

ATRIBUTOS QUÍMICOS DE LATOSSOLO VERMELHO SUBMETIDO A DIFERENTES MANEJOS

Ludmila de Freitas¹, José Carlos Casagrande², Ivanildo Amorim de Oliveira¹,
Milton César Costa Campos³, Vinícius Mendes Rodrigues de Oliveira¹

¹Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Jaboticabal, São Paulo, Brasil - ludmilafreitas84@gmail.com; ivanildoufam@gmail.com; viniciusmro91@gmail.com

²Universidade Federal de São Carlos, Centro de Ciências Agrárias, Araras, São Paulo, Brasil - bighouse@cca.ufscar.br

³Universidade Federal do Amazonas, Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente, Humaitá, Amazonas, Brasil - mcesarsolos@gmail.com

Recebido para publicação: 03/12/2012 – Aceito para publicação: 08/12/2014

Resumo

A retirada da vegetação natural para implantação de sistema agrícola pode provocar desequilíbrios no solo, conforme o sistema de manejo empregado. Com o objetivo de estudar as alterações em Latossolo Vermelho Distrófico causadas pelo cultivo contínuo de cana-de-açúcar, selecionaram-se três áreas (mata, cana-de-açúcar e reflorestada) adjacentes, no município de Guariba (SP). Em cada área, foram coletadas, aleatoriamente, quatro amostras, nas camadas de 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m. Foram avaliados os atributos químicos pH, matéria orgânica (MO), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), alumínio (Al) e acidez potencial (H+Al), e calculados os valores de soma de bases (SB), capacidade de troca de cátions (CTC), saturação por alumínio (m%) e saturação por bases (V%). As análises de agrupamentos e componentes principais permitiram identificar a formação de três grupos, formados por mata nativa, área reflorestada e área com cana-de-açúcar. Os resultados indicam que o uso intensivo do solo alterou os seus atributos químicos. As técnicas de análises multivariadas mostraram que os principais atributos relacionados com os ambientes foram: na mata nativa, a MO, H+Al, m% e Al; na área com cana-de-açúcar, Mg, Ca, V%, SB e CTC. Enquanto que o ambiente reflorestado ficou entre os ambientes mata nativa e cana-de-açúcar.

Palavras-chave: Mata nativa; cana-de-açúcar; área reflorestada.

Abstract

Chemical properties of an oxisol under different management practices. The removal of natural vegetation for establishing an agricultural system may lead to soil imbalances according to management system used. Three adjacent areas were selected in Guariba, SP, Brazil, for the purpose of studying changes in a Latossolo Vermelho Distrófico (oxisol) caused by continuous cropping of sugarcane. In each area, four samples were collected in the 0.0-0.10 m and 0.10-0.20 m soil layers. The following chemical properties were evaluated: pH, organic matter (OM), phosphorus (P), potassium (K), calcium (Ca), magnesium (Mg), aluminum (Al), potential acidity (H+Al), and aluminum saturation (m%); and the values of the sum of bases (SB), cation exchange capacity (CEC), and base saturation (V%). Cluster analyses and principal components allowed identification the formation of three groups, made up of native forest, reforested area, and the area planted to sugarcane. Results indicate that intensive use of the soil altered its chemical properties. Multivariate analysis techniques showed that the main properties related to the environment in the native forest area were organic matter, potential acidity, aluminum saturation, and aluminum. In the sugarcane area the properties were Mg, Ca, V%, BS, SB, and CEC. The reforested area was in an intermediate position between the native forest and sugarcane environments.

Keywords: Native forest; sugarcane; reforested area.

INTRODUÇÃO

O aumento da intensidade do uso do solo e a diminuição da cobertura vegetal nativa têm levado à degradação dos recursos naturais e, em especial, à diminuição da fertilidade do solo. Os sistemas agrícolas que associam a monocultura contínua ao uso de equipamentos inadequados de preparo do solo resultam em rápida degradação do solo. Com a conversão floresta/uso agropecuário, ocorrem

desequilíbrios nos ecossistemas, uma vez que o manejo adotado pode ocasionar a alteração dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo (FONSECA *et al.*, 2007).

As propriedades químicas dos solos são significativamente modificadas com a retirada da vegetação natural e o cultivo, principalmente na camada arável, em decorrência da adição de corretivos e fertilizantes e de operações agrícolas. Essas alterações dependem de vários fatores, como a cultura implantada e o manejo utilizado, a classe e a fertilidade inicial do solo, o comportamento físico-químico de cada nutriente e suas interações com o meio (MARCHIORI JÚNIOR; MELO, 2000). Ademais, as alterações nos teores de nutrientes do solo e o conhecimento da fertilidade dos solos são fatores primordiais para a obtenção de sucesso na atividade agrícola (FRAZÃO *et al.*, 2008).

Os ecossistemas naturais apresentam integração harmoniosa entre a cobertura vegetal e os atributos do solo, em virtude de processos essenciais de ciclagem de nutrientes e acúmulo e decomposição de matéria orgânica. Dessa forma, o conhecimento das modificações químicas 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 conservação dos ecossistemas.

As inter-relações das propriedades do solo controlam os processos e os aspectos relacionados às suas variações espaciais e temporais, de tal forma que qualquer alteração pode afetar diretamente a sua estrutura e a atividade biológica e, conseqüentemente, a sua qualidade (CARNEIRO *et al.*, 2009). Segundo Cardoso *et al.* (2011), avaliações das alterações nas propriedades do solo decorrentes de impactos da intervenção antrópica em ecossistemas naturais podem constituir importante instrumento para auxiliar no monitoramento da conservação ambiental, pois permitem caracterizar a situação atual, alertar para situações de risco e, por vezes, prever situações futuras, especialmente quando adotada como referência a vegetação nativa original.

O estudo dos atributos do solo ao longo do tempo permite quantificar a magnitude e a duração das alterações provocadas por diferentes sistemas de manejo. Por serem sensíveis, esses atributos são importantes para estabelecer se houve degradação ou melhoria da qualidade do solo em relação a um sistema de manejo determinado (REICHERT *et al.*, 2009).

Nesse contexto, para identificar o potencial ou as limitações de funcionamento de um tipo de solo, é preciso estabelecer um referencial, o qual se relaciona ao solo em estado natural, sem alterações antrópicas. Teoricamente, nessas condições o solo expressaria o seu potencial, suas limitações e sua qualidade de referência, pois, quando ocorre a modificação de sistemas naturais para agrícolas, muitos atributos do solo são alterados e sua qualidade é modificada (MELO FILHO *et al.*, 2004).

Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar, comparativamente, as alterações nos atributos químicos do solo em área cultivada com cana-de-açúcar, em área revegetada com espécies florestais nativas e em área de mata natural, mediante a adoção de técnicas de análise estatística multivariada.

MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo localiza-se no nordeste do estado de São Paulo, no município de Guariba (Figura 1), na localização geográfica 21°31'31" S e 48°19'25" O. O local apresenta altitude de 600 m e o clima é Cwa, segundo a classificação de Köppen – do tipo mesotérmico, com inverno seco, precipitação de 1.400 mm, chuvas concentradas no período de novembro a fevereiro. O solo da área foi classificado como Latossolo Vermelho Distrófico, segundo critérios da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2013), com textura franco-argilo-arenosa e relevo plano.

O estudo foi realizado em três áreas adjacentes e homogêneas: a) área com mata em condição natural (AM), caracterizada como Floresta Estacional Semidecidual tropical subcaducifólia, com cerca de 60 anos e 18 ha de extensão; b) área com cana-de-açúcar (AC), cultivada há mais ou menos 40 anos, com extensão de 50 ha aproximadamente. O preparo do solo para o plantio foi realizado com arado de discos e grade pesada. A adubação utilizada foi somente torta de filtro nos últimos três ciclos da cultura, não havendo aplicação de qualquer outro tipo de fertilizante nesse período, porém a área foi adubada anteriormente, tendo sido realizada calagem em área total, baseada em análise de fertilidade prévia do solo, visando elevação da saturação por bases a 70%; c) área reflorestada com espécies nativas (AR), implantada há 8 anos, sendo anteriormente explorada com monocultura de cana-de-açúcar por 40 anos. Nessa área foram introduzidas algumas espécies arbóreas, como, por exemplo, o jambolão, pelos próprios trabalhadores locais, sem bases científicas. Assim, as espécies escolhidas não foram selecionadas.

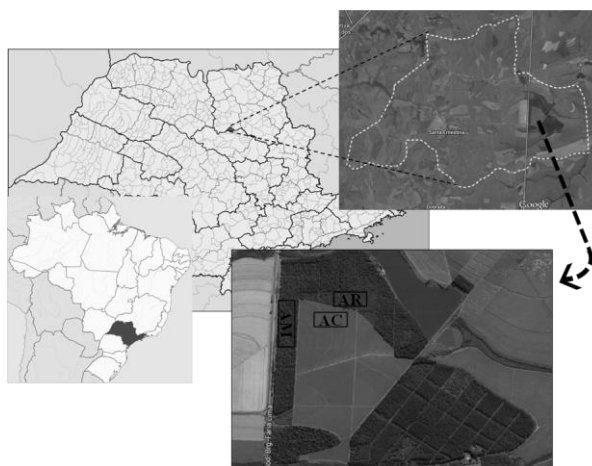


Figura 1. Localização das áreas: AC: área cultivada com cana-de-açúcar; AR: área com reflorestamento; AM: mata nativa.

Figure 1. Location of areas: AC: cultivated with sugarcane area; AR: area with reforestation; AM: native forest.

Cada ecossistema foi subdividido em quatro subáreas, cada uma com 1/4 da área total de cada ecossistema. Para as análises químicas, foram coletadas quatro amostras deformadas, compostas por quinze pontos, em ziguezague, por área. Foram realizadas quatro repetições por área, escolhidos aleatoriamente, na profundidade de 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m, sendo no total 8 amostras por área, totalizando 24 amostras coletadas. Após a coleta, as amostras de solo foram acondicionadas em sacos de plástico, identificadas e conduzidas para serem processadas no Laboratório de Fertilidade do Solo pertencente ao Centro de Ciências Agrárias da Universidade Estadual de São Carlos, campus de Araras, estado de São Paulo.

A análise química de rotina para fins de fertilidade seguiu o método proposto pela Embrapa (2011). Determinou-se valor de pH, teor de matéria orgânica (MO), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), alumínio (Al), acidez potencial (H+Al) e saturação por alumínio (m%), sendo calculados os valores de soma das bases (SB), capacidade de troca de cátions (CTC) e saturação por bases (V%).

Técnicas estatísticas foram utilizadas para verificar semelhanças entre os manejos, na tentativa de agrupá-los usando-se os atributos químicos do solo, por meio de estatística multivariada. Foram aplicados dois métodos estatísticos, visando classificar os acessos em grupos: análise de agrupamentos hierárquica e análise de componentes principais (ACP).

A análise de agrupamentos hierárquica foi realizada calculando-se a distância euclidiana entre os acessos para o conjunto das doze variáveis (pH, MO, P, K, Ca, Mg, Al, H+Al e m%, e calculados os valores de SB, CTC e V%) e utilizando-se o algoritmo de Ward para a obtenção dos agrupamentos de acessos similares. Para reduzir os erros, devidos às escalas e às unidades das variáveis, os dados foram padronizados com média zero e variância igual a 1. O resultado da análise foi apresentado em forma gráfica (dendrograma), que auxiliou na identificação dos agrupamentos dos acessos. Os grupos foram definidos pelo traçado de uma linha paralela ao eixo horizontal, onde se encontram as maiores distâncias em que os grupos foram formados. O dendrograma obtido pela análise de agrupamentos 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 conhecimento, pelo pesquisador, de seu objeto de pesquisa ao decidir o ponto em que vai ser efetuado o 'corte'.

A ACP foi aplicada a fim de se avaliarem qualitativamente as características de cada área e se verificarem as variáveis mais relacionadas com cada uma delas. A partir dos escores dos componentes principais, foi obtida a matriz de distância euclidiana entre as formações. Para reduzir os erros, devidos às escalas e às unidades das variáveis selecionadas, os dados também foram padronizados com média zero e

variância 1. Isso permitiu, também, condensar a maior quantidade da informação original contida em p variáveis ($p = 12$, neste estudo) em duas variáveis latentes ortogonais, denominadas *componentes principais*, que são combinações lineares das variáveis originais criadas com os dois maiores autovalores da matriz de covariância dos dados (HAIR, 2005).

Dessa forma, o conjunto inicial de doze variáveis passou a ser caracterizado por duas novas variáveis latentes, o que possibilitou sua localização em figuras bidimensionais (ordenação dos acessos por componentes principais). A adequação dessa análise é verificada pela informação total das variáveis originais retida nos componentes principais que mostram autovalores superiores à unidade, ou autovalores inferiores à qual não dispõem de informação relevante.

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 os três ambientes com os atributos estudados. O objetivo dessa análise foi verificar se os valores de F formados pelas médias das variáveis analisadas conjuntamente diferiram quando os ambientes foram contrastados entre si. Em caso afirmativo, indica que os manejos são diferentes, analisando-se todos os atributos em conjunto.

Todas as análises estatísticas multivariadas foram processadas no software Statistica versão 7.0 (STATSOFT, 2004).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os valores dos atributos químicos do solo apresentaram variações sob os usos das áreas de mata, reflorestada e de cana-de-açúcar, nas profundidades de 0,0-0,10 e 0,10-0,20 m (Tabela 1).

Para a maioria dos nutrientes, os maiores valores médios, nas duas profundidades estudadas, foram verificados na área sob cultivo, quando comparados com a área testemunha (AM) e a AR. Esse comportamento pode ser atribuído ao tipo de manejo utilizado (adubação e calagem), além da incorporação superficial dos restos culturais, o que contribui com a ciclagem dos nutrientes extraídos pelas culturas anteriores. Na mata, pode-se explicar os teores baixos de nutrientes, em parte, pelo fato de que nesse ambiente grande parte dos nutrientes está alocada na vegetação, além da pobreza química do Latossolo oriundo do alto grau de intemperismo, característica dessa classe de solos (PORTUGAL *et al.*, 2008).

Tabela 1. Valores médios dos atributos químicos do solo nas diferentes áreas estudadas.

Table 1. Mean values of soil chemical properties in different areas studied.

Área	P Resina mg/dm ³	MO g/dm ³	pH CaCl ₂	mmol _c dm ⁻³								V %	m
				K	Ca	Mg	H+Al	Al	SB	CTC			
Profundidade 0,0 - 0,10 m													
AC	92,5	15,0	6,2	2,8	24,2	10,25	22,0	0,8	37,3	59,3	63,1	1,3	
AR	93,5	15,2	4,7	1,3	16,5	5,5	42,50	2,4	23,3	65,8	35,3	3,6	
AM	2,75	20,0	3,7	1,4	2,0	2,5	84,0	16,6	5,9	89,9	6,6	18,5	
CV	107,1	17,5	22,7	42,5	69,7	55,4	55,4	114,2	26,3	69,9	61,8	145,5	
Profundidade 0,10 - 0,20 m													
AC	94,2	13,5	5,9	2,4	22,7	9,2	27,5	0,8	34,4	61,9	56,2	1,3	
AR	101,5	13,2	4,6	2,3	16,2	5,5	44,2	2,2	24,1	68,3	35,2	3,2	
AM	1,7	18,5	3,8	2,5	1,75	2,5	74,2	16,3	6,8	81,0	8,3	20,4	
CV	119,9	16,7	19,5	69,9	68,6	51,4	43,8	114,6	19,8	62,8	55,2	141,2	

Médias de quatro repetições. Letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% na coluna. AC: área cultivada com cana-de-açúcar; AR: área reflorestada; AM: área com mata nativa (referencial); CV: coeficiente de variação %.

As mudanças nos sistemas estudados influenciaram a concentração de matéria orgânica no solo (Tabela 1). Os valores de matéria orgânica mostraram-se superiores nas camadas superficiais, o que já havia sido observado por Silva *et al.* (2006). Os valores de MO foram maiores na mata, nas duas profundidades avaliadas, indicando que a retirada da mata e a utilização agrícola reduziram os teores de C orgânico no solo. Devido ao revolvimento dos solos sob cultivo, a aeração é maior, sendo a mineralização de MO favorecida, o que explica um maior acúmulo de restos vegetais e consequente acúmulo de MO no solo (RANDO, 1981). Esses resultados também estão de acordo com Portugal *et al.* (2010), segundo os quais há um declínio no estoque de MO após a conversão de florestas nativas em sistemas agrícolas. Segundo esses autores, essa redução pode ser atribuída ao aumento da erosão do solo e a menores

quantidades de aportes orgânicos em sistemas manejados comparativamente às florestas nativas, o que está ocorrendo em maior intensidade nas áreas com o cultivo de cana-de-açúcar.

Os valores mais elevados de CTC coincidiram com os tratamentos com maiores teores de MO, tendência também observada por Casagrande e Dias (1999), que estudaram a influência do cultivo de cana-de-açúcar sobre as propriedades químicas do solo. A contribuição da matéria orgânica para a CTC dos solos é fundamental e foi estimada entre 56 e 82% da CTC da camada superficial de solos sob condições tropicais (RAIJ, 1981), o que favorece a retenção de cátions e diminui as perdas por lixiviação (CARNEIRO *et al.*, 2009). Nos Latossolos brasileiros, a MO é a principal geradora de cargas negativas na superfície (SOUSA *et al.*, 2007), sendo natural a maior CTC encontrada na área com mata, onde se encontram os maiores teores de MO. Resultados similares também foram obtidos por Portugal *et al.* (2010). A CTC do solo também teve seus maiores valores encontrados na área com mata nativa, na profundidade de 0,0-0,10 m em relação às demais áreas.

Os teores de Al variaram entre as áreas, com os maiores valores ocorrendo na mata e os menores na cana-de-açúcar, acompanhando as variações de pH, já que o Al tóxico às plantas é reduzido à medida que o pH aumenta (SOUSA *et al.*, 2007; PORTUGAL *et al.*, 2010). Os maiores valores médios de pH verificados na área sob cultivo variaram de 4,6 a 6,2 e de 3,7 a 3,8 na área de mata, provavelmente em consequência da maior lixiviação promovida pelo intenso regime hídrico associado às melhores condições de drenagem em área de mata (CAMPOS *et al.*, 2012).

Os valores de acidez potencial (H+Al) e saturação por alumínio (m%) também variaram entre os usos, apresentando comportamento similar ao mostrado pelo Al, com os maiores valores observados na mata e os menores no canavial, estando a área reflorestada intermediária aos demais manejos. Tais valores na área de mata nativa foram maiores entre os usos agrícolas nas duas profundidades, o que não aconteceu com o Al, indicando que a diferença na acidez potencial nesse ambiente deve-se ao maior valor de H. Isso se explica pelo maior teor de matéria orgânica observado na mata (Tabela 1), já que a matéria orgânica do solo apresenta vários grupos funcionais, especialmente os grupos carboxílicos e fenólicos, que podem liberar o H que irá compor os íons envolvidos na capacidade de troca de cátions do solo (CTC) (SOUSA *et al.*, 2007) e acidificá-lo. Segundo Cardozo (2008), os elevados teores de H+Al são decorrentes dos altos teores de carbono orgânico verificados nas áreas. Para Tibau (1984), a matéria orgânica é uma fonte de prótons H⁺, que tendem a acidificar os solos. Tal acidificação se reflete de modo mais acentuado nos valores de acidez extraível do que no pH do solo.

Os teores de P disponível foram maiores nas áreas com reflorestamento e com cana-de-açúcar, nas duas profundidades, enquanto a mata apresentou os menores valores. Esses resultados justificam-se pelas adições de torta de filtro nos cultivos sucessivos da cana-de-açúcar e por, possivelmente, no momento da introdução das espécies nativas na área com reflorestamento, ter sido realizada adubação em cobertura. O fósforo é considerado um elemento essencial para as plantas e se encontra em baixa quantidade nos solos brasileiros (BASTOS *et al.*, 2008).

Os teores de K, Ca e Mg variaram entre os diferentes usos do solo. Os teores médios de Ca, Mg e K foram maiores na área sob cultivo, nas duas profundidades analisadas, exceto para o K, que na profundidade de 0,10-0,20 cm não apresentou maiores valores. Possivelmente, valores elevados desses nutrientes na área cultivada sejam devidos às aplicações de calcário e fertilizantes (cloreto de potássio) anteriores à amostragem do solo. Na mata, os menores teores de nutrientes explicam-se, em parte, pelo fato de que, nesse ambiente, grande parte dos nutrientes está alocada na vegetação, além da pobreza química do Latossolo e do alto grau de intemperismo, como mostrado para o ambiente de Mar de Morros (PORTUGAL *et al.*, 2008; PORTUGAL *et al.*, 2010).

Os valores de SB e V% seguem a tendência dos valores descritos para K, Ca e Mg: em ambos os casos, possuem maiores valores para a área de cana-de-açúcar. À medida que se reduziu a saturação por bases, o pH também diminuiu, o que caracteriza uma acidez elevada.

Nota-se, observando a tabela 1, que os valores de CV são altos, o que pode ser considerado como um dos primeiros indicadores da existência de heterogeneidade nos dados (BOTEGA *et al.*, 2013). Os elevados valores de CV verificados para alguns atributos sugerem alta heterogeneidade em torno da média entre os atributos avaliados. Referida heterogeneidade pode ter várias causas, dentre as quais merecem destaque os processos de formação do solo e o acúmulo e distribuição das partículas do solo em função da forma do relevo e do fluxo de água na área (ARTUR *et al.*, 2014). Além disso, segundo Carvalho *et al.* (2003), os resultados de análises de atributos do solo costumam apresentar valores altos de

coeficiente de variação.

Diante da possibilidade de utilização das variáveis selecionadas para distinção das áreas, fez-se uso da análise de agrupamento hierárquico, mediante a qual foi possível observar a separação dos ambientes (Figura 2), agrupando-se as variáveis, com base no grau de semelhança, em grupos homogêneos.

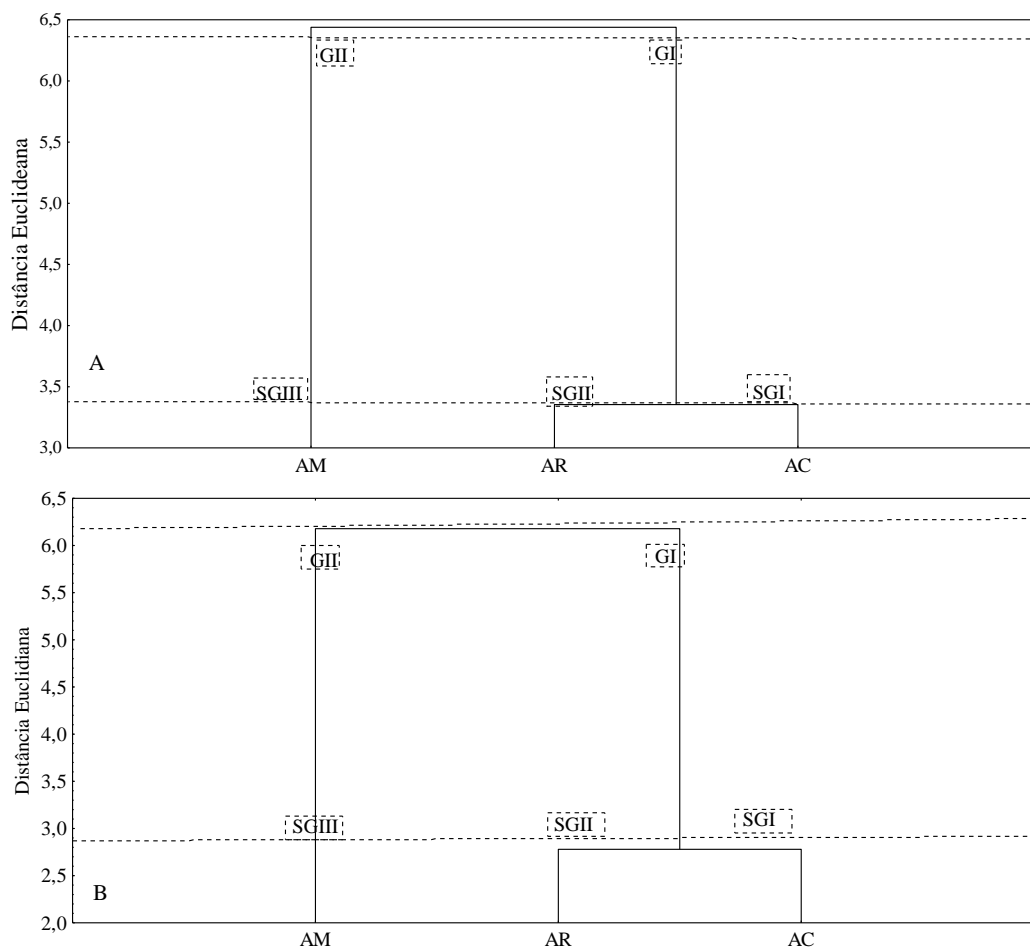


Figura 2. Dendrograma resultante da análise hierárquica de agrupamentos mostrando a formação de grupos segundo as variáveis. A: profundidade 0,0-0,10 m; B: profundidade 0,10-0,20 m; AC: área cultivada com cana-de-açúcar; AR: área reflorestada; AM: área com mata nativa.

Figure 2. Dendrogram resulting from hierarchical cluster analysis showing the formation of groups according to the variables. The depth: 0.0-0.10 m; B: depth from 0.10 to 0.20 m; AC: cultivated with sugarcane area; AR: reforested area; AM: area with native forest.

Observa-se que, tanto na profundidade de 0,0-0,1 m quanto na profundidade de 0,1-0,2 m, as áreas de cana-de-açúcar e com reflorestamento apresentaram maior semelhança, por possuírem a menor distância euclidiana. Foi admitido um corte na distância euclidiana de 6,4 e de 6,8 nas figuras 2A e 2B, respectivamente, o que favoreceu uma divisão de grupos, indicando que, com o uso conjunto dos atributos químicos, é possível ordenar os dados em dois grupos: o GI, englobando os dados formados pela área reflorestada e com a área com cana-de-açúcar, e o GII, formado pela área de mata. O grupo formado por mais de uma área (GI), provavelmente, se deve ao fato de apresentarem atributos químicos similares, estando de acordo com a afirmativa de Yemefack *et al.* (2005) de que essa técnica permite agrupar variáveis com características semelhantes entre si e com aumento de variabilidade entre os agrupamentos formados. Diminuindo a distância euclidiana, com um corte na distância de 3,4 e 2,0 (Figura 2A e 2B, respectivamente), nota-se a formação de 3 subgrupos: o SBGI, formado pela área cultivada com cana-de-açúcar, o SBGII, pela área reflorestada, e o SBGIII, pela mata nativa. 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 três grupos foi marcante, mostrando as particularidades de cada tipo de manejo, pois as características dos atributos de um mesmo grupo são semelhantes e diferentes do comportamento de outros agrupamentos. Esse resultado deve-se ao fato de que, devido ao manejo e ao cultivo adotado, o ambiente cultivado com cana-de-açúcar e a área reflorestada se diferenciaram do ambiente natural, a mata nativa. Tais resultados corroboram os encontrados por Freitas *et al.* (2012).

Essa separação dos pontos da floresta com a área cultivada e com reflorestamento salienta o fato de que o cultivo de cana-de-açúcar produz uma modificação nos atributos do solo, fazendo com que ele se torne diferente do solo originalmente coberto por floresta. Segundo Spera *et al.* (2004), à medida que essas áreas vão sendo incorporados ao processo produtivo, os atributos do solo sofrem alterações. As diferenças são devidas às variações entre a fertilidade natural da mata e a decorrente de diferentes níveis de adubação da cana, além de haver influência do manejo do solo na implantação e manutenção da cultura, bem como pelo uso de implementos agrícolas.

Os agrupamentos formados pela análise de Cluster confirmam a diferença de ambientes, visto que os três manejos estudados estão nitidamente separados, ou por outra visão na distância de 4,3, o ambiente cultivado e o reflorestado são mais similares, sendo a mata nativa o ambiente isolado e que mais se diferencia dos demais.

Conforme o pressuposto de haver alterações nos atributos químicos do solo em relação ao manejo, esperava-se encontrar melhores condições químicas do solo na mata que nos demais ambientes, no entanto os valores dos atributos químicos em geral foram superiores nas áreas cultivadas. Na tabela 2, é possível perceber, pela distância euclidiana, uma diferença de ambiente maior entre mata nativa e cana-de-açúcar, e, na sequência, entre mata nativa e área reflorestada.

Tabela 2. Distância euclidiana entre os ambientes estudados.

Table 2. Euclidean distance between the studied environments.

Camada	Distância Euclidiana 0,0-0,10 m			Distância Euclidiana 0,10-0,20 m		
	AC	AR	AM	AC	AR	AM
AC	0,00	3,35	6,79	0,00	2,86	6,70
AR	3,35	0,00	4,55	2,86	0,00	4,99
AM	6,79	4,55	0,00	6,70	4,99	0,00

AC: área com cana-de-açúcar; AR: área reflorestada; AM: mata nativa.

Essas diferenças de agrupamento resultam, portanto, das diferenças dos atributos observados, possibilitando uma análise mais generalizada da qualidade das áreas estudadas, como a análise de componentes principais. Os atributos que promoveram a ausência de similaridade da mata com as demais áreas e, contrariamente, a grande proximidade do ambiente cultivado com cana-de-açúcar e área reflorestada, podem ser evidenciados nos resultados da análise de componentes principais (FREITAS *et al.*, 2014).

Na análise de componentes principais, foram considerados os dois primeiros fatores, fator 1 e fator 2, pois eles conseguem reter cumulativamente a quantidade suficiente da informação total contida no conjunto das variáveis originais para cada área, definido por 12 variáveis, o que possibilita sua localização com um ponto em um gráfico bidimensional (HAIR *et al.*, 2005). A primeira e a segunda componentes principais foram necessárias para explicar a variância total, devido somente a elas apresentarem elevados autovalores e porcentagem de variância total acima de 70% (autovalores de 9,76 e 1,22 na profundidade 0,0-0,10 m, e 9,29 e 1,12 na profundidade 0,10-0,20 m; e porcentagem de variância acumulada de 91,61% na profundidade 0,0-0,10 m e de 86,90% na profundidade de 0,10-0,20 m), justificando o uso da CPI e CP2 (Tabela 3). Resultados similares foram encontrados por Freitas *et al.* (2014). Segundo Freddi *et al.* (2008), as CPs que apresentam autovalores superiores a 1 (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 4 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.

Tabela 3. Autovalores e % da variância pela análise dos componentes principais para as análises químicas do solo.

Table 3. Eigenvalues and % variance by principal component analysis for the chemical analysis of the soil.

Componente	Autovalores	% da variância total	
		% da variância total	% cumulativas da variância total
Profundidade 0,0-0,10 m			
1	9,76	81,41	81,41
2	1,22	10,20	91,61
Profundidade 0,10-0,20 m			
1	9,29	77,47	77,47
2	1,12	9,14	86,90

Tabela 4. Correlação entre cada componente principal e as variáveis analisadas.

Table 4. Correlation between each principal component and variables.

Atributos	Componente principal			
	0,0-0,10 m		0,10-0,20 m	
	Fator 1	Fator 2	Fator 1	Fator 2
P Resina	-0,654893	-0,942340*	-0,588908	-0,249809
Matéria orgânica	0,784423*	0,235274	0,891646*	-0,059181
pH	-0,959783*	0,673716	-0,941810*	0,022990
Potássio	-0,744066*	0,246070	0,068390	0,973159*
Cálcio	-0,989643*	0,108486	-0,990063*	-0,080709
Magnésio	-0,965055*	0,715166*	-0,952648*	-0,074481
Acidez potencial	0,974553*	-0,131364	0,952479*	0,048684
Alumínio	0,920798*	-0,427966	0,954632*	0,112032
CTC	-0,886340*	-0,618813	-0,869735*	0,269725
V%	-0,988241*	0,803090*	-0,982304*	0,079195
SB	-0,997334*	0,100846	-0,993596*	0,056748
m%	0,885797*	0,613470	0,921197*	-0,081050

* Valores mais significativos.

A partir das observações feitas na distribuição dos atributos químicos do solo sob os diferentes usos pela ACP, observou-se que algumas propriedades apresentam comportamento distinto em relação às demais. De acordo com a tabela 4, na camada de 0,0-0,10 m, as variáveis que melhor explicaram ou mais contribuíram para a variância total dos dados foram, à exceção do P, todas as demais variáveis na primeira componente principal, e P, Mg e V% na segunda componente principal. Na camada de 0,10-0,20 m, analisando-se a primeira componente principal, observou-se que as variáveis que mais contribuíram para a variância total dos dados foram, à exceção do P e do K, todas as demais variáveis. No segundo componente principal, observa-se que somente K teve maior poder discriminatório entre as variáveis analisadas.

A representação gráfica e a correlação das variáveis nos componentes principais (Figura 3 e Tabela 4) permitiram caracterizar as variáveis que mais discriminaram na formação e diferenciação dos ambientes, vindo a confirmar a análise de agrupamento para os ambientes estudados, com a formação de três grupos, que correspondem à diferenciação de três tipos de manejo.

As variáveis mais fortemente correlacionadas com o ambiente da mata nativa nas duas profundidades analisadas foram MO, CTC, m%, Al e H+Al. Solos com mata apresentaram maior teor de MO, pois, segundo Morais *et al.* (2012), maiores teores de matéria orgânica em área de vegetação nativa explicam-se devido à maior formação de massa vegetal e, conseqüentemente, de grandes quantidades de resíduos orgânicos. A maior relação com a MO deve-se também ao fato de ela estar diretamente associada com a não interferência antrópica, sem o uso de implementos agrícolas e de tratos culturais. No ambiente com mata nativa, é possível verificar uma maior influência de MO e CTC, indicando que a retirada da mata e a utilização agrícola reduziram os teores de C orgânico no solo, como pode ser observado por meio da figura 1 para o ambiente cultivado. Esses resultados também estão de acordo com Portugal *et al.* (2010) e Freitas *et al.* (2011), segundo os quais há um declínio no estoque de matéria orgânica após a conversão de florestas nativas em sistemas agrícolas. Segundo esses autores, essa redução pode ser atribuída ao aumento da erosão do solo, aos processos mais acelerados de mineralização da matéria orgânica do solo e a menores

quantidades de aportes orgânicos em sistemas manejados, comparativamente às florestas nativas, o que provavelmente está ocorrendo em maior intensidade nas áreas com o cultivo de cana-de-açúcar.

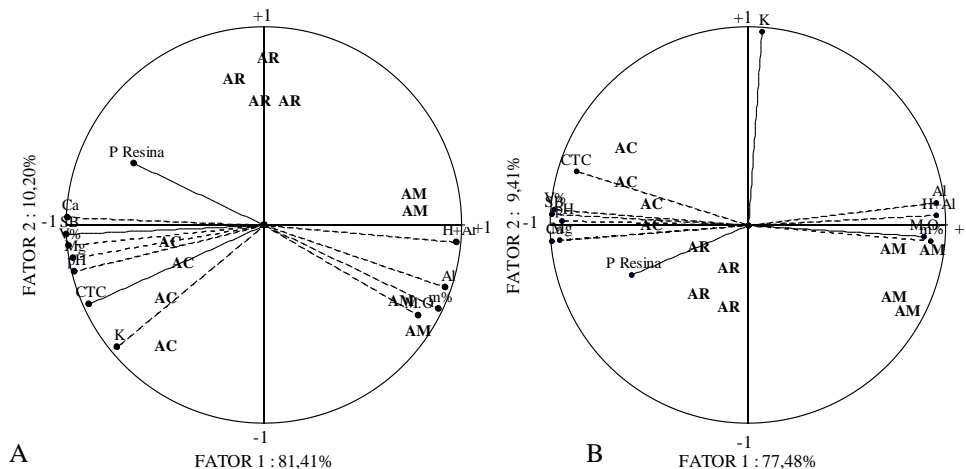


Figura 3. Análise de componentes principais das médias dos atributos químicos dos diferentes ecossistemas estudados: AC: área cultivada com cana-de-açúcar; AR: área reflorestada; AM: área com mata nativa (testemunha). A: camada de 0,0-0,10 m; B: camada de 0,10-0,20 m.

Figure 3. Principal components analysis of the averages of the chemical attributes of the different ecosystems studied: AC: area planted with sugar cane; AR: reforested area; AM: native forest (reference). A: layers of 0,0-0,10 m; B: layers 0,10-0,20 m.

Os altos teores de alumínio trocável são esperados em solos sob vegetação nativa que sustenta vegetação altamente adaptada ao efeito tóxico do Al e a condições de oligotrofia (SOARES *et al.*, 2011). Assim como observado para as variações de pH, os teores de Al trocável são menores nos ambientes cultivados, em função do efeito das práticas corretivas.

Os teores baixos de Ca, Mg, K e SB na mata demonstram um ambiente natural sem adição de calagem ou de qualquer outro tipo de base introduzida artificialmente. Assim, à medida que os teores de bases diminuem, aumenta a acidez e, conseqüentemente, verifica-se uma maior quantidade de H⁺ disponível na solução do solo, o que caracteriza uma acidez elevada. O contrário se observa no ambiente cultivado, no qual uma maior influência dessas variáveis ocorre devido às aplicações de calcário e insumos anteriores à amostragem, que contribuíram para resultados mais elevados de bases. No ambiente reflorestado, encontram-se valores intermediários aos demais, o que salienta o fato de que esse solo está se aproximando de uma condição natural e de equilíbrio para espécies florestais menos exigentes em fertilidade. Com isso, esse ambiente possui características do ambiente cultivado e da mata nativa, porém nota-se uma proximidade maior ao ambiente cultivado, justificando que as alterações de seus atributos sejam devidas ao manejo do solo. A área em recuperação apresentou baixo teor de MO em relação às demais áreas. Trata-se de área degradada em regeneração e que ainda não alcançou produção expressiva de biomassa vegetal para resultar em elevados acúmulos de matéria orgânica no solo.

A ACP das variáveis mostrou que, levando em conta todos os aspectos químicos analisados, houve uma clara distinção entre os ambientes, como pode ser visualizado na figura 2, onde a mata é encontrada no segundo quadrante e o ambiente cultivado e reflorestado estão bem próximos, no primeiro e quarto quadrantes.

Essa separação dos pontos da mata com a área cultivada e reflorestada salienta o fato de que o cultivo de cana-de-açúcar deve produzir uma modificação acentuada no solo, fazendo com que ele se torne diferente do solo originalmente coberto por floresta. Segundo Spera *et al.* (2004), à medida que essas áreas vão sendo incorporadas ao processo produtivo, os atributos do solo sofrem alterações. As diferenças são devidas às variações de fertilidade natural da mata e às decorrentes de diferentes níveis de adubação da cana. A variação dos atributos do solo na vegetação nativa é muito menor quando se compara com solos de uso agrícola, razão pela qual a vegetação nativa é um referencial para avaliação de solos incorporados a sistemas agrícolas. É possível observar, também, que a área reflorestada está entre os demais ambientes, o que

significa um ambiente intermediário quanto às características dos atributos químicos.

Com o objetivo de melhor entender as relações entre os 3 ambientes analisados, é possível verificar, por meio da tabela 5, que os maiores valores de F são encontrados quando a área cultivada com cana-de-açúcar é comparada com a mata nativa (Tabela 5).

Nota-se que a área reflorestada está mais próxima do ambiente cultivado que o da mata nativa, apesar do aporte de resíduos orgânicos (verificou-se considerável acúmulo de serapilheira), o solo apresentou valores intermediários na maioria de seus atributos avaliados, sendo que essa área ainda não atingiu a adequada qualidade química do solo, visto que, em condições naturais, os principais fatores que interferem na ciclagem de nutrientes são o clima, a composição das espécies vegetais, o status sucessional da floresta (tempo após alguma perturbação) e a fertilidade do solo (VITOUSEK; SANFORD, 1986). Pode-se inferir que, apesar dos dez anos de reflorestamento sem revolvimento do solo, esse período não foi suficiente para a recuperação das características originais do solo (solo de mata nativa). É importante considerar que a área esteve sob cultivo de cana-de-açúcar por mais de 40 anos. Outra explicação provável para esse resultado seria o solo da área cultivada ser o mais revolvido, devido às práticas culturais adotadas e ao uso intensivo de implementos agrícolas, que afetam diretamente os atributos analisados. Em geral, a manutenção desses ecossistemas ocorre por meio da ciclagem de nutrientes. As perdas de elementos são pequenas. Qualquer intervenção na dinâmica desse processo pode modificar a sincronia entre a disponibilidade de nutrientes oriundos da decomposição dos resíduos vegetais e a demanda nutricional das plantas, gerando, na maioria das vezes, uma maior perda de nutrientes do solo (MYERS *et al.*, 1994).

Tabela 5. Resultado da Anova contrastando as áreas estudadas com todas as variáveis em conjunto.

Table 5. Results of Anova contrasting areas studied with all the variables together.

Áreas	0,0 - 0,10 m	0,10 - 0,20 m
	Valor de F	Valor de F
AC x AR	234,65***	221,5621***
AC x AM	729,58***	675,7447***
AM x AR	378,42***	332,1395***

(***) Todos os valores são significativos para $p < 0.001$.

Essas diferenças de agrupamento são resultado, portanto, das diferenças dos atributos observadas em função do manejo, possibilitando uma análise mais generalizada da qualidade das áreas estudadas. Uma explicação provável para esse resultado deve-se ao fato de o cultivo da cana-de-açúcar promover depreciação da MO em função do preparo intensivo do solo e do uso de fertilizantes.

O uso conjunto das análises exploratórias multivariadas mostra a facilidade de identificar as diferenças e a separação dos três ambientes resultantes das diferenças do uso e do manejo das áreas, o que determinou as alterações nos atributos químicos do solo nas áreas estudadas.

CONCLUSÕES

- Os atributos químicos do solo sofreram alterações em função do uso e manejo do solo.
- O uso das técnicas de análise multivariada, de agrupamento e de componentes principais foi eficiente para verificar as diferenças, com base nos atributos químicos do solo em cada ambiente estudado, resultantes das diferenças do uso e do manejo das áreas.
- Os atributos *matéria orgânica*, *acidez potencial*, *saturação por alumínio* e *alumínio* foram responsáveis pela separação da área de mata dos demais ambientes.

REFERÊNCIAS

ARTUR, A. G.; OLIVEIRA, D. P.; COSTA, M. C.; ROMERO, R. E.; SILVA, M. V. C.; FERREIRA, T. O. Variabilidade espacial dos atributos químicos do solo, associada ao microrrelevo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 2, p. 141 - 149, 2014.

BASTOS, A. L.; COSTA, J. P. V.; SILVA, I. F.; RAPOSO, R. W. C.; SOUTO, J. S. Influência de doses de fósforo no fluxo difusivo em solos de Alagoas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campinas, v. 12, n. 2, p. 136 - 142, 2008.

- BOTTEGA, E. L.; QUEIROZ, D. M.; PINTO, F. A. C.; SOUZA, C. M. A. Variabilidade espacial de atributos do solo em sistema de semeadura direta com rotação de culturas no Cerrado brasileiro. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 44, n. 1, p. 1 - 9, 2013.
- CAMPOS, M. C. C.; RIBEIRA, M. R.; SOUZA JÚNIOR, V. S.; RIBEIRO FILHO, M. R.; ALMEIDA, M. C. Toposequência de solos na transição Campos Naturais-Floresta na região de Humaitá, Amazonas. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 42, n. 3, p. 387 - 398, 2012.
- CARDOSO, E. L.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; FERREIRA, M. M.; FREITAS, D. A. F. Qualidade química e física do solo sob vegetação arbórea nativa e pastagens no Pantanal sul-mato-grossense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 3, p. 613 - 622, 2011.
- CARDOZO, S. V.; PEREIRA, M. G.; RAVELLI, A.; LOSS, A. Caracterização de propriedades edáficas em áreas sob manejo orgânico e natural na região serrana do estado do Rio de Janeiro. **Semina**, Londrina, v. 29, n. 3, p. 517 - 530, 2008.
- CARNEIRO, M. A. C.; SOUZA, E. D.; REIS, E. F.; PEREIRA, H. S.; AZEVEDO, W.C. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de Cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 1, p. 147 - 157, 2009.
- CARVALHO, M. P.; TAKEDA, E. Y.; FREDDI, O. S. Variabilidade espacial de atributos de um solo sob videira em Vitória Brasil (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 4, p. 695 - 703, 2003.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Centro Nacional de Pesquisa de Solos**. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, 2011. 230 p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Centro Nacional de Pesquisa de Solos**. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 3. ed. revisada e ampliada. Brasília. 2013. 353 p.
- FONSECA, G. C.; CARNEIRO, M. A. C.; COSTA, A. R.; OLIVEIRA, G. C.; BALBINOS, L. C. Atributos físicos, químicos e biológicos de Latossolo Vermelho Distrófico de cerrado sob duas rotações de cultura. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 37, n. 1, p. 22 - 30, 2007.
- FRAZÃO, L. A.; PÍCCOLO, M. C.; FEIGL, B. J.; CERRI, C. C.; CERRI, C. E. P. Propriedades químicas de um Neossolo Quartzarênico sob diferentes sistemas de manejo no Cerrado mato-grossense. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 2, p. 641 - 648, 2008.
- 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**, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 953 - 961, 2008.
- FREITAS, L.; CASAGRANDE, J. C.; OLIVEIRA, I. A.; AQUINO, R. E. Análises multivariadas de atributos físicos em Latossolo Vermelho submetido a diferentes manejos. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 8, n. 15, p. 126 - 139, 2012.
- FREITAS, L.; CASAGRANDE, J. C.; OLIVEIRA, I. A.; SOUZA JÚNIOR, P. R.; CAMPOS, M. C. C. Análises multivariadas de atributos químicos do solo para caracterização de ambientes. **Revista Agro@mbiente On-line**, Boa Vista, v. 8, n. 2, p. 155 - 164, 2014.
- FREITAS, L.; CASAGRANDE, J. C.; DESUÓ, I. C. Atributos químicos e físicos de solo cultivado com cana-de-açúcar próximo a fragmento florestal nativo. **Holos Environment**, Rio Claro, v. 11, n. 2, p. 137 - 147, 2011.
- HAIR, J. F.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK, W. **Análise multivariada de dados**. Porto Alegre, Bookman, 2005. 597 p.
- MARCHIORI JÚNIOR, M.; MELO, W. J. Alterações na matéria orgânica e na biomassa microbiana em solo de mata natural submetido a diferentes manejos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 6, p. 1177 - 1182, 2000.
- MELO FILHO, J. F.; DEMATTÊ, J. A. M.; LIBARDI, P. L.; PORTELA, J. C. Comportamento espectral

de um Latossolo Amarelo coeso argissólico em função de seu uso e manejo. **Magistra**, Cruz das Almas, v. 16, n. 2, p. 105 - 112, 2004.

MORAIS, T. P. S.; PISSARRA, T. C. T.; REIS, F. C. Atributos físicos e matéria orgânica de um Argissolo Vermelho-Amarelo em microbacia hidrográfica sob vegetação nativa, pastagem e cana-de-açúcar. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 8, n. 15, p. 213 - 223, 2012.

MYERS, R. J. K.; PALM, C. A.; CUEVAS, E.; GUNATILEKE, I. U. N.; BROSSARD, M. The synchronization of nutrient mineralisation and plant nutrient demand. In: WOOMER, P. L.; SWIFT, P. L. (Ed.). **The biological management of tropical soil fertility**. New York: J. Wiley, 1994. p. 81 - 116.

PORTUGAL, A. F.; COSTA, O. D. V.; COSTA, L. M.; SANTOS, B. C. M. Atributos químicos e físicos de um Cambissolo Háplico tb distrófico sob diferentes usos na Zona da Mata mineira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 249 - 258, 2008.

PORTUGAL, A. F.; COSTA, O. D. V.; COSTA, L. M. Propriedades físicas e químicas do solo em áreas com sistemas produtivos e mata na região da Zona da Mata mineira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 2, p. 575 - 585, 2010.

RAIJ, B. V. Mecanismos de interação entre solos e nutrientes. In: RAIJ, B. V. **Avaliação da fertilidade do solo**. Instituto da Potassa e Fosfato, Piracicaba, 1981. p. 17 - 31.

RANDO, E. M. **Alterações nas características e propriedades físicas de um Latossolo Roxo distrófico, ocasionadas pelo cultivo convencional**. 161 f. Dissertação (Mestrado em solos e nutrição de plantas) – Escola Superior de Agricultura de Lavras, Lavras, 1981.

REICHERT, J. M.; KAISER, D. R.; REINERT, D. J.; RIQUELME, U. F. B. Variação temporal de propriedades físicas do solo e crescimento radicular de feijoeiro em quatro sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, n. 3, p. 310 - 319, 2009.

SILVA, G. R.; SILVA JÚNIOR, M. L.; MELO, V. S. Efeitos de diferentes usos da terra sobre as características químicas de um Latossolo Amarelo do estado do Pará. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 36, n. 2, p. 151 - 158, 2006.

SOARES, M. R.; CASAGRANDE, J. C.; OLIVEIRA, M. S.; MORAES, M. I. M. Nutrição mineral de espécies nativas em solos do Cerrado. In: Barbosa, L. M.(Ed.). **Restauração ecológica: desafios atuais e futuros**. São Paulo: Instituto de Botânica - SMA, 2011, p. 147 - 154.

SPERA, S. T.; SANTOS, H. P.; FONTANELLI, R. S.; TOMM, G. O. Efeitos de sistemas de produção de grãos envolvendo pastagens sob plantio direto nos atributos físicos de solo e na produtividade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 3, p. 533 - 542, 2004.

STATSOFT, INC. Statistica for Windows (Computer Program Manual). Statsoft Inc, Tulsa (OK) EUA. 2004. Disponível em: <<http://www.statsoft.com>>.

TIBAU, A. O. **Matéria orgânica do solo: matéria orgânica e fertilidade do solo**. São Paulo: Nobel, 1984, 172 p.

VITOUSEK, P. M.; SANFORD JUNIOR, R. L. Nutrient cycling in moist tropical forest. **Annual Review on Ecology Systematics**, Palo Alto, v. 17, n. 4, p. 137 - 167, 1986.

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.