

**Avaliação de parâmetros físicos do solo como potenciais causadores do mau desenvolvimento da soja [*Glycine Max (L.) Merrill*] em área comercial sob solo de textura muito argilosa****Evaluation of soil physical parameters as potential causes of poor development of soybean [*Glycine Max (L.) Merrill*] in a commercial area under very clayey soil**

DOI:10.34117/bjdv6n11-551

Recebimento dos originais:08/10/2020

Aceitação para publicação:25/11/2020

**Vagner Pavezzi Framesqui**

Engenheiro Agrônomo, Maringá – PR.

Mestrando em Agroecologia (PROFAGROEC/UEM) - Universidade Estadual de Maringá – UEM

E-mail: framesqui@hotmail.com

**Marcelo Alessandro Araújo**

Professor Doutor do Curso de Engenharia Agrícola

Universidade Estadual de Maringá - UEM, Campus do Arenito, Cidade Gaúcha – PR

E-mail: araujoomaa2@gmail.com

**Simone Lemes de Souza**

Engenheira Agrônoma, Maringá – PR

**Silvio Yoshiharu Ushiwata**

Professor Doutor do Curso de Agronomia

Universidade do Estado de Mato Grosso - UNEMAT, Campus Nova Xavantina – MT

**Antônio Carlos Berto Júnior**

Acadêmico do Curso de Engenharia Agrícola

Universidade Estadual de Maringá - UEM, Campus do Arenito, Cidade Gaúcha – PR

**Eduardo Henrique Pereira Jorge**

Acadêmico do Curso de Engenharia Agrícola

Universidade Estadual de Maringá - UEM, Campus do Arenito, Cidade Gaúcha – PR

**RESUMO**

O presente trabalho consistiu na avaliação de parâmetros físicos do solo, tais como: densidade do solo, porosidade do solo, e resistência mecânica do solo à penetração em uma área agrícola comercial, na qual vinha sendo observada, em alguns pontos da mesma, redução considerável de produtividade nas últimas três safras. Para efeito de avaliação foram separadas, dentro dessa mesma propriedade e posição no relevo, duas áreas, sendo uma em que o desenvolvimento da soja aparentava estar normal (Área Normal) e outra que visivelmente as plantas estavam pouco desenvolvidas (Área Ruim). Foram coletadas em cada área, no centro da camada de 0,05 a 0,15 m de profundidade, vinte amostras com estrutura indeformada, que foram utilizadas para determinação da porosidade (macro, micro e total do solo) e densidade do solo. Nas mesmas áreas, e distante aproximadamente 0,50 m dos pontos onde

foram coletados os cilindros para densidade e porosidade, foram coletados vinte dados de resistência do solo à penetração (RP) em intervalos de 0,05 em 0,05m até 0,60m de profundidade, perfazendo um total de 240 dados por área. Os resultados foram analisados utilizando-se o teste *t* para determinação do intervalo de confiança da média ( $p < 0,05$ ). Os resultados encontrados mostraram que a densidade do solo apresentou valor significativamente maior na “Área Normal”. Os dados de porosidade não diferiram significativamente nas áreas avaliadas e, em nenhuma delas a macroporosidade foi superior a  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . Por outro lado, a RP mostrou-se mais sensível em apontar limitações do que os outros parâmetros físicos avaliados, pois como esperado, apresentou pior comportamento na “Área Ruim”, na camada de 0,15 a 0,25 m de profundidade. A variação de comportamento encontrada nos diferentes parâmetros físicos avaliados parece estar relacionada a textura do solo, que nas áreas estudadas apresenta teor de argila muito elevado.

**Palavras-chave:** densidade, porosidade, resistência do solo à penetração, compactação, plantio direto

### **ABSTRACT**

The present work consisted of the evaluation of soil physical parameters, such as: soil bulk density, soil porosity, and soil mechanical resistance to penetration in a commercial agricultural area, in which considerable productivity reduction in the last three harvests had been observed at some points of the soil. For evaluation purpose, two areas were separated within this same property and position in the relief, one in which soybean development appeared to be normal (Normal Area) and another that visibly the plants were poorly developed (Bad Area). Twenty samples with undeformed structure were collected in each area, in the center of the layer from 0.05 to 0.15 m depth, which were used to determine porosity (macro, micro and total porosity of the soil) and soil bulk density. In the same areas, and approximately 0.50 m apart from the points where the cylinders were collected for bulk density and porosity, twenty soil penetration resistance (PR) data were collected at intervals from 0.05 at 0.05m to 0.60m depth, totaling 240 data per area. The results were analyzed using the t-test to determine the mean confidence interval ( $p < 0.05$ ). The results showed that soil bulk density presented significantly higher value in the "Normal Area". Porosity data did not differ significantly in the evaluated areas and in none of them macroporosity was greater than  $0.10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . On the other hand, the PR was more sensitive in pointing out limitations than the other physical parameters evaluated, because, as expected, it presented worse behavior in the "Bad Area", in the layer of 0.15 to 0.25 m depth. The behavior variation found in the different physical parameters evaluated seems to be related to soil texture, which in the studied areas has very high clay content.

**Key words:** soil bulk density, soil porosity, soil resistance to penetration, soil compaction, no-tillage

## **1 INTRODUÇÃO**

A soja é uma cultura de grande importância mundial. Atualmente ela é a cultura de grãos de maior importância econômica cultivada no Brasil. Recentemente o país superou os Estados Unidos e passou a ser o maior produtor mundial do grão, obtendo na safra 2019/2020 uma produção de 124,845 milhões de toneladas em uma área total de plantio de 36,95 milhões de hectares, correspondendo a uma produtividade média de  $3.379 \text{ kg ha}^{-1}$ . No ranking dos cinco maiores produtores mundiais de soja temos, além do Brasil e EUA, Argentina, China e Paraguai completando o pódio (AGRIANUAL, 2020).

Segundo dados da safra 2019/2020, no Brasil, o maior produtor é o estado de Mato Grosso que cultiva uma área de 10,004 milhões de hectares e obteve uma produção de 35,885 milhões de toneladas

(produtividade média de 3.587 kg ha<sup>-1</sup>), em segundo lugar aparece o estado do Paraná, com uma área plantada de 5,503 milhões de hectares, produção de 21,598 milhões de toneladas (produtividade média de 3.925 kg ha<sup>-1</sup>) – (EMBRAPA, 2020). Nota-se que o Paraná apresenta produtividade média maior do que o Mato Grosso, tal fato provavelmente se deve as condições climáticas, técnicas de cultivo como plantio direto, consolidado a várias décadas e também as características dos solos em que o grão é cultivado no estado.

O plantio direto como é bastante divulgado em diversas pesquisas é uma prática de cultivo muito importante e eficiente. Porém, devido ao tráfego de máquinas e implementos pode promover a compactação do solo (HILL et al., 1985). De acordo com Håkansson e Medvedev (1995), o uso intenso de máquinas e implementos no processo produtivo pode levar a compactação do solo, influenciando em propriedades físicas, químicas e biológicas, que por sua vez podem interferir diretamente no desenvolvimento e na produtividade das culturas. Dexter (2004) e Horn et al. (1995), salientam que um dos primeiros efeitos da compactação é a elevação na densidade e redução na porosidade, sobretudo nos poros de maior diâmetro como os macroporos. De acordo com Abreu et al. (2004), o desenvolvimento radicular da soja ocorre através dos macroporos ou dos espaços vazios que existem entre os agregados. Portanto, modificações causadas pela compactação via de regra tendem a afetar primeiro os poros de maior diâmetro, pois estes são menos resistentes e se deformam com maior facilidade (HORN et al.; 1995). Além disso, a compactação do solo promove a elevação dos valores de resistência do solo à penetração (RP), que dependendo da espécie, pode reduzir ou até mesmo paralisar o desenvolvimento radicular (BEUTLER e CENTURION, 2003).

De maneira geral, na literatura têm-se adotado o valor de 2,0 MPa proposto por Taylor et al. (1966), como sendo limitante ao desenvolvimento e produção das culturas de interesse agrícola. Porém, este valor é contestável, uma vez que diversos autores, sob diferentes solos e cultivos, encontraram valores muitas vezes inferiores (BEUTLER et al., 2005; BEUTLER et al., 2007; VARQUEZ et al., 1989) e também superiores (BEUTLER et al., 2006; SECCO et al., 2004). Além disso, os valores de resistência do solo à penetração também podem apresentar variação considerável dependendo do tipo de equipamento utilizado na determinação dos valores de RP. Miotto et al. (2016; 2020), avaliando dois tipos de penetrômetros em áreas submetidas aos mesmo cultivos e no mesmo período de coleta, verificaram maiores valores de RP no penetrômetro de impacto em relação ao de anel dinamométrico, e sugeriram cautela quanto ao uso do valor de 2,0 MPa como limite crítico quando se fizer uso do penetrômetro de impacto.

Com base no que foi discutido até aqui pode-se afirmar que, na agricultura moderna, práticas de manejo como o plantio direto e o uso intensivo de máquinas e implementos agrícolas nas mais diferentes etapas do processo produtivo é realidade comum. Porém, alguns efeitos colaterais do uso intensivo da tecnologia podem ocorrer, causando problemas como compactação, que por vezes pode

causar limitações severas em termos de quebra de produtividade. Assim, em áreas de uso agrícola comercial, quando são detectadas zonas e/ou manchas com crescimento reduzido da cultura, a investigação das possíveis causas torna-se de extrema importância para a entender qual ou quais fatores são responsáveis por aquela condição, e de posse dessa informação traçar a estratégia adequada para a implementação dos procedimentos a serem adotados visando sanar e/ou mitigar tal problema.

Neste sentido, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a densidade, porosidade e a resistência mecânica do solo à penetração (RP), em uma área agrícola comercial que apresenta solo de textura muito argilosa, na qual notadamente vinha sendo observado, ao longo das últimas três safras, redução na produtividade de soja. Para efeito de avaliação foram separadas dentro da mesma propriedade e posição no relevo duas áreas, sendo uma que visivelmente as plantas de soja estavam pouco desenvolvidas (Área Ruim) e outra em que o desenvolvimento estava normal (Área Normal).

## **2 MATERIAL E MÉTODOS**

O estudo foi realizado em uma propriedade agrícola localizada na região de Maringá – PR, na qual se faz o cultivo comercial de soja e milho no sistema plantio direto a mais de dez anos. O solo avaliado foi classificado como Latossolo Vermelho, textura muito argilosa (areia: 40 g kg<sup>-1</sup>, silte: 90 g kg<sup>-1</sup> e argila: 870 g kg<sup>-1</sup> de solo). Nesta propriedade, notava-se a pelo menos três safras consecutivas a existência de “manchas” ou “faixas” onde as culturas apresentavam desenvolvimento e produtividade reduzidas.

Inicialmente foram levantadas as hipóteses de que o problema teria como causa a infestação por nematoides ou então algum outro patógeno de solo. Porém, foram coletadas amostras dos locais afetados e enviadas para laboratório especializado afim de confirmar ou não tais hipóteses, as quais foram descartadas após os resultados das análises laboratoriais. Uma vez descartadas as hipóteses iniciais passou-se a suspeitar que tal problema teria relação com a condição física do solo, uma vez que, havia diferença visível entre o desenvolvimento radicular das plantas de soja das duas áreas (Figura 1).

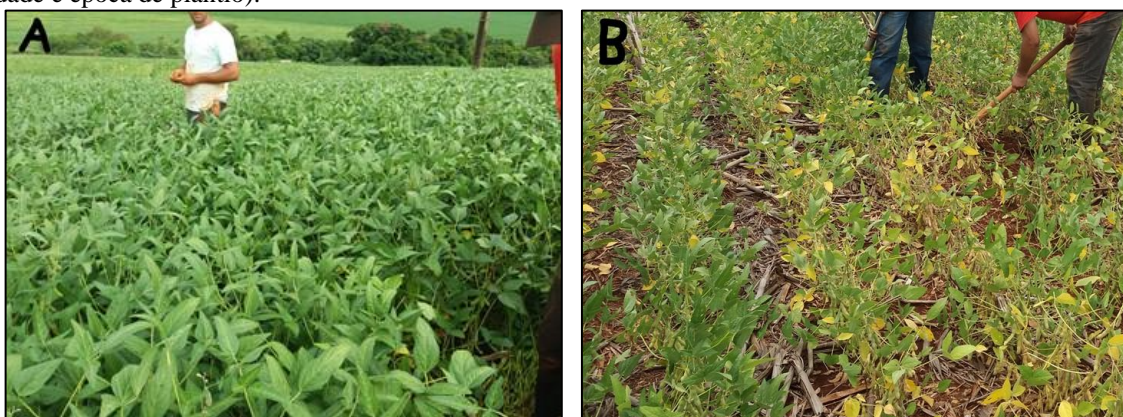


Figura 1. Foto ilustrando o sistema radicular da soja nas duas áreas. A planta da esquerda corresponde a “Área Ruim” e a da direita a “Área Normal”.



Assim, com base exposto acima foram realizadas em janeiro de 2019, seguindo um protocolo pré-estabelecido, coletas de amostras para fins de determinação do estado físico do solo da propriedade. No momento da coleta a cultura implantada na área era a soja. Na propriedade existiam locais que visualmente aparentavam estar em excelentes condições para produção e outros locais próximos que visivelmente a cultura estava pouco desenvolvida, destoando completamente do padrão. Esses dois locais foram denominados de “Área Normal” e “Área Ruim” (Figura 2 A e B).

Figura 2. (A) - “Área Normal” - soja bem desenvolvida, (B) - “Área Ruim” - soja mau desenvolvida (ambas na mesma propriedade e época de plantio).



Com base nas características visuais da lavoura e uma vez separadas as áreas, que faziam parte da mesma propriedade agrícola e encontravam-se na mesma posição no relevo, foram realizadas coletas de amostras de solo para determinação da densidade e porosidade do solo (macroporos, microporos e porosidade total) e dados para cálculo da resistência do solo à penetração.

Para a determinação da densidade e a porosidade do solo (macro, micro e porosidade total) foram coletadas em cada uma das áreas amostras com estrutura indeformada através de amostrador e cilindros específicos conforme descrito em Araújo et al. (2004) e Miotto et al. (2016, 2020) e as determinações seguiram a metodologia da Embrapa (1997). Em cada uma das duas áreas foram coletados, no centro da camada de 0,05 a 0,15m, vinte cilindros (densidade e poros), totalizando quarenta cilindros.

A determinação dos dados de resistência mecânica do solo à penetração (RP), foi realizada com auxílio de um penetrômetro de anel dinamométrico conforme descrito em Miotto et al. (2016, 2020). A coleta dos dados de RP foi realizada em pontos distantes aproximadamente 0,50 m dos pontos onde foram coletados os cilindros para densidade e porosidade. Em cada uma das duas áreas foram escolhidos vinte pontos nos quais os dados de RP foram anotados em intervalos de 0,05 em 0,05m até 0,60m de profundidade, perfazendo um total de 480 dados de RP. Para coleta dos dados de RP o solo apresentava umidade próxima a capacidade de campo.

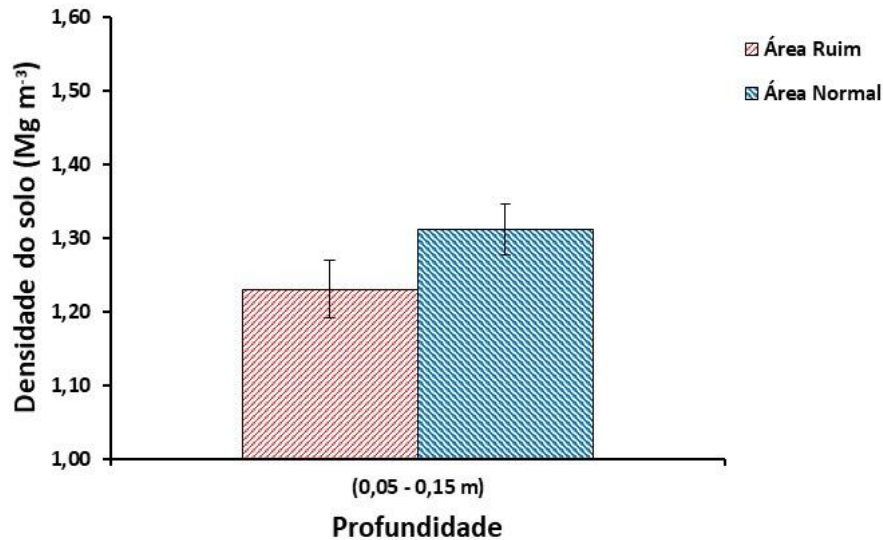
Após a tabulação dos valores obtidos, foram confeccionados gráficos com dados de densidade, porosidade do solo (macroporos, microporos e porosidade total) e resistência mecânica do solo à penetração (RP). Para análise estatística dos resultados obtidos nas duas áreas foi aplicado o teste *t* e determinado o intervalo de confiança da média a 95% ( $p < 0,05$ ). De acordo com Payton et al. (2000), as médias são consideradas estatisticamente diferentes quando não há sobreposição dos limites superior e inferior das barras dos intervalos de confiança.

### **3 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Os indicadores de qualidade física do solo podem ser divididos em primários e secundários, de acordo com grau relativo de dificuldade de obtenção de seus valores. Os parâmetros densidade, porosidade e resistência do solo a penetração pertencem ao grupo dos indicadores primários. Portanto, possuem grande relevância na avaliação da qualidade física dos solos (STEFANOSKI et al.; 2013). No presente estudo, os resultados dos indicadores primários: densidade do solo, porosidade e resistência do solo à penetração estão apresentados a seguir.

Na figura 3 estão apresentados os resultados dos valores médios de densidade do solo (Ds), obtidos nas duas áreas avaliadas. As barras indicam o intervalo de confiança da média e sua sobreposição apontam ausência de diferença estatística significativa. De acordo com Kiel (1979), os valores médios de densidade geralmente encontrados em solos argilosos variam de 1,00 a 1,25 Mg m<sup>-3</sup>. Porém, Reichert et al. (2003) salientam que, para solos de textura argilosa os valores de densidade do solo crítica situam-se entre 1,30 a 1,40 Mg m<sup>-3</sup>.

Figura 3. Valores médios de densidade do solo para as duas áreas avaliadas.



A análise dos resultados mostra valores significativamente maiores de densidade do solo na “Área Normal”. Isso indica que, para este parâmetro, esta área apresentou comportamento abaixo do esperado. Estes resultados discordam daqueles encontrados por Cardoso et al. (2006), que observaram em solo com textura similar à do presente estudo, maiores valores de densidade no tratamento plantio direto compactado. Tomando como base somente os resultados de densidade do solo, aparentemente a limitação parece não ser física. Porém, como trata-se de área comercial (ambiente não controlado), em um solo de textura extremamente argilosa (argila: 870 g kg<sup>-1</sup> de solo) deve-se considerar os demais parâmetros. Apesar da maior densidade do solo na “Área Normal”, o valor encontrado ficou muito próximo do limite inferior de densidade do solo crítica proposto por Reichert et al. (2003) (1,30 a 1,40 Mg m<sup>-3</sup>).

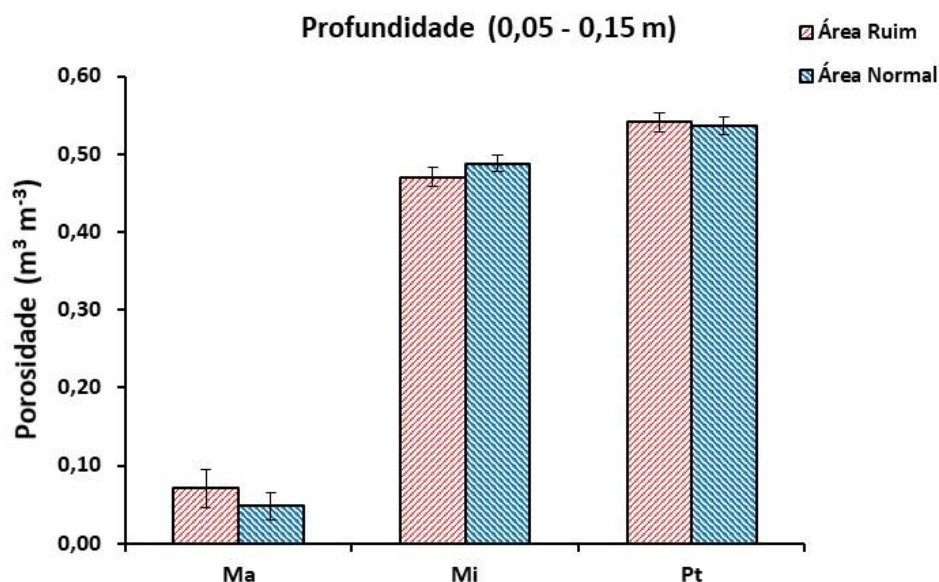
A porosidade do solo é um indicador primário de qualidade física do solo e podemos dividi-la em macro, micro e porosidade total do solo. A macroporosidade do solo diz respeito aos poros de maior diâmetro (> 50 µm), responsáveis principalmente pelas trocas gasosas no solo. Já a microporosidade do solo corresponde aos poros de menor diâmetro (< 50 µm), responsáveis principalmente pela retenção e suprimento de água para as raízes das plantas. E, por fim a porosidade total corresponde ao somatório destes dois últimos.

De acordo com Grable e Siemer (1968), valores de macroporosidade abaixo de 0,10 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> tendem a dificultar severamente a difusão de oxigênio no solo tornando a aeração restritiva, dificultando assim as trocas gasosas entre o solo e as raízes, causando prejuízos ao crescimento e desenvolvimento das plantas. Até os dias atuais este é o valor mais aceito e amplamente utilizado na literatura. Entretanto, alguns autores como Feng et al. (2002), argumentam que para solos argilosos este valor de macroporosidade deve ser maior. Por outro lado, Micucci e Taboada (2006), constataram crescimento das raízes de soja mesmo em valores de macroporosidade bem inferiores a 0,10 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>,

e justificaram tal comportamento à capacidade das raízes de soja em promoverem o aumento do diâmetro dos poros durante o seu crescimento, ou quebrarem agregados do solo, quando este encontrasse em condições adequadas de umidade. Seguindo esta linha, McQueen e Shepherd (2002) encontraram resultados em sua pesquisa que lhes permitiram sugerir, para solo pouco drenados, valor mínimo de macroporosidade de  $0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , sem que houvesse prejuízos significativos às raízes. Freddi et al. (2007), também constataram que valores de macroporosidade da ordem de  $0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  não impediram o crescimento radicular da cultura do milho.

Os valores médios de macro (Ma), micro (Mi) e porosidade total do solo (Pt) são apresentados na figura 4 para as duas áreas avaliadas. As barras indicam o intervalo de confiança da média e sua sobreposição apontam ausência de diferença significativa.

Figura 4. Porosidade do solo - Macro (Ma), Micro (Mi) e Porosidade Total (Pt) nas duas áreas avaliadas.



A análise estatística mostrou que não ocorreu diferença significativa em nenhum dos três parâmetros de porosidade avaliados (macro, micro e porosidade total). Porém, houve tendência de maiores valores de macroporosidade na “Área Ruim”. Por outro lado, a microporosidade apresentou tendência a ser maior na “Área Normal”. Os resultados de macroporosidade indicam relação com o comportamento da densidade. Entretanto, em ambas as áreas os valores ficaram abaixo de  $10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , valor este adotado na literatura como sendo mínimo para que ocorram trocas gasosas de forma eficiente no solo (GRABLE e SIEMER, 1968; XU et al., 1992; BENJAMIM et al., 2003). Porém, se considerarmos a macroporosidade de  $0,05 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  proposta por McQueen e Shepherd (2002), ambas as áreas se encontram com valores iguais ou acima desta.

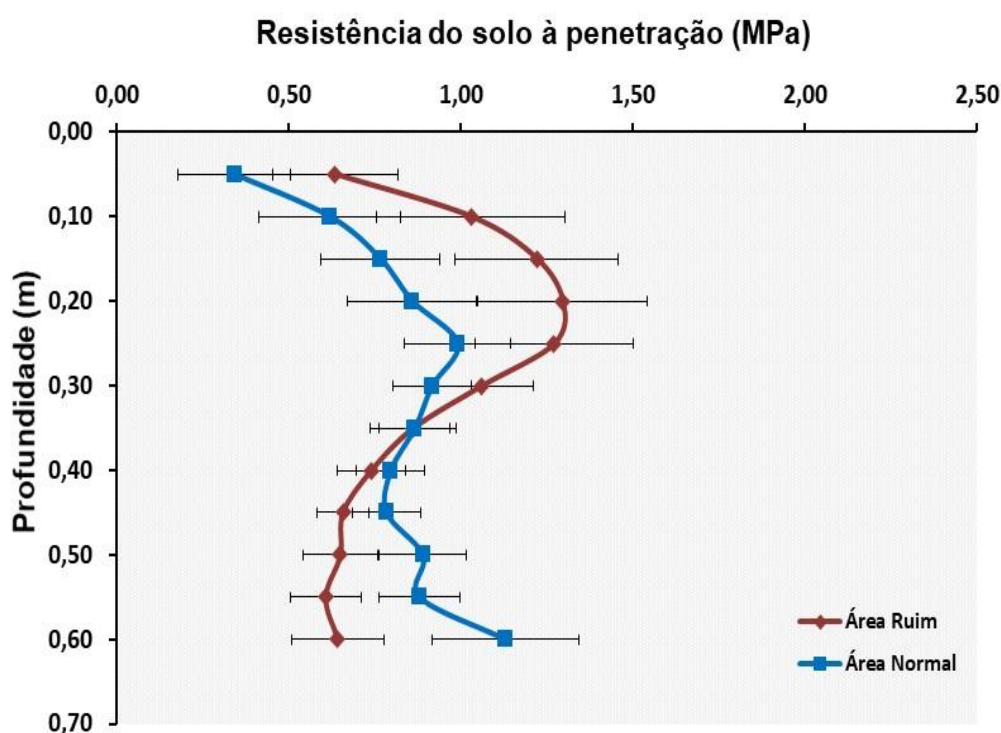
A microporosidade diz respeito aos poros responsáveis pela retenção de água no solo. Neste caso, a “Área Normal” apresentou valores ligeiramente superiores aos encontrados na “Área Ruim”. A diferença é somente dois pontos percentuais, mas pode influenciar positivamente no suprimento de



água para as plantas sobretudo em anos mais secos. Com relação a porosidade total, como se trata do somatório dos dados de macroporos e microporos, já era esperado maior valor na “Área Ruim”, uma vez que, apesar da ausência de diferença estatística, esta área apresentou maiores valores de macroporos.

Os valores médios de RP para as duas áreas avaliadas na profundidade de 0,00 – 0,60 m em intervalos de 0,05 em 0,05 m são apresentados na figura 5. As barras indicam o intervalo de confiança da média e sua sobreposição apontam ausência de diferença significativa.

Figura 5. Resistência mecânica do solo à penetração nas duas áreas avaliadas.



A análise estatística mostrou que só ocorreu diferença significativa nas profundidades de 0,15 m, 0,55 e 0,60 m. Na profundidade de 0,15 m a “Área Ruim” apresentou valores significativamente maiores. Já para as profundidades de 0,55 a 0,60 m os valores foram significativamente maiores na “Área Normal”.

Nenhuma das áreas apresentou valores de RP superiores a 2,0 MPa, valor tido na literatura como limitante ao crescimento e desenvolvimento das plantas (TAYLOR et al., 1966). Apesar da ausência de diferenças significativas de RP em quase todas as profundidades avaliadas, a análise do gráfico (Figura 4) mostra que na camada compreendida entre as profundidades de 0,15 a 0,25 m há uma tendência de limitação pela RP na “Área Ruim”. Restrições relativas à RP podem limitar ou até mesmo impedir o acesso de raízes a zonas onde existe água retida em microporos causando prejuízo ao crescimento e desenvolvimento das plantas (BEUTLER e CENTURION, 2004), sobretudo em períodos de déficit hídrico (BEUTLER et al.; 2007). Assim, com base nessas informações é válido

lembrar que a “Área Ruim” apresentou microporosidade dois pontos percentuais menor do que a “Área Normal”.

Embora a resistência do solo à penetração em ambas as áreas tenha ficado abaixo de 2,0 MPa, os valores observados na “Área Ruim”, na camada de 0,15 a 0,25 m, são indicativos robustos de limitações físicas nesta área. Pois, os resultados aqui encontrados corroboram fortemente com aqueles verificados por Beutler et al. (2007), que avaliando a cultura da soja sob condição de cultivo de sequeiro, em um solo de textura similar ao do presente estudo, verificaram que os valores de resistência à penetração (avaliada com o solo na capacidade de campo) passaram a ser limitantes à produtividade da soja a partir de 1,30 MPa. Os resultados também corroboram com Beutler et al. (2005) e Varquez et al. (1989).

## 5 CONCLUSÕES

A densidade do solo apresentou valor significativamente maior na “Área Normal”.

Os dados de porosidade não diferiram significativamente nas áreas avaliadas e, em nenhuma delas a macroporosidade foi superior a  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ .

A resistência do solo à penetração apresentou pior comportamento na “Área Ruim”, na camada de 0,15 a 0,25 m de profundidade.

No presente estudo, o parâmetro resistência do solo à penetração foi mais sensível do que a densidade e porosidade do solo em demonstrar as limitações físicas que ocorriam na “Área Ruim”.

**REFERÊNCIAS**

- ABREU, S. L.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Escarificação mecânica e biológica para redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.28, p.519-531, 2004.
- AGRIANUAL 2020: Anuário da agricultura brasileira. 25° Ed. São Paulo, FNP Consultoria e Comércio, 2020. p.409-439.
- ARAÚJO, M. A; TORMENA, C. A; SILVA, A. P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho Distrófico cultivado e sob mata nativa. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 28, n. 2, p. 337-345, 2004.
- BENJAMIN, J. G.; NIELSEN, D. C.; VIGIL, M. F. Quantifying effects of soil conditions on plant growth and crop production. *Geoderma*, 116:137-148, 2003.
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; CENTURION, M. A. P. C.; LEONEL, C. L.; JOÃO, A. C. G. S.; FREDDI, O. S. Intervalo hídrico ótimo no monitoramento da compactação e da qualidade física de um Latossolo Vermelho cultivado com soja. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.31, p.1223-1232, 2007.
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; CENTURION, M. A. P. C.; SILVA, A. P. Efeito da compactação na produtividade de cultivares de soja em latossolo vermelho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 30:787-794, 2006.
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 39:581-588, 2004.
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Efeito do conteúdo de água e da compactação do solo na produção de soja. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 38:849-856, 2003.
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SILVA, A. P. Soil resistance to penetration and least limiting water range for soybean yield in a haplustox from Brazil. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 48:863-871, 2005.
- CARDOSO, E. G.; ZOTARELLI, L.; PICCININ, J. L.; TORRES, E.; SARAIVA, O. F.; GUIMARÃES, M. F. Sistema radicular da soja em função da compactação do solo no sistema plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 41:493-501, 2006.
- DEXTER, A. R. Soil physical quality: Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. Part. 1. *Geoderma*, 120:201-214, 2004.
- EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Manual de métodos de análises de solos. 2. ed. Rio de Janeiro, 1997, 212 p.
- EMBRAPA. Soja em números (safra 2019/20). Portal Embrapa Soja, Londrina. c2020. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/dados-economicos>>. Acesso em: 10 de set. de 2020.
- FENG, G.; WU, L.; LETEY, J. Evaluating aeration criteria by simultaneous measurement of oxygen diffusion rate and soil-water regime. *Soil Science*, 197:495-503, 2002.

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.

GRABLE, A. R.; SIEMER, E. G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots. *Soil Science Society of America Journal*, 32:180-186, 1968.

HÅKANSSON, I.; MEDVEDEV, V. W. Protection of soils from mechanical overloading by establishing limits for stresses caused by heavy vehicles. *Soil Tillage Research*, 35:85-97, 1995.

HILL, R. L.; HORTON, R.; CRUSE, R. M. Tillage effects on soil water retention and pore size distribution of two mollisols. *Soil Science Society of America Journal*, 49:1264-1270, 1985.

HORN, R.; DOMZAL, H.; SLOWINSKA-JURKIEWICZ, A.; van OUWERKERK, C. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. *Soil Tillage Research*, 35:23-36, 1995.

KIEHL, E. J. *Manual de edafologia*. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 262p.

MCQUEEN, D. J.; SHEPHERD, T. J. Physical changes and compaction sensitivity of a fine-textured, poorly drained soil (Typic Endoaquept) under varying durations of cropping Manawatu Region, New Zealand. *Soil Tillage Research*, 63:93-107, 2002.

MICUCCI, G. F.; TABOADA, M. A. Soil physical properties and soybean (*Glycine max*, Merrill) root abundance in conventionally and zero-tilled soils in the humid Pampas of Argentina. *Soil Tillage Research*, 86:152-162, 2006.

MIOTO, L. S.; ARAUJO, M. A.; SERON, C. C.; LAVANHOLI, R.; BATISTA, M. A.; LOZANO, C. S. Resistência do solo à penetração das raízes avaliada por dois penetrômetros em uma área cultivada com mandioca. *Acta Iguazu, Cascavel*, v. 5, n.1, p. 65-79, 2016.

MIOTO, L. S.; ARAUJO, M. A.; SERON, C. C.; LAVANHOLI, R.; BATISTA, M. A.; USHIWATA, S. Y. Resistência mecânica do solo à penetração avaliada em área de segundo ano de implantação da cultura da mandioca (*Manihot esculenta* CRANTZ). *Brazilian Journal of Development*, Curitiba, v. 6, n. 1, p. 4601-4620, jan. 2020.

PAYTON, M. E.; MILLER, A. E.; RAUN, W. R. Testing statistical hypothesis using standard error bars and confidence intervals. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 31:547-551. 2000.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. *Ciência & Ambiente*, 27:29-48, 2003.

SECCO, D.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; ROS, C. O. da. Produtividade de soja e propriedades físicas de um latossolo submetido a sistemas de manejo e compactação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.28, p.797-804, 2004.

STEFANOSKI, D. C.; SANTOS, G. G.; MARCHÃO, R. L.; PETTER, F. A.; PACHECO, L. P. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.17, n.12, p.1301-1309, 2013.

TAYLOR, H. M.; ROBERSON, G. M.; PARKER, J. J. Soil strengthroot penetration relations to medium to coarse-textured soil materials. *Soil Science*, 102:18-22, 1966.

VARQUEZ, L.; MYHRE, D. L.; GALLAHER, R. N.; HANLON, E. A.; PORTIER, K. M. Soil compaction associated with tillage treatments for soybean. *Soil Tillage Research*, 13:35-45, 1989.

XU, X.; NIEBER, J. L.; GUPTA, S. C. Compaction effect on the gas diffusion coefficient in soils. *Soil Science Society of America Journal*, 56:1743-1750, 1992.