

Variabilidade espacial da resistência mecânica do solo à penetração sobre a produtividade do milho 2^a safra

PINHATA, A. A.¹; FRANCHINI, J. C.²; SANTOS, E.L.¹; BALBINOT, A. A.³; DEBIASI, H.²

¹Centro Universitário Filadélfia – Unifil, Campus Palhano, Londrina-PR, a.pinhata@gmail.com;

²Pesquisador, Embrapa Soja.

Introdução

No sistema plantio direto (SPD) é comum a existência de uma camada de solo caracterizada por um maior grau de compactação, localizada, geralmente, entre 0,1 e 0,2 m de profundidade. Além de aumentar a resistência do solo à penetração das raízes (MORAES et al., 2014), limitando a profundidade e o volume de solo explorado pelas raízes em busca de água e nutrientes (BERGAMIN et al., 2010), a compactação do solo reduz a porosidade total, a macroporosidade, a capacidade de infiltração de água, a aeração e a condutividade hidráulica (MORAES et al., 2016). Essas modificações podem diminuir a produtividade das culturas, especialmente em anos secos e/ou excessivamente úmidos (TORRES; SARAIVA, 1999).

Existem diversos indicadores do estado de compactação do solo, sendo a resistência mecânica à penetração (RP) o mais utilizado. A determinação de valores críticos para este indicador, acima dos quais o estado de compactação é considerado limitante à produtividade das culturas, tem sido objeto de várias pesquisas, conforme relatado por Reichert et al. (2007). No entanto, existe pouca informação a respeito da relação entre a RP e a produtividade do milho cultivado em condições de 2ª safra no Estado do Paraná. Neste contexto, o mapeamento da variabilidade espacial em escala de lavoura pode se constituir em uma ferramenta interessante para determinar os efeitos da RP sobre a produtividade do milho cultivado na 2ª safra.

Diante disso, o objetivo deste trabalho foi determinar a relação entre a produtividade do milho 2ª safra e a RP, por meio do mapeamento da variabilidade espacial em condições de lavoura no norte do Estado do Paraná.

Material e Métodos

O trabalho foi realizado na safra 2015 numa gleba agrícola de 108 ha, pertencente à Fazenda Santa Cândida, localizada em Cambé/PR (23°10' S, 51°14' O e altitude média de 520 m). O solo foi classificado como Latossolo Vermelho distroférrico, muito argiloso, com 737 g kg⁻¹ de argila, 74 g kg⁻¹ de silte e 189 g kg⁻¹ de areia, na camada de 0-20 cm. A área vem sendo manejada sob sistema plantio direto (SPD) desde 2001, com o cultivo de soja no verão e da rotação trigo/milho na 2ª safra, no outono/inverno.

O milho (híbrido AG 9010) foi semeado em 10/03/2015, com espaçamento entrelinhas de 0,9 m e população equivalente a 60 mil plantas ha⁻¹. A adubação de base consistiu da aplicação de 300 kg ha⁻¹ de NPK (05-20-20), a lanço e em superfície, imediatamente antes da semeadura. A adubação nitrogenada de cobertura foi realizada no estádio V5, aplicando-se 80 kg ha⁻¹ de N a lanço em superfície, na forma de ureia. Os tratos culturais foram realizados de acordo com as indicações técnicas para o milho na região.

A RP foi determinada em maio de 2015, por meio de um penetrômetro digital, equipado com cone de 130 mm² de área de base e 30° de ângulo em relação à vertical. Os dados de RP foram obtidos em 365 pontos distribuídos na área, seguindo uma grade amostral regular de 50 x 50 m. Foi realizada uma leitura de RP na camada de 0 a 0,45 m (resolução de 0,01 m) por ponto avaliado. Simultaneamente à avaliação de RP, foram coletadas amostras deformadas de solo nas camadas de 0-0,1 e 0,1-0,2 m, em 94 pontos (1 ponto a cada 4 pontos de avaliação da RP), para a determinação do conteúdo gravimétrico de água do solo, conforme Embrapa (1999). A avaliação da produtividade de grãos do milho foi realizada por meio de colheita manual das espigas presentes em 4 m de uma linha (3,6 m² de área útil), em 244 pontos regularmente distribuídos na área de estudo. Após a trilha das espigas, os grãos foram limpos e pesados, sendo os valores de produtividade corrigidos para 13% de umidade.

Os dados de RP e de produtividade do milho foram submetidos à análise geoestatística, conforme VIEIRA et al. (2002). O modelo selecionado para ajuste do semivariograma foi aquele que resultou no maior coeficiente de correlação, obtido pelo método de validação cruzada. A partir dos modelos ajustados aos semivariogramas, os dados de RP e produtividade do milho foram interpolados por meio de krigagem, sendo então utilizados para a elaboração dos mapas de variabilidade espacial, através do programa Surfer 9.0. A relação entre os dados krigados de produtividade do milho 2^a safra e de RP foi estimada por meio de análises de correlação (Pearson) e regressão, utilizando-se o programa Sigmaplot9.0 (Systat Software, Inc.).

Resultados e Discussão

Visando facilitar o estabelecimento da relação entre a compactação e desempenho produtivo do milho na 2^a safra, minimizando a interferência da variabilidade de outros fatores ambientais, a área estudada foi dividida em quatro regiões homogêneas, distintas entre si (A, B, C e D; Figura 1), com base no padrão de variabilidade espacial da produtividade do milho e da RP, nas profundidades de 0,15 e 0,45 m. As regiões A e D se caracterizaram pela menor produtividade de milho, porém

a área A apresentou menor RP em todas as profundidades avaliadas (Figura 1). Já as regiões B e C resultaram em produtividades superiores às das regiões A e D, porém a região B apresentou menor RP em comparação com a D, em toda a camada avaliada. Por fim, na região C, a RP, nas profundidades entre 0,35 e 0,45 m, foi similar à região D e maior que na região B.

Considerando todos os pontos avaliados, houve correlação negativa e significativa entre a produtividade e a RP medida nas profundidades entre 0,05 e 0,30 m (Figura 2). De acordo com Dancey e Reidy (2005), a magnitude das correlações variou de fraca (profundidades de 0,05; 0,20; 0,25; e 0,30 m) a moderada (0,10 e 0,15 m). Quando os valores obtidos na região A foram excluídos, os valores de r tornaram-se significativos para todas as profundidades. Adicionalmente, a magnitude das correlações aumentou em todas as profundidades avaliadas, oscilando de moderada (0,05; 0,35; 0,40; e 0,45 cm) a forte (0,10 e 0,30 m) (DANCEY; REIDY, 2005). Estes resultados, em conjunto com os dados da Figura 1, indicam que as menores produtividades obtidas na região A não estão associadas ao estado de compactação do solo, mas sim a outro fator limitante. Ressalta-se que, no presente estudo, o conteúdo gravimétrico de água do solo foi fracamente influenciado pelas regiões (Figura 3). Deste modo, as diferenças de RP entre as regiões (Figuras 1), podem ser atribuídos principalmente ao estado de compactação do solo.

Na Figura 4, são apresentados os mapas de variabilidade espacial da produtividade de grãos e da RP na profundidade de 0,15 m, escolhida por apresentar a maior correlação ($r = -0,82$) com o desempenho produtivo do milho 2ª safra (Figura 2). A comparação dos mapas indica que, excetuando-se a região A (Figura 1), houve associação entre a variabilidade espacial da produtividade do milho e a da RP. Isto fica mais evidente quando se compara os valores de produtividade de milho e RP nas áreas delimitadas pelos círculos A1, B1, C1 e D1. Neste sentido, as áreas delimitadas pelos círculos B1 e C1, com maiores médias de produtividade de milho (162 e 159 scs ha⁻¹, respectivamente), apresen-

taram menores valores de RP na profundidade de 0,15 m em comparação com a área D1 (Figura 5), cuja média de produtividade foi inferior (153 scs ha^{-1}). Por outro lado, a produtividade média de milho nos pontos localizados na área A1 (152 scs ha^{-1}) foi similar à observada na região D1, porém a RP, a 0,15 m de profundidade, foi similar à obtida nas regiões com maior produtividade de milho (B e C; Figura 3). Novamente, isto indica que a produtividade de milho na região A (Figura 1) não foi limitada pela RP, mas sim por outro fator ambiental não avaliado na presente pesquisa.

Ainda com relação aos dados da Figura 3, nota-se que a área delimitada pelo círculo D1 apresentou valores médios de RP mais elevados que a B1 em todas as profundidades avaliadas. A área D1 também apresentou valores de RP superiores à C1 nas profundidades entre 0,05 e 0,30 m. Embora a produtividade de milho tenha apresentado a correlação negativa mais forte com a RP medida na profundidade de 0,15 m, este resultado revela que os maiores valores de RP em outras profundidades, também contribuíram para limitar a produtividade da cultura na área D1. Adicionalmente, os dados demonstram que a RP na área delimitada pelo círculo C1 foi superior à B1 nas profundidades entre 0,25 e 0,45 m. Este fator pode constituir-se numa das explicações para a menor produtividade média de milho na área C1 em relação à área B1.

A produtividade do milho 2ª safra diminuiu linearmente com o aumento do grau de compactação do solo, expresso pela RP, na profundidade de 0,15 m (Figura 5). A retirada dos pontos situados na região A (Figura 1), altera os parâmetros da equação linear e aumenta o coeficiente de determinação (R^2), o que não ocorre quando a análise é feita com todos os pontos incluídos. Numa análise sem a região A (Figura 5b), o consequente aumento da RP, de 2,5 para 4,5 Mpa, proporcionou uma redução média de 8 scs ha^{-1} na produtividade do milho 2ª safra. Tal diminuição de produtividade pode ser associada, principalmente à redução da disponibilidade hídrica pela menor infiltração de água (MORAES et al., 2016) e pela restrição ao desenvolvimento radicular da cultura (BERGAMIN et al., 2010).

Ressalta-se que os dados obtidos no presente estudo não permitiram a indicação de um limite crítico de RP na profundidade de 0,15 m, tendo em vista que a resposta da produtividade do milho 2ª safra a esta variável foi linear. Entretanto, os resultados indicam reduções na produtividade do milho 2ª safra já a partir de uma RP de 2,5 MPa. Neste contexto, os dados obtidos por Freddi et al. (2007), em experimento conduzido sobre uma Latossolo Vermelho de textura média, demonstram que reduções significativas na produtividade do milho ocorreram a partir de uma RP de aproximadamente 2,5 MPa quando medida em um conteúdo de água de solo equivalente à capacidade de campo.

Conclusão

O aumento da RP na camada superficial (0,05-0,20 m) e/ou subsuperficial (0,25-0,45 m) diminui a produtividade de grãos do milho 2ª safra. A variabilidade espacial da RP constitui-se em um indicador eficiente dos impactos da compactação do solo sobre o desempenho produtivo do milho 2ª safra, desde que os efeitos associados a outros fatores ambientais sejam minimizados.

Referências

BERGAMIN, A. C.; VITORINO, A. C. T.; FRANCHINI, J. C.; SOUZA, C. M. A.; SOUZA, F. R. compactação em um Latossolo Vermelho distroférico e suas relações com o crescimento radicular do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 681-691, 2010.

DANCEY, C. P.; REIDY, J. Análise de correlação: o r de Pearson. In: DANCEY C.P.; REIDY, J. **Estatística sem matemática para psicologia**. Porto Alegre: Artemed, 2006. p. 178-216.

EMBRAPA. **Manual de métodos e análise de solo**. 2 ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPQ, 1997. 212 p.

FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F.; BEUTLER, A. N.; ARATANI, R. G.; LEONEL, C. L. Compactação do solo no crescimento radicular e produtividade da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 627-636, 2007.

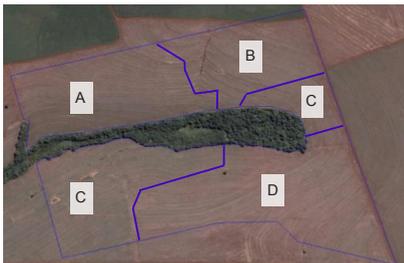
MORAES, M. T.; DEBIASI, H.; CARLESSO, R.; FRANCHINI, J. C.; SILVA, V. R. Critical limits of soil penetration resistance in a Rhodic Eutrudox. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 288-298, 2014.

MORAES, M. T.; DEBIASI, H.; CARLESSO, R.; FRANCHINI, J. C.; SILVA, V. R.; LUZ, F. B. Soil physical quality on tillage and cropping systems after two decades in the subtropical region of Brazil. **Soil & Tillage Research**, v.155, p.351-362, 2016.

REICHERT, J. M.; SUZUKY, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: Identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. **Tópicos em ciência do solo**, v. 5, p. 49-134, 2007.

TORRES, E.; SARAIVA, O. F. **Camadas de impedimento mecânico do solo em sistemas agrícolas com a soja**. Londrina: Embrapa Soja, 1999. 58p. (Embrapa Soja. Circular Técnica, 23).

VIEIRA, S. R.; MILLETE, J.; TOPP, G. C.; REYNOLDS, W. D. Handbook for geostatistical analysis of variability in soil and climate data. **Tópicos em Ciência do Solo**, v. 2, p.1-45, 2002.



Região	Produtividade ⁽¹⁾ ---- scs ha ⁻¹ ----	RP 0,15m ⁽¹⁾ ----- MPa -----	RP 0,45m ⁽¹⁾
A	152,4 ± 1,1	3,0 ± 0,2	1,9 ± 0,2
B	160,8 ± 1,3	2,9 ± 0,3	1,9 ± 0,1
C	157,8 ± 1,0	3,1 ± 0,2	2,3 ± 0,1
D	154,7 ± 1,4	3,9 ± 0,2	2,3 ± 0,1

⁽¹⁾ Valores médios ± desvio padrão

Figura 1. Regiões homogêneas na área estudada, estabelecidas em função da produtividade do milho e da resistência mecânica do solo à penetração medida nas profundidades de 0,15 e 0,45 m.

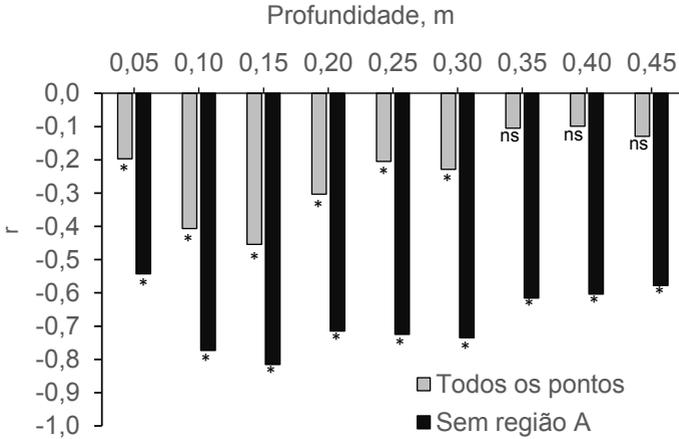


Figura 2. Coeficientes de correlação linear de Pearson (r) entre a resistência mecânica do solo à penetração e a produtividade de grãos de milho na 2ª safra (2015), considerando todos os pontos avaliados ou excluindo-se a zona A (Figura 2). * = coeficiente de correlação linear significativo, pelo teste t ($P < 0,01$); ns = coeficiente de correlação linear não significativo, pelo teste t ($P < 0,01$).

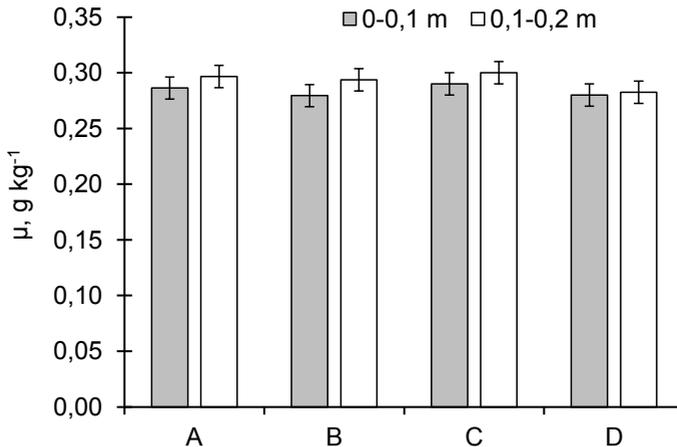


Figura 3. Conteúdo gravimétrico de água (μ) de um Latossolo Vermelho distroférrico no momento da avaliação da resistência mecânica do solo à penetração, nas regiões A, B, C e D.

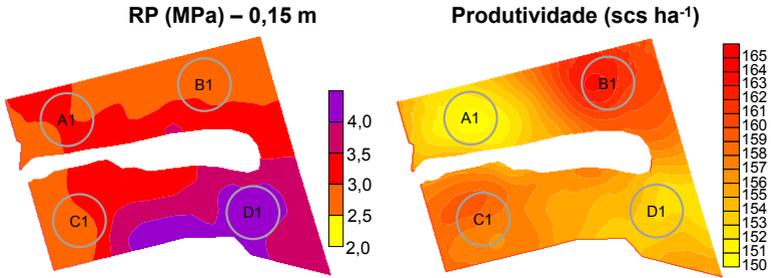


Figura 4. Mapas de variabilidade espacial da resistência mecânica do solo à penetração (RP) a 15 cm de profundidade e da produtividade de grãos do milho 2ª safra (2015). As letras indicam regiões relativamente homogêneas quanto aos valores de RP a 15 cm e produtividade de grão do milho 2ª safra.

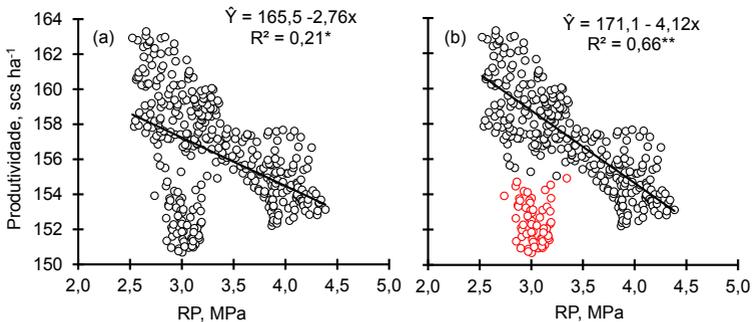


Figura 5. Valores médios de resistência mecânica do solo à penetração na camada entre 0,05 e 0,45 m (intervalos de 0,05 m), nas áreas delimitadas pelos círculos A1, B1, C1 e D1 (Figura 4).

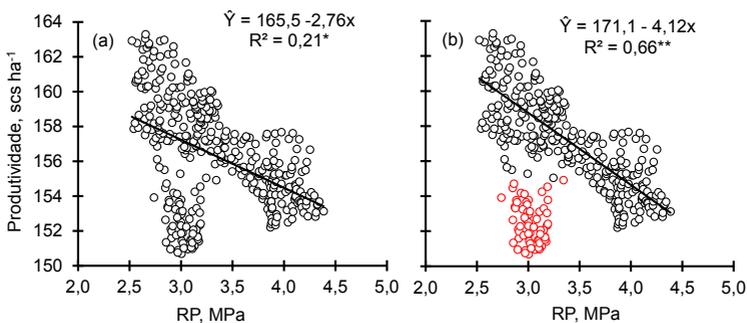


Figura 6. Relação entre a resistência mecânica do solo à penetração (RP) a 0,15 m de profundidade e a produtividade da milho 2ª safra, com (a) ou sem (b) os dados obtidos na região A (Figura 2). * = equação significativa (teste F, $p < 0,05$); ** = equação significativa (teste F, $p < 0,01$).