

Identificação de camadas com diferentes estados de compactação pela análise fatorial da resistência do solo à penetração

Gubiani, P. I.¹; Reinert, D. J.¹; Reichert, J. M.¹; Gelain, N. S.¹; Oliveira, A. E.¹; Uhde, L. T.²

¹Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS, e-mail: paulogubiani@gmail.com, Apresentador. dalvanreinert@gmail.com, reichert@smail.ufsm.br, neivaengenheira@gmail.com, alanebano.oliveir@hotmail.com

²Universidade Regional-Unijuí, Ijuí-RS, e-mail: uhde@unijui.edu.br

Resumo

A divisão das medidas de resistência do solo à penetração (RP) em camadas distintas é necessária quando se quer avaliar a distribuição da RP na área e em profundidade, e pode ser obtida por meio da análise fatorial. Os objetivos deste trabalho foram: (i) analisar a variação da RP em profundidade; (ii) definir camadas horizontais com medidas semelhantes de RP e (iii) comparar as camadas formadas com gráficos de superfície. A RP foi medida em um Latossolo Vermelho Distroférrico típico em 77 pontos, definidos pelas intersecções de uma malha de 10 m x 10 m. As trinta profundidades foram agrupadas em sete camadas (fatores), as quais preservaram as diferenças marcantes originais do conjunto dos dados. A partir da superfície, os fatores, representando as sucessivas camadas formadas, foram descritos como: camada de descompactação na superfície (fator 3); camada de máxima compactação logo abaixo da superfície (fator 7); camada menos compactada em subsuperfície (fator 4); camadas com aumento da compactação (fatores 2 e 6); camada de maior compactação (fator 5); camada de compactação uniforme (fator 1). As camadas formadas permitiram avaliar a distribuição da compactação em cada camada e em profundidade.

Introdução

A resistência do solo à penetração (RP) é uma medida muito utilizada para indicar o estado de compactação do solo e a probabilidade de redução da produção das culturas (Tormena et al., 2007; Reichert et al., 2009). As medições da RP *in situ* fornecem um perfil de valores desde a superfície até a profundidade avaliada. O agrupamento das medidas de RP em camadas que representem proporções do perfil contendo medidas semelhantes, e que as camadas formadas sejam distintas umas das outras é necessário quando se quer avaliar a distribuição da RP na área e em profundidade.

A análise de componentes principais e análise fatorial foram usadas, respectivamente por Stelluti et al (1998) e Weirich Neto et al. (2006) para detectar camadas compactadas. Contudo, devido à maior complexidade inerente das análises multivariadas, muitas vezes as camadas são definidas arbitrariamente ou com base na mudança visual do comportamento da RP em profundidade. Como consequência, o resultado estatístico e as conclusões sobre o estudo podem não ser os que melhor explicam o comportamento da RP em profundidade, pois o uso da média atenua diferenças marcantes que existem nos dados, com maior efeito quanto maior for a espessura das camadas. Nesse sentido, os objetivos deste trabalho foram: (i) analisar a variação da RP em profundidade; (ii) definir camadas

horizontais com medidas semelhantes de RP por meio da análise fatorial e (iii) comparar as camadas formadas com gráficos de superfície.

Material e Métodos

A RP foi medida em uma área experimental da Unijuí, em Ijuí-RS, manejada sob plantio direto por quatro anos. O solo do local é classificado como Latossolo Vermelho Distroférico típico, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 2006). Durante o inverno de 2010, a área permaneceu em pousio e, no momento da avaliação, a vegetação espontânea estava senescida devido à aplicação de herbicida. A RP foi medida em 77 pontos, definidos pelas intersecções de uma malha de 10 m x 10 m, sendo que em cada ponto foram realizadas três repetições.

Para a aquisição dos dados de RP, foi utilizado um penetrômetro manual com haste de ponta cônica (ângulo de 30° e área basal de 129 mm²) inserida no solo a uma velocidade de penetração de aproximadamente 1 m min⁻¹, sendo os dados armazenados a cada 1,5 cm, desde a superfície até 45 cm de profundidade.

Na análise fatorial, executada conforme Manly (2008), as profundidades constituíram as variáveis independentes (Weirich Neto et al., 2006). Nesse caso, quando as variáveis recebem pesos altos na matriz carregamento, as correlações são de grau elevado e as profundidades variam juntas, isto é, existe a tendência de formação de uma camada que reúne várias profundidades. Para melhor nitidez da correlação entre as variáveis foi empregada a rotação Varimax, e o número de fatores foi definido com base no número de autovalores maiores que 1, conforme sugere Manly (2008).

Resultados e Discussão

O conjunto total das medidas mostra grande variabilidade (dispersão dos pontos) da RP em todas as profundidades, principalmente nas quatro primeiras (Figura 1a). A linha dos valores médios evidencia a presença de camadas que sugerem a predominância de processos distintos. O segmento AB indica diminuição da compactação no sentido BA, devido à atividade biológica (raízes, macro e micro fauna), ciclos de umedecimento e secagem e ação mecânica dos dispositivos de semeadura (discos e facão), chamados todos, neste texto, de agentes descompactadores. O segmento BC indica aumento da compactação no sentido CB, mostrando que as pressões confinadas nesta camada não são compensadas pela ação dos agentes descompactadores. A projeção do segmento BC para a superfície indicaria o estado de compactação na superfície logo após o tráfego de máquinas, como foi observado pelas medidas de RP feitas por Collares et al. (2008) a 1 e 44 dias após o tráfego de uma pá carregadora de 16,6 Mg em um Latossolo (Figuras 1b). Com o passar do tempo, o estado de compactação na superfície é aliviado pela ação dos agentes descompactadores (Figuras 1c).

Porém, nem sempre os perfis de RP apresentam conformação semelhante à ilustrada na Figura 1a, devido à variação em profundidade do estado de compactação, a umidade, a granulometria, a matéria orgânica, etc. Neste trabalho, a variação de umidade em profundidade foi pequena (em média

de $0,29 \text{ kg kg}^{-1}$ e $0,32 \text{ kg kg}^{-1}$, respectivamente nas camadas de 10-15 cm e de 30-35 cm) e o teor de argila do solo é de 700 g kg^{-1} na camada de 0-40 cm, o que permite concluir que as diferenças de RP se devem principalmente às diferenças no estado de compactação do solo.

O segmento CD descreve uma camada na qual os agentes descompactadores vão gradativamente reduzindo seu efeito em profundidade, concomitantemente ao aumento gradativo da compactação. O limite inferior do segmento CD parece ser a profundidade a partir da qual as forças compactadoras e descompactadoras deixam de atuar ou estão em equilíbrio. Outra interpretação que ainda pode ser feita é que a projeção do segmento CD para a superfície, gradativamente desviando-se para valores menores de RP à medida que se aproxima da superfície, parece descrever o que seria um perfil natural de adensamento do solo (segmento teórico). O desvio, principalmente, dos segmentos AB e BC em relação ao segmento teórico pode dar uma indicação de quanto o manejo degrada a estrutura do solo, ao modificar a conformação da linha média de sua conformação natural.

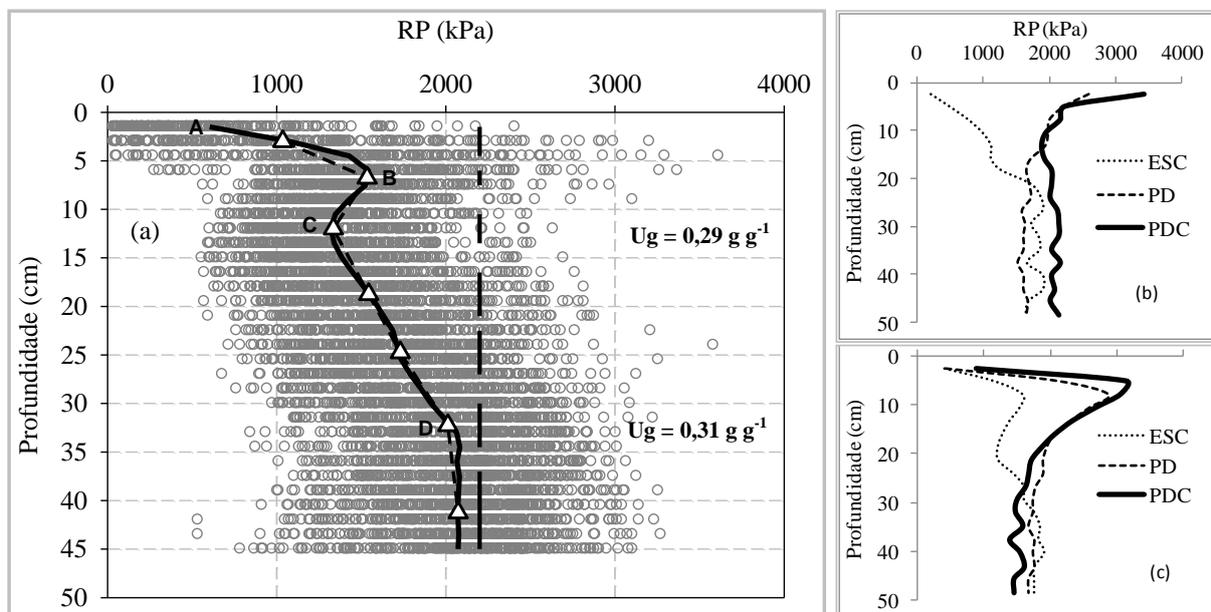


Figura 1. Resistência do solo à penetração (RP) medida no Latossolo Vermelho Distroférico típico (a). Os pontos representam todas as medidas armazenadas pelo penetrômetro (6.930 dados). As linhas representam as médias de todas as profundidades (sólida) e das camadas formadas pela análise fatorial (tracejada). Os traços verticais mostram a espessura das camadas definidas pela análise fatorial. U_g = umidade gravimétrica. As figuras b e c foram extraídas do trabalho de Collares et al. (2008).

Para que as regiões da curva de RP com comportamento diferenciado, bem como os processos associados sejam evidenciados de forma mais nítida, percebe-se que as camadas devem ser menos espessas na parte superior. Porém, as camadas que evidenciam as diferenças marcantes de RP não seriam as camadas formadas pelos três segmentos descritos anteriormente. A primeira camada teria apenas parte do segmento AB, a segunda camada teria partes dos segmentos AB e BC (medidas acima

e abaixo do ponto B), e uma terceira camada teria partes dos segmentos BC e CD (medidas acima e abaixo do ponto C). Contudo, a análise visual feita somente sobre a linha dos valores médios pode não diferenciar adequadamente as camadas, pois desconsidera a variação do conjunto de dados.

As camadas formadas pela análise fatorial são indicadas pelos pesos destacados em negrito na Tabela 1. O valor médio de RP e espessura das camadas, respectivamente, são representados pelos pontos da linha tracejada e traços verticais (Figura 1). Observa-se que o valor médio das camadas formadas pela análise fatorial quase se sobrepuseram à linha dos pontos médios, o que significa que as camadas formadas preservam as diferenças marcantes originais do conjunto dos dados. Também se verifica que nem todas as profundidades foram agrupadas. As profundidades 9, 15, 28 e 36 não se correlacionaram com grau elevado com as profundidades adjacentes e, portanto não participaram dos grupos formados.

Tabela 1. Matriz de pesos para as profundidades (variáveis) em cada fator.

Profundidade (cm)	Fator						
	1	2	3	4	5	6	7
1,5	0,063	0,023	0,891	0,029	-0,007	0,119	-0,122
3,0	0,040	0,060	0,968	-0,025	-0,007	0,029	0,083
4,5	0,006	0,121	0,833	-0,043	-0,027	-0,050	0,439
6,0	0,021	0,151	0,465	0,037	0,027	-0,005	0,810
7,5	0,031	0,108	0,057	0,309	0,073	0,092	0,894
9,0	0,050	0,056	-0,142	0,612	0,085	0,208	0,655
10,5	0,133	0,135	-0,075	0,804	0,079	0,274	0,358
12,0	0,112	0,280	-0,009	0,872	0,099	0,205	0,142
13,5	0,130	0,459	0,042	0,814	0,121	0,079	0,046
15,0	0,083	0,689	0,089	0,629	0,109	0,017	0,030
16,5	0,046	0,849	0,084	0,402	0,076	0,071	0,059
18,0	0,034	0,906	0,074	0,225	0,084	0,199	0,071
19,5	0,021	0,870	0,040	0,096	0,067	0,358	0,097
21,0	0,045	0,742	0,028	0,032	0,065	0,563	0,127
22,5	0,098	0,523	0,016	0,090	0,102	0,750	0,109
24,0	0,142	0,344	0,033	0,191	0,160	0,816	0,078
25,5	0,166	0,202	0,022	0,236	0,288	0,805	0,054
27,0	0,194	0,162	0,084	0,223	0,482	0,721	0,029
28,5	0,216	0,121	0,068	0,145	0,641	0,599	-0,030
30,0	0,259	0,107	0,023	0,052	0,777	0,415	0,003
31,5	0,299	0,114	0,001	0,013	0,843	0,230	0,040
33,0	0,391	0,079	-0,045	0,097	0,838	0,144	0,055
34,5	0,526	0,025	-0,083	0,149	0,733	0,074	0,089
36,0	0,646	0,060	-0,044	0,160	0,590	0,031	0,104
37,5	0,744	0,080	0,027	0,181	0,451	0,000	0,107
39,0	0,833	0,057	0,047	0,134	0,384	0,028	0,071
40,5	0,903	0,035	0,051	0,046	0,270	0,065	0,021
42,0	0,938	0,033	0,038	0,027	0,168	0,099	-0,011
43,5	0,931	0,031	0,032	0,048	0,097	0,163	-0,011
45,0	0,850	0,027	0,005	0,052	0,109	0,230	-0,037
Variância Relativa	19,151	14,032	9,085	11,505	14,050	12,618	7,828
Variância Acumulada	19,151	33,183	42,268	53,774	67,824	80,441	88,270

As trinta profundidades foram reunidas em sete fatores que somam 88% da variância dos dados, sendo que os fatores 1, 2 e 5 contribuem com parcela maior (variância relativa). A interpretação pela análise fatorial é que o fator 3 (intervalo de profundidades 1,5 a 4,5 cm) continua descrevendo o processo de descompactação do segmento AB; o fator 7 (intervalo de profundidades 6 a 7,5 cm) descreve a camada de máxima compactação logo abaixo da superfície; o fator 4 (intervalo de profundidades 10,5 a 13,5 cm) descreve a camada de menor compactação em subsuperfície; os fatores 2 e 6 (intervalo de profundidades 16,5 a 21,5 cm e 22,5 a 27 cm, respectivamente) descrevem camadas com aumento da compactação; o fator 5 (intervalo de profundidades 30 a 34,5 cm) descreve a camada de maior compactação em profundidade e o fator 1 (intervalo de profundidade 37,5 a 45 cm) descreve a camada de compactação uniforme.

Os gráficos de superfície construídos com a interpolação (“inverse distance weighting”) dos valores médios de RP das intersecções da malha de 10 m x 10 m demonstram que as camadas formadas são contrastantes, o que era o objetivo do emprego da análise fatorial (Figura 2). Foram apresentados somente os gráficos das primeiras 4 camadas, as quais representam os intervalos de profundidades com diferenças mais marcantes (Figura 1a).

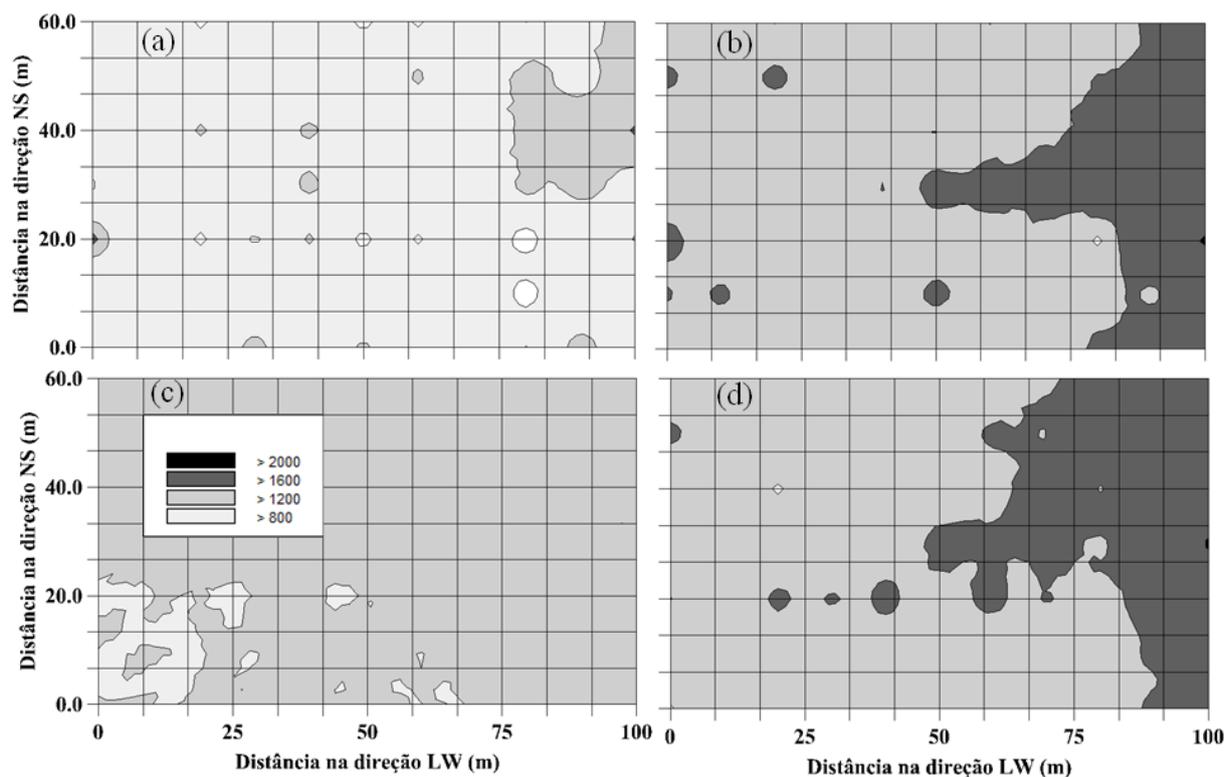


Figura 2. Superfícies de RP (kPa) formadas pelos valores médios de cada ponto de intersecção das camadas 1,5-4,5 cm (a), 6,0-7,5 cm (b), 10,5-13,5 cm (c) e 16,5-21,0 cm (d) definidas pela análise fatorial (Figura 1 e Tabela 1).

O gráfico da camada 1,5-4,5 cm reúne valores de RP com predomínio na faixa 800-1200; o gráfico da camada 6,0-7,5 cm reúne valores de RP com nas faixas 1200-1600 e 1600-2000 (camada de

maior compactação logo abaixo da superfície); o gráfico da camada 10,5-13,5 cm reúne valores de RP com predomínio no intervalo 1200-1600, (camada de menor compactação em subsuperfície) e no gráfico da camada 16,5-21,0 cm reúne valores de RP nas faixas nas faixas 1200-1600 e 1600-2000 (camada de aumento da compactação em profundidade).

Com base nas camadas formadas, verifica-se que uma faixa na extremidade à direita possibilita estudar o efeito da compactação sobre o crescimento de plantas numa condição de solo mais compactada e com menor variação da RP em profundidade (Figura 2). Do centro para a extremidade esquerda há várias porções da camada de 10,5-13,5 cm com menor compactação em relação às porções imediatamente acima (camada 6-7,5 cm) e abaixo (camada 16,5-21,0 cm). Além dessa utilidade prática, a delimitação adequada das camadas permite reconhecer, de forma mais clara, a extensão de atuação dos principais fatores condicionantes da compactação, bem como o impacto do manejo na estrutura do solo.

Conclusão

A análise fatorial foi útil como critério estatístico para a identificação de camadas de solo que agrupassem medidas semelhantes de resistência do solo à penetração. As camadas formadas se caracterizaram por menor variação da resistência à penetração dentro da camada do que entre camadas. Contudo, nas regiões de maior resistência à penetração, a uniformidade ao longo do perfil foi maior do que dentro das camadas. A identificação de regiões de compactação mais uniformes ao longo do perfil indica condições estruturais melhores para se estudar o efeito da compactação sobre o crescimento radicular.

Literatura Citada

COLLARES, G. L. et al. Compactação de um latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.32, n.3, p.933-942, 2008.

EMBRAPA/CNPS. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 2.ed. Brasília: Embrapa, 2006, 306p.

MANLY, B. J. F. Métodos Estatísticos Multivariados – Uma introdução. 3ed. Bookman, 2008. Porto Alegre, Brasil.

REICHERT, J. M. et al. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil & Tillage Research*, v.102, n.2, p.242-254, 2009.

STELLUTI, M. et al. Multivariate approach to evaluate the penetrometer resistance in different tillage systems. *Soil & Tillage Research*, v.46, n.3-4, p.145-151, 1998.

TORMENA, C. A. et al. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um latossolo vermelho distroférico sob sistemas de plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.31, n.2, p.211-219, 2007.

WEIRICH NETO, P. H. et al. Análise multivariada da resistência do solo à penetração sob plantio direto. *Ciência Rural*, v.36, n.4, p.1186-1192, 2006.