

# POTENCIAL DE CULTURAS DE COBERTURA EM ACUMULAR CARBONO E NITROGÊNIO NO SOLO NO PLANTIO DIRETO E A MELHORIA DA QUALIDADE AMBIENTAL<sup>(1)</sup>

T. J. C. AMADO<sup>(2)</sup>, C. BAYER<sup>(3)</sup>, F. L. F. ELTZ<sup>(4)</sup> & A. C. R. BRUM<sup>(4)</sup>

## RESUMO

O solo é um importante componente do ecossistema, influenciando a qualidade do ar e da água. Atualmente, é crescente o interesse pelo potencial que o solo apresenta em seqüestrar carbono e, conseqüentemente, contribuir para mitigar o efeito estufa. Este estudo teve por objetivos avaliar: (a) o potencial da inclusão de plantas de cobertura em sistemas de produção de milho (aveia + ervilhaca, tremoço (posteriormente azevém + ervilhaca), mucuna e feijão-de-porco) em acumular C orgânico e N total num Argissolo Vermelho distrófico arênico, comparativamente ao sistema tradicional pousio/milho e a uma área preservada de campo natural; (b) a contribuição dos sistemas de cultura em plantio direto no seqüestro de CO<sub>2</sub> atmosférico pelo solo. Para instalação do experimento, realizaram-se uma lavração e duas gradagens, que acarretaram uma queda acentuada nos estoques de C orgânico e N total nos primeiros quatro anos, em comparação ao campo natural. Do quarto ao oitavo ano, os sistemas de cultura promoveram uma recuperação dos estoques de C e N total, sendo esta maior no sistema milho + mucuna. No oitavo ano, o solo no sistema milho + mucuna apresentou 5,42 Mg ha<sup>-1</sup> de C e 1,27 Mg ha<sup>-1</sup> de N a mais que o solo no sistema pousio/milho, na camada de 0-20 cm. Estimou-se que o sistema tradicional pousio/milho apresentou uma liberação líquida de 4,32 Mg ha<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub> em relação ao campo natural, enquanto, no sistema milho + mucuna, ocorreu um seqüestro de 15,5 Mg ha<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub>. A utilização de sistemas conservacionistas de produção de milho é uma eficiente alternativa ao sistema tradicional (pousio/milho) em acumular matéria orgânica no solo e contribuir para o seqüestro do CO<sub>2</sub> atmosférico em solos agrícolas e, portanto, para a melhoria da qualidade ambiental.

**Termos de indexação:** manejo do solo, qualidade do solo, matéria orgânica, efeito estufa, seqüestro de CO<sub>2</sub>.

---

<sup>(1)</sup> Recebido para publicação em fevereiro de 2000 e aprovado em setembro de 2000.

<sup>(2)</sup> Professor Adjunto do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM. CEP 97119-900 Santa Maria (RS). Bolsista do CNPq. E-mail: tamado@ccr.ufsm.br

<sup>(3)</sup> Professor do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC. Caixa Postal 281, CEP 88520-000 Lages (SC). E-mail: bayer@cav.udesc.br

<sup>(4)</sup> Professor Titular do Departamento de Solos da UFSM.

**SUMMARY:** *POTENTIAL OF COVER CROPS TO SEQUESTER CARBON AND INCREASE SOIL NITROGEN CONTENT, UNDER NO-TILLAGE SYSTEM, IMPROVING ENVIRONMENTAL QUALITY*

*Soil is an important component of the ecosystem. Its management affects air and water quality. Nowadays, the soil potential to sequester carbon and, therefore, mitigate global warming, is an emergent subject. The main goals of this research were: (a) to evaluate the potential of cover crops (black oat, blue lupine (priori to oat + vetch), velvet bean and jack bean) used in corn production systems to increase soil organic carbon (OC) and total nitrogen (TN) content in a sandy-loam typic Paleudalf, in comparison with traditional farm system (fallow/corn) and a native grass field; and (b) to assess soil potential for acting as a sink of atmospheric CO<sub>2</sub> under a no-tillage system. To establish this experiment, all treatments, except for native pasture, were conventionally tilled with plow plus disk for soil fertilization and liming. This soil disturbance caused an expressive decrease of soil OC and TN contents as compared to native vegetation, in the first four years. From the fourth to the eighth year, the cropping systems in no-tillage recovered the OC and TN contents in soil, this effect being highest in corn + velvet bean. At the eighth year, the soil under the corn+velvet bean system had 5.42 Mg ha<sup>-1</sup> of C and 1.27 Mg ha<sup>-1</sup> of N more than the fallow/corn system, in the 0 to 20 cm soil layer. It was estimated that corn+velvet bean, in the eight year, acted as a sink of 15.5 Mg ha<sup>-1</sup> of CO<sub>2</sub>, while the treatment fallow/corn had a net emission of 4.32 Mg ha<sup>-1</sup> of CO<sub>2</sub>. The use of conservation cropping systems in substitution to traditional fallow/corn systems used by farmers was an efficient tool to store soil organic matter and increase agricultural carbon sequestration and, therefore, mitigate the greenhouse effect.*

*Index terms: soil management, soil quality, organic matter, CO<sub>2</sub> sequestration, greenhouse effect.*

## INTRODUÇÃO

O solo é um componente crítico da biosfera terrestre, funcionando não somente no sistema agrícola, mas também na manutenção da qualidade ambiental, com efeitos locais, regionais e mundial (Doran & Parkin, 1994). Atualmente, a comunidade científica e a sociedade como um todo têm-se voltado para as possíveis conseqüências que o chamado efeito estufa, resultante do aumento da concentração de alguns gases na atmosfera, poderá ocasionar sobre as condições climáticas e sobre a qualidade da vida no planeta (Idso, 1990; Goudriaan & Unsworth, 1990; Amado, 1999). Dentre os gases que têm apresentado significativo aumento de sua concentração na atmosfera nas últimas décadas, destaca-se o CO<sub>2</sub> (Taylor & MacCracken, 1990).

As principais fontes antrópicas de emissão de CO<sub>2</sub> são a queima de combustíveis fósseis, o desmatamento com queimadas de florestas e as atividades associadas ao processo de industrialização (Mosier, 1998). A agricultura também apresenta significativa influência sobre a composição do ar atmosférico. Esta atividade, quando com freqüente mobilização do solo, provoca o incremento da oxidação biológica do C orgânico a CO<sub>2</sub>, ocasionando um aumento da concentração desse gás na atmosfera (Reicosky & Lindstrom, 1993; Reicosky & Forcella, 1998). Além disso, o consumo agrícola de combustíveis fósseis e de insumos industrializados (fertilizantes, herbicidas

e inseticidas) também deve ser considerado (Kem & Johnson, 1993).

Atualmente, são discutidas alternativas de como reverter este quadro de degradação ambiental, particularmente no que se refere à diminuição da concentração do CO<sub>2</sub> atmosférico. A quantificação do potencial que a agricultura tem para seqüestrar carbono no solo ainda é um desafio para os pesquisadores. Acredita-se que uma das grandes oportunidades esteja na recuperação dos teores de matéria orgânica de solos anteriormente cultivados sob preparo convencional (Lal et al., 1995; Reicosky & Forcella, 1998). Em regiões temperadas, Lal et al. (1999) estimaram que, graças à mudança do preparo convencional para o plantio direto, foi possível, num período entre 25 e 50 anos, recuperar de 50 a 75% do C orgânico perdido. Em regiões subtropicais, existem evidências de que a adoção do plantio direto, com elevada adição de resíduos, poderá promover uma recuperação dos teores de matéria orgânica do solo em um período de tempo mais curto (Bayer & Mielniczuk, 1997; Amado, 1999).

O Brasil tem potencial para ser importante dreno de CO<sub>2</sub> em nível mundial, por apresentar grande área de adoção do plantio direto (12 milhões de hectares) e sistemas de produção com elevada adição de resíduos, graças à rotação de culturas e ao cultivo de plantas de cobertura na entressafra das culturas comerciais. No entanto, ainda são escassos os resultados de pesquisa que procuram quantificar

este potencial, o qual deve ser determinado regionalmente, uma vez que depende do tipo de solo, principalmente textura e mineralogia, do relevo e das condições climáticas, temperatura e umidade (Parfitt et al., 1997; Alvarez & Lavado, 1998).

A inclusão de leguminosas em sistemas de rotação de culturas é uma estratégia que também deve ser avaliada em relação ao seu efeito nos estoques de matéria orgânica do solo. É provável que o aumento da produtividade das culturas comerciais em sucessão a leguminosas também ocasione um incremento da adição de resíduos não colhidos ao solo, favorecendo a acumulação de matéria orgânica e o seqüestro de CO<sub>2</sub> (Amado et al., 1998; Bayer et al., 2000b). Além disso, a substituição parcial dos fertilizantes minerais pelo N fixado biologicamente por leguminosas pode resultar numa diminuição na liberação de N<sub>2</sub>O. Este gás, proporcionalmente ao CO<sub>2</sub>, tem um efeito muito maior na degradação do ambiente (Li, 1995). Portanto, o uso de leguminosas para cobertura do solo, além do seu efeito na produtividade das culturas comerciais, pode, potencialmente, resultar na melhoria da qualidade ambiental, em comparação a sistemas tradicionais.

Os objetivos deste estudo foram avaliar: (a) o potencial de culturas de cobertura no plantio direto em acumular C orgânico e N total num Argissolo Vermelho distrófico arênico; (b) estimar a contribuição desses sistemas na emissão ou remoção do CO<sub>2</sub> atmosférico.

## MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido em um experimento instalado, em 1991, na UFSM, Santa Maria (RS), visando identificar sistemas de produção de milho adaptados à conservação do solo. A localização geográfica da área experimental é 29°45' de latitude sul e 53°42' de longitude oeste. A altitude é de aproximadamente 96 m.

### Características edafoclimáticas

O solo é um Argissolo Vermelho distrófico arênico (Typic Paleudalf), com 730, 120 e 150 g kg<sup>-1</sup> de areia, silte e argila, respectivamente. O argilomineral predominante é a caulinita e apresenta 17 g kg<sup>-1</sup> de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Brasil, 1973). O clima da região é subtropical úmido, Cfa, segundo classificação climática de Koeppen. A temperatura média anual é de 19,3°C, variando mensalmente de 9,3 a 31,5°C. A precipitação média anual é de 1.769 mm (Moreno, 1961).

### Histórico da área e instalação do experimento

Anterior à instalação do experimento, em abril de 1991, a área encontrava-se sob condição de campo natural, com predominância de gramíneas e presença de plantas daninhas de diversas espécies (Debarba, 1993). A análise química do solo, na época,

apresentou os seguintes valores: pH = 4,5, P = 1,8 mg dm<sup>-3</sup>, K = 0,042 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, Ca + Mg = 2,6 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> e teor de MO = 24,6 g kg<sup>-1</sup> (Debarba, 1993).

A adequação da fertilidade da área para instalação do experimento constou da aplicação de 6.450 kg ha<sup>-1</sup> de calcário dolomítico, 130 de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na forma de superfosfato triplo e 90 de K<sub>2</sub>O na forma de cloreto de potássio. O calcário foi incorporado com uma aração e duas gradagens, enquanto os fertilizantes com a segunda gradagem.

### Delineamento experimental e tratamentos

A partir da instalação do experimento, o plantio direto foi utilizado sem interrupção. Os tratamentos constaram de cinco sistemas de produção de milho: (1) pousio/milho (*Zea mays*); (2) aveia preta (*Avena strigosa*) + ervilhaca comum (*Vicia sativa*)/milho; (3) tremoço azul (*Lupinus angustifolius*) substituído por azevém (*Lolium multiflorum*)+ervilhaca comum/milho; (4) milho + mucuna (*Stizolobium cinereum*) e (5) milho + feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*), dispostos segundo um delineamento inteiramente casualizado, com duas repetições.

Para avaliar os efeitos dos sistemas de cultura nos estoques de C e N do solo, foram utilizados o sistema tradicional pousio/milho e uma área preservada de campo natural adjacente ao experimento. Cada parcela experimental apresentou uma área de 77 m<sup>2</sup> (3,5 x 22 m). No sistema 3, a partir do quarto ano, o tremoço foi substituído pelo azevém + ervilhaca em razão da alta incidência de doenças. Em 1995, cultivou-se girassol (*Heliantus annuus*) e, em 1997, cultivou-se soja (*Glycyne max*), visando à rotação de culturas com o milho. As culturas de cobertura de inverno foram semeadas em abril-maio e as de cobertura de verão em janeiro. Nos meses de outubro e novembro, foram estabelecidas as culturas comerciais de verão (Debarba, 1993; Segnfredo, 1995).

A adubação nitrogenada mineral (uréia), aplicada na cultura do milho, foi parcelada em duas aplicações: 130 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, nos sistemas pousio/milho, aveia + ervilhaca/milho, tremoço (azevém + ervilhaca)/milho, e 65 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, nos sistemas milho + feijão-de-porco e milho+mucuna. As adubações de P e K seguiram as recomendações da CFS-RS/SC (1995) durante todo o período experimental.

### Amostragem do solo

O solo foi amostrado na instalação do experimento e transcorridos 2, 4 e 8 anos. Na instalação, o solo foi amostrado na camada de 0-20 cm; aos 2 e 4 anos, a amostragem foi nas camadas de 0-2,5, 2,5-5,0 e 5,0-10,0 cm, e aos 8 anos, a coleta foi nas profundidades de 0-2,5, 2,5-5,0, 5,0-7,5, 7,5-10,0, 10,0-15,0 e 15,0-20,0 cm. Em todos os anos, a amostragem foi manual por meio da abertura de uma trincheira, de dimensões de, aproximadamente, 10 x 50 x 25 cm.

## **Análises químicas**

As amostras foram secas à sombra, moídas e analisadas em relação ao seu teor de C orgânico por meio de digestão sulfocrômica com aquecimento externo, segundo Tedesco et al. (1995). No último ano, utilizou-se o método de digestão da amostra com uma mistura de ácido fosfórico e ácido sulfúrico e coleta do CO<sub>2</sub> liberado, segundo procedimento descrito por Nelson & Sommers (1982). A concentração de N total no solo foi avaliada somente no oitavo ano, seguindo o método Kjeldhal descrito por Tedesco et al. (1995). Os valores de densidade do solo, apresentados por Debarba (1993) e Seganfredo (1995) e determinados neste trabalho, foram utilizados para calcular os estoques de C orgânico e N baseado numa equivalência com a massa de solo (Angers et al., 1997; Peterson et al., 1998; Bayer et al., 2000a).

## **Adições de C e N pela fitomassa das culturas de cobertura e pelo milho**

A estimativa das adições médias anuais de C e N pelos sistemas de cultura foi realizada com base nos resultados apresentados por Debarba (1993) e Seganfredo (1995). Esta estimativa considerou a contribuição apenas da parte aérea das culturas.

## **Análise estatística**

O efeito dos sistemas de cultura sobre os estoques de C orgânico e N total do solo foi avaliado por meio da análise de variância, num delineamento inteiramente casualizado, com duas repetições. A diferença entre as médias de tratamentos foi avaliada pelo teste de Duncan a 5%.

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **Adições de carbono e nitrogênio ao solo pelos sistemas de cultura**

Durante o período experimental, verificou-se uma variação nos valores de carbono e nitrogênio na fitomassa dos sistemas de cultura, considerando, principalmente, as condições climáticas e a presença de pragas (Debarba, 1993; Seganfredo, 1995).

Na média dos oito anos, as adições anuais de C e N pelos sistemas de cultura variaram de 2.780 a 4.700 kg ha<sup>-1</sup> de C e de 71 a 217 kg ha<sup>-1</sup> de N (Quadro 1). As maiores adições ocorreram nos sistemas com culturas de cobertura, o que evidencia o seu potencial em aumentar as adições de C ao solo e, no caso de leguminosas, de fixação simbiótica de N. A maior diferença na adição de C e N entre os sistemas de cultura foi devida à variação nas adições pelas plantas de cobertura, tendo a adição de C e N pelo milho apresentado pequena variação entre os sistemas de cultura (Quadro 1).

### **Análise temporal dos estoques de C orgânico no solo**

O solo sob campo natural apresentou um estoque médio de C orgânico de 12,28 Mg ha<sup>-1</sup>, na camada de 0-10 cm, o qual permaneceu praticamente estável ao longo do período experimental (Figura 1). Esse comportamento do estoque de C orgânico no campo natural era esperado, considerando tratar-se de um solo sob vegetação perene, sem pastoreio por animais, onde as taxas de adição e de perda de C orgânico são constantes e iguais (Dalal & Mayer, 1986a,b; Bayer et al., 2000a,b).

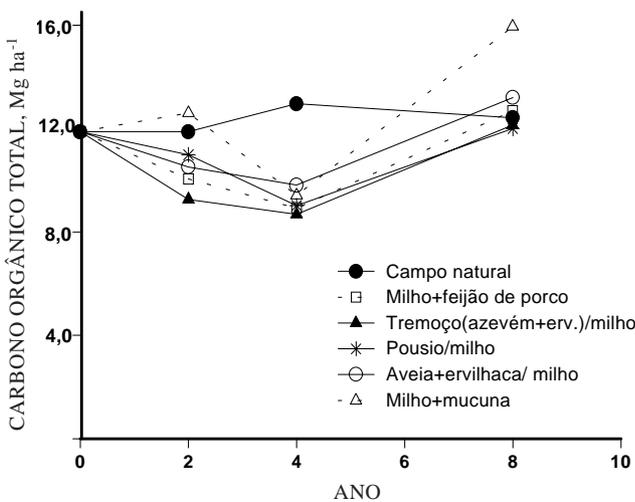
O revolvimento do solo com uma aração e duas gradagens, no início do experimento, reduziu o estoque de C orgânico do solo (Figura 1). Este declínio manifestou-se até quatro anos após o preparo e, provavelmente, foi resultante da diminuição ou eliminação de fatores que determinaram a estabilidade física da matéria orgânica, principalmente a ruptura de agregados (Carter et al., 1994) e o incremento da oxigenação do solo (Reicosky & Lindstrom, 1993). A redução da estabilidade de agregados pelo revolvimento inicial do solo foi constatada por Debarba (1993), neste mesmo experimento. Segundo esse autor, o diâmetro médio geométrico dos agregados passou de 5,7 mm (condição de campo natural anterior à instalação do experimento) para 2,0 mm no sistema pousio/milho.

A ruptura de agregados promove uma desestabilização da matéria orgânica tornando-a suscetível à decomposição microbiana (Sollins et al., 1996; Corazza et al., 1999). A redução no teor de matéria orgânica, notadamente em solos com argila de baixa atividade, ocasiona novos decréscimos na agregação, assim, ambos os parâmetros, agregação e estoque de C orgânico no solo, estão estreitamente associados (Carter et al., 1994; Feller & Beare, 1997). À medida que ocorre recuperação do estoque de C orgânico, há um aumento do tamanho de agregados (Campos et al., 1997), que se repercute em novo incremento da proteção física da matéria orgânica.

Do quarto ao oitavo ano, ocorreu uma recuperação dos estoques de C orgânico do solo em todos os sistemas de cultura (Figura 1). As taxas de acúmulo de C orgânico, na camada de 0-10 cm do solo, neste período, foram de 1,6 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, no tratamento milho + mucuna, e de 0,95 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, no milho + feijão-de-porco. Bayer et al. (2000b), em experimento realizado na Depressão Central do RS, determinaram uma taxa de acúmulo de 1,33 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de C, na camada de 0-30 cm, no plantio direto com alta adição de resíduos, comparativamente ao sistema convencional com baixa adição de resíduos. Na região do Cerrado, Corazza et al. (1999) encontraram uma taxa de 1,43 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de C, na camada de 0-100 cm, no plantio direto adotado por 15 anos. Estes valores foram superiores aos encontrados por Lal et al. (1999), em condições de clima temperado úmido, que estimaram uma faixa de 0,1 a 0,5 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>

**Quadro 1. Adição média anual de carbono e nitrogênio pela parte aérea de culturas de cobertura e culturas comerciais no sistema de produção de milho**

Sistema de cultura	Carbono			Nitrogênio		
	Cultura cobertura	Milho	Total anual	Cultura cobertura	Milho	Total Anual
	kg ha <sup>-1</sup>					
Pousio/milho	720	2.060	2.780	20	51	71
Aveia + ervilhaca/milho	1.690	2.550	4.240	80	61	141
Tremoço (azevém + ervilhaca)/milho	1.350	2.410	3.760	60	57	117
Milho + mucuna	2.000	2.510	4.510	140	66	206
Milho + feijão-de-porco	2.250	2.450	4.700	152	65	217



**Figura 1. Análise temporal dos estoques de carbono orgânico na camada de 0-10 cm de um Argissolo Vermelho distrófico arênico sob diferentes sistemas de cultura e em campo natural.**

de C, quando da passagem do preparo convencional para o plantio direto.

Estes resultados demonstram que, com a utilização de sistemas de manejo conservacionista, é viável a recuperação dos teores de matéria orgânica de solos degradados, mesmo em condições climáticas altamente favoráveis à decomposição microbiana e num solo com baixo teor de argila (150 g kg<sup>-1</sup>), no qual a proteção física da matéria orgânica é mínima.

**Estoques de C orgânico e N total no solo transcorridos oito anos**

O solo sob campo natural apresentou estoques de 23,24 Mg ha<sup>-1</sup> de C e 4,14 Mg ha<sup>-1</sup> de N na camada de 0-20 cm (Quadro 2). Bayer & Mielniczuk (1997), em condições climáticas semelhantes às do presente

estudo, determinaram em área de campo natural um estoque de C orgânico de 40,85 Mg ha<sup>-1</sup> de C, na camada de 0-17,5 cm de um Argissolo Vermelho distrófico arênico típico com 220 g kg<sup>-1</sup> de argila e concentração de óxidos de ferro totais na fração argila equivalente a 109 g kg<sup>-1</sup> de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Assumindo adições anuais de C similares nos dois locais, os menores estoques de C orgânico sob campo natural, no presente estudo (Argissolo Vermelho distrófico arênico com 150 g kg<sup>-1</sup> de argila e 17 g kg<sup>-1</sup> de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), evidenciam maiores taxas de decomposição da matéria orgânica, provavelmente resultantes da baixa proteção física pela interação com minerais.

Dentre os sistemas de cultura, os estoques de C orgânico do solo variaram de 22,06 Mg ha<sup>-1</sup> de C, no sistema tradicional pousio/milho, a 27,48 Mg ha<sup>-1</sup> de C, no sistema milho + mucuna. Em relação ao N total, os estoques variaram de 3,59 Mg ha<sup>-1</sup> (pousio/milho) a 4,87 Mg ha<sup>-1</sup> (milho + mucuna) (Quadro 2). O destaque do sistema milho + mucuna em relação aos demais, provavelmente, foi associado ao elevado aporte de fitomassa neste sistema, estimado em 4,51 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de C. A mucuna isoladamente foi responsável por 44% deste aporte de fitomassa, com uma quantidade anual média de N adicionado e, ou, reciclado de 140 kg ha<sup>-1</sup>.

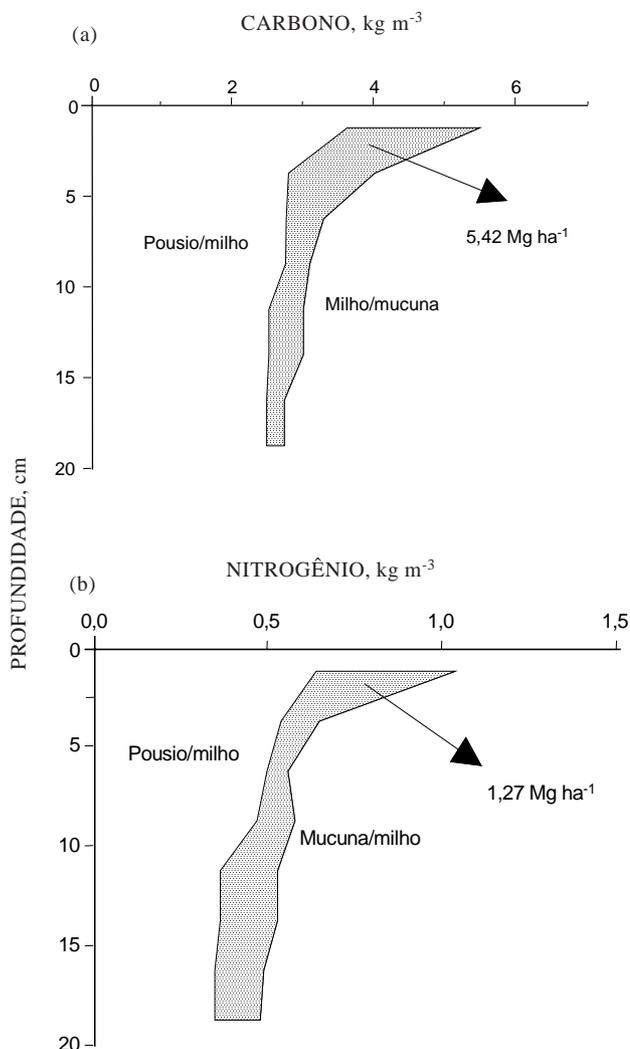
Nos demais sistemas de cultura, com plantas de cobertura, o solo apresentou estoque de C orgânico semelhante ao do campo natural. Mesmo no tratamento pousio/milho, transcorridos oito anos de adoção do plantio direto, verificou-se uma recuperação no estoque de C orgânico. Este resultado deveu-se, principalmente, à ausência de mobilização do solo, fator indispensável ao acúmulo de carbono neste solo, à gradual melhoria da fertilidade pelas adubações minerais e calagem e ao aporte de fitomassa do milho ao longo do período experimental. Em relação ao estoque de N total no solo, todos os sistemas de produção de milho com inclusão de culturas de cobertura, exceção a milho + feijão-de-porco,

apresentaram valores superiores aos do sistema tradicional pousio/milho, com destaque ao tratamento milho/mucuna que foi superior a todos os demais (Quadro 2).

A prática de deixar o solo com vegetação espontânea, durante o período da entressafra de culturas comerciais, ainda é utilizada em larga escala no Brasil. Todavia, neste experimento, a substituição da vegetação espontânea (pousio) por sistemas de cultura com utilização mais intensa do solo, como o sistema milho+mucuna, promoveu um aumento de  $5,42 \text{ Mg ha}^{-1}$  de C, no estoque de C orgânico, e de  $1,27 \text{ Mg ha}^{-1}$  de N, no estoque de N total do solo. As principais alterações nos estoques de C e N total, neste tratamento, ocorreram na camada de 0-5 cm, com 57 e 40%, respectivamente, do total (Figura 2). Estes resultados concordam com os encontrados por Bayer & Mielniczuk (1997) e Corazza et al. (1999) que atribuíram o maior acúmulo superficial de C e N do plantio direto à localização superficial dos resíduos vegetais. Entretanto, segundo Bayer et al. (2000a), a longo prazo, o acúmulo de matéria orgânica ocorreu também em maiores profundidades no solo.

O aumento verificado no estoque de C orgânico no sistema milho + mucuna, comparativamente ao pousio/milho, ratifica a afirmação de Batjes (1998) de que a substituição do pousio por plantas de cobertura constitui importante estratégia de melhoria da qualidade ambiental. Em relação ao estoque de N total no solo, houve uma taxa média de acúmulo de  $159 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ .

Considerando que o milho no sistema de produção com mucuna recebeu metade da adubação nitrogenada mineral do sistema com pousio, esta diferença no estoque de N total é atribuída basicamente ao N adicionado e, ou, reciclado pela leguminosa. A semelhança entre a taxa média de acúmulo de N total no solo ( $159 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ) no sistema milho + mucuna e a adição média anual de



**Figura 2. Estoques de (a) carbono orgânico e (b) nitrogênio total na camada de 0-20 cm de um Argissolo Vermelho distrófico arênico nos sistemas pousio/milho e milho + mucuna, transcorridos oito anos.**

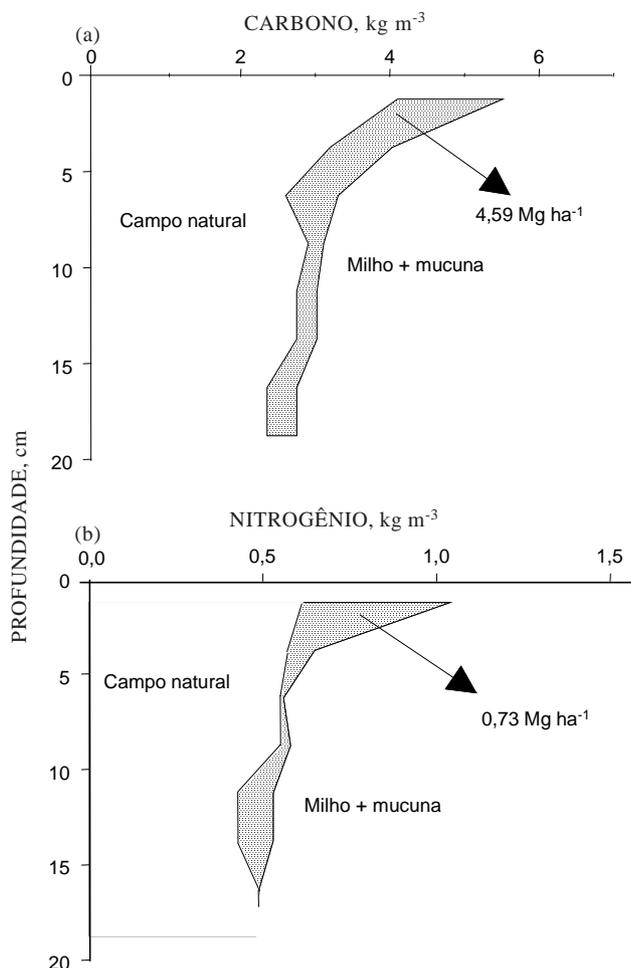
**Quadro 2. Alterações nos estoques de carbono orgânico e nitrogênio total na camada de 0-20 cm, transcorridos oito anos da utilização de cinco sistemas de produção de milho, numa área de campo natural de um Argissolo Vermelho distrófico arênico na Depressão Central do Rio Grande do Sul**

Sistema de cultura	Carbono orgânico	Nitrogênio total
	Mg ha <sup>-1</sup>	
Pousio/milho	22,06 B	3,59 C
Aveia + ervilhaca/milho	22,76 B	4,24 B
Tremoço (azevém + erv.)/milho	23,30 B	4,19 B
Mucuna + milho	27,48 A	4,87 A
Feijão-de-porco + milho	22,71 B	4,04 BC
Campo natural	23,24 B	4,14 B

Médias seguidas de letras iguais, na coluna, não diferem entre si pelo teste Duncan a 5%.

N pela fitomassa da leguminosa ( $140 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ) evidenciam que grande parte do N fixado biologicamente está ficando armazenado na forma de N total do solo, fato que é ambientalmente interessante. Bayer & Mielniczuk (1997) determinaram uma taxa de acúmulo de  $98 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  no estoque de N total no plantio direto de aveia + ervilhaca/milho + caupi em relação ao preparo convencional de aveia/milho.

Transcorridos oito anos, o solo no sistema milho + mucuna apresentou ganhos de C e N mesmo em comparação ao campo natural (Figura 3). O estoque de N no solo aumentou  $728 \text{ kg ha}^{-1}$  na camada de 0-20 cm pela utilização da mucuna, leguminosa eficiente em reciclar e adicionar N via fixação biológica. Este aumento representou uma taxa anual média de  $91 \text{ kg ha}^{-1}$ . Os ganhos nos estoques de C e N foram concentrados na camada de 0-5 cm, com 57 e 71%, respectivamente, do total (Figura 3).



**Figura 3. Estoques de (a) carbono orgânico e (b) nitrogênio total na camada de 0-20 cm de um Argissolo Vermelho distrófico arênico no sistema Mucuna + milho e sob campo natural, transcorridos oito anos.**

Especificamente em relação ao C, na camada de 0-5 cm, houve um acréscimo de 34% no estoque do sistema milho+mucuna comparativamente ao do tratamento-controle. Resultados semelhantes foram relatados por Corazza et al. (1999) que encontraram maior estoque de C no plantio direto do que na vegetação natural do cerrado. Neste experimento, os elevados aportes de resíduos vegetais pelo sistema milho + mucuna em relação ao campo natural e às taxas de decomposição da matéria orgânica, provavelmente semelhantes em ambos os sistemas, podem explicar os resultados obtidos, os quais contrastam com os obtidos por Capurro (1999). Esse autor encontrou uma redução média de 7% no estoque do C orgânico, na camada de 0-5 cm do campo natural, quando o plantio direto de triticale e avevém foi utilizado.

Lal et al. (1999) afirmaram que a adubação mineral foi importante fator para aumentar as taxas de adição de resíduos vegetais ao solo e, portanto acumular C orgânico no solo. Este fato pode explicar os resultados obtidos neste experimento, onde o campo natural apresenta baixa fertilidade natural e as adubações minerais realizadas nas culturas comerciais repercutiram-se em atenuação desta limitação natural.

Existe uma relação entre os estoques de C e N no solo; por esse motivo, para obter maior eficiência em seqüestrar C no solo, há necessidade de haver periódicas adições de N. Uma estratégia econômica e ambientalmente sustentável para adicionar N é a utilização de leguminosas em sistemas de rotação de culturas. Amado et al. (1999) demonstraram que a utilização de leguminosas por longo tempo, além de aumentar o estoque de N, aumenta a capacidade de fornecimento de N do solo às culturas comerciais.

**Contribuição dos sistemas de cultura no seqüestro de CO<sub>2</sub> atmosférico**

A utilização do estoque de C orgânico no campo natural, como um referencial de situação estável ao longo do tempo, permite inferir a contribuição dos sistemas de cultura na emissão ou no seqüestro de CO<sub>2</sub> pelo solo. O sistema tradicional pousio/milho resultou, em oito anos, numa liberação líquida de  $4,32 \text{ Mg ha}^{-1}$  de CO<sub>2</sub>, em comparação à do solo não cultivado (campo natural) (Figura 4).

Em relação ao sistemas pousio/milho, todos os sistemas de culturas com plantas de cobertura promoveram uma menor emissão de CO<sub>2</sub> atmosférico. O sistema milho + mucuna promoveu um balanço positivo de aproximadamente  $20 \text{ Mg ha}^{-1}$  de CO<sub>2</sub>, em comparação ao do sistema pousio/milho. Estimou-se que 75% deste valor foi devido à fixação do CO<sub>2</sub> atmosférico na forma de matéria orgânica no solo. Esses resultados confirmam que uma das mais significativas oportunidades que a agricultura possui para atuar como um dreno de CO<sub>2</sub> está na recuperação dos teores de matéria orgânica de solos cultivados.

Considerando o estoque de C orgânico no solo sob campo natural como referencial, verificou-se que, no sistema milho + mucuna, com elevado aporte de resíduos vegetais ao solo, houve um seqüestro líquido de 15,5 Mg ha<sup>-1</sup> de CO<sub>2</sub> (Figura 4), resultando em uma taxa de fixação de 1,9 Mg CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>. Tal resultado indica que a agricultura, desde que utilizada com sistemas conservacionistas, mostra potencial para fixação líquida de CO<sub>2</sub> atmosférico, mesmo quando comparada a sistemas naturais não perturbados, como o campo natural.

Assim, foi possível conciliar dois objetivos: a produção de alimentos e a melhoria da qualidade ambiental. A utilização de leguminosas, como fonte de N ao sistema, pode promover aumento na produção de fitomassa e de grãos das culturas comerciais. O incremento de fitomassa das culturas comerciais, somado à fitomassa das plantas de cobertura, representa uma grande contribuição na adição de resíduos vegetais ao solo e, portanto, trata-se de uma eficiente alternativa para seqüestrar C no solo (Reiscoosky & Forcella, 1998).

A substituição do uso de fertilizantes nitrogenados minerais por leguminosas também pode ser importante estratégia na manutenção da qualidade ambiental. A produção industrial de adubos nitrogenados envolve o consumo de grande quantidade de energia, obtida a partir da queima de combustíveis fósseis, com significativa emissão de gases para atmosfera. Além disto, a possibilidade de diminuição das perdas de N via N<sub>2</sub>O, em sistemas que envolvem o uso de leguminosas como plantas de cobertura, comparativamente a sistemas baseados no uso exclusivo de fertilizantes minerais, também deve ser considerada do ponto de vista de impacto ambiental (Li, 1995). O N<sub>2</sub>O apresenta, proporcionalmente, um efeito 270 vezes maior do que o CO<sub>2</sub> em relação ao aquecimento da terra; contudo,

ainda são escassos os resultados de pesquisa sobre o efeito da adoção de sistemas de manejo na emissão deste gás.

## CONCLUSÕES

1. A lavração e a gradagem do solo na instalação do experimento diminuíram os estoques de C orgânico e N total do solo. A partir do quarto ano de adoção do plantio direto, houve uma recuperação dos estoques de C orgânico e N total do solo em todos os sistemas de cultura.

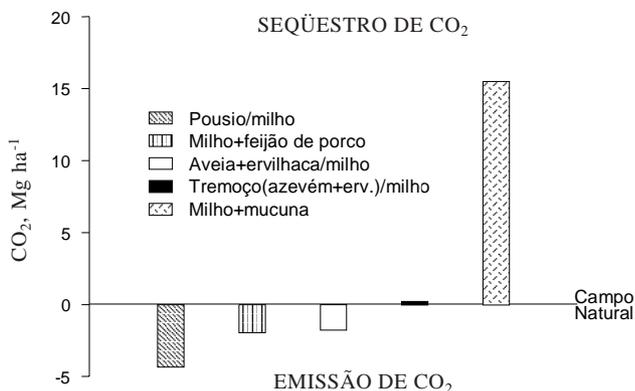
2. As maiores alterações nos estoques de C orgânico e N total, decorrentes dos sistemas de cultura e do plantio direto, ocorreram na camada superficial do solo (até à profundidade de 5 cm).

3. A utilização da mucuna no plantio direto de milho foi a estratégia mais eficiente em promover aumento nos estoques de C orgânico e N total do solo.

4. Nas condições em que foi realizado este experimento, o plantio direto associado ao uso de culturas de cobertura demonstrou potencial para recuperar o teor de MO e, conseqüentemente, seqüestrar carbono no solo e contribuir para mitigar o efeito estufa.

## LITERATURA CITADA

- ALVAREZ, R. & LAVADO, R.S. Climate, organic matter and clay content relationship in the Pampa and Chaco soils, Argentina. *Geoderma*, 83:127-141, 1998.
- AMADO, T.J.C. Seqüestro de carbono em plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. In: CONFERÊNCIA ANUAL DA REVISTA PLANTIO DIRETO, 4., Passo Fundo, 1999. Anais. Passo Fundo, Aldeia Norte, 1999. p.44-51.
- AMADO, T.J.C.; FERNANDES, S.B.V. & MIELNICZUK, J. Nitrogen availability as affected by ten years of cover crop and tillage systems in southern Brazil. *J. Soil Water Conserv.*, 53:268-272, 1998.
- AMADO, T.J.C.; MIELNICZUK, J.; FERNANDES, S.B.V. & BAYER, C. Culturas de cobertura, acúmulo de nitrogênio total no solo e produtividade de milho. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:679-686, 1999.
- ANGERS, D.A.; BOLINDER, M.A.; CARTER, M.R.; GREGORICH, E.G.; DRURY, C.F.; LIANG, B.C.; VORONEY, R.P.; SIMARD, R.R.; DONALD, R.G.; BEYAERT, R.P. & MARTEL, J. Impact of tillage practices on organic carbon and nitrogen storage in cool, humid soils of eastern Canada. *Soil Till. Res.*, 41:191-201, 1997.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. Divisão de Pesquisa Pedológica. Levantamento de reconhecimento de Solos do Estado do Rio Grande do Sul. Recife, 1973. 431 p. (Boletim Técnico, 30)



**Figura 4. Estimativa do seqüestro e emissão de CO<sub>2</sub> em diferentes sistemas de produção de milho sob plantio direto, incluindo plantas de cobertura, comparativamente ao campo natural (linha base).**

- BATJES, N.H. Mitigation of atmospheric CO<sub>2</sub> concentration by increased carbon sequestration in the soil. *Biol. Fertil. Soils*, 27:230-235, 1998.
- BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J. & CERETTA, C.A. Effect of no-till cropping systems on soil organic matter in a sandy clay loam Acrisol from southern Brazil monitored by electron spin resonance and nuclear magnetic resonance. *Soil Till. Res.*, 53:95-104, 2000a.
- BAYER, C. & MIELNICZUK, J. Características químicas do solo afetadas por métodos de preparo e sistemas de cultura. *R. Bras. Ci. Solo*, 21:105-112, 1997.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; AMADO, T.J.C.; MARTIN-NETO, L. & FERNANDES, S. V. Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. *Soil Till. Res.*, 54:101-109, 2000b.
- CAMPOS, B.C.; REINERT, D.J.; NICOLODI, R.; RUEDELL, J. & PETRERE, C. Estabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico após sete anos de rotação de culturas e sistemas de manejo de solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 21:473-480, 1997.
- CAPURRO, E.P.G. Sistema solo-planta de campo nativo submetido ao uso de herbicidas para semeadura direta de forrageiras de estação fria. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 1999. 87p. (Tese de Mestrado)
- CARTER, M.R.; ANGERS, D.A. & KUNELIUS, H.T. Soil structure and organic matter fractions under perennial grasses. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58:1194-1199, 1994.
- COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO-CFRS/SC. Recomendações de adubação e calagem para o Estado do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. 3.ed. Passo Fundo, SBCS-Núcleo Regional Sul, EMBRAPA/CNPQ, 1995. 223p.
- CORAZZA, E.J.; SILVA, J.E.; RESCK, D.V.S. & GOMES, A.C. Comportamento de diferentes sistemas de manejo como fonte ou depósito de carbono em relação à vegetação de cerrado. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:425-432, 1999.
- DALAL, R.C. & MAYER, R.J. Long-term trends in fertility of soils under continuous cultivation and cereal cropping in southern Queensland. I. Overall changes in soil properties and trends in winter cereal yields. *Aust. J. Soil Res.*, 24:265-279, 1986a.
- DALAL, R.C. & MAYER, R.J. Long-term trends in fertility of soils under continuous cultivation and cereal cropping in southern Queensland. II. Total organic carbon and its rate of loss from the soil profile. *Aust. J. Soil Res.*, 24:281-292, 1986b.
- DEBARBA, L. Sistemas de produção de milho adaptados à conservação do solo. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 1993. 150p. (Tese de Mestrado)
- DORAN, J.W. & PARKIN, T.B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDOCEK, D.F. & STEWART, B.A., eds. *Defining soil quality for a sustainable environment*. Madison, Soil Science Society of America, 1994. p.3-35. (Publication, 35)
- FELLER, C. & BEARE, M.H. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma*, 79:69-116, 1997.
- GOUDRIAAN, J. & UNSWORTH, M.H.. Implications of increasing carbon dioxide and climate change for agricultural productivity and water resources. In: *Impact of carbon dioxide, trace gases, and climate change on global agriculture*. Madison, American Society of Agronomy, 1990. p.111-130. (Special Publication, 3)
- IDSO, S.B. The carbon dioxide/trace gas greenhouse effect: Greatly overestimated? In: *Impact of carbon dioxide, trace gases, and climate change on global agriculture*. Madison, American Society of Agronomy, 1990. p.19-26. (Special Publication, 3)
- KEM, J.S. & JOHNSON, M.G. Conservation tillage impacts on national soil and atmospheric carbon levels. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57:200-210, 1993.
- LAL, R.; FOLLET, R.F.; KIMBLE, J. & COLE, C.V. Managing U.S. cropland to sequester carbon in soil. *J. Soil Water Conserv.*, 5:374-381, 1999.
- LAL, R.; KIMBLE, J. & STEWART, B. A. Word soils as a source or sink for radiatively-active gases. In: LAL, R.; KIMBLE, J.; LEVINE, E. & STEWART, B. A., eds. *Soil management and greenhouse effect*. Boca Raton, Advances in Soil Science, CCR Lewis Publishers, 1995. p.1-7.
- LI, C. Modeling Impact of Agricultural Practices on Soil C and N<sub>2</sub>O emissions. In: LAL, R.; KIMBLE, J.; LEVINE, E. & STEWART, B. A., eds. *Soil management and greenhouse effect*. Boca Raton, Advances in Soil Science, CCR Lewis Publishers, 1995. p.101-112.
- MORENO, J.A. Clima do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Secretaria da Agricultura, Diretoria de Terras e Colonização, Seção de Geografia, 1961. 46p.
- MOSIER, A.R. Soil processes and global change. *Biol. Fertil. Soils*, 27:221-229, 1998.
- NELSON, E.W. & SOMMERS, L.E. Total carbon, organic carbon, and organic matter. p. 539-579. In: PAGE, A.L., ed. *Methods of soil analysis*. 2. ed. Part 2. Madison, American Society of American, 1982. (Agronomy Monograph, 9)
- PARFITT, R. L.; THENG, B.K.G.; WHITTON, J.S. & SHERPHERD, T.G. Effects of clay minerals and land use on organic matter pools. *Geoderma*, 75:1-12, 1997.
- PETERSON, G.A.; HALVORSON, A.D.; HAVLIN, J.L.; JONES, O.R.; LYON, D.J. & TANAKA, D.L. Reduced tillage and increasing cropping intensity in the Great Plains conserves soil C. *Soil Till. Res.*, 47:207-218, 1998.
- REICOSKY, D.C. & FORCELLA, F. Cover crop and soil quality interactions in agroecosystems. *J. Soil Water Conserv.*, 53:224-229, 1998.
- REICOSKY, D.C. & LINDSTROM, M.J. Fall tillage method: effect on short-term carbon dioxide flux from soil. *Agron. J.*, 85:1237-1243, 1993.
- SEGANFREDO, M.L. Sistemas de culturas adaptados à produtividade do milho e à conservação do solo. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 1995. 100p. (Tese de Mestrado)
- SOLLINS, P.; HOMMAN, P. & CALDWELL, B.A. Stabilization and destabilization of soil organic matter: mechanisms and controls. *Geoderma*, 74:65-105, 1996.
- TAYLOR, K.E. & MACCRACKEN, M.C. Projected effects of increasing concentrations of carbon dioxide and trace gases on climate. In: *IMPACT of carbon dioxide, trace gases, and climate change on global agriculture*. Madison, American Society of Agronomy, 1990. p.1-18. (Special Publication, 3)
- 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, 5)

