos. Embrapa Solos, Rio de Janeiro.
- Gee, G.W., Or, D., 2002. Particle-size analysis, in: Dane, J.H., Topp, G.C. (Eds.), *Methods of soil analysis*. Soil Sci. Soc. Am. J., Madison, pp. 255-315.
- Gerrard, J., 1992. *Soil Geomorphology: An Integration of Pedology and Geomorphology*. Chapman and Hall, London.
- Gholizade, A., Soom, M.A.M., Saberioon, M.M., Borůvka, L., 2013. Visible and near infrared reflectance spectroscopy to determine chemical properties of paddy soils. *J. Food, Agric. Environ.* 11, 859–866.
- GRASS Development Team, 2015. *Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software, Version 7.0*. Open Source Geospatial Foundation.
- Guadagnin, P.M.A., Trentin, R., 2014. Compartimentação Geomorfométrica Da Bacia Hidrográfica Do Arroio Caverá - RS. *Geo UERJ* 1, 183–199.
- Hall, G.F., 1983. Pedology and Geomorphology, in: Wilding, L.P, Smeck, N.E., Hall, G.F. (Eds.), *Pedogenesis and Soil Taxonomy: 1. Concepts and Interactions*. Elsevier, Amsterdam, pp.117-140.
- Hutchinson, M. F., Gallant, J.C., 2000. Digital elevation models and representation of terrain shape, in: Wilson, D. J., Gallant, J.C. (Eds), *Terrain analysis: principles and applications*. John Wiley & Sons, New York, pp. 29-50.
- IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo, escala: 1:1.000.000. São Paulo: IPT, 1981
- King, L.C., 1957. The uniformitarian nature of hillslopes. *Transactions of the Edinburgh Geological Society*, 17, 81-102. doi:10.1144/transed.17.1.811957
- Köppen, W., 1948. *Climatologia: com um estúdio de los climas de la tierra*. Fondo de Cultura Economica, Buenos Aires.
- Landis, J.R., Koch, G.G., 1977. The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics* 33, 159–174. doi:10.2307/2529310
- Lepsch, I. F., Coelho, R. M., 1994. Relações solo-relevo em uma encosta com transição arenito-basalto em Jaú (SP). *R. Bras. Ci. Solo* 18, 123-137.
- MacMillan, R.A., Pettapiece, W.W., Brierley, J.A., 2005. An expert system for allocating soils to landforms through the application of soil survey tacit knowledge. *Canadian Journal of Soil Science* 85,103-112.
- MacMillan, R.A., Pettapiece, W.W., Nolan, S.C., Goddard, T.W., 2000. A generic procedure for automatically segmenting landforms into landform elements using DEMs, heuristic rules and fuzzy logic. *Fuzzy Sets Syst.* 113, 81–109. doi:10.1016/S0165-0114(99)00014-7
- Marques Júnior, J., Lepsch, I.F., 2000. Depósitos superficiais neocenozóicos, superfícies geomórficas e solos em Monte Alto, SP. *Geociências* 19, 90-106.
- Miller, B.A., 2014. Semantic calibration of digital terrain analysis scale. *Cartogr. Geogr. Inf. Sci.* 41, 166–176. doi:10.1080/15230406.2014.883488
- Miller, B.A., Schaetzl, R.J., 2015. Digital classification of hillslope position. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 79, 132–145. doi:10.2136/sssaj2014.07.0287
- Minár, J., Evans, I.S., 2008. Elementary forms for land surface segmentation: The theoretical basis of terrain analysis and geomorphological mapping. *Geomorphology* 95, 236–259. doi:10.1016/j.geomorph.2007.06.003
- Mitášová, H., Hofierka, J., 1993. Interpolation by regularized spline with tension: II. Application to terrain modeling and surface geometry analysis. *Math. Geol.* 25, 657–669. doi:10.1007/BF00893172

- Mortimore, J.L., Marshall, L.J.R., Almond, M.J., Hollins, P., Matthews, W., 2004. Analysis of red and yellow ochre samples from Clearwell Caves and Çatalhöyük by vibrational spectroscopy and other techniques. *Spectrochim. Acta A* 60, 1179–1188.
- Mouazen, A.M., Karoui, R., Baerdemaeker, J., Ramon, H., 2005. Classification of soil texture classes by using soil visual near infrared spectroscopy and factorial discriminant analysis techniques. *Near Infrared Spectrosc.* 13, 231–240.
- Neteler, M., Mitasova, H., 2008. *Open source GIS: A GRASS GIS Approach*. Springer, New York.
- Penteado, M. M., 1976. Geomorfologia do Setor Centro-Occidental da Depressão Periférica Paulista. São Paulo: USP - Instituto de Geografia, 70-77.
- Penteado, M. M., 1969. A Bacia de Sedimentação de Rio Claro - Estado de São Paulo. *Geographica - Revista da Sociedade de Geografia de Lisboa*, 5, 38-61.
- Ruhe, R. V., 1975. Climatic geomorphology and fully developed slopes. *Catena* 2, 309–320. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0341-8162\(75\)80019-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0341-8162(75)80019-1)
- Santos, R.D., Lemos, R.C., Santos, H.G., Ker, J.C., Anjos, L.H.C., 2015. *Manual de descrição e coleta de solo no campo*. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/Embrapa Solos, Viçosa.
- Schaetzl R.J., 2013. Catenas and Soils, in: Shroder, J.F, Pope, G.A. (Eds.), *Treatise on Geomorphology*. Academic Press, San Diego, pp. 145-158.
- Shaw, P. J. A., 2009. *Multivariate statistics for the Environmental Sciences*. John Wiley & Sons, London.
- Shi, X., Long, R., Dekett, R., Philippe, J., 2009. Integrating Different Types of Knowledge for Digital Soil Mapping. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73, 1682–1692. doi:10.2136/sssaj2007.0158
- Siqueira, D.S., Marques Junior, J., Pereira, G.T., 2010. The use of landforms to predict the variability of soil and orange attributes. *Geoderma* 155, 55-66.
- Sirtoli, A.E., Silveira, C.T., Mantovani, L.E., Oka-Fiori, C., 2008. Atributos do relevo derivados de modelo digital de elevação e suas relações com solos. *Sci. Agrar.* 9, 317–329.
- Soriano-Disla, J.M., Janik, L.J., Viscarra Rossel, R.A., Macdonald, L.M., McLaughlin, M.J., 2014. The Performance of Visible, Near-, and Mid-Infrared Reflectance Spectroscopy for Prediction of Soil Physical, Chemical, and Biological Properties. *Appl. Spectrosc. Rev.* 49, 139–186. doi:10.1080/05704928.2013.811081
- Stenberg, B., Viscarra Rossel, R.A., Mouazen, A.M., Wetterlind, J., 2010. Visible and Near Infrared Spectroscopy in Soil Science, in: Sparks, D.L. (Ed.), *Advances in Agronomy*. Academic Press, Burlington, pp. 163-215. doi: 10.1016/S0065-2113(10)07005-7
- Van Ranst, E., Coninck, F., 2002. Evaluation of ferrolysis in soil formation. *Eur. J. Soil Sci.* 53, 513–519. doi:10.1046/j.1365-2389.2002.00475.x
- Vidal-Torrado, P., Lepsch, I. F., Castro, S. S., 2005. Conceitos e aplicações das relações pedologia-geomorfologia em regiões tropicais úmidas, in: Vidal-Torrado, P., Alleoni, L. R. F., Cooper, M., Silva, A. P., Cardoso, E. J., Prochnow, L. I. (Eds.), *Tópicos em Ciência do Solo*. SBCS, Viçosa, pp.145-192.
- Vidal-Torrado, P., Lepsch, I.F., Castro, S.S., Cooper, M., 1999. Pedogênese em uma seqüência Latossolo-Podzólico na borda de um platô na depressão periférica paulista. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 23, 909–921. doi:10.1590/S0100-06831999000400018
- Vidal-Torrado, P., Lepsch, I.F., 1999. Relações material de origem/solo e

- Pedogênese em uma seqüência de solos predominantemente Argilosos e Latossólicos sobre psamitos na depressão periférica paulista. *Rev. Bras. Ciência do Solo* 23, 357–369.
- Vidal-Torrado, P. Pedogênese e Morfogênese no distrito de Tupi (Piracicaba, SP). Piracicaba, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 1994. 212p. (Tese de Doutorado)
- Viscarra Rossel, R.A., Behrens, T., Ben-Dor, E., Brown, D.J., Demattê, J.A.M., Shepherd, K.D., Shi, Z., Stenberg, B., Stevens, A., Adamchuk, V., Aïchi, H., Barthès, B.G., Bartholomeus, H.M., Bayer, A.D., Bernoux, M., Böttcher, K., Brodský, L., Du, C.W., Chappell, A., Fouad, Y., Genot, V., Gomez, C., Grunwald, S., Gubler, A., Guerrero, C., Hedley, C.B., Knadel, M., Morrás, H.J.M., Nocita, M., Ramirez-Lopez, L., Roudier, P., Campos, E.M.R., Sanborn, P., Sellitto, V.M., Sudduth, K.A., Rawlins, B.G., Walter, C., Winowiecki, L.A., Hong, S.Y., Ji, W., 2016. A global spectral library to characterize the world’s soil. *Earth-Science Rev.* 155, 198–230. doi:10.1016/j.earscirev.2016.01.012
- Viscarra Rossel, R.A., Bui, E.N., Caritat, P., McKenzie, N.J., 2010. Mapping iron oxides and the color of Australian soil using visible-near-infrared reflectance spectra. *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 115, 1–13. doi:10.1029/2009JF001645
- Viscarra Rossel, R.A., 2008. ParLeS: Software for chemometric analysis of spectroscopic data. *Chemom. Intell. Lab. Syst.* 90, 72–83. doi:10.1016/j.chemolab.2007.06.006
- Viscarra Rossel, R.A., Walvoort, D.J.J., McBratney, A.B., Janik, L.J., Skjemstad, J.O., 2006. Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. *Geoderma* 131, 59–75. doi:10.1016/j.geoderma.2005.03.007
- Weidong, L., Baret, F., Xingfa, G., Qingxi, T., Lanfen, Z., Bing, Z., 2002. Relating soil surface moisture to reflectance. *Remote Sens. Environ.* 81, 238–246. doi:10.1016/S0034-4257(01)00347-9
- Williams, M., Kuhn, W., Painho, M., 2012. The influence of landscape variation on landform categorization. *J. Spat. Inf. Sci.* 5, 51–73. doi:10.5311/JOSIS.2012.5.107
- Wysocki, D.A., Schoenberger, P. J., Hirmas, D. R., LaGarry, H.E., 2011. Geomorphology of soil landscapes, in: Huang, P. M., Li, Y., Summer, M.E. (Eds.), *Handbook of soil science*. CRC Press, Boca Raton, pp. 969-994.
- Young, A., 1980. *Tropical soils and soil survey*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Zinck, J.A., Metternicht, G., Bocco, G., Del Valle, H. F., 2016. *Geopedology: an integration of geomorphology and pedology for soil and landscapes studies*. Springer, London.