

ANÁLISE MULTIVARIADA DA RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO EM SOLO SOB PASTAGEM DEGRADADA

GEOVANI JOSÉ SILVA¹, JOÃO CARLOS SOUZA MAIA², ALOISIO BIANCHINI²,
MARIANO MARTINEZ ESPINOSA³, DANIEL DIAS VALADÃO JUNIOR^{4*},
FRANCIELE CAROLINE DE ASSIS VALADÃO⁴

Recibido: 23/4/2020

Recibido con revisiones: 23/9/2020

Aceptado: 24/9/2020

RESUMO

O objetivo desse trabalho foi selecionar medidas de parença e métodos de aglomeração mais apropriados à análise de conglomerados para a caracterização da variabilidade vertical e horizontal da resistência à penetração em Latossolo Vermelho Distrófico sob pastagem degradada. Compararam-se as técnicas e se avaliaram algoritmos e medidas de parença em AAH. A RP foi medida a intervalos de 10 mm até 300 mm de profundidade, em 4 pontos afastados 0,50 m dos 30 vértices de uma malha de 6 x 10 m e, em mais 3 sítios com 18 pontos radialmente distanciados em 0,125 m. AF e AAH foram aplicadas para avaliação da variabilidade vertical da RP e por AAH se avaliou também sua dispersão horizontal. A camada de maior RP média se localizou entre 20 e 60 mm de profundidade em 94,22% dos perfis avaliados e nos 5,78% perfis restantes, foi mais espessa e mais profunda se estabelecendo entre 60 e 190 mm. A técnica de AAH utilizando o algoritmo da ligação média aritmética entre grupo e o coeficiente distância euclidiana se mostrou eficiente como a AF na caracterização da variabilidade vertical da RP, resultando estratificação do seu perfil mais coerente com a dinâmica da RP em profundidade. Os valores de RP no solo sob pastagem degradada são superiores ao limite crítico, sendo a camada de 20 a 60 mm de profundidade a de maior impedância mecânica.

Palavras-chave: Penetrometria, componentes principais, agrupamento hierárquico.

SOIL STRENGTH IN DEGRADED PASTURE ASSESSED BY MULTIVARIATE ANALYSIS TECHNIQUES

ABSTRACT

The objective of this work was to select similarity measures and agglomeration methods most appropriate to cluster analysis to characterize the vertical and horizontal variability of resistance to penetration in Latossolo Vermelho Distrófico under degraded pasture. The PR was sampled at intervals of 10 mm until 300 mm depth, in 4 points spaced 0.50 m from the 30 vertices of a 6 x 10 m mesh and at 3 more sites with 18 radially distanced points by 0.125 m. AF and HCA were applied to evaluate the soil PR variability in depth and by HCA its horizontal dispersion too. The highest PR values was between 20 and 60 mm deep in 94.22% of the evaluated profiles and in the remaining 5.8%, thicker and deeper, this layer it was established between 60 and 190 mm. The HCA technique by algorithm of arithmetic mean linkage between group and, Euclidean distance coefficient proved efficient, as well as, AF in the evaluation of the vertical PR variability, resulting a stratification of the resistance profile more coherent with the dynamics of the PR in depth. The PR values in the soil under degraded pasture are higher than the critical limit, with the layer of 20 to 60 mm deep having the highest mechanical impedance.

Key words: Penetrometry, principal components, hierarchical cluster.

1 Instituto Federal de Mato Grosso-Campus Cuiabá. Brasil

2 Universidade Federal de Mato Grosso, Faculdade de Agronomia, Medicina Veterinária e Zootecnia. Brasil

3 Universidade Federal de Mato Grosso, Departamento de Estatística. Cuiabá. Brasil.

4 Instituto Federal de Mato Grosso-Campus Campo Novo do Parecis. Brasil

* Autor de contacto: daniel.valadao@cnp.ifmt.edu.br

INTRODUÇÃO

O uso do solo em desacordo com suas potencialidades e limitações podem levar à sua degradação física o que é uma preocupação, visto que inúmeros agricultores e pecuaristas não dispõem ou não aplicam conhecimentos e tecnologias, que possibilitem o uso sustentável deste recurso (Iori *et al.*, 2012). Desta forma, a lotação excessiva e o pisoteio animal em condições inadequadas de umidade podem levar à compactação dos solos (Ortigara *et al.*, 2014).

A resistência à penetração medida por um penetrômetro tem sido a metodologia mais utilizada e bastante eficiente na localização e quantificação de camadas de solo adensadas e restritivas ao pleno crescimento radicular das plantas (Oliveira Filho *et al.*, 2016). Isso, devido ao caráter pouco invasivo, à rapidez, praticidade e baixo custo na obtenção dessa variável (Oliveira *et al.*, 2007), além da considerável correlação com o desenvolvimento de raízes relatada por inúmeros pesquisadores de Taylor *et al.* (1966) a Costa *et al.* (2012).

A elevada variabilidade vertical e horizontal da resistência à penetração, aliada à sensibilidade diferenciada das espécies, tem gerado polêmicas e controvérsias e dificultado a obtenção de valores críticos de RP (Weirich Neto *et al.*, 2006). Muito embora, seja amplamente aceito o valor de 2 MPa proposto por Taylor *et al.* (1966), como o limite crítico de resistência à penetração.

A classificação e delimitação das camadas do solo, em que a média possa ser um bom parâmetro para representar a resistência à penetração em profundidade, é difícil e carregada de subjetividade (Weirich Neto *et al.*, 2006). No entanto, recentemente tem crescido o número de trabalhos que utilizam a técnica da análise multivariada tentando entender as relações das características do solo e a influência do manejo. Alves *et al.* (2019) estudaram a variabilidade da RP em solo argiloso sob pastagem degradada. Cortez *et al.* (2019) trabalharam com interpolação por krigagem ordinária na determinação da variabilidade da RP sob sistema de plantio direto. Ferrari *et al.* (2018) buscaram entender a relação da variabilidade espacial da RP em diferentes profundidades em solo sob cana-de-açúcar. Ohana-Levi *et al.*

(2018) usaram um agrupamento espacial multivariado ponderado para determinar zonas de manejo de irrigação em área de cultivo de uva.

No caso da análise de agrupamento hierárquico (AAH) ela divide um conjunto de dados em grupos, cujas variáveis sejam similares dentro do grupo e diferentes dos outros grupos, dessa forma, combinando grupos que apresentam variâncias baixas podendo formar agrupamento que possuam variâncias iguais (Ferreira, 2011).

Marôco (2010) recomenda algum tipo de distância métrica para agrupamento de casos e os coeficientes de correlação ou de associação para agrupar variáveis, o autor alerta para a necessidade de considerar escala e tipo de variável, ao se escolher um coeficiente de parença. Conforme Manly (2008), diferentes métodos de ligação podem resultar agrupamentos diferentes para um mesmo conjunto de dados e sugere testar mais de um algoritmo ou critério para agregar ou desagregar elementos.

Assim, as hipóteses desse trabalho são que a análise de agrupamento hierárquico é tão eficiente quanto a análise fatorial por componentes principais na estratificação do perfil da resistência do solo à penetração, bem como, essa técnica é capaz de definir áreas de impedância mecânica do solo. Logo, o objetivo desse trabalho foi selecionar medidas de parença e métodos de aglomeração mais apropriados à análise de conglomerados, para a caracterização da variabilidade vertical e horizontal da resistência à penetração em Latossolo Vermelho Distrófico sob pastagem degradada.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado em uma área de pastagem com moderado a forte grau de degradação, classificação de acordo com critérios sugeridos por Dias-Filho (2017), inserida na folha cartográfica sob índice de nomenclatura SD21ZDIV3NODI-V1C, de coordenadas geográficas 15°49'20.83" S e 55°24'06.49" W, sistema de referência WGS 1984, no IFMT- Campus São Vicente, município de Santo Antônio do Leverger – MT. O solo é um Latossolo Vermelho Distrófico, conforme o Sistema Brasileiro de Classificação do Solo (Santos

et al., 2018) e possui textura franco-argilo-arenosa com 59,63% de areia, 31,56% de argila e 8,81% de silte.

A resistência do solo à penetração foi medida por meio de um penetrógrafo eletroeletrônico robusto, desenvolvido por Bianchini *et al.* (2002) conforme padrão ASAE para penetrômetros de uso agrícola. Na área amostral se estabeleceu uma malha com 30 vértices espaçados de 6 x 10 m. Ensaios de penetrometria foram realizados em 4 pontos afastados 0,50 m do centro de cada vértice da malha. Esses ensaios alcançaram a profundidade de 0,30 m, sendo a RP registrada a cada 0,0025 m de aprofundamento do conjunto haste/cone. Outros 54 ensaios foram executados em três sítios com 18 pontos cada, espaçados radialmente em 0,125 m e dispostos em duplos hexágonos. Estes foram denominados ensaios adensados (EA) e objetivaram verificar a variabilidade da RP em espaço reduzido.

O conjunto de dados foi submetidos à estatística descritiva e teve a aderência à distribuição normal avaliada pelo teste de Shapiro-Wilk, em um nível de significância $\alpha = 0,05$. Em seguida, a matriz de dados originais foi submetida a análise fatorial exploratória em modo R, para obtenção da matriz simétrica das correlações e a significância das correlações populacionais Π estimadas por R foi avaliada pelo teste de esfericidade de Bartlett. A adequação dos dados de RP ao modelo de análise fatorial foi avaliada ainda, pela aplicação do teste de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO), adotando como referência a classificação proposta por Sharma (1996). Os fatores foram extraídos por componentes principais, retidos pelo critério de Kaiser-Guttman (autovalor > 1) e submetidos ao método de rotação ortogonal varimax. Cada fator retido definiu uma camada, em função das profundidades com cargas fatoriais significativas que a ele se associaram.

Realizou-se, também, análise de agrupamento hierárquico tanto para agrupar profundidades (variáveis), quanto para agrupar pontos de ensaios (casos). Com o propósito de selecionar medida de similaridade/dissimilaridade e algoritmo mais apropriados para agrupar a RP em profundidade. As dissimilaridades foram o complemento do coeficiente de correlação de Pearson (r), o comple-

mento do quadrado deste mesmo coeficiente (r^2) (Ferreira, 2011) e, embora não indicada para agrupar variáveis, a distância euclidiana (d) um coeficiente de dissimilaridade originalmente métrico. Como algoritmos foram testados os métodos da ligação simples (LS), ligação completa (LC), ligação pela média aritmética entre grupo (LA), método da mediana (LM) e método de Ward (LW).

Cada solução de agrupamento obtida foi avaliada pelo coeficiente de correlação cofenética (CC) conforme recomendações de Ferreira (2011), coeficiente de estresse e grau de distorção Kruskal (1964). Como critério de ajuste se adotou CC 0,80 e grau de distorção e estresse conforme Kruskal (1964) e Menezes *et al.* (2008). O número de grupos em cada solução foi definido com base no critério de Mojena (1977) tendo como constante 1,25 de Milligan & Cooper (1985), convalidado pela análise visual dos dendrogramas, considerando a estrutura definida na AF e o conhecimento do domínio. No agrupamento de casos (pontos ensaiados) foi utilizado a distância euclidiana absoluta (DE) como medida de dissimilaridade e os algoritmos de ligação LA e LW. As médias de RP foram comparadas duas a duas pelo teste de t para amostras independentes considerando $\alpha = 0,05$.

O programa estatístico SPSS versão 17 para Windows foi utilizado para processamento das análises descritiva, de fatores e teste de médias e o programa Genes (Cruz, 2013) para análise de conglomerados, correlação cofenética, distorção e estresse.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores da RP, por intervalo de profundidade de 10 mm, variaram entre 0,33 MPa verificado no intervalo de profundidade mais superficial (P10) e 9,51 MPa averiguado na profundidade de 30 mm, demonstrando assim, a grande amplitude da variabilidade desse atributo físico no solo estudado. Os valores médios de RP (Tabela 1) são bastante elevados e mesmo a menor média, encontrada para a profundidade de 300 mm, supera os 2,0 MPa definido por Taylor (1966) e amplamente aceito como nível crítico para a RP. Nos intervalos de profundidade de 20 a 130 mm é

Tabela 1. Estatística descritiva e inferencial da resistência à penetração (RP) em Latossolo sob pastagem degradada, por intervalo de profundidade (Prof.) antes e depois da classificação por métodos multivariados¹**Table 1.** Descriptive and inferential statistics of penetration resistance (RP) in an Oxisol under degraded pasture, by depth interval (Prof.) before and after classification by multivariate methods¹

Prof. (mm)	Min		Max		CV	Shapiro-Wilk		Camadas (LA/DE)	GLA1	GLA2	GLA3	GLW1	GLW2	GLW3	Média
	----- RP (MPa) -----				%	Sig.	Sig*		----- RP (MPa) -----						
10	2,8	0,3	7,2	52,1	0,0	1,0	0-10	2,7*	3,8 a	1,3	2,3 b	4,2 a	1,8 b	2,8*	
20	4,3	0,9	8,6	39,4	0,1	0,8	10-20	4,1	5,9 a	2,3 c	3,8 b	5,9 a	2,9 c	4,3	
30	5,4	1,2	9,5	28,9	0,6	0,5									
40	5,9	1,6	9,3	24,0	0,7	0,5	20-60	5,6	7,4	4,3	5,9*	6,7	4,7*	5,7	
50	5,9	2,2	9,5	21,1	0,1	0,9									
60	5,8	2,5	9,2	19,3	0,0	0,7									
70	5,6	2,7	8,7	17,5	0,0	0,5									
80	5,4	2,5	8,1	17,8	0,0	0,3	60-100	5,0	6,5	5,5*a	5,9*	5,4 a	4,6*	5,3	
90	5,1	2,3	7,9	18,4	0,1	0,1									
100	4,9	2,1	7,7	19,3	0,3	0,5									
110	4,6	1,8	7,4	20,1	0,3	0,5									
120	4,4	1,7	6,9	20,3	0,0	0,0									
130	4,2	1,6	6,8	20,9	0,0	0,1									
140	4,0	1,7	6,5	21,3	0,0	0,5	100-190	3,6 b	4,7 a	5,4*	4,6a	3,6 b	3,5 b	3,8	
150	3,8	2,0	6,3	22,2	0,0	0,4									
160	3,6	1,8	6,1	23,2	0,0	0,6									
170	3,5	1,6	6,0	24,2	0,0	0,9									
180	3,4	1,4	5,9	24,8	0,0	0,9									
190	3,2	1,5	5,6	24,6	0,0	0,8									
200	3,1	1,4	5,3	23,6	0,0	0,3									
210	3,0	1,3	5,0	22,1	0,0	0,5									
220	2,9	1,3	4,7	20,9	0,0	0,4									
230	2,8	1,2	4,6	20,5	0,0	0,4									
240	2,8	1,2	4,5	20,9	0,0	0,3	190-300	2,6*b	3,2 a	3,5	3,1 a	2,6 b	2,5 b	2,7*	
250	2,7	1,2	4,4	21,7	0,0	0,3									
260	2,6	1,3	4,4	22,8	0,0	0,6									
270	2,5	1,3	4,3	23,0	0,0	0,6									
280	2,5	1,4	4,2	23,0	0,0	0,8									
290	2,4	1,3	4,1	23,2	0,0	0,9									
300	2,4	1,1	4,1	23,5	0,0	1,0									
Média	3,8	1,6	6,4	23,5	--	--		3,6	4,8	4,3 b	4,3 b	3,9	3,4		

¹ Min e Max: média aritmética, mínimo e máximo; CV: coeficiente de variação; Sig: Significância da estatística de Shapiro-Wilk para aderência à distribuição normal dos dados iniciais (N=174) e Sig*: de dados agrupados por método hierárquico (N=24 casos); camadas de intervalos de profundidades agrupados por agrupamento hierárquico (mm); LA e LW (1, 2 e 3): grupos de pontos definidos pelos métodos hierárquicos da ligação média aritmética entre grupos e de Ward respectivamente; médias seguidas de letras iguais linha e de (*) na coluna, não diferem pelo teste t em nível de 5% de significância estatística e médias desacompanhada de letras ou do (*), bem como, acompanhadas de letras diferentes diferem das demais pelos mesmos critérios.

classificada como muito alta e como alta nos demais intervalos de profundidade, conforme classificação de Soil Survey Staff (1993). Esses valores elevados de RP são em consequência da consolidação do solo decorrente das cargas impostas pelo pisoteio animal, como também afirmam Vogel & Fey (2016). A consolidação do solo também foi substancialmente potencializada pela coesão em razão do baixo teor de umidade, que no momento da realização dos ensaios era de $44,2 \pm 3,94$ % da máxima capacidade de retenção de água do solo.

Como esperado, a variabilidade da RP foi maior nas camadas mais superficiais e o coeficiente de variação (CV) de 52,12% verificado em P10 foi cerca de três vezes o valor do menor CV ocorrido em P70. Estes coeficientes de variação são classificados como médios, conforme critério de Warrick & Nielsen (1980). Arzeno *et al.* (2014) relataram para solo do mesmo tipo sob semeadura direta, valores de CV duas vezes maiores, enquanto os valores de CV obtidos por Blainski *et al.* (2008), para LVd sob pastagem, se equivalem ao triplo dos aqui observados.

Verifica-se, observando a estatística de Shapiro-Wilk, sétima coluna da **Tabela 1**, que os intervalos de profundidades P20, 30, 40 e 50 e, P90, 100 e 110 apresentam distribuição aproximadamente normal, o que corresponde a menos de um quarto dos intervalos de profundidade.

O conjunto de dados de RP apresentou resultado altamente significativos ($p < 0,001$), para a estatística do teste de esfericidade de Bartlett, com 435 graus de liberdade, o que indica correlações fortes entre as variáveis e em número suficiente para a realização da análise fatorial (AF) conforme Marôco (2010).

Na **Tabela 2**, a medida de adequação da amostragem de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO_G) possibilita classificar a matriz de dados como de boa adequação à aplicação da AF, em conformidade com Sharma (1996). Os valores do teste para cada variável, $KMO(i)$, variaram de 0,626 a 0,902, possibilitando a inclusão de todos os intervalos de profundidades na análise fatorial, conforme Hair Jr *et al.* (2009).

Observando os carregamentos fatoriais constantes da **Tabela 2**, ficam evidentes as fortes correlações entre as profundidades que formam uma camada e o respectivo fator que a define. Intervalos de profundidade que delimitam camadas, em razão de seu carácter transicional, podem se apresentar carregados simultaneamente em dois fatores, não definido tão claramente esse limite, resultando no que Weirich Neto *et al.* (2006) denominaram de erro de definição.

Pela análise fatorial ficaram definidas as camadas de 0 a 30; 30 a 80; 80 a 140; 140 a 220 e de 220 a 300 mm para o perfil de resistência do solo à penetração. Esta estratificação é idêntica em número e se assemelha em espessura à estratificação obtida por Colet *et al.* (2008) para solo não escarificado sob pastagem. Diferenças de 5 a 20 mm na espessura de quatro das cinco camadas podem estar associadas a desigualdades metodológicas, especialmente em relação à espessura dos intervalos de profundidade adotados como variáveis independentes na AF. Podem ainda, refletir dessemelhanças reais entre os perfis das duas áreas ou serem corroboradas pelo erro de definição

As medidas da qualidade de ajuste de quinze soluções de agrupamento hierárquico, testadas para classificação da resistência à penetração em profundidade estão dispostas na **Tabela 3**.

Os métodos de aglomeração ligação simples (LS) e da minimização do incremento da variância intragrupo (LW), seguidos do método da ligação completa entre grupos (LC) apresentaram os menores desempenhos, independente do coeficiente de dissimilaridade ou da medida de qualidade de ajuste considerada. Os melhores índices de desempenho foram obtidos pelo método da ligação pela média aritmética entre grupos (LA) que foi ligeiramente superior ao método da mediana (LM). A análise conjunta das três medidas da qualidade de ajuste aponta como a solução mais ajustada, a solução de agrupamento resultante da aplicação do método LA como algoritmo de aglomeração e tendo o complemento do quadrado do coeficiente de correlação de Pearson (Cr^2) como coeficiente de dissimilaridade. Esta solução apresentou coeficiente de correlação coefenética (CC) maior que 80%, grau de distorção

Tabela 2. Medida de adequação da amostra de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) geral (G) e por variável (I), carregamento fatorial, comunalidade e variância explicada pelos cinco primeiros fatores da resistência à penetração em solo sob pastagem

Table 2. Measure of adequacy of the general Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) sample (G) and by variable (I), factor loading, commonality and variance explained by the first five factors of resistance to penetration into soil under pasture

Profundidade (mm)	KMO (G) (I)	Fatores (Componentes Principais)					Comunalidade
	(G) 0,852	1	2	3	4	5	
10	0,656	-0,053	-0,068	-0,009	0,171	0,930	0,901
20	0,656	-0,038	-0,068	0,014	0,327	0,932	0,981
30	0,704	-0,011	-0,042	0,017	<u>0,574</u>	<u>0,784</u>	0,946
40	0,733	-0,002	-0,015	0,011	0,773	0,569	0,921
50	0,748	0,001	0,017	0,057	0,895	0,376	0,945
60	0,768	-0,013	0,058	0,165	0,945	0,220	0,972
70	0,814	0,031	0,103	0,344	0,896	0,123	0,947
80	0,853	0,067	0,136	<u>0,537</u>	<u>0,787</u>	0,028	0,932
90	0,849	0,086	0,091	0,752	0,588	-0,001	0,926
100	0,858	0,124	0,141	0,870	0,385	-0,014	0,941
110	0,880	0,164	0,254	0,913	0,184	-0,003	0,958
120	0,886	0,174	0,371	0,886	0,073	0,019	0,959
130	0,865	0,178	0,489	0,818	0,061	0,036	0,946
140	0,883	0,194	<u>0,627</u>	<u>0,697</u>	0,092	0,018	0,925
150	0,894	0,230	0,728	0,557	0,110	-0,024	0,905
160	0,900	0,271	0,805	0,432	0,099	-0,063	0,923
170	0,902	0,314	0,850	0,325	0,076	-0,078	0,939
180	0,899	0,361	0,869	0,241	0,035	-0,069	0,950
190	0,887	0,397	0,868	0,199	0,015	-0,059	0,955
200	0,874	0,436	0,847	0,170	0,022	-0,043	0,940
210	0,880	0,490	0,804	0,156	0,040	-0,027	0,912
220	0,879	<u>0,577</u>	<u>0,737</u>	0,139	0,044	0,009	0,898
230	0,854	0,686	0,631	0,120	0,039	0,019	0,885
240	0,856	0,798	0,493	0,126	0,037	0,026	0,897
250	0,862	0,879	0,361	0,129	0,015	0,003	0,920
260	0,853	0,914	0,272	0,123	-0,026	-0,024	0,926
270	0,850	0,941	0,226	0,108	-0,045	-0,038	0,952
280	0,833	0,936	0,244	0,116	-0,005	-0,038	0,950
290	0,837	0,905	0,259	0,128	0,049	-0,046	0,906
300	0,875	0,860	0,267	0,123	0,081	-0,031	0,834
Autovalor		7,47	7,32	5,43	4,77	2,91	
Variância total %		24,90	24,39	18,09	15,90	9,69	
Variância acumulada %		24,90	49,29	67,38	83,28	92,97	

Tabela 3. Qualidade e ajuste das correlações entre dissimilaridades originais e gráficas, de conglomerados da resistência à penetração em Latossolo sob pastagem degradada, em função de coeficientes de parença e métodos de agrupamento

Table 3. Quality and adjustment of the correlations between original and graphic dissimilarities, of conglomerates of resistance to penetration in Latossolo under degraded pasture, according to similarity coefficients and grouping methods

Método de Agrupamento ²	Medida de dissimilaridade ¹ /Medida de ajuste								
	Cr			Cr ²			DE		
	CC ³	Distorção	Estresse	CC	Distorção	Estresse	CC	Distorção	Estresse
(%).....								
LS	78,39	99,21	91,62	69,90	97,79	85,87	36,90	89,84	77,08
LC	85,36	69,65	43,27	81,21	31,7	29,34	80,93	62,65	57,94
LA	87,08	6,18	24,87	87,18	3,72	19,28	83,92	7,19	26,81
LM	86,69	20,03	26,36	86,24	11,1	20,25	80,71	3,79	29,22
LW	71,80	92,25	87,32	78,11	88,4	86,5	76,30	91,96	87,01

¹ Cr (1 - r) e Cr² (1 - r²) coeficientes de dissimilaridade obtidos a partir do coeficiente de correlação de Pearson (r) e, DE é a distância Euclidiana entre pares de intervalos de profundidade no perfil da resistência do solo à penetração; ² Ligação simples (LS), completa (LC), pela média aritmética entre grupos (LA), pela mediana (LM) e da minimização do incremento da variância intragrupo de Ward (LW); ³ Coeficiente de correlação cofenética (CC).

menor que 5% e coeficiente de estresse considerado de nível bom conforme classificação de Kruskal (1964). Os métodos de agrupamento LA e LM obtiveram índices de ajustes que os validam, independente do coeficiente de dissimilaridade.

Quatro das soluções de agrupamento da RP vertical são apresentadas na **Figura 1**. Optou-se por apresentar as soluções LA/DE e LA/Cr² (**Figura 1**; A e B.) pelos índices de qualidade de ajuste obtidos por estas soluções e, LW/DE e LW/Cr²

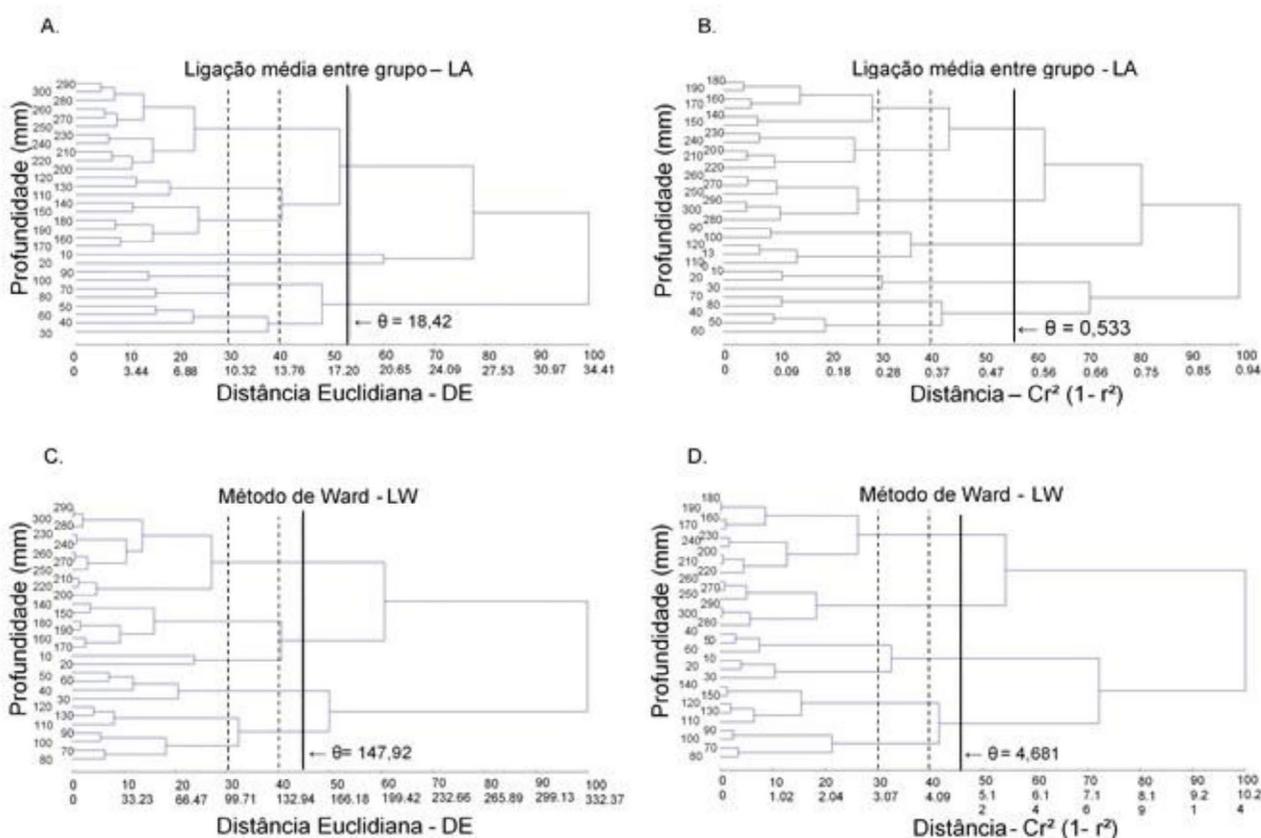


Figura 1. Agrupamento hierárquico por duas medidas de dissimilaridade e dois métodos de ligação, da resistência vertical do solo à penetração em pastagem degradada.

Figure 1. Hierarchical grouping by two measures of dissimilarity and two methods of connection, from vertical soil resistance to penetration into degraded pasture

(**Figura 1C e D.**) apesar dos insuficientes índices de ajustes obtidos, devido ao fato do método de Ward ser um dos mais utilizados em razão de se revestir de forte apelo estatístico.

Adotando-se o valor θ de Mojena (1977) como ponto de corte, apenas a solução LA/Cr² agrupa o perfil da RP em cinco camadas como na AF, as demais soluções distinguem quatro camadas com tal valor de distância (dissimilaridade). Há de se destacar diferenças fundamentais entre as soluções apresentadas, além do número de camadas definidos nesse ponto de corte. Primeiramente, as estratificações definidas por LA/Cr² e AF só apresentam diferenças maiores que o erro de definição nas camadas 4 e 5, sendo de 30 e 20 mm respectivamente. Isso, ao incorporar à camada de número 4 os intervalos de profundidades P140, que em AF associa-se ao fator definidor da camada 3 e, P230 e P240 associados ao fator 1, que define a 5ª camada do perfil de RP em AF (Tabela 2). Entretanto, mesmo a carga fatorial de 0,493 da variável P240 junto ao fator 2 (4ª camada) e que equivale a cerca de 60% de sua carga junto ao fator 1 (camada 5), apresenta significância empírica conforme Hair Jr *et al.* (2009), o que em princípio, poderia avaliar sua associação à camada 4 como definido em LA/Cr² (**Figura 1B**).

Das 4 quatro camadas determinadas pela solução de agrupamento LA/DE (**Figura 1A**) as duas primeiras são grupos unitários, cujos intervalos de profundidades (P10 e P20) seriam variáveis discrepantes (outliers multivariados), apresentando comportamento da RP diferente de todos os demais intervalos para o nível de similaridade definido por θ . O restante do perfil foi agrupado em uma terceira camada de 80 mm de espessura (P30, ..., P100 mm) e a 4ª camada com 200 mm de espessura, até P300.

Na solução LW/Cr² o corte em θ agrupa os 30 intervalos de profundidade nas camadas: 0 a 60; 60 a 150; 150 a 240 e 240 a 300 mm confirmando a tendência do método de Ward de formar grupos com número similar de elementos (Hair Jr *et al.*, 2009).

Verifica-se, ao observar a **Figura 1C**, que a solução de agrupamento LW/DE com corte determi-

nado por θ , produz na prática 5 grupos e não 4, visto que, apesar de P10 e P20 terem sido considerados pelo algoritmo como possuindo comportamento da RP semelhante ao grupo de P130, ..., P190, estes intervalos de profundidade são fisicamente separados no perfil, constituindo, portanto, camadas distintas.

Uma análise geral dos dendrogramas da **Figura 1** permite verificar que, apesar da ordem de agrupamento dos intervalos de profundidade se dar de forma diversa, os limites das camadas formadas se parecem. Como em AF, as soluções de agrupamento tendem a aglomerar os intervalos de profundidades em camadas com espessura crescente ao se aprofundar no perfil. Isso é ainda mais evidente nas soluções que se utilizam da DE como dissimilaridade, especialmente em associação com o algoritmo de agrupamento da ligação pela média aritmética entre grupos (LA). Esta combinação (LA/DE) produz as estratificações com as camadas mais estreitas na porção superior do perfil e as mais espessas em profundidade. Mesmo o método de Ward que apresenta como característica produzir grupos homogêneos e que em associação com Cr² agrupou os seis intervalos superficiais em uma camada, teve tal tendência amenizada quando associado à DE como coeficiente de dissimilaridade.

À medida que se aumenta a exigência de similaridade interna, as tendências se confirmam. Em um corte a 30% da dissimilaridade máxima, a solução LA/Cr² produz o maior número de grupos (9), seguida de LA/DE com 8 grupos, sendo os três superficiais, camadas unitárias (outliers). LW/Cr² e LW/DE definem 6 grupos, apresentado as camadas formadas por LW/DE, espessuras mais variadas nos extremos do perfil. Cargnelutti Filho *et al.* (2008) relataram diferenças entre grupos formados a partir da DE e da distância generalizada de Mahalanobis e concordância entre os obtidos por diferentes algoritmos e a distância generalizada de Mahalanobis.

A classificação e a distribuição no plano horizontal, dos perfis da RP em grupos gerados pelos métodos de aglomeração LA e LW a partir da distância euclidiana absoluta ou quadrática, estão disponibilizadas na **Figura 2**. É facilmente percebida a diferença entre os dois métodos

de aglomeração, tanto na amplitude das distâncias de aglomeração quanto no formato e tamanho dos grupos formados.

O dendrograma da **Figura 2A** representa a solução de agrupamento dos pontos de ensaios da RP obtida aplicando LA. Pelo critério da inércia entre saltos, um corte é estabelecido em 65,86% da dissimilaridade máxima e tem-se a formação dos grupos de perfis de RP: GLA1 com 139 casos, GLA2 com 24, GLA3 com 10 casos e o ensaio de número 132 constituindo um grupo unitário, portanto, identificado pela análise de agrupamento como um perfil discrepante (GLA4). Ao aumentar a exigência de similaridade, aumenta-se o nú-

mero de grupos com reduzido número de casos. Assim, um corte em 56,83% da distância máxima leva a formação de 7 grupos sendo 3 grupos unitários ou perfis outliers (casos 117; 124 e 132). Exigida uma similaridade de 62,19% serão formados 15 grupos, cinco grupos de um único caso e mais dois grupos contendo dois casos.

No dendrograma obtido da aplicação do método de Ward (**Figura 2B**) são identificados os grupos GLW1, GLW2 e GLW3 com 48; 61 e 65 casos respectivamente, ao se adotar corte passando por 28,09% da distância máxima. Distintamente, o método LW não identifica o perfil 132 como discrepante e o associa ao GLW3 e produz, como

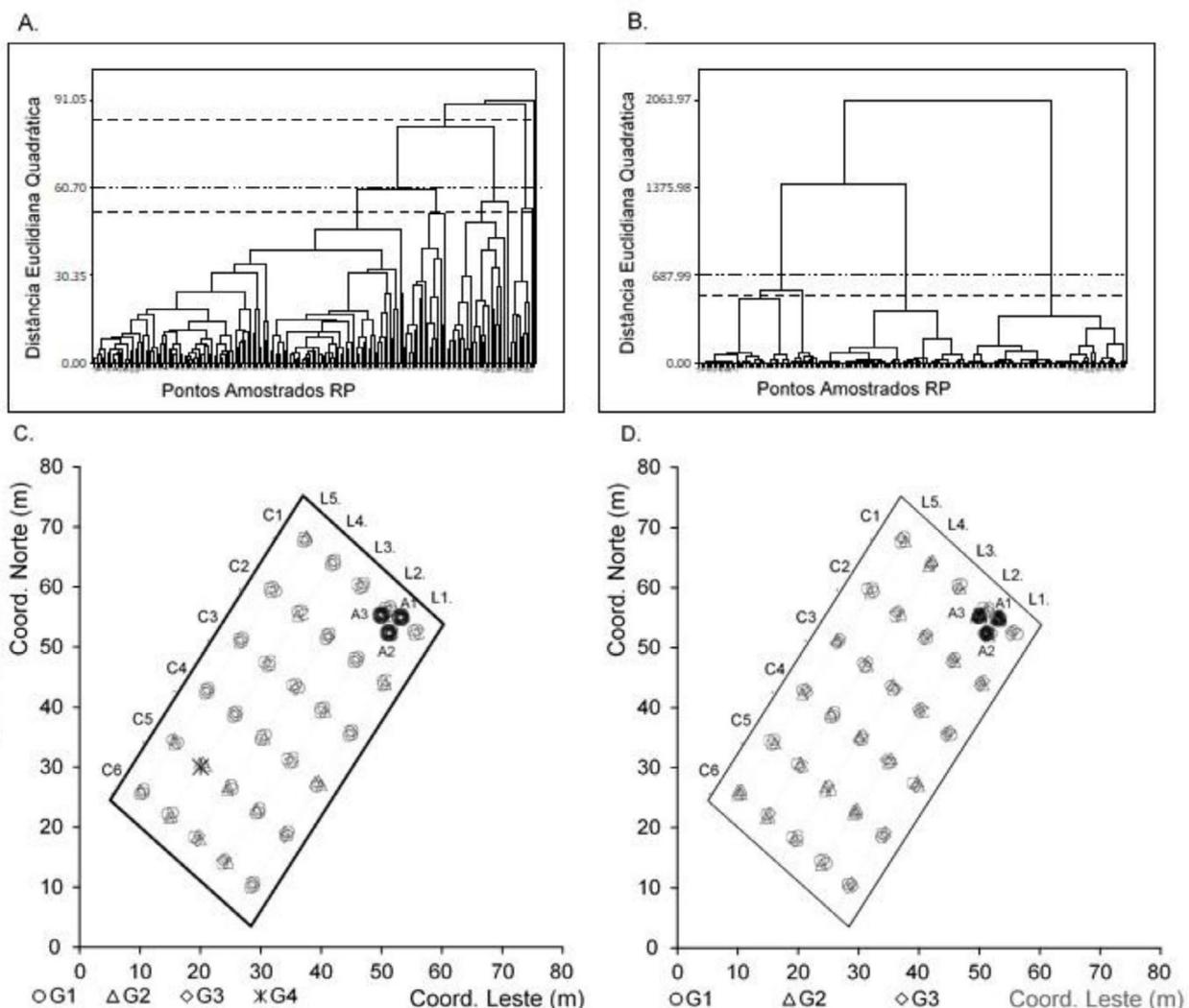


Figura 2. Dendrogramas dos pontos amostrados da resistência do solo à penetração em pastagem degradada, agrupados pelos métodos da ligação média entre grupos (A) e de Ward (B) e sua distribuição espacial (C) e (D).

Figure 2. Dendrograms of the sampled points of soil resistance to penetration in degraded pasture, grouped by the methods of the average connection between groups (A) and Ward (B) and their spatial distribution (C) and (D).

relatado na literatura, grupos homogêneos com número de elementos muito próximos (Hair Jr *et al.*, 2009)

A distribuição espacial das categorias de perfis da RP definidas pelos dois métodos de aglomeração se deu de forma diversa (**Figura 2C** e **D**). Os perfis de RP categorizados como GLA1 se distribuem como categoria única dos 4 pontos amostrados em um mesmo vértice de malha, por 13 dos 30 cruzamentos ou sítios de amostragem (**Figura 2C**). Em LW (**Figura 2D**), somente os sítios C5/L2 e C6/L5 apresentam perfis de RP de uma única categoria (GLW2). Doze sítios de amostragem apresentam simultaneamente as três categorias de perfis determinadas por LW, já por LA, apenas os sítios C5/L5, C6/L2 e C6/L3 apresentaram perfis de RP de três categorias distintas.

Em relação aos sítios de amostragem adensada da RP (A1, A2 e A3), os métodos LA e LW também abordam a variabilidade da RP local ou em espaço reduzido de forma diferente. A classificação por LW denota maior variabilidade local dos perfis de RP, visto que 18,52; 48,15 e 33,33% dos 54 pontos amostrados são classificados como perfis dos grupos GLW1; 2 e 3 respectivamente, enquanto que pelo método LA, um perfil em A1 e dois em A3 são do grupo GLA2 (5,55%), um em A2 é perfil GLA3 (1,85%) e os 50 pontos restantes (92,60%) são reunidos como perfis do mesmo grupo GLA1.

A classificação da variabilidade horizontal dos perfis da RP promoveu incremento substancial na aderência dos dados de RP por intervalo de profundidade à curva de distribuição normal. Esse incremento foi da ordem de 36,50% nos grupos obtidos pelo método de Ward e de cerca 55% naqueles obtidos a partir da ligação média entre grupos. Este resultado é divergente do que relataram Aquino & Brei, (2013) sobre a aderência à normalidade de dados agrupados. Tal divergência, muito provavelmente, se deveu aos procedimentos de agrupamento e os tipos de variáveis empregadas. A significância do teste de Shapiro-Wilk para dados de RP dos 30 intervalos de profundidade, para um grupo de 24 perfis agrupados por LA estão dispostos na coluna 8 da **Tabela 1**.

A dispersão da RP em profundidade, por grupo de ensaios de penetrometria, é mostrada na **Figura 3**. Verifica-se visualmente a homogeneidade dos grupos produzidos com aplicação do método de Ward. Parecem mais evidentes as diferenças entre os grupos gerados pelo algoritmo LA, tanto em forma do perfil, quanto em amplitude dos valores da RP. Parece pertinente, identificar o caso 132 como um perfil de RP à parte (GLA4), não o associando a nenhum dos outros grupos formados. Os perfis dos grupos GLA2 e GLW2 atingem as maiores médias de RP na profundidade de 40 mm, porém esses valores são ligeiramente maiores em GLA2 ao longo de todo perfil. Em GLA3, as maiores médias de RP são alcançadas na profundidade de 110 mm, decaindo lentamente a partir daí.

Em termos gerais, somente as camadas de 0-10 e de 190-300 mm (camadas 1 e 6 obtidas por AAH - LA/DE) não apresentaram diferença nas médias da RP, pelo teste t, a 5% de significância (**Tabela 1**). Avaliando camadas, dentro de cada grupo de pontos amostrados, no entanto, verifica-se que além das camadas 1 e 6 em GLA1, também as camadas 4 e 5 em GLA3 e, 3 e 4 em GLW1 e em GLW3 são consideradas iguais em média pelo mesmo teste.

Os grupos GLA3 e GLW1 não apresentaram diferença estatisticamente significativa, pelo teste t, ao nível de 5% de probabilidade, em relação à média da RP. Porém, a média da RP em um perfil de 300 mm não se mostra um parâmetro adequado, nem mesmo para grupos de casos, em razão da amplitude e variabilidade do atributo RP nos diferentes intervalos de profundidade, formando camadas com comportamentos divergentes. Mesmo GLA3 e GLW1 iguais em média, diferem muito no número de casos, na média da RP para as seis camadas e ainda, na posição da camada com a maior RP, que em GLA3 é de 60 a 190 (4ª e 5ª camadas) enquanto em GLW1, a maior RP média ocorre na profundidade de 20 a 100 mm (camadas 3 e 4). Os grupos de casos formados por LA apresentam diferenças nas médias de RP, nas seis camadas do perfil. Já por LW, ocorrem semelhanças entre grupos em algumas camadas. Isso, demonstra ter havido maior

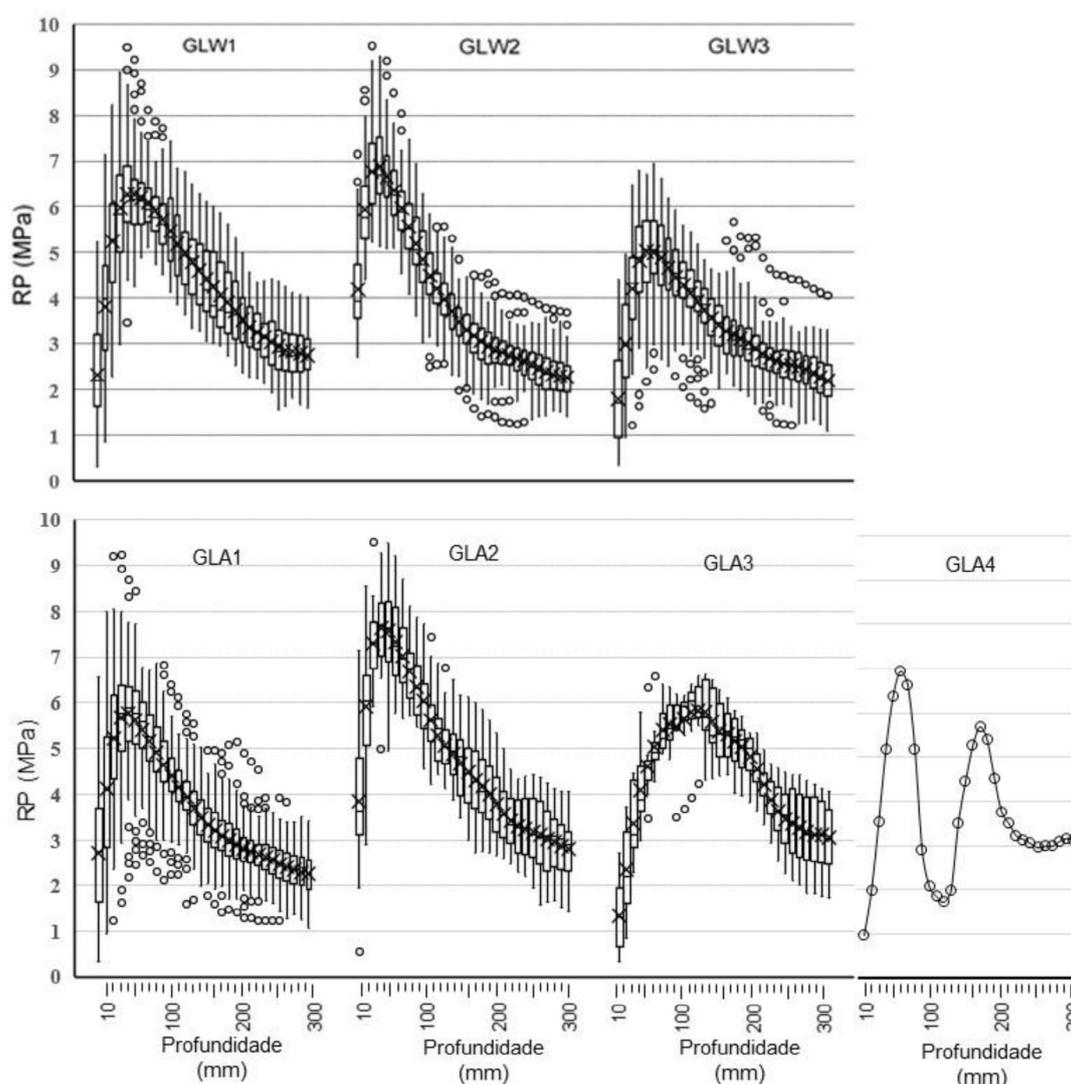


Figura 3. Perfis sumarizados da resistência à penetração (RP) de casos (ensaios) agrupados pelo método de Ward (GLW1; 2 e 3) e pelo método da ligação média entre grupos (GLA1; 2; 3 e 4), a partir da distância euclidiana absoluta.

Figure 3. Summarized profiles of penetration resistance (PR) of cases (trials) grouped by the Ward method (GLW1; 2 and 3) and by the method of the mean link between groups (GLA1; 2; 3 and 4), from absolute Euclidean distance.

eficiência de LA em identificar diferenças entre pontos de amostragem da RP. Como neste trabalho, também se verifica a constituição de grupos de pontos de amostragem da RP com número similar de casos pelo método de Ward, ao observar os dendrogramas obtidos por Medina *et al.* (2012) e Cortés *et al.* (2013).

CONCLUSÕES

A variação dos valores da RP é maior nas camadas mais superficiais.

Os valores de RP no solo sob pastagem degradada são superiores ao limite crítico, sendo a camada de 20 a 60 mm de profundidade a de maior impedância mecânica.

A estratificação do perfil da RP pelo método da ligação pela média e a distância euclidiana é mais condizente com a dinâmica da resistência do solo à penetração em profundidade.

A variabilidade horizontal da RP foi mais eficientemente caracterizada pelo método da ligação pela média associado à distância euclidiana absoluta.

BIBLIOGRAFIA

- Alves, ES.; ABS Santos; LCL Medeiros; D, Alberto; MDA Gomes; MAL, Santos & C, Gomes. 2019. Variabilidade espacial da resistência a penetração em solo argiloso sob pastagem degradada. *Braz. J. of Develop.*,5:26570-26577. <http://dx.doi.org/10.34117/bjdv5n11-287>
- Aquino, LS & VA Brei. 2013. É possível manter nosso bem-estar consumindo a mesma variedade de produtos? A influência da categorização na saciação do consumidor. *Análise*. 24:16-27.
- Arzeno, JL; SR Vieira; GM Siqueira & O Guedes Filho, 2014. Variabilidade espacial da resistência à penetração na superfície do solo em sistemas de manejo. *Rev. Bras. Ciênc. Agrár.* 9:343-352. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=119032103005>.
- Bianchini, A; JCM Maia; PSG Magalhães; N Cappelli & CK Umezu. 2002. Penetrógrafo eletrônico automático. *Rev. bras. eng. agríc. ambient.* 6:332-336. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662002000200024>
- Blainski, E; CA Tormena; J Fidalski & RML Guimarães. 2008. Quantificação da degradação física do solo por meio da curva de resistência do solo à penetração. *Rev. Bras. de Ciênc. Solo.* 32:975-983. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000300007>
- Cargnelutti Filho, A.; N Dalfollo; R Padilha; J Rodrigues & E Jost. 2008. Comparação de métodos de agrupamento para o estudo da divergência genética em cultivares de feijão. *Ciênc. Rural.* 38:2138-2145. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782008000800008>
- Colet, MJ; CB Sverzut & PH Weirich Neto. Efeito da escarificação na resistência à penetração de um solo sob pastagem. 2008. *Rev. Bras. Eng. Biosistemas.* 2:119-128. <http://dx.doi.org/10.18011/bioeng2008v2n2p119-128>
- Cortés, CA; JH Camacho-Tamayo & FR Leiva. 2013. Análisis multivariado del comportamiento espacial y temporal de la resistencia del suelo a la penetración. *Acta Agron.* 62: 268-278.
- Cortez, JW; Moreno CTM; Farinha LS; Arcoverde SNS & Valente IQM. 2019. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em um sistema de semeadura direta. *Científica*,47:175-182. <http://dx.doi.org/10.15361/1984-5529.2019v47n2p175-182>
- Costa, MAT; CA Tormena; SMB Lugão; J Fidalski; WG Nascimento & FM Medeiros. 2013. Resistência do solo à penetração e produção de raízes e de forragem em diferentes níveis de intensificação do pastejo. *Rev. Bras. de Ciênc. Solo.* 36:993-1004. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000300029>.
- Cruz, CD. GENES - a software package for analysis in experimental statistics and quantitative genetics. 2013. *Acta Sci. Agron.* 35:271-276. <http://dx.doi.org/10.4025/actasciagron.v35i3.21251>.
- Dias-Filho, MB. 2017. Degradação de pastagens: o que é e como evitar. Brasília: EMBRAPA. 19p.
- Ferrari, JMS; CPC Gabriel; TBG Silva; FD Mota; LRA Gabriel Filho & EM Tanaka. 2018. Análise da variabilidade espacial da resistência à penetração do solo em diferentes profundidades. *BIOENG.* 12:164-175. <http://dx.doi.org/10.18011/bioeng2018v12n2p164-175>
- Ferreira, DF. 2011. Estatística Multivariada. Lavras: Ed. UFLA. 676p.
- Hair Jr, JF.; RE Anderson; RL Tatham & WC Black. 2009. Análise multivariada de dados. 6ed. Porto Alegre: Bookman. 688p.
- Iori, P; RB Silva; MS Dias Júnior & JM Lima. 2012. Pressão de pré-consolidação como ferramenta de análise de sustentabilidade estrutural de classes de solos com diferentes usos. *Rev. Bras. de Ciênc. Solo.* 36:1448-1456. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832012000500008>.
- Kruskal, JB.1964. Multidimensional scaling by optimizing goodness of fit to a nonmetric hypothesis. *Psychometrika*, 29:1-27.
- Manly, BJF. 2008. Métodos estatísticos multivariados: uma introdução. 3. ed. Porto Alegre: Bookman. 229p.
- Marôco, J. 2010. Análise estatística: com utilização do SPSS. 3 ed. Lisboa: Sílabo. 822p.
- Medina, C; JH Camacho-Tamayo & CA Cortes. 2012. Soil penetration resistance analysis by multivariate and geostatistical methods. *Eng. Agríc.* 32:91-101. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162012000100010>
- Menezes, IPP; LV Hoffmann; MF Alves; CL Morello & PAV Barroso. 2008. Distância genética entre linhagens avançadas de germoplasma de algodão com uso de marcadores de RAPD e microssatélites. *Pesq. Agropec. Bras.* 43:1339-1347. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2008001000012>
- Milligan, GW & MC Cooper. 1985. An examination of procedures for determining the number of clusters in a data set. *Psychometrika.* 50:159-179.
- Mojena, R. 1977. Hierarchical grouping methods and stopping rules: An evaluation. *The Computer Journal.* 20:359-363.
- Ohana-Levi, N; I Bahat; A Peeters; A Shtein; Y Netzer; Y Cohen & Ben-Gal A. 2019. A weighted multivariate spatial clustering model to determine irrigation management zones. *Computers and Electronics in Agriculture.* 162:719-731. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.05.012>
- Oliveira Filho, FX; NO Miranda; JF Medeiros; PCM Silva; FO Mesquita & TKG Costa. 2016. Compactação de solo cultivado com cana-de-açúcar em Baía Formosa, Rio Grande do Norte. *Rev. Ceres.* 63:715-723. <http://dx.doi.org/10.1590/0034-737x201663050017>

- Oliveira, GC; EC Severiano & CR Mello. Dinâmica da resistência à penetração em Latossolo vermelho da micro-região de Goiânia, GO. 2007. *Rev. bras. eng. agríc. ambient.* 11:265-270. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662007000300004>.
- Ortigara, C; E Koppe; FB Luz; AM Bertollo; DR Kaiser & VR Silva. Uso do solo e propriedades físico-mecânicas de Latossolo Vermelho. 2014. *Rev. Bras. de Ciênc. Solo.* 38:619-626. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832014000200026>
- Santos, HG dos; PK Jacomine; LH dos Anjos; VA de Oliveira; JF Lumbreras; MR Coelho; JA de Almeida; JC de Araújo Filho; JB de Oliveira & JF Cunha. 2018. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5 ed. rev. ampl. Embrapa. [Brasília, DF, Brasil]
- Sharma, S. 1996. *Applied Multivariate Techniques*. New York: John Wiley and Sons, 512p.
- Soil Survey Staff. 1993. *Soil survey manual*. Washington, USDA-SCS. U.S. Gov. Print. Office. 437p. (Handbook, 18).
- Taylor, HM; GM Roberson & JJ Parker Junior. 1966. Soil strength-root penetration relations for medium to coarse-textured soil materials. *Soil Sci.* 102:18-22.
- Warrick, AW & DR Nielsen. 1980. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: Hillel D. *Applications of soil physics*. New York: Academic Press. 319-344.
- Weirich Neto, PH; E Borghi; CB Sverzut; EC Mantovani; RL Gomide & WLC Newes. 2006. Análise multivariada da resistência do solo à penetração sob plantio direto. *Ciênc. Rural*, 36:1186-1192. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782006000400022>.
- Vogel, GF & R Fey. 2016. Resistência mecânica à penetração em diferentes sistemas de uso do solo. *Rev. de Agric. Neo.* 3:21-26. <https://doi.org/10.32404/rean.v3i1.812>