



ARTIGO ORIGINAL

Ludmila de Freitas¹
José Carlos Casagrande²
Ivanildo Amorim de Oliveira¹
Milton César Costa Campos^{3*}

¹Universidade Estadual Paulista – UNESP,
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias,
Via de Acesso Prof. Paulo Donato Castellane, s/n,
Rural, 14884-900, Jaboticabal, SP, Brasil

²Universidade Federal de São Carlos – UFSCar,
Centro de Ciências Agrárias, Rodovia Anhanguera,
km 174, Araras, SP, Brasil

³Universidade Federal do Amazonas – UFAM,
Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente,
Rua 29 de Agosto, 786, Divino Pranto,
69800-000, Humaitá, AM, Brasil

Autor Correspondente:

*E-mail: mcesarsolos@gmail.com

PALAVRAS-CHAVE

Análise discriminante
Componentes principais
Teor de argila no solo

KEYWORDS

Discriminant analysis
Principal components analysis
Soil clay content

Análise multivariada na avaliação de atributos de solos com diferentes texturas cultivados com cana-de-açúcar

Multivariate analysis in the evaluation of soil attributes with different textures cultivated with sugarcane

RESUMO: A textura é um importante atributo do solo para o entendimento do manejo, interferindo na compactação do solo, na retenção de água no solo, no arejamento, na disponibilidade de nutrientes e na estabilidade dos agregados. O objetivo deste trabalho foi avaliar, comparativamente, os atributos químicos e físicos do solo em função de diferentes classes texturais, sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar, com o auxílio da análise estatística multivariada. Em cada área, foram coletadas 44 amostras de solo com espaçamento de 5 m na linha e 10 m entre linhas. O solo foi coletado na profundidade de 0,0-0,10 e 0,10-0,20 m, em minitrincheiras de áreas cultivadas com cana-de-açúcar. Foram avaliados os atributos químicos e os atributos físicos, e em seguida, os dados foram submetidos a análises estatísticas multivariadas. O estudo mostra que as áreas com menores teores de argila apresentam comportamento diferenciado da área mais argilosa. Os atributos químicos apresentam melhor ligação na área com maior teor de argila. O uso das técnicas de multivariadas foi eficiente para verificar as similaridades e/ou diferenças das áreas estudadas com diferentes gradientes texturais.

ABSTRACT: *Texture is an important attribute of soil to the understanding of management, interfering in soil compaction, water retention in soil, aeration, nutrient availability, and stability of aggregates. In this sense, the objective of this article was to evaluate comparatively the chemical and physical attributes of the soil as a function of different textural classes, under continuous cultivation of sugar cane, with the aid of multivariate statistical analysis. In each area, 44 soil samples were collected with spacing of 5 m on the line and 10 m between lines. Soil sample collection occurred at 0.0-0.10 and 0.10-0.20 m depths in areas cultivated with sugarcane. Chemical and physical attributes of soil were assessed and the results were subjected to multivariate analysis. The study shows that the areas with lower clay contents present differentiated behavior compared with the area with higher clay contents. The chemical attributes present better correlation with to the area with higher clay contents. The use of techniques of multivariate analysis was efficient to verify the similarities and/or differences between the studied areas with different textural gradients.*

1 Introdução

A textura é indispensável para a classificação do solo e a predição do manejo e da aptidão de uso. Além disso, a textura é fator determinante das propriedades de retenção e capacidade de armazenamento de água e nutrientes, da distribuição de poros e, conseqüentemente, das propriedades de condução de água e gases, afetando a dinâmica das trocas com plantas e atmosfera (Reichardt; Timm, 2012). A textura ainda interfere na resistência do solo à ação de implementos de mobilização do solo e nas propriedades térmicas do solo, tais como capacidade calorífica e condutividade térmica.

A matéria orgânica do solo devido a sua ação cimentante, promove a agregação do solo, proporcionando aumento na estabilidade de agregados (Costa et al., 2004). Já em se tratando de solos com maiores teores de argila, alguns estudos evidenciam que estes solos normalmente apresentam incremento na capacidade de troca catiônica (CTC) do solo (Bayer; Mielniczuk, 1997), na diminuição da toxidez de alumínio (Al) e na maior disponibilidade de elementos químicos essenciais, que não existem no material de origem, como carbono e nitrogênio (Burlle et al., 1997), entre outros, como Ca, Mg e K. Solos com maiores teores de argila também têm a propriedade de favorecer a formação de aglomerados de partículas unitárias, que se formam por causa de atrações físicas entre partículas ou através de agentes cimentantes, como óxidos de ferro e matéria orgânica (Freitas et al., 2013).

Por outro lado, o conhecimento das alterações nos atributos químicos e físicos do solo, causadas pelo cultivo contínuo, pode fornecer subsídios para a adoção de práticas de manejo que permitam incrementar o rendimento das culturas, garantindo a contínua sustentabilidade e a conservação dos ecossistemas. Neste sentido, o uso de técnicas estatísticas facilita a interpretação do comportamento dos atributos do solo, para uma melhor tomada de decisão na prática de manejo. Na análise simultânea de muitas informações, a estatística multivariada torna-se a melhor ferramenta, possibilitando obter informações e interpretações que poderiam não ser perceptíveis com o uso da análise estatística univariada (Cruz; Regazzi, 2001). Dessa forma, alguns estudos têm aplicado técnicas multivariadas para avaliação das variáveis do solo e encontrado resultados satisfatórios. Assim, o entendimento do comportamento dos atributos do solo permite o estabelecimento de práticas adequadas de manejo do solo.

Dessa forma, o uso conjunto destas técnicas pode auxiliar na tomada de decisão e no uso e manejo adequado, tendo por base o comportamento dos atributos do solo; além disso, pode indicar possíveis atributos que sofrem maior alteração com interferência antrópica. O objetivo foi avaliar comparativa e conjuntamente os atributos químicos e físicos do solo em função de diferentes classes texturais, sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar, e definir quais atributos apresentam potencial no estudo da identificação destes solos, com auxílio da análise estatística multivariada.

2 Material e Métodos

O estudo foi realizado em quatro áreas localizadas no interior do Estado de São Paulo (Figura 1). Uma área (Área 1) está localizada no Centro de Ciências Agrárias da Universidade

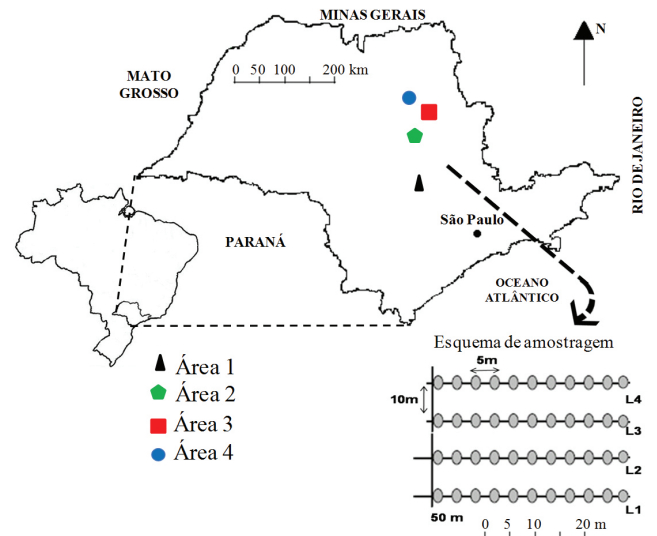


Figura 1. Localização das áreas de estudo e esquema de amostragem de solo.

Federal de São Carlos, no Município de Araras, São Paulo, com coordenadas de latitude $22^{\circ} 18' 31''$ S e longitude $47^{\circ} 23' 13''$ O, com Latossolo Vermelho (Embrapa, 2013) contendo 52% de argila (520 g kg^{-1}), com textura argilosa, cultivada com cana-de-açúcar, sendo que, no ano de coleta, esta se encontrava no terceiro corte. Do ponto de vista geológico, a área está situada na Bacia do Paraná, composta por rochas sedimentares que variam de arenitos (Formação Palermo), argilitos (Formação Corumbataí), siltitos e calcários (Formação Irati), além de rochas basálticas (Formação Serra Geral). O relevo do local é suave ondulado ou plano.

A segunda área (Área 2) está localizada no município de Santa Ernestina, sob as coordenadas $21^{\circ} 31' 42''$ S e $48^{\circ} 34' 31''$, sendo o solo classificado como Latossolo Amarelo (Embrapa, 2013), contendo cerca de 27% de argila (270 g kg^{-1}), com textura franco-argilo arenosa, cultivada com cana-de-açúcar no terceiro corte. A terceira área (Área 3) está localizada no município de Guariba, com coordenadas $21^{\circ} 31' 31''$ S e $48^{\circ} 19' 25''$ O, em Latossolo Vermelho (Embrapa, 2013), contendo 20% de argila (200 g kg^{-1}), com textura franco-arenosa e cultivada com cana no terceiro corte. A quarta área (Área 4) está localizada no município de Guariba, com coordenadas de $21^{\circ} 29' 55''$ S e $48^{\circ} 25' 23''$ O, sendo o solo classificado como Argissolo Vermelho (Embrapa, 2012), contendo cerca de 15% de argila (150 g kg^{-1}), com textura arenosa e cultivada com cana-de-açúcar no terceiro corte. O relevo do local das áreas 2, 3 e 4 é suave ondulado, sendo que, do ponto de vista geológico, destaca-se a presença de basaltos da formação Serra Geral e de rochas alcalinas (IPT, 1981).

A classificação climática para as regiões é do tipo Cwa segundo Köppen, ou seja, clima mesotérmico de inverno seco, em que a temperatura média do mês mais quente é superior a 22°C e a do mês mais frio, inferior a 18°C . A precipitação média anual varia de 1.100 a 1.700 mm. A umidade relativa do ar apresenta uma média anual de aproximadamente 71%, ocorrendo concentração de chuvas no período de outubro a março, e o período mais seco estende-se de abril até setembro.

Durante cerca de 40 anos, as áreas foram cultivadas com cana-de-açúcar e nos últimos 10 anos foram adubadas somente com torta de filtro na cobertura. Nesses três ciclos de produção, a colheita foi realizada como cana crua, ou seja, sem queima ou despalha.

Foram coletadas 44 amostras em cada área de solos deformadas e indeformadas, com espaçamento de 5 m entre estas na linha e 10 m entre linhas (Figura 1). As amostras de solos foram coletadas nas profundidades de 0,0-0,10 e 0,10-0,20 m em minitrincheiras, em áreas cultivadas com cana-de-açúcar.

Os atributos químicos do solo foram determinados conforme Embrapa (2012): pH (CaCl_2), potássio (K^+), cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), disponibilidade de P resina, acidez potencial (H+Al), boro (B), enxofre (S), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn) (Tabela 1). O carbono total foi determinado pelo método de Walkley-Black modificado por Yeomans e Bremner (1988), e a matéria orgânica, por sua vez, foi estimada com base no carbono orgânico.

As amostras de solo com estrutura preservada, coletadas em anel volumétrico, foram saturadas por meio da elevação gradual de uma lâmina de água até atingir cerca de dois terços da altura do anel, para que este sofresse saturação (Embrapa, 2011). A porosidade total (Pt) foi obtida pela diferença entre a massa do solo saturado e a massa do solo seco, em estufa a 105 °C, durante 24 h, sendo a massa de água usada para saturação dos anéis convertida em volume. A microporosidade do solo foi determinada pelo método da mesa de tensão. Pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade, obteve-se a macroporosidade. A densidade do solo (Ds) foi calculada pela relação entre a massa de solo seca a 105 °C, durante 24 h, da amostra de solo do cilindro volumétrico e o volume do mesmo cilindro (Embrapa, 2011).

Considerando-se a estrutura multivariada contida nos dados, foram empregadas técnicas estatísticas para verificar semelhanças entre os manejos na tentativa de agrupá-los usando-se os atributos físicos e químicos.

Realizou-se análise de agrupamento por método hierárquico, usando a distância euclidiana como medida de semelhança entre os registros e o método de Ward como estratégia de

agrupamento. Para reduzir os erros, devidos às escalas e às unidades das variáveis, os dados foram padronizados com média zero e variância 1. O dendrograma obtido pela análise de agrupamento apresenta, no eixo vertical, o nível de similaridade e, no eixo horizontal, as áreas, formando as classes homogêneas. À medida que o nível de fusão aumenta, o nível de similaridade decresce. Então, traçar uma linha horizontal no dendrograma significa traçar a Linha Fenon, como é chamada, o que delimitará o número de grupos a se formarem. Além de buscar o menor nível de distorção que o processo aglomerativo possa trazer, é preciso ter conhecimento pelo pesquisador de seu objeto de pesquisa ao decidir o ponto a ser efetuado o 'corte'.

Para determinar quantas componentes devem ser excluídas da análise, foram determinados os autovalores e o gráfico de *scree-plot*, que é um gráfico dos autovalores em função da ordem das componentes principais, representando graficamente a porcentagem de variância explicada por cada atributo. Quando esta porcentagem se reduz e a curva passa a ser quase paralela ao eixo das abscissas, as componentes correspondentes podem ser excluídas. O critério adotado para a escolha do número de componentes foi selecionar aquelas que apresentaram autovalores acima de 1,00 e conseguiram sintetizar uma variância acumulada acima de 70% (Hair Junior, 2009).

A análise de agrupamento foi complementada com a de componentes principais, para obter um conjunto menor de combinações lineares das variáveis que preservasse a maior parte da informação fornecida pelas variáveis originais (Silva et al., 2010). Esta análise possibilita avaliar qualitativamente as características de cada área e verificar as variáveis que mais estão relacionadas com cada uma dessas áreas. O efeito do manejo do solo e sua interação sobre cada variável original e fator extraído foram testados pelo General Linear Model (GLM), utilizado como análise de variância multivariada, sendo que esse procedimento analisou as quatro áreas com os atributos estudados. O objetivo desta análise foi o de verificar se os valores de F formados pelas médias das variáveis analisadas conjuntamente diferiram quando os ambientes foram contrastados entre si. Em caso afirmativo,

Tabela 1. Caracterização física e química dos solos em duas profundidades.

Áreas	Atributos Químicos																
	MO	P	pH	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	H+Al	Al ³⁺	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Ds	Micro	Macro
	g dm ⁻³	Resina	CaCl ₂						mmol dm ⁻³						g cm ⁻³	%	
0,0–0,10 m																	
Área 1	29,0	10,7	4,8	1,6	27,6	11,5	49,3	3,0	18,9	0,5	3,1	39,5	53,5	1,3	1,3	26,3	26,1
Área 2	9,9	12,4	5,1	1,4	16,3	8,2	23,3	1,5	2,4	0,3	0,3	24,2	13,7	0,3	1,6	14,4	25,1
Área 3	12,8	7,9	5,2	2,2	15,1	10,5	24,3	1,6	5,7	0,2	0,7	45,8	15,7	0,3	1,6	15,7	25,6
Área 4	9,3	13,8	4,8	1,2	14,3	7,7	31,2	2,6	7,1	0,2	0,7	35,3	41,3	0,3	1,7	12,9	28,0
0,10–0,20 m																	
Área 1	27,6	8,7	4,7	1,2	25,6	10,8	51,7	3,9	10,4	0,5	3,1	40,6	48,2	0,9	1,4	25,2	25,8
Área 2	8,9	11,9	5,1	1,5	16,6	7,6	24,1	1,4	3,1	0,3	0,3	24,3	13,4	0,3	1,6	14,6	25,3
Área 3	12,6	8,1	5,1	2,2	14,2	9,8	25,9	2,3	7,1	0,2	0,7	49,6	16,4	0,3	1,8	15,4	26,4
Área 4	8,8	12,2	4,7	1,0	14,2	7,2	30,9	2,7	7,1	0,1	0,7	34,9	40,2	0,3	1,6	13,0	27,8

K⁺= potássio, Ca²⁺= cálcio; Mg²⁺= magnésio; H+Al= acidez potencial; B= boro; S= enxofre; Fe= ferro; Mn= manganês; Zn= zinco; Ds = densidade do solo.

indica que os manejos são diferentes, analisando todos os atributos em conjunto.

A comparação dos perfis das diferentes áreas foi realizada utilizando-se todas as variáveis conjuntamente, com a análise complementar, que é a análise discriminante, uma matriz de classificação de dados. A partir desta análise, é possível definir o quão distintas são as áreas estudadas, sendo estas representadas em um gráfico, no qual é possível verificar a separação entre elas. Todas as análises estatísticas multivariadas foram processadas no software STATISTICA versão 7.0 (STATSOFT, 2004).

3 Resultados e Discussão

Diante da possibilidade de utilização das variáveis selecionadas para distinção das áreas estudadas, fez-se uso da análise de agrupamento hierárquico, obtendo-se a variação expressiva nos valores de distância euclidiana entre os acessos, para o conjunto de variáveis consideradas, sendo possível a divisão de grupos (Figura 2).

Foi admitido um corte na distância euclidiana de 5,3 (nas duas profundidades estudadas), favorecendo uma divisão de grupos, indicando que, com o uso conjunto dos atributos químicos e físicos, é possível ordenar os dados

em dois grupos: o G1, englobando os dados formados pela área 1 (52% de argila), e o G2, formado pelas áreas 2, 3 e 4 (Figuras 2A e 2B). No grupo formado por mais de uma área (G2), neste caso, provavelmente tais áreas apresentaram atributos químicos e físicos similares, além de estas três áreas apresentarem percentuais de argila próximos (27, 20 e 15% respectivamente), haja vista a formação de um único agrupamento. Esta informação está de acordo com a afirmativa de Yemefack et al. (2005) de que esta técnica permite agrupar variáveis com características semelhantes entre si e com aumento de variabilidade entre os agrupamentos formados.

Nas profundidades de 0,0-0,10 e 0,10-0,20 m (Figuras 2A e 2B), traçou-se uma segunda linha horizontal, a fim de diminuir ainda mais o nível de similaridade entre as áreas estudadas. A linha foi traçada em 4,8 na profundidade de 0,0-0,10 m e 4,3 na profundidade de 0,10-0,20 m, que representam as distâncias euclidianas de ligação entre as variáveis. Observa-se a formação de três grupos distintos: G1, englobando os dados formados pela área 1; G2, formado pelas áreas 2 e 3, e G3, formado pela área 4. Nota-se que houve uma separação maior entre as áreas, o que demonstra que à medida que diminui o nível de fusão, a similaridade das áreas aumenta. Isso significa que a variação entre grupos diminui e a variação dentro do grupo aumenta. A diferenciação dos grupos foi marcante, mostrando

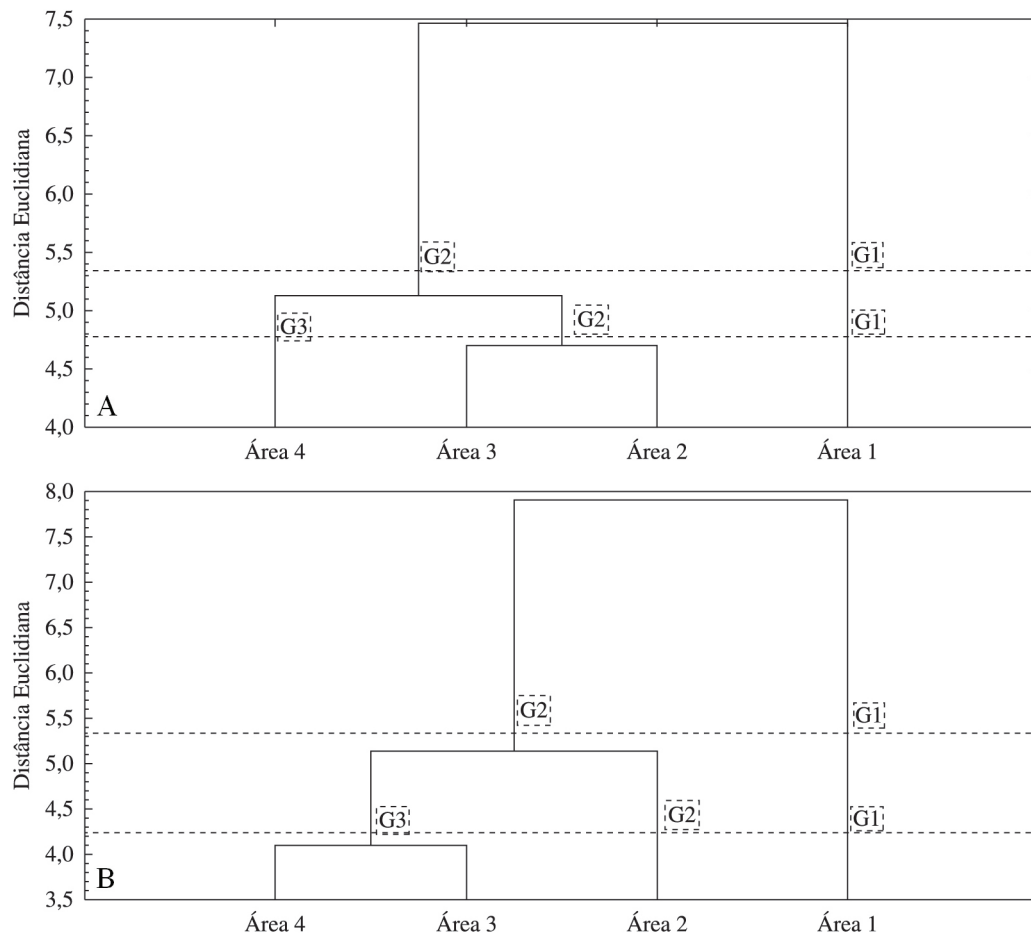


Figura 2. Dendrograma das inter-relações referentes aos atributos físicos e químicos pela distância euclidiana média. A= profundidade de 0,0-0,10 m e B= 0,10-0,20 m.

as particularidades de cada ambiente, pois as características dos atributos de um mesmo grupo são semelhantes e diferentes do comportamento de outros agrupamentos.

O gráfico do *scree plot* pode ser usado para a verificação da importância e da contribuição de cada variável para explicação da variância total (Figura 3). Esse gráfico, conjuntamente com os autovalores, pode ser utilizado para a tomada de decisão de quantas componentes devem ser retidas para posterior aplicação da análise de componente principal (ACP), de modo que expliquem acima de 70% da variância, como critérios para decisão do número de CP a serem retidas (Hair Junior, 2009). Neste caso, podem-se utilizar as componentes principais, para representar graficamente, o poder discriminatório dos atributos do solo.

Os pesos dos atributos de cada ambiente, na primeira e na segunda componentess retida, mostram que os atributos mais significativos, para os 80,74 e 83,55% da variabilidade explicada nas profundidades 0,0-0,10 e 0,10-0,20 m, respectivamente, foram: H+Al (5,88%), Mg (5,88%), Cu (5,85%), MO (5,72%), Ds (5,68%) e pH (5,63%), na profundidade de 0,0-0,10 m (Figura 3A). Na profundidade de 0,10-0,20 m, os atributos Zn (5,88%), Ca (5,88%), Cu (5,88%), Al (5,81%), H+Al (5,76%)

e Micro (5,71%) apresentaram maior contribuição na variância total explicada pelas componentes 1 e 2 (Figura 3B). Com estes atributos, possivelmente, ocorra maior impacto ou alteração, quando submetidos a alguma forma de manejo.

A primeira e a segunda componente principal foram necessárias para explicar a variância total, em razão somente de estas apresentarem elevados autovalores (9,39 e 4,32 na profundidade 0,0-10 m, e 9,90 e 4,30 na profundidade 0,10-0,20 m), justificando o uso da CP1 e CP2. Segundo Freddi (2008), as CPs que apresentam autovalores superiores a um podem ser utilizadas para uma ordenação bidimensional dos acessos e das variáveis, o que permitiu a construção de um gráfico biplot.

Os autovetores apresentados na Tabela 2 correspondem às duas principais componentes e podem ser considerados como uma medida da relativa importância de cada variável, em relação às componentes principais, sendo os sinais, positivos ou negativos, indicações de relações diretamente e inversamente proporcionais, respectivamente. No caso em questão, os coeficientes dos atributos ou seus pesos acima de 0,7, independentemente se positivos ou negativos, foram destacados.

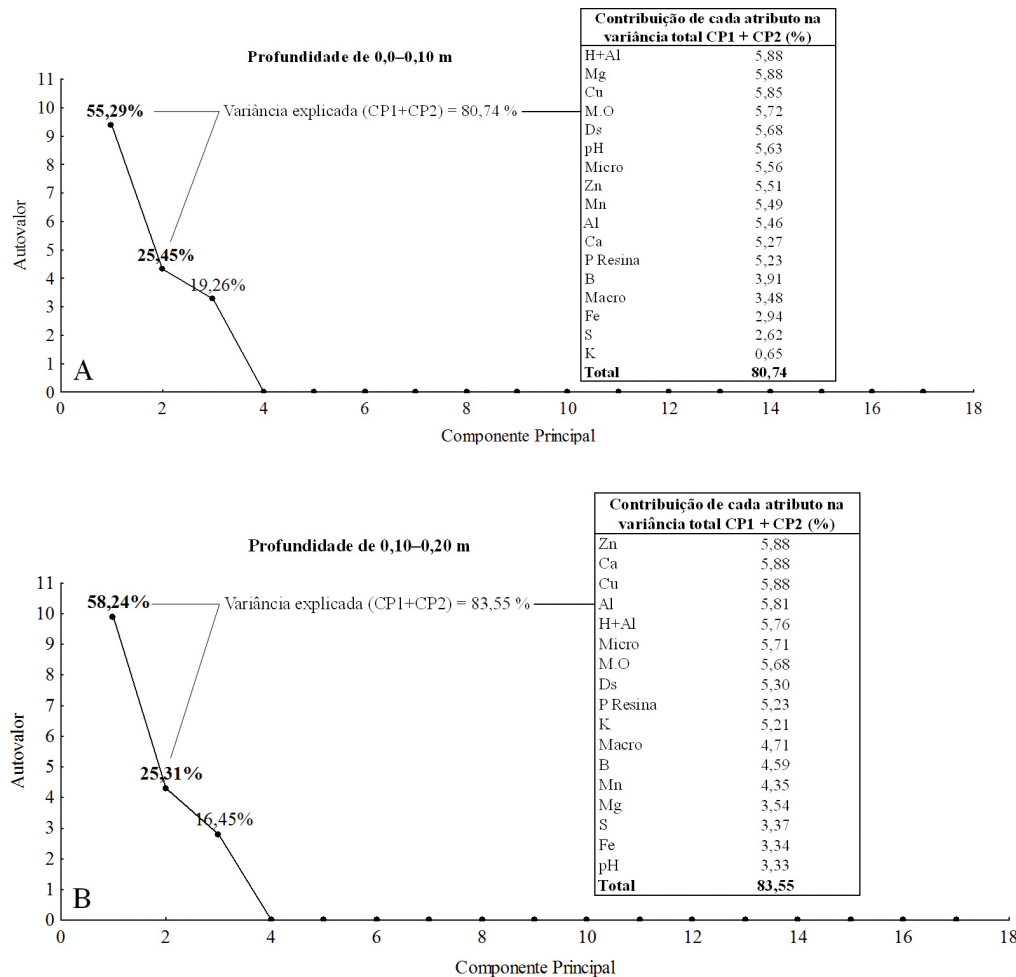


Figura 3. Proporção da variação no conjunto de dados explicada pelo componente principal (PC) e contribuição de cada variável para explicação da variância total pelo método *scree plot* para os solos.

Tabela 2. Correlação entre cada componente principal e atributos físicos e químicos dos solos em duas profundidades.

Atributos	Componente principal			
	0,0-0,10 m		0,10-0,20 m	
	CP1	CP2	CP1	CP2
P Resina	0,041325	-0,942340*	0,383851	-0,861077*
Matéria Orgânica	-0,957186*	0,235274	-0,981726*	-0,047243
pH	0,708818*	0,673716	0,687996	-0,303256
Potássio	0,222960	0,246070	0,309798	0,888687*
Cálcio	-0,939856*	0,108486	-0,944191*	-0,328615
Magnésio	-0,698890	0,715166*	-0,769852*	0,095149
Acidez potencial	-0,991333*	-0,131364	-0,988192*	0,055810
Alumínio	-0,863243*	-0,427966	-0,908871*	0,401631
Enxofre	-0,249142	-0,618813	-0,090634	0,751496*
Boro	-0,138794	0,803090*	0,636216	0,612216
Cobre	-0,992035*	0,100846	-0,999280*	0,017899
Ferro	-0,350510	0,613470	-0,295708	0,692730
Manganês	-0,873554*	-0,412556	-0,772321*	0,378557
Zinco	-0,967060*	0,028902	-0,986078*	-0,166283
Densidade do solo	0,945253*	-0,269325	0,943313*	0,101803
Microporosidade	-0,938428*	0,254047	-0,969479*	-0,173299
Macroporosidade	-0,410165	-0,650380	0,190237	0,874331*

*Valores mais discriminatórios; CP1= componente principal 1; CP2= componente principal 2.

A correlação entre as variáveis e as componentes principais permitiu caracterizar as variáveis que mais discriminaram na formação e diferenciação dos solos. Quanto ao percentual de variância explicado pelas CPs, verifica-se que, na profundidade 0,0-0,10 m, a primeira e a segunda componentes são responsáveis por 80,04% da variância total, sendo 55,29% na CP1 e 25,45% na CP2. Na profundidade 0,10-0,20 m, as duas primeiras CPs foram responsáveis por 83,55% da variância dos dados originais, com 58,25% na CP1 e 25,30% na CP2. Isso mostra que, de 17 variáveis, passam-se a utilizar duas, com 44 observações que representam o conjunto original de cada área, havendo redução de dimensionalidade das variáveis originais, com perda de explicação de menos de 20% nas duas profundidades estudadas.

As variáveis mais fortemente relacionadas com a área 1 (52% de argila), na profundidade de 0,0-0,10 m, foram MO, Ca, Mg, H+Al, Al, Cu, Mn, Zn, Micro (Tabela 2 e Figura 4A), apresentando-se, no terceiro e quarto quadrantes, com pequeno ângulo em relação ao eixo das abscissas. Quanto aos maiores valores de MO, Genu et al. (2013) afirmam que elevados teores de matéria orgânica estão relacionados a maiores teores de argila nos solos. Quanto à alta fertilidade deste ambiente, justifica-se pelos altos valores de MO, que retém nutrientes como Ca, Mg e K, o que leva ao aumento da CTC do solo.

A área 1 (Figura 4) possui a maior relação com a acidez potencial (H+Al). Solos mais argilosos possuem H+Al em maiores quantidades devido à decomposição da matéria orgânica e dos resíduos vegetais, o que leva à liberação de compostos orgânicos na superfície do solo, causando formação de complexos orgânicos hidrossolúveis entre Ca^{2+} e Mg^{2+} com ligantes orgânicos (Miyazawa et al., 1993), facilitando a descida desses cátions no perfil do solo (Franchini et al.,

1999), o que ocasiona a acidificação do solo. Além disso, a acidez potencial nessa área deve-se ao maior valor de H. Isso se explica pelo maior teor de MO observado, visto que a MO apresenta vários grupos funcionais, especialmente os grupos carboxílicos e fenólicos, que podem liberar o H que irá compor os íons envolvidos na CTC do solo (Rangel; Silva, 2007).

A área 1 (Tabela 2) tem maior relação com a microporosidade; isto é devido a esses solos possuírem microagregados pela partícula de argila, o que lhes confere uma maior microporosidade, fato este oposto, quando encontrados em solos arenosos: por possuírem partículas maiores, apresentam espaço poroso constituído por poros de maior diâmetro (macroporos), tendo, assim, uma menor quantidade de poros totais encontrados nestes solos. Araújo et al. (2004) salientam que a microporosidade do solo é fortemente influenciada pela textura e pelo teor de carbono orgânico. Assim, em solos arenosos, há predominância de macroporos, enquanto que, em solos argilosos, a tendência é predominar microporos.

A presença de maiores teores de Zn na área 1 é devida ao seu teor ser ligeiramente maior em sedimentos argilosos e bem menor em arenitos (Raij, 2011), como pode ser observado na Figura 4. O Mn possui maior relação na área argilosa, provavelmente, decorrente dos elevados teores de MO encontrado no solo, uma vez que esta é uma das principais fontes deste nutriente no solo. O Cu possui alta relação com a área 1, devido ao fato de, em solos argilosos, haver menor probabilidade de deficiência deste micronutriente, quando comparados com solos arenosos, que podem tornar-se deficientes em Cu em decorrência de perdas de lixiviação (Freitas et al., 2013).

A área 2 (27% de argila) é caracterizada por apresentar maior ligação com a Ds (Figura 4). Segundo Silva et al. (2011),

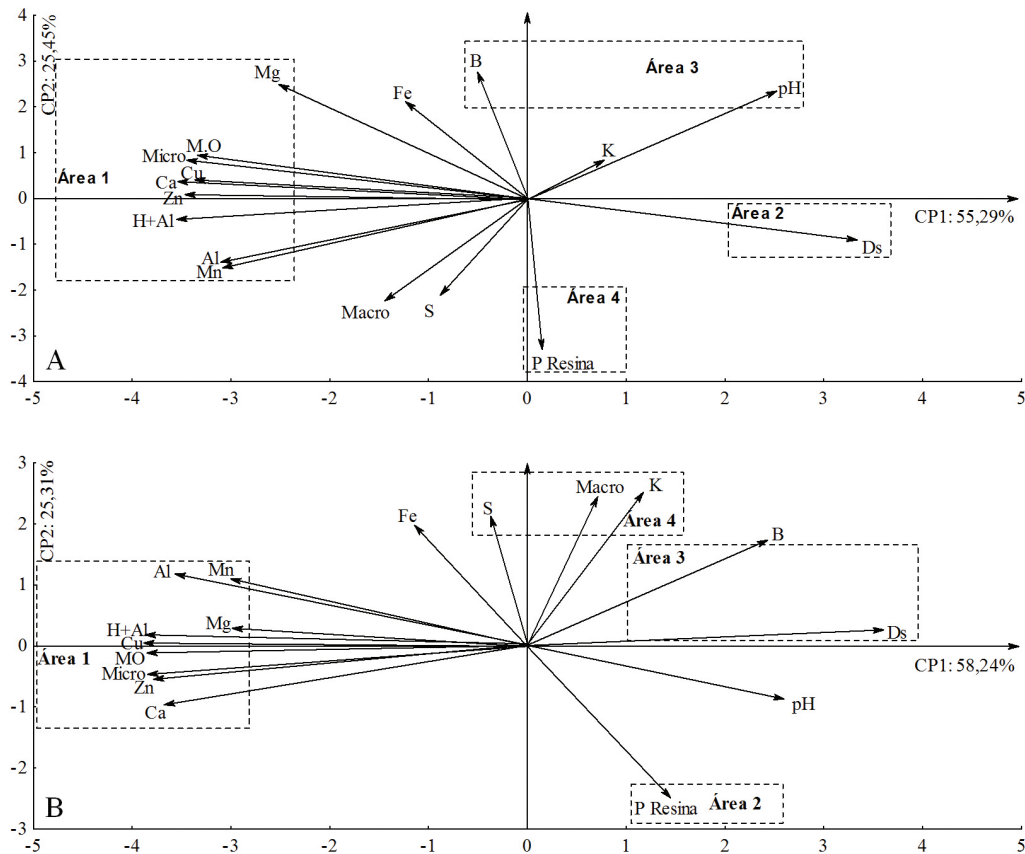


Figura 4. Biplot dos componentes principais dos atributos físicos e químicos dos solos. A= profundidade de 0,0-0,10 m; B= profundidade 0,10-0,20 m.

solos com menores teores de argila apresentam maior valor de densidade em razão do maior peso específico das partículas de quartzo que compõem a fração areia e do menor teor de matéria orgânica, comumente verificado nestes solos. Neste sentido, solos com maior densidade apresentam diminuição da porosidade total, redução da permeabilidade e da infiltração de água, quebra dos agregados e aumento da resistência mecânica à penetração, ocasionando prejuízo ou comprometendo a qualidade física do solo (Pezarico et al., 2013).

Na área 3 (20% de argila), os atributos pH e B apresentam maior poder discriminatório neste solo (Figura 4A). A maior relação com o B no solo é devida a este micronutriente geralmente ser encontrado em maior quantidade na matéria orgânica, o que sugere a sua maior probabilidade de escassez em solos arenosos, podendo ser facilmente lixiviado (Lima et al., 2007). Já a maior relação com o pH indica que um solo é ácido quando possui muitos íons H^+ e poucos íons Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ adsorvidos em seu complexo coloidal de troca. Recentemente, outros resultados confirmaram isso, pois a adição de resíduos vegetais aumentou os valores de pH e teores de Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , além de reduzir os teores de Al trocável no solo (Franchini et al., 1999). Entretanto, estes efeitos parecem ocorrer em curto prazo, como mencionado por Miyazawa et al. (1993), que observaram que o material vegetal causou aumentos rápidos no pH imediatamente após a adição do resíduo, havendo a diminuição rápida e gradativa até

a estabilização, quando resíduos de várias espécies de plantas foram adicionados ao solo.

O P resina foi o atributo com maior poder discriminatório para a área 4 (Figura 4A). Esta ligação deve-se ao menor percentual de argila neste solo, uma vez que, em solos mais arenosos, a fixação de P é menor, pois, segundo Machado et al. (2011), em solos com maiores teores de areia, aumenta a disponibilidade de P, e sua diminuição em solos com maiores teores de argila, uma vez que sua retenção torna-se mais fraca e a disponibilização mais fácil.

Na profundidade de 0,10-0,20 m, a área 1 apresentou o mesmo comportamento da profundidade 0,0-0,10 m, sendo mais relacionada com os atributos de MO, Ca, Mg, H+Al, Al, Cu, Mn, Zn, Micro (Tabela 3 e Figura 4B). Já a área 2 (27% de argila) é caracterizada por apresentar maior ligação com o P, devido ao menor percentual de argila neste solo, uma vez que, em solos mais arenosos, a fixação de P é menor, como discutido anteriormente.

Na área 3 (20% de argila), os atributos B e Ds apresentam maior poder discriminatório neste solo (Tabela 3 e Figura 4B). A maior relação com o B é devida ao fato de o micronutriente ser facilmente lixiviado em solos mais arenosos. A maior relação com a densidade do solo é devida a esta estar relacionada com solos mais arenosos, como ocorrido na profundidade de 0,0-0,1 m na área 2.

K, S e macroporosidade foram os atributos com maior poder discriminatório para a área 4, na profundidade 0,10-0,20 m. A

Tabela 3. Correlação entre cada raiz discriminante dos atributos físicos e químicos dos solos em duas profundidades.

Atributos	0,0-0,10 m		0,10-0,20 m	
	Raiz 1	Raiz 2	Raiz 1	Raiz 2
Fósforo	0,02172	-0,001651	-0,08329	-0,019963
Matéria Orgânica	0,26577	-0,278935	-0,51022	-0,151195
pH	-0,03231	0,043389	0,44120	-0,114979
Potássio	-0,43392	-0,310513	0,57794	-0,309541
Cálcio	0,36493	-0,182683	-0,42001	0,356668
Magnésio	-0,29737	-0,251653	0,13129	-0,778772*
Acidez potencial	0,56400	0,387526	-0,10575	-0,123964
Alumínio	-0,28574	-0,279415	-0,02772	0,043185
Enxofre	0,39269	0,168277	-0,58260	0,206410
Boro	0,05081	-0,058100	0,03776	0,081629
Cobre	0,90324*	-0,137390	-0,74796*	-0,257179
Ferro	-0,47503	-0,378706	0,42665	-0,594736
Manganês	0,25793	0,788037*	-0,01495	0,622819
Zinco	-0,43016	0,059864	-0,00522	0,005311
Densidade	2,59646*	4,591438*	-1,96970*	4,848478*
Microporosidade	1,34787*	1,165616*	-1,20971*	1,635304*
Macroporosidade	2,19773*	4,232332*	-1,64790*	4,314848*

*Caracterização principal das relações canônicas.

forte relação com o K é devida à maior lixiviação deste nutriente em solos mais arenosos. Werle et al. (2008) encontraram relação entre a textura e a perda de K no solo, sendo que o solo mais arenoso apresentou maior perda por lixiviação deste nutriente. A maior relação com a macroporosidade é devida ao fato de os solos arenosos possuírem partículas maiores, apresentarem espaço poroso constituído por poros de maior diâmetro (macroporos), tendo, assim, uma menor quantidade de poros totais encontrados nestes solos (Reichardt; Timm, 2012). Já o S, em solos arenosos, ocorre a movimentação do SO_4^{2-} maior e, com isso, pode ser perdido por percolação. Além disso, estes solos possuem baixos teores de matéria orgânica e, conseqüentemente, menores reservas de S orgânico.

Com o objetivo de verificar as associações entre os ambientes e seus atributos químicos e físicos, foi aplicado à técnica complementar, com o uso de análise discriminante, o que permitiu complementar os resultados obtidos para todas as áreas.

Pela análise discriminante, 91,55% da variabilidade das relações estudadas foi explicada nas duas primeiras raízes na profundidade de 0,0-0,10 m. A primeira raiz canônica (Can 1) apresentou 82,75%, e a segunda raiz canônica (Can 2), 8,8%. Na profundidade de 0,10-0,20 m, as duas primeiras raízes explicaram 80,0%, sendo 73,43 na Can 1 e 6,67% na Can 2 (Figura 5).

A área com solo argiloso é totalmente diferente das demais áreas, em ambas as profundidades estudadas, se analisarmos o eixo da Can 1. A análise discriminante demonstra que a Can 1 é responsável pela separação da área argilosa (área 1) das outras áreas, sendo que este solo confere características mais distantes dos demais. Esta afirmativa está de acordo com a análise de componentes principais (Figura 4), que mostrou maior fertilidade, com maiores valores de MO devido ao maior percentual de argila. Solos com maiores teores de argila

Tabela 4. Resultado da análise multivariada contrastando as áreas estudadas com todas as variáveis em conjunto.

Áreas	0,0-0,10 m	0,10-0,20 m
	Valor de F	Valor de F
Área 1 × Área 2	574,0051***	481,5621***
Área 1 × Área 3	536,2372***	75,7447***
Área 1 × Área 4	441,8073***	432,1395***
Área 2 × Área 3	29,16776	36,23898
Área 2 × Área 4	66,98405	39,97293
Área 3 × Área 4	82,79833	62,48853

(***) Todos os valores são significativos para $p < 0,001$.

favorecem a maior presença de matéria orgânica, devido à maior mineralização de materiais orgânicos.

Os atributos com maior poder na discriminação das áreas são densidade do solo, micro e macroporosidade nas duas profundidades (0,0-0,10 e 0,10-0,20 m) (Tabela 3). Estes resultados demonstram que os atributos físicos podem ser os mais importantes e os que mais contribuem para a separação das áreas, enfatizando os atributos físicos do solo, visto que estes – macro, micro e densidade do solo – foram os atributos que mais estão relacionados com as áreas, além de Cu, Mn e Mg.

Ao contrastar os ambientes, observam-se maiores valores de F na área argilosa (Área 1), quando comparada às outras áreas (Tabela 4). Já as demais áreas, quando contrastadas entre si, possuem características semelhantes, nas duas profundidades. Isso demonstra a influência da textura do solo, pois esta tem influência na fertilidade dos solos, além de apresentar contribuição nos atributos físicos como Ds e porosidade do solo.

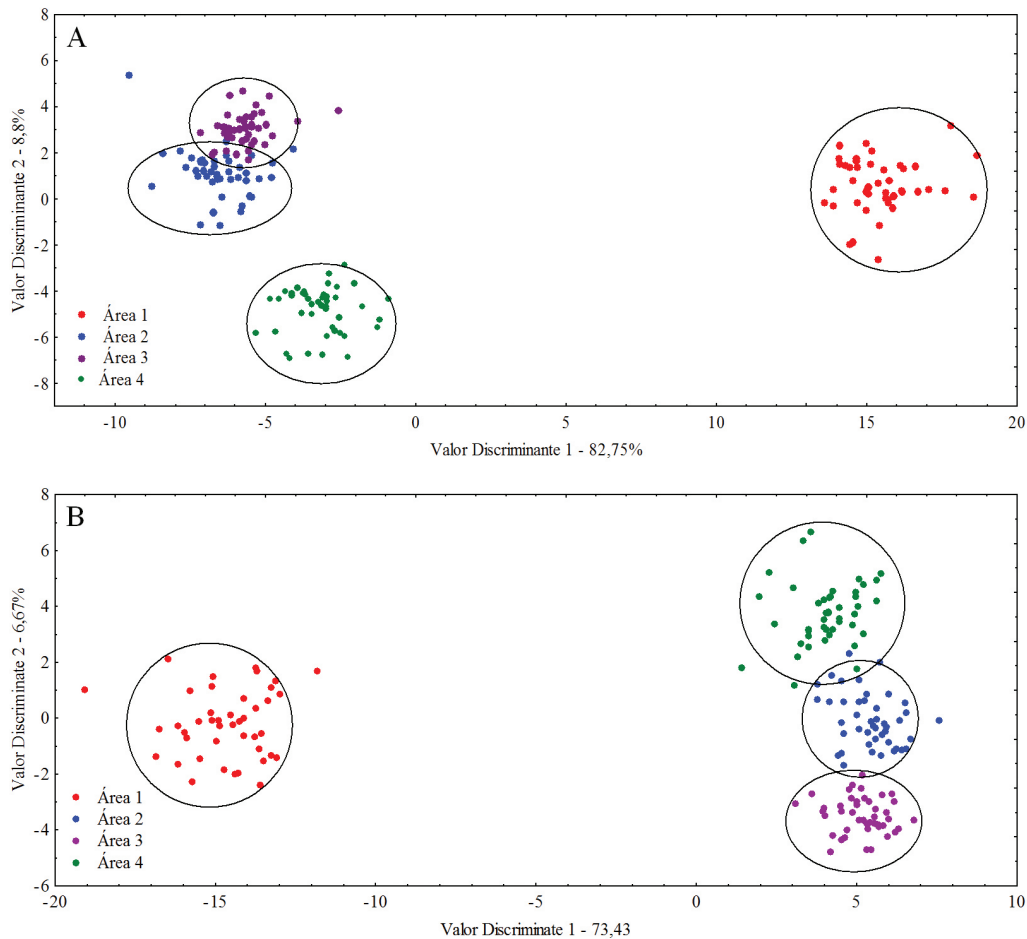


Figura 5. Agrupamento das áreas pela análise discriminante canônica 1 e 2 dos atributos dos solos. A=profundidade de 0,0-0,10 m e B=0,10-0,20 m.

Logo, pode-se afirmar, com base nas análises de dados, que houve a separação das quatro áreas, resultantes das diferenças do teor de argila entre as áreas, o que determinou a forte influência da textura na caracterização das áreas.

4 Conclusões

O solo argiloso apresenta maior relação com o teor de matéria orgânica e maior fertilidade do solo. As técnicas de análises multivariadas mostraram que os principais atributos para distinção dos ambientes são a densidade do solo, a macro e a microporosidade, o manganês, o cobre e o magnésio. O uso das técnicas de análises multivariadas é eficiente para verificar as similaridades ou as diferenças, com base nos atributos químicos e físicos do solo em cada área estudada.

Referências

- ARAÚJO, M. A.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 28, n. 2, p. 337-345, 2004. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832004000200012>
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Características químicas do solo afetadas por métodos de preparo e sistemas de cultura. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 21, n. 1, p. 105-112, 1997.

- BURLE, M. L.; MIELNICZUK, J.; FOCCHI, S. Effect of cropping systems on soil chemical characteristics, with emphasis on soil acidification. *Plant Soil*, v. 190, n. 2, p. 309-316, 1997. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1004266831343>

- COSTA, F. S.; BAYER, C.; ALBUQUERQUE, J. A.; FONTOURA, S. M. V. Aumento de matéria orgânica num latossolo Bruno em plantio direto. *Ciência Rural*, v. 34, n. 2, p. 587-589, 2004. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782004000200041>

- CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J. *Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético*. Viçosa: UFV, 2001. p. 480.

- EMBRAPA. *Manual de métodos de análise de solo*. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. p. 230.

- EMBRAPA. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2013. p. 353.

- FRANCHINI, J. C.; MIYASAWA, M.; PAVAN, M. A.; MALAVOLTA, E. Dinâmica de íons em solo ácido lixiviado com extratos de resíduos de adubos verdes e soluções puras de ácidos orgânicos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 34, n. 12, p. 2267-2276, 1999. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X1999001200014>

- FREDDI, O. S.; FERRAUDO, A. S.; CENTURION, J. F. Análise multivariada na compactação de um latossolo vermelho cultivado

- com milho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, n. 3, p. 953-961, 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000300005>
- FREITAS, L.; CASAGRANDE, J. C.; OLIVEIRA, I. A.; MORETI, T. C. F.; CARMO, D. A. B. Avaliação de atributos químicos e físicos de solos com diferentes texturas cultivados com cana-de-açúcar. *Enciclopédia Biosfera*, v. 9, n. 17, p. 362-374, 2013.
- GENU, A. M.; DEMATTÊ, J. A. M.; NANNI, M. R. Caracterização e comparação do comportamento espectral de atributos do solo obtidos por sensores orbitais (ASTER e TM) e terrestre (IRIS). *Ambiência*, v. 9, n. 2, p. 279-288, 2013. <http://dx.doi.org/10.5777/ambiencia.2013.02.03>
- HAIR JUNIOR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. Análise multivariada de dados. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009. p. 688.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - IPT. *Mapa de jazidas e ocorrências minerais do Estado de São Paulo*. São Paulo: IPT, 1981. (v. 3).
- MACHADO, V. J.; SOUZA, C. H. E.; ANDRADE, B. B.; LANA, R. M. Q.; KORNDORFER, G. H. Curvas de disponibilidade de fósforo em solos com diferentes texturas após aplicação de doses crescentes de fosfato monoamônico. *Bioscience Journal*, v. 27, n. 1, p. 70-76, 2011.
- MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A. & CALEGARI, A. Efeito de material vegetal na acidez do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 17, n. 3, p. 411-416, 1993.
- PEZARICO, C. R.; VITORINO, A. C. T.; MERCANTE, F. M.; DANIEL, O. Indicadores de qualidade do solo em sistemas agroflorestais. *Revista de Ciências Agrárias*, v. 56, n. 1, p. 40-47, 2013.
- RAIJ, B. van. *Fertilidade do solo e manejo de nutrientes*. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011. p. 420.
- RANGEL, O. J. P.; SILVA, C. A. Estoques de carbono e nitrogênio e frações orgânicas de Latossolo submetido a diferentes sistemas de uso e manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 31, n. 6, p. 1609-1623, 2007. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832007000600037>
- REICHARDT, R.; TIMM, L. C. *Solo Planta Atmosfera: conceitos, processos e aplicações*. Barueri: Manole, 2012. p. 524.
- SILVA, G. L.; LIMA, H. V.; CAMPANHA, M. M.; GILKES, R. J.; OLIVEIRA, A. T. S. Soil physical quality of Luvisols under agroforestry, natural vegetation and conventional crop management systems in the Brazilian semi-arid region. *Geoderma*, v. 167-168, p. 61-70, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.09.009>
- SILVA, M. O.; FREIRE, M. B. G. S.; MENDES, A. M. S.; FREIRE, F. J.; CAMPOS, M. C. C.; AMORIM, L. B. Discriminação de diferentes classes de solos irrigados com águas salinas, na região de Mossoró, RN, com o uso de análise multivariada. *Ambiência*, v. 2, n. 2, p. 261-270, 2010.
- STATSOFT. *Statistica 7.0*. Tulsa: StatSoft, 2004. p. 250.
- WERLE, R.; GARCIA, R. A.; ROSOLEM, C. A. Lixiviação de potássio em função da textura e da disponibilidade do nutriente no solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, n. 6, p. 2297-2305, 2008. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000600009>
- YEMEFACK, M.; ROSSITER, D. G.; NJOMGANG, R. Multi-scale characterization of soil variability within an agricultural landscape mosaic system in southern Cameroon. *Geoderma*, v. 125, n. 1-2, p. 117-143, 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.07.007>
- YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, v. 19, n. 13, p. 1467-1476, 1988. <http://dx.doi.org/10.1080/00103628809368027>

Contribuição dos autores: Ludmila de Freitas realizou as coletas de solo do experimento e a escrita científica; José Carlos Casagrande contribuiu com a coleta de solo do experimento e com a revisão bibliográfica e a escrita científica; Ivanildo Amorim de Oliveira contribuiu com a escrita científica e com a revisão bibliográfica; Milton César Costa Campos contribuiu com a escrita, a revisão bibliográfica e as correções técnica e gramatical do trabalho.

Fonte de financiamento: Não houve fonte de financiamento.

Conflito de interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesse.