

Capítulo

6

Avaliação de Rotação de Culturas na Física do Solo, nas Décadas de 1990 a 2010

Silvio Tulio Spera, Henrique Pereira dos Santos, Renato Serena Fontaneli, Anderson Santi, Genei Antonio Dalmago

Introdução

Uma alternativa muito eficiente, porém, mais complexa, de manter a produtividade, e indiretamente promover a recuperação/renovação de pastagem, é a integração lavoura e pecuária, na qual a introdução da lavoura não é eventual, mas parte constante de um sistema de produção de grãos e de produção animal que interage e se completa biológica e economicamente (Macedo, 2001). Esse sistema permite uso racional de insumos, de máquinas e de mão de obra na propriedade agrícola, ao mesmo tempo em que diversifica a produção e o fluxo de caixa dos produtores.

Com a adoção do sistema plantio direto para produção anual de grãos, principalmente em solos de textura argilosa, tem despertado atenção a aparente degradação estrutural de solo, de acordo com dados de pesquisa que demonstram elevação da densidade de solo e aumento de resistência à penetração (Torres; Saraiva, 1999). Atualmente, muitos produtores usuários de plantio direto tornaram a lavrar o solo sob alegação de que a compactação de solo tem sido a principal causa de redução de rendimento de grãos. Sá (2000) destaca que compactação inibe o desenvolvimento de

raízes, o que causa menor desenvolvimento de plantas. Porém Kochhann et al. (1999) sustentam que a suposição de que a continuidade do sistema plantio direto por vários anos implicaria problemas de degradação estrutural na camada superficial nem sempre é comprovada.

Tem sido observado efeito de cobertura vegetal sobre as propriedades físicas do solo (Anjos et al., 1994; Albuquerque et al., 1995; Andreola et al., 2000). Os trabalhos desenvolvidos por Da Ros et al. (1997), por Albuquerque et al. (2001) e por Silveira e Stone (2001), em sistemas de rotação de culturas sob plantio direto incluindo espécies com sistema radicular agressivo e com diferentes quantidades de fitomassa, sugerem que as propriedades físicas e químicas de solo podem ser alteradas. Entretanto, sob plantio direto, o solo apresenta, frequentemente, na camada superficial, após algum tempo, maior valor para densidade de solo e para microporosidade e menor valor para macroporosidade (Albuquerque et al., 2001; Silveira; Stone, 2001). De acordo com Reeves (1995), com o passar dos anos, nas camadas inferiores a densidade de solo sob cultivo pode diminuir, em razão do aumento do nível de matéria orgânica na camada superficial.

Este capítulo tem por objetivo avaliar o efeito de sistemas de produção de grãos com integração lavoura + pecuária na física do solo.

Física do solo em sistemas de produção de grãos com integração lavoura + pecuária, sob sistema plantio direta, em Passo Fundo, RS

No período de 1990 a 1995, em Passo Fundo, RS, a Embrapa Trigo desenvolveu trabalho, no Cepagro, da FAMV/UPF, com sistemas de produção integração lavoura + pecuária com pastagens anuais de inverno, sob sistema plantio direto (Santos et al., 2006b). Os tratamentos constaram dos seguintes sistemas:

Sistema I: trigo/soja, pastagem de aveia preta/soja e pastagem de aveia preta/soja;

Sistema II: trigo/soja e pastagem de aveia preta + ervilhaca/milho;

Sistema III: trigo/soja, pastagem de aveia preta + ervilhaca/soja e pastagem de aveia preta + ervilhaca/milho; e

Sistema IV: trigo/soja, aveia branca/soja e aveia branca/soja.

Os atributos físicos do solo (densidade do solo, agregados estáveis em água com diâmetro superior a 4,76 mm, e diâmetro médio geométrico de agregados estáveis em água) não foram influenciados pelos sistemas de produção, exceto para comparação entre as densidades do solo nos sistemas III e IV, na profundidade 20-30 cm. Essa diferença pode ser considerada sem relevância, pois não há evidências de como os sistemas de produção III e IV poderiam influenciar esse atributo apenas nessa profundidade de solo. A inexistência de efeitos dos sistemas de produção sobre esses atributos físicos do solo pode, em parte, ser creditada à semelhança do conjunto de espécies vegetais que compuseram os sistemas de produção. Embora os sistemas II (trigo/soja e pastagem de aveia preta + ervilhaca/milho) e III (trigo/soja, pastagem de aveia preta + ervilhaca/soja e pastagem de aveia preta + ervilhaca/milho) tenham envolvido a cultura de milho, que é uma espécie de elevado potencial de produção de fitomassa, também envolveram a cultura de ervilhaca, que é reconhecida, pela baixa relação C/N, como aceleradora da taxa de mineralização de matéria orgânica. Ao longo dos anos e na média conjunta dos anos (1990/1991 a 1995/1996), não houve diferenças entre as médias para rendimento de grãos de milho. O rendimento médio de grãos de milho foi de 6.370 kg/ha.

Física do solo em sistemas de produção de grãos com integração lavoura + pecuária, sob sistema plantio direto, em Coxilha, RS

No período de 1995 a 2000, em Coxilha, RS, foram estudados sistemas de produção de grãos com pastagens anuais de inverno e de verão. Os tratamentos foram constituídos por seis sistemas de produção com integração lavoura + pecuária (Santos et al., 2006a):

Sistema I: trigo/soja e pastagem de aveia preta + ervilhaca/milho;

Sistema II: trigo/soja e pastagem de aveia preta + ervilhaca + azevém/milho;

Sistema III: trigo/soja e pastagem de aveia preta + ervilhaca/pastagem de milheto;

Sistema IV: trigo/soja e pastagem de aveia preta + ervilhaca + azevém/pastagem de milheto;

Sistema V: trigo/soja, aveia branca/soja e pastagem de aveia preta + ervilhaca/pastagem de milheto; e

Sistema VI: trigo/soja, aveia branca/soja e pastagem de aveia preta + ervilhaca + azevém/pastagem de milheto.

Na avaliação entre os sistemas de produção de grãos com pastagens anuais de inverno e de verão, houve diferença para o valor de densidade de solo somente entre os sistemas II e V, na camada superficial (Spera et al. 2006). O sistema V ($1,30 \text{ Mg/m}^3$) apresentou densidade de solo maior que a do sistema II ($1,23 \text{ Mg/m}^3$), na camada 0-5 cm. O Latossolo Vermelho sob floresta subtropical apresentou densidade de $0,91 \text{ Mg/m}^3$ e $1,07 \text{ Mg/m}^3$, respectivamente, nas camadas 0-5 cm e 10-15 cm. Essas densidades são menores que as dos demais sistemas de produção estudados, pois os sistemas de produção foram conduzidos sob sistema plantio direto,

determinando aumento da densidade do solo, em relação à floresta subtropical. Spera et al. (2004), estudando sistemas mistos no mesmo tipo de solo do presente trabalho, verificaram que a densidade de solo sob trigo/soja, ervilhaca/milho e aveia branca/soja, nas camadas 0-5 cm e 10-15 cm, sob trigo/soja, pastagem de aveia preta + ervilhaca/milho e aveia branca/soja, sob pastagem perene de inverno e sob pastagem perene de verão, foi maior do que na floresta subtropical. Da Ros et al. (1997), em Latossolo Vermelho-Escuro distrófico, verificaram que a menor densidade de solo ocorreu em tratamentos submetidos a preparo convencional com aração e gradagem, em relação ao sistema plantio direto, em todas as camadas estudadas (0-7 cm, 7-14 cm e 14-21 cm). Stone e Silveira (2001), em Latossolo Vermelho distrófico perférrico, observaram que plantio direto apresentou maior densidade de solo do que preparo convencional de solo com arado de discos e gradagem, no preparo somente com arado de discos e no preparo somente com grade e com sistemas de rotação de culturas. Esses mesmos autores verificaram que soja/trigo, soja/trigo/soja/feijão/arroz/feijão e arroz/feijão apresentaram densidade de solo mais elevada, na camada 0-10 cm. Contudo, estes dois últimos tratamentos foram semelhantes aos sistemas de sucessão milho/feijão e arroz consorciado com calopogônio/feijão.

Houve diferença na densidade de solo entre as camadas amostradas nos dois primeiros sistemas de produção de grãos com pastagens anuais de inverno e de verão e na floresta subtropical. A densidade do solo nos sistemas I (1,27 Mg/m³ para 1,34 Mg/m³) e II (1,23 Mg/m³ para 1,31 Mg/m³) e na floresta subtropical (0,91 Mg/m³ para 1,07 Mg/m³) aumentou da camada 0-5 cm para a camada 10-15 cm. Resultados similares foram observados por Trein et al. (1991), por Torres e Saraiva (1999), por Albuquerque et al. (2001) e por Spera et al. (2004). A densidade do solo foi menor na camada 0-5 cm, em relação à camada 10-15 cm, indicando possível compactação de solo nessa profundidade. Esse processo tem sido atribuído ao tráfego de máquinas (Anjos et al., 1994) e ao pisoteio por animais (Trein et al. 1991).

Neste estudo, a maior densidade de solo verificada na camada 10-15 cm pode ser atribuída à presença residual de camada compactada resultante de operações anteriores de preparo de solo com aração e gradagem.

Não houve diferença quanto à porosidade total entre os sistemas de produção de grãos com pastagens anuais de inverno e de verão. A floresta subtropical mostrou maior porosidade total ($0,663 \text{ m}^3/\text{m}^3$ e $0,613 \text{ m}^3/\text{m}^3$), em relação a todos os sistemas de produção estudados, nas camadas 0-5 cm e 10-15 cm. Anjos et al. (1994), comparando diferentes sistemas de manejo de solo e floresta, não verificaram diferenças entre os tratamentos para porosidade total, na camada 0-20 cm. Nesse caso, em relação à floresta subtropical houve redução na macroporosidade de todos os sistemas de produção estudados, com consequências significativas na porosidade total. Spera et al. (2004) observaram que trigo/soja, ervilhaca/milho e aveia branca/soja, trigo/soja, pastagem de aveia preta + ervilhaca/milho e aveia branca/soja, pastagem perene de inverno e pastagem perene de verão apresentaram menor porosidade total do que a floresta subtropical, nas camadas 0-5 cm e 10-15 cm. Albuquerque et al. (2001) observaram também maior porosidade total na floresta, em relação à área sob sistema plantio direto e à sob preparo convencional de solo com arado e grade. Albuquerque et al. (1995) verificaram que monocultura trigo/soja apresentou menor valor de porosidade total na camada 1,0-8,6 cm que as rotações: trigo/soja, aveia preta/soja e aveia preta + ervilhaca/milho e aveia preta/soja, aveia preta/soja e trigo/soja. Stone e Silveira (2001) observaram que as rotações milho/feijão/milho/feijão/arroz/feijão, milho/feijão, arroz consorciado com calopogônio/feijão, arroz/feijão e soja/trigo/soja/feijão/arroz/feijão apresentaram porosidade total mais elevada na camada 0-10 cm. Entretanto, estes últimos quatro tratamentos foram semelhantes à sucessão soja/trigo quanto à porosidade total de solo.

Houve diferença na porosidade total entre as profundidades de apenas um sistema de produção com pastagens anuais de inverno e de verão e na floresta subtropical. No sistema II (de $0,535 \text{ m}^3/\text{m}^3$ para $0,504 \text{ m}^3/\text{m}^3$) e na

floresta subtropical (de $0,663 \text{ m}^3/\text{m}^3$ para $0,613 \text{ m}^3/\text{m}^3$), a porosidade total diminuiu da camada 0-5 cm para a camada 10-15 cm. Esses resultados estão de acordo com os obtidos por Spera et al. (2004) em sistemas de produção de grãos com pastagens anuais de inverno, pastagens perenes de inverno e pastagens perenes de verão, em que esses autores observaram que a porosidade total diminuiu da camada 0-5 cm para a camada 10-15 cm. Porém, para o caso do sistema II, verifica-se que pode ter ocorrido acúmulo de resíduos culturais ou ação de sistema radicular de culturas na reestruturação da porosidade, na camada 0-5 cm, em relação aos demais tratamentos, e para o caso da floresta subtropical, o acúmulo de serrapilheira na camada 0-5 cm promoveu, além da redução da densidade do solo, aumento de porosidade total, em comparação à camada 10-15 cm, na qual houve este acúmulo. Resultados semelhantes também foram obtidos por Albuquerque et al. (1995), com sistemas de manejo de solo que incluíam rotação de culturas, em mesmo tipo de solo, nos quais a porosidade total diminuiu da camada 1,0-8,6 cm para a camada 8,6-16,2 cm.

Entre os sistemas de produção com pastagens anuais de inverno e de verão, houve diferenças entre as médias para microporosidade. O sistema IV ($0,410 \text{ m}^3/\text{m}^3$) apresentou maior valor para microporosidade do que o sistema I ($0,389 \text{ m}^3/\text{m}^3$), na camada 0-5 cm. Por sua vez, o sistema VI ($0,408 \text{ m}^3/\text{m}^3$ e $0,417 \text{ m}^3/\text{m}^3$) apresentou microporosidade maior que a do sistema I ($0,389 \text{ m}^3/\text{m}^3$ e $0,390 \text{ m}^3/\text{m}^3$), nas camadas 0-5 cm e 10-15 cm, respectivamente. Além disso, o sistema V ($0,411 \text{ m}^3/\text{m}^3$) também mostrou valor maior de microporosidade, em relação ao sistema I, na camada 10-15 cm. A floresta subtropical mostrou valor de microporosidade maior do que os de todos os sistemas de produção estudados, na camada 0-5 cm. A floresta subtropical possui maior volume de microporos do que os sistemas de produção estudados por não sofrer as perturbações inerentes às atividades agrícolas. Resultados semelhantes foram obtidos por Spera et al. (2004), trabalhando com diferentes sistemas de produção com integração lavoura + pecuária. Ademais, o sistema II apresentou menor valor de mi-

croporosidade, em comparação com os sistemas III, IV, V e VI, na camada 0-5 cm. Stone e Silveira (2001) observaram que soja/trigo, soja/trigo/soja/feijão/arroz/feijão, milho/feijão e arroz/feijão mostraram microporosidade mais elevada na camada 0-10 cm. Todavia, a microporosidade destes dois últimos tratamentos foi semelhante à da rotação milho/feijão/milho/feijão/arroz/feijão.

Não houve diferença de microporosidade entre as profundidades de solo dos sistemas de produção de grãos com pastagens anuais de inverno e de verão. Resultados similares foram encontrados por Albuquerque et al. (1995) e por Andreola et al. (2000), estudando manejos de solo e de rotação de culturas. Por sua vez, o valor de microporosidade da floresta subtropical diminuiu da camada 0-5 cm ($0,441 \text{ m}^3/\text{m}^3$) para a camada 10-15 cm ($0,394 \text{ m}^3/\text{m}^3$). Dados concordantes foram obtidos por Albuquerque et al. (2001), da camada 0-5 cm para a camada 10-15 cm.

Houve diferenças entre as médias dos sistemas de produção de grãos com pastagens anuais de inverno e de verão para macroporosidade. O sistema II ($0,157 \text{ m}^3/\text{m}^3$) apresentou maior macroporosidade do que os sistemas III ($0,116 \text{ m}^3/\text{m}^3$), IV ($0,110 \text{ m}^3/\text{m}^3$), V ($0,102 \text{ m}^3/\text{m}^3$) e VI ($0,105 \text{ m}^3/\text{m}^3$), na camada 0-5 cm. Por sua vez, floresta subtropical ($0,222 \text{ m}^3/\text{m}^3$ e $0,220 \text{ m}^3/\text{m}^3$) apresentou macroporosidade superior a de todos os sistemas de produção estudados, nas camadas 0-5 cm e 10-15 cm. Tanto a microporosidade como a macroporosidade foram afetadas pelos sistemas de produção estudados. Segundo Bouma (1991), os macroporos estão relacionados com processos vitais para as plantas, devendo o ambiente pedológico ser preservado. A redução da macroporosidade tende a se refletir, significativamente ou não, na porosidade total e no aumento de densidade de solo. Albuquerque et al. (1995), Andreola et al. (2000) e Silveira e Stone (2001), estudando modelos de rotação de culturas, não encontraram diferenças nos valores de macroporosidade entre os sistemas de produção estudados. Silveira e Stone (2001) observaram que os sistemas de rotação com arroz consorciado com calopogônio/feijão e milho/feijão/milho/feijão/arroz/

feijão apresentaram valor mais elevado para macroporosidade, na camada 0-10 cm. Todavia, este último não diferiu dos sistemas arroz/feijão e milho/feijão.

Foi verificada diferença de macroporosidade entre profundidades de amostragem de solo em somente um sistema de produção com pastagens anuais de inverno e de verão. O valor de macroporosidade do sistema II diminuiu da camada 0-5 cm ($0,157 \text{ m}^3/\text{m}^3$) para a camada 10-15 cm ($0,104 \text{ m}^3/\text{m}^3$). Essa diferença é consequência da alteração da porosidade total. Spera et al. (2004) obtiveram resultados semelhantes no valor de macroporosidade somente para alguns sistemas de produção estudados, ou seja, houve diminuição dos valores nos sistemas trigo/soja, trigo/soja, ervilhaca/milho e aveia branca/soja, trigo/soja, aveia preta + ervilhaca/milho e aveia branca/soja e alfafa para feno.

Houve diferença entre as médias de resistência à penetração de solo em somente um sistema de produção com pastagens anuais de inverno e de verão. O sistema III ($1,95 \text{ kgf}/\text{cm}^2$) mostrou maior resistência à penetração do que o sistema II ($1,34 \text{ kgf}/\text{cm}^2$), na camada 0-5 cm. O sistema II pode ter diluído o efeito do pisoteio de bovinos, na camada 0-5 cm, em relação aos demais tratamentos, pela presença de resíduos culturais de milho. Dentre as culturas, os resíduos de milho oferecem mais proteção mecânica ao solo (Derpsch et al., 1991). Porém, na floresta subtropical apresentou menor resistência à penetração de solo, em relação a maioria dos sistemas de produção estudados, nas camadas 0-5 cm e 10-15 cm. Albuquerque et al. (2001) verificaram que plantio direto manifestou maior valor para resistência à penetração de solo do que preparo convencional de solo e floresta.

Na maioria dos sistemas de produção de grãos com pastagens anuais de inverno e de verão e na floresta subtropical, houve diferenças entre as profundidades de solo para resistência à penetração. Nos sistemas I (de $1,65 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ para $2,72 \text{ kgf}/\text{cm}^2$), II (de $1,34 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ para $2,78 \text{ kgf}/\text{cm}^2$), IV (de $1,76 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ para $2,87 \text{ kgf}/\text{cm}^2$), V (de $1,46 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ para $2,69 \text{ kgf}/\text{cm}^2$) e VI

(de 1,60 kgf/cm² para 2,85 kgf/cm²), e na floresta subtropical (de 0,83 kgf/cm² para 1,97 kgf/cm²), a resistência à penetração aumentou da camada 0-5 cm para a camada 10-15 cm. Resultados similares para floresta foram obtidos por Albuquerque et al. (2001), nos quais a resistência à penetração aumentou da camada 0-5 cm para a camada 10-15 cm.

Observando os valores de macroporosidade, porosidade total, densidade e resistência de solo à penetração, constata-se que a estrutura de solo, em virtude de atividade agropecuária, sofreu degradação em todos os sistemas de produção estudados, em relação à floresta subtropical. Resultados equivalentes foram obtidos por Argenton (2000). Deve-se levar em consideração que os animais foram introduzidos para pastejar apenas quando o solo encontrava-se relativamente seco. Trein et al. (1991) observaram em ensaio, que a resistência à penetração e após o pastejo por período de 40 horas, e com a lotação de 200 cabeças por hectare, aumentou, na camada 0-7,5 cm. No presente estudo, esse pastejo foi efetuado apenas duas ou três vezes, no inverno, e três a quatro vezes, no verão, com duração de no máximo dois dias em cada pastejo com carga de dez a quinze animais. Além disso, após a retirada dos animais da área, manteve-se intervalo de 40-60 dias, de modo a permitir rebrotes das forrageiras de inverno antes do estabelecimento das culturas de verão.

Física do solo em sistemas de produção de grãos com integração lavoura + pecuária, com culturas de cobertura de solo e duplo propósito, sob sistema plantio direto, em Coxilha, RS

No período de 2003 a 2009, houve mudanças nos tratamentos dos sistemas de produção com integração lavoura + pecuária, conduzidos em Coxilha, RS, nos quais foram introduzidas culturas de cobertura de solo e de duplo propósito (Santos et al., 2009b):

Sistema I: trigo/soja e ervilhaca/milho;

Sistema II: trigo/soja e pastagem de aveia preta/milho;

Sistema III: trigo/soja e pastagem de aveia preta/soja;

Sistema IV: trigo/soja e ervilha/milho;

Sistema V: trigo/soja, triticale duplo propósito/soja e ervilhaca/soja; e

Sistema VI: trigo/soja, aveia branca de duplo propósito/soja e trigo duplo propósito/soja.

Os resultados deste estudo foram discutidos a partir da avaliação de 2008. A maioria dos sistemas de produção com integração lavoura-pecuária, em 2008, na camada de 0 cm a 2 cm, mostrou maior valor de densidade do solo, em relação a 2005, após quatro anos de cultivo, enquanto que na camada de 10 cm a 15 cm ocorreu o inverso. Segundo Costa et al. (2003), com o passar dos anos, a densidade do solo com sistema plantio direto pode diminuir parcialmente, em consequência do aumento do teor de matéria orgânica na camada superficial, melhorando a estrutura do solo. Isso pode variar com o tipo e a profundidade do solo, e também com o sistema de rotação de culturas utilizado.

No estudo, em 2008, os teores de matéria orgânica de solo, em todas as camadas e sistemas de produção com integração lavoura-pecuária foram iguais ou superiores aos teores registrados em 2005. De acordo com Marcolan e Anghinoni (2006), o uso do solo com sistema plantio direto por período de quatro anos, após o revolvimento foi suficiente para o retorno dos atributos físicos do solo à condição próxima à original, uma vez que os mesmos não se diferenciaram dos sistemas de produção de oito e 12 anos de cultivo.

Em 2008, na camada de 0 cm a 2 cm, não houve diferença entre os sistemas de produção com integração lavoura-pecuária (1,07 Mg/ha a 1,13 Mg/

ha) e nem destes e a floresta subtropical (0,92 Mg/ha), nos valores de densidade do solo. E, na camada de 10 cm a 15 cm, não houve diferença entre os valores de densidade do solo dos sistemas de produção com integração lavoura-pecuária (1,32 Mg/ha a 1,34 Mg/ha). Porém, nesta mesma camada, o solo da floresta subtropical (1,14 Mg/ha) mostrou valor menor de densidade, em relação aos sistemas de produção com integração lavoura-pecuária. Os maiores valores de densidade dos sistemas de produção com integração lavoura-pecuária são explicados pelo efeito das atividades agropecuárias intensas, por muitos anos, que promove, entre outros efeitos negativos, o aumento da densidade. Spera et al. (2004), estudando sistemas de produção com integração lavoura-pecuária no mesmo tipo de solo, observou que a densidade nas camadas de 0 cm a 5 cm e de 10 cm a 15 cm, de solos manejados com as rotações trigo/soja, ervilhaca/milho e aveia branca/soja, sob pastagem perene de inverno e sob pastagem perene de verão, aumentou consideravelmente, em relação ao status original. Silva et al. (2000), em trabalho desenvolvido somente com pastagens anuais de inverno e cultura de milho no verão, ambas estabelecidas sob sistema plantio direto, não observaram diferenças na densidade de solo entre as áreas pastejadas e das não pastejadas. De acordo com os mesmos autores, o pisoteio animal não teve efeito sobre a densidade do solo, possivelmente pelo fato de o resíduo da pastagem permanecer próximo a 1,0 Mg/ha de matéria seca.

A densidade do solo foi maior na camada de 10 cm a 15 cm, em relação à camada de 0 cm a 2 cm, em todos os sistemas de produção com integração lavoura-pecuária. Isso indica a existência de camada compactada situada a partir dos 10 cm de profundidade em todos os sistemas de produção com integração lavoura-pecuária, o processo de degradação tem sido atribuído ao tráfego de máquinas (Cunha et al., 2009) e ou ao pisoteio por animais (Albuquerque et al., 2001; Drewry et al., 2008). Neste estudo, maiores valores de densidade, na camada de 10 cm a 15 cm, podem ser

atribuídos à formação de uma camada adensada, residual, resultante de operações anteriores de preparo de solo com arados e grades, podendo, nas parcelas sob cultivo de forrageiras, estar pouco associadas ao pisoteio promovido pelos bovinos.

Densidade de solo ainda tem sido um atributo físico usado na avaliação do estado estrutural do solo e os valores encontrados permitem concluir que existe compactação de solo nos sistemas de manejo estudados. Os valores, nas camadas, mantiveram-se abaixo do valor considerado limitante para os latossolos argilosos de Passo Fundo, que, de acordo com Klein e Câmara (2007), situaram-se ao redor de $1,40 \text{ Mg/m}^3$. Valores comparáveis de densidade do solo foram constatados por Santos et al. (2006b) com sistemas de produção integração lavoura-pecuária, no mesmo tipo de solo. Neste estudo, assim como no de Santos et al. (2009a), 10 a 15 bovinos foram mantidos pastando durante o dia e em solo relativamente seco, consumindo toda a forragem ofertada em um ou dois dias. Entretanto, foi verificado aumento do valor da densidade do solo, após pastejo, em experimento conduzido por Trein et al. (1991), em Argissolo Vermelho típico, com lotação elevada de animais (200 UA) e por 40 horas. Como os animais pastaram em solo argiloso úmido, houve intensa compactação da área. Nos ensaios de Albuquerque et al. (1995), em Latossolo Vermelho distrófico, a sequência trigo/soja manifestou, na camada 1,0 cm a 8,6 cm, maior densidade do solo do que os sistemas de rotação trigo e soja e aveia preta consorciada com ervilhaca e; trigo e soja, aveia preta e soja seguida novamente de aveia preta e soja.

Em 2008, todos os sistemas de produção com integração lavoura-pecuária, em ambas as camadas amostradas, mostraram valores de porosidade total menor do que na avaliação feita em 2005. Por outro lado, não houve diferença na porosidade total entre os sistemas de produção integração lavoura-pecuária, em ambas as camadas estudadas (0-2 cm: $0,528 \text{ m}^3/\text{m}^3$ a $0,541 \text{ m}^3/\text{m}^3$ e 10-15 cm: $0,446 \text{ m}^3/\text{m}^3$ a $0,455 \text{ m}^3/\text{m}^3$) e nem des-

ses, em relação à floresta subtropical (0-2 cm: 0,588 m³/m³ e 10-15 cm: 0,500 m³/m³), na camada superficial. Porém, o solo da floresta subtropical, na camada de 10 cm a 15 cm, mostrou valores maiores de porosidade total, em relação aos sistemas de produção com integração lavoura-pecuária. Comparando-se com os valores de porosidade total na condição original, encontrados na floresta subtropical, constata-se que, após várias décadas de ações antrópicas, houve redução na macroporosidade dos solos cultivados, independentemente do tipo de sistemas de produção com integração lavoura-pecuária. As diferenças na porosidade total podem ser atribuídas ao efeito da presença, de diferentes tipos de sistemas radiculares, extenso ou não das espécies forrageiras. A intensidade variável do trânsito de máquinas, conforme o tipo de sistema de produção, também pode ter afetado a porosidade total. Spera et al. (2004), estudando as propriedades físicas de solos com sistemas de produção com integração lavoura-pecuária, verificaram que as rotações trigo/soja, ervilhaca/milho e aveia branca/soja e; trigo/soja, pastagem de aveia preta + ervilhaca/milho e aveia branca/soja, pastagem perene de inverno e pastagem perene de verão mostraram porosidade total inferior àquelas presentes na floresta subtropical. Diferentes tipos de rotação de culturas também afetam, de modo distinto, os valores de porosidade total. Albuquerque et al. (1995) verificaram que a sequência trigo e soja manifestou menor valor de porosidade total que as rotações: trigo e soja, aveia preta e soja e aveia preta + ervilhaca e milho e; aveia preta e soja, aveia preta e soja e trigo e soja, enquanto Stone e Silveira (2001) observaram, em solos sob rotação milho e feijão, milho e feijão, e arroz e feijão, maior porosidade total do que na sucessão soja e trigo.

A porosidade total foi maior na camada de 0 cm a 2 cm do que na camada de 10 cm a 15 cm, exceto na floresta subtropical. Nos sistemas de produção com integração lavoura-pecuária do presente estudo, supõe-se que tenha havido combinação do efeito do acúmulo de resíduos culturais e da ação agregante do sistema radicular de culturas na reestruturação do

solo, recompondo a porosidade do solo. No caso da floresta subtropical, o acúmulo constante de serrapilheira na camada superficial determina, além da menor densidade do solo, maior porosidade total, em comparação à camada de 10 cm a 15 cm. Nos sistemas agrícolas, a maior porosidade total da camada superficial, em relação à camada mais profunda, indica, nesta última camada, processo de degradação da estrutura do solo, caracterizado como “pé-de-arado” (ou “pé-de-grade”). Resultados equivalentes também foram reportados por Albuquerque et al. (1995) e Spera et al. (2004). Além disso, no presente estudo, na camada de 10 cm a 15 cm, houve menor volume de macroporos, com conseqüente maior volume de microporos, em todos os sistemas de produção com integração lavoura-pecuária, podendo resultar, nestes sistemas de produção com integração lavoura-pecuária, em redução da infiltração de água no solo. Isto está de acordo com o observado em alguns trabalhos, fato observado, porém, na camada superficial (Marcolan; Anghinoni, 2006; Lanzasova et al., 2007).

Em 2008, os sistemas de produção com integração lavoura-pecuária, mostraram menores valores de microporosidade, em ambas as camadas estudadas, em relação ao observado em 2005. Não houve diferença entre as médias dos valores de microporosidade dos sistemas de produção com integração lavoura-pecuária (0-2 cm: 0,374 m³/m³ a 0,380 m³/m³ e 10-15 cm: 0,376 m³/m³ a 0,387 m³/m³) e nem o da floresta subtropical (0-2 cm: 0,423 m³/m³ e 10-15 cm: 0,400 m³/m³). Spera et al. (2004), não observaram diferenças de microporosidade, em ambas as camadas estudadas, entre sistemas de produção com integração lavoura-pecuária envolvendo somente produção de grãos e sistemas de produção com integração lavoura-pecuária. Entretanto, Stone e Silveira (2001) observaram que as rotações soja/trigo e soja/trigo/soja/feijão/arroz/feijão manifestaram, na camada de 0-10 cm, microporosidade mais elevada do que as rotações milho e feijão, milho e feijão, arroz e feijão e; arroz consorciado com calopogônio e feijão.

Não foram constatadas, no presente estudo, diferenças na microporosidade das diferentes camadas de solo em sistemas de produção com integração lavoura-pecuária e floresta subtropical, embora isto possa não ser atribuído a um mesmo processo. Costa et al. (2003) e Spera et al. (2004), avaliando sistemas de manejo de solo que incluíam rotação de culturas e sistemas de produção com integração lavoura-pecuária, não encontraram diferenças dos valores de microporosidade, entre os tratamentos, em camadas comparáveis entre si quanto à profundidade, embora as camadas tenham sido submetidas a diferentes efeitos mecânicos. Provavelmente, há uma condição limite na formação de microporos detectáveis.

Neste estudo e bem como no de Spera et al. (2004), também, com sistemas de produção com culturas anuais e com pastagens perenes, não houve diferença entre os valores de microporosidade, evidenciando que, em sistemas de produção com integração lavoura-pecuária, o pisoteio animal, em lotação adequada, não promove alterações adicionais ao atributo microporosidade do solo, além daquelas advindas ao trânsito de máquinas.

Na camada superficial, os valores de macroporosidade, em 2008, na maioria dos sistemas, foram maiores do que o observado em 2005, enquanto que, na camada mais profunda constatou-se o inverso. O aumento dos macroporos torna os sistemas de produção com integração lavoura-pecuária mais importantes do ponto de vista de manejo conservacionista do solo. De acordo com Andreola et al. (2000), o aumento dos volumes de macroporos melhora a aeração e a infiltração de água no solo. Por outro lado, entretanto, não houve diferença na macroporosidade total entre os sistemas de produção com integração lavoura-pecuária, em ambas as camadas estudadas (0-2 cm: 0,150 m³/m³ a 0,159 mm³/m³ e 10-15 cm: 0,066 m³/m³ a 0,074 m³/m³). Porém, o solo da floresta subtropical, na camada de 10 cm a 15 cm (0,100 m³/m³) mostrou maiores valores de macroporosidade, em relação aos sistemas de produção com integração lavoura-pecuária. Segundo Passioura (2002), os macroporos estão relacionados com pro-

cessos vitais para as plantas, devendo o ambiente edáfico ser preservado ou recuperado. Albuquerque et al. (1995) e Andreola et al. (2000) estudando atributos físicos do solo de rotações de culturas, não encontraram diferenças nos valores de macroporosidade entre os sistemas de produção estudados. Stone e Silveira (2001), observaram que os sistemas arroz consorciado com calopogônio e milho e feijão, arroz e feijão mostraram maior macroporosidade, na camada de 0 cm a 10 cm, do que os sistemas que incluíram soja e trigo.

A macroporosidade, na camada superficial, foi maior na maioria dos sistemas de produção integração lavoura-pecuária, em comparação à camada de 10 cm a 15 cm. Os resultados da macroporosidade foram similares ao da porosidade total. Assim, na maioria dos sistemas de produção com integração lavoura-pecuária, os maiores volumes de macroporos nas camadas superficiais, refletem a influência da matéria orgânica na estruturação de solos (Bronick; Lal, 2005). A densidade do solo foi sempre menor na camada superficial e, em consequência, a porosidade total e a macroporosidade foram maiores, já que esses atributos são inversamente proporcionais e dependentes entre si.

No presente estudo, o pastejo foi efetuado apenas uma ou duas vezes, no inverno, com duração de no máximo dois dias em cada pastejo com carga de dez a quinze animais. Além disso, após a retirada dos animais da área, manteve-se um intervalo de 40 a 60 dias, de modo a permitir rebrotas das forrageiras de inverno antes do estabelecimento das culturas de verão. A integração entre lavouras e pecuária, se inadequadamente manejada, pode favorecer intensificação do processo de degradação física do solo, comumente observada em sistema plantio direto, e principalmente, compactação do solo.

Conclusões

Física do solo em sistemas de produção de grãos com integração lavoura + pecuária, sob sistema plantio direto, em Passo Fundo, RS

Em geral, os sistemas de produção componentes da integração lavoura-pecuária não interferem nos atributos químicos e físicos do solo.

Não há indícios que o pisoteio animal pelos bovinos tenha agravado a compactação do solo. As pastagens anuais de inverno não favorecem a redução da compactação.

Física do solo em sistemas de produção de grãos com integração lavoura + pecuária, sob sistema plantio direto, em Coxilha, RS

A densidade de solo e a resistência à penetração é maior na camada 10-15 cm do que na camada 0-5 cm, nos sistemas I (trigo/soja e pastagem de aveia preta + ervilhaca/milho) e II (trigo/soja, pastagem de aveia preta + ervilhaca + azevém/milho e aveia branca/soja) e na floresta subtropical.

A floresta subtropical apresenta densidade de solo e resistência à penetração menor do que a maioria dos sistemas de produção estudados, nas camadas 0-5 cm e 10-15 cm, em consequência para porosidade total e macroporosidade, ocorreu o inverso.

A porosidade total e a microporosidade diminuem da camada superficial para a camada mais profunda na floresta subtropical, enquanto que, para o sistema II, isso é observado para porosidade total e para macroporosidade.

No sistema II, há redução dos macroporos e aumento da densidade e da resistência à penetração de solo, da camada 0-5 cm para a camada de 10-15 cm, devido maior intensidade das atividades agrícolas.

Física do solo em sistemas de produção de grãos com integração lavoura + pecuária, com culturas de cobertura do solo e de duplo propósito, sob sistema plantio direto, em Coxilha, RS

A densidade de solo, em todos os sistemas de produção integração lavoura-pecuária, é maior na camada de 10 cm a 15 cm do que na camada superficial, indicando que o pisoteio animal não intensifica a compactação da camada superficial.

Na maioria dos sistemas de produção integração lavoura-pecuária avaliados, há redução dos macroporos e aumento da densidade, na camada de 10 cm a 15 cm, em relação à camada de 0 cm a 2 cm, não podendo, portanto, associar a compactação do solo somente ao pisoteio dos animais, mas o efeito residual das operações anteriores de aração e gradagem do solo.

Na camada superficial, não há diferença nos atributos físicos do solo entre os sistemas de produção integração lavoura-pecuária e nem destes para a floresta subtropical.

Tecnologias desenvolvidas

A integração lavoura-pecuária permitiu a intensificação e aumento da eficiência do uso da terra, proporcionando maiores rendimentos de grãos, em menos tempo e em menor área, facilitando a transição de pastagem nativa pastejada para sistemas de produção com integração da lavoura com a pecuária, sob sistema plantio direto, preservando melhor a qualidade física do solo.

Referências

- ALBUQUERQUE, J. A.; REINERT, D. J.; FIORIN, J. E.; RUEDELL, J.; PETRERE, C.; FONTINELLI, F. Rotação de culturas e sistemas de manejo do solo: efeito sobre a forma da estrutura do solo ao final de sete anos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 19, n. 1, p. 115-119, 1995.
- ALBUQUERQUE, J. A.; SANGOI, L.; ENDER, M. Efeitos da integração lavoura-pecuária nas propriedades físicas do solo e características da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 3, p. 717-723, 2001.
- ANDREOLA, F.; COSTA, L. M.; OLSZEWSKI, N. Influência da cobertura vegetal de inverno e da adubação orgânica e, ou, mineral sobre as propriedades físicas de uma Terra Roxa Estruturada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 4, p. 857-865, 2000.
- ANJOS, J. T.; UBERTI, A. A. A.; VIZZOTTO, V. J.; LEITE, G. B.; KRIEGER, M. Propriedades físicas em solos sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 18, n. 1, p. 139-145, 1994.
- ARGENTON, J. **Propriedades físicas do solo em dois sistemas de cultivo com plantas de cobertura de verão intercalares à cultura do milho**. 2000. 97 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages.
- BOUMA, J. Influence of soil macroporosity on environmental quality. **Advances in Agronomy**, v. 46, p. 1-37, 1991.
- BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, v. 124, n. 1, p. 3-22, 2005.

COSTA, F. S.; ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; FOUTOURA, S. M. V.; WOBETO, C. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, v. 27, n. 3, p. 527-535, 2003.

CUNHA, J. P. A. R.; CASCAÃO, V. N.; REIS, E. F. Compactação causada pelo tráfego de trator em diferentes manejos de solo. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 31, n. 3, p. 371-376, 2009.

DA ROS, C. O.; SECCO, D.; FIORIN, J. E.; PETRERE, C.; CADORE, M. A.; PASA, L. Manejo do solo a partir de campo nativo: efeito sobre a forma e estabilidade da estrutura ao final de cinco anos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, n. 2, p. 241-247, 1997.

DERPSCH, R.; ROTH, C. H.; SIDIRAS, N.; KOPRE, U. Importância da rotação de culturas. In: DERPSCH, R.; ROTH, C. H.; SIDIRAS, N.; KOPRE, U. **Controle da erosão no Paraná**, BRASIL: sistemas de cobertura do solo, plantio direto e preparo conservacionista do solo. Eschborn: GTZ; IAPAR, 1991. p. 147-164.

DREWRY, J. J.; CAMERON, K. C.; BUCHAN, G. D. Pasture yield and soil physical property responses to soil compaction from treading and grazing – a review. **Australian Journal of Soil Research**, v. 46, n. 3, p. 237-256, 2008.

KLEIN, V. A.; CÂMARA, R. K. Rendimento de soja e intervalo hídrico ótimo em latossolo vermelho sob plantio direto escarificado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 2, p. 221-227, 2007.

KOCHHANN, R. A.; DENARDIN, J. E.; FAGANELLO, A. **É necessária a descontinuidade do sistema plantio direto após dez anos de adoção?** Passo Fundo: Embrapa-CNPT, 1999. 10 p. htm. (Embrapa-CNPT. Comunicado técnico online, 43.). Disponível em: <http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/p_co43.htm>. Acesso em: 5 jun. 2018.

LANZANOVA, M. E.; NICOLOSO, R. S.; LOVATO, T.; ELTZ, F. L. F.; AMADO, T. J. C.; REINERT, D. J. Atributos físicos do solo em sistema integração lavoura-pecuária sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 5, p. 1131-1140, 2007.

MACEDO, M. C. M. Integração lavoura e pecuária: alternativa para sustentabilidade da produção animal. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DA PASTAGEM, 18., 2001, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: FEALQ, 2001. p. 257-283.

MARCOLAN, A. L.; ANGHINONI, I. Atributos físicos de um argissolo e rendimento de culturas de acordo com o desenvolvimento do solo em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 1, p. 163-170, 2006.

PASSIOURA, J. B. Soil conditions and plant growth. **Plant Cell & Environment**, v. 25, n. 2, p. 311-318, 2002.

REEVES, D. W. Soil management under no-tillage: soil physical aspects. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DO SISTEMA PLANTIO DIRETO, 1., 1995, Passo Fundo. **Resumos...** Passo Fundo: EMBRAPA-CNPT, 1995. p. 127-130.

SÁ, J. C. de M. A intimidade do processo. Por que não lavrar nem gradear o solo? **Revista Plantio Direto**, n. 60, p. 20-21, 2000.

SANTOS, H. P. dos; FONTANELI, Ren. S.; SPERA, S. T.; FONTANELI, Rob. S.; TOMM, G. O. Atributos químicos e físicos de solo sob pastagens perenes de verão, **Bragantia**, v. 68, n. 4, p. 1037-1046, 2009a.

SANTOS, H. P. dos; FONTANELI, R. S.; SPERA, S. T.; MALDANER, G. L. Rendimento de grãos e algumas características agronômicas de soja, em sistemas de produção integração Lavoura-pecuária (ILP), sob plantio direto. In: SOJA: resultados de pesquisa 2008-2009. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2009b. p. 120-136. (Embrapa Trigo. Documentos, 93).

SANTOS, H. P. dos; FONTANELI, R. S.; SPERA, S. T.; TOMM, G. O. AMBROSI, I. **Sistemas de produção de grãos com pastagens anuais de inverno e de verão, sob plantio direto**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2006a. 128 p. (Embrapa Trigo. Documentos, 69).

SANTOS, H. P. dos; FONTANELI, R. S.; TOMM, G. O.; DENARDIN, J. E. Atributos físicos e químicos de solo em sistemas de produção de grãos envolvendo pastagens anuais sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v. 12, n. 1/2, p. 73-81, 2006b.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Densidade do solo, atributos químicos e sistema radicular do milho afetado pelo pastejo e manejo de solo. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, v. 24, n. 1, p. 191-199, 2000.

SILVEIRA, P. M.; STONE, L. F. Teores de nutrientes e de matéria orgânica afetados pela rotação de culturas e sistemas de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 2, p. 387-394, 2001.

SPERA, S. T.; SANTOS, H. P. dos; FONTANELI, R. S.; TOMM, G. O. Efeito de pastagens de inverno e de verão em características físicas do solo, sob plantio direto. **Ciência Rural**, v. 36, n. 4, p. 1193-1200, 2006.

SPERA, S. T.; SANTOS, H. P. dos; TOMM, G. O.; FONTANELI, R. S. Avaliação de alguns atributos físicos de solo em sistemas de produção de grãos, envolvendo pastagens sob plantio direto. **Revista Científica Rural**, v. 9, n. 1, p. 23-31, 2004.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, v. 25, n. 2, p. 395-401, 2001.

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

TREIN, C. R.; COGO, N. P.; LEVIEN, R. Métodos de preparo do solo na cultura do milho e ressemeadura do trevo, na rotação aveia + trevo/milho, após pastejo intensivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 15, n. 1, p. 105-111, 1991.