

JAIRO CALDERARI DE OLIVEIRA JUNIOR

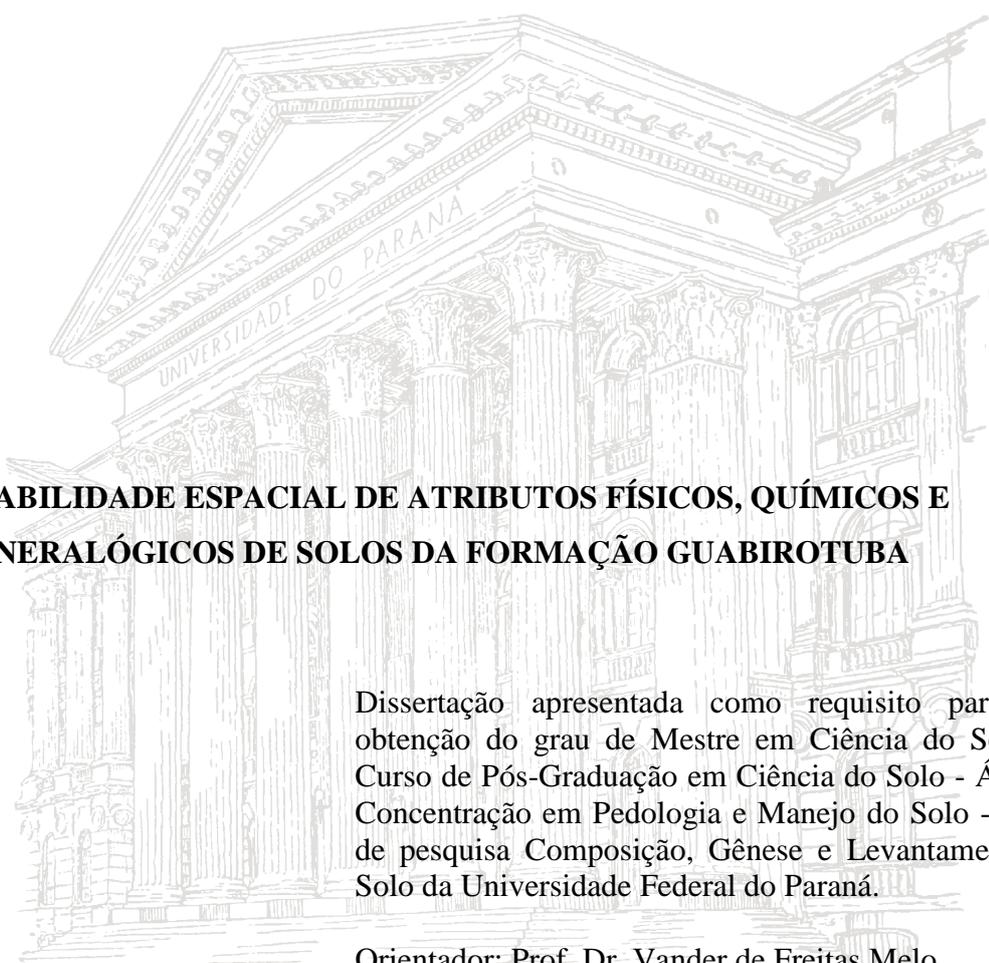
**VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS FÍSICOS, QUÍMICOS E
MINERALÓGICOS DE SOLOS DA FORMAÇÃO GUABIROTUBA**



CURITIBA

2011

JAIRO CALDERARI DE OLIVEIRA JUNIOR



**VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS FÍSICOS, QUÍMICOS E
MINERALÓGICOS DE SOLOS DA FORMAÇÃO GUABIROTUBA**

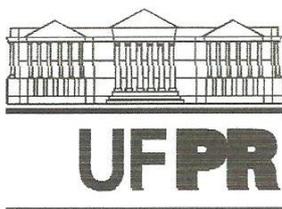
Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Ciência do Solo do Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo - Área de Concentração em Pedologia e Manejo do Solo - Linha de pesquisa Composição, Gênese e Levantamento do Solo da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Vander de Freitas Melo

Co-orientador: Prof. Dr. Luiz Claudio de Paula Souza

CURITIBA

2011



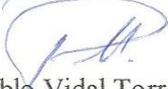
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE SOLOS E ENGENHARIA AGRÍCOLA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO(MESTRADO)
Rua dos Funcionários, 1540-Curitiba/PR-80035-050-Fone/Fax 41-3350-5648
Página: www.pgcsolo.agrarias.ufpr.br/
E-mail: pgcsolo@ufpr.br

PARECER

Os Membros da Comissão Examinadora, designados pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado, apresentada pelo candidato **JAIRO CALDERARI DE OLIVEIRA JÚNIOR**, sob o título: "**Variabilidade espacial de atributos químicos, físicos e mineralógicos de solos da Formação Guabirotuba**", requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Ciência do Solo – Área de Concentração: Pedologia e Manejo do Solo, do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, após haverem analisado o referido trabalho e arguido o candidato, são de Parecer pela "**APROVAÇÃO**" da Dissertação, completando assim, os requisitos necessários para receber o diploma de **Mestre em Ciência do Solo - Área de Concentração: "Pedologia e Manejo do Solo"**.

Secretaria do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, em Curitiba, 18 de janeiro de 2011.


Prof. Dr. Vander de Freitas Melo, Presidente.


Prof. Dr. Pablo Vidal Torrado, Iº. Examinador.


Prof. Dr. Helio Olympio da Rocha, IIº. Examinador.

Dedico este trabalho a minha esposa RAQUEL,
que muito me apoiou e incentivou
e aos meus pais JAIRO e NADJA

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me conceder essa oportunidade e iluminar meu caminho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Vander de Freitas Melo, pela amizade, paciência, confiança e inquestionável orientação.

Ao meu co-orientador, Prof. Dr. Luiz Claudio de Paula Souza, pelos ensinamentos, palavras de apoio, pelos conselhos, confiança e pela grande amizade.

Ao Prof. Dr. Valmiqui da Costa Lima, pelos ensinamentos, apoio, incentivo, amizade e conversas animadas.

A todos meus colegas e amigos de mestrado do PPG em Ciência do Solo, em especial Thiago, Mauricio, Katy, Ana Paula, Araújo, Venina, Tales, pelos momentos de descontração e pela ajuda no desenvolvimento das atividades.

Aos funcionários do Departamento de Ciência do Solo, Gerson, Elda, Cleusa, em especial à Maria, pela grande ajuda e amizade.

Aos meus amigos e familiares, em especial meus queridos pais, Jairo e Nadja, pelo apoio financeiro e incentivo para alcançar meus sonhos.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, pela oportunidade de realizar este trabalho e a CAPES pelo apoio financeiro na forma de bolsa de mestrado.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Obrigado!

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

- Figura 1.** (a) Altitudes da área de estudo e subdivisões por geomorfologia e uso atual: Inferior, Médio e Superior. (b) Unidades de Mapeamento: 1 a 10, descritas por Kraemer (2007) 19
- Figura 2.** Perfil altimétrico da área (superfície), com a distância horizontal do perfil, unidade de mapeamento e teor de carbono em $g\ dm^{-3}$. Compartimento inferior – unidades 2 e 10; compartimento médio – unidades 2, 3, 7 e 8; compartimento superior – unidade 4, 5 e 6 25
- Figura 3.** Gráfico de normalidade (a) e distribuição das classes de frequência (b) dos teores de P em área total 28
- Figura 4.** Gráfico de normalidade (a) e distribuição das classes de frequência (b) dos teores de P no Compartimento Inferior 28

CAPÍTULO 3

- Figura 1.** Relevô em 3D da área de estudo situada na Fazenda Experimental do Cangüiri (a) e distribuição dos pontos de amostragem em malha regular e mais 10% de pontos com posicionamento aleatório dentro da malha regular 37
- Figura 2.** Modelo de um semivariograma e suas principais feições (Landim & Struraro, 2002) ... 41
- Figura 3.** Semivariograma dos atributos mineralógicos: a) Fe amorfo, b) Fe cristalino, c) Fe amorfo / Fe Cristalino, d) Gt, e) SI Gt, f) DMC Gt, g) Hm, h) DMC Hm, i) SI Hm e j) Gt/(Gt+Hm) 46
- Figura 3. Continuação.** Semivariograma dos atributos mineralógicos: k) Al Amorfo, l) Ct, m) Ct DMC, n) IA Ct, o) Gb, p) Gb DMC, q) Ct/(Ct+Gb), r) T^a Ct e s) T^a Gb 47

CAPÍTULO 4

- Figura 1.** Relevô em 3D da área de estudo situada na Fazenda Experimental do Cangüiri (a) e distribuição dos pontos de amostragem em malha regular e mais 10% de pontos com posicionamento aleatório dentro da malha regular 57
- Figura 2.** Mapa de solos da área de estudo (Kremer, 2007), apresentado em detalhe sua localização dentro do Centro de Estações Experimentais da Fazenda do Cangüiri (CEEX Cangüiri), da Universidade Federal do Paraná (UFPR) 58
- Figura 3.** Índices topográficos gerados a partir do MNT da área: a) MNT, b) Altitude Sobre o Canal de Drenagem, c) Declive, d) Índice de Umidade, e) MRRTF, f) MRVBF, g) Perfil de Curvatura, h) Plano de Curvatura e i) Isocluster dos índices 61
- Figura 4.** Distribuição espacial dos minerais, seus atributos e as linhas de drenagem. a) Fe Amorfo extraído com oxalato de amônio, b) Fe cristalino (FeDCB-FeOA), c) FeA/FeC, d) Gt, e) SI Gt, f) Gt DMC, g) Hm e h) Gt/(Gt+Hm) 63
- Figura 5.** Distribuição espacial dos minerais, seus atributos e as linhas de drenagem. a) Alumínio Amorfo extraído com oxalato de amônio, b) Caulinita, c) Gibbsita, d) Ct/(Ct+Gb), e) Ct DMC, f) Gb DMC, g) Índice de Assimetria da Caulinita, h) Temperatura de desidroxilação da caulnita, i) Temperatura de desidroxilação da gibbsita 64

LISTA DE QUADROS

CAPÍTULO 2

Quadro 1. Valores mínimos, máximos e a média das características físicas e químicas das amostras do horizonte A em cada subdivisão	20
Quadro 2. Amplitude dos atributos, em porcentagem, na Área Total (Total) e compartimentos Inferior (composto pelas unidades de mapeamento 1, 9 e 10), Médio (composto pelas unidades 2, 3, 7 e 8) e Superior (composto pelas unidades 4, 5 e 6)	24
Quadro 3. Coeficiente de variação dos atributos em área total (Total), compartimentos inferior (composto pelas unidades de mapeamento 1, 9 e 10), médio (composto pelas unidades 2, 3, 7 e 8) e superior (composto pelas unidades 4, 5 e 6)	24
Quadro 4. Coeficiente de assimetria dos atributos dentro de cada compartimento	25
Quadro 5. Coeficiente de curtose dos atributos dentro de cada compartimento	26
Quadro 6. Valores de p para o teste de normalidade Shapiro-Wilk	26
Quadro 7. Matriz de correlação dos atributos em área total (n=135)	26
Quadro 8. Matriz de correlação dos atributos no compartimento inferior, médio e superior	27

CAPÍTULO 3

Quadro 1. Estatística descritiva dos atributos mineralógicos do horizonte B das 135 amostras	42
Quadro 2. Parâmetros geoestatísticos e das feições do semivariograma para os atributos mineralógicos do horizonte B das 135 amostras	43

CAPÍTULO 4

Quadro 1. Valores mínimos, máximos, média e coeficiente de variação (CV) para os atributos químicos e físicos do horizonte B das amostras de solo	56
Quadro 2. Métodos para a geração dos Índices de Representação da Paisagem	60
Quadro 3. Valores de minerais da fração argila dos solos (Valor do atributo) e valores médios dos índices geomorfológicos nas áreas com maiores valores (A1, A2 e A3) e nas áreas com menores valores (B1, B2 e B3)	67
Quadro 3. Continuação	68
Quadro 4. Teores dos atributos mineralógicos e valores médios dos atributos químicos em cada classe	69
Quadro 4. Continuação	70
Quadro 5. Correlações entre os índices topográficos e as características mineralógicas da fração argila e químicas do solo significativas ($p = 0,05$)	71

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL.....	8
1.1. LITERATURA CITADA	10
2. VARIABILIDADE DOS ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DE SOLOS DA FORMAÇÃO GUABIROTUBA EM DIFERENTES UNIDADES DE AMOSTRAGEM	14
2.1. INTRODUÇÃO	15
2.2. MATERIAL E MÉTODOS	17
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	19
2.4. CONCLUSÕES	28
2.5. LITERATURA CITADA	29
3. VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS MINERALÓGICOS DOS SOLOS	33
3.1. INTRODUÇÃO	34
3.2. MATERIAL E MÉTODOS	36
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
3.4. CONCLUSÕES	48
3.5. LITERATURA CITADA	48
4. ÍNDICES DE REPRESENTAÇÃO DA PAISAGEM E DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE ATRIBUTOS MINERALÓGICOS DE SOLOS.....	52
4.1. INTRODUÇÃO	53
4.2. MATERIAL E MÉTODOS	55
4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
4.4. CONCLUSÕES	71
4.5. LITERATURA CITADA	72

1. INTRODUÇÃO GERAL

O solo é um dos mais importantes recursos naturais, pois sustenta a produção de algumas fontes de bioenergia (biodiesel e álcool), matéria prima para diversas indústrias (têxtil, madeireira, farmacêutica e de papel) além da reconhecida importância na produção de alimentos. Atualmente o solo tem ganhado destaque na sociedade por também desempenhar importante papel ambiental, regulando o ciclo hidrológico, funcionando como “filtro” para poluentes de corpos d’água e como grande dreno de dióxido de carbono (principalmente os Organossolos). Assim o estudo do solo, e em particular de sua variabilidade, também ganha importância no planejamento de uso desse recurso tão importante para a humanidade, como o entendimento da variabilidade dos seus atributos auxilia na predição da sua distribuição espacial e conseqüentemente seus potenciais e limitações.

A variabilidade espacial dos atributos do solo é conhecida de longa data (Burrough, 1993) sendo largamente empregada em mapeamento de solos nas divisões de diferentes unidades de solos (Hudson, 1992), levando-se em consideração a geomorfologia, estratigrafia, posição da encosta e declividade. Porém, mesmo em escalas pequenas e sobre o mesmo material de origem é observado alta variabilidade dos atributos do solo, devido a variações locais de umidade, atividade biológica, lixiviação, erosão e sedimentação (Barbar & Melo, 2008).

Para fins de fertilidade do solo, a amostragem é a maior fonte de incerteza dos dados, maior até que o preparo, manuseio e a análise em laboratório (Lambkin et al., 2004). Vários trabalhos relacionados a amostragem do solo têm sido realizados visando a redução da variabilidade com diferentes enfoques: instrumento de coleta das amostras (trado e pá de corte) (Alvarez V. & Guarçoni M., 2003; Guarçoni M. et al., 2003; Oliveira et al., 2007), número de amostras simples necessárias para formar uma composta (Souza et al., 1997; Alvarez V. & Guarçoni M., 2003; Carvalho et al., 2002; Silva et al., 2003; Oliveira et al., 2007; Amaro Filho et al., 2007; Brus & Noij, 2008; Weindorf & Zhu, 2010), efeito dos tratos culturais (Silveira et al., 2000; Guarçoni et al., 2007; Oliveira et al., 2007; Pauletti et al., 2009); interferência das pedoformas (Souza et al., 2003; Montanari et al., 2005; Souza et al., 2006; Sanchez et al., 2009); escalas de amostragem (Lin et al., 2005; Wang et al., 2008). Porém, a delimitação de uma gleba homogênea para amostragem é fundamental para a representatividade da área, uma vez que a amostragem composta (amplamente utilizada) tem como premissa que a média aritmética das amostras simples é igual ao valor das amostras compostas (Oliveira et al., 2007), influenciando assim nos tratos culturais (adubação e correção do pH) a serem conduzidos.

As propriedades físicas e químicas do solo são reflexos, em grande parte, dos minerais que o constituem, com destaque para a caulinita que é o mineral mais abundante em solos de clima

tropical, como os brasileiros (Melo et al., 2001a; Melo & Wypych, 2009), seguido de gibbsita (óxidos de Al), goetita e hematita (óxidos de Fe) (Resende et al., 1997). Do ponto de vista químico, a caulinita possui carga variável, que ao pH natural do solo apresenta capacidade de troca catiônica (CTC), sendo a mesma influenciada pelas práticas de calagem. Os óxidos de Fe e Al, por permanecerem longo tempo no ambiente, são importantes indicadores ambientais e pedogenéticos. Estes, quando em teores elevados, indicam solos altamente intemperizados (Kampf & Curi, 2000) e do ponto de vista agrônomo assumem importante papel no manejo do solo, uma vez que tem grande capacidade de adsorver fósforo, poluentes, gerar cargas positivas (CTA) e conferir estrutura mais granular (Costa & Bigham, 2009; Kampf et al., 2009). Por este motivo, o estudo e caracterização da variabilidade dos atributos mineralógicos do solo são de grande contribuição no entendimento da variabilidade dos demais atributos do solo.

A geoestatística se destaca como importante ferramenta na análise e caracterização da variabilidade espacial dos atributos do solo e se diferencia da estatística clássica por buscar a dependência espacial entre as amostras, necessitando das posições onde foram coletadas as amostras (Vieira, 2000; Carvalho et al., 2002). A principal ferramenta geoestatística para análise da variabilidade espacial é o semivariograma, que através de algumas de suas feições descreve a variabilidade dos atributos, sendo o alcance (a) sua principal feição, indicando a distância a partir da qual as amostras não mais apresentam dependência espacial e os valores das amostras passam a ser considerados aleatórios. Com base nos dados obtidos do semivariograma, podemos estimar, de forma mais exata, valores para locais onde não foram coletadas amostras, facilitando a visualização da informação e seu entendimento (Saldaña & Ibañez, 2007; Camargo et al., 2008; Zhu & Lin, 2010).

Milne (1935) foi um dos precursores no estudo da relação solo-paisagem, cuja sucessão lateral dos solos denominou de catena, em que sugeriu mecanismos específicos de formação de solo como: 1) relações diretas entre topografia e relevo; 2) solos em posição mais baixa da paisagem apresentando pior drenagem e 3) processos da relação solo-paisagem incluindo erosão e deposição e lixiviação de solutos através da encosta (Milne, 1935; Brown et al., 2004). De fato, para o melhor entendimento das dinâmicas do solo e sua distribuição, é necessária uma abordagem multidisciplinar, levando em consideração principalmente a estratigrafia, geomorfologia e hidrologia (Vidal-Torrado et al., 2005).

Ghidin et al. (2006) estudando duas pedossequências de Latossolos no estado do Paraná, observaram influência direta da posição da paisagem nos atributos mineralógicos do solo onde, na posição inferior da paisagem obteve-se maiores teores de caulinita, minerais de baixa cristalinidade e C orgânico. Camargo et al. (2008) observaram influência da pedofoma no diâmetro médio do

crystal (DMC) para goetita, hematita e gibbsita, em que os maiores valores para esse atributo foram encontrados em superfícies côncava-convexa.

Com a tendência dos estudos de solos se tornarem cada vez mais quantitativos, denominada pedometria (Webster & Oliver, 1990; McBratney & Odeh, 1998; Saldaña & Ibañez, 2007), o modelo numérico do terreno (MNT) ganha importância, pois baseado nele são gerados vários produtos, entre eles os índices de representação da paisagem (Altitude sobre o canal de drenagem, Curvatura, *Multiresolution Index of Valley Bottom Flatness* (MRVBF), *Multiresolution index of Ridge Top Flatness* (MRRTF), Plano de curvatura, Perfil de curvatura, Fator LS, Declividade, Índice de Umidade).

A maioria dos trabalhos que utilizam esses índices estuda sua eficiência quanto à predição de atributos físicos ou morfológicos do solo (Mckenzie & Ryan, 1999; Chagas, 2006; Bock & Kothe, 2008; Gilo & Etzelmuller, 2009; Hancock et al., 2010) sem abordar a mineralogia dos mesmos, com exceção de Brown et al.(2004) que utilizou o altitude em relação ao canal de drenagem para correlacionar solos de coloração mais avermelhada a maiores altitudes(maior teor de hematita) de solos de coloração mais amarelada e cinza-escuras a menores altitudes (maiores teores de goetita e até lixiviação de Fe), porem sem quantificar os teores dos minerais.

Considerando que o entendimento da variabilidade dos atributos químicos, físicos e mineralógicos fornecem informações importantes para o estabelecimento de práticas culturais, definição de melhores padrões de amostragem, entendimento da relação solo-paisagem, o presente trabalho visa:

- i) estudar a variabilidade dos atributos químicos e físicos do horizonte A em diferentes unidades amostrais;
- ii) caracterização da variabilidade espacial dos atributos mineralógicos através de análise geoestatística;
- iii) estudar a distribuição espacial dos atributos mineralógicos, utilizando os índices de representação da paisagem para caracterização de sua ocorrência.

1.1. LITERATURA CITADA

AMARO FILHO, J.; NEGREIROS, R.F.D.; ASSIS JÚNIOR, R.N. & MOTA, J.C.A. Amostragem e variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho em Mossoró, RN. R. Bras. Ci. Solo, 31:415-422, 2007.

ALVAREZ V., V.H. & GUARÇONI M., A. Variabilidade horizontal da fertilidade do solo em sistema de plantio direto. R. Bras. Ci. Solo. 27: 297-310, 2003.

BOCK, M. & KOTHE, R. Predicting the Depth of hydrologic Soil Characteristics Hamburger. Beiträge zur Physischen Geographie und Landschaftsökologie –Heft 19, 2008.

BURROUGH, P.A. Soil variability: a late 20th century view. *Soils Fertilizers* 56:529–562. 1993.

BROWN, D.J.; CLAYTON, M.K. & McSWEENEY, K. Potential terrain controls on soil color, texture contrast and grain-size deposition for the original catena landscape in Uganda. *Geoderma* 122:51-72, 2004.

BRUS, D.J.; & NOIJ, I.G.A.M. Designing sampling schemes for effect monitoring of nutriente leaching from agricultural soils. *European Journal of Soil Science*, 59:292-303, 2008.

CAMARGO, L.A.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T. & HORVAT, R.A. Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de um Latossolo sob diferentes formas do relevo. I – Mineralogia da fração argila. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:2269-2277, 2008.

CARVALHO, J.R.P.; SILVEIRA, P.M. & VIEIRA, S.R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. *Pesq. agropec. bras.*, 37:1151-1159, 2002.

CHAGAS, C. da S. Mapeamento digital de solos por correlação ambiental e redes neurais em uma bacia hidrográfica no domínio de mar de morros.– Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006, 223 p. (Tese Doutorado em solos e nutrição de plantas).

GILO, M.D. & ETZELMULLER, B. Spatial prediction of soil classes using digital terrain analysis and multinomial logistic regression modeling integrated in GIS: Examples from Vestfold County, Norway. *Catena*, (77):8-18, 2009.

HANCOCK, G.R.; MURPHY, D. & EVANS, K.G. Hillslope and catchment scale soil organic carbon concentration: An assessment of the role of geomorphology and soil erosion in an undisturbed environment. *Canadá. Geoderma*, (155):36-45, 2010.

HUDSON, B.D. The soil survey as paradigm-based science. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56, 836–841. 1992.

BARBAR, L.C. & MELO, V.F. Variabilidade das características químicas e mineralógicas de solos da região de Curitiba (PR). *Sci. Agr.*, 9:187-197, 2008.

GUARÇONI M., A.; ALVAREZ V., V.H.; NOVAIS, R.F.; CANTARUTTI, R.B.; LEITE, H.G. & FREIRE, F.M. Diâmetro de trado necessário à coleta de amostra num Cambissolo sob plantio direto ou sob plantio convencional antes ou depois da aração. *R. Bras. Ci. Solo*, 31:947-959, 2007

GHIDIN, A.A.; MELO, V.F.; LIMA, V.C. & LIMA, J.M.J.C. Topossequências de Latossolos originados de rochas basálticas no Paraná. I – Mineralogia da fração argila. *R.Bras. Ci. Solo*, 30:293-306, 2006.

KÄMPF, N. & CURI, N. Óxidos de ferro: Indicadores de atributos e ambientes pedogenênicos e geoquímicos. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H. & SCHAEFER, C.E.G.R., eds. Tópicos em ciência do solo. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. 1:107-138.

LAMBKIN, D.; NORTCLIFF, S. & WHITE, T. The importance of precision in sampling sludges, biowastes and treated soils in a regulatory framework. *Trends in Analytical Chemistry*, 23:704-715, 2004.

LIN, H.; WHEELER, D.; BELL, J. & WILDING, L. Assessment of soil spatial variability at multiple scales. *Ecological Modeling*. 182:271–290, 2005.

McBRATNEY, A.B., Odeh, I.O.A. An overview of pedometric techniques for use in soil survey. In: *Proceedings of the 16th ISSS Congress, Montpellier, France. 1998.*

MCKENZIE, N.J. & RYAN, P. Spatial prediction of soil properties using environmental correlation. *Geoderma*, 89(1-2):67-94, April 1999.

MELO, V.F.; SINGH, B.; SCHAEFER, C.E.G.R.; NOVAIS, R.F. & FONTES, M.P.F.F. Chemical and mineralogical properties of kaolinite-rich Brazilian soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 65: 1324-1333, 2001.

MELO, V.F. & WYPYCH, F. Caulinita e Halosita. In: MELO, V.F. & ALLEONI, L.R.F., eds. *Química e mineralogia do solo (Parte I – Conceitos básicos)*. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.1., p.427-504, 2009.

MILNE, G. Some suggested units of classification and mapping, particularly for East African Soils. *Soil Res.*, 4:183-198, 1935.

MONTANARI, R.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T. & SOUZA, Z.M. Forma da paisagem como critério para otimização amostral de latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar. *Pesq. Agropec. Bras.*, 40:69-77, 2005.

OLIVEIRA, F.H.T.; ARRUDA, J.A.; SILVA, I.F.; & ALVES, J.C. Amostragem para avaliação da fertilidade do solo em função do instrumento de coleta das amostras e de tipos de preparo do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 31:973-983, 2007

PAULETTI, V.; MOTTA, A.C.V.; SERRAT, B.M.; FAVARETTO, N. & ANJOS, A. Atributos químicos de um Latossolo Bruno sob sistema de plantio direto em função da estratégia de adubação e do método de amostragem de solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 33:581-590, 2009.

SALDAÑA, A. & IBÁÑEZ, J.J. Pedodiversity, connectance and spatial variability of soil properties, what is the relationship? *Ecological Modeling*, 208:342–352. 2007.

SANCHEZ, R.B.; MARQUES JÚNIOR, J.; SOUZA, Z.M.; PEREIRA, G.T. & MARTINS FILHO, M.V. Variabilidade espacial de atributos do solo e de fatores de erosão em diferentes pedoformas. *Bragantia*, 68:1095-1103, 2009.

SOUZA, L.S.; COGO, N.P. & VIEIRA, S.R. Variabilidade de propriedades físicas e químicas do solo em um pomar cítrico. *R. Bras. Ci. Solo*, Viçosa, 21:367-372, 1997

SOUZA, C.K.; MARQUES JÚNIOR, J.; MARTINS FILHO, M.V. & PEREIRA, G.T. Influência do relevo e erosão na variabilidade espacial de um Latossolo em Jaboticabal (SP). *R. Bras. Ci. Solo*, 27:1067-1074, 2003.

SOUZA, Z.M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T. & BARBIERI, D.M. Smal. relief shape variation influence spatial variability of soil chemical attributes. *Sci. Agric.*, 63:161-168, 2006.

SILVA, M.A.G.; MUNIZ, A.S.; SENGIK, E.; MATA, J.D.V.; CARISSIMI, C. & CEGANA, A.C. Amostragem e variabilidade nos atributos de fertilidade em um Latossolo sob plantio direto em São Miguel do Iguaçú, Estado do Paraná. *Acta Scientiarum: Agronomy*, 25:243-248, 2003

SILVEIRA, P.M.; ZIMMERMANN, P.J.P.; SILVA, S.C. & CUNHA, A.A. Amostragem e variabilidade espacial de características químicas de um Latossolo submetido a diferentes sistemas de preparo. *Pesq. agrop. bras*, 35:2057-2064, 2000.

VIDAL-TORRADO, P.; LEPSCH, I.F.; CASTRO, S.S. Conceitos e aplicações das relações pedologia-geomorfologia em regiões tropicais úmidas. *Tópicos em Ciência do Solo*, 4:85-144, 2005.

VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H. & SCHAEFER, C.E.G.R., eds. *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1. p.1-54

WANG, Y.; FENG, N.; LI, T.; ZHANG XI, Z. & LIAO, G. Spatial variability of soil cation exchange capacity in Hilly tea plantation soils under different sampling scales. *Agricultural Sciences in China*. 7:96-103, 2008.

WEBSTER, R. & OLIVER, M.A., 1990. *Statistical Methods in Soil and Land Resource Survey*. Oxford University Press, Oxford.

WEINDORF, D.C. & ZHU, Y. Spatial variability of soil properties at Capulin volcano, New Mexico, USA: implications for sampling strategy. *Pedosphere*, 20:185-197, 2010.

ZHU, Q. & LIN, S. Comparing ordinary kriging and regression kriging for soil properties in contrasting landscapes. *Pedosphere* 20: 594–606. 2010.

2. VARIABILIDADE DOS ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DE SOLOS DA FORMAÇÃO GUABIROTUBA EM DIFERENTES UNIDADES DE AMOSTRAGEM

RESUMO

A amostragem do solo é uma importante etapa para caracterização dos atributos físicos e químicos de uma área e definir práticas de manejo e adubação. Para isso, usualmente é utilizada amostragem composta, que busca a representação da área através da homogeneização de amostras simples e, assim, a subdivisão da área em glebas homogêneas assume um importante papel. O objetivo deste trabalho foi avaliar a variabilidade dos atributos químicos (pH; Ca^{2+} ; Mg^{2+} ; Al^{3+} ; K; P; H; carbono orgânico) e físicos do solo (areia grossa, areia fina, silte e argila) em uma população de amostras em diferentes níveis de subdivisão das glebas e verificar a confiabilidade da amostragem composta da área. A área do estudo situa-se na Fazenda Experimental do Canguiri da Universidade Federal do Paraná, Curitiba (PR). A coleta das amostras foi realizada numa gleba de 12,88 ha, com espaçamento de 30 m, totalizando 135 amostras simples. Os dados obtidos foram analisados por medidas de dispersão e normalidade, tomando os seguintes níveis de subdivisão: i) área total (n=135); ii) compartimentos geomorfológicos: inferior (n=38), médio (n=60) e superior (n=37); iii) subdivisão dos compartimentos em unidades de mapeamento: inferior – 3 unidades, médio – 4 unidades, superior – 3 unidades. Os atributos que apresentaram maior variabilidade foram Al^{3+} , P, K^+ . Com maior subdivisão da área, os parâmetros estatísticos mostraram menor variação dos dados. Para o Al^{3+} , por exemplo, com a maior subdivisão os valores de amplitude (diferença percentual entre o valor mínimo e o valor máximo) passaram de 3.895% para 294%, mostrando a importância dos critérios utilizados na subdivisão das glebas. Em áreas com relevo mais acidentado, mesmo a coleta de amostra composta por compartimento ou por unidade de mapeamento não garantiu a homogeneidade da amostragem. A distribuição dos dados para maioria dos atributos em área total e em compartimentos geomorfológicos não seguiu a distribuição normal, restringindo o uso da amostragem composta nessas condições, ao contrário do observado quando a área foi subdivida em unidades de mapeamento.

Termos de indexação: amostragem composta, variabilidade amostral, coeficiente de variação, distribuição normal.

SUMMARY: VARIABILITY OF SOIL PHYSICAL AND CHEMICALS ATTRIBUTES OF GUABIROTUBA FORMATION IN DIFFERENT PLOT DIVISIONS

Soil sampling is an important step on physical and chemical characterization of soil and defines management and fertilization practices. For this, composite sampling is largely used; seeking to represent the area representation through the homogenization of single samples. Thus, area subdivision in homogeneous plots plays an important role. The aim of this study was evaluate the variability of soil chemical (pH; Ca²⁺; Mg²⁺; Al³⁺; K; P; H; organic carbon) and physical attributes (coarse sand, fine sand, silt and clay) in a sample set in different levels of area subdivision and verify the reliable of composite sample. The study area was located in the Canguiri Experimental Farm of Federal University of the Paraná, Curitiba (PR). Soil sampling was performed in an area of 12,88 ha; each sampling points was 30 m away from each other, resulting 135 simple samples. Data was analyzed by dispersion and normality parameters, using the following levels of detail: i) total area (n=135); ii) geomorphological compartments: bottom (n=38), medium (n=60), top (n=37); iii) compartment divisions on mapping units: bottom – 3 units, medium – 4 units, top – 3units. Al³⁺, P and K⁺ were the attributes that presented the higher variability. By increasing area subdivisions, the statistical parameters showed the lowers data variations. Al³⁺, for example, with high level of detail in division, the amplitude values (difference between higher and lower values in percentage) decreased from 3.895% to 294%, pointing out the importance of criteria used on plot divisions. In areas with higher slope, even the composite sampling collect by geomorphological compartment or mapping units do not guarantee the sampling quality. For most attributes on total area and geomorphological compartments, data distribution did not show a normal distribution, restricting the use of composite sampling in these conditions, but the opposite was observed when the area was subdivided into mapping units.

Index terms: *composite sampling, sample variability, coefficient of variation, normal distribution.*

2.1. INTRODUÇÃO

Vários estudos de amostragem têm sido conduzidos visando reduzir a variabilidade das características do solo: influência do instrumento de coleta (trado, pá de corte, etc) (Alvarez V. & Guarçoni M., 2003; Guarçoni et al. 2007; Oliveira et al., 2007); número de amostras simples necessárias para formar uma composta (Souza et al., 1997; Alvarez V. & Guarçoni M., 2003; Carvalho et al., 2002; Silva et al., 2003a; Oliveira et al., 2007; Amaro Filho et al., 2007; Brus & Noij, 2008; Weindorf & Zhu, 2010), efeito dos tratos culturais (Silveira et al., 2000; Guarçoni et al., 2007; Oliveira et al., 2007; Pauletti et al., 2009); interferência das pedoformas (Souza et al., 2003; Montanari et al., 2005; Souza et al., 2006; Sanchez et al., 2009); escalas de amostragem (Lin et al.,

2005; Wang et al., 2008). Contudo, nesses estudos, normalmente, não se consideram a variabilidade das amostras simples na composição da amostra composta e a forma como as glebas são definidas, o que pode comprometer a confiabilidade das análises e as práticas culturais.

Delimitar uma gleba homogênea é um passo importante para a amostragem dos solos e representatividade da área, devendo-se levar em conta a vegetação, posição topográfica, características do solo e histórico de utilização da área (Cantarutti et al., 1999; SBCS, 2004). Entretanto, a alta variabilidade do solo, mesmo em áreas com características aparentemente uniformes, dificulta a amostragem representativa (Silveira et al., 2000; Souza et al., 2003; Souza et al., 2006; Barbar & Melo, 2008; Zorzi et al., 2008), se tornando a maior fonte de incerteza dos resultados, maior até que o preparo, manuseio e a análise de laboratório (Lambkin et al., 2004). Solos originados da Formação Guabirotuba possuem naturalmente grande variabilidade nos seus atributos físicos, químicos e mineralógicos (Kraemer, 2007; Barbar & Melo, 2008) devendo-se ter maior cuidado na divisão de glebas para amostragem e caracterização da área.

A amostragem composta de solos tem como premissa que a média aritmética das amostras simples é similar ao valor da amostra composta (Oliveira et al., 2007), considerando, então, que os indivíduos que a compuseram tenham distribuição igual a normal e, nesse caso, a população pode ser representada pela média e pelo desvio padrão (Snedecor & Cochran, 1967). Guarçoni et al. (2007), Machado et al. (2007), Guedes Filho et al. (2010) e Silva et al. (2010) encontraram distribuição normal para a maioria dos atributos do solo, ao contrário de outros autores: Souza et al. (1997) apenas para o P e umidade gravimétrica; Silva & Chaves. (2001) somente para K; Souza et al. (1999) e Montezano et al. (2006) distribuição não normal para a maioria dos atributos do solo. Com a coleta de uma amostra composta torna-se impossível determinar a distribuição dos indivíduos. Caso a população não siga uma distribuição do tipo normal, a média (obtida das amostras simples ou o valor da amostra composta) não pode ser considerada a melhor medida de representação da população (Amaro Filho et al., 2007; Rosa Filho et al., 2009).

O coeficiente de variação (CV), obtido pela razão entre desvio padrão e a média dos dados, é uma importante ferramenta para a análise da dispersão dos dados por ser uma medida relativa ao valor médio da série, possibilitando comparar dados com unidades de medida e médias diferentes. Já o desvio padrão, que é uma medida de dispersão absoluta, é limitado na comparação de dados expressos em diferentes unidades. Segundo Warrick & Nielsen (1980) o CV para os atributos do solo, mesmo em áreas homogêneas, podem variar de 10% até mais de 1.000%, sendo elas classificadas em três níveis: baixa ($CV \leq 12\%$), média ($12\% < CV \leq 52\%$) e alta ($CV > 52\%$). Vanni (1998) colocou limites menos restritivos para esse parâmetro: $CV < 35\%$ - média representativa e série de dados homogêneos; CV entre 35% e 65% - série dados heterogênea e

média pouco significativa; e $CV > 65\%$ - série de dados muito heterogênea e média sem nenhum significado. Como exemplos de aplicação dos valores de CV, Montanari et al. (2005) e Souza et al.(2006) estudaram a influência das pedoformas na variabilidade dos atributos do solo e observaram que pedoformas côncavas necessitavam de maior número de amostras para representar sua variabilidade quando comparado com pedoformas retilíneas, ou seja, maior CV da primeira pedoforma. O P e o K foram os atributos com maiores variações nas pedoformas (maior CV), principalmente na camada superficial, reforçando os trabalhos de Souza et al. (1999), Carvalho et al. (2002), Alvares & Garçon (2003) e Silva et al.(2003a).

Este trabalho teve como objetivo avaliar a variabilidade dos atributos químicos (pH; Ca^{2+} ; Mg^{2+} ; Al^{3+} ; K; P; H; carbono orgânico) e físicos do solo (areia grossa, areia fina, silte e argila) em uma população de amostras em diferentes níveis de subdivisão das glebas e verificar a confiabilidade da amostragem composta da área.

2.2. MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo está situada na Fazenda Experimental do Cangüiri (CEEX), da Universidade Federal do Paraná (UFPR), no município de Pinhais, região metropolitana de Curitiba (PR), entre as coordenadas geográficas: $-25^{\circ}22'38''$ e $-25^{\circ}24'46''$ de latitude Sul, $-49^{\circ}09'05''$ e $-49^{\circ}06'40''$ de longitude Oeste, com altitude média de 920 m. O material de origem é a formação Guabirota, composto por argilito, seguindo-se de arcósios e depósitos rudáceos, além de pequenos horizontes de caliche (Salamuni & Stellfeld, 2001). Os solos derivados desse material são predominantemente Cambissolos Álicos, Latossolos Vermelho-Amarelos Álicos e Solos Orgânicos (Embrapa, 1984).

Foram coletadas 135 amostras simples da área de estudo em 12,88 ha. A coleta de amostras do horizonte A foi realizada por um trado mecânico com um tubo de PVC no seu interior, acoplado a tomada de potência de um trator. As amostras foram secas ao ar e passadas em peneira de 2 mm para a caracterização química (Embrapa, 1997): pH em água e em $KCl\ 1\ mol\ L^{-1}$; Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+} trocáveis ($KCl\ 1\ mol\ L^{-1}$); K^{+} trocável e P disponível (Mehlich 1); H – acidez potencial não trocável (acetato de $Ca\ 1\ mol\ L^{-1}$ pH 7,0); carbono orgânico (método espectrofotométrico). A textura foi determinada pelo método do densímetro e as frações areia grossa e fina por tamisamento (Embrapa, 1997).

Para análise da variabilidade dos atributos químicos e físicos do solo, a área total foi primeiramente subdividida em três glebas levando em consideração o relevo, o uso atual e histórico da área: compartimento superior, compartimento médio e compartimento inferior (Figura 1a).

Em um nível de maior subdivisão das glebas, foram utilizadas as 10 unidades de mapeamento, na escala 1:10.000, descritas por Kraemer (2007) (Figura 1b): Un1 – LATOSSOLO VERMELHO Distrófico húmico textura muito argilosa; Un2 – LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico húmico textura argilosa; Un3 – CAMBISSOLO HÚMICO Distrófico textura muito argilosa; Un4 – Associação CAMBISSOLO HÚMICO Distrófico latossólico textura argilosa + CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico textura argilosa; Un5 – Associação CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico latossólico textura argilosa + CAMBISSOLO HÚMICO Alumínico latossólico textura argilosa; Un6 – CAMBISSOLO HÚMICO Distrófico latossólico textura argilosa; Un7 – CAMBISSOLO HÚMICO Alumínico latossólico textura argilosa; Un8 – Associação CAMBISSOLO HÚMICO Distrófico latossólico textura argilosa + CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico latossólico textura argilosa; Un9 – CAMBISSOLO HÚMICO Distrófico latossólico textura argilosa e Un10 – CAMBISSOLO HÚMICO Distrófico latossólico textura argilosa. Devido à incompatibilidade dos limites das áreas das unidades e dos compartimentos (Figuras 1^a e 1b), algumas unidades se posicionaram em dois compartimentos simultaneamente. Por exemplo, no quadro 1, a unidade 7, mesmo apresentando pequena proporção de área no compartimento superior, foi incluída no compartimento médio.

O número de amostras para cada subdivisão foi diferente (Quadro 1), uma vez que o tamanho das áreas não foi igual (Figuras 1^a e 1b). Utilizando o programa Statistica for Windows (Statsoft, 2007) foram obtidos valores máximos, mínimos, média, coeficiente de variação, assimetria, curtose e Shapiro-Wilk. Utilizou-se a análise de correlação linear simples (Pearson) para verificar a relação de causa/efeito entre os atributos físicos e químicos dos solos na área total e em suas subdivisões.

Para analisar a distribuição dos dados foram calculados os coeficientes de assimetria, curtose e feito o teste de Shapiro-Wilk. Caso a distribuição dos dados siga o tipo normal, a coleta de uma amostra composta teria boa representatividade da área, caso contrário, a utilização da amostragem composta poderia incorrer em erro na estimativa dos valores para os atributos na área (Rosa Filho et al., 2009). A distribuição normal foi indicada quando os valores de coeficiente de assimetria e curtose foram zero e três respectivamente (Snedecor & Cochran, 1967), e o valor de p calculado no teste de Shapiro-Wilk for maior que 0,05.

Para análise da amplitude dos dados a mesma foi expressa em porcentagem, possibilitando a comparação entre atributos com diferentes unidades de medida como, por exemplo, Al³⁺ e CO. Para

o cálculo da amplitude dos dados em porcentagem, usou-se a expressão: $[(\text{máximo} / \text{mínimo}) - 1] \times 100$.

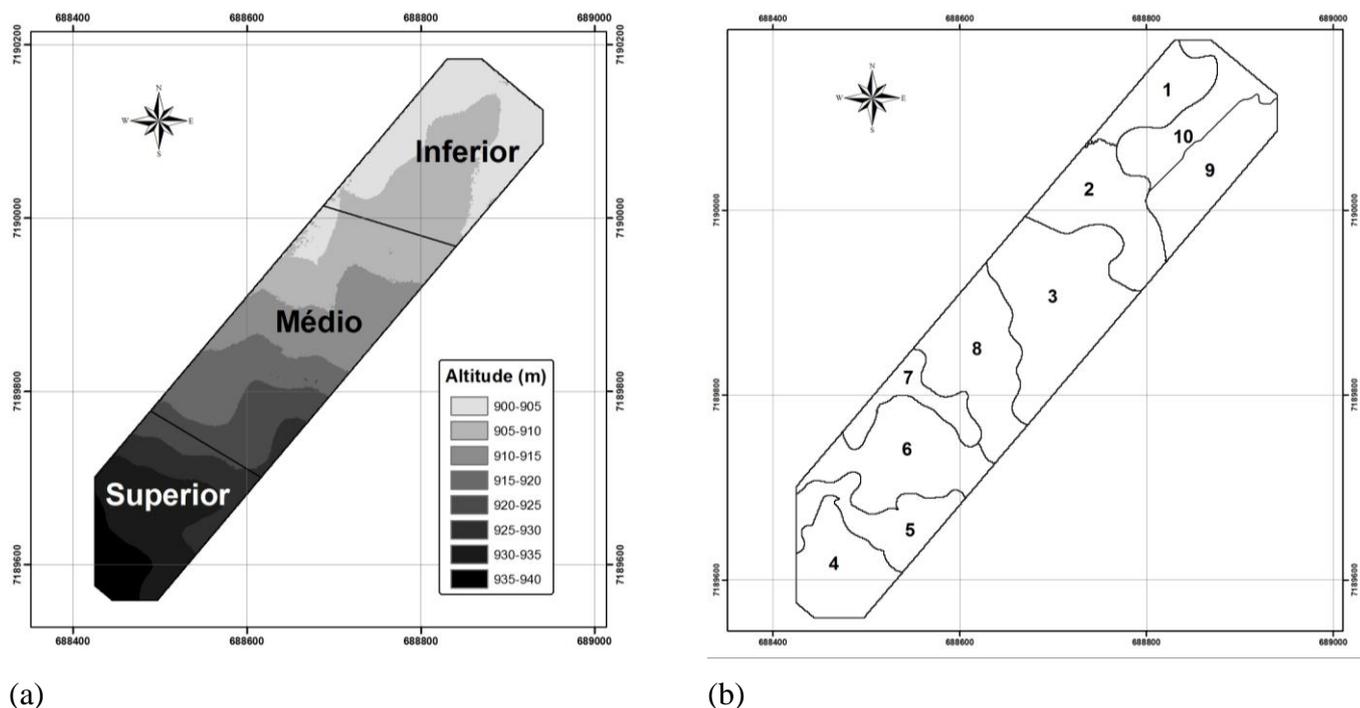


Figura 1. (a) Altitudes da área de estudo e subdivisões por geomorfologia e uso atual: Inferior, Médio e Superior. (b) Unidades de Mapeamento: 1 a 10, descritas por Kraemer (2007).

2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O Quadro 1 mostra os valores mínimo, máximo e a média obtidos para cada atributo nos diferentes compartimentos de amostragem, indicando também o número de amostras que compõem cada compartimento. O menor número de amostras observado foi para a unidade de mapeamento 1 (Un 1) com 8 amostras, o que segundo Oliveira et al. (2007) é suficiente para formar uma amostra composta.

A amplitude dos valores de cada atributo químico diminuiu à medida que a área total foi subdividida (Quadro 2). Tomando o carbono orgânico (CO) como exemplo, na área total ($n = 135$) a amplitude entre o maior e o menor valor foi de 565 %; nos compartimentos inferior, médio e superior foram de 485, 432 e 284 %, respectivamente. Em áreas mais homogêneas os valores de amplitude das unidades foram ainda inferiores aos observados para seu respectivo compartimento (inferior - entre 57 e 415%, médio - entre 51 e 350 %, superior - entre 49 e 284 %).

Quadro 1. Valores mínimos, máximos e a média das características físicas e químicas das amostras do horizonte A em cada subdivisão⁽¹⁾

		Total	Inf.	Un 1	Un 9	Un 10	Médio	Un 2	Un 3	Un 7	Un 8	Sup.	Un 4	Un 5	Un 6
Amostras (n)		135	38	8	13	10	60	15	25	11	13	37	13	14	13
pH_{água}	Mín.	5,1	5,1	5,1	5,2	5,3	5,1	5,3	5,2	5,1	5,3	5,1	5,3	5,1	5,2
	Máx.	6,4	6,3	5,8	6,3	5,8	6,3	6,3	6,2	6,0	6,0	6,4	6,2	5,8	6,4
	Méd.	5,6	5,5	5,5	5,5	5,5	5,6	5,6	5,7	5,5	5,7	5,5	5,7	5,4	5,5
pH_{KCl}	Mín.	4,1	4,4	4,4	4,4	4,6	4,1	4,4	4,1	4,2	4,4	4,1	4,5	4,1	4,2
	Máx.	5,6	5,6	5,1	5,6	5,2	5,5	5,2	5,1	5,0	5,5	5,3	5,3	5,0	4,9
	Méd.	4,7	4,8	4,8	4,7	4,8	4,7	4,7	4,6	4,5	4,8	4,6	4,8	4,5	4,5
Al³⁺ (cmol _c dm ⁻³)	Mín.	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,11	0,10	0,11	0,12	0,10	0,10	0,11	0,13
	Máx.	4,05	1,37	0,88	1,37	0,40	3,67	1,09	2,05	3,67	1,18	4,05	1,37	2,94	4,05
	Méd.	0,66	0,42	0,27	0,56	0,22	0,49	0,58	0,37	1,16	0,41	1,18	0,41	1,09	1,63
Ca²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	Mín.	1,09	3,03	3,33	3,07	3,75	1,61	3,03	2,69	1,61	4,15	1,09	2,73	1,22	1,09
	Máx.	11,05	11,05	6,84	7,54	11,05	8,70	9,05	8,70	6,33	7,70	7,51	7,33	7,51	6,80
	Méd.	5,17	5,66	5,23	5,45	6,08	5,59	5,99	5,76	4,20	5,68	4,00	5,32	3,93	3,61
Mg²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	Mín.	0,41	0,68	1,58	0,68	2,18	1,15	1,63	1,33	1,15	1,78	0,41	1,76	0,94	0,41
	Máx.	4,67	4,67	4,28	4,11	4,67	4,52	4,36	4,52	4,05	4,21	4,12	3,39	4,12	4,00
	Méd.	2,71	2,97	3,01	2,62	3,30	2,91	3,06	2,91	2,61	2,73	2,10	2,48	2,33	2,05
K⁺ (cmol _c dm ⁻³)	Mín.	0,02	0,05	0,08	0,05	0,06	0,02	0,04	0,02	0,06	0,07	0,04	0,05	0,04	0,04
	Máx.	0,66	0,60	0,35	0,60	0,22	0,66	0,36	0,66	0,39	0,64	0,55	0,41	0,55	0,29
	Méd.	0,18	0,15	0,15	0,17	0,11	0,20	0,18	0,25	0,15	0,18	0,17	0,17	0,19	0,13
P (mg dm ⁻³)	Mín.	0,29	0,29	0,29	1,93	1,23	0,41	1,97	0,41	1,11	1,62	0,45	0,83	0,45	0,63
	Máx.	36,87	8,61	8,61	6,90	5,15	36,87	6,92	17,64	7,49	36,87	9,36	3,18	9,36	5,98
	Méd.	3,80	3,28	2,87	3,87	2,76	4,83	3,82	5,11	3,07	6,33	2,65	2,05	3,76	2,41
H (cmol _c dm ⁻³)	Mín.	3,30	3,66	3,66	5,52	5,66	4,03	4,74	5,28	4,71	4,03	3,30	3,30	5,20	5,02
	Máx.	14,72	11,44	7,89	10,93	8,69	11,81	11,44	11,81	9,47	9,15	14,72	12,05	14,72	8,97
	Méd.	7,39	7,23	5,75	8,11	7,15	7,32	7,92	7,59	7,57	6,29	7,66	7,04	8,14	7,36
CO (g dm ⁻³)	Mín.	8,25	8,25	24,73	30,77	8,25	8,90	29,94	26,09	8,90	26,99	14,28	14,28	25,20	27,70
	Máx.	54,86	48,29	38,81	48,29	42,50	47,31	45,35	47,31	40,08	44,69	54,86	54,86	51,75	41,22
	Méd.	35,59	35,69	31,69	38,00	34,71	35,40	37,79	37,06	31,53	34,25	35,80	35,37	37,53	33,79
Argila (g kg ⁻¹)	Mín.	260	353	541	458	390	335	522	399	410	372	260	363	260	425
	Máx.	670	597	605	598	587	607	639	634	586	657	670	523	558	670
	Méd.	518	436	583	543	509	470	584	534	482	496	504	444	487	515
Silte (g kg ⁻¹)	Mín.	325	390	386	393	400	372	353	355	402	335	325	466	433	325
	Máx.	716	639	449	529	597	657	469	589	580	607	716	616	716	558
	Méd.	470	552	406	446	477	519	406	456	505	491	483	541	500	472
AF (g kg ⁻¹)	Mín.	2	3	6	4	7	2	3	2	6	5	3	4	5	3
	Máx.	14	10	9	8	10	11	7	8	9	11	14	14	11	11
	Méd.	7	7	7	7	8	6	5	5	7	7	9	10	8	7
AG (g kg ⁻¹)	Mín.	2	3	4	3	4	2	3	2	4	3	2	3	2	3
	Máx.	14	9	5	6	9	14	8	11	9	14	13	8	13	12
	Méd.	5	5	4	5	5	5	4	5	6	7	5	5	5	6
AT (g kg ⁻¹)	Mín.	6	8	10	8	12	6	7	6	10	7	6	7	9	6
	Máx.	24	19	15	14	19	21	12	17	17	21	24	23	24	18
	Méd.	12	12	11	11	14	11	10	10	13	14	14	15	13	13

⁽¹⁾ A localização da área e a hierarquia das subdivisões são apresentadas nas figuras 1a e 1b. Total – área total subdividida no compartimento inferior, médio e superior. Inf. – compartimento inferior subdividido nas unidades de mapeamento 1, 9 e 10. Médio – compartimento médio subdividido nas unidades de mapeamento 2, 3, 7 e 8. Sup. – compartimento superior subdividido nas unidades de mapeamento 4, 5 e 6. AF – areia fina; AG – areia grossa; AT – areia total. O número de amostras para as unidades de mapeamento diferem do número total do compartimento devido a incompatibilidade dos limites das áreas das unidades e dos compartimentos, assim algumas unidades se posicionaram em dois compartimentos simultaneamente.

O compartimento superior, em relação aos demais, apresentou maiores valores de amplitude e de coeficiente de variação para a grande maioria dos atributos (Quadros 2 e 3). O relevo ondulado predominante nesse compartimento permitiu a formação de microrelevos (observações de campo) com curvaturas côncavas e convexas com drenagens diferenciadas, as quais, provavelmente, ampliaram as variações dos atributos e dificultaram a representatividade da área mesmo com a amostragem composta. A declividade média do compartimento superior, médio e inferior foi de 11; 9 e 7 %, respectivamente. No corte apresentado na figura 2 a variação altimétrica total do compartimento médio foi de 12 m e do compartimento superior de 20 m.

O perfil altimétrico da área total *versus* o teor de CO ilustra o efeito da forma do terreno (curvaturas) nos valores dos atributos (Figura 2). Nas unidades 2 e 10, com relevo mais plano, verificou-se maior homogeneidade nos teores de CO. Nos compartimentos médio e superior os menores teores de CO no horizonte A foram observados nas posições convexas do relevo e o maior acúmulo de água nas posições côncavas induziram o acúmulo de matéria orgânica. Mesmo na unidade 3 do compartimento médio, que apresenta relevo suave ondulado, o encaixe de pequenas linhas de drenagem promoveu aumento nos teores de CO nas superfícies côncavas (Figura 2). Normalmente essa pequena diferença no relevo não seria discriminada pela amostragem composta convencional, o que poderia ocorrer em erro na recomendação de adubação nitrogenada, quando a mesma é baseada nos níveis de CO.

As áreas que apresentaram maior e menor amplitude de valores não foram as mesmas para todos os atributos (Quadro 2) indicando que, além do fator relevo, as variações intrínsecas de cada atributo foram importantes. Para área total o atributo com maior amplitude foi o P (12.651%) seguido de K^+ (3.978%) e de Al^{3+} (3.895%). A grande amplitude entre o valor máximo (36,87 mg dm^{-3}) e o mínimo (0,29 mg dm^{-3}) para P na área total foi decorrente, possivelmente, de concentração de dejetos bovinos (não mais visíveis no momento da coleta), uma vez que os solos originados do argilito da Formação Guabirota são muito pobres nesse nutriente, com teores naturais próximos a zero (Mazza et al., 2009). Na unidade 8 a anomalia no teor de P em um ponto de amostragem (36,87 mg dm^{-3} – Quadro 1) pode comprometer a representatividade do compartimento médio (amostragem em áreas mais restritas e homogêneas geomorfologicamente); o valor de CV na unidade 8 e no compartimento médio foram superiores ao CV da área total (Quadro 3), ou seja, nesse caso, quanto maior a área e o número de amostras, maior a diluição dessas anomalias. Uma vez que a campo, na tomada de amostras simples para formar uma composta, não há como identificar se uma amostra possui valor anômalo, a utilização da média é comprometida nesses casos.

Os teores máximos de K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} na unidade 8 ficaram próximos aos observados nas demais unidades, o que confirma o enriquecimento anômalo apenas de P em um dos pontos de amostragem dessa unidade (Quadro 1).

No gráfico de normalidade de P (Figura 3a) o teor máximo da unidade 8 se distanciou dos demais pontos de amostragem. Esse teor anômalo de P também contribuiu para tornar a distribuição das frequências dos dados da área total distante da distribuição normal (Figura 3b) e elevados valores de assimetria (Quadro 4) e de curtose (Quadro 5). No compartimento inferior a distribuição das frequências se aproximou da distribuição normal (Figuras 4a e 4b), o que determinou valores de assimetria e curtose próximos a zero (Quadros 4 e 5). O valor positivo de assimetria para esse compartimento refletiu a maior concentração das observações abaixo do valor médio: maior número de observações à esquerda do gráfico da distribuição normal (Figura 4b).

A maioria dos atributos, principalmente para compartimento inferior, apresentou coeficiente de assimetria (Quadro 4) e de curtose (Quadro 5) mais distantes de zero valor característico da distribuição normal. Assim, uma média aritmética não seria a medida mais adequada para representação desses atributos (Rosa Filho, 2009), ao contrário do que normalmente é realizado em amostragens composta para adubação e calagem (Oliveira et al., 2007). Para o Mg^{2+} a distribuição das frequências dos dados ficou muito próxima da distribuição normal independentes do nível de detalhamento da amostragem.

Seguindo a mesma tendência da amplitude, os valores de CV máximo e mínimo para cada atributo dentro dos compartimentos não ocorreram nas mesmas unidades de mapeamento. Na área total o Al^{3+} apresentou o maior CV (117%), seguido de P (99%) e de K^+ (78%), semelhante às observações de Alvarez V. & Garçon M. (2003), Silva et al. (2003a), Silva et al. (2003b) e Gomes et al. (2008). Uma particularidade observada por esse método de análise é que conforme as áreas foram subdivididas, alguns compartimentos apresentam valor maior que da área total. Por exemplo, o K^+ apresenta CV de 78% para a área total e 80 % para o compartimento médio. Dentre as unidades de mapeamento do compartimento médio, a unidade 8 possui CV de 96 % e as demais unidades tiveram CV menores que do compartimento. Com o elevado CV para K^+ no nível de maior subdivisão (unidade 8), mesmo a amostragem mais detalhada dessa gleba, não garante boa representatividade da área.

Os coeficientes de correlação (r) na área total foram negativos entre Al^{3+} e Ca (-0,71) e Al^{3+} e Mg^{2+} (-0,70) e positivo entre Ca^{2+} e Mg^{2+} (0,82) (Quadro 6). Dentre os compartimentos, o que apresentou maiores coeficientes de correlação para esses atributos foi o superior, sendo que os outros dois compartimentos apresentaram valores de r menores que da área total para a maioria dos atributos (Quadros 7 e 8).

Os coeficientes de correlação altos e negativos Al^{3+} e pH em KCl (Quadros 7 e 8) indicam que horizontes superficiais mais intemperizados (maior pH KCl) tendem a apresentar menor CTC e maior possibilidade de estabilização do Al na estrutura de óxidos secundários (gibbsita) (Silva et al., 2008; Motta & Melo, 2009). No compartimento inferior, com solos mais desenvolvidos, apesar dos altos valores de amplitude e dos coeficientes de variação (Quadros 2 e 3), os teores máximos de Al^{3+} foram inferiores aos observados nos demais compartimentos (Quadro 1), o que confirma a relação negativa entre grau de intemperismo e acidez potencial trocável do solo (Bohn et al., 1979; Motta & Melo, 2009). Por estar em uma área de preservação ambiental (APA do rio Iraí) não se usa insumos agrícolas na Fazenda Experimental da UFPR, o que descarta a possível relação inversa entre teores de Al^{3+} e correção dos solos.

A areia fina e areia grossa na área total foram os atributos físicos do solo que apresentaram maior variabilidade (Quadro 2), com amplitudes de valores de 639 e 555 %, respectivamente. Dentre as unidades de mapeamento, a unidade 5 apresentou os maiores valores de amplitude e coeficiente de variação para areia grossa (Quadros 2 e 3). As diferentes declividades da área também influenciaram na variabilidade dos atributos físicos, sendo que as menores amplitudes e CV foram observadas no compartimento inferior. A argila não apresentou grande variabilidade, com coeficiente de assimetria negativo (Quadro 4), comportamento também observado por Montezano et al. (2006). O teor máximo de argila foi de 670 g kg^{-1} (Quadro 1), compatível com rocha de origem. Mesmo sendo um dos atributos mais estáveis do solo, apresentando CV na faixa de média variabilidade (Vieira et al., 2007), localmente, na Formação Guabirota, verificam-se lentes de arenito Arcósio (Salamuni & Stellfeld, 2001), o que pode resultar em maiores teores de areia no solo.

Os coeficientes de assimetria e curtose para os atributos físicos, em sua maioria, não apresentaram distribuição similar à normal, porém mostraram menor variabilidade quando comparado com os atributos químicos da mesma área. As frações granulométricas são os atributos mais estáveis do solo, sendo sua variabilidade devida à variação natural do solo (Montezano et al., 2006; Vieira et al., 2007), apresentando CV na faixa de média variabilidade.

Quadro 2. Amplitude dos atributos, em porcentagem, na Área Total (Total) e compartimentos Inferior (composto pelas unidades de mapeamento 1, 9 e 10), Médio (composto pelas unidades 2, 3, 7 e 8) e Superior (composto pelas unidades 4, 5 e 6)⁽¹⁾

	Total	Inf.	Un 1	Un 9	Un 10	Médio	Un 2	Un 3	Un 7	Un 8	Sup.	Un 4	Un 5	Un 6
pH_{água}	26	25	15	23**	10*	23 ⁺	20**	19	18	15*	26 ⁺⁺	17	15*	22**
pH_{KCl}	37	27 ⁺	17	27**	13*	35 ⁺⁺	20	25	19*	26**	28	19	21**	18*
Al³⁺	3.895	1.256 ⁺	756	1.236**	294*	1.905	902	1.905	3.246**	881*	3.877 ⁺⁺	1246*	2.603	3.061**
Ca²⁺	912	265	105*	146	195**	223 ⁺	199	223	293**	86*	587 ⁺⁺	169*	517	523**
Mg²⁺	1.051	585	170	503**	114*	241 ⁺	168	241	253**	137*	916 ⁺⁺	93*	338	888**
K⁺	3.978	1.056 ⁺	340	1.056**	261*	3.978 ⁺⁺	743	3.978**	547*	870	1.226	647	1.226**	586*
P	12.651	2.877	2.877**	258*	320	8.882 ⁺⁺	250*	4.197**	577	2.174	1.995 ⁺	284*	1.995**	854
H⁺	346	199	115**	98	54*	193 ⁺	141**	124	101*	127	346 ⁺⁺	265**	183	79*
CO	565	485 ⁺⁺	57*	57	415**	432	51*	81	350**	66	284 ⁺	284**	105	49*
Argila	157	58 ⁺	12*	31	51**	77	22*	59	43	77**	157 ⁺⁺	44*	114**	58
Silte	121	61 ⁺	16*	35	49**	81	33*	66	44	81**	121 ⁺⁺	32*	65	72**
AF	639	230 ⁺	48	93**	41*	456 ⁺⁺	122	339**	44*	123	323	274**	101*	221
AG	555	198 ⁺	49*	95	136**	487	143	343	130*	450**	518 ⁺⁺	143*	518**	361
AT	307	134 ⁺	48*	64	65**	239	72	168	69*	186**	307 ⁺⁺	207	166*	213**

⁽¹⁾ *Menores valores dentro das unidades de mapeamento que compõe o compartimento; ** Maiores valores dentro das unidades de mapeamento que compõe o compartimento; ⁺Menor valor do compartimento que compõe a área total; ⁺⁺ Maior valor dentro do compartimento que compõe a área total. Un1 – LATOSSOLO VERMELHO Distrófico húmico textura muito argilosa; Un2 – LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico húmico textura argilosa; Un3 – CAMBISSOLO HÚMICO Distrófico textura muito argilosa; Un4 – Associação CAMBISSOLO HÚMICO Distrófico latossólico textura argilosa + CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico textura argilosa; Un5 – Associação CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico latossólico textura argilosa + CAMBISSOLO HÚMICO Alumínico latossólico textura argilosa; Un6 – CAMBISSOLO HÚMICO Distrófico latossólico textura argilosa; Un7 – CAMBISSOLO HÚMICO Alumínico latossólico textura argilosa; Un8 – Associação CAMBISSOLO HÚMICO Distrófico latossólico textura argilosa + CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico latossólico textura argilosa; Un9 – CAMBISSOLO HÚMICO Distrófico latossólico textura argilosa; Un10 – CAMBISSOLO HÚMICO Distrófico latossólico textura argilosa.

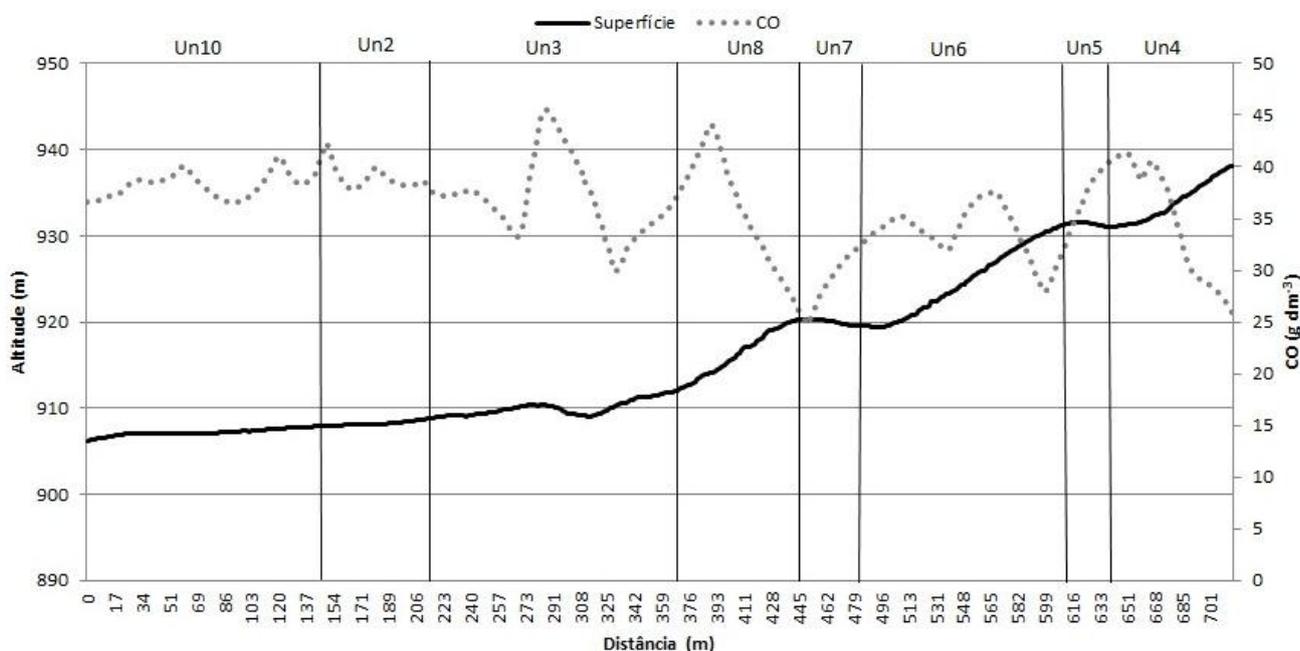
Quadro 3. Coeficiente de variação dos atributos em área total (Total), compartimentos inferior (composto pelas unidades de mapeamento 1, 9 e 10), médio (composto pelas unidades 2, 3, 7 e 8) e superior (composto pelas unidades 4, 5 e 6)⁽¹⁾

	Total	Inf.	Un 1	Un 9	Un 10	Médio	Un 2	Un 3	Un 7	Un 8	Sup.	Un 4	Un 5	Un 6
pH_{água}	5	4⁺	4	6**	3*	4⁺	4	3*	5**	4	5⁺⁺	4*	5	6**
pH_{KCl}	6	5⁺	5	4**	4*	5⁺	5	4*	5	6**	7⁺⁺	4*	5	6**
Al³⁺	117	89	94**	80	49*	83⁺	56*	108**	99	81	92⁺⁺	91**	80*	82
Ca²⁺	35	31	24*	25	39**	24⁺	27*	28	37**	20	49⁺⁺	25*	48	55**
Mg²⁺	34	31	30	35**	26*	23⁺	27	25	37**	24*	46⁺⁺	18*	42	68**
K⁺	78	71⁺	59	84**	46*	80⁺⁺	54*	74	71	96**	74	77	84**	56*
P	99	59⁺	98**	48	44*	105⁺⁺	44**	71	68	148**	69	40*	58	67**
H⁺	25	24⁺	25	22**	12*	24⁺	29**	21	18*	25	26⁺⁺	31**	29	16*
CO	20	20	16	13*	29**	19⁺	13*	17	29**	17	21⁺⁺	29**	19	12*
Argila	13	9⁺	4*	7	12**	13	6*	13	10	15**	14⁺⁺	11*	15**	13
Silte	14	11⁺	6*	8	13**	15⁺⁺	8*	14	10	15**	13	9*	13	14**
AF	29	21⁺	15	21**	10*	24	23	25**	13*	21	28⁺⁺	29**	21*	28
AG	42	22⁺	13*	16	27**	47⁺⁺	24**	36	27	60**	45	29*	65**	44
AT	28	17⁺	13*	16**	15	28	15*	23	14	32**	31⁺⁺	28	34**	27*

⁽¹⁾ *Menores valores dentro das unidades de mapeamento que compõe o compartimento; ** Maiores valores dentro das unidades de mapeamento que compõe o compartimento; ⁺Menor valor do compartimento que compõe a área total; ⁺⁺ Maior valor dentro do compartimento que compõe a área total.

Quadro 4. Coeficiente de assimetria dos atributos dentro de cada compartimento

	Total	Inf.	Un 1	Un 9	Un 10	Médio	Un 2	Un 3	Un 7	Un 8	Sup.	Un 4	Un 5	Un 6
pH _{água}	0,69	1,13	-0,87	2,16	0,27	0,62	2,02	0,06	0,60	0,07	0,95	0,71	-0,41	1,95
pH _{KCl}	0,34	0,85	-0,63	2,10	0,22	0,48	0,52	-0,50	0,38	0,94	0,46	0,44	-0,64	0,69
Al ³⁺	2,32	1,62	2,32	0,77	0,08	1,89	0,41	3,53	1,28	1,66	0,93	1,65	0,50	0,49
Ca ²⁺	-0,03	0,92	-0,24	-0,19	1,37	0,17	-0,12	-0,05	-0,51	-0,09	0,18	-0,50	-0,52	0,16
Mg ²⁺	-0,26	-0,32	-0,18	-0,42	0,35	0,20	0,01	-0,09	-0,24	0,83	0,20	0,55	-0,66	0,30
K ⁺	1,66	2,66	2,09	2,46	1,44	1,45	0,20	0,91	1,34	2,14	1,29	0,84	1,38	1,30
P	5,71	1,03	1,53	0,31	0,88	4,83	0,72	2,16	1,38	3,33	1,59	0,16	2,46	1,28
H ⁺	0,66	0,20	-0,21	0,12	0,14	0,53	-0,01	0,89	-0,84	0,81	1,02	0,68	4,40	-0,60
CO	-0,69	-1,72	0,30	0,47	-2,45	-0,71	-0,10	0,25	-1,69	0,80	0,05	-0,02	-0,03	0,54
Silte	0,57	1,44	1,14	0,94	1,16	0,35	0,13	0,89	-0,55	-0,26	0,44	0,12	7,81	-0,91
Argila	-0,59	-1,39	-1,04	-0,88	-1,12	-0,35	-0,08	-0,88	0,58	0,22	-0,48	-0,17	7,87	0,95
AF	0,80	-0,44	2,47	-0,31	1,85	0,36	-0,12	0,17	0,30	1,20	0,36	-0,34	-0,73	0,18
AG	1,98	1,98	-0,01	-0,09	2,16	1,79	2,22	1,82	0,64	0,89	1,81	0,70	3,98	1,25
AT	1,01	1,13	1,89	-0,25	2,63	0,96	-0,21	0,78	0,83	0,37	0,68	0,05	1,99	-0,11

**Figura 1.** Perfil altimétrico da área (superfície), com a distância horizontal do perfil, unidade de mapeamento e teor de carbono em g dm^{-3} . Compartimento inferior – unidades 2 e 10; compartimento médio – unidades 2, 3, 7 e 8; compartimento superior – unidade 4, 5 e 6.

Os teste de Shapiro-Wilk indicou que na área total, apenas pH_{KCl} , Ca^{2+} e Mg^{2+} tiveram distribuição similar a normal (Quadro 6). Para o Al^{3+} observou-se distribuição normal apenas nas unidades Un2 e Un6, para o P nas unidades Un10, Un4 e Un5 e para K^{+} apenas na unidade Un2. De maneira geral, as unidades de mapeamento tiveram distribuição mais próxima da normal, com destaque para a Un4, que apresentou 12 dos 14 atributos estudados nessa condição.

Quadro 5. Coeficiente de curtose dos atributos dentro de cada compartimento.

	Total	Inf.	Un 1	Un 9	Un 10	Médio	Un 2	Un 3	Un 7	Un 8	Sup.	Un 4	Un 5	Un 6
pH_{água}	1,03	4,07	0,21	5,63	1,71	0,70	5,94	0,93	1,49	-0,34	1,20	1,06	-0,41	4,71
pH_{KCl}	0,33	1,62	-0,02	5,78	-0,63	1,11	-0,96	1,12	-0,12	1,84	-0,79	0,11	-0,64	-1,29
Al³⁺	5,60	1,77	5,84	-0,89	-1,62	4,24	-1,12	14,57	0,88	1,71	-0,19	2,68	0,50	-0,93
Ca²⁺	0,29	1,54	-0,97	-0,61	1,17	-0,34	-0,33	-0,47	-0,78	-0,91	-1,21	-0,20	-0,52	-1,67
Mg²⁺	-0,19	-0,12	-0,50	0,34	-1,18	-0,17	-0,93	0,47	-0,80	1,15	-0,65	0,43	-0,66	-1,81
K⁺	2,42	9,59	4,80	7,28	1,23	1,39	-1,20	-0,30	1,15	4,29	1,00	-1,07	1,38	1,03
P	45,96	0,61	1,80	-1,58	0,37	28,82	-1,17	5,71	0,95	11,51	3,05	-1,45	2,46	0,90
H⁺	1,37	-0,09	-0,64	-0,97	0,00	-0,09	-1,22	0,69	0,70	0,06	3,56	1,53	4,40	-0,09
CO	2,73	5,34	-0,65	0,45	6,48	2,85	-1,50	-0,82	3,07	-0,13	1,50	1,08	-0,03	-0,54
Silte	0,45	2,65	0,34	1,50	0,69	-0,67	-0,91	-0,11	0,71	0,72	2,82	-0,95	7,81	1,12
Argila	0,55	2,45	-0,15	1,29	0,66	-0,66	-0,96	-0,15	0,69	0,66	2,87	-0,89	7,87	1,25
AF	1,58	0,45	6,46	-1,23	4,41	1,28	-1,23	1,69	-1,36	3,02	0,61	0,30	-0,73	0,29
AG	4,73	6,21	-0,55	1,00	5,72	3,09	6,55	5,33	0,42	-0,69	4,45	-0,26	3,98	1,18
AT	1,23	3,87	4,31	-1,26	7,75	0,60	-0,97	0,84	0,91	-1,04	0,18	-0,21	1,99	-0,20

Quadro 6. Valores de *p* para o teste de normalidade Shapiro-Wilk⁽¹⁾

	Total	Inf.	Un 1	Un 9	Un 10	Médio	Un 2	Un 3	Un 7	Un 8	Sup.	Un 4	Un 5	Un 6
pH_{água}	0,00	0,01	0,63*	0,00	0,34*	0,42*	0,00	0,93*	0,40*	0,89*	0,05	0,68*	0,70*	0,01
pH_{KCl}	0,14*	0,09	0,75*	0,00	0,91*	0,53*	0,18*	0,32*	0,89*	0,25*	0,06	0,90*	0,41*	0,02
Al³⁺	0,00	0,00	0,00	0,04	0,06	0,00	0,21*	0,00	0,04	0,00	0,00	0,01	0,07	0,19*
Ca²⁺	0,18*	0,04	0,69*	0,95*	0,05	0,89*	0,72*	0,83*	0,21*	0,20*	0,05	0,64*	0,59*	0,11*
Mg²⁺	0,18*	0,85*	0,89*	0,99*	0,60*	0,56*	0,82*	0,69*	0,36*	0,74*	0,38*	0,64*	0,58*	0,04
K⁺	0,00	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00	0,33*	0,01	0,02	0,00	0,00	0,01	0,00	0,04
P	0,00	0,00	0,03	0,04	0,44*	0,00	0,02	0,00	0,02	0,00	0,00	0,24*	0,21*	0,03
H⁺	0,02	0,83*	0,82*	0,65*	1,00*	0,39*	0,31*	0,20*	0,67*	0,20*	0,01	0,68*	0,02	0,71*
CO	0,00	0,00	0,89*	0,87*	0,00	0,01	0,17*	0,37*	0,02	0,18*	0,31*	0,89*	0,93*	0,41*
Silte	0,02	0,00	0,09	0,28*	0,06	0,16*	0,73*	0,01	0,80*	0,71*	0,05	0,87*	0,00	0,14*
Argila	0,02	0,00	0,11	0,37*	0,07	0,17*	0,78*	0,01	0,77*	0,70*	0,04	0,76*	0,00	0,12*
AF	0,00	0,74*	0,00	0,32*	0,03	0,21*	0,21*	0,03	0,27*	0,17*	0,35*	0,43*	0,87*	1,00*
AG	0,00	0,00	0,79*	0,20*	0,01	0,00	0,00	0,00	0,21*	0,02	0,00	0,37*	0,00	0,07
AT	0,00	0,02	0,03	0,42*	0,00	0,01	0,68*	0,31*	0,45*	0,65*	0,20*	0,96*	0,01	0,88*

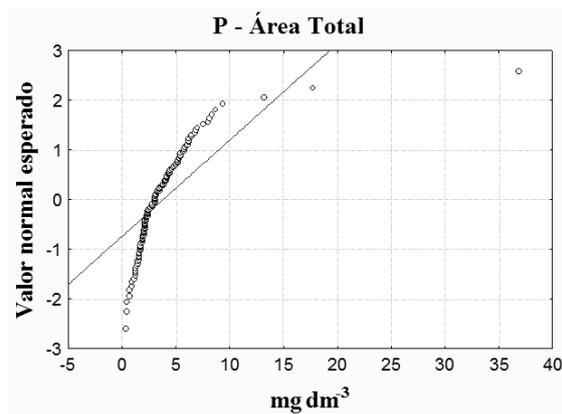
⁽¹⁾ * - atributos com distribuição normal a 5% de probabilidade.**Quadro 7.** Matriz de correlação dos atributos em área total (n=135)⁽¹⁾

	pH _{água}	pH _{KCl}	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	P	H ⁺	CO	Silte	Argila	AF	AG
pH_{KCl}	0,65**												
Al³⁺	-0,51**	-0,70**											
Ca²⁺	0,51**	0,65**	-0,71**										
Mg²⁺	0,49**	0,64**	-0,70**	0,82**									
K⁺	0,19*	0,14	-0,10	0,10	0,06								
P	0,12	0,26**	-0,17	0,26**	0,12	0,50**							
H⁺	-0,50**	-0,63**	0,46**	-0,31**	-0,32**	-0,04	-0,04						
CO	-0,13	-0,07	0,04	0,24**	0,16	0,15	0,13	0,50**					
Silte	0,15	0,06	-0,03	-0,03	-0,03	-0,08	-0,05	-0,01	-0,09				
Argila	-0,15	-0,07	0,04	0,03	0,04	0,08	0,05	0,02	0,10	-1,00**			
AF	0,02	0,14	-0,02	-0,14	-0,22*	-0,13	-0,17*	-0,14	-0,18*	0,50**	-0,52**		
AG	0,14	0,25**	-0,11	0,00	-0,07	0,00	0,17	-0,23**	-0,15	0,48**	-0,50**	0,30**	
AT	0,10	0,24**	-0,08	-0,08	-0,18*	-0,08	0,00	-0,23**	-0,21*	0,61**	-0,64**	0,80**	0,82*

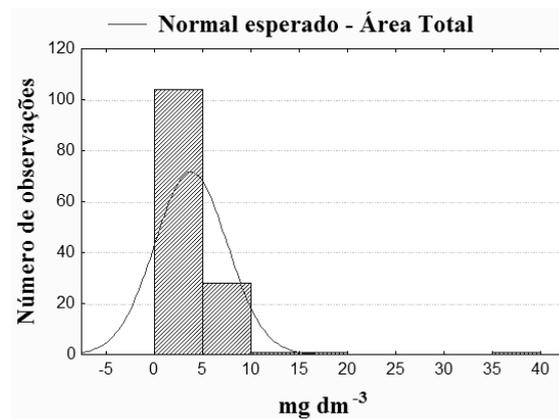
⁽¹⁾ * e ** - coeficientes de correlação significativos aos níveis de 5 e 1 % de probabilidade, respectivamente, pelo teste t.

Quadro 8. Matriz de correlação dos atributos no compartimento inferior, médio e superior⁽¹⁾

	pH _{água}	pH _{KCl}	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	P	H ⁺	CO	Silte	Argila	AF	AG
Inferior													
pH _{KCl}	0,77 **												
Al ³⁺	-0,46**	-0,67**											
Ca ²⁺	0,58**	0,55**	-0,44**										
Mg ²⁺	0,63**	0,65**	-0,51**	0,72**									
K ⁺	0,10	0,21	-0,33	0,23	0,24								
P	0,21	0,18	-0,17	0,34*	0,24	0,65**							
H ⁺	-0,31	-0,63**	0,50**	-0,17	-0,22	-0,24	0,07						
CO	0,09	0,17	-0,13	0,53**	0,36*	0,19	0,41*	0,32					
Silte	0,14	0,05	-0,17	0,14	0,08	0,03	0,25	0,23	0,05				
Argila	-0,14	-0,05	0,18	-0,14	-0,08	-0,02	-0,25	-0,23	-0,05	-1,00**			
AF	-0,06	0,10	-0,31	-0,05	-0,10	-0,16	0,01	0,06	-0,02	0,43**	-0,46**		
AG	-0,10	-0,04	-0,12	0,12	0,09	-0,23	-0,16	0,09	0,16	0,17	-0,19	0,26	
AT	-0,10	0,05	-0,28	0,03	-0,03	-0,24	-0,08	0,09	0,07	0,40*	-0,43**	0,86**	0,72**
Médio													
pH _{KCl}	0,58**												
Al ³⁺	-0,58**	-0,62**											
Ca ²⁺	0,42**	0,50**	-0,58**										
Mg ²⁺	0,36**	0,44**	-0,54**	0,73**									
K ⁺	0,43**	0,29*	-0,27*	0,13	0,07								
P	0,18	0,42**	-0,21	0,24	-0,04	0,52**							
H ⁺	-0,50**	-0,65**	0,54**	-0,29*	-0,27*	-0,05	-0,09						
CO	-0,05	-0,09	-0,02	0,25*	0,18	0,14	0,08	0,42**					
Silte	0,15	0,06	-0,14	0,01	0,13	-0,21	-0,04	-0,24	-0,26*				
Argila	-0,15	-0,08	0,14	-0,01	-0,12	0,21	0,03	0,26*	0,27*	-1,00**			
AF	0,07	0,08	-0,18	-0,09	-0,12	-0,20	-0,09	-0,24	-0,21	0,37**	-0,39**		
AG	0,11	0,38**	-0,19	-0,04	-0,10	-0,03	0,25*	-0,55**	-0,34**	0,53**	-0,56**	0,30*	
AT	0,12	0,33**	-0,23	-0,07	-0,13	-0,11	0,15	-0,53**	-0,36**	0,57**	-0,60**	0,68**	0,91**
Superior													
pH _{KCl}	0,74**												
Al ³⁺	-0,57**	-0,84**											
Ca ²⁺	0,53**	0,82**	-0,82**										
Mg ²⁺	0,49**	0,75**	-0,80**	0,86**									
K ⁺	-0,21	-0,05	0,00	0,00	-0,05								
P	-0,33*	-0,01	-0,10	0,24	0,28	0,36*							
H ⁺	-0,63**	-0,61*	0,52**	-0,40*	-0,41*	0,09	0,10						
CO	-0,35*	-0,22	0,11	0,10	0,05	0,17	0,27	0,76**					
Silte	0,27	0,44**	-0,35*	0,27	0,16	0,04	-0,16	0,05	0,03				
Argila	-0,27	-0,44**	0,35*	-0,27	-0,15	-0,04	0,16	-0,04	-0,02	-1,00**			
AF	0,33*	0,51**	-0,38*	0,26	0,07	0,02	-0,11	-0,34*	-0,37*	0,64**	-0,67**		
AG	0,22	0,22	-0,08	-0,05	-0,20	0,09	-0,14	0,14	0,01	0,62**	-0,65**	0,58**	
AT	0,31	0,41**	-0,26	0,12	-0,07	0,06	-0,14	-0,12	-0,21	0,71**	-0,74**	0,90**	0,88**

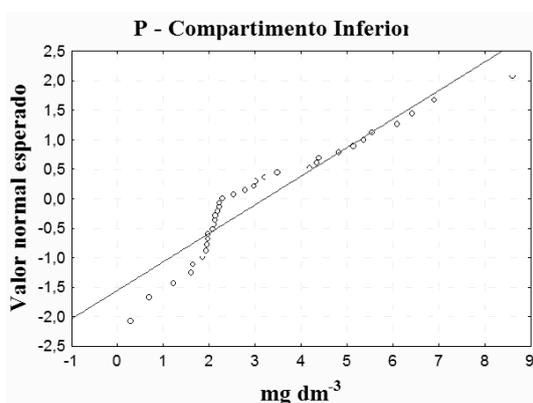


(a)

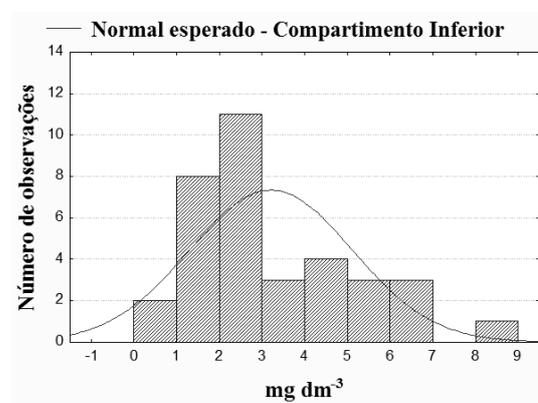


(b)

Figura 2. Gráfico de normalidade (a) e distribuição das classes de frequência (b) dos teores de P em área total



(a)



(b)

Figura 3. Gráfico de normalidade (a) e distribuição das classes de frequência (b) dos teores de P no Compartimento Inferior.

2.4. CONCLUSÕES

1. Com a divisão da área em nível maior de detalhe, a variação da maioria dos atributos reduziu significativamente. Contudo, em áreas com relevo mais acidentado, mesmo a coleta de amostra composta em compartimentos geomorfológicos ou em unidades de mapeamento não garantiu a qualidade da amostragem.
2. A ocorrência de linhas de drenagem nas encostas induziu ao aumento local nos teores de carbono orgânico, limitando sua representatividade.
3. Na área total os maiores coeficientes de variação foram observados para Al^{3+} , P e K^+ (117; 99 e 78 % respectivamente). A ocorrência de teor anômalo de P na unidade de mapeamento 8 comprometeu seriamente a amostragem composta do compartimento médio da paisagem.

4. Os valores para a maioria dos atributos não seguiram distribuição normal na área total e nos compartimentos, porém, com a subdivisão da área em unidades de mapeamento resultou numa distribuição normal para maior número de atributos, com destaque para a Un4, que apresentou 12 dos 14 atributos estudados com distribuição normal.

2.5. LITERATURA CITADA

ALVAREZ V., V.H. & GUARÇONI M., A. Variabilidade horizontal da fertilidade do solo em sistema de plantio direto. R. Bras. Ci. Solo. 27: 297-310, 2003.

AMARO FILHO, J.; NEGREIROS, R.F.D.; ASSIS JÚNIOR, R.N. & MOTA, J.C.A. Amostragem e variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho em Mossoró, RN. R. Bras. Ci. Solo, 31:415-422, 2007.

BARBAR, L.C. & MELO, V.F. Variabilidade das características químicas e mineralógicas de solos da região de Curitiba (PR). Scientia Agraria, 9:187-197, 2008.

BONN, H.L.; McNEAL, B.L. & OCONNOR, G.A. Soil chemistry. New York, John Wiley & Sons, 1979. 329 p.

BRUS, D.J.; & NOIJ, I.G.A.M. Designing sampling schemes for effect monitoring of nutriente leaching from agricultural soils. European Journal of Soil Science, 59:292-303, 2008.

CANTARUTTI, R.B.; ALVAREZ V., V.H & RIBEIRO, A.C. Amostragem do solo. In: RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G & ALVAREZ V., V.H., Eds. Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais (5ª aproximação). Viçosa, MG, p.13-20, 1999.

CARVALHO, J.R.P.; SILVEIRA, P.M. & VIEIRA, S.R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. Pesq. agropec. bras., 37:1151-1159, 2002.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Paraná. Londrina, IAPAR, 1984. Tomo I.

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

GUARÇONI M., A.; ALVAREZ V., V.H.; NOVAIS, R.F.; CANTARUTTI, R.B.; LEITE, H.G. & FREIRE, F.M. Diâmetro de trado necessário à coleta de amostra num Cambissolo sob plantio direto ou sob plantio convencional antes ou depois da aração. R. Bras. Ci. Solo, 31:947-959, 2007

GOMES, J.B.V.; BOLFE, E.L.; CURI, N.; FONTES, H.R.; BARRETO, A.C. & VIANA, R.D. Variabilidade espacial de atributos do solo em unidades de manejo em área piloto de produção integrada de coco. R. Bras. Ci. Solo, 32:2471-2482, 2008.

GUEDES FILHO, O.; VIEIRA, S.R.; CHIBA, M.K.; NAGUMO, H. & DECHEN, S.C.F. Spatial and temporal variability of crop yield and some Rhodic Hapludox properties under no-tillage. R. Bras. Ci. Solo, 34:1-14, 2010.

- KRAEMER, G.B. Variabilidade espacial dos atributos na delimitação das unidades de mapeamento. Curitiba (PR), Universidade Federal do Paraná, 2007. 101p. (Dissertação de Mestrado)
- LAMBKIN, D.; NORTCLIFF, S. & WHITE, T. The importance of precision in sampling sludges, biowastes and treated soils in a regulatory framework. *Trends in Analytical Chemistry*, 23:704-715, 2004.
- LIN, H.; WHEELER, D.; BELL, J. & WILDING, L. Assessment of soil spatial variability at multiple scales. *Ecological Modeling*. 182:271–290, 2005.
- MACHADO, L.O.; LANA, A.M.Q.; LANA, R.M.Q.; GUIMARÃES, E.C. & FERREIRA, C.V. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo em áreas sob sistema plantio convencional. *R. Bras. Ci. Solo*, 31:591-599, 2007.
- MAZZA, L.M.; PÔGGERE, G.C.; FERRARO, F.P.; RIBEIRO, C.B.; CHEROBIM, V.F.; MOTTA, A.C. & MORAES, A. Adubação nitrogenada na produtividade e composição química do campim Mombaça no primeiro planalto paranaense. *Scientia Agraria*, 10:257-265, 2009.
- MONTANARI, R.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T. & SOUZA, Z.M. Forma da paisagem como critério para otimização amostral de latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar. *Pesq. Agropec. Bras.*, 40:69-77, 2005.
- MONTEZANO, Z.F.; CORAZZA, E.J. & MURAOKA, T. Variabilidade espacial da fertilidade do solo em área cultivada e manejada homogeneamente. *R. Bras. Ci. Solo*, 30:839-847, 2006.
- MOTTA, A.C.V. & MELO, V.F. Química dos solos ácidos. In: MELO, V.F. & ALLEONI, L.R.F. eds. *Química e mineralogia do solo, parte II- Aplicações*. Viçosa, MG. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. p.313-380.
- OLIVEIRA, F.H.T.; ARRUDA, J.A.; SILVA, I.F.; & ALVES, J.C. Amostragem para avaliação da fertilidade do solo em função do instrumento de coleta das amostras e de tipos de preparo do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 31:973-983, 2007
- PAULETTI, V.; MOTTA, A.C.V.; SERRAT, B.M.; FAVARETTO, N. & ANJOS, A. Atributos químicos de um Latossolo Bruno sob sistema de plantio direto em função da estratégia de adubação e do método de amostragem de solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 33:581-590, 2009.
- ROSA FILHO, G.; CARVALHO, M.P.; ANDREOTTI, M.; MONTANARI, R.; BINOTI, F.F.S. & GIOIA, M.T. Variabilidade da produtividade da soja em função de atributos físicos de um Latossolo Vermelho Distroférrico sob plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 33:283-293, 2009.
- SALAMUNI, E. & STELLFELD, M.C. Banco de dados geológicos geo-referenciados da Bacia Sedimentar de Curitiba (PR) como base de sistema de informação geográfica (SIG). *Boletim Paranaense de Geociências*, 49:21-32, 2001.
- SANCHEZ, R.B.; MARQUES JÚNIOR, J.; SOUZA, Z.M.; PEREIRA, G.T. & MARTINS FILHO, M.V. Variabilidade espacial de atributos do solo e de fatores de erosão em diferentes pedoformas. *Bragantia*, 68:1095-1103, 2009.

SBCS. Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Comissão de Química e Fertilidade do solo.- 10. ed.- Porto Alegre, 2004.

SILVA, P.C.M. & CHAVES, L.H.G. Avaliação e variabilidade espacial de fósforo, potássio e matéria orgânica em Alissolos. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 5:431-436, 2001.

SILVA, M.A.G.; MUNIZ, A.S.; SENGIK, E.; MATA, J.D.V.; CARISSIMI, C. & CEGANA, A.C. Amostragem e variabilidade nos atributos de fertilidade em um Latossolo sob plantio direto em São Miguel do Iguçu, Estado do Paraná. Acta Scientiarum: Agronomy, 25:243-248, 2003a.

SILVA, V.R.; REICHERT, J.M.; STORK, L. & FEIJÓ, S. Variabilidade espacial das características químicas do solo e produtividade de milho em um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico arênico. R. Bras. Ci. Solo, 27:1013-1020, 2003b.

SILVA, V.; MOTTA, A.C.; MELO, V.F. & LIMA, V.C. Variáveis de acidez em função da mineralogia da fração argila do solo. R. Bras. Ci. Solo, 32:551-559, 2008.

SILVA, S.A.; LIMA, J.S.S.; XAVIER, A.C. & TEIXEIRA, M.M. Variabilidade espacial de atributos químicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo húmico cultivado com café. R. Bras. Ci. Solo, 34:15-22, 2010.

SILVEIRA, P.M.; ZIMMERMANN, P.J.P.; SILVA, S.C. & CUNHA, A.A. Amostragem e variabilidade espacial de características químicas de um Latossolo submetido a diferentes sistemas de preparo. Pesq. agrop. bras, 35:2057-2064, 2000.

SNEDECOR, G.W.; COCHRAN, W.G. Statistical methods. 6.ed. Ames: Iowa State University, 1967. 593p.

SOUZA, L.S.; COGO, N.P. & VIEIRA, S.R. Variabilidade de propriedades físicas e químicas do solo em um pomar cítrico. R. Bras. Ci. Solo, Viçosa, 21:367-372, 1997

SOUZA, E.G.; JOHANN, J.A.; ROCHA, J.V.; RIBEIRO, S.R.A.; SILVA, M.S.; URIBE-OPAZO, M.A.; MOLIN, J.P.; OLIVEIRA, E.F.; NÓBREGA, L.H.P. Variabilidade espacial dos atributos químicos do solo em um Latossolo Roxo Distrófico da região de Cascavel – PR. Eng. Agríc., 18:80-92, 1999.

SOUZA, C.K.; MARQUES JÚNIOR, J.; MARTINS FILHO, M.V. & PEREIRA, G.T. Influência do relevo e erosão na variabilidade espacial de um Latossolo em Jaboticabal (SP). R. Bras. Ci. Solo, 27:1067-1074, 2003.

SOUZA, Z.M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T. & BARBIERI, D.M. Small relief shape variation influence spatial variability of soil chemical attributes. Sci. Agric., 63:161-168, 2006.

STATSOFT. Statistica for Windows. v.8.0. Tulsa, 2007.

VANNI, S.M. Modelos de regressão: Estatística aplicada. São Paulo, Legmar Informática, 1998. 177p.

VIEIRA, V.A.S.; MELLO, C.R. & LIMA, J.M. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em uma microbacia hidrográfica. *Ciênc. agrotec.*, 31:1477-1485, 2007.

WANG, Y.; FENG, N.; LI, T.; ZHANG XI, Z. & LIAO, G. Spatial variability of soil cation exchange capacity in Hilly tea plantation soils under different sampling scales. *Agricultural Sciences in China*. 7:96-103, 2008.

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

WEINDORF, D.C. & ZHU, Y. Spatial variability of soil properties at Capulin volcano, New Mexico, USA: implications for sampling strategy. *Pedosphere*, 20:185-197, 2010.

ZORZI, P.; BARBIZZI, S.; BELLI, M.; FAJGELJ, A.; JACIMOVIC, R.; JERAN, Z.SANSONE, H. & PERK, M. Soil sampling reference site: The challenge is defining reference material for sampling. *Applied Radiation and Isotopes*, 66:1588-1591, 2008.

3. VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS MINERALÓGICOS DOS SOLOS

RESUMO

As características físicas e químicas do solo são em grande parte influenciadas pela sua constituição mineralógica, que por sua vez é decorrente da interação entre os fatores e os processos pedogenéticos que ocorrem em diferentes intensidades, mesmo a curtas distâncias horizontais, resultando assim na variabilidade espacial do solo. Assim, a caracterização dessa variabilidade é de fundamental importância para o entendimento dos atributos do solo, sua fragilidade, potencial de uso bem como para definir melhores padrões de amostragem. O objetivo deste trabalho foi caracterizar a variabilidade espacial da caulinita (Ct), gibbsita (Gb), goetita (Gt) e hematita (Hm) de solos originados da Formação Guabirotuba e alguns de seus atributos cristalográficos e as relações $Gt/(Gt+Hm)$, Fe amorfo/Fe cristalino e $Ct/(Ct+Gb)$. A área do estudo situa-se na Fazenda Experimental do Canguiri da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, (PR). As amostras do horizonte B foram coletadas na interseção de uma malha georreferenciada com espaçamento regular de 30 m, adicionando mais 10% de pontos com posicionamento aleatório dentro da malha com a finalidade de reduzir o efeito pepita, totalizando 135 amostras. Para a descrição da dispersão e variabilidade dos dados, foi utilizado análise por estatística descritiva clássica (média, mediana, máximo, mínimo, desvio-padrão, coeficiente de variação, assimetria, curtose e teste de Shapiro-Wilk), enquanto para a caracterização da variabilidade espacial dos mesmos dados utilizou-se a geoestatística na produção dos semivariogramas e interpretação dos mesmos. Dentre os atributos estudados, a caulinita foi o mineral mais abundante da fração argila com média de $546,29 \text{ g kg}^{-1}$, seguido da Gb com média de $114,08 \text{ g kg}^{-1}$. O atributo que apresentou maior CV foi a relação FeA/FeC (94,6%), indicando grande dispersão dos valores em relação a média. Foi observado efeito pepita puro apenas para substituição isomórfica na Hm (SI Hm), sendo que o Fe cristalino (FeC) foi o atributo que apresentou maior alcance com valor de 625 m. Apesar dos teores de Ct apresentarem baixo CV (10,8%), seu alcance foi de apenas 22,4 m, distância máxima entre os pontos da malha para adequada caracterização da variabilidade desse atributo. O Fe amorfo mesmo com baixo alcance (55,0 m) o efeito pepita foi quase nulo, indicando alta dependência espacial entre os valores e que a grade de amostragem foi eficiente na caracterização da sua variabilidade espacial.

Termos de indexação: Formação Guabirotuba, geoestatística, caulinita, gibbsita, goetita, hematita.

*SUMMARY: USE OF GEOESTATÍSTICA IN SATIMATING SPATIAL VARIABILITY OF SOIL
MINERALOGICAL PROPERTIES*

The physical and chemical properties of soil depends largely on its mineralogical constitution, which in turn is due to the factors and pedogenetic process that happen in different intensities, even over short horizontal distances, thus resulting in soil spatial variability. For this reason, the characterization of variability is essential for knowledge of soil attributes, it's fragility, it's potential use, as well a better understanding of sampling standards. The aim of this study was to characterize the spatial variability of kaolinite (Ct), gibbsite (Gb), goethite (Gt) and hematite (Hm) in soil that came from the Guabirota Formation, as well as some of their crystallographic attributes and ratios $Gt/(Gt+Hm)$, amorphous Fe/crystal Fe and $Ct/(Ct+Gb)$. The study area is located at the Canguiri Experimental Farm of the Federal University of Paraná, Curitiba (PR). The B horizon samples were performed on georeferenced regular grid intersection, 30 m apart, adding 10% of extra points, randomly located into grid, in order to reduce the nugget effect, in a total of 135 samples. Data dispersion and variation was determined by classic descriptive statistics (medium, median, maximum, minimum, standard deviation, coefficient of variation, skewness, kurtosis and Shapiro-Wilk test), while the spatial variability of the same attributes was determined by geostatistics through semivariogram and its analysis. Among the attributes studied, Ct was the predominant mineral in clay fraction with $546,2 \text{ g kg}^{-1}$, follow by Gb averaging $114,1 \text{ g kg}^{-1}$. Ratio FeA/FeC was the attribute that showed a higher coefficient of variation (94,6%). The nugget effect was observed only on Hm isomorphous substitution (SI Hm), whereas crystalline Fe (FeC) was the attribute that showed the highest range value with 625 m. Both, Ct and Gb, present high spatial variability, with a range value of 22,4 and 20,1 m respectively, and the characterization of their spatial variability is due to randomly spaced samples, and the regular grid spaced 30 m apart would not be efficient in characterizing the spatial variability of these attributes.

Index terms: Guabirota Formation, geostatistic, kaolinite, gibbsite, goethite, hematite.

3.1. INTRODUÇÃO

O solo é resultante da interação entre fatores (material, clima, relevo, organismos e tempo) e processos pedogenéticos (adição, remoção, transformação e transporte) que atuam em diferentes intensidades ao longo da paisagem resultando na variabilidade espacial dos atributos. A constituição mineralógica do solo é determinante no comportamento físico e químico do mesmo, influenciando na capacidade de troca de cátions, na reação a calagem, na porosidade do solo, na sua estrutura, na estabilidade dos seus agregados e na susceptibilidade a erosão, o que justifica o estudo da sua variabilidade no solo.

Assim como um solo pode levar centenas de anos para se formar, o mesmo pode ocorrer com sua constituição mineralógica, sendo que práticas agrícolas de curto prazo não influenciam significativamente nas características mineralógicas do solo, como observado por Gonçalves et al. (2008) sob diferentes sistemas de cultivos durante 24 anos. Os principais minerais da fração argila dos solos desenvolvidos nos trópicos úmidos são a caulinita (Ct), gibbsita (gb), hematita (Hm) e

goetita (Gt) (Resende et al., 1997). A Ct é o mineral predominante em solos brasileiros (Melo et al., 2001a; Melo & Wypych, 2009), e no aspecto químico possui carga variável, que ao pH natural do solo apresenta capacidade de troca catiônica (CTC), sendo a mesma influenciada pelas práticas de calagem. Os óxidos de Fe e Al, componentes da fração residual do solo, são importantes indicadores ambientais e pedogenéticos. Estes, quando em teores elevados, indicam solos altamente intemperizados (Kampf & Curi, 2000) e do ponto de vista agrônomo assumem importante papel no manejo do solo, uma vez que tem grande capacidade de adsorver fósforo, poluentes, gerar cargas positivas (CTA) e conferir estrutura mais granular (Costa & Bigham, 2009; Kampf et al., 2009).

A pedometria é um campo da ciência do solo que busca quantificar os atributos do solo utilizando várias técnicas, entre elas a estatística clássica e geoestatística, ou então a combinação das duas técnicas, o chamado método híbrido (Webster & Oliver, 1990; McBratney & Odeh, 1998; Saldaña & Ibañez, 2007). Ao contrário da estatística clássica que tem como premissa a independência das amostras, a geoestatística caracteriza a variabilidade espacial do atributo através da dependência espacial entre as amostras (Vieira, 2000; Carvalho et al., 2002), sendo uma importante ferramenta na interpolação dos dados, estimando valores onde não foram coletadas amostras, na espacialização e visualização da informação com qualidade, facilitando o seu entendimento (Saldaña & Ibañez, 2007; Camargo et al., 2008; Zhu & Lin, 2010).

A variabilidade espacial dos atributos do solo é conhecida há vários anos (Burrough, 1993), sendo largamente empregado em mapeamento de solos nas divisões de diferentes unidades de solos (Hudson, 1992). Camargo et al. (2008) estudando a variabilidade espacial dos atributos mineralógicos de um Latossolo, com malha de amostragem regular espaçada em 10 m, encontraram menor variabilidade espacial para o diâmetro médio do cristal (DMC) da Hm, com alcance de 37,2 m, maior variabilidade para DMC da Gt com alcance de 19,8 m e dependência espacial para todas as variáveis estudadas.

Alguns trabalhos foram realizados em solos originados da Formação Guabirotuba com a finalidade de estudar sua variabilidade, Kremmer (2007) estudou os atributos químicos, físicos e morfológicos com técnicas de geoestatística e observou grande variabilidade para espessura do horizonte A, pH em KCl e areia fina (alcance de 20, 20 e 23 m respectivamente). Oliveira Junior et al. (2010) avaliou a variabilidade dos atributos do solo em diferentes unidades amostrais através da estatística clássica e observaram que mesmo em pequenas glebas a variabilidade para alguns atributos pode ser considerada grande. Barbar & Melo (2008) estudando a mineralogia dos solos da região de Curitiba encontraram alta variabilidade para Ct e Gb (CV de 43 e 30% respectivamente) em amostras distanciada em 50 cm.

Este trabalho teve como objetivo caracterizar a variabilidade espacial de atributos mineralógicos da fração argila de solos da Formação Guabirota por meio de análise geoestatística como forma de indicar melhores padrões de amostragem para os mesmos.

3.2. MATERIAL E MÉTODOS

Área do estudo e coleta das amostras

A área de estudo ocupa uma gleba de aproximadamente 12,88 ha e está situada na Fazenda Experimental do Cangüiri (CEEX), da Universidade Federal do Paraná (UFPR), no município de Pinhais, região metropolitana de Curitiba (PR), entre as coordenadas geográficas: -25°22'38" e -25°24'46" de latitude Sul, -49°09'05" e -49°06'40" de longitude Oeste. A encosta em que se encontra a área possui orientação SO-NE, com amplitude altimétrica de 35 m (Figura 1a), e altitude mínima e máxima de 905 e 940 m, respectivamente.

O substrato geológico da área relaciona-se a Formação Guabirota, com sedimentos originados do intemperismo das rochas do embasamento cristalino durante períodos úmidos, com a sedimentação e retrabalhamento desse material ocorrendo na alternância de ciclos úmidos e semi-áridos. A litoestatigrafia é composta por argilito rico em esmectita, seguindo-se de arcósios e depósitos rudáceos, além de pequenos horizontes de caliche (Salamuni & Stellfeld, 2001).

A coleta das amostras e as descrições morfológicas foram efetuadas por Kremmer (2007). O mesmo autor coletou monólitos em um tubo de PVC de 110 cm de altura dentro de um trado mecânico acoplado a tomada de potência de um trator, utilizando malha regularmente espaçada em 30 m e mais 10% de pontos com localização aleatória dentro da malha, totalizando 135 pontos amostrais (Figura 1b), sendo os mesmos alocados a campo com auxílio de estação total. Para a análise mineralógica, o presente trabalho utilizou apenas a fração argila do horizonte B de cada amostra.

Análises de laboratório

As amostras foram secas ao ar e passadas em peneira de 2 mm para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA). Para as análises mineralógicas a matéria orgânica foi eliminada com peróxido de hidrogênio (H₂O₂ 15% vol/vol) em banho-maria. As frações do solo foram dispersas com NaOH 0,2 mol L⁻¹, a areia foi retida em peneira com malha de 0,053 mm e a fração silte e argila separadas por sedimentação com base na lei de Stokes (Jackson, 1979). Os minerais do tipo 2:1, como esmectita, não foram abordados nesse estudo devido à dificuldade em obter dados quantitativos sobre seus teores, impedindo a análise estatística clássica e geoestatística dos mesmos.

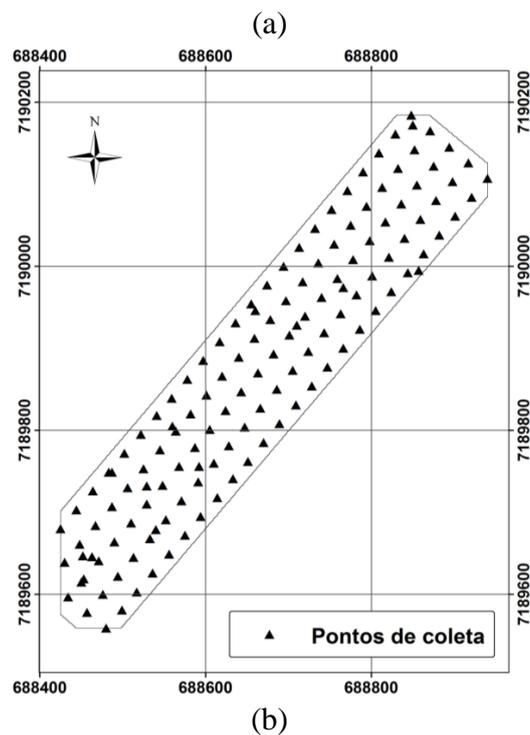
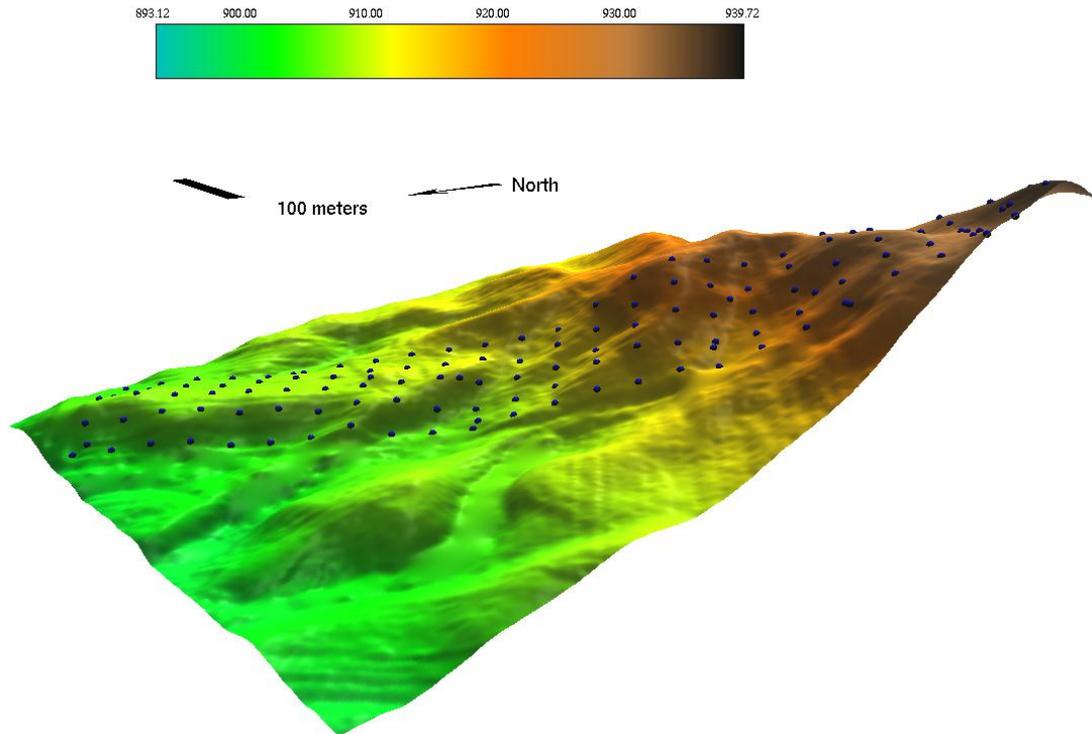


Figura 1. Relevo em 3D da área de estudo situada na Fazenda Experimental do Cangüiri (a) e distribuição dos pontos de amostragem em malha regular e mais 10% de pontos com posicionamento aleatório dentro da malha regular.

Concentração dos óxidos de Fe

Para reduzir a interferência dos picos de Ct no estudo das características cristalográficas dos óxidos de Fe na difratometria de raios-X (DRX), os mesmos foram concentrados através da extração

de Ct com NaOH 5 mol L⁻¹ (Norrish & Taylor, 1961), usando béquer de teflon e colocando em chapa aquecedora por 2 horas. Foi adicionado metassilicato de sódio (Na₂SiO₃.5H₂O) para que a concentração de Si na solução fosse de 0,2 mol L⁻¹, evitando a dissolução de óxidos de Fe com alta substituição isomórfica em Al (Kämpf & Schwertmann, 1982). A sodalita [Na₄Al₃Si₃O₁₂(OH)] formada durante a extração foi removida com duas lavagens com 50 mL de solução HCl 0,5 mol L⁻¹ e uma com 50 mL de água deionizada (Norrish & Taylor, 1961), agitadas continuamente por 10 minutos (Singh & Gilkes, 1991).

O resíduo da extração foi estudado por DRX em aparelho PHILIPS modelo PW 1050/70 equipado com tubo de cobre, filtro de Ni e radiação CuK α operado a 20 mA e 40kV, em amostra em pó com varredura de 10 a 40 °2 θ e velocidade do goniômetro de 0,4 ° 2 θ min⁻¹. Utilizou-se NaCl como padrão interno para correção das distorções instrumentais, sendo que a mistura foi feita triturando a amostra em almofariz na presença de aproximadamente 4% de NaCl (Melo et al., 2001b).

A relação entre Gt e Hm ($R = Gt/Gt + Hm$) foi estimada com base na área dos picos dos minerais, segundo Torrent & Cabedo (1986). A substituição isomórfica de Fe por Al na estrutura da Hm e Gt foi estimada pela posição dos picos destes minerais. A posição dos picos de NaCl, em cada amostra, foi utilizada para corrigir os valores das posições dos picos da Hm e Gt. A SI na Gt foi calculada segundo Schulze (1984) e na Hm segundo Schwertmann et al. (1979). O DMC da Hm e Gt foram calculados a partir da largura a meia altura (LMA) da reflexão (104) da Hm e (110) e da Gt, utilizando-se a equação de Scherrer (Klug & Alexander, 1954). A partir dos dados apresentados por Klug & Alexander (1954), para ângulos de Bragg (°2 θ), foi ajustada a equação para obter a largura a meia altura corrigida (Melo et al., 2001b), e os teores de Gt e Hm foram estimados por alocação dos teores de FeDCB-FeOA, respeitando a relação Gt/(Gt+Hm) e SI dos minerais obtidos pelos DRXs e a fórmula mínima dos minerais (Melo et al 2001b).

Concentração de caulinita e gibbsita

Para o estudo da caulinita e gibbsita na fração argila, os óxidos de Fe foram removidos através de quatro extrações sucessivas por ditionito-citrato-bicarbonato (DCB) em banho-maria por 30 min cada. Em tubos de centrífuga foram adicionados: 2,0 g de amostra, 40 mL de citrato de sódio 0,3 mol L⁻¹; 5 mL de bicarbonato de sódio 1 mol L⁻¹, 1 g de ditionito de sódio em pó no início do aquecimento e mais 1 g após 15 min (Mehra & Jackson, 1960), tomando o cuidado para a que a temperatura não ultrapassasse 75 °C, evitando assim a formação e sulfato de Fe. O extrato das quatro extrações foram combinados em frascos âmbar e o teor de Fe foi determinado pelo método da colorimetria, usando como indicador ortofenantrolina e a leitura realizada no aparelho UV-VIS.

Para a remoção do excesso de sais, ao final das extrações, lavou-se o resíduo duas vezes com 80 mL de $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 0,5 mol L⁻¹ e uma vez com 80 mL de água deionizada. Após a lavagem, os tubos de ensaio contendo as amostras foram secados em estufa a 60 °C e pesados para o controle de redução de massa da amostra pelo DCB.

Análise termogravimétrica (TG) e análise térmica diferencial (ATD)

Os resíduos do DCB foram secadas em estufa a 60 °C, triturados em almofariz e submetidos a análise térmica diferencial (ATD) e análise termogravimétrica (ATG) em equipamento SHIMADZU modelo DTG-60, Simultâneo DTA-TG APPARATUS, pelo aquecimento de 20 mg de argila em cadinho de platina da temperatura ambiente até 950⁰C, a uma taxa de aquecimento de 10⁰C min⁻¹ e fluxo de gás N₂ de 50 mL min⁻¹. Os teores de Ct e Gb da amostra desferrificada foram então corrigidas para a amostra natural descontando a perda de massa da extração com DCB.

Análise dos atributos cristalográficos da Ct e Gb

No mesmo resíduo da extração por DCB, as características cristalográficas da Ct e Gb foram estudadas por DRX. Os difratogramas foram com velocidade do goniômetro de 1° 2 θ min⁻¹ e varredura de 3 a 50° 2 θ .

O diâmetro médio do cristal (DMC) foi calculado com base na largura a meia altura (LMA) da reflexão (002) e (001) dos minerais Ct e Gb respectivamente, montando-se placas de Koch com amostras em pó não orientadas, adicionando halita como padrão interno (Klug & Alexander, 1934; Melo et al., 2001a). Para o cálculo do índice de assimetria da caulinita (IA) (Hughes & Brown, 1979) foi utilizada a largura a meia altura da reflexão (001) (Singh & Gilkes, 1991).

Extração de óxidos de Fe e Al de baixa cristalinidade

As determinações dos teores de óxidos de Fe e Al amorfos foram realizadas pela extração com oxalato de amônio (OA) na ausência de luz (McKeague, 1978), colocando-se em tubos de ensaio 0,4 g de amostra e 10 mL de oxalato de amônio 0,2 mol L⁻¹, com pH ajustado para 3. Após a agitação por duas horas a suspensão foi centrifugada e os extratos utilizados para a leitura dos teores de Fe por colorimetria. O teor de Al foi determinado por espectrometria de absorção atômica.

Análise estatística e geoestatística

Os valores dos atributos mineralógicos foram analisados por meio da estatística descritiva considerando média, mediana, desvio padrão, normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk (W) e

coeficiente de variação (CV). Foram utilizados os critérios descritos por Warrick & Nielsen (1980) para classificação dos valores de CV: baixa variabilidade ($CV < 12\%$), média variabilidade ($12\% \leq CV < 62\%$) e alta variabilidade ($CV > 62\%$).

Para descrição da variabilidade espacial dos dados, foram gerados semivariogramas usando o programa GS+ (Gamma Design Software, 2000), que se baseia na seguinte equação:

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

em que: $\hat{\gamma}(h)$ a semivariância estimada a partir dos dados experimentais; Z os valores medidos nos pontos x_i e $x_i + h$; N(h) o número de pares de valores medidos separados por uma distância h.

O semivariograma (Figura 2) possui feições que descrevem a variabilidade espacial dos seguintes atributos (Landim & Struraro, 2002): 1) Amplitude (a) – distância a partir da qual as amostras passam a ser independentes entre si; 2) Patamar ($C + C_0$) – valor de variância onde a mesma se estabiliza e; 3) efeito pepita (C_0) – descontinuidade da origem do semivariograma em que teoricamente se atribui a erros de amostragem, como por exemplo, espaçamento entre amostras muito grande. Outro parâmetro extraído do semivariograma é a proporção $\{[1-(C_0/C)]*100\}$, ou seja, a porcentagem do efeito pepita no valor do patamar, estimando a dependência espacial das amostras, que de acordo com Cambardella et al. (1994) são classificados como: baixa dependência ($< 25\%$), média dependência ($25\% < \text{proporção} \leq 75\%$) e alta dependência ($> 75\%$). Quando o valor de proporção é igual a zero temos o efeito pepita puro, ou seja, as amostras não apresentam dependência espacial entre elas na distância amostrada, e os valores observados ocorrem de forma aleatória no espaço. No presente estudo, foram adicionados 10% de pontos em relação a malha regular a fim de diminuir o efeito pepita e caracterizar melhor a variabilidade espacial dos atributos.

A escolha do modelo teórico que melhor se ajustou a distribuição dos dados foi baseada na menor soma de quadrado de resíduos (RSS) e maior coeficiente de determinação (r^2) e a confiança do modelo escolhido foi testada pela validação cruzada.

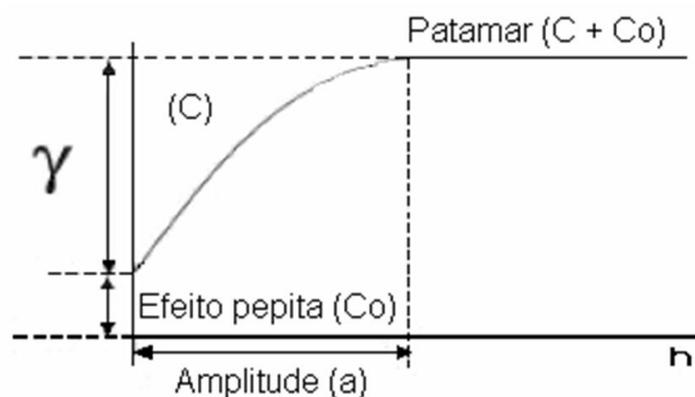


Figura 2. Modelo de um semivariograma e suas principais feições (Landim & Struraro, 2002).

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram observados baixos teores de Fe cristalino nas amostras, com valor máximo de 74,4 g kg⁻¹ e valor médio de 46,9 g kg⁻¹ (Quadro 1), semelhante ao obtido por Barbar & Melo (2008), fato que os autores atribuíram aos baixos teores de minerais ferromagnesianos no argilito da Formação Guabirotuba. Em relação à distribuição dos dados, os valores de média e mediana muito próximos indicaram uma distribuição próxima ao do tipo normal, o que foi comprovado pelo teste de Shapiro-Wilk. O coeficiente de variação (CV) é uma medida estatística que quantifica de forma relativa (em porcentagem) quanto os valores estão se distanciando da média. Para o Fe cristalino o CV indicou média variabilidade (21,9%). Barbar & Melo (2008) analisando os mesmos atributos em três sítios com solos originados da Formação Guabirotuba, observaram baixa variabilidade (CV < 10%) para dois deles e média variabilidade (CV = 19,8%) para outro sítio.

Na análise geoestatística, observando a distribuição no espaço, o Fe cristalino apresentou proporção de 60% (Quadro 2), caracterizando a dependência espacial entre suas amostras como moderada (Cambardella et al., 1994). O alcance é inversamente proporcional à variabilidade espacial e a mais importante feição do semivariograma, seu valor é determinado na distância em que a curva do modelo teórico se estabiliza e a partir dessa distância as amostras não apresentam mais dependência espacial e os valores obtidos ocorrem de forma aleatória no espaço. O Fe cristalino foi o atributo que apresentou maior alcance (625 m), conseqüentemente a menor variabilidade espacial (Figura 3b). Como aplicação prática, em um estudo, por exemplo, de fixação de P por óxidos de Fe cristalinos, seria necessária apenas uma amostra para a caracterização de toda área.

Quadro 1. Estatística descritiva dos atributos mineralógicos do horizonte B das 135 amostras.

Atributo ⁽¹⁾	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	DP ⁽²⁾	CV% ⁽³⁾	Assimetria	Curtose	W ⁽⁴⁾
Fe A (g kg ⁻¹)	2,73	2,24	0,40	12,80	2,0	74,6	1,92	5,12	0,00
Fe C (g kg ⁻¹)	46,87	46,35	21,42	74,42	10,2	21,9	0,38	-0,14	0,07
FeA/FeC	0,06	0,04	0,01	0,44	0,06	94,6	2,90	12,19	0,00
Gt (g kg ⁻¹)	31,5	30,6	0,3	69,5	11,7	37,3	0,31	0,82	0,00
SI Gt (mmol mol ⁻¹)	154,7	157,8	2,0	289,09	63,7	41,1	-0,1	-0,5	0,00
DMC Gt 110 (nm)	11,6	10,5	5,7	41,67	4,2	36,5	3,2	18,8	0,00
Hm (g kg ⁻¹)	23,0	21,5	1,1	72,7	14,2	61,8	0,8	0,6	0,00
DMC Hm 104 (nm)	17,7	15,8	9,3	48,38	6,9	39,0	2,1	5,6	0,00
SI Hm (mmol mol ⁻¹)	90,5	91,6	5,6	240,37	45,6	50,3	0,5	0,5	0,00
Gt/(Gt+Hm)	0,6	0,6	0,0	0,99	0,2	37,3	-0,3	-0,4	0,47
Al A (g kg ⁻¹)	6,16	6,31	2,96	13,45	1,6	26,9	0,68	1,74	0,00
Ct (g kg ⁻¹)	546,29	542,57	416,62	699,97	59,2	10,8	0,22	-0,25	0,35
DMC Ct (nm)	8,2	7,8	3,3	15,39	2,2	27,5	0,7	0,4	0,00
IA Ct	0,3	0,3	0,0	0,58	0,1	42,5	0,0	-0,5	0,75
Gb (g kg ⁻¹)	114,08	103,73	35,14	296,97	45,1	39,6	0,94	1,16	0,00
DMC Gb (nm)	88,7	73,1	-29,1	589,52	71,3	80,3	3,3	18,8	0,00
Ct/(Ct+Gb)	0,83	0,84	0,61	0,94	0,0	7,5	-0,79	0,27	0,00
Ta Ct (°C)	465,55	464,24	444,80	494,21	9,1	1,9	1,13	1,44	0,00
Ta Gb (°C)	254,36	254,07	235,37	273,76	6,4	2,5	0,22	0,60	0,25

⁽¹⁾ Fe A – teor de óxido de Fe amorfo extraído pelo Oxalato de Amônio(OA), Fe C – teor de óxido de Fe cristalino (FeDCB-FeOA), FeA/FeC - relação entre Fe amorfo e Fe cristalino, SI Gt - substituição isomórfica na Gt, DMC Gt 110 - diâmetro médio do cristal (DMC) da Gt na direção (110), Al A – teor de alumínio amorfo extraído pelo OA, IA Ct - índice de assimetria da Ct, T^a Ct - temperatura de desidroxilação da Ct. ⁽²⁾DP - Desvio-padrão. ⁽³⁾CV - coeficiente de variação. ⁽⁴⁾Teste de normalidade Shapiro-Wilk a 5% de probabilidade.

O Fe amorfo apresentou baixos teores, com média e máximo de 2,73 e 12,8 g kg⁻¹, respectivamente (Quadro 1), e ao contrário da forma cristalina, houve grande dispersão dos dados (CV = 74,6%), com distribuição do tipo não normal (valor do teste de Shapiro-Wilk menor que 0,05). Porém, essa característica não é limitante para o emprego da análise geoestatística (Cressie, 1991). Mesmo possuindo distribuição não normal, o Fe amorfo apresentou forte dependência espacial, com valor de proporção igual a 100. O alto valor de proporção se deve ao valor quase nulo do efeito pepita (Quadro 2 e Figura 3a), indicando que a grade de amostragem foi eficiente para a caracterização da variabilidade espacial desse atributo, fato que também pode ser observado pelo valor de alcance (55 m) maior que o espaçamento utilizado na grade de amostragem.

A relação Fe amorfo/Fe cristalino (FeA/FeC) é um importante parâmetro para a descrição do ambiente em que o solo foi formado, onde maiores valores da relação indicam maior quantidade de material de baixa cristalinidade ou amorfo, que tem sua formação ligada a baixa intensidade dos fatores pedogenéticos, a condições de alta umidade ou altos teores de matéria orgânica (Ghidin et al., 2006). O valor médio da relação FeA/FeC mostrou grande predomínio da forma cristalina do óxido de Fe. Foram observados valores de assimetria e curtose muito distantes de zero, fato que indica distribuição não normal (Snedecor & Cochran, 1967), além de ser o atributo com maior CV (94,6%). Para essa relação o valor de proporção foi o menor entre os atributos (47%), ainda sendo

considerado de moderada dependência espacial. Apesar do maior CV e menor proporção, a relação FeA/FeC teve alcance de 64,6 m e sua variabilidade espacial foi eficientemente caracterizada pela grade de amostragem.

Quadro 2. Parâmetros geoestatísticos e das feições do semivariograma para os atributos mineralógicos do horizonte B das 135 amostras.

Atributo ⁽¹⁾	Modelo ⁽²⁾	Efeito Pepita ⁽³⁾	Patamar ⁽⁴⁾	Alcance (m) ⁽⁵⁾	Proporção ⁽⁶⁾	r ²	RSS ⁽⁷⁾
Fe A (g kg ⁻¹)	Exponencial	0,001	0,496	55,0	100	0,99	0,0011
Fe C (g kg ⁻¹)	Esférico	54,5	133,9	625,0	60	0,94	132
FeA/FeC	Exponencial	0,0009	0,002	64,6	47	0,86	4,6 E-08
Gt (g kg ⁻¹)	Exponencial	0,947	3,355	28,9	72	0,91	0,056
SI Gt (mmol mol ⁻¹)	Esférico	320	3487	34,9	90	0,88	226822
DMC Gt 110 (nm)	Esférico	0,036	0,074	82,2	51	0,98	5,9 E-06
Hm (g kg ⁻¹)	Esférico	0,285	0,721	77,7	60	0,96	0,001
DMC Hm 104 (nm)	Exponencial	0,087	0,293	14,7	70	0,96	2,9 E-05
SI Hm (mmol mol ⁻¹)	Efeito pepita puro	-	-	-	-	-	-
Gt/(Gt+Hm)	Esférico	0,025	0,051	102,5	51	0,96	9,1 E-06
Al A (g kg ⁻¹)	Esférico	1,042	2,601	67,2	60	0,97	0,036
Ct (g kg ⁻¹)	Exponencial	0,413	1,59	22,4	74	0,75	0,0239
DMC Ct (nm)	Exponencial	0,0001	0,106	20,5	100	0,95	1,3 E-04
IA Ct	Esférico	0,001	0,009	45,1	89	0,94	6,1 E-07
Gb (g kg ⁻¹)	Exponencial	0,626	3,089	20,1	80	0,92	0,0308
DMC Gb (nm)	Esférico	683	1811	39,4	100	0,92	69207
Ct/(Ct+Gb)	Esférico	0,0006	0,003	62,0	79	0,94	4,8 E-08
Ta Ct (°C)	Esférico	0,006	0,042	38,4	85	0,90	2,0 E-05
Ta Gb (°C)	Exponencial	0,025	0,060	316,2	58	0,96	6,4 E-06

⁽¹⁾ Fe A – teor de óxido de Fe amorfo extraído pelo Oxalato de Amônio(OA), Fe C – teor de óxido de Fe cristalino (FeDCB-FeOA), FeA/FeC - relação entre Fe amorfo e Fe cristalino, SI Gt - substituição isomórfica na Gt, DMC Gt 110 - diâmetro médio do cristal (DMC) da Gt na direção (110), Al A – teor de alumínio amorfo extraído pelo OA, IA Ct - índice de assimetria da Ct, T^a Ct - temperatura de desidroxilação da Ct. ⁽²⁾Modelo - modelo teórico da curva com melhor ajuste a semivariância dos dados. ⁽³⁾Efeito pepita - descontinuidade da origem do eixo y ⁽⁴⁾Patamar - valor de variância em que a mesma se estabiliza. ⁽⁵⁾Alcance - distância em que ocorre o patamar. ⁽⁶⁾Proporção: $[1-(C_0/(C_0+C_1))]$. ⁽⁷⁾ Soma dos quadrados dos resíduos.

Os teores de Gt e seus atributos cristalográficos [substituição isomórfica de Fe por Al (SI Gt) e diâmetro médio do cristal na direção 110 (DMC Gt)] apresentaram média variabilidade dos seus dados, com CV de 37,3; 41,1 e 36,5%, respectivamente (Quadro 1). Os valores de assimetria e curtose para os dois primeiros atributos foram próximos ao da distribuição do tipo normal, já para DMC Gt os valores de assimetria e curtose (3,2 e 18,8, respectivamente) ficaram bem distantes de zero, indicando distribuição do tipo não normal. O alcance obtido para os teores de Gt foi de 28,9 m (Quadro 2), e apenas devido aos pontos aleatórios entre a malha de amostragem (Figura 1b) foi possível determinar a variabilidade desse atributo, uma vez que a malha de 30 m não seria suficiente para caracterizar sua variabilidade espacial. Para a SI Gt o alcance foi ligeiramente superior (34,9 m), e assim como o teor de Gt, a dependência espacial da amostra foi classificada como forte (Cambardela et al., 1994). Para DMC Gt foi observado moderada dependência espacial,

e mesmo com distribuição do tipo não normal, obteve o maior alcance (82,2 m) entre os atributos desse mineral.

Para o teor de Hm e SI Hm observou-se distribuição similar a do tipo normal, com valores de assimetria e curtose próximos a zero (Quadro 1), mas com grande dispersão dos dados para Hm (CV = 61,8) e média para DMC Hm e SI Hm (39,0 e 50,3 % respectivamente). Dentre os atributos da Hm, apenas o seu teor teve baixa variabilidade espacial (alcance de 77,7 m). Para o DMC Hm só foi possível à caracterização da sua variabilidade espacial graças aos pontos com posicionamento aleatório na malha, uma vez que o seu alcance foi de apenas 14,7 m; enquanto para a SI Hm foi observado completa aleatoriedade nos valores, com o semivariograma apresentando efeito pepita puro, e conforme podemos observar na Figura 3i, a linha horizontal reta indica que não foi possível o ajuste de um modelo teórico de curva aos dados de semivariância ou seja, não há dependência espacial ente as amostras para este atributo. Para a caracterização desses dois últimos atributos, seria necessária a utilização de uma grade de amostragem com espaçamento menor.

A formação da Gt ocorre em detrimento da formação de Hm, em que os principais fatores que favorecem ao aumento da relação $Gt/(Gt+Hm)$, são os menores teores de Fe no material de origem, baixas temperaturas, maior grau de umidade e matéria orgânica e valores de pH mais baixos (Kämpf & Schwertmann, 1982; Schwertmann & Taylor, 1989). A média para a relação $Gt/(Gt+Hm)$ foi de 0,60, mostrando que, de modo geral, há predomínio da Gt nesses solos. Alguns pontos de amostragem apresentaram baixos valores da relação atribuídos provavelmente, a condições pretéritas mais favoráveis a formação de Hm, uma vez que o clima da região é frio e úmido e o material de origem é pobre em Fe. Para essa mesma relação foi observada CV médio (37,3%) e valores de assimetria e curtose próximos ao da distribuição do tipo normal.

Tomando como referência os valores de alcance, observa-se que os teores dos óxidos de Fe (Gt e Hm) apresentam maior variabilidade espacial que o teor total de Fe cristalino (Figura 3d, 3g e 3b, respectivamente). Isso provavelmente é atribuído a maior influência das pequenas variações de umidade e teor de matéria orgânica sobre a formação de Hm e Gt do que o teor total de óxidos de Fe. Se levarmos em consideração esses resultados, num estudo só sobre relação $Gt/(Gt+Hm)$, as amostras coletadas a distância superiores a 102,5 m poderiam ser consideradas independentes, enquanto que para um estudo sobre os teores de Gt, essa distância seria de 28,9 m. Na prática, para a determinação dos teores e relação de Gt seria necessária uma malha de amostragem com menor espaçamento entre cada ponto.

O mineral predominante na fração argila foi a Ct, com média de $546,3 \text{ g kg}^{-1}$ e valor máximo observado de $699,9 \text{ g kg}^{-1}$, apresentando também valores de assimetria e curtose próximos a distribuição próxima a normal e com baixa dispersão dos dados (CV = 10,8%). Apesar dos valores

de assimetria e curtose indicarem distribuição próxima a do tipo normal, tal condição não foi observada no teste de normalidade de Shapiro-Wilk (Quadro 1). Com relação a variabilidade espacial da Ct foi observado valor de proporção (75%) na transição entre forte e moderada dependência espacial entre as amostras, e alcance de 22,4 m (Quadro 1 e Figura 3l). Dessa forma, para quantificar esse mineral na fração argila dos solos seria necessário a amostragem similar a realizada em grade regular, evitando grandes generalizações na coleta da amostra para estudos mineralógicos.

Em estudo realizado por Melo et al. (2001a), o índice de assimetria da Ct (IA Ct) mostrou forte e significativa correlação com os teores de K no mineral ($r = 0,98^{***}$), funcionando como importante fonte de nutrientes em solos muito intemperizados. De acordo com os mesmo autores, a assimetria no pico da Ct é decorrente da interestratificação com minerais do tipo 2:1, principalmente esmectita e mica.

Foram observados para os atributos cristalográficos IA Ct e DMC Ct, valores de CV de média variabilidade (42,5 e 27,5% respectivamente), e o valor de proporção para ambos foi classificado como de alta dependência espacial (Quadro 2). O alcance para o DMC Ct foi de 20,5 m enquanto para IA Ct o alcance foi de 45,1 m (Figura 3m e 3n, respectivamente); o que indica a necessidade de malha com espaçamento mais reduzido para o estudo da variabilidade do DMC Ct.

A Gb foi o segundo mineral em termos quantitativos, com média de $114,08 \text{ g kg}^{-1}$ e média variabilidade dos dados (CV de 39,6%). O modelo teórico que melhor se ajustou aos dados da Gb foi o exponencial, com alta dependência espacial (proporção de 80% - Quadro 2 e Figura 3o), e alta variabilidade espacial com alcance de 20,1 m, sendo sua caracterização possível apenas às amostras com localização aleatória dentro malha, uma vez que o espaçamento de 30 m não seria eficiente na caracterização da sua variabilidade espacial.

O valor médio da relação $Ct/(Ct+Gb)$ refletiu a predominância da Ct na fração argila (0,83), não havendo grande variação desses valores, conforme demonstra o CV de 7,6% (Quadro 1). Mesmo com baixo valor de CV, o teste de Shapiro-Wilk indicou que a distribuição desses dados não seguiu a distribuição do tipo normal. Assim como observado para $Gt/(Gt+Hm)$ a relação $Ct/(Ct+Gb)$, apresentou menor variabilidade, ou seja, maior valor de alcance (62 m) do que o mineral isolado.

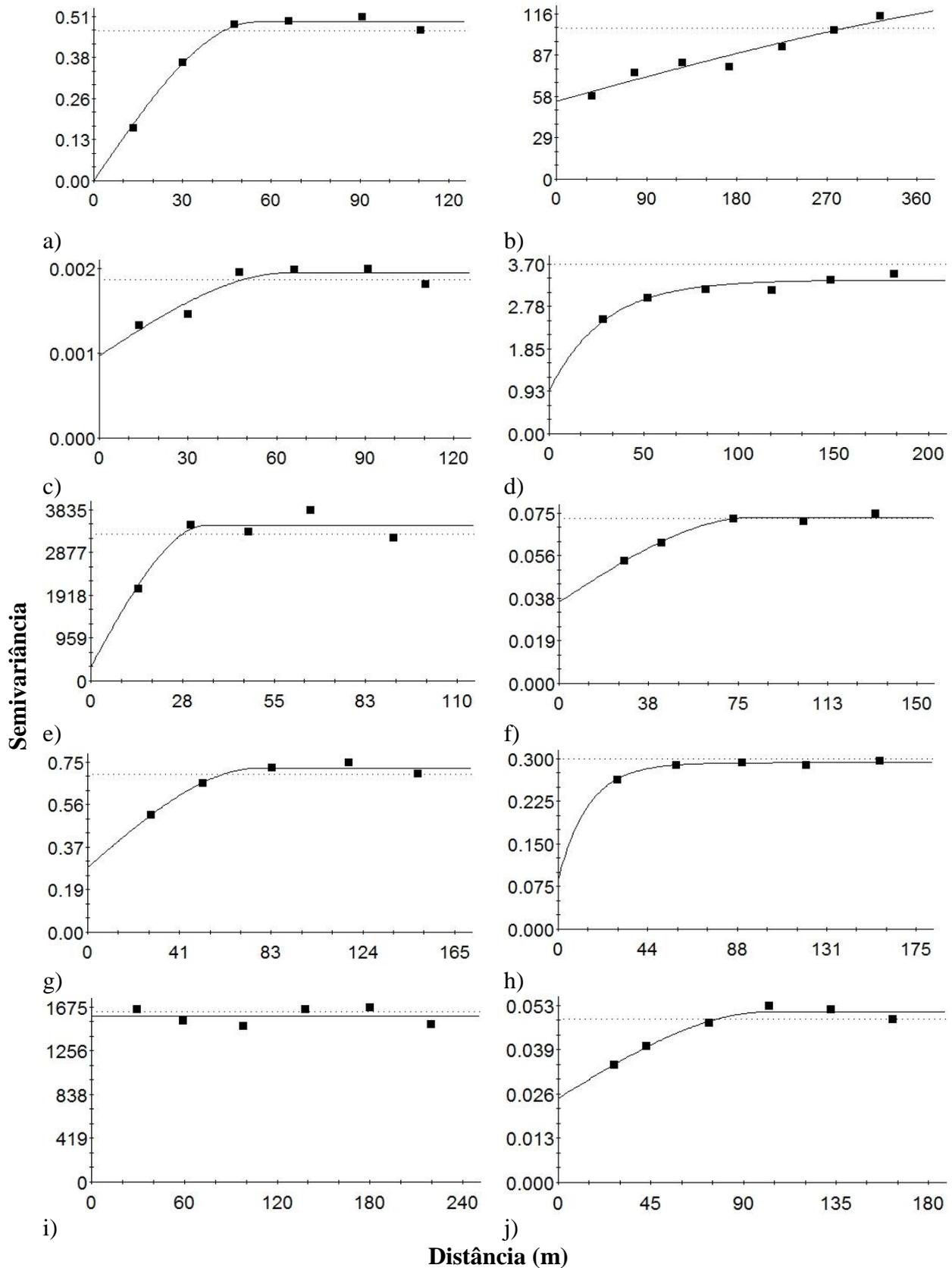


Figura 3. Semivariograma dos atributos mineralógicos: a) Fe amorfo, b) Fe cristalino, c) Fe amorfo/Fe Cristalino, d) Gt, e) SI Gt, f) DMC Gt, g) Hm, h) DMC Hm, i) SI Hm e j) Gt/(Gt+Hm).

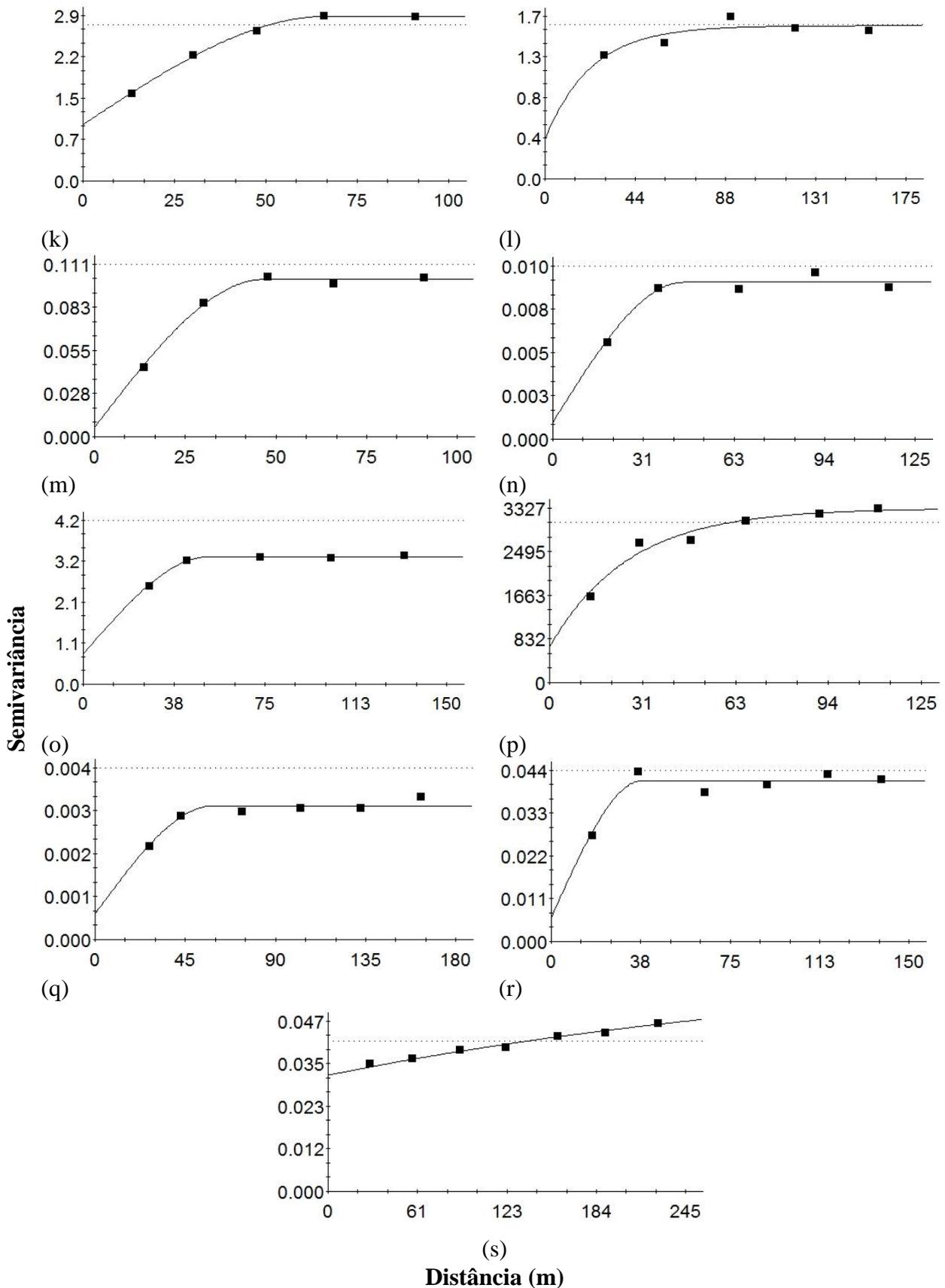


Figura 3. Continuação. Semivariograma dos atributos mineralógicos: k) Al Amorfo, l) Ct, m) Ct DMC, n) IA Ct, o) Gb, p) Gb DMC, q) Ct/(Ct+Gb), r) T^a Ct e s) T^a Gb.

A temperatura de desidroxilação da Gb (T^a Gb) e da Ct (T^a Ct) apresentam forte correlação com o DMC desses minerais estando também relacionado ao maior grau de cristalinidade do mesmo, conforme observado por Melo et al. (2001a). A T^a Gb apresentou distribuição do tipo normal segundo teste de Shapiro-Wilk ao contrário do observado T^a Ct, mesmo ambas apresentando baixo CV. Observou-se menor variabilidade espacial para T^a Gb em relação a T^a Ct, com valores de alcance de 316,2 e 38,4 m respectivamente (Quadro 2).

3.4. CONCLUSÕES

1. Os teores de caulinita tiveram alcance de apenas 22,4 m, distância máxima da malha de amostragem para adequada caracterização da variabilidade desse atributo. Da mesma forma, para os teores de gibbsita e para os atributos cristalográficos da goetita, a malha de amostragem espaçada em 30 m não foi suficiente para caracterizar a variabilidade espacial desses atributos em solos da Formação Guabirotuba, uma vez que a distância máxima da malha de amostragem para adequada estimativa dos valores desses atributos foram menores que o espaçamento utilizado. Apesar desse comportamento, a caulinita apresentou baixo coeficiente de variação (CV = 10,8%).
2. Os teores de Fe cristalino foi o atributo que apresentou menor variabilidade espacial, com alcance de 625 m. Considerando os óxidos de Fe cristalino, os teores de hematita e goetita apresentaram menor alcance.
3. Mesmo com baixo alcance (55,0 m), a grade de amostragem representou satisfatoriamente a variabilidade dos teores de Fe amorfo. Adicionalmente para esse atributo o efeito pepita foi quase nulo, o que indica alta dependência espacial dos valores.

3.5. LITERATURA CITADA

BARBAR, L.C. & MELO, V.F. Variabilidade das características químicas e mineralógicas de solos da região de Curitiba (PR). *Sci. Agr.*, 9:187-197, 2008.

BURROUGH, P.A. Soil variability: a late 20th century view. *Soils Fertilizers* 56, 529–562. 1993.

CAMARGO, L.A.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T. & HORVAT, R.A. Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de um Latossolo sob diferentes formas do relevo. I – Mineralogia da fração argila. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:2269-2277, 2008.

CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KARLEN, D.L.; TURCO, R.F. & KONOPKA, A.E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58:1501-1511, 1994.

CARVALHO, J.R.P.; SILVEIRA, P.M. & VIEIRA, S.R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. *Pesq. Agropec. Bras.*, 37:1151-1159, 2002.

COSTA, A.C.S. & BIGHAM, J.M. Óxidos de ferro. In: MELO, V.F. & ALLEONI, L.R.F., eds. *Química e mineralogia do solo (Parte I – Conceitos básicos)*. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.1, p.505-573, 2009.

CRESSIE, N. *Statistics for spatial data*. New York, John Wiley, 1991. 900p.

GAMMA DESIGN SOFTWARE. *Geostatistics for the environmental sciences (Version 5.0.3 Beta for Windows)*. Michigan, 2000.

GHIDIN, A.A.; MELO, V.F.; LIMA, V.C. & LIMA, J.M.J.C. Topossequências de Latossolos originados de rochas basálticas no Paraná. I – Mineralogia da fração argila. *R.Bras. Ci. Solo*, 30:293-306, 2006.

GONÇALVES, D.; LEITE, W.C.; BRINATTI, A.M.; SAAB, S.C.; IAROSZ, K.C.; MASCARENHAS, Y.P.; CARNEIRO, P.I.B. & ROSA, J.A. Mineralogia de um Latossolo Vermelho distrófico submetido a diferentes manejos por 24 anos. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:2647-2652, 2008, Número Especial.

HUDSON, B.D. The soil survey as paradigm-based science. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56, 836–841. 1992.

HUGHES, J.C. & BROWN, G. A crystallinity index for soil kaolinite and its relation to parent rock, climate and soil maturity. *J. Soil Sci.* 30:557–563. 1979.

JACKSON, M.L. *Soil chemical analysis - advanced course*. Madison: Prentice-Hall, 1979. 895 p.

KÄMPF, N. & CURI, N. Óxidos de ferro: Indicadores de atributos e ambientes pedogenéticos e geoquímicos. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H. & SCHAEFER, C.E.G.R., eds. *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. 1:107-138.

KÄMPF, N.; CURI, N. & MARQUES, J.J. Óxidos de alumínio, silício, manganês e titânio. In: MELO, V.F. & ALLEONI, L.R.F., eds. *Química e mineralogia do solo (Parte I – Conceitos básicos)*. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.1., p.573- 610, 2009.

KÄMPF, N. & SCHWERTMANN, U. Goethite and hematite in a climosequence in Southern Brazil and their application in classification of kaolinitic Soils. *Geoderma*, 29:27-39, 1982.

KLUG, H.P. & L.E. ALEXANDER. *X-ray diffraction procedures for polycrystalline and amorphous materials*. John Wiley & Sons, New York. 1954.

KRAEMER, G.B. Variabilidade espacial dos atributos na delimitação das unidades de mapeamento. Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 2007. 101p. (Tese de Mestrado)

LANDIM, P. M. B.; STURARO, J. R. Krigagem indicativa aplicada à elaboração de mapas probabilísticos de riscos. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/kindicativa.pdf>>. Acesso em: 10/12/2010.

McBRATNEY, A.B. & Odeh, I.O.A. An overview of pedometric techniques for use in soil survey. In: Proceedings of the 16th ISSS Congress, Montpellier, France. 1998.

McKEAGUE, J.A. Manual on soil sampling and methods of analysis. Ottawa: Canadian Society of Soil Science, 1978. 212 p.

MEHRA, O.P.; JACKSON, M.L. Iron oxide removal from soils and clays by a ditionite-citrate system buffered with sodiumbicarbonate. *Clays and Clay Minerals*, 7:317-327, 1960.

MELO, V.F.; SINGH, B.; SCHAEFER, C.E.G.R.; NOVAIS, R.F. & FONTES, M.P.F.F. Chemical and mineralogical properties of kaolinite-rich Brazilian soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 65: 1324-1333, 2001a.

MELO, V.F.; FONTES, M.P.F.; NOVAIS, R.F.; SINGH, B. & SCHAEFER, C.E.G.R. Características dos óxidos de Fe e de Al de diferentes classes de solos. *R. Bras. Ci. Solo*, 25:19-32, 2001b.

MELO, V.F. & WYPYCH, F. Caulinita e Haloisita. In: MELO, V.F. & ALLEONI, L.R.F., eds. *Química e mineralogia do solo (Parte I – Conceitos básicos)*. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.1., p.427-504, 2009.

NORRISH, K. & TAYLOR, R. M. The isomorphous replacement of iron by aluminium in soil goethites. *Journal of Soil Science*, 12:294-906, 1961.

OLIVEIRA JUNIOR, J.C.; SOUZA, L.C.P.; MELO, V.F. Variabilidade de atributos físicos e químicos de solos da Formação Guabirotuba em diferentes unidades de amostragem. *R. Bras. Ci. Solo*, 34:1491-1502, 2010.

RESENDE, M.; CURTI, N.; REZENDE, S.B. & CORRÊA, G.F. *Pedologia: Base para distinção de ambientes*. Viçosa, NEPUT, 1997. 367p.

SALAMUNI, E. & STELLFELD, M.C. Banco de dados geológicos geo-referenciados da Bacia Sedimentar de Curitiba (PR) como base de sistema de informação geográfica (SIG). *Boletim Paranaense de Geociências*, 49:21-32, 2001.

SALDAÑA, A. & IBÁÑEZ, J.J. Pedodiversity, connectance and spatial variability of soil properties, what is the relationship? *Ecological Modeling*, 208:342–352. 2007.

SCHWERTMANN, U.; FITZPATRICK, R.W.; TAYLOR, R.M. & LEWIS, D.G. The influence of aluminium on iron oxides. Part II. Preparation and properties of Al-substituted hematites. *Clays Clay Miner.*, 29:269-276, 1979.

SCHWERTMANN, U. & TAYLOR, R.M. Iron oxides. In: DIXON, J.B. & WEED, S.B., eds. *Minerals in soil environments*. 2.ed. Madison, Soil Science Society of America, 1989. p.379-438. (Book Series, 1)

SCHULTZ, L.G., A.O. SHEPARD, P.D. BLACKMON & H.C. STARKEY. Mixed-layer kaolinite-montmorillonite from the Yucatan Peninsula, Mexico. *Clays Clay Miner.* 19:137–150, 1971.

SINGH, B. & GILKES, R. J. Concentration of iron oxides from soils clays by 5 M NaOH treatment: The complete removal of sodalite and kaolin. *Clay Minerals*, 26:463-472, 1991.

SNEDECOR, G.W. & COCHRAN, W.G. *Statistical methods*. 6.ed. Ames, Iowa State University, 1967. 593p.

TORRENT, J.; CABEDO, A. Sources of iron oxides in reddish brown soil profiles from calcarenites in Southern Spain. *Geoderma*, 37:57-66, 1986.

VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H. & SCHAEFER, C.E.G.R., eds. *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1. p.1-54

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

WEBSTER, R. & OLIVER, M.A., 1990. *Statistical Methods in Soil and Land Resource Survey*. Oxford University Press, Oxford.

ZHU, Q. & LIN, S. Comparing ordinary kriging and regression kriging for soil properties in contrasting landscapes. *Pedosphere* 20: 594–606. 2010.

4. ÍNDICES DE REPRESENTAÇÃO DA PAISAGEM E DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE ATRIBUTOS MINERALÓGICOS DE SOLOS

RESUMO

A assembleia mineralógica do solo é resultante de diversos fatores e processos pedogenéticos, influenciando nas características físicas e químicas do solo. Com a tendência dos estudos do solo em quantificar seus atributos de forma georreferenciada, caminha-se para a pedometria, onde o uso de índices de representação da paisagem assume importante papel na caracterização de diferentes superfícies submetidas a diferentes processos pedogenéticos. Este trabalho teve como objetivo estudar a distribuição espacial dos atributos mineralógicos do solo usando os índices de representação da paisagem como ferramenta na caracterização dos ambientes de maiores ou menores teores dos minerais, além de suas relações com os atributos químicos do solo. A área do estudo situa-se na Fazenda Experimental do Canguiri, da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR. As amostras foram coletadas em malha regular, em um total de 135 pontos. Na fração argila das amostras, após extração DCB, foram determinados os teores de Ct e Gb por termogravimetria (TG) e os picos de temperatura de desidroxilação de ambos. Para determinação dos atributos cristalográficos desses minerais foi utilizada difratometria de raios X. Nos maiores valores de Al amorfo, observou-se uma tendência de maiores valores de CO onde os índices de representação da paisagem indicam áreas com relevo mais suave e predominância de processos de pedimentação. Na relação $Ct/(Ct+Gb)$ os índices distinguiram áreas com maior valor da relação, conseqüentemente maior proporção de Ct, em áreas com cotas mais próximas ao canal de drenagem e aporte de sílica enquanto áreas com maior proporção de Gb foram caracterizadas por estarem em topos planos. Os atributos mineralógicos estudados nesse trabalho apresentaram influência em alguns atributos químicos do solo e os índices de representação da paisagem apresentaram resultados satisfatórios na caracterização de diferentes superfícies, estando estas relacionadas à formação de alguns desses atributos mineralógicos.

Termos de indexação: caulinita, gibbsita, goetita, hematita, índices de representação da paisagem.

SUMMARY: SPATIAL DISTRIBUTION OF SOIL MINERALOGICAL ATTRIBUTES, ITS RELATIONSHIP WITH SOIL CHEMICAL ATTRIBUTES AND LANDSCAPE INDEX

Mineral assemblage of the soil is the result of several factors and pedogenic processes, determining physical and chemical properties. With a tendency of the studies about soil to quantify in georeferenced way its attributes, to pedometrics, where the use of landscape representation

indexes plays an important role in characterizing different surfaces under different pedogenic processes. This work aims to study the behavior of the attributes of kaolinite (Ka), gibbsite (Gb), hematite (Hm), goethite (Gt), amorphous Fe and Al in soil chemical properties as well as the use of indexes to represent the landscape as a support to the discussions about the occurrences of chemical and mineralogical attributes in different surface locations. The study area is located at the Canguiri Experimental Farm of the Federal University of Paraná, Curitiba, Brazil. Samples were collected at regular grid intervals, for a total of 135 points. In the clay fraction of samples after DCB extraction, were found levels of Ct and Gb by thermogravimetry (TG) and the peak temperature of dehydroxylation of both. To determine the crystallographic characteristics of these minerals X-ray diffraction was used. In larger amounts of amorphous Al and CO, a trend was observed where the landscape representation indexes indicate areas with smooth topography and predominance of sedimentation processes. In relation Ct/(Ct + Gb) indexes distinguished areas with the highest ratio, hence higher proportion of Ct, in areas with elevations nearest to the drainage channel and input of silica while areas with higher proportion of Gb were characterized by being on flat plains. The mineralogy studied in this work had an influence on some soil chemical properties and landscape representation indexes showed satisfactory results in the characterization of different surfaces, as those related to the formation of some of these mineralogical attributes.

Index terms: kaolinite, gibbsite, goethite, hematite, landscape representation indexes.

4.1. INTRODUÇÃO

O conhecimento da distribuição espacial dos solos, bem como os fatores que influenciam nessa distribuição, é de fundamental importância no levantamento dos recursos naturais e estabelecimento de estratégias de desenvolvimento para uma região, onde a adequada utilização desse recurso, com menor impacto possível, permite o equilíbrio do meio e que gerações futuras possam desfrutar dos mesmos recursos. Para obtenção desse conhecimento é necessário integrar os estudos pedológicos com estudos de outras áreas de conhecimento, como por exemplo, a hidrologia, estratigrafia e geomorfologia, para melhor entendimento dos processos pedogenéticos (Vidal-Torrado et al., 2005; Cunha et al., 2005). Assim solos de uma mesma região e mesmo material de origem podem apresentar propriedades distintas quando em diferentes posições na paisagem, condições de umidade, drenagem e relevo (Ghidin et al., 2006a,b; Barbar & Melo, 2008; Camargo et al., 2008), influenciando também em seus aspectos ambientais e agrônômicos (Reyniers et al., 2005; Souza et al., 2006; Chi et al., 2009).

A constituição mineralógica do solo é o resultado da interação de diversos fatores e processos pedogenéticos, refletindo a condição ambiental a que foi exposto ao longo do tempo (White & Brantley, 1995). Os minerais da fração argila mais freqüentes são a caulinita (Ct), gibbsita (Gb), hematita (Hm) e goetita (Gt). A Ct, mineral mais abundante na fração argila do solo (Pedrotti et al., 2003; Melo et al., 2008b; Camargo et al., 2008; Melo & Wypych, 2009), por apresentar ponto de carga zero (PCZ) abaixo do pH da maioria dos solos brasileiros, tem predomínio de cargas negativas (Fontes et al., 2001; Melo et al., 2008a), com grande importância na retenção de nutrientes e desenvolvimento de plantas como também na retenção de poluentes, como metais pesados (Melo & Wypych, 2009).

Já ao contrário, a hematita (Hm), goetita (Gt) e a gibbsita (Gb) apresentam PCZ acima do pH da maioria dos solos, o que favorece a formação de cargas positivas (CTA) (Costa & Bigham, 2009; Kampf et al., 2009), podendo reter fosfatos e nitratos, reduzindo o problema de eutrofização das águas (Kampf et al., 2009). No que diz respeito a morfologia e estrutura do solo, esses minerais, por possuírem formato esférico atuam como desorganizadores do ajuste face a face dos minerais filossilicatados, responsáveis pela formação de estruturas pequenas e granulares, o que melhora a porosidade e drenagem do solo (Resende et al., 1997; Ghidin et al., 2006a; Melo et al., 2008a).

Ghidin et al. (2006a) observaram em duas toposequências de Latossolos do estado do Paraná que os teores de Ct aumentaram no terço inferior da encosta devido a lixiviação de sílica, que em maior concentração inibiu a formação de Gb (Hsu, 1989). Na mesma posição da paisagem os autores observaram maiores teores de minerais de baixa cristalinidade em decorrência dos maiores teores de C orgânico e pior drenagem, inibindo a cristalização desses minerais (Kampf & Schwertmann, 1982; Wowk, 2003; Pires, 2004). Estudando a influência da pedoforma, Camargo et al. (2008a) observaram maiores valores para o diâmetro médio do cristal (DMC) para Gt, Hm e Gb em superfície côncava-convexa.

Com o auxílio do modelo numérico do terreno (MNT) são obtidos alguns índices de representação da paisagem (índices de paisagem), dentre os quais se destacam: Altitude Sobre o Canal de Drenagem, Curvatura, *Multiresolution Index of Valley Bottom Flatness* (MRVBF), Plano de Curvatura, Perfil de Curvatura, Fator LS, Declividade e Índice de Umidade. Com o uso dessas ferramentas, a visualização e correlação dos atributos do solo com a paisagem ganham maior sustentação (Vidal-Torrado et al., 2005; Camargo et al., 2008). Os índices de paisagem se destacam por representar de forma numérica os atributos da paisagem, podendo associar-se aos fatores e processos pedogenéticos bem como a sua intensidade de ocorrência de acordo com os valores obtidos, utilizado os mesmos para predição de determinadas classes e atributos dos solos (Ippoliti et al., 2005; Sirtoli, 2008; Prates, 2010). Com a crescente preocupação em relação a qualidade do

meio-ambiente, otimização de recursos e dados mais precisos, a descrição de forma quantitativa e mais objetiva dos atributos do solo apresentam grande importância (McBratney et al., 2000; Mendonça-Santos & Santos, 2007).

Pei et al. (2010) e Hancock et al. (2010) encontraram maior acúmulo de matéria orgânica em áreas com maior Índice de Umidade, fator que retarda o processo de decomposição. Já Moore et al. (1993), Chagas (2006) e Sirtoli (2008), utilizando o Índice de Umidade e a declividade, encontraram GLEISSOLOS e ORGANOSSOLO em condições de relevo mais plano e alto valor de umidade.

Outro índice de representação da paisagem o *Multiresolution Index of Valley Bottom Flatness* (MRVBF) distingue fundos de vales planos de encostas (Robert et al., 1997; Wang & Laffan, 2009), sendo que valores inferiores a 0,5 indicam áreas de erosão e valores acima de 0,5 indicam áreas de sedimentação (Mckenzie & Gallant, 2007).

O Plano e o Perfil de Curvatura estão relacionados respectivamente à taxa de variação da declividade e do aspecto ao longo da curva de nível. O primeiro mede a propensão de a água convergir (valores positivos) ou divergir (valores negativos) à medida que atravessa o terreno, e o segundo caracteriza diferentes velocidades do fluxo da água e processo relacionados ao transporte de sedimentos, onde valores positivos indicam áreas convexas e valores negativos indicam áreas côncavas (Valeriano, 2008).

A maioria dos trabalhos que utilizam os índices de paisagem estuda sua eficiência quanto à predição de atributos físicos ou morfológicos do solo (Mckenzie & Ryan, 1999; Chagas, 2006; Bock & Kothe, 2008; Gilo & Etzelmuller, 2009; Hancock et al., 2010) sem a indagação sobre a mineralogia dos mesmos, que é essencial para o entendimento do comportamento agrícola e funcionalidade ambiental. Diante do exposto, espera-se que alguns índices de representação da paisagem sejam eficientes na caracterização de processos pedogenéticos e diferentes ambientes.

O trabalho objetivou estudar a distribuição espacial dos atributos mineralógicos do solo usando os índices de representação da paisagem como ferramenta na caracterização dos ambientes de maiores ou menores teores dos minerais.

4.2. MATERIAL E MÉTODOS

Área do estudo e coleta das amostras

A área de estudo ocupa uma gleba de aproximadamente 10 ha e está situada na Fazenda Experimental do Cangüiri (CEEX), da Universidade Federal do Paraná (UFPR), no município de Pinhais, região metropolitana de Curitiba (PR), entre as coordenadas geográficas: -25°22'38" e -

25°24'46" de latitude Sul, -49°09'05" e -49°06'40" de longitude Oeste. A encosta em que se encontra a área possui orientação SO-NE, sua amplitude altimétrica é de 35 m, com altitude mínima e máxima de 905 e 940 m respectivamente (Figura 1a).

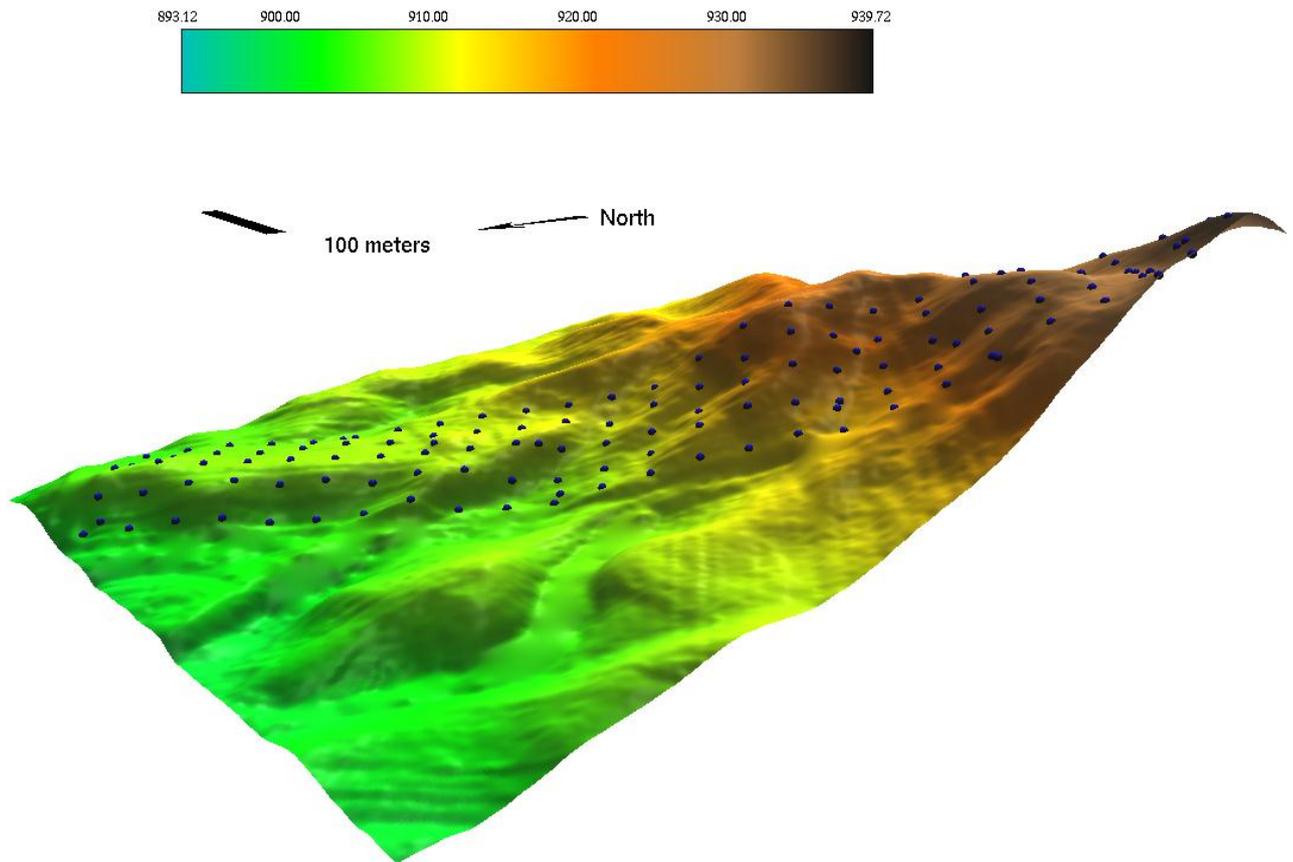
O substrato geológico da área relaciona-se a Formação Guabirotuba, com sedimentos originados do intemperismo das rochas do embasamento cristalino durante períodos úmidos, com a sedimentação e retrabalhamento desse material ocorrendo na alternância de ciclos úmidos e semi-áridos. A litoestatigrafia é composta por argilito rico em esmectita, seguindo-se de arcósios e depósitos rudáceos, além de pequenos horizontes de caliche (Salamuni & Stellfeld, 2001).

A coleta das amostras e as descrições morfológicas foram efetuadas por Kremmer (2007). O mesmo autor coletou monólitos em um tubo de PVC de 110 cm de altura dentro de um trado mecânico acoplado a tomada de potência de um trator, utilizando uma malha regularmente espaçada em 30 m, totalizando 135 pontos amostrais (Figura 1b), sendo os mesmos alocados a campo com auxílio de estação total. Os valores de mínima, máxima, média e coeficiente de variação (CV) obtidas por Kremmer (2007) para os atributos químicos e físicos do horizonte B dos solos estão descritas no Quadro 1. Para a análise mineralógica, o presente trabalho utilizou apenas a fração argila do horizonte B de cada amostra. As classes de solos da área em escala de alta intensidade são apresentadas na Figura 2.

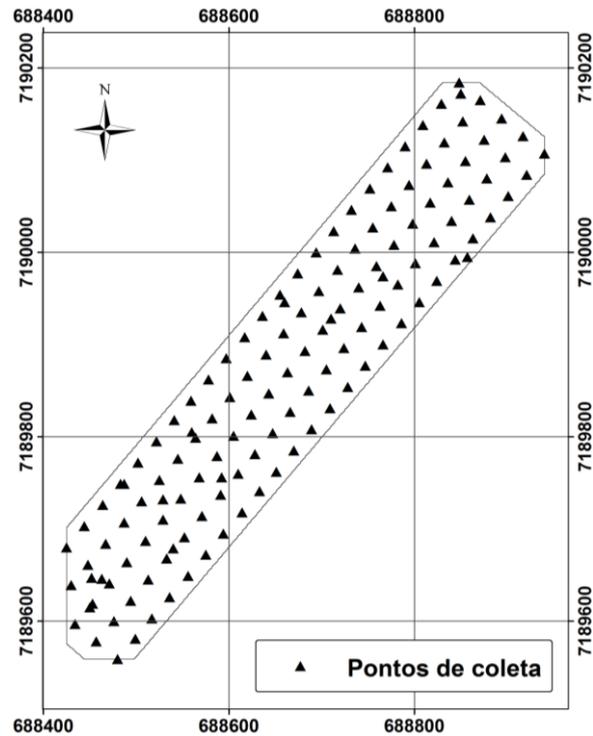
Quadro 1. Valores mínimos, máximos, média e coeficiente de variação (CV) para os atributos químicos e físicos do horizonte B das amostras de solo⁽¹⁾.

Atributo	Mínimo	Máximo	Média	CV (%)	Assimetria	Curtose	W ⁽²⁾
pH _{água}	4,42	6,46	5,21	5	0,69	1,03	0,00
pH _{KCl}	4,01	4,98	4,31	6	0,34	0,33	0,14*
Al ³⁺ (cmolc dm ⁻³)	0,11	7,69	2,47	117	2,32	5,60	0,00
Ca ²⁺ (cmolc dm ⁻³)	0,31	2,10	0,80	35	-0,03	0,29	0,18*
Mg ²⁺ (cmolc dm ⁻³)	0,04	2,39	0,68	34	-0,26	-0,19	0,18*
K ⁺ (cmolc dm ⁻³)	0,01	0,61	0,05	78	1,66	2,42	0,00
P (mg dm ⁻³)	0,10	3,42	0,34	99	5,71	45,96	0,00
H (cmolc dm ⁻³)	0,45	11,27	3,95	25	0,66	1,37	0,02
CO (g dm ⁻³)	3,95	36,96	9,70	20	-0,69	2,73	0,00
Argila (g kg ⁻¹)	344	825	580	13	0,57	0,45	0,02
Silte (g kg ⁻¹)	171	633	409	14	-0,59	0,55	0,02
AF (g kg ⁻¹)	1	12	7	29	0,80	1,58	0,00
AG (g kg ⁻¹)	0	20	4	42	1,98	4,73	0,00
AT (g kg ⁻¹)	3	24	11	28	1,01	1,23	0,00

⁽¹⁾Dados adaptados de Kremmer (2007): pH em água e em KCl 1 mol L⁻¹; Ca²⁺, Mg²⁺ e Al³⁺ trocáveis (KCl 1 mol L⁻¹); K⁺ trocável e P disponível (Mehlich 1); H – acidez potencial não trocável (acetato de Ca 1 mol L⁻¹ pH 7,0); carbono orgânico determinado pelo método espectrofotométrico (EMBRAPA, 1997) ⁽²⁾ valor *p* para o teste de Shapiro-Wilk (W), * - atributo com distribuição normal a 5% de probabilidade.



a)



b)

Figura 1. Relevo em 3D da área de estudo situada na Fazenda Experimental do Cangüiri (a) e distribuição dos pontos de amostragem em malha regular e mais 10% de pontos com posicionamento aleatório dentro da malha regular.

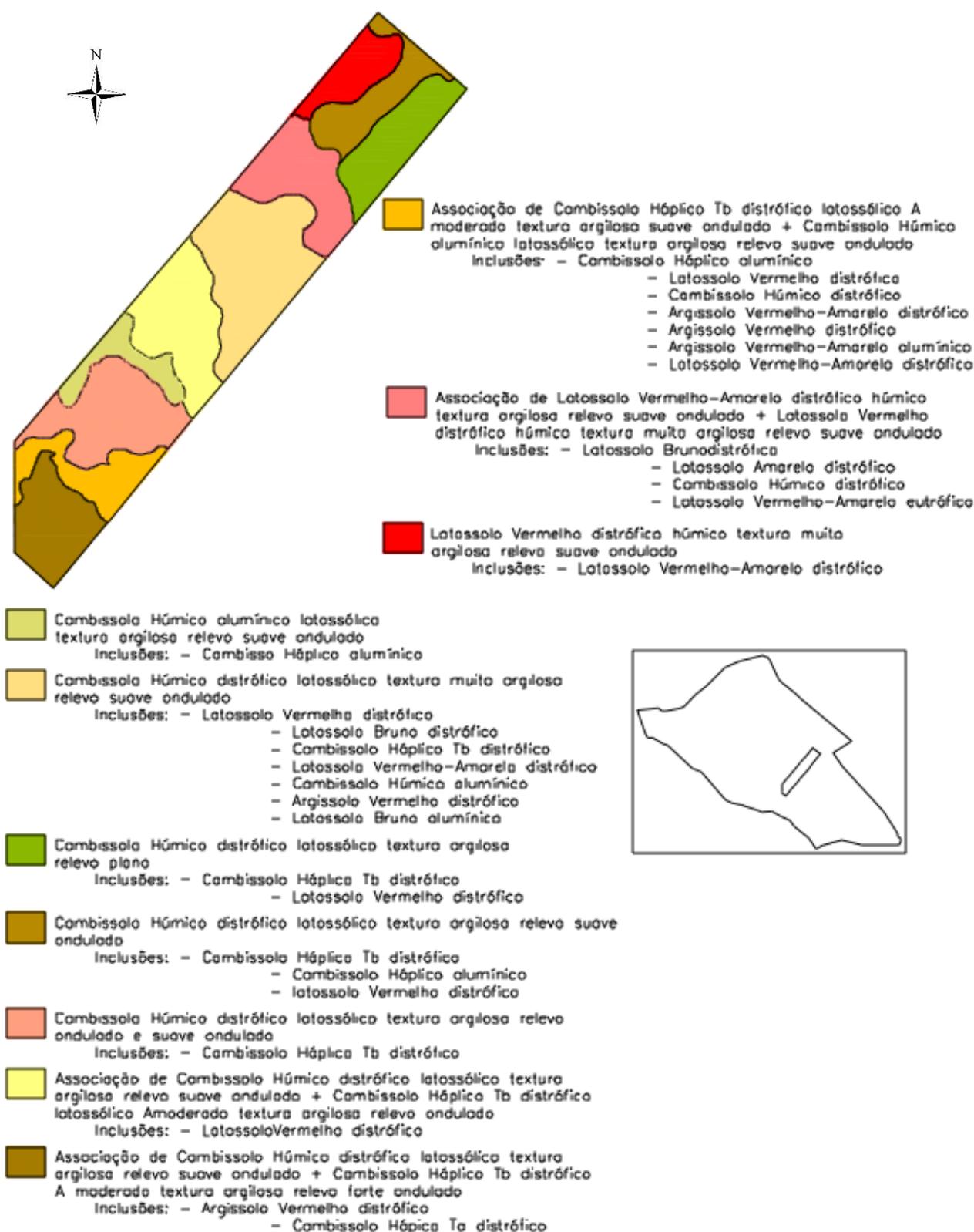


Figura 2. Mapa de solos da área de estudo (Kremer, 2007), apresentado em detalhe sua localização dentro do Centro de Estações Experimentais da Fazenda do Canguiri (CEEX Canguiri), da Universidade Federal do Paraná (UFPR).

Análises de laboratório

As amostras foram secas ao ar e passadas em peneira com malha de 2 mm para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA). Para as análises mineralógicas a matéria orgânica foi eliminada com peróxido de hidrogênio (H₂O₂ 15% vol/vol) em banho-maria. As frações do solo foram dispersas com NaOH 0,2 mol L⁻¹ (Jackson, 1979), a areia foi retida em peneira com malha de 0,053 mm e a fração silte e argila separadas por sedimentação com base na lei de Stokes. Todos os procedimentos e análises mineralógicas são apresentados no Capítulo 3.

Interpolação dos atributos mineralógicos pelo método da krigagem

Uma vez conhecido o semivariograma do atributo em questão e o mesmo apresentando dependência espacial entre as amostras, é possível interpolar valores para qualquer posição dentro da área em questão, com a vantagem de variância mínima dos valores e reduzindo gastos (Vieira, 2000). Para a interpolação dos atributos mineralógicos utilizou-se o método da krigagem ordinária, a qual se baseia na estrutura espacial obtida pelos semivariograma de cada atributo, apresentados no capítulo anterior.

Modelo Numérico do Terreno (MNT) e Índices de representação da paisagem

Os dados de altimetria da área de estudo foram obtidos através de imageamento por laser scanning (LIDAR) e cedidos pelo Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC). Para eliminar a interferência da vegetação sobre o modelo do terreno, foi realizada a filtragem dos dados no programa ALDPAT 1.0 através da função *Morph Filter*. Após a filtragem, o modelo numérico do terreno (MNT) foi gerado com resolução de 5 m, em seguida, utilizando o programa SAGA 2.0, foram gerados os índices de representação da paisagem (Quadro 2): Altitude sobre o canal de drenagem, Declividade, Fator LS, Índice de Umidade, *Multiresolution index of Ridge Top Flatness* (MRRTF), *Multiresolution Index of Valley Bottom Flatness* (MRVBF), Perfil de Curvatura e Plano de Curvatura.

Para caracterizar as diferentes paisagens foi realizado o agrupamento de classes pela mínima distância Euclidiana (Isocluster) em função dos índices de representação da paisagem. Para cada atributo tomou-se como base as três áreas com os maiores valores (A1, A2 e A3) e as três áreas com menores valores (B1, B2 e B3), em que para cada área foi extraído o valor médio de cada índice de representação da paisagem, a fim de observar qual índice poderia explicar a ocorrência do maior ou menor valor do atributo.

Quadro 2. Métodos para a geração dos Índices de Representação da Paisagem

Índices de Representação da Paisagem	Método
Altitude sobre o canal de drenagem	Olaya & Conrad, 2008
Curvatura	Zevenbergen & Thirne, 1987
MRVBF	Olaya & Conrad, 2006
MRRTF	Olaya & Conrad, 2006
Plano de curvatura	Zevenbergen & Thirne, 1987
Perfil de curvatura	Zevenbergen & Thirne, 1987
Fator LS	Olaya & Conrad, 2008
Declividade	Zevenbergen & Thirne, 1987
Índice de Umidade	Olaya & Conrad, 2008

Fonte: SAGA (2005).

Análise estatística

Com o objetivo de verificar as relações entre os atributos mineralógicos com os índices de representação da paisagem e atributos químicos desses solos, foi realizada uma análise de correlação linear simples (Pearson) utilizando o programa Statistica for Windows (Statsoft, 2007).

4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Índices de representação da paisagem

O Índice de Altura sobre o canal de drenagem está relacionado a distância vertical (cota altimétrica) do ponto no terreno em relação ao canal de drenagem. Na Figura 3b pode-se observar que as áreas com maior valor (maior altitude sobre o canal de drenagem) situam-se mais ao sul da área e na posição mais alta da paisagem, com valores de até 12,8 m acima do canal de drenagem. Além indicar a proximidade dos canais de drenagem e por consequência as condições de drenagem, este índice pode indicar a energia potencial da água (Romão, 2006), a qual também atuará na ação dos processos erosivos, conforme Piedade (2010), que descreveu a parte superior dessa encosta como área de intensos processos erosivos, além da qual também possui os maiores valores de declividade da área (Figura 3c).

Tomando como base os estudos de Lin et al. (2006) e Prates (2010), em que foram observados solos com má condição de drenagem para valores de índice de umidade acima de 8, maior ocorrência de áreas nessas condições foram perto aos canais de drenagem e alguns locais na parte mais baixa da paisagem, mais ao norte (Figura 3d). Esse índice tem sido usado freqüentemente para a predição de maiores teores de matéria orgânica do solo, pois estima o balanço entre acúmulo de água e condições de drenagem em escala local (Pei, et al., 2010, Hancock et al., 2010).

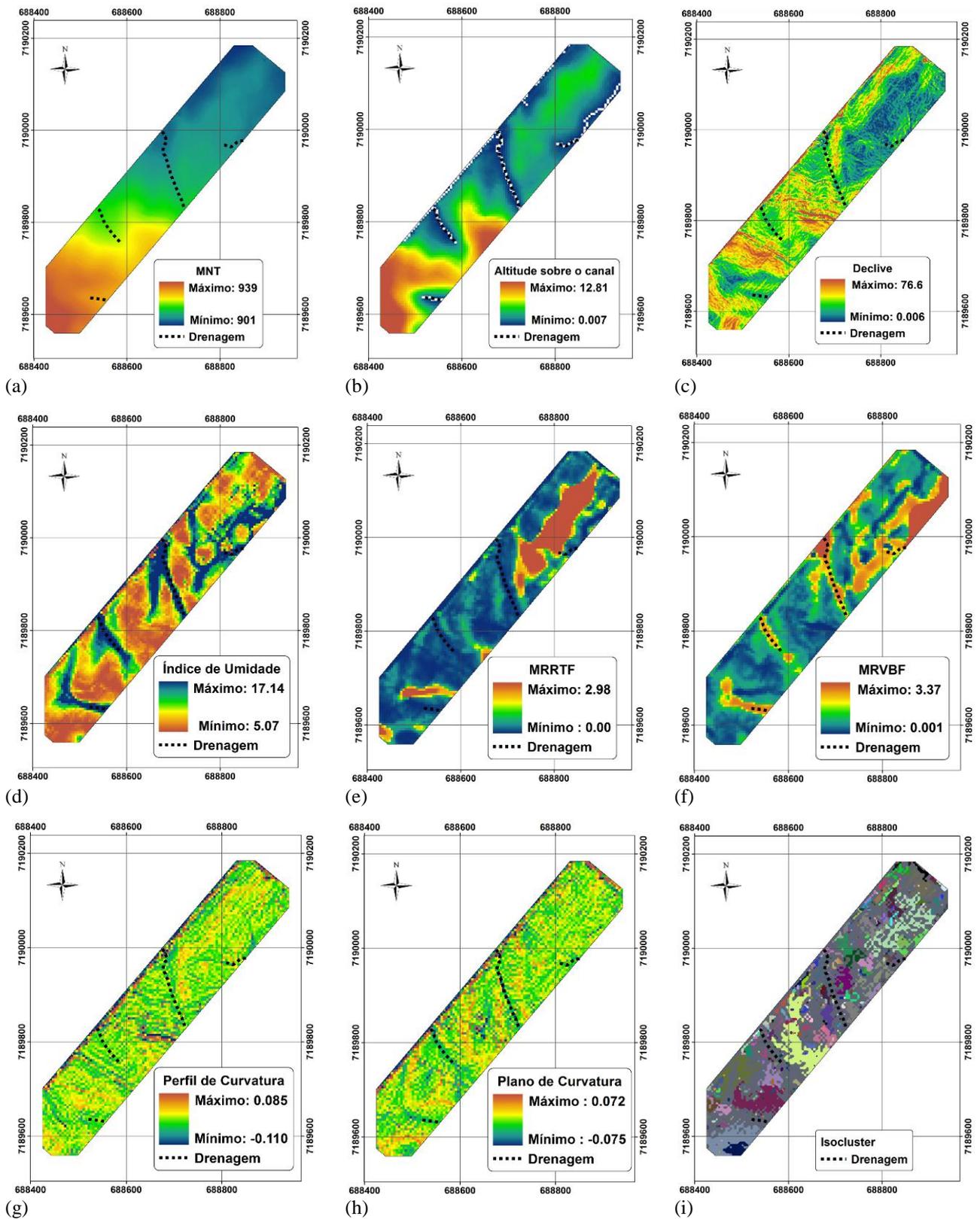


Figura 3. Índices topográficos gerados a partir do MNT da área: a) MNT, b) Altitude Sobre o Canal de Drenagem, c) Declive, d) Índice de Umidade, e) MRRTF, f) MRVBF, g) Perfil de Curvatura, h) Plano de Curvatura e i) Isocluster dos índices.

Ainda em relação ao índice de umidade foi possível observar que os maiores valores desse índice situaram-se em áreas semelhantes aos maiores valores da relação $Gt/(Gt+Hm)$ (Figura 3d e 4h), corroborando com Ghidin et al. (2006a), que encontraram maior teor de Gt em áreas mais baixas com maior teor de umidade, fato que favorece a formação de Gt em detrimento da Hm (maiores valores da relação).

O índice *Multiresolution Index of Ridge Top Flatness* (MRRTF) indica o quão plano é o topo de uma encosta. É possível observar que as áreas que apresentaram maiores valores de MRRTF são semelhantes às áreas que apresentaram maiores teores de Gb (Figuras 3e e 5c). Segundo Ghidin et al. (2006a) nas áreas de topo, devido a lixiviação preferencial de Si, há condições para a cristalização do Al na forma de Gb. Já para o índice *Multiresolution Index of Valley Bottom Flatness* (MRVBF) distingue fundos de vales de encostas, onde as cores amareladas a vermelho indicam áreas em que há excesso de água (Figura 3f), estando a maioria dessas áreas localizadas próximas ao canal de drenagem. Ainda com base no índice MRVBF é possível observar a semelhança entre os maiores valores deste índice com os maiores teores de Ct (Figura 3f e 5b), fato que se deve a acúmulo de Si, lixiviado das encostas e que é acumulada nas posições mais baixas da paisagem e com maior umidade, favorecendo a neogênese deste mineral (Ghidin et al., 2006a).

Devido à precisão do levantamento por imageamento laser scanner, com pontos cotados a cada 0,3 m e mais de 44 mil pontos na área após a filtragem, os índices de Perfil de Curvatura e Plano de Curvatura apresentaram aspecto de irregular (Figura 3g e 3h), em que a curtas distâncias a superfície muda de côncavo-convergente (valores negativos de Perfil e Plano de curvatura respectivamente) para convexo-divergente (valores positivos de Perfil e Plano de curvatura respectivamente). Mesmo assim, é possível observar a predominância de áreas com Perfil de Curvatura côncavo (coloração variando de azul a verde) na região central da área.

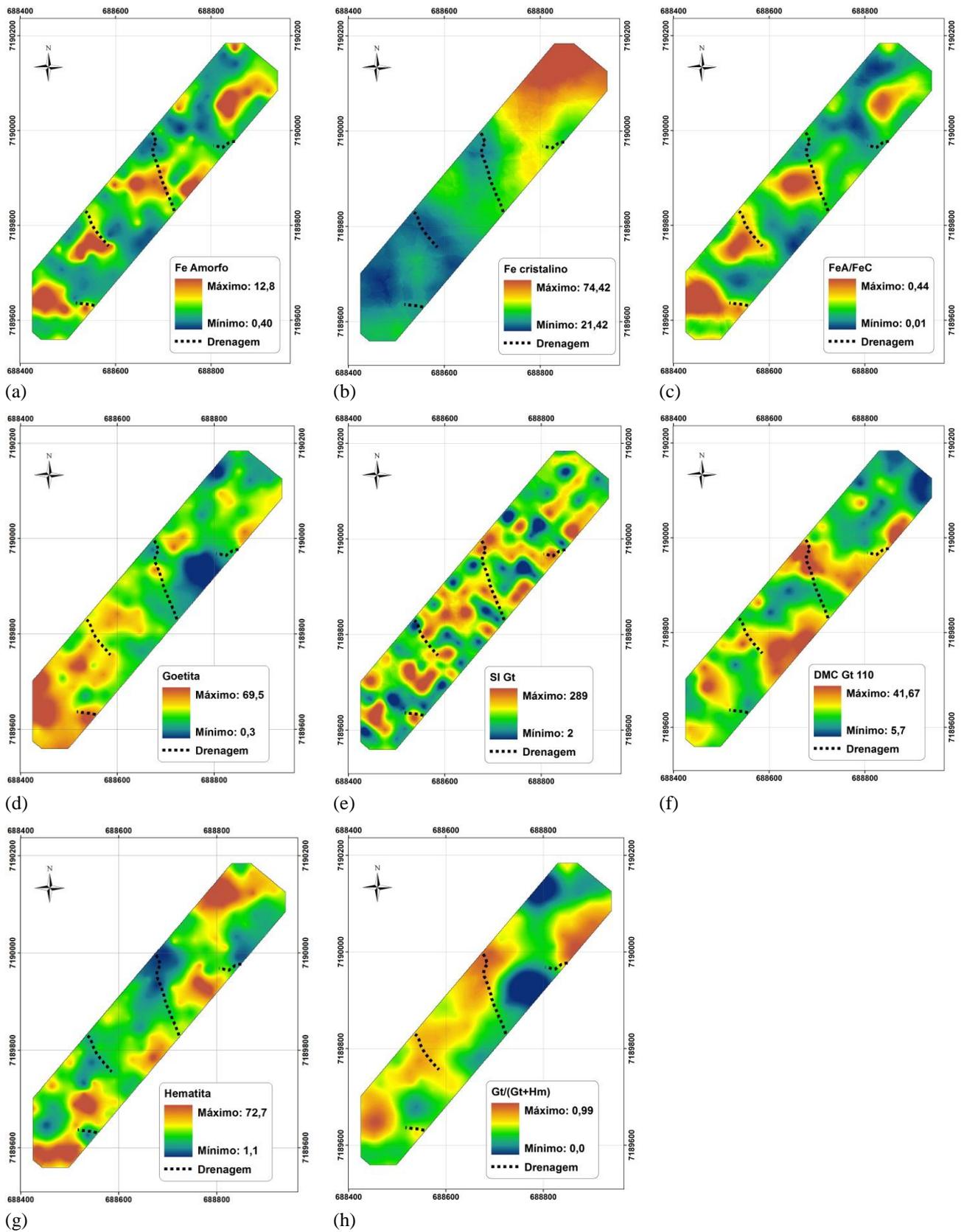


Figura 4. Distribuição espacial dos minerais, seus atributos e as linhas de drenagem. a) Fe Amorfo extraído com oxalato de amônio, b) Fe cristalino (FeDCB-FeOA), c) FeA/FeC, d) Gt, e) SI Gt, f) Gt DMC, g) Hm e h) Gt/(Gt+Hm).

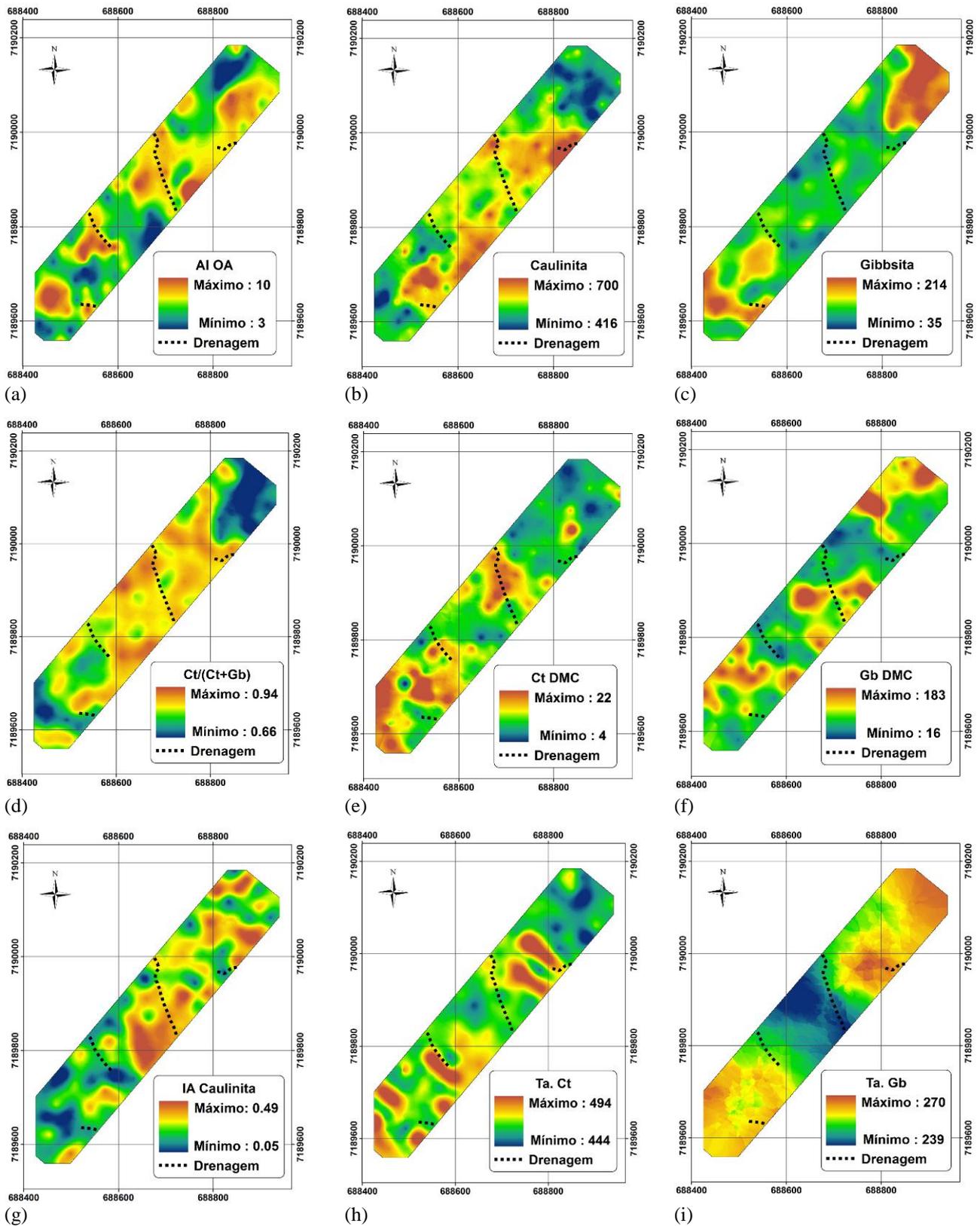


Figura 5. Distribuição espacial dos minerais, seus atributos e as linhas de drenagem. a) Alumínio Amorfo extraído com oxalato de amônio, b) Caulinita, c) Gibbsita, d) $Ct/(Ct+Gb)$, e) Ct DMC, f) Gb DMC, g) Índice de Assimetria da Caulinita, h) Temperatura de desidroxilação da caulnita, i) Temperatura de desidroxilação da gibbsita.

Atributos mineralógicos

As áreas com os maiores teores de Al amorfo (A1 a A3) foram observadas em declividades menos acentuadas, variando entre 4,9 a 7,6%, e em superfícies côncavas com fluxo de água ligeiramente divergente (valor negativo para perfil de curvatura e positivo para plano de curvatura - Quadro 3), com exceção para a área A3 que foi caracterizada como superfície côncava com fluxo de água convergente. Já as áreas com menores teores de Al amorfo (B1 a B3) foram caracterizados por superfícies convexas com fluxo de água divergente. O índice MRVBF abaixo de 0,5 nas áreas com menores teores de Al amorfo caracterizam predominância de processos erosivos (Mckenzie & Gallant, 2007; Prates, 2010), ao contrário do que foi observado nos maiores teores, em que valores de MRVBF acima de 0,5 indicam maior sedimentação e acúmulo de MO. Vários trabalhos demonstram o efeito positivo da MO na manutenção de minerais amorfos na fração argila (Kämpf & Schwertmann, 1982; Wowk, 2003; Pires, 2004).

Foi observado para o Fe amorfo que seus maiores teores foram encontrados em áreas com cotas mais próximas ao canal de drenagem do que em relação as áreas com menores teores, com exceção para a área A2 em que o valor de 0,67 para o índice MRVBF indicou processos de sedimentação e acúmulo de CO (Mckenzie & Gallant, 2007; Prates, 2010), sendo que para o Fe cristalino os valores desse índice mais próximos de 0,5 distinguiram áreas mais estáveis, com processos erosivos/sedimentares menos acentuados, que em conjunto com os menores teores de CO (Quadro 4) favorecem a maior ocorrência de Fe na forma mais cristalina. No Quadro 4, fica destacado a influência da MO nos teores de Al amorfo e Fe amorfo, onde menores teores de Al amorfo apresentaram valores de CO entre 4,96 e 5,22 g dm⁻³ e nos maiores teores, o CO variou de 9,59 a 11,03 g dm⁻³, enquanto para as áreas com maiores teores de Fe amorfo os valores de CO variaram de 14,95 a 18,00 g dm⁻³, e para os menores teores de Fe amorfo o CO variou de 5,71 a 11,08 g dm⁻³.

Os menores valores para a relação Fe amorfo/Fe cristalino (FeA/FeC) indicam o predomínio do Fe na forma mais cristalina. Em duas áreas com os menores valores para essa relação (B2 e B3), observou-se perfil de curvatura mais convexa e fluxo de água divergente (Quadro 4) caracterizando boa condição de drenagem, ao contrário da área B1 que apresentou perfil e plano de curvatura côncavo-convergente (-0,0016 e -0,0002 respectivamente), mas por estar localizado em uma área de topo plano (MRRTF = 2,78) permitiu o maior predomínio da forma cristalina de Fe (Ghidin et al., 2006a).

Dependendo das condições pedoambientais, ocorre a formação de Gt em detrimento da Hm, favorecido, principalmente, pelos baixos teores de Fe no material de origem, alto teor de matéria orgânica e umidade (Schwertmann & Taylor, 1989). Foi observado para as áreas com os maiores

teores de Gt clara tendência de maiores teores de CO (Quadro 4), ao passo que as áreas B1 e B2 apresentaram menores valores por estarem em posição de topo plano (MRRTF = 2,85 e 2,76 respectivamente) e a área B3 apresentou perfil convexo com fluxo de água divergente (Quadro 5), dificultando o acúmulo de CO. Para a Hm, os valores de MRVBF se destacaram na distinção das áreas onde maiores valores do índice foram observados para as áreas com menores valores de Hm devido a estarem situadas em fundos de vales mais planos, onde ocorre grande acúmulo de água, além de possuir altos teores de CO (Quadro 4).

Os maiores valores da relação $Gt/(Gt+Hm)$, e conseqüentemente maior predomínio de Gt, foram observados em cotas altimétricas mais próximas ao canal de drenagem, com maiores valores do índice de Umidade e maiores valores de MRVBF. O alto e significativo valor de correlação entre $Gt/(Gt+Hm)$ e MRVBF (0,84) mostra que este índice de representação da paisagem é uma importante ferramenta para distinção de áreas em ocorre a formação de Gt em detrimento da Hm. Para o teor de Fe cristalino, o índice MRRTF teve alta e positiva correlação ($r = 0,71$). Para os atributos cristalográficos dos óxidos de Fe não foi possível observar uma tendência para os valores dos índices de representação da paisagem.

A Ct apresentou os maiores teores (acima de 626 g kg^{-1}) nas superfícies em que a cota em relação ao canal de drenagem (Alt CD) não superou 0,43 m (Quadro 3), além de relevo mais suave, menores perdas de solo (com menores valores do Fator LS) e maiores processos de sedimentação (MRVBF acima de 0,5). Como consequência dos maiores teores de Ct, também foi observado maiores valores da relação $Ct/(Ct+Gb)$ nessas condições de paisagem.

Como descrito por Curi & Franzmeier (1984); Ghidin et al. (2006a), Kampf et al. (2009), os maiores teores de Gb foram encontrados em ambiente mais altos em relação aos canais de drenagem (Alt CD superior a 2,87 m) e topos mais planos, com valores de MRRTF superiores a 1,62 (Quadro 4), e menores processos erosivos, com valores de Fator LS menores que 1,37. As paisagens descritas favorecem o intenso intemperismo do solo e como consequência, a dessilicatização de aluminossilicatos e lixiviação do Si sendo que a formação de Gb ocorre de forma rápida (Hsu, 1989; Kampf et al., 2009), refletindo em menores valores da relação $Ct/(Ct+Gb)$. O valor negativo e significativo de correlação linear entre Ct e Gb (-0,77) (Quadro 5) contribui para a ideia de que formação de Gb se dá em detrimento da Ct. Como causa dos maiores teores de Gb, foram observados menores teores de acidez trocável (Al^{3+}), este fato também pode ser observado nas correlações positivas de $Ct/(Ct+Gb)$ com Al^{3+} e m%, onde as maiores proporções de Gb indicam intemperismo muito intenso e o sistema mais oxidico propicia a estabilização do Al na estrutura da gibbsita (Motta & Melo, 2009).

Quadro 3. Valores de minerais da fração argila dos solos (Valor do atributo) e valores médios dos índices geomorfológicos nas áreas com maiores valores (A1, A2 e A3) e nas áreas com menores valores (B1, B2 e B3)⁽¹⁾.

	área	Teor/Valor	Alt CD	Declive	Fator LS	Umidade	MRRTF	MRVBF	PI Curv	Pf Curv
Fe amorfo	A1	7,42	1,58	8,5	3,29	8,18	0,18	0,88	0,0042	0,0001
	A2	6,78	1,98	7,2	3,70	8,11	0,19	0,67	0,0035	0,0149
	A3	6,40	1,58	13,3	5,02	7,47	0,14	0,38	0,0016	-0,0019
	B1	0,57	2,53	8,7	3,67	7,45	0,30	0,46	0,0099	0,0097
	B2	0,75	9,05	11,4	3,10	6,72	0,32	0,33	-0,0001	-0,0001
	B3	0,76	1,99	7,7	5,06	8,85	0,13	0,72	0,0026	0,0008
Fe cristalino	A1	61,78	1,52	9,7	4,08	8,24	0,16	0,67	0,0024	0,0015
	A2	61,73	2,57	11,2	4,63	7,88	0,20	0,50	0,0016	0,0070
	A3	61,67	1,77	11,3	5,97	7,63	0,14	0,33	0,0047	0,0049
	B1	36,86	7,53	4,9	2,39	9,11	0,56	1,07	0,0022	-0,0008
	B2	37,13	8,34	5,5	3,57	8,14	0,25	0,57	-0,0036	-0,0110
	B3	37,60	7,65	3,4	1,36	9,85	0,29	1,83	0,0018	0,0027
Fe A/ Fe C	A1	0,13	10,86	14,6	7,66	7,40	0,03	0,16	0,0025	0,0009
	A2	0,13	9,40	12,8	7,21	7,84	0,04	0,37	0,0009	0,0005
	A3	0,13	7,01	7,6	3,45	8,77	0,10	0,80	0,0022	-0,0014
	B1	0,02	9,23	5,8	0,75	7,21	2,78	0,17	-0,0002	-0,0016
	B2	0,02	1,77	11,3	5,97	7,63	0,14	0,33	0,0047	0,0049
	B3	0,03	2,09	17,5	4,96	6,97	0,17	0,14	0,0090	0,0016
Gt	A1	123,81	8,70	8,6	3,30	7,87	0,28	0,51	0,0050	-0,0100
	A2	119,44	9,40	12,8	7,21	7,84	0,04	0,37	0,0009	0,0005
	A3	118,92	8,96	13,9	5,89	7,64	0,10	0,31	0,0011	0,0005
	B1	14,86	2,34	2,1	0,24	7,57	2,85	0,28	0,0029	0,0009
	B2	15,73	2,26	2,3	0,35	8,33	2,76	0,65	0,0030	0,0023
	B3	17,43	2,13	2,5	1,69	7,58	0,57	0,57	0,0042	0,0064
SI Gt	A1	259,39	8,96	13,9	5,89	7,64	0,10	0,31	0,0011	0,0005
	A2	243,41	8,86	11,1	5,19	7,51	0,13	0,32	0,0006	0,0003
	A3	242,91	9,34	12,6	6,45	7,51	0,06	0,32	0,0011	0,0020
	B1	67,49	0,83	8,6	2,60	7,35	0,42	0,36	0,0158	-0,0003
	B2	81,36	6,56	5,2	0,55	7,38	2,62	1,16	0,0015	0,0059
	B3	81,62	2,34	2,1	0,24	7,57	2,85	0,28	0,0029	0,0009
DMC Gt 110	A1	15,50	8,24	9,7	3,78	6,80	0,36	0,17	-0,0002	-0,0009
	A2	15,13	0,42	6,8	5,51	8,69	0,05	0,89	0,0055	0,0119
	A3	15,06	0,04	4,8	2,19	11,58	0,00	3,30	0,0000	-0,0111
	B1	7,05	1,29	7,4	2,51	7,61	0,23	0,67	0,0041	0,0018
	B2	7,27	0,58	8,6	1,94	8,69	0,04	1,93	0,0021	-0,0009
	B3	7,34	0,74	2,8	2,04	8,53	0,25	1,78	0,0022	0,0037
Hm	A1	105,43	0,92	14,2	2,33	7,56	0,36	0,34	0,0012	0,0050
	A2	104,74	2,09	17,5	4,96	6,97	0,17	0,14	0,0090	0,0016
	A3	100,08	0,75	7,0	2,89	8,15	0,28	0,58	0,0007	-0,0019
	B1	5,85	0,29	7,4	1,00	8,16	0,35	2,41	0,0102	0,0106
	B2	6,06	0,25	3,7	1,10	8,91	0,16	2,54	0,0040	0,0051
	B3	6,88	0,27	3,3	4,35	10,38	0,31	2,92	0,0039	0,0214
SI Hm	A1	130,44	5,68	6,7	3,22	8,92	0,19	1,17	0,0008	0,0021
	A2	130,33	8,86	11,1	5,19	7,51	0,13	0,32	0,0006	0,0003
	A3	126,74	0,51	8,7	3,31	8,01	0,21	0,71	0,0038	-0,0041
	B1	32,82	0,73	8,2	2,64	8,20	0,45	0,54	0,0040	-0,0046
	B2	45,69	10,86	14,6	7,66	7,40	0,03	0,16	0,0025	0,0009
	B3	57,78	0,51	4,4	5,09	8,26	0,25	0,63	0,0100	0,0167
DMC Hm 104	A1	23,09	0,86	10,0	5,60	8,17	0,14	0,53	0,0013	-0,0009
	A2	22,19	1,69	13,7	5,82	7,58	0,11	0,38	0,0044	0,0014
	A3	21,78	1,86	9,6	4,27	8,25	0,16	0,69	0,0007	0,0019
	B1	5,16	0,73	8,2	2,64	8,20	0,45	0,54	0,0040	-0,0046
	B2	6,89	10,86	14,6	7,66	7,40	0,03	0,16	0,0025	0,0009
	B3	10,00	10,11	11,7	5,49	7,07	0,17	0,18	0,0018	-0,0049
Gt/ (Gt+Hm)	A1	0,82	0,04	4,8	2,19	11,58	0,00	3,30	0,0000	-0,0111
	A2	0,79	0,29	7,4	1,00	8,16	0,35	2,41	0,0102	0,0106
	A3	0,79	0,31	4,7	0,97	10,08	0,06	2,97	0,0059	0,0009
	B1	0,24	1,81	10,3	1,22	8,08	0,41	1,44	0,0038	-0,0048
	B2	0,25	2,13	2,5	1,69	7,58	0,57	0,57	0,0042	0,0064
	B3	0,26	2,15	4,8	1,54	7,75	0,95	0,44	-0,0003	0,0038

Quadro 3. Continuação.

Atributo	Área	Valor do atributo	Alt CD	Declive	Fator LS	Umidade	MRRTF	MRVBF	PI Curv	Pf Curv
Al amorfo (g Kg ⁻¹)	A1	8,53	7,01	7,6	3,45	8,77	0,10	0,80	0,0022	-0,0014
	A2	8,48	7,53	4,9	2,39	9,11	0,56	1,07	0,0022	-0,0008
	A3	8,17	8,34	5,5	3,57	8,14	0,25	0,57	-0,0036	-0,0110
	B1	3,87	1,67	10,5	4,30	8,20	0,22	0,45	0,0012	0,0002
	B2	3,85	1,77	11,3	5,97	7,63	0,14	0,33	0,0047	0,0049
	B3	3,82	2,57	11,2	4,63	7,88	0,20	0,50	0,0016	0,0070
Ct (g Kg⁻¹)	A1	645,5	0,40	4,1	0,38	6,71	0,80	1,40	0,0103	0,0167
	A2	626,9	0,43	1,9	0,97	8,86	1,05	1,29	0,0051	0,0066
	A3	626,2	0,43	2,8	0,97	8,86	1,05	1,29	0,0051	0,0066
	B1	477,1	0,92	14,2	2,33	7,56	0,36	0,34	0,0012	0,0050
	B2	474,6	2,03	5,6	1,25	7,32	1,42	0,38	0,0034	0,0034
	B3	474,0	10,86	14,6	7,66	7,40	0,03	0,16	0,0025	0,0009
Gb (g Kg⁻¹)	A1	220,0	3,32	4,0	0,78	7,41	2,76	0,35	-0,0052	-0,0040
	A2	216,3	2,87	7,0	1,37	7,15	1,62	0,47	-0,0021	0,0004
	A3	210,5	3,20	6,1	0,69	6,89	2,82	0,19	0,0027	0,0121
	B1	53,3	0,60	9,3	4,64	7,47	0,23	0,50	0,0033	0,0034
	B2	51,2	0,60	5,8	4,64	7,47	0,23	0,50	0,0033	0,0034
	B3	50,8	1,04	8,2	2,64	7,49	0,53	0,36	0,0081	0,0016
Ct/(Ct+Gb)	A1	0,91	1,04	8,2	2,64	7,49	0,53	0,36	0,0081	0,0016
	A2	0,91	0,60	5,8	4,64	7,47	0,23	0,50	0,0033	0,0034
	A3	0,91	0,60	9,3	4,64	7,47	0,23	0,50	0,0033	0,0034
	B1	0,70	2,87	7,0	1,37	7,15	1,62	0,47	-0,0021	0,0004
	B2	0,70	3,20	6,1	0,69	6,89	2,82	0,19	0,0027	0,0121
	B3	0,69	3,32	4,0	0,78	7,41	2,76	0,35	-0,0052	-0,0040
IA Ct	A1	0,43	0,90	4,8	0,59	7,76	1,32	2,92	0,0046	0,0029
	A2	0,42	7,02	16,3	6,84	6,92	0,05	0,07	0,0016	0,0062
	A3	0,41	3,09	9,9	4,96	7,51	0,16	0,32	0,0012	-0,0071
	B1	0,12	1,87	7,6	4,90	8,71	0,20	0,61	0,0012	-0,0018
	B2	0,12	5,85	6,6	1,40	7,67	0,09	1,84	0,0011	0,0056
	B3	0,12	2,72	6,4	4,36	9,60	0,06	1,51	0,0010	0,0051
Ct DMC (nm)	A1	17,22	7,20	10,0	3,06	7,21	0,20	0,54	0,0013	0,0045
	A2	16,75	10,11	11,7	5,49	7,07	0,17	0,18	0,0018	-0,0049
	A3	16,61	11,08	7,6	5,02	7,18	0,19	0,16	0,0004	-0,0009
	B1	7,63	0,51	4,4	5,09	8,26	0,25	0,63	0,0100	0,0167
	B2	7,51	1,21	7,5	3,86	8,25	0,28	0,52	0,0077	0,0108
	B3	7,27	2,03	5,6	1,25	7,32	1,42	0,38	0,0034	0,0034
Gb DMC (nm)	A1	209,4	1,58	13,3	5,02	7,47	0,14	0,38	0,0016	-0,0019
	A2	195,7	0,60	4,7	2,53	9,00	0,16	1,63	0,0022	-0,0007
	A3	191,4	1,12	8,3	3,97	8,30	0,24	0,59	0,0010	-0,0031
	B1	36,0	0,80	14,3	3,24	6,76	0,20	0,56	0,0281	0,0043
	B2	35,9	0,46	7,8	1,35	7,85	0,24	1,70	0,0100	0,0103
	B3	35,3	1,76	9,0	4,11	5,93	0,33	0,14	0,0195	0,0223
Temperatura Ct (° C)	A1	487,9	2,65	8,6	5,20	9,09	0,19	0,66	0,0006	0,0042
	A2	486,9	10,86	14,6	7,66	7,40	0,03	0,16	0,0025	0,0009
	A3	486,1	1,66	6,0	4,54	9,02	0,12	0,93	0,0013	0,0075
	B1	452,5	3,32	5,2	1,75	6,75	0,49	0,44	0,0053	0,0116
	B2	452,0	0,90	4,8	0,59	7,76	1,32	2,92	0,0046	0,0029
	B3	450,5	3,32	4,0	0,78	7,41	2,76	0,35	-0,0052	-0,0040
Temperatura Gb (° C)	A1	258,5	0,81	3,4	0,15	7,88	2,64	0,77	0,0017	0,0063
	A2	258,5	2,35	4,9	0,85	7,09	2,39	0,31	0,0041	0,0015
	A3	258,4	2,26	9,3	3,25	5,82	0,52	0,16	0,0255	0,0217
	B1	247,7	1,04	8,2	2,64	7,49	0,53	0,36	0,0081	0,0016
	B2	247,7	1,50	6,7	1,64	7,38	1,06	0,31	0,0117	0,0024
	B3	247,6	1,54	11,2	2,90	7,40	0,41	0,36	-0,0022	-0,0132

⁽¹⁾Alt. Dren. – Altitude em Relação ao Canal de Drenagem; Curv. – curvatura; LS – Fator de perda do solo; Umid. – Índice de Umidade; MRRTF – *Multiresolution Index of Ridge Top Flatness*; MRVBF – *Multiresolution Index of Valley Bottom Flatness*; Pf curv – Perfil de Curvatura; Pl curv – Plano de curvatura; EF – Energia do Fluxo.

Quadro 4. Teores dos atributos mineralógicos e valores médios dos atributos químicos em cada classe.

	área	pH _{água}	pH _{KCl}	H ⁺	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	P	CO	CTC	SB	m%	V%
Fe Amorfo	A1	5,63	4,38	8,06	2,49	1,07	0,60	0,04	0,24	14,95	12,24	1,71	59,7	14,3
	A2	5,57	4,37	7,70	2,43	1,09	0,67	0,04	0,26	14,95	11,89	1,79	58,1	15,7
	A3	5,27	4,38	8,70	2,19	1,24	0,89	0,05	0,39	18,00	12,78	2,19	50,7	17,7
	B1	5,05	4,32	3,41	3,66	0,97	0,66	0,05	0,22	11,08	8,39	1,68	74,1	20,0
	B2	5,34	4,25	1,81	2,97	0,87	0,69	0,09	0,20	5,71	6,35	1,65	66,0	26,2
	B3	5,04	4,31	3,50	3,21	0,89	0,60	0,05	0,23	10,88	8,09	1,53	69,8	19,0
Fe cristalino	A1	5,04	4,26	2,33	2,72	0,47	0,47	0,06	0,33	5,35	6,05	1,00	73,3	17,1
	A2	5,26	4,49	2,71	1,35	0,59	0,63	0,04	0,35	5,03	5,18	1,25	52,9	24,5
	A3	5,19	4,44	2,65	3,25	0,56	0,51	0,06	0,30	5,22	6,78	1,11	74,9	20,5
	B1	5,54	4,50	10,89	4,28	0,86	0,55	0,24	0,45	11,03	14,17	1,47	74,6	13,4
	B2	5,51	4,36	7,44	2,42	0,68	0,29	0,07	0,24	11,03	10,80	1,03	70,4	11,0
	B3	5,21	4,22	4,74	4,12	0,70	0,50	0,08	0,28	9,17	9,97	1,27	78,1	12,9
Fe A/ Fe C	A1	5,67	4,58	5,68	0,98	0,58	0,40	0,60	0,58	10,60	8,07	1,55	41,1	21,3
	A2	5,57	4,50	8,29	1,39	0,76	0,36	0,41	0,49	10,42	10,88	1,43	53,5	17,9
	A3	5,39	4,42	9,64	2,04	0,85	0,23	0,07	0,38	9,59	12,73	1,13	64,4	9,3
	B1	5,36	4,27	1,98	2,88	0,97	0,79	0,11	0,22	5,86	6,68	1,87	61,2	28,4
	B2	5,19	4,44	2,65	3,25	0,56	0,51	0,06	0,30	5,22	6,78	1,11	74,9	20,5
	B3	5,10	4,37	2,69	2,40	0,50	0,38	0,05	0,24	5,58	5,97	0,93	73,2	16,0
Gt	A1	5,30	4,35	4,66	1,81	0,69	0,17	0,03	0,20	10,72	7,27	0,88	67,5	12,3
	A2	5,57	4,50	8,29	1,39	0,76	0,36	0,41	0,49	10,42	10,88	1,43	53,5	17,9
	A3	5,40	4,36	6,22	1,73	1,05	0,20	0,09	0,29	10,01	9,14	1,27	58,0	14,9
	B1	5,49	4,49	3,51	1,46	0,97	1,13	0,03	0,40	7,49	6,63	2,13	44,6	32,9
	B2	5,45	4,46	3,83	1,22	0,96	1,04	0,03	0,39	7,70	6,54	2,02	42,3	31,1
	B3	5,20	4,38	4,56	1,32	1,16	0,79	0,03	0,39	8,33	7,86	1,98	40,0	25,5
SI Gt	A1	5,40	4,36	6,22	1,73	1,05	0,20	0,09	0,29	10,01	9,14	1,27	58,0	14,9
	A2	5,37	4,32	5,42	1,90	1,02	0,21	0,03	0,25	10,17	8,53	1,23	61,0	15,3
	A3	5,48	4,39	5,80	1,60	1,03	0,27	0,14	0,34	10,01	8,62	1,29	55,8	16,5
	B1	5,15	4,23	4,64	3,16	0,52	0,53	0,05	0,22	9,92	8,78	1,10	78,7	12,6
	B2	4,94	4,13	5,09	5,10	0,96	0,69	0,13	0,57	9,97	11,43	1,78	74,1	15,7
	B3	5,49	4,49	3,51	1,46	0,97	1,13	0,03	0,40	7,49	6,63	2,13	44,6	32,9
DMC Gt 110	A1	5,23	4,20	2,34	3,19	0,78	0,49	0,05	0,26	5,91	6,82	1,31	71,1	19,3
	A2	5,22	4,31	7,44	3,24	1,19	0,80	0,05	0,34	16,36	12,63	2,04	62,3	17,1
	A3	5,09	4,29	5,45	2,24	0,88	0,91	0,03	0,41	10,01	9,29	1,83	56,9	19,9
	B1	5,28	4,56	4,05	0,63	0,62	0,66	0,03	0,37	8,37	5,99	1,31	32,9	22,0
	B2	5,46	4,54	4,20	0,92	0,68	0,87	0,05	0,39	8,03	6,73	1,60	36,7	23,8
	B3	5,42	4,54	4,17	0,85	0,67	0,85	0,05	0,34	8,34	6,58	1,56	35,4	23,7
Hm	A1	5,00	4,26	2,85	2,99	0,42	0,36	0,05	0,17	6,31	6,62	0,83	78,7	12,7
	A2	5,10	4,37	2,69	2,40	0,50	0,38	0,05	0,24	5,58	5,97	0,93	73,2	16,0
	A3	5,00	4,26	2,76	3,04	0,48	0,42	0,06	0,15	5,84	6,76	0,95	76,2	14,1
	B1	5,18	4,38	5,61	4,05	1,25	1,43	0,09	0,48	15,67	11,49	2,77	67,2	25,5
	B2	5,13	4,26	5,28	3,45	1,08	1,24	0,09	0,30	13,14	11,11	2,40	59,3	21,9
	B3	5,20	4,08	2,60	4,51	0,89	0,97	0,06	0,58	16,73	8,77	1,91	71,6	21,9
SI Hm	A1	5,22	4,33	7,60	3,30	0,83	0,37	0,06	0,42	9,23	11,47	1,26	72,3	11,2
	A2	5,37	4,32	5,42	1,90	1,02	0,21	0,03	0,25	10,17	8,53	1,23	61,0	15,3
	A3	5,03	4,30	4,23	2,30	0,54	0,30	0,06	0,23	9,16	7,32	0,89	72,4	12,4
	B1	5,09	4,37	4,60	1,58	0,74	0,74	0,05	1,08	7,57	7,66	1,53	57,6	20,0
	B2	5,67	4,58	5,68	0,98	0,58	0,40	0,60	0,58	10,60	8,07	1,55	41,1	21,3
	B3	5,03	4,29	4,60	4,92	0,82	0,90	0,08	1,11	7,31	9,22	1,77	77,2	20,3
DMC Hm 104	A1	5,60	4,43	6,46	2,41	1,13	0,77	0,05	0,46	13,74	10,18	1,87	58,3	18,5
	A2	5,67	4,38	5,66	1,95	0,97	0,68	0,04	0,46	12,32	9,19	1,69	55,4	18,7
	A3	5,29	4,14	3,00	4,54	0,67	0,83	0,07	0,30	9,38	8,92	1,56	75,4	17,6
	B1	5,09	4,37	4,60	1,58	0,74	0,74	0,05	1,08	7,57	7,66	1,53	57,6	20,0
	B2	5,67	4,58	5,68	0,98	0,58	0,40	0,60	0,58	10,60	8,07	1,55	41,1	21,3
	B3	5,30	4,42	4,19	1,67	0,58	0,19	0,05	0,14	10,26	6,67	0,81	67,4	14,2
Gt/ (Gt+Hm)	A1	5,09	4,29	5,45	2,24	0,88	0,91	0,03	0,41	10,01	9,29	1,83	56,9	19,9
	A2	5,18	4,38	5,61	4,05	1,25	1,43	0,09	0,48	15,67	11,49	2,77	67,2	25,5
	A3	5,13	4,45	5,96	1,14	0,85	0,68	0,04	0,33	10,05	8,65	1,58	43,9	18,3
	B1	5,20	4,35	4,70	1,46	1,14	0,84	0,03	0,41	8,66	8,15	2,01	42,1	24,9
	B2	5,20	4,38	4,56	1,32	1,16	0,79	0,03	0,39	8,33	7,86	1,98	40,0	25,5
	B3	5,19	4,38	4,67	1,42	1,16	0,78	0,03	0,39	8,15	7,99	1,97	42,4	25,6

Quadro 4. Continuação

	área	pH _{água}	pH _{KCl}	H ⁺	Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	P	CO	CTC	SB	m%	V%
Al amorfo (g Kg ⁻¹)	A1	5,39	4,42	9,64	2,04	0,85	0,23	0,07	0,38	9,59	12,73	1,13	64,42	9,3
	A2	5,54	4,50	10,89	4,28	0,86	0,55	0,24	0,45	11,03	14,17	1,47	74,61	13,4
	A3	5,51	4,36	7,44	2,42	0,68	0,29	0,07	0,24	11,03	10,80	1,03	70,38	10,9
	B1	5,12	4,36	2,51	2,63	0,54	0,50	0,06	0,29	4,96	6,16	1,09	70,95	18,8
	B2	5,19	4,44	2,65	3,25	0,56	0,51	0,06	0,30	5,22	6,78	1,11	74,88	20,5
	B3	5,26	4,49	2,71	1,35	0,59	0,63	0,04	0,35	5,03	5,18	1,25	52,93	24,5
Ct (g Kg⁻¹)	A1	5,15	4,26	3,62	1,69	0,80	0,10	0,03	0,21	6,53	6,17	0,91	64,88	14,8
	A2	5,10	4,29	3,66	1,70	0,79	0,15	0,03	0,22	6,59	6,30	0,97	64,61	15,4
	A3	5,09	4,28	3,66	1,71	0,78	0,14	0,03	0,22	6,59	6,30	0,94	64,49	14,9
	B1	5,00	4,26	2,85	2,99	0,42	0,36	0,05	0,17	6,31	6,62	0,83	78,69	12,7
	B2	5,30	4,60	5,83	0,83	0,83	0,83	0,05	0,24	10,75	7,88	1,68	40,46	23,8
	B3	5,67	4,58	5,68	0,98	0,58	0,40	0,60	0,58	10,60	8,07	1,55	41,13	21,3
Gb (g Kg⁻¹)	A1	5,30	4,67	3,23	0,58	0,50	1,02	0,03	0,26	7,70	5,20	1,54	28,84	30,5
	A2	5,23	4,63	3,96	0,45	0,56	0,88	0,03	0,24	8,23	5,80	1,46	24,16	25,7
	A3	5,43	4,66	4,13	0,47	0,63	1,11	0,03	0,21	8,10	6,27	1,75	22,13	29,3
	B1	5,36	4,28	3,74	2,05	0,88	0,79	0,03	0,52	10,28	7,42	1,70	55,50	22,9
	B2	5,36	4,27	3,74	1,99	0,87	0,77	0,03	0,53	10,28	7,36	1,66	55,08	22,6
	B3	5,36	4,27	4,02	2,01	0,86	0,75	0,03	0,58	10,36	7,46	1,63	55,76	22,2
Ct/(Ct+Gb)	A1	5,36	4,27	4,02	2,01	0,86	0,75	0,03	0,58	10,36	7,46	1,63	55,76	22,2
	A2	5,36	4,27	3,74	1,99	0,87	0,77	0,03	0,53	10,28	7,36	1,66	55,08	22,6
	A3	5,36	4,28	3,74	2,05	0,88	0,79	0,03	0,52	10,28	7,42	1,70	55,50	22,9
	B1	5,23	4,63	3,96	0,45	0,56	0,88	0,03	0,24	8,23	5,80	1,46	24,16	25,7
	B2	5,43	4,66	4,13	0,47	0,63	1,11	0,03	0,21	8,10	6,27	1,75	22,13	29,3
	B3	5,30	4,67	3,23	0,58	0,50	1,02	0,03	0,26	7,70	5,20	1,54	28,84	30,5
IA Ct	A1	5,23	4,63	4,69	0,78	0,86	0,43	0,05	0,35	9,57	6,78	1,34	37,31	20,1
	A2	5,30	4,31	3,41	2,58	0,77	0,65	0,04	0,61	7,92	6,81	1,45	70,25	21,3
	A3	5,23	4,19	4,26	3,43	0,67	0,83	0,04	0,16	9,80	9,20	1,54	69,47	16,8
	B1	5,45	4,27	4,45	2,83	0,75	0,73	0,04	0,57	9,99	8,55	1,47	69,01	17,2
	B2	4,91	4,13	4,72	4,82	0,91	0,63	0,11	0,53	9,97	11,08	1,65	74,57	15,1
	B3	5,17	4,24	4,07	4,17	0,72	1,38	0,05	0,55	8,61	9,28	1,97	69,65	22,7
Ct DMC (nm)	A1	5,40	4,35	2,67	2,05	0,53	0,11	0,05	0,41	8,14	5,30	0,70	75,14	13,4
	A2	5,30	4,42	4,19	1,67	0,58	0,19	0,05	0,14	10,26	6,67	0,81	67,35	14,2
	A3	5,31	4,42	3,86	1,08	0,53	0,20	0,13	0,21	0,00	5,80	0,86	56,26	14,9
	B1	5,03	4,29	4,60	4,92	0,82	0,90	0,08	1,11	7,31	9,22	1,77	77,23	20,3
	B2	5,01	4,24	2,45	3,48	0,53	0,48	0,07	0,27	5,12	7,01	1,08	76,38	15,9
	B3	5,30	4,60	5,83	0,83	0,83	0,83	0,05	0,24	10,75	7,88	1,68	40,46	23,8
Gb DMC (nm)	A1	5,27	4,38	8,70	2,19	1,24	0,89	0,05	0,39	18,00	12,78	2,19	50,70	17,6
	A2	5,18	4,37	3,44	1,91	0,59	0,46	0,04	0,25	8,01	6,25	1,09	63,73	17,6
	A3	5,24	4,37	8,44	2,36	1,35	0,99	0,06	0,41	18,11	12,78	2,40	49,78	19,2
	B1	5,14	4,29	5,11	2,94	1,34	1,61	0,08	0,30	11,28	10,91	3,02	50,97	28,5
	B2	5,14	4,31	5,82	3,31	1,22	1,43	0,09	0,31	13,28	11,72	2,74	56,79	24,5
	B3	5,15	4,28	4,76	2,67	1,75	2,14	0,08	0,40	11,28	10,53	3,95	46,34	39,8
Temperatura Ct (° C)	A1	5,33	4,21	3,28	3,05	0,71	0,41	0,03	0,60	8,19	7,33	1,14	73,50	15,7
	A2	5,67	4,58	5,68	0,98	0,58	0,40	0,60	0,58	10,60	8,07	1,55	41,13	21,3
	A3	5,05	4,36	3,66	2,08	0,82	0,72	0,04	0,22	8,39	7,25	1,58	57,51	22,3
	B1	5,34	4,62	2,79	0,87	0,48	1,02	0,04	0,30	6,96	4,98	1,54	38,79	31,3
	B2	5,23	4,63	4,69	0,78	0,86	0,43	0,05	0,35	9,57	6,78	1,34	37,31	20,0
	B3	5,30	4,67	3,23	0,58	0,50	1,02	0,03	0,26	7,70	5,20	1,54	28,84	30,5
Temperatura Gb (° C)	A1	5,03	4,31	4,13	1,77	0,67	0,46	0,04	0,33	7,12	7,03	1,13	61,67	16,1
	A2	5,41	4,43	4,14	2,08	0,91	0,90	0,04	0,40	8,99	7,59	1,79	63,99	27,7
	A3	5,09	4,55	4,59	0,84	0,60	0,58	0,04	0,37	8,59	6,37	1,22	42,18	19,3
	B1	5,36	4,27	4,02	2,01	0,86	0,75	0,03	0,58	10,36	7,46	1,63	55,76	22,2
	B2	5,40	4,30	5,12	1,94	1,06	0,90	0,03	0,51	12,13	8,97	1,99	51,50	23,3
	B3	5,33	4,33	6,49	1,94	1,14	0,90	0,04	0,46	13,54	10,46	2,08	49,19	20,6

O índice de assimetria da Ct (IA Ct), que está relacionada à sua interestratificação com minerais do tipo 2:1 (Melo et al., 2001), apresentou altos valores em duas situações distintas (Quadro 4). Na primeira, a área A1 está em uma cota mais próxima ao canal de drenagem (0,90 m) e valor de MRVBF alto (2,92) ocorrendo processos intensos de sedimentação (Mckenzie & Gallant,

2007; Prates, 2010), o que indica aporte de bases advindas da lixiviação, atenuando do processo de intemperismo desses minerais 2:1 interestratificados com a Ct. Essa condição ocorre de forma predominante na área, conforme podemos observar nos valores de correlação linear para IA Ct *versus* Alt CD (-0,70), IA Ct *versus* MRVBF (0,70) e IA Ct *versus* Declividade (-0,70) (Quadro 5). No segundo caso, as áreas A2 e A3 estão a uma cota mais alta em relação ao canal de drenagem, porem os processos erosivos ocorrem com grande intensidade, com valores de MRVBF abaixo de 0,5. Devido ao material de origem, o argilito da Formação Guabirota, possui altos teores de esmectita (Massad et al., 1981; Lima et al., 1995), acredita-se que os maiores valores de IA Ct estejam relacionados a material menos intemperizado e maiores teores de minerais 2:1 interestratificados nas condições de paisagem citadas anteriormente.

Quadro 5. Correlações entre os índices topográficos e as características mineralógicas da fração argila e químicas do solo significativas ($p = 0,05$).

	Ct	Gb	Alt CD ⁽¹⁾	MRVBF	MRRTF	Declive	T ^a Ct	Al ³⁺	m%	pH _{KCl}	Mg ²⁺	K ⁺	V%
Al OA ⁽²⁾	-	-	-0,70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Gb	-0,77	-	-	-	-	-	-0,78	-0,86	-0,72	0,76	-	-	-
Ct/(Ct+Gb)	-	-	-	-	-	-	0,80	0,84	0,70	-0,73	-	-	-
IA Ct ⁽³⁾	-	-	-0,70	0,70	-	-0,70	-	-	-	-	0,73	-0,68	-
Fe OA	-	0,70	-	-	-	-	-	-0,72	-0,83	0,69	-	-	-
Fe C	-	-	-	-	0,71	-	-	-	-	-	-	-	-
Gt/(Gt+Hm)	-	-	-	0,84	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Alt CD	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,69	-	-0,66
Fator LS ⁽⁴⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	0,72	-	-0,77	-	-0,82
Declividade	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-0,76

⁽¹⁾Alt CD - Altura em relação ao canal de drenagem, ⁽²⁾Al OA - Al de baixa cristalinidade, ⁽³⁾IA Ct - índice de assimetria da caulinita seundo metodologia de Singh & gilkes (1992), ⁽⁴⁾Fator LS - Fator de perda do solo (loss soil)

4.4. CONCLUSÕES

1. Os menores valores da relação caulinita/(caulinita + gibbsita), o que indica superfícies com menor aporte de sílica e maior drenagem, foram correlacionados com maiores valores de Altitude em Relação ao Canal de Drenagem e Fator de Perda do Solo (Fator LS), e menores valores de *Multiresolution Index of Valley Bottom Flatness* (MRVBF).

2. O Índice de Assimetria da caulinita (IA Ct) apresentou duas condições distintas para seus maiores valores, ocorrendo em áreas com maiores processos erosivos e conseqüentemente materiais menos intemperizados e em superfícies com maiores processos sedimentares e mais próximos ao canal de drenagem, que com o aporte de sílica e bases mantém preservados os minerais 2:1 interestratificados.

3. O índice *Multiresolution Index of Valley Bottom Flatness* (MRVBF), que indica posições mais planas de fundo de vale, apresentou alta e positiva correlação com $Gt/(Gt+Hm)$, o mesmo foi observado para o índice *Multiresolution Index of Ridge Top Flatness* (MRRTF), que representa áreas de topo mais planas, em relação ao teor de Fe cristalino.

4.5. LITERATURA CITADA

BARBAR, L.C. & MELO, V.F. Variabilidade das características químicas e mineralógicas de solos da região de Curitiba (PR). *Sci. Agr.*, 9:187-197, 2008.

BOCK, M. & KOTHE, R. Predicting the Depth of hydrologic Soil Characteristics Hamburger. *Beiträge zur Physischen Geographie und Landschaftsökologie –Heft 19*, 2008.

CAMARGO, L.A.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T. & HORVAT, R.A. Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de um Latossolo sob diferentes formas do relevo. I – Mineralogia da fração argila. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:2269-2277, 2008.

CHAGAS, C. da S. Mapeamento digital de solos por correlação ambiental e redes neurais em uma bacia hidrográfica no domínio de mar de morros.– Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006, 223 p. (Tese Doutorado em solos e nutrição de plantas).

CHI, B. L., BING, C. S., WALLEY, F. & YATES, T. Topographic indices and yield variability in a rolling landscape of western Canada. *Pedosphere*. 19: 362–370, 2009.

COSTA, A.C.S. & BIGHAM, J.M. Óxidos de ferro. In: MELO, V.F. & ALLEONI, L.R.F., eds. *Química e mineralogia do solo (Parte I – Conceitos básicos)*. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.1, p.505-573, 2009.

CUNHA, P.; MARQUES JÚNIOR, J.; CURI, N.; PEREIRA, G.T. & LEPSCH, I.F. Superfícies geomórficas e atributos de Latossolos em uma seqüência arenítico- basáltica da região de Jaboticabal (SP). *R. Bras. Ci. Solo*, 29:81-90, 2005.

CURI, N. & FRANZMEIER, D.P. Toposequence of Oxisols from the central plateau of Brazil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48:341-346, 1984.

EMBRAPA. *Manual de Métodos de Análise de Solo*. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997.

GILO, M.D. & ETZELMULLER, B. Spatial prediction of soil classes using digital terrain analysis and multinomial logistic regression modeling integrated in GIS: Examples from Vestfold County, Norway. *Catena*, (77):8-18, 2009.

GHIDIN, A.A.; MELO, V.F.; LIMA, V.C. & LIMA, J.M.J.C. Topossequências de Latossolos originados de rochas basálticas no Paraná. I – Mineralogia da fração argila. *R.Bras. Ci. Solo*, 30:293-306, 2006a.

GHIDIN, A.A.; MELO, V.F.; LIMA, V.C. & LIMA, J.M.J.C. Topossequências de Latossolos originados de rochas basálticas no Paraná. II – Relação entre mineralogia da fração argila e propriedades físicas do solo. R.Bras. Ci. Solo, 30:307-319, 2006b.

HANCOCK, G.R.; MURPHY, D. & EVANS, K.G. Hillslope and catchment scale soil organic carbon concentration: An assessment of the role of geomorphology and soil erosion in an undisturbed environment. Canadá. Geoderma, (155):36-45, 2010.

HSU, P.H. Aluminium oxides and oxyhydroxides. In: DIXON, J.B. & WEED, S.B., eds. Minerals in soil environments. 2.ed. Madison, Soil Science Society of America, 1989. p.331-378.

IPPOLITI, G.A.; COSTA, L.M.; SHAEFER, C.E.G.R.; FERNANDES, E.I.F. & GAGGERO, M.R. Análise digital do terreno: ferramenta na identificação de pedoformas em microbacia na região de “mar de morros” (MG). R. Bras. Ci. Solo, 29: 269-276, 2005.

KÄMPF, N.; CURTI, N. & MARQUES, J.J. Óxidos de alumínio, silício, manganês e titânio. In: MELO, V.F. & ALLEONI, L.R.F., eds. Química e mineralogia do solo (Parte I – Conceitos básicos). Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.1., p.573- 610, 2009.

KÄMPF, N. & SCHWERTMANN, U. Goethite and hematite in a climosequence in Southern Brazil and their application in classification of kaolinitic Soils. Geoderma, 29:27-39, 1982.

KRAEMER, G.B. Variabilidade espacial dos atributos na delimitação das unidades de mapeamento. Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 2007. 101p. (Tese de Mestrado)

LIMA, V.C. Caracterização e classificação de solos derivados de eruptivas básicas do terceiro planalto paranaense. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1979. 249p. (Tese de Doutorado)

LIN, H.S.; KOGELMANN, W.; WALKER, C. & BRUNS, M.A. Soil moisture patterns in a forested catchment: A hydrological perspective. Canadá. Geoderma, (131):345-368, 2006.

MASSAD, F. ; ROCHA, J. L. R. ; YASSUDA, A. J. . Algumas Características Geotécnicas de Solos da Formação Guabirotuba, Paraná. . In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS TROPICAIS EM ENGENHARIA, Rio de Janeiro, Anais, I:706-723, 1981.

McBRATNEY, A.B.; MENDONÇA-SANTOS, M.L. & MINASNY, B. On digital soil mapping. Geoderma, 117:3-52, 2003.

McKENZIE, N.J. & GALLANT, J.C. Digital Soil Mapping With Improved Environmental Predictors and Models of Pedogenesis. In: LAGACHERIE, P.; McBRATNEY, A.B.; VOLTZ, M. Developments in Soil Science, v.31. EUA: Elsevier B.V., 2007. p. 327-349.

McKENZIE, N.J. & RYAN, P. Spatial prediction of soil properties using environmental correlation. Geoderma, 89(1-2):67-94, April 1999.

MELO, V.F.; SINGH, B.; SCHAEFER, C.E.G.R.; NOVAIS, R.F. & FONTES, M.P.F.F. Chemical and mineralogical properties of kaolinite-rich Brazilian soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 65: 1324-1333, 2001.

MELO, V.F.; MOURA, R.; TOLEDO, F.H.; LIMA, V.C. & GHIDIN, A.A. Morfologia de agregados de Latossolos Bruno e Vermelho do estado do Paraná, avaliada por imagens obtidas em scanner. R. Bras. Ci. Solo, 32:85-99, 2008a.

MELO, V.F.; TOLEDO, F.H.; MOURA, R.; LIMA, V.C. & GHIDIN, A.A. Caracterização química e mineralógica de agregados de diferentes classes de tamanho de Latossolos Bruno e Vermelho localizados no estado do Paraná. R. Bras. Ci. Solo, 32:67-83, 2008b.

MELO, V.F. & WYPYCH, F. Caulinita e Haloisita. In: MELO, V.F. & ALLEONI, L.R.F., eds. Química e mineralogia do solo (Parte I – Conceitos básicos). Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.1., p.427-504, 2009.

MOORE, I.D.; GESSLER, P.E; NIELSEN, G.A. & PETERSON, G.A. Soil attribute prediction using terrain analysis. Soil Sci. Soc. Am. J., 57:443-452, 1993.

MOTTA, A.C.V. & MELO, V.F. Química dos solos ácidos. In: MELO, V.F. & ALLEONI, L.R.F. eds. Química e mineralogia do solo, parte II- Aplicações. Viçosa, MG. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. p.313-380.

PEDROTTI, A.; FERREIRA, M.M.; CURI, N.; SILVA, M.L.N.; LIMA, J.M. & CARVALHO, R. Relação entre atributos físicos, mineralogia da fração argila e formas de alumínio no solo. R. Bras. Ci. Solo, 27:1-9, 2003.

PEI, T.; QIN, C.; ZHU, A.; YANG, L.; LUO, M.; LI, B. & ZHOU, C. Mapping soil organic matter using the topographic wetness index: A comparative study based on different ow-direction algorithms and kriging methods. Ecological Indicators, 10:610-619, 2010.

PIEDADE, T.C. Visualização tridimensional para análise de características físicas e químicas de solos. Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 2010. (Tese de Mestrado)

PIRES, A.C.D. Interação de íons Zn^{2+} e Pb^{2+} com os constituintes orgânicos e minerais de solos de Curitiba, PR. Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 2004. 92p. (Tese de Mestrado)

PRATES, V. Utilização de índices para a representação da paisagem como apoio para levantamento pedológico em ambiente de geoprocessamento. Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 2010. (Tese de Mestrado).

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S.B. & CORRÊA, G.F. Pedologia: Base para distinção de ambientes. Viçosa, NEPUT, 1997. 367p.

REYNIERS, M.; MAERTENS, K.; VRINDTS, E. & DE BAERDEMAEKER, J. Yield variability related to landscape properties os loamy soil central Belgium. Soil & Tillage Research. 88:262-273, 2006.

ROBERT, S.D.W.; DOWLING, T.I. & WALKER J. FLAG: a fuzzy landscape analysis GIS method for dryland salinity assessment. CSIRO, Land and Water Technical Report 8/97, Canberra. Disponível em: www.clw.csiro.au/publications/technical/technical97.html. Acesso em 13 jul. 2010.

ROMÃO, P.A. Modelagem de terreno com base na morfometria e em sondagens geotécnicas – região de Goiânia – GO, Universidade de Brasília, 2006. 192 p. (Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental).

SAGA (2005). System for Automated Geoscientific Analyses, Version: 2.0.2. <http://www.saga-gis.org>

SALAMUNI, E. & STELLFELD, M.C. Banco de dados geológicos geo-referenciados da Bacia Sedimentar de Curitiba (PR) como base de sistema de informação geográfica (SIG). Bol. Paraná. Geociênc., 49:21-32, 2001.

SCHWERTMANN, U. & TAYLOR, R.M. Iron oxides. In: DIXON, J.B. & WEED, S.B., eds. Minerals in soil environments. 2.ed. Madison, Soil Science Society of America, 1989. p.379-438. (Book Series, 1)

SIRTOLI, A.E. Mapeamento de solos com auxílio da geologia, atributos do terreno e índices espectrais integrados por redes neurais artificiais. Curitiba, 2008, 102 p. (Tese de Doutorado em Geologia Ambiental).

SOUZA, Z.M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T. & BARBIERI, D.M. Small relief shape variations influence spatial variability of soil chemical attributes. Sci. Agric., 63:161-168, 2006.

STATSOFT, Inc. (2007). STATISTICA (data analysis software system), version 8.0.

VALERIANO, M.M. TOPODATA: guia de utilização de dados geomorfométricos locais. São José dos Campos: INPE, 2008.

VIDAL-TORRADO, P.; LEPSCH, I.F. & CASTRO, S.S. Conceitos e aplicações das relações pedologia-geomorfologia em regiões tropicais úmidas. Tópicos em Ciência do Solo, 4:85-144, 2005.

VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H. & SCHAEFER, C.E.G.R., eds. Tópicos em ciência do solo. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1. p.1-54

WANG, D. & LAFFAN, S.W. Characterisation of valleys from DEMs. 18th World IMACS / MODSIM Congress, Cairns, Australia 13-17 July 2009. Disponível em <http://mssanz.org.au/modsim09>. Acessado em 17 de dez. 2009.

WHITE, A.F. & BRANTLEY, S.L. Chemical weathering rates of silicate minerals: An overview. Reviews in Mineralogy, 31:1-22, 1995.

WOWK, G.I.T. Avaliação da contaminação do solo por chumbo proveniente da reciclagem de sucatas de baterias em área de várzea no município de Paula Freitas (PR). Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 2003. 74p. (Tese de Mestrado)