

USO DA TÉCNICA DE COMPONENTES PRINCIPAIS NA FÍSICA DO SOLO

Daniel Dias Valadão Júnior¹, Aloísio Bianchini², Geovani José Silva³, Franciele Caroline de Assis Valadão¹

¹ Doutor(a) em Agricultura Tropical, Professor do Instituto Federal de Mato Grosso - Campo Novo do Parecis (MT).

² Doutor em Engenharia Agrícola, Professor do da Universidade Federal de Mato Grosso - Cuiabá (MT).

³ Doutor em Agricultura Tropical, Professor do Instituto Federal de Mato Grosso - Cáceres (MT).

RESUMO: A análise estatística multivariada pode ser empregada como uma importante ferramenta na obtenção de maior quantidade de informações, quando comparada com métodos univariados, além disso, ela pode proporcionar a escolha de atributos que isoladamente representem maior percentagem da variância total dos dados, facilitando trabalhos futuros. Assim, o objetivo deste trabalho foi aplicar a técnica de componente principal sobre um conjunto de dados obtidos antes e após a intervenção no solo com diferentes implementos em diferentes datas de coleta, buscando um atributo que explicasse a variância dos dados para assim verificar o efeito dos implementos. Os tratamentos foram dispostos em esquema de parcela subdividida, sendo considerada parcela quatro tipos de intervenção no solo (sem intervenção; aração; gradagem e escarificação), e, como subparcela, cinco tempos de avaliação: antes da intervenção, 80, 140, 200 e 305 dias após a intervenção. Dois componentes principais foram suficientes para explicar a variância total dos dados. A técnica de componentes principais mostrou-se adequada quando se busca relações entre atributos físicos do solo, e redução do conjunto de dados. A resistência do solo a penetração foi o atributo físico do solo capaz de representar o conjunto de atributos originais. Foi possível a modelagem da resistência do solo a penetração ao longo do tempo, com o modelo polinomial de segundo grau se mostrando mais adequado.

Palavras-chave: Técnica multivariada. Correlação. Resistência do solo a penetração. Implementos.

USING THE TECHNIQUE OF PRINCIPAL COMPONENTS IN SOIL PHYSICS

ABSTRACT: The technique of multivariate analysis can be used as an important tool in obtaining a greater quantity of information that using only the univariate methods, in addition, the multivariate analysis can provide a choice of attributes that individually represents greater percentage of variance data facilitating future work. The objective of this study was to apply the technique of principal component on a set of data obtained before and after soil intervention with different implements in different sampling dates, searching for an attribute that explains the variance of data to monitor and verify the effect of implements. The treatments were arranged in split plot design and is considered part four types of intervention on the ground (without intervention, plowing, disking and chiseling), and as a subplot, five times of assessment: before the intervention, 80, 140, 200 and 305

days after the intervention. Two principal components were sufficient to explain the total variance. The technique of principal components was adequate when seeking relationships between soil physical properties, and reduction of the data set. The resistance to penetration was the soil attribute able to represent the set of unique attributes. It was possible to model the soil resistance to penetration over time, with the polynomial model of second degree is showing more appropriate.

Key words: Multivariate technique. Correlation. Soil resistance to penetration, Implements.

INTRODUÇÃO

O crescimento das plantas é influenciado por várias propriedades físicas do solo, com complexas interações, tendo na maioria dos estudos a interpretação isolada de variáveis do solo e da planta, dificultado o estabelecimento de relações funcionais do manejo do solo e produção das culturas (FREDDI *et al.*, 2008). Os estudos que quantificam a qualidade do solo, de modo geral, apresentam inúmeras variáveis, as quais são descritas por meio de análises estatísticas univariadas, comprometendo, possivelmente, as interpretações e as conclusões destes, por não ser explorada a existência ou não da dependência entre as variáveis analisadas (FIKDALSKI *et al.*, 2007).

Na tentativa de contemplar essas interações, a análise estatística multivariada pode ser empregada como uma importante ferramenta para obtenção de quantidade maior de informação que não poderia ser gerada com uso apenas de métodos univariados, passando, assim, a encarar o fenômeno como dependente de muitas variáveis, não bastando explicar e conhecer as variáveis de forma isolada, mas sim nas suas relações, buscando entendê-las na totalidade (BEEBE *et al.*, 1998; GROBE, 2005). Além disso, ao contemplar essas relações, é possível eleger atributos que de forma individualizada representem o estado atual do solo, facilitando a amostragem e diminuindo o tempo para o diagnóstico.

Dentro da análise multivariada, a técnica de componentes principais pode ser usada para entender a complexa relação existente quando se estuda atributos que compõem um sistema dinâmico como o solo, que está sujeito as ações antrópicas e da natureza. A técnica de componentes principais são combinações lineares das variáveis originais, sendo estimados de maneira que o primeiro componente explica o maior percentual da variância total, o segundo componente explica o segundo maior percentual e assim por diante até que toda variância seja explicada (MORRISON, 2003).

Este trabalho teve por objetivo aplicar a técnica de componente principal sobre um conjunto de dados obtidos antes e após a intervenção no solo com diferentes implementos em diferentes datas de coleta, buscando um atributo que explicasse a variância dos dados para verificar o efeito dos implementos.

MATERIAL E MÉTODOS

A coleta das amostras do foi realizada no município de Campo Verde no Estado do Mato Grosso, no período de outubro de 2007 a outubro de 2008 em área de relevo plano, pertencente à “Agropecuária Rio Manso”. A fazenda tem 3006 ha, sob coordenadas 15°31'58”S e 55°18'07”W e altitude 725 m. O clima da região é do tipo Aw pela classificação de Koppen, com precipitação média anual de 1421 mm.

Na área escolhida, o solo foi classificado Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (EMBRAPA, 2013), de textura argilosa (488,5 g kg⁻¹ de argila), e sido utilizada em plantio direto por oito anos, e encontrava-se em pousio há cinco anos. No momento da amostragem durante o período de pousio, surgiu vegetação rasteira espontânea, que em outubro de 2007, foi controlada com uma roçadora manual e mantida como cobertura morta.

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso. Os tratamentos foram dispostos em esquema de parcela subdividida, sendo considerados como parcela quatro tipos de preparo do solo: sem intervenção; aração; gradagem e escarificação, e, como subparcela, cinco tempos de avaliação: antes da intervenção, oitenta dias, 140 dias, 200 dias e 305 dias após a intervenção. Cada tratamento principal, ou seja, as parcelas, contou com seis repetições, totalizando vinte e quatro parcelas experimentais.

Em razão das dificuldades de manobras do trator agrícola e equipamentos na instalação do experimento, os tratamentos principais foram dispostos em faixas contendo três repetições. Sendo cada faixa com um comprimento de 45 m, e uma largura de 5 m. Assim, cada parcela mediu 5 por 15 m, ou 75 m².

O trator agrícola utilizado foi um Massey Ferguson, modelo 292, 4x2, com tração dianteira auxiliar (TDA), turbo, com potência de 77 kW (105 cv), e massa aproximada 3670 kg, operando a uma velocidade média de 5 km h⁻¹ com a TDA desligada. O arado de discos fixos utilizado foi da marca TATU-MARCHESAN, modelo AF 4 com acoplamento no sistema hidráulico de três pontos, equipado com quatro discos côncavos de 0,66 m (26") x 0,04 m, espaçados 0,57 m e massa aproximada de 492 kg. A grade de discos “off set”, utilizada, foi da marca BALDAN, equipada com 16 discos de borda recortada de 0,66 m (26") x 0,06 m, espaçados de 0,23 m, divididos em duas seções, sendo a segunda regulável e ajustável em relação ao ângulo de deslocamento, e massa aproximada de 1310 kg. O escarificador de arrasto utilizado foi um STARA modelo ASA C, automático, equipado com cinco hastes espaçadas 0,42 m, e ainda com discos de cortes de palhada e rolo nivelador/destorroador e massa aproximada de 420 kg. O arado de discos e a grade de discos foram regulados para atingirem a máxima profundidade de trabalho possível, e o escarificador para uma profundidade de 0,30 m. Os equipamentos foram passados uma única vez em cada local, porém, como a largura de trabalho dos equipamentos era inferior aos 5 m pré-estabelecidos para a parcela, o número de passadas para que se atingisse essa largura variou entre os equipamentos

Para a coleta de amostras, em cada época de avaliação, foram escolhidos, aleatoriamente, três sítios de amostragem por parcela, que foram identificados e tiveram a

resistência do solo à penetração (RSP) medida por meio de um penetrógrafo eletrônico automático manual com velocidade de penetração constante (BIANCHINI *et al.*, 2002). Foram realizados cinco ensaios em pontos afastados cerca de 0,30 m do centro de cada sítio, sendo a resistência registrada a cada 0,025 m, até a profundidade de 0,30 m. No centro de cada sítio de amostragem, na camada de 0,025 a 0,075 m de profundidade, foi coletado amostra com estrutura preservada, utilizando amostrador e anel metálico. Além das amostras preservadas foram coletadas também amostras deformadas, utilizando-se trado holandês, para determinação do conteúdo de água do solo no momento da coleta. Coletou-se ainda um terceiro tipo de amostra, usada na análise da agregação do solo. Para obtenção dessas amostras, uma por parcela, foi aberta uma mini-trincheira e de sua lateral foi retirada uma fatia de solo com estrutura preservada que foi acondicionada em recipientes plásticos retangulares, com capacidade para 0,0005 m³ e com tampa.

Além da resistência do solo à penetração (RSP), foram avaliados a porosidade total, macroporosidade, microporosidade, diâmetro médio geométrico, índice de estabilidade de agregados em água e conteúdo de água no solo, obtidos via metodologias laboratoriais propostas pela EMBRAPA (2011).

Os dados foram submetidos ao teste de normalidade ($p > 0,10$) e homogeneidade de variância ($p < 0,05$). Após aceitação desses pressupostos, realizou-se a análise de componentes principais e correlação de Pearson, onde foram estudadas as variáveis sem considerar os tratamentos, tendo como ponto de partida para a análise a matriz de covariância entre as características estudadas (JOHNSON; WICHERN, 2002). Após a análise de componentes principais foi elencada a variável mais importante e aplicada à análise de variância. Para esses procedimentos foi utilizado o software MINITAB (2008) versão 15.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para análise de componentes principais um dos primeiros passos é a escolha do número de componentes a ser utilizado. Johnson e Wichern (2002), citam que existem basicamente três métodos para escolher tal número, onde o principal deles é o gráfico do cotovelo, ou *scree-plot*, que para o presente trabalho pode ser observado na Figura 1. A interpretação dessa Figura é baseada na mudança brusca de direção da linha que une os autovalores dos diferentes componentes principais gerados, onde, o número de componentes principais será sempre igual ao número de variáveis originais utilizadas. Na Figura 1 pode ser notado que essa mudança brusca ocorre já no segundo componente principal indicando que dois componentes já seriam suficientes para explicar a variância original dos dados.

No entanto, existem outros meios de escolha do número de componentes principais, estes baseados em uma percentagem mínima da variância que deve ser explicada. Morrison (2003) cita um valor próximo a 80% como sendo suficiente. Outro método que pode ser utilizado, é o número de componentes principais que possuam autovalores superiores a 1, conhecido como critério Kaiser ou raiz latente (HAIR *et al.*, 2005), meio descartado no presente trabalho, por nenhum dos autovalores ser superior a esse número, conforme pode

ser visualizado na Tabela 1, que traz ainda a percentagem da variância total explicada por cada um dos componentes principais e o total acumulado.

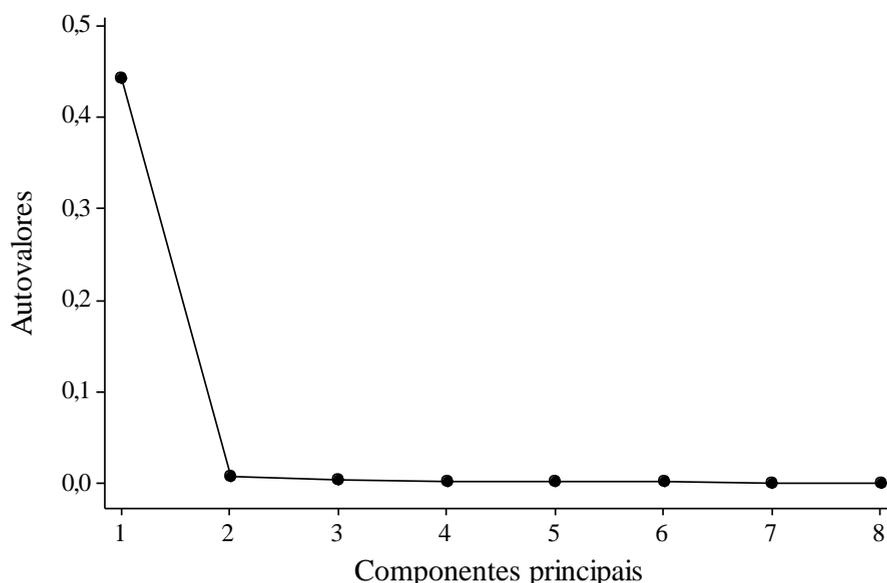


Figura 1. Gráfico do cotovelo (*scree-plot*) dos autovalores correspondentes a cada um dos oito componentes principais

Tabela 1. Autovalores e percentual acumulado da variância total por cada componente principal (CP).

Componente principal	Autovalor	Proporção	Acumulado (%)
CP1	0,442	0,971	97,1
CP2	0,007	0,015	98,6
CP3	0,003	0,006	99,2
CP4	0,002	0,004	99,6
CP5	0,001	0,002	99,8
CP6	0,000	0,001	99,9
CP7	0,000	0,001	100
CP8	0,000	0,000	100

Baseado nos dois primeiros métodos, gráfico do cotovelo e percentagem da variância total explicada, e nos objetivos principais da análise de componentes principais, que são: a redução da dimensão dos dados originais e facilitar a interpretação das análises realizadas com um número menor de componentes possíveis (BARROSO e ARTES, 2003), foram eleitos dois componentes principais, sendo eles os componentes principais 1 e 2, cujos autovalores são 0,442 e 0,007, respectivamente, com uma variância total acumulada de 98,6%. Esse pequeno número de componentes principais pode ter ocorrido devido à pequena variação da amostra estudada, e ocasionado pelo tamanho da amostra ($n = 120$) que favorece a redução da variação residual. O segundo componente escolhido, apesar da pouca percentagem da variância total explicada por ele, pois se o número de componentes

principais for muito pequeno, pode ocorrer à redução exagerada da dimensionalidade e muita informação pode ser perdida.

Considerando os dois componentes principais escolhidos de forma individualizada, o primeiro explica 97,1% da variância total e o segundo 1,5% com seus autovetores podendo ser observados na Tabela 2. Numa definição simples, os autovetores são os coeficientes das combinações lineares, cujo valor absoluto determina a importância da variável dentro do componente principal (JOHNSON; WICHERN, 2002), podendo ser utilizados, então, para avaliar a importância relativa de cada característica em cada componente principal, sendo os sinais positivos ou negativos indicadores das correlações existentes (ZANINE *et al.*, 2008), lembrando que essas correlações não podem ser estendidas entre componentes principais.

Tabela 2. Autovetores dos oito componentes principais (CP).

Atributos*	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8
RSP	0,989	-0,089	0,028	0,065	-0,043	0,022	0,060	0,057
DS	0,116	0,659	-0,126	-0,668	0,223	-0,094	-0,102	0,146
MAC	-0,067	-0,304	-0,026	-0,454	-0,134	0,273	0,744	0,225
MIC	0,020	0,066	0,001	0,219	0,786	-0,169	0,458	-0,303
PT	-0,049	-0,256	-0,014	0,101	0,343	-0,273	-0,141	0,842
DMG	0,013	-0,023	-0,984	0,135	-0,081	-0,054	0,050	-0,016
IEA	0,002	0,018	-0,081	0,084	0,347	0,893	-0,240	0,103
CA	-0,036	0,629	0,084	0,510	-0,261	0,112	0,379	0,335

*RSP: resistência do solo à penetração (MPa); DS: densidade do solo (Mg m^{-3}); MAC: macroporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); MIC: microporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); PT: porosidade total ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); DMG: diâmetro médio geométrico (mm); IEA: índice de estabilidade de agregados (%).

No componente principal 1, considerado o mais importante pela elevada variância total explicada por ele, existe autovalores positivos e negativos, sendo o principal coeficiente o da RSP, (0,989) e os demais sem importância devido ao reduzido valor dos coeficientes. A RSP correlacionou-se positivamente com a densidade do solo, microporosidade, diâmetro médio geométrico e índice de estabilidade de agregados e apresentou correlação negativa com macroporosidade, porosidade total e conteúdo de água no solo, sendo necessário salientar que essas correlações podem não ser verdadeiras pelos reduzidos coeficientes encontrados.

No componente principal 2, os principais coeficientes foram DS (0,659) e CA de (0,629) com correlação positiva entre as duas variáveis. O isolamento dessas duas variáveis em um componente principal indica uma correlação importante entre elas, pois exigiu apenas um componente principal para explicar a variação causada por essa correlação (ZANINE *et al.*, 2008).

Ao comparar as correlações obtidas pela técnica de componentes principais com as obtidas pela técnica da correlação linear de Pearson (Tabela 3), técnica utilizada por muitos autores quando se busca relações entre atributos do solo (BEUTLER *et al.*, 2001; CORRÊA *et al.*, 2003; SILVA *et al.*, 2008), observaram-se em geral, as mesmas correlações. No entanto, no componente principal 2 ocorreram divergências, sendo a principal delas o fato

da DS e do CA não ter apresentado coeficiente de correlação significativo pela técnica de Pearson, o que pode significar uma ineficiência desse método, em certas situações, ao buscar relações entre atributos físicos do solo. Segundo Resende *et al.* (1999), Bertol *et al.* (2001) e Silva *et al.* (2008), um pequeno acréscimo na densidade do solo pode promover maior capacidade de reter e de disponibilizar água, forçando assim a uma correlação positiva entre essas duas variáveis, concordando então com os resultados da técnica de análise de componentes principais. De maneira geral, as correlações encontradas concordam com as citadas na literatura, como exemplo Silva *et al.* (2008) encontraram que as menores correlações ocorreram entre densidade do solo e conteúdo de água (0,65), e resistência do solo a penetração e densidade do solo (0,69), e as maiores foram observadas entre densidade do solo e macroporosidade (-0,85).

Tabela 3. Coeficientes da correlação de Pearson entre as variáveis.

Atributos*	RSP	DS	MAC	MIC	PT	DMG	IEA
DS	0,766**						
MAC	-0,782**	-0,766**					
MIC	0,438**	0,398**	-0,546**				
PT	-0,774**	-0,897**	0,773**	-0,235 ^{ns}			
DMG	0,157 ^{ns}	0,133 ^{ns}	-0,115 ^{ns}	0,066 ^{ns}	-0,083 ^{ns}		
IEA	0,056 ^{ns}	0,066 ^{ns}	-0,115 ^{ns}	0,296 ^{ns}	-0,04 ^{ns}	0,174 ^{ns}	
CA	-0,375**	0,055 ^{ns}	-0,166 ^{ns}	0,022 ^{ns}	-0,133 ^{ns}	-0,115 ^{ns}	0,039 ^{ns}

** Significativo a 0,01 de probabilidade pelo teste F. ^{ns} Não significativo pelo teste F a 0,05 de probabilidade.

*RSP: resistência do solo à penetração (MPa); DS: densidade do solo (Mg m^{-3}); MAC: macroporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); MIC: microporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); PT: porosidade total ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); DMG: diâmetro médio geométrico (mm); IEA: índice de estabilidade de agregados (%).

Outra grande vantagem da técnica de análise de componentes principais, sobre outras técnicas, está relacionada a possibilidade de eleger a variável que exerce maior peso, ou seja, a variável que seja capaz de explicar a maior percentagem da variância total dos dados, isso é dado pela correlação entre componente principal e variável original, obtido pela fórmula proposta por Johnson e Wichern (2002). Essas correlações são medidas das contribuições individuais de cada variável e não consideram a contribuição multivariada das demais variáveis (SILVA; PANDOVANI, 2006). Esse fato, na área de física de solo, é importante, por poder proporcionar a opção da escolha de poucos, ou um único atributo para se trabalhar, facilitando as coletas de amostras, que são em sua maioria trabalhosas e dispendiosas.

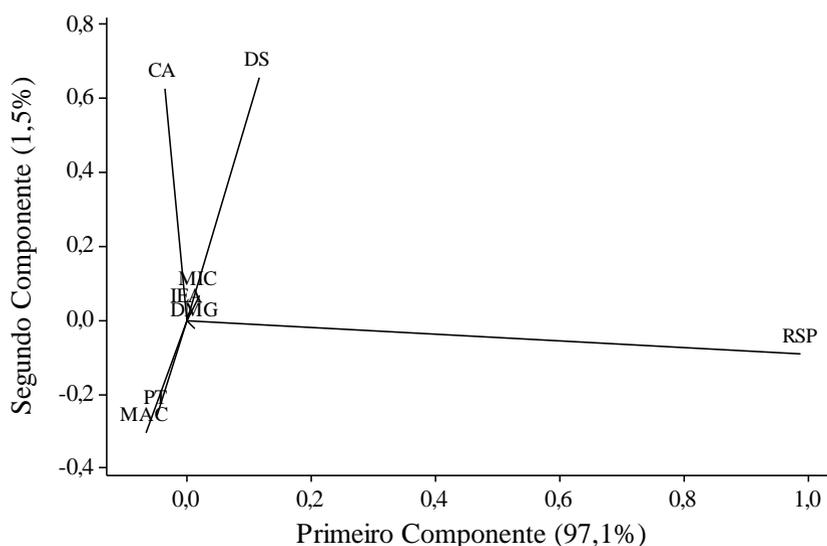
Ao aplicar a fórmula proposta por Johnson e Wichern (2002) sobre os componentes principais 1 e 2 e as variáveis originais (Tabela 4), observou-se que as variáveis mais importantes foram: RSP, densidade do solo, porosidade total, conteúdo de água e macroporosidade. Porém, como o componente principal 1 explica 97,1% da variância total dos dados e a RSP nesse componente apresenta um autovetor de 0,98, mais que o triplo do restante dos autovetores somados e que na soma de quadrados apresentou coeficiente 1,00, pode-se dizer que a RSP é sem dúvida a variável mais importante, sendo então ela a escolhida para medir o efeito dos tratamentos implemento e dias de coleta.

Tabela 4. Correlação entre cada componente principal e variáveis físicas do solo.

Atributos*	C.Principal 1	C. Principal 2	Soma dos quadrados
RSP	1,000	-0,011	1,000
DS	0,774	0,553	0,905
MAC	-0,788	-0,450	0,825
MIC	0,445	0,184	0,232
PT	-0,786	-0,517	0,887
DMG	0,162	-0,036	0,028
IEA	0,060	0,068	0,008
CA	-0,381	0,838	0,849

*RSP: resistência do solo à penetração (MPa); DS: densidade do solo (Mg m^{-3}); MAC: macroporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); MIC: microporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); PT: porosidade total ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); DMG: diâmetro médio geométrico (mm); IEA: índice de estabilidade de agregados (%).

Comparando os resultados obtidos pela fórmula de Johnson; Wichern (2002), com os obtidos no diagrama de dispersão dos autovetores nos componentes principais 1 e 2 (Figura 2), verificaram-se resultados semelhantes, com a RSP, isolada no componente principal 1. Já a densidade do solo e o conteúdo de água se isolaram no componente principal 2, com correlação positiva entre ambas e correlação negativa com a macroporosidade e porosidade total. Pode-se dizer que por ambos os processos poderia se elencar a RSP como a variável mais significativa, porém, pela fórmula de Johnson e Wichern (2002) a qual trabalha com números de forma direta, apresenta maior facilidade de interpretação e menor chance de cometer equívocos.



RSP: resistência do solo à penetração (MPa); DS: densidade do solo (Mg m^{-3}); MAC: macroporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); MIC: microporosidade ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); PT: porosidade total ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); DMG: diâmetro médio geométrico (mm); IEA: índice de estabilidade de agregados (%).

Figura 2. Diagrama de dispersão nos componentes principais 1 e 2 dos autovetores das variáveis originais.

A própria definição de RSP, já explica o porquê da predominância da mesma, sobre os demais atributos. Na literatura é possível encontrar várias definições para RSP, entre elas destacam-se índice integrado da compactação do solo, conteúdo de água, textura e tipo de mineral (BAVER *et al.*, 1972); e ainda, característica física do solo que exprime o grau de compactação e a facilidade de penetração das raízes no solo (RIBON *et al.*, 2003) e; finalmente, é a resistência física que o solo oferece, estando diretamente relacionada com a compactação do mesmo, umidade e textura (SOUZA *et al.*, 2005). A RPS é uma medida integradora dos demais atributos, refletindo diretamente as condições do solo, podendo assim, com os devidos cuidados, substituir os demais atributos em trabalhos de física de solo.

A análise de variância sobre a RSP apresentou efeito significativo para os implementos, para as datas de amostragem e interação significativa entre implementos e datas de amostragem. Os coeficientes de variação observados foram de 30,75% na parcela e de 22,05% na subparcela. Como a interação foi significativa realizou-se análise do desdobramento da mesma, aplicando-se teste de média para os equipamentos dentro dos dias (Tabela 5) e regressão para as médias em cada implemento em função dos dias (Figura 3).

Tabela 5. Valores médios da resistência do solo a penetração em função dos implementos e dos dias após o preparo.

Implementos	Dias após a intervenção				
	0	80	140	200	305
	Resistência do solo a penetração (MPa)				
Sem Intervenção	1,87 a	1,46 a	1,55 a	2,23 a	2,38a
Escarificador	1,72 a	0,77 b	0,72 b	1,32 b	1,79 b
Grade	2,01 a	0,85 b	0,77 b	1,65 b	2,28 a
Arado	1,69 a	0,36 c	0,79 b	1,29 b	1,24 c

*Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 0,05 de probabilidade de erro.

O equipamento que promoveu a maior alteração na RSP foi o arado (Tabela 5), pois, oitenta dias após o preparo, a média foi de 0,36 MPa, diferindo dos demais implementos e da testemunha (sem intervenção). No entanto, se observa que apesar dos outros implementos terem promovido menor alteração, eles também diferiram da testemunha nos 80, 140 e 200 dias após a intervenção. Nos 305 dias após a intervenção a média obtida com grade foi novamente igual ao da área sem intervenção, diferindo dos demais por apresentar a menor média.

A RSP ao longo do tempo, não significativamente para a área sem intervenção, não sendo então possível o ajuste de modelo. Para os equipamentos, escarificador (Equação 1), grade (Equação 2) e arado (Equação 3), o modelo que melhor se adequou foi o polinomial de segundo grau, com distribuição normal dos resíduos pelo teste não paramétrico de Ryan-Jones ($p > 0,10$) e variância constante para os resíduos padronizados ($p < 0,05$). Os coeficientes de determinação (R^2) dos modelos foram de 0,80, 0,80 e 0,41, respectivamente.

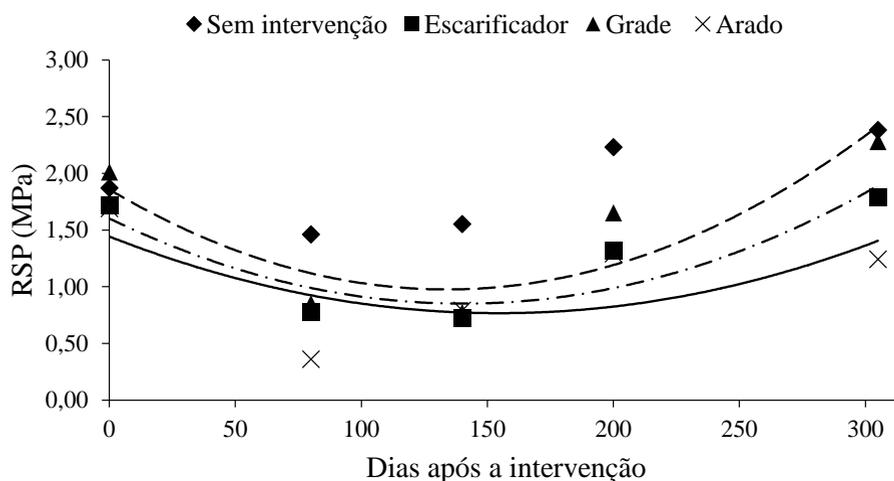


Figura 3. Resistência do solo a penetração para os tratamentos e tempo transcorrido após a intervenção no solo.

$$RSP = 1,6981 - 0,011Dias + 0,00004Dias^2 \quad \text{Equação [1]}$$

$$RSP = 1,8580 - 0,013Dias + 0,00004Dias^2 \quad \text{Equação [2]}$$

$$RSP = 1,4475 - 0,009Dias + 0,00003Dias^2 \quad \text{Equação [3]}$$

Ao comparar o presente trabalho com o de Ralisch *et al.* (2001), que estudaram um solo argiloso sob sistema de plantio direto durante três anos, e após a escarificação, implantaram a cultura do trigo e, posteriormente a cultura da soja, observa-se que nos resultados obtidos por eles, após o período de quase um ano, houve variação significativa da RSP na camada superficial (0-0,10 m), assim, concluíram que a operação de escarificação apresenta efeito imediato na redução da resistência a penetração nas camadas superficiais, mas o efeito tende a diminuir ou até neutralizar no período de apenas uma safra agrícola.

Para Mahl *et al.* (2003), que trabalharam em Nitossolo, o processo de regeneração do solo ocorre em duas etapas distintas, no início, após quatro meses o solo oferece baixa resistência a penetração até a profundidade que atuou o escarificador, e após dezoito meses esse fenômeno ocorre somente na camada superficial entre 0,05 e 0,10 m. Para Furlani (2000), até mesmo o solo em pousio apresenta aumento da resistência à penetração. Voorhees e Lindstrom (1984) sugerem que isto ocorre, pois, o pousio expõem o solo à ação direta da chuva, levando-o à desagregação, uma vez que as plantas daninhas espontâneas não são capazes de promover contínua e adequada cobertura do solo em termos quantitativo e qualitativo e produzem baixa quantidade de biomassa.

CONCLUSÃO

A técnica de componentes principais se mostrou adequada quando se busca relações entre atributos físicos do solo, e quando se busca reduzir o conjunto de dados.

A técnica de componentes principais permitiu a escolha da resistência do solo a penetração como o atributo físico capaz de representar o conjunto de atributos avaliados.

A resistência do solo a penetração foi afetada pelos implementos, tendo o arado atuado de forma mais contundente.

Foi possível a modelagem da resistência do solo a penetração ao longo do tempo, com o modelo polinomial de segundo grau sendo o mais adequado.

AGRADECIMENTOS

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Mato Grosso-FAPEMAT pelo financiamento da pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARROSO, L. P.; ARTES, R. Análise multivariada. In: REUNIÃO ANUAL DA RBRAS, 48., SEAGRO, 10., 2003, Londrina. **Anais...** Lavras: UFLA, 2003. p. 151.

BAVER, L. D.; GARDNER, W. H.; GARDNER, W. R. **Soil physics**. 4 ed. New York: J. Wiley, 1972. 529 p.

BEEBE, K. R.; PELL, R. J.; SEASHOLT, M. B. **Chemometrics: A practical guide**. New York: John Wiley & Sons, 1998. 348 p.

BERTOL, I.; BEUTLER, J. F.; LEITE, D.; BATISTELA, O. Propriedades físicas de um Cambissolo Húmico afetado pelo tipo de manejo do solo. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 58, n. 3, p. 555-560, 2001.

BEUTLER, A. N.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; FERREIRA, M. M.; CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO, I. A. Resistência à penetração e permeabilidade de Latossolo vermelho distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos Cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 1, p.167-177, 2001.

BIANCHINI, A.; MAIA, J. C. M.; MAGALHAES, P. S. G. CAPELLI, N.; UMEZU, C.K. Penetrógrafo eletrônico automático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 2, p.332-336, 2002.

CORRÊA, M. M.; KER, J. C.; MENDONÇA, E. S.; RUIZ, H. A.; BASTOS, R. S. Atributos físicos, químicos e mineralógicos de solos da região das Várzeas de Sousa (PB). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 2, p.311-324, 2003.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA - Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Manual de métodos de análises de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: EMBRAPA, 2013. 353 p.

FIDALSKI, J.; TORMENA, C. A.; SCAPIM, C. A. Espacialização vertical e horizontal dos indicadores de qualidade para um Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 3, p.09-19, 2007.

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. 2, p.953-961, 2008.

FURLANI, C. E. **Efeito do preparo do solo e do manejo da cobertura de inverno na cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.)**. 2000. 218 f. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2000.

HAIR, J. F.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK, W. C. **Análise multivariada de dados**. Trad. SANT'ANNA, A. S; CHAVES NETO, A. 5 ed. Porto Alegre: Bookman, 2005. 593 p.

GROBE, J. R. **Aplicações da estatística multivariada na análise de resultados em experimentos com solos e animais**. 2005. 145 f. Tese (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. **Applied multivariate statistical analysis**. Nova Jersey: Prentice-Hall, 2002. 632 p.

MAHL, D.; GAMERO, C. A.; SILVA, A. R. B.; SILVA, R. B. Avaliação da escarificação em área de plantio direto através da resistência do solo a penetração. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIENCIA DO SOLO, 29., 2003, Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. CD-ROM

MINITAB. **Programa Estatístico, versão 15 para Windows**, Pennsylvania: State College, 2008. CD ROM

MORRISON, D.F. **Multivariate statistical methods**. 4 ed. New York: Duxbury Press, 2003. 415 p.

RALISCH, R.; TAVARES FILHO, J.; ALMEIDA, M. V. P. Avaliação em um solo argiloso sob plantio direto de uma escarificação na evolução da resistência do solo à penetração. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2001. CD-ROM.

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B.; CORRÊA, G. F. **Pedologia**: Base para distinção de ambientes. 3.ed. Viçosa: NEPUT, 1999. 304 p.

RIBON, A. A.; CENTURION, J. F; CENTURION, M. A. P. C.; PEREIRA, G. T. Densidade e resistência a penetração de solos cultivados com siringueira sob diferentes manejos. **Acta Scientiarum: Agronomy**, Maringá, v. 25, n. 1, p.13-17, 2003.

SILVA, G. J.; VALADÃO JÚNIOR, D. D.; BIANCHINI, A.; AZEVEDO, E. C.; MAIA, J. C. S. Variação de atributos físico-hídricos em Latossolo Vermelho-Amarelo do Cerrado Mato-Grossense sob diferentes formas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 5, p.2135-2143, 2008.

SILVA, N. R.; PANDOVANI, C. R. Utilização de componentes principais em experimentação agrônômica. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 21, n. 4, p.98-113, 2006.

SOUZA, E. D.; CARNEIRO, M. A. C.; PAULINO, H. B. Physical attributes of a Typic Quartzipsamment and a Rhodic Hapludox under different management systems. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n. 11, p.1135-1139, 2005.

VOORHEES, W. B.; LINDSTROM, M. J. Soil compaction on conservation tillage in the northern corn belt. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 38, n. 5, p.307-311, 1984.

ZANINE, A. M.; DIAS, P. F.; SOUTO, S. M.; FERREIRA, D. J.; SANTOS, E.M.; PINTO, L. F. B. Avaliação do capim-tanzânia (*Panicum maximum*) por meio de métodos de análise multivariada. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, Salvador, v. 9, n. 1, p.179-189, 2008.

