

ANÁLISE TÉCNICA DE FONTES DE NUTRIENTES ASSOCIADAS A SISTEMAS DE PREPARO DO SOLO⁽¹⁾

Carla Maria Pandolfo⁽²⁾, Carlos Alberto Ceretta⁽³⁾, Milton da Veiga⁽²⁾ & Angelo Mendes Massignam⁽²⁾

RESUMO

Os dejetos têm sido utilizados como fontes orgânicas de nutrientes em diferentes condições edafoclimáticas, culturas e sistemas de preparo do solo. Os efeitos de seu uso continuado são mais bem avaliados pela integração de diferentes atributos de solo e de planta. O objetivo deste trabalho foi comparar as fontes de nutrientes, com ênfase nas orgânicas, utilizando-se alguns atributos de solo e de planta, por meio de um modelo proposto para análise do aspecto técnico destas. Para realizar este estudo, foi utilizado um experimento conduzido por 10 anos na Estação Experimental da Epagri de Campos Novos/SC, em um Nitossolo Vermelho. Os tratamentos consistiram da combinação de cinco sistemas de preparo do solo (plantio direto; preparo reduzido; preparo convencional; preparo convencional com resíduos queimados; e preparo convencional com resíduos retirados) com quatro fontes de nutrientes (adubação mineral de acordo com a recomendação para cada cultura - AM; 5 t ha⁻¹ ano⁻¹ de matéria úmida de cama de aviário - CA; 60 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ de dejetos líquidos de bovinos - DLB; e 40 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ de dejetos líquidos de suínos - DLS) e testemunha, sem aplicação de nutrientes - TES. Na avaliação do uso das fontes de nutrientes, utilizou-se um modelo cujas entradas foram atributos de solo e de planta transformados, os quais se constituíram em índices respectivos. As saídas deste modelo foram, para cada fonte de nutrientes dentro de cada sistema de manejo do solo, figuras triangulares, e a área destas com seu respectivo intervalo de confiança ($p < 0,10$). As fontes de nutrientes não se diferenciaram quando índices de planta e químicos e físicos do solo foram analisados conjuntamente, porém a cama de aviário apresentou melhor desempenho quando avaliada pelo índice químico do solo ou pelo índice de planta. O desempenho técnico das fontes de nutrientes e o índice físico do solo, em particular, dependem do sistema de preparo

⁽¹⁾ Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor. Recebido para publicação em maio de 2007 e aprovado em outubro de 2007.

⁽²⁾ Pesquisador da Estação Experimental da Epagri de Campos Novos. BR 282, km 342, Caixa Postal 116, CEP 89620-000 Campos Novos (SC). E-mail: pandolfo@epagri-sc.gov.br

⁽³⁾ Professor do Departamento de Solos, Centro de Ciências Rurais Universidade Federal de Santa Maria – UFSM. CEP 97105-900 Santa Maria (RS). Email: ceretta@ccr.ufsm.br

do solo, sendo o plantio direto o preparo com melhor resposta aos índices avaliados, e o preparo convencional com palha retirada, o pior. O modelo utilizado na análise do aspecto técnico foi uma ferramenta eficiente na avaliação mais abrangente do uso das fontes orgânicas de nutrientes.

Termos de indexação: dejetos, adubação, modelo de análise, índices de solo.

SUMMARY: *NUTRIENT SOURCES ASSOCIATED WITH SOIL TILLAGE SYSTEMS: TECHNICAL ASPECTS*

Manure has been used as organic nutrient sources in different soil, climate, crop, and soil management systems. The effects of the continuous use of these systems is best evaluated by integrated analysis, based on different soil and crop attributes. This study was carried out to compare nutrient sources, mainly the organic ones, based on some chemical and physical soil attributes as well as crop attributes. The study was carried out at an experimental station of Epagri in Campos Novos, on a Typic Hapludox, in a long-term experiment. The treatments were a combination of five tillage systems (no-till, chisel plow, conventional tillage, conventional tillage with burned crop residues, and conventional tillage with crop residues removal) with five nutrient sources (TES = control, without fertilizer; AM = mineral fertilizer according with technical recommendation for each crop; CA = 5 Mg ha⁻¹ year⁻¹ of moist poultry litter; DLB = 60 m³ ha⁻¹ year⁻¹ of liquid cattle manure; and, DLS = 40 m³ ha⁻¹ year⁻¹ of liquid pig manure). A model was established to evaluate the nutrient sources use. The model was fed data of soil and crop attributes, that were transformed into the respective indexes. A model was used to quantify and analyze the effect of nutrient sources on technical aspects of each soil management type. The outputs were triangular pictures and their areas, with the respective confidence limits (p < 0.10). The nutrient sources did not differ when the plant, chemical and physical indexes were considered together, whereas results of poultry litter were best when evaluated by the chemical or the plant index. The technical behavior of the nutrient sources and the physical index in particular were related to soil tillage. Among the evaluated tillage systems, no-till performed best and the conventional system with straw removal worst. The model used to analyze the technical aspects was an efficient tool for a more comprehensive evaluation of the use of organic nutrient sources.

Index terms: manure, fertilization, analysis model, soil indexes.

INTRODUÇÃO

Os efeitos do uso de dejetos no solo, na planta e no ambiente, são variáveis e dependem da composição química e física dos dejetos, da dose aplicada, do modo de aplicação, da época, da frequência e do tempo de aplicação. Pesquisas têm indicado que o uso dos dejetos como fonte de nutrientes tem efeito significativo nas propriedades químicas, físicas e biológicas do solo, sendo alguns deles atribuídos ao aporte continuado de material orgânico (Sommerfeldt & Chang, 1985; Kanchikerimath & Singh, 2001), resultando no aumento da produtividade do solo (Muchovej & Obreza, 1996) e das culturas (Scherer et al., 1984; Choudhary et al., 1996) e, também, por serem fontes dos principais macronutrientes essenciais às plantas, como N, P, K, Ca, Mg e S, bem como de alguns micronutrientes. Também podem aumentar o conteúdo de C e N no solo, a atividade microbiana no solo e a qualidade dos grãos (Nyakatawa et al., 2001). Com relação às

propriedades físicas, Weil & Kroontje (1979), em revisão de literatura, afirmam que o efeito dos dejetos sobre elas é variável em função do tipo de dejetos, da dose aplicada e do modo de aplicação. Entre os efeitos benéficos relatados pelo uso de dejetos, em geral, estão o decréscimo da densidade do solo, o aumento do tamanho e da estabilidade dos agregados em água, o decréscimo do encrostamento superficial, o aumento da condutividade hidráulica e a melhoria na capacidade de retenção de água.

O tipo de preparo do solo condiciona o grau de incorporação dos resíduos vegetais, a degradação da matéria orgânica (Etana et al., 1999), e pode afetar a eficiência das fontes orgânicas e minerais de nutrientes. Assim, para atingir bons níveis de produtividade, é importante tanto a capacidade de um solo em contribuir para essa produção quanto a disponibilidade de outras entradas no sistema, como a adição de fertilizantes e o uso de práticas de melhoria e conservação do solo (Popp et al., 2002). O tipo de

manejo do solo conduz à degradação ou à recuperação de sua estrutura, pois os fatores químicos, físicos e biológicos estão continuamente interagindo (Silva & Mielniczuk, 1997). Os sistemas de preparo, por sua vez, afetam as características químicas, físicas e biológicas do solo e, conseqüentemente, os processos de erosão, disponibilidade de nutrientes, estruturação do solo, etc. A intensidade de revolvimento do solo ou a manutenção ou não dos resíduos de colheita na lavoura pode interferir na mineralização da fonte orgânica aplicada e nas perdas de nutrientes. Por outro lado, sistemas de preparo que resultam na degradação do solo podem ter os efeitos negativos minimizados com a aplicação de fontes orgânicas de nutrientes (Veiga et al., 1998).

Neste trabalho, denominou-se aspecto técnico a análise conjunta dos atributos de solo e de planta após o uso prolongado de dejetos como fonte de nutrientes às plantas. Essa análise mais ampla dos dados pode ser feita por meio de modelos, e isso permite melhor embasamento na tomada de decisão sobre o uso de fontes orgânicas de nutrientes, permitindo, inclusive, melhor entendimento da relação das fontes com os sistemas de manejo do solo. A vantagem dessa análise é o fato de se aproximar mais da realidade, porque a decisão de uso de qualquer insumo ou técnica é, na prática, tomada a partir de uma série de informações disponíveis, e não apenas considerando algum aspecto pontual.

As fontes de nutrientes apresentam desempenhos diferenciados, os quais podem ser influenciados pelos sistemas de preparo do solo (Scherer & Nesi, 2007), cuja avaliação pode ser feita por meio de um modelo que integre atributos de solo e planta. O objetivo deste trabalho foi comparar fontes de nutrientes, com ênfase nas orgânicas, associadas a sistemas de preparo do solo, após longo tempo de uso, por meio de índices de planta e de solo, propondo um modelo para análise do aspecto técnico, visando oferecer subsídios mais abrangentes para tomada de decisão sobre o uso de fontes de nutrientes para as plantas.

MATERIAL E MÉTODOS

Utilizou-se para as avaliações um experimento conduzido por um período de 10 anos na Estação Experimental da Epagri de Campos Novos, no município de Campos Novos, no Planalto Sul Catarinense (27 ° 24 ' S, 51 ° 13 ' O e 970 m de altitude), em um Nitossolo Vermelho (Embrapa, 1999). O delineamento foi em faixas com três repetições, com uma combinação de cinco sistemas de preparo do solo e quatro fontes de nutrientes mais uma testemunha, perfazendo 25 tratamentos. Os sistemas de preparo do solo foram aplicados em faixas transversais ao declive do terreno (aproximadamente 5 %), e as fontes de nutrientes, em faixas transversais aos sistemas de preparo, ambas com 6 m de largura e 30 m de

comprimento (subparcelas de 6 x 6 m). Os sistemas de preparo do solo foram: plantio direto (PD); preparo reduzido com uma escarificação mais uma gradagem (PRE); preparo convencional com uma aração e duas gradagens (PCO); preparo convencional com palha queimada (PCQ); e preparo convencional com palha retirada (PCR). A palha foi queimada ou retirada tanto para as plantas de cobertura de inverno como para as culturas comerciais. Os tratamentos de preparo do solo foram aplicados apenas antes da implantação das culturas comerciais. Foram aplicadas quatro fontes de nutrientes: 5 t ha⁻¹ ano⁻¹ de cama de aviário (CA), em base úmida; 40 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ de dejetos líquidos de suínos (DLS); 60 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ de dejetos líquidos de bovinos confinados (DLB); adubação mineral de reposição (AM); e uma testemunha, sem aplicação de nutrientes (TES). As fontes orgânicas e minerais foram aplicadas antes da última gradagem, quando era o caso, ou sobre a superfície do solo no PD, por ocasião da semeadura das culturas comerciais. Na adubação mineral foi utilizada a recomendação de adubação de reposição (CQFSRS/SC, 1995), usando-se uréia, superfosfato triplo e cloreto de potássio como fontes dos elementos. As fontes orgânicas de nutrientes foram adquiridas na região. O total de N, P₂O₅ e K₂O aplicados nos nove anos foi, respectivamente, de 1.106, 847 e 882 kg ha⁻¹ com esterco de aves; 732, 531 e 1.019 kg ha⁻¹ com dejetos líquidos de bovinos; 1.000, 1.507 e 526 kg ha⁻¹ com dejetos líquidos de suínos; e 675, 450 e 690 kg ha⁻¹ com adubo mineral. Implantou-se uma rotação de culturas com ciclos de três anos, sendo cultivados no primeiro ciclo triticale/soja/ervilhaca comum/milho/aveia-preta/feijão. A partir do segundo ciclo o triticale foi substituído por centeio. Foram utilizados cultivares recomendados para a região, e o controle de plantas invasoras foi efetuado apenas nas culturas comerciais, pela aplicação de herbicidas pós-emergentes específicos para cada cultura.

Avaliações

As avaliações das culturas comerciais constaram do rendimento de grãos, utilizando-se como área útil 16,8 m² para o milho e 4,5 m² para soja e feijão, com valores corrigidos para 13 % de umidade. A matéria seca das plantas de cobertura (MS) foi determinada antes do manejo químico destas (dessecação), em uma área de 0,25 m², sendo o material coletado seco em estufa a 60 °C até massa constante. O comprimento (CR) e a distribuição de raízes (DR) foram avaliados em amostras coletadas por ocasião do florescimento do milho, no décimo ano de condução do experimento, em um ponto por parcela, situado na entrelinha a 10 cm de uma planta, nas camadas de 0–10, 10–20, 20–30 e 30–40 cm, utilizando-se um trado tipo caneco com 7,5 cm de diâmetro. A determinação do CR foi efetuada com o uso do programa "Rootedge", descrito por Kaspar & Ewing (1997), em imagens adquiridas por meio de scanner, as quais foram processadas previamente com o programa SPRING (Câmara Neto et al., 1996).

As análises químicas foram realizadas em amostras de solo coletadas no final do nono ano do experimento; nesse estudo utilizou-se a média ponderada das camadas de 0–10 cm para o PD ou 0–20 cm para os demais sistemas de preparo. Como atributos químicos, foram utilizados o pH em água (pH), fósforo disponível (P), potássio disponível (K), matéria orgânica (MO), alumínio trocável (Al^{3+}), cálcio trocável (Ca^{2+}) e magnésio trocável (Mg^{2+}), determinados conforme Tedesco et al. (1995). Os atributos físicos avaliados foram a densidade do solo (ds) e a macroporosidade (*mac*), determinados na camada de 12,5–17,5 cm, conforme Embrapa (1997); o conteúdo de água disponível (CAD), de 0–40 cm; e o índice de estabilidade de agregados em água (IEA), determinado de 0–5 cm. Este último corresponde à relação DMGea/DMGsa, sendo DMGea o diâmetro médio geométrico dos agregados estáveis em água (Kemper & Chepil, 1965) e DMGsa o diâmetro médio geométrico dos agregados secos ao ar, ambos determinados utilizando-se agregados menores que 8 mm de diâmetro. O CAD foi determinado em amostras com estrutura preservada coletadas nas camadas de 0–5, 5–10, 12,5–17,5 e 27,5–32,5 cm, representando, respectivamente, as camadas de 0–5, 5–10, 10–20 e 20–40 cm, e corresponde à diferença de umidade volumétrica entre 10 e 1.500 kPa de tensão, ambas transformadas em lâmina (mm) para cada camada, as quais foram somadas para determinar a lâmina na camada de 0–40 cm.

Índices

Na avaliação do aspecto técnico do uso das fontes de nutrientes foram utilizados três índices: índice de plantas (IP), índice químico do solo (IQS) e índice físico do solo (IFS). Os atributos de solo e de planta foram transformados por relativizações por meio de equações (*v*) e, ou, relativizados pelo máximo (*r*). Para compor os índices, foram conferidos pesos aos atributos, conforme a participação inferida para estes.

O IP foi composto pelos atributos produção acumulada de MS das plantas de cobertura durante os nove anos e comprimento e distribuição de raízes da cultura do milho, sendo calculado pela seguinte equação:

$$IP = 0,70 MS_r + 0,20 DR_v + 0,10 CR_v \quad (1)$$

Para a produção de MS das plantas de cobertura, atribuiu-se peso de 70 % e, para o conjunto dos atributos de raízes, de 30 % (20 % para a DR e 10 % para o CR), já que estes foram determinados apenas para o milho cultivado no décimo ano de experimentação.

A relativização da produção de MS das plantas de cobertura foi calculada pela maior produção acumulada em uma parcela nos nove anos avaliados, sendo atribuído o valor 1. A relativização do comprimento de raízes (CR_v) foi realizada por meio do comprimento total de raízes da parcela (soma das camadas), em relação ao valor máximo de comprimento obtido em

uma parcela. Na relativização da distribuição de raízes (DR_v), assumiu-se o valor de 1 para uma distribuição de raízes equitativa de 25 % para cada uma das quatro camadas amostradas, calculada pela seguinte equação:

$$DR_v = 1 - \left(\sum_4^{i=1} (| Ri - 25 |) \right) / 150 \quad (2)$$

em que *i* corresponde à camada amostrada e *Ri* à fração do comprimento de raízes na camada *i*, em relação ao total obtido na camada de 0–40 cm, em %. A distribuição equitativa das raízes nas camadas foi atribuída para atender, ao mesmo tempo, à função de absorção de nutrientes das raízes nas camadas superficiais e à absorção de água nas camadas inferiores do perfil. Assim, quanto maior o índice de distribuição de raízes (1 ou próximo a esse valor), mais equitativa é a distribuição em relação aos 25 % esperados para cada camada.

O IQS foi composto pelos atributos pH_v , MO_v , P_v e K_v , saturação por Al^{3+} (m_v) e ($Ca^{2+} + Mg^{2+}$), na camada de solo de 0–20 cm para os sistemas de preparo PRE, PCO, PCQ e PCR e de 0–10 cm para o PD. Os atributos químicos foram relativizados por meio de equações elaboradas considerando as expectativas de resposta da planta, nas faixas de interpretação dos atributos para fins de adubação e calagem. Utilizaram-se como referência as expectativas de produtividade das plantas nas faixas de interpretação para P e K como: até 40 % para muito baixo; entre 40 e 75 % para baixo; de 75 a 90 % para médio e; maior que 90 % para alto (CQFS/NRS, 2004). A relativização dos teores de P e K do solo foi feita por meio do uso das classes de P e de sua interpretação na classe 1 de argila e as classes de K para um solo com CTC média, condições nas quais se enquadrava o solo (CQFS/NRS, 2004).

As equações para as relativizações dos dados de pH, P, K, MO, *m* e Ca + Mg trocáveis foram:

$$(pH_v) \quad y_{PD} = 0,0002 + \frac{1,0002}{1 + e^{-\left(\frac{x-4,3917}{0,2697}\right)}} \quad (3)$$

$$(P_v) \quad y_{PC} = -0,0050 + \frac{1,0058}{1 + e^{-\left(\frac{x-4,6340}{0,3431}\right)}} \quad (4)$$

$$(K_v) \quad y = -2,6426 + \frac{3,6427}{1 + e^{-\left(\frac{x+1,3109}{2,0388}\right)}} \quad (5)$$

$$(K_v) \quad y = -0,8728 + \frac{1,8729}{1 + e^{-\left(\frac{x-6,3382}{18,1471}\right)}} \quad (5)$$

$$(MO_v) \quad y = -9,7944 + \frac{10,8077}{1 + e^{-\left(\frac{x+4,0268}{1,775}\right)}} \quad (6)$$

$$(m_v) \quad y = -0,2005 + \frac{1,23}{1 + e^{-\left(\frac{x-29,5777}{-7,6593}\right)}} \quad (7)$$

$$(Ca + Mg)_v \quad y = -0,0981 + \frac{1,0988}{1 + e^{-\left(\frac{x-2,3317}{1,0401}\right)}} \quad (8)$$

em que y corresponde ao dado relativizado (expectativa de produtividade) e x ao dado do atributo determinado ao final do nono ano.

Quanto à composição do IQS, foram assumidos pesos de 25 % para cada um dos atributos P_v , K_v e MO_v , pois recomendam adubação específica. Entretanto, para o pH_v , saturação por alumínio (m_v) e $(Ca^{2+} + Mg^{2+})_v$, atribuiu-se um peso de 25 % para a média dos três, pois estes atributos estão associados à prática da calagem. O IQS está representado na equação a seguir:

$$IQS = 0,25P_v + 0,25K_v + 0,25MO_v + 0,25 [pH_v + m_v + (Ca^{2+} + Mg^{2+})_v]/3 \quad (9)$$

O IFS foi composto pelos atributos ligados à estrutura do solo (ds e mac), pelo CAD e por um atributo dinâmico (IEA), sendo todos relativizados. Foi escolhida a camada de 12,5–17,5 cm para os atributos ligados à estrutura, por ser a camada diagnóstica para os sistemas de preparo, e a de 0–5 cm para o IEA, porque é a que sofre o impacto da gota da chuva, sendo, portanto, importante para diagnosticar a suscetibilidade do solo à erosão. Para o CAD foi escolhida a camada de 0–40 cm, onde está concentrada a maior parte do sistema radicular das culturas (Merten & Mielniczuck, 1991; Rosolen et al., 1992). O IFS foi calculado pela equação:

$$IFS = 0,4 IEA_r + 0,2 mac_v + 0,2 ds_v + 0,2 CAD_r \quad (10)$$

A relativização da mac (mac_v) se baseou nos resultados obtidos por Baver & Farnsworth (1940), que correlacionaram a porosidade de aeração com a produção de beterraba-açucareira. Com base nos resultados deste estudo, obteve-se uma curva sigmóide, com quatro coeficientes (equação 11). No caso da ds_v , considerou-se que os valores de densidade se situam entre 1,1 e 1,2 $kg\ dm^{-3}$ quando o solo argiloso atinge aproximadamente 10 % de mac e que valores menores e maiores dessa variável resultam em redução do potencial do solo, respectivamente, pela redução da macroporosidade para valores restritivos ao fluxo de água e ar ou aumento excessivo da drenagem interna. Para essa relação, obteve-se a seguinte equação de Gaussian, com quatro coeficientes (equação 12):

$$y = -0,0693 + \frac{1,05}{1 + e^{-\left(\frac{x-5,1587}{2,4766}\right)}} \quad (11)$$

$$y = -368,968 + 369,9679e^{\left[-0,5\left(\frac{x-1,078}{8,2831}\right)^2\right]} \quad (12)$$

em que y corresponde à relativização da mac ou ds (expectativa de rendimento) e x à mac (11) e ds do solo (12), ao final do nono ano.

A relativização (CAD_r) foi feita considerando-se que há maior benefício para a cultura quanto maior for o valor do CAD, e os resultados foram relativizados pelo maior teor encontrado em uma parcela. Os IEA foram relativizados (IEA_r) para o valor máximo obtido em uma parcela. Esse procedimento foi adotado porque o índice de estabilidade é dependente do método utilizado, cujos valores dependem, principalmente, da velocidade de umedecimento das amostras e da intensidade de agitação (Veiga et al., 2004).

Modelo para análise das fontes de nutrientes

O estudo do aspecto técnico do uso das fontes de nutrientes envolveu um modelo de análise com geração de triângulos e cálculo das suas áreas e dos intervalos de confiança dessas áreas (Figura 1). A média e o intervalo de confiança também foram determinados para os três índices usados na figura, os quais se constituíram nos seus raios, fazendo-se uso de atributos transformados para que estes apresentassem valores entre zero e um, sempre se levando em conta que o valor 1,0 corresponde ao potencial máximo (desejável) e valores inferiores compreendem, proporcionalmente, uma redução desse potencial em relação ao máximo. Considerou-se que, quanto maior for o triângulo em relação ao tamanho máximo possível, melhor é o desempenho técnico do uso daquela fonte de nutrientes.

Os vértices dos triângulos correspondem aos valores de cada índice, plotados no raio correspondente. A área do triângulo externo correspondeu à soma das áreas de três triângulos internos, cujos lados correspondem ao comprimento dos dois raios adjacentes, e a área foi calculada da fórmula $A = E1 \times E2 \times (\sin \alpha/2)$, sendo $\alpha = 120^\circ$ (Figura 1).

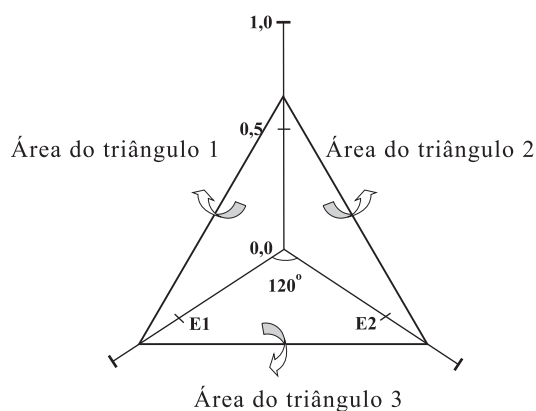


Figura 1. Representação esquemática dos três triângulos internos utilizados no cálculo da área total do triângulo elaborado para cada fonte de nutrientes, dentro de cada sistema de preparo do solo.

No cálculo dos intervalos de confiança da área de cada triângulo foi utilizado o programa @Risk 4.5 para Excel. Os dados de entrada do modelo foram a média, o desvio-padrão, o valor máximo e o valor mínimo dos atributos, para cada tratamento. O programa simulou a área da figura para 1.000 combinações dos valores dos índices e o intervalo de confiança dessa área e dos índices, a 10 % de probabilidade de erro. As áreas ou os índices dos tratamentos foram estatisticamente diferentes quando os intervalos de confiança, na comparação entre dois tratamentos, não se sobrepuseram.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Forma e tamanho dos triângulos

Os sistemas PD e PCR foram os mais contrastantes, motivo pelo qual foram utilizados na Figura 2 para exemplificar a representação gráfica do aspecto técnico. Considerando-se o conceito aplicado ao modelo de análise conjunta de atributos, as fontes de nutrientes e a testemunha apresentaram melhor desempenho no PD em relação ao PCR. A forma e o tamanho do triângulo demonstram que as fontes de nutrientes apresentaram comportamento diferenciado, cuja magnitude variou com o sistema de preparo do solo. No PD, houve menor variabilidade entre os índices, enquanto no PCR a distorção dos triângulos foi ocasionada principalmente pelo IFS, que apresentou os valores mais baixos e limitou o desempenho do aspecto técnico das fontes. Esses resultados podem ser explicados pelas características que identificam o tipo de preparo, como o grau de mobilização do solo, que resulta em maior ou menor incorporação dos resíduos vegetais, ou do preparo específico dos resíduos vegetais, ou seja, se foram removidos ou queimados.

As diferenças entre os sistemas de preparo do solo são ressaltadas por Derpsch et al. (1991), pois estes podem influenciar de modo diferenciado as propriedades químicas, físicas e biológicas do solo e, também, a magnitude da erosão do solo, em função da maior ou menor cobertura do solo remanescente após o preparo. Exemplo disso é o trabalho de Costa et al. (2003), os quais verificaram que o sistema PD promoveu melhoria nas propriedades físicas avaliadas, quando comparado ao sistema PC, com reflexos no aumento da produtividade da soja (42 %) e do milho (22 %). A retirada da palha no PCR representou déficit de aporte de uma das principais fontes de matéria orgânica, a qual é importante na estabilidade estrutural do solo (Oades, 1984).

Aspecto técnico – área dos triângulos

A aplicação de CA por longo tempo determinou maior área do triângulo (aspecto técnico), evidenciando suas vantagens em relação ao uso de DLS, DLB, AM e testemunha (Quadro 1), embora a variação não tenha sido suficiente para diferenciar a CA do DLS,

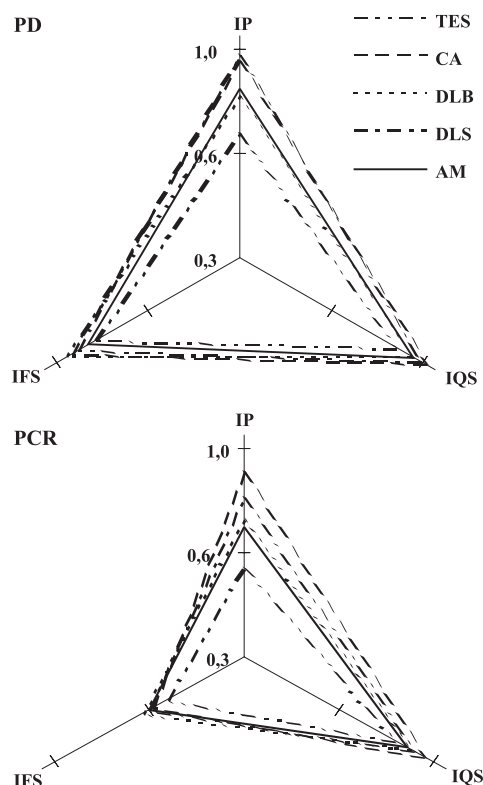


Figura 2. Aspecto técnico do uso de fontes de nutrientes, composto pelo índice de planta (IP), índice químico do solo (IQS) e índice físico do solo (IFS), para os sistemas de preparo do solo plantio direto (PD) e preparo convencional com palha retirada (PCR). Tes: testemunha; CA: cama de aviário; DLB: dejetos líquidos de bovinos; DLS: dejetos líquidos de suínos; e AM: adubo mineral.

bem como entre o DLB e AM, em qualquer dos sistemas de preparo. Algumas das justificativas para as vantagens do uso da CA podem ser o seu baixo teor de umidade (Moore Jr. et al., 1995), alto pH e baixa relação C/N (Araji et al., 2001), além de normalmente apresentar maior concentração de nutrientes.

Excetuando-se a testemunha, somente duas comparações entre os dejetos foram diferentes nos cinco sistemas de preparo, os quais ocorreram no sistema PRE, em que a CA foi maior do que o DLB e o DLB menor que o DLS, mostrando que houve diferenças significativas em poucas comparações entre os dejetos quanto ao aspecto técnico. O desempenho semelhante entre as fontes é respaldado pelos resultados obtidos em outros estudos que comprovam que a aplicação de dejetos ao solo pode substituir a necessidade de fertilizantes comerciais (Scherer & Bartz, 1984; Scherer et al., 1984; Sutton, 1994), apesar de a estratégia de uso associado de fontes orgânicas e minerais ser preferencial. A menor área do triângulo, ou menor desempenho técnico, sempre foi apresentada pela testemunha, e esta foi a que mais vezes se

Quadro 1. Média e limite superior e inferior da área do aspecto técnico, do índice de planta (IP), do índice físico (IFS) e do índice químico do solo (IQS) para as fontes de nutrientes, em cada sistema de preparo do solo

Preparo ⁽¹⁾	Fontes ⁽²⁾	Área			IP			IFS			IQS		
		Média	Inf.	Sup.	Média	Inf.	Sup.	Média	Inf.	Sup.	Média	Inf.	Sup.
PD	TES	0,778	0,677	0,880	0,675	0,599	0,756	0,793	0,670	0,910	0,859	0,827	0,884
	CA	1,087	1,028	1,128	0,903	0,866	0,929	0,875	0,807	0,911	0,968	0,965	0,970
	DLB	0,973	0,909	1,029	0,793	0,760	0,826	0,892	0,812	0,957	0,914	0,908	0,920
	DLS	1,077	1,017	1,133	0,917	0,885	0,944	0,865	0,796	0,925	0,951	0,943	0,957
	AM	0,952	0,868	1,032	0,820	0,743	0,892	0,828	0,760	0,896	0,923	0,892	0,942
PRE	TES	0,761	0,691	0,839	0,736	0,669	0,801	0,698	0,616	0,785	0,867	0,831	0,897
	CA	1,007	0,946	1,062	0,858	0,818	0,898	0,834	0,769	0,888	0,953	0,949	0,956
	DLB	0,867	0,812	0,921	0,781	0,749	0,813	0,786	0,714	0,855	0,885	0,872	0,896
	DLS	1,024	0,975	1,069	0,919	0,884	0,949	0,803	0,754	0,847	0,944	0,929	0,957
	AM	0,919	0,830	1,008	0,854	0,739	0,956	0,771	0,723	0,820	0,901	0,875	0,920
PCO	TES	0,653	0,580	0,733	0,597	0,546	0,654	0,687	0,589	0,794	0,856	0,829	0,880
	CA	0,904	0,810	1,004	0,836	0,748	0,922	0,718	0,621	0,813	0,957	0,949	0,965
	DLB	0,806	0,716	0,902	0,762	0,715	0,808	0,701	0,583	0,819	0,908	0,888	0,925
	DLS	0,933	0,856	1,018	0,840	0,787	0,891	0,768	0,675	0,861	0,939	0,929	0,948
	AM	0,874	0,820	0,934	0,855	0,816	0,894	0,688	0,625	0,756	0,928	0,916	0,939
PCQ	TES	0,620	0,558	0,682	0,635	0,549	0,718	0,565	0,521	0,608	0,893	0,873	0,911
	CA	0,837	0,777	0,897	0,866	0,824	0,907	0,618	0,551	0,684	0,943	0,930	0,953
	DLB	0,724	0,661	0,793	0,801	0,732	0,872	0,567	0,511	0,631	0,890	0,880	0,898
	DLS	0,816	0,754	0,878	0,840	0,784	0,891	0,638	0,581	0,702	0,913	0,886	0,932
	AM	0,769	0,726	0,810	0,806	0,777	0,832	0,606	0,552	0,657	0,913	0,894	0,929
PCR	TES	0,538	0,494	0,584	0,563	0,512	0,617	0,559	0,512	0,607	0,827	0,803	0,850
	CA	0,819	0,753	0,889	0,864	0,809	0,919	0,607	0,538	0,679	0,930	0,913	0,942
	DLB	0,712	0,636	0,789	0,721	0,669	0,773	0,639	0,556	0,726	0,869	0,805	0,914
	DLS	0,747	0,691	0,803	0,786	0,753	0,820	0,616	0,547	0,686	0,886	0,858	0,913
	AM	0,673	0,603	0,737	0,697	0,612	0,781	0,616	0,582	0,648	0,855	0,803	0,894

⁽¹⁾ PD: plantio direto; PRE: preparo reduzido; PCO: preparo convencional; PCQ: preparo convencional com palha queimada; PCR: preparo convencional com palha retirada. ⁽²⁾ TES: testemunha; CA: cama de aviário; DLB: dejetos líquidos de bovinos; DLS: dejetos líquidos de suínos; AM: adubo mineral.

diferenciou das outras fontes, tendo sido inferior ao uso de CA e DLS em todos os sistemas de preparo do solo. A área do DLB somente foi maior que a testemunha nos sistemas de preparo PD e PCR. O pior desempenho do DLB, em relação a CA e DLS, pode ser explicado pelo menor teor de nutrientes fornecidos por ele em relação às demais, na dose aplicada. A AM somente diferiu das fontes orgânicas no sistema de preparo PCR, onde apresentou área significativamente menor quando comparada à CA.

Entre os sistemas de preparo do solo, a maior diferenciação entre o aspecto técnico das fontes de nutrientes ocorreu no PCR (Quadro 1 e Figura 2), devido provavelmente às particularidades de cada sistema de preparo do solo, como o grau de mobilização e da permanência ou não dos resíduos culturais no solo. Em média, verificou-se que as áreas das fontes de nutrientes decresceram no sentido PD > PRE > PCO > PCQ > PCR, com muitas diferenças nas comparações, evidenciando que o desempenho técnico das fontes de nutrientes depende do sistema de preparo do solo.

Índice de planta e índice químico e físico do solo

De modo geral, os maiores valores de IP foram obtidos com o uso de CA e DLS, porém estes não se diferenciaram em nenhum dos sistemas de preparo do solo (Quadro 1). Com exceção das comparações entre a testemunha e as demais fontes, a CA foi a que mais vezes se diferenciou das demais; o maior número de vezes foi com o DLB (três das cinco comparações possíveis).

O IP, independentemente do preparo do solo, apresentou a maior variação de valores entre as fontes de nutrientes, quando comparado ao IQS e IFS (Figura 2). Entretanto, o IP apresentou menor número de comparações com diferenças significativas entre as fontes de nutrientes (Quadro 1), provavelmente devido à variabilidade dos atributos que compõem este índice. Em contraste, as fontes apresentaram, graficamente, menor dispersão nos valores do IQS (Figura 2), mas maior número de comparações entre fontes que diferiram significativamente (Quadro 1). Isso reforça a proposta deste trabalho e mostra como

é importante associar diferentes formas de interpretação de resultados. A figura mostra qual o índice que está mais afastado de um referencial, porém a área média e o intervalo de confiança permitem uma separação das fontes significativamente diferentes.

O IQS, em média, mostrou valores absolutos maiores do que os de IP e IFS (Quadro 1), indicando que o solo apresentava boa condição química, considerando-se os atributos e as relativizações utilizados. Os maiores valores de IQS ocorreram com o uso de CA e os menores, na testemunha, seguido do DLB em quase todos os sistemas de preparo, tendo havido, de maneira geral, diferenças significativas entre essas comparações. A CA também se diferenciou do AM em todos os sistemas de preparo do solo. As maiores diferenças entre as fontes de nutrientes aconteceram no PD, enquanto o menor número de vezes ocorreu no PCQ e PCR. Isso confirma que a escolha do preparo do solo e das práticas de manejo dos resíduos de plantas se constitui em importante fator que regula a disponibilidade dos nutrientes das fontes aplicadas, à semelhança do que relata Power (1994).

Diferentemente do IQS, as fontes de nutrientes não promoveram alterações no IFS capaz de diferenciá-las, mas houve variação do IFS entre os sistemas de preparo do solo. Isso pode ser explicado pelo fato de o trabalho ter sido realizado em solo argiloso (710 g kg^{-1} de argila na camada de 0–20 cm), que apresenta menor suscetibilidade a alterações físicas. Alterações substanciais nessas características pela adição de

materiais orgânicos são esperadas em solos de textura média e com aplicação de doses maiores que a deste estudo, como foi o caso do trabalho realizado por Weil & Krootje (1979), que aplicaram $110 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de CA durante cinco anos em um solo franco argiloso.

O IFS médio das fontes variou de 0,661 na testemunha a 0,738 no DLS (Quadro 1), ao passo que, entre os sistemas de preparo, o IFS variou de 0,599 no PCQ a 0,851 no PD, com 14 combinações diferentes entre as 50 possíveis. Os valores do IFS médio decresceram na seguinte ordem $\text{PD} > \text{PRE} > \text{PCO} > \text{PCR} > \text{PCQ}$. Os resultados mostram que a remoção dos resíduos ou a sua queima afetou a qualidade física do solo, pois, além da falta de MO para os processos biológicos, o solo fica sem cobertura, suscetível à erosão e, conseqüentemente, sensível a uma degradação maior do que nos outros sistemas de preparo.

Validação do modelo de análise

O modelo proposto se mostrou adequado para analisar o uso de fontes de nutrientes, pois o coeficiente de correlação foi de 0,76, entre a área da figura (aspecto técnico) e o rendimento acumulado de grãos das culturas de milho, soja e feijão, nos nove anos estudados (Figura 3). Os coeficientes de correlação entre o rendimento acumulado de grãos e o IP, IQS e IFS foram, respectivamente, de 0,90, 0,83 e 0,39. As correlações foram altas, exceto para o IFS, indicando que as relativizações utilizadas foram consistentes com o comportamento biológico esperado. A pequena variação dos atributos físicos certamente foi a maior

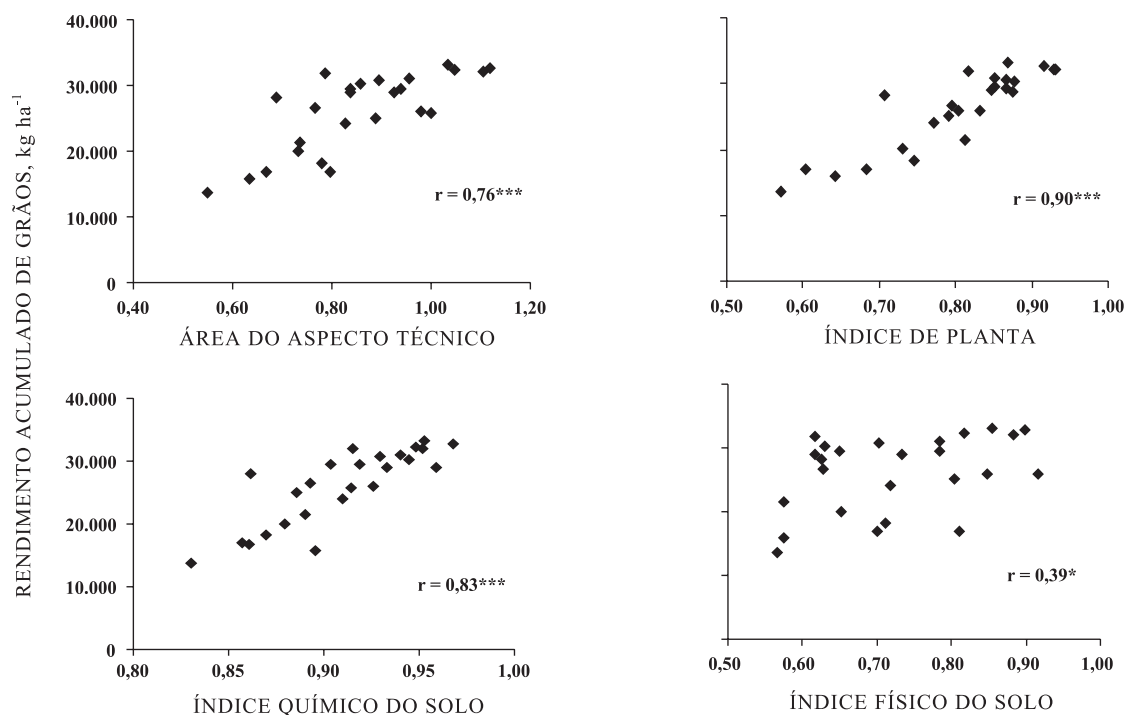


Figura 3. Rendimento acumulado de grãos das culturas comerciais durante nove anos, em função da área do aspecto técnico, do índice de planta, do índice químico e do índice físico do solo (* $p = 0,05$; *** $p = 0,001$).

responsável pela baixa correlação com o IFS. Apesar disso, é possível que mesmo pequenas diferenças nos atributos físicos possam ter contribuído na expressão de outros atributos, especialmente aqueles relacionados às plantas. Isso porque densidade do solo, textura, agregação, estabilidade de agregados e distribuição do tamanho de poros são fatores que afetam indiretamente o crescimento das plantas, e a relação desses fatores com a produção vegetal ocorre devido a sua influência na disponibilidade de água, aeração, temperatura e mecanismos de resistência mecânica à emergência de plantas ou ao crescimento de raízes (Letey, 1985).

CONCLUSÕES

1. As fontes de nutrientes não se diferenciaram quanto ao aspecto técnico. Contudo, a cama de aviário apresentou melhor desempenho quando avaliada pelo índice químico do solo ou pelo índice de planta.
2. O desempenho técnico das fontes de nutrientes e o índice físico do solo, em particular, dependeram do sistema de preparo do solo.
3. O plantio direto foi o preparo com melhor resposta aos índices avaliados, e o preparo convencional com palha retirada, o pior.
4. O modelo utilizado para análise do aspecto técnico foi uma ferramenta eficiente na avaliação mais abrangente do uso das fontes orgânicas de nutrientes.

LITERATURA CITADA

- ARAJI, A.A.; ABDU, Z.O. & JOICE, P. Efficient use of animal manure on cropland-economic analysis. *Biores. Technol.*, 79:179-191, 2001.
- BAVER, L.D. & FARNSWORTH, R.B. Soil structure effects in the growth of sugar beets. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 5:45-48, 1940.
- CAMARA NETO, G.; SOUZA, R.C.M.; FREITAS, U.M. & GARRIDA, J. Spring: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. *Comp. Graph.*, 20:395-403, 1996.
- CHOUDHARY, L.D.; BAILEY, L.D. & GRANT, C.A. Review of the use of swine manure in crop production: Effects on yield and composition and on soil and water quality. *Waste Manag. Res.*, 14:581-595, 1996.
- COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO – CFSRS/SC. Recomendações de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. 3.ed. Passo Fundo, Embrapa-CNPT/SBCS – Núcleo Regional Sul, 1995. 224p.
- COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - CQFS-NRS. Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. Porto Alegre, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Núcleo Regional Sul, 2004. 400p.
- COSTA, F.S.; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C.; FONTOURA, S.M.V. & WOBETO, C. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas plantio direto e preparo convencional. *R. Bras. Ci. Solo*, 27:527-535, 2003.
- DERPSCH, R.; ROTH, C.H.; SIDIRAS, N. & KÖPKE, U. Controle da erosão no Paraná, Brasil: sistemas de cobertura do solo, plantio direto e preparo conservacionista do solo. Eschborn, GTZ; IAPAR, 1991. 272p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro, 1999. 412p.
- ETANA, A.; HAKANSSON, I.; ZAGAL, E. & BUCAS, S. Effects of tillage depth on organic carbon content and physical properties in five Swedish soils. *Soil Till. Res.*, 52:129-139, 1999.
- KANCHIKERIMATH, M. & SINGH, D. Soil organic matter and biological properties after 26 years of maize-wheat-cowpea cropping as affected by manure and fertilization in a Cambisol in semiarid region of India. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 86:155-156, 2001.
- KASPAR, T.C. & EWING, R.P. Rootedge: Software for measuring root length from desktop scanner images. *Agron. J.*, 89:932-940, 1997.
- KEMPER, W.D. & CHEPIL, W.S. Size distribution of aggregation. In: BLACK, C.A., ed. *Methods of soil analysis*. Madison, American Society of Agronomy, 1965. p.499-510.
- LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. In: STEWART, B.A. *Advances in soil science*. New York, Springer-Verlag, 1985. v.1. p.277-294.
- MERTEN, G.H. & MIELNICZUK, J. Distribuição do sistema radicular e dos nutrientes em Latossolo Roxo sob dois sistemas de preparo do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 15:369-374, 1991.
- MOORE JR., P.A.; DANIEL, T.C.; SHARPLEY, A.N. & WOOD, C.W. Poultry manure management: Environmentally sound options. *J. Soil Water Conserv.*, 50:321-327, 1995.
- MUCHOVEJ, R.M.C. & OBREZA, T.A. Application of organic wastes in agriculture. In: ALVAREZ V., V.H.; FONTES, L.E.F. & FONTES, M.P.F., eds. *O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado*. Viçosa, MG, SBCS/ UFV/ DPS, 1996. p.901-914.
- NYAKATAWA, E.Z.; REDDY, K.C. & BROWN, G.F. Residual effect of poultry litter applied to cotton in conservation tillage systems on succeeding rye and corn. *Field Crops Res.*, 71:159-171, 2001.
- OADES, J.M. Soil organic matter and structural stability: Mechanisms and implications for management. *Plant Soil*, 76:319-337, 1984.

- POPP, J.; HOAG, D. & II ASCOUGH, J. Sustainable soil management: A framework for analysis. 2002. Disponível em: <http://www.topsoil.nserl.purdue.edu/nserlweb/isco99/pdf/ISCOdisc/sustaining_the_global_farm/P117.Popp.pdf>. Acesso em: 20 de nov. de 2003.
- POWER, J.F. Understanding the nutrient cycling process. *J. Soil Water Conserv.*, 49:16-23, 1994. Supplement.
- ROSOLEM, C.A.; FURLANI JR, E.; BICUDO, S.J.; MOURA, E.G. & BULHÕES, L.H. Preparo do solo e sistema radicular do trigo. *R. Bras. Ci. Solo*, 16:115-120, 1992.
- SCHERER, E.E. & BARTZ, H.R. Adubação do feijoeiro com esterco de aves, nitrogênio, fósforo e potássio. 2.ed. Florianópolis, EMPASC, 1984. 15p. (Boletim Técnico, 10).
- SCHERER, E.E. & NESI, C.N. Sistemas de preparo do solo, doses e fontes de adubo nitrogenado na produtividade de milho. *Agropec. Catarinense*, 20:67-71, 2007.
- SCHERER, E.E.; CASTILHOS, E.G.D.; JUCKSCH, I. & NADAL, R.D. Efeito da adubação com esterco de suínos, nitrogênio e fósforo em milho. Florianópolis, EMPASC, 1984. 26p. (Boletim Técnico, 24).
- SILVA, I.F. & MIELNICZUK, J. Avaliação do estado de agregação do solo afetado pelo uso agrícola. *R. Bras. Ci. Solo*, 21:313-319, 1997.
- SOMMERFELDT, T.G. & CHANG, C. Changes in soil properties under annual applications of feedlot manure and different tillage practices. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49:983-987, 1985.
- SUTTON, A.L. Proper animal manure utilization. *J. Soil Water Conserv.*, 49:65-70, 1994. Supplement
- TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H. & VOLKWEISS, S.J. Análises de solo, plantas e outros materiais. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p. (Boletim Técnico de Solos, 5).
- VEIGA, M.; PANDOLFO, C.M. & WILDNER, L.D.P. Aspectos técnicos e econômicos da erosão em um solo do Oeste Catarinense. *Agropec. Catarinense*, 11:23-28, 1998.
- VEIGA, M.; SANTI, G.R.; REINERT, D.J. & REICHERT, J.M. Estabilidade de agregados em diferentes condições de energia de desagregação e de umidade antecedente, em um Latossolo Vermelho distrófico. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 15., Santa Maria, 2004. Anais. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2004. CD-ROM.
- WEIL, R.R. & KROONTJE, W. Physical condition of a Davidson Clay Loam after five years of heavy poultry manure applications. *J. Environ. Qual.*, 8:387-392, 1979.