

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**EFEITO DO PREPARO SOBRE A EMISSÃO DE CO₂ DO SOLO
EM ÁREAS AGRÍCOLAS DESCRITA POR MODELO
EXPONENCIAL DECRESCENTE NO TEMPO**

Luís Gustavo Teixeira
Engenheiro Agrônomo

JABOTICABAL – SÃO PAULO – BRASIL
2010

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**EFEITO DO PREPARO SOBRE A EMISSÃO DE CO₂ DO SOLO
EM ÁREAS AGRÍCOLAS DESCRITA POR MODELO
EXPONENCIAL DECRESCENTE NO TEMPO**

Luís Gustavo Teixeira

Orientador: Prof. Dr. Newton La Scala Júnior

Co-Orientador: Prof. Dr. Afonso Lopes

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Agronomia (Produção Vegetal).

Jaboticabal - SP

Junho – 2010

Teixeira, Luís Gustavo
T266e Efeito do preparo sobre a emissão de CO₂ do solo em áreas agrícolas descrita por modelo exponencial decrescente no tempo / Luís Gustavo Teixeira. -- Jaboticabal, 2010
x, 56 f. : il. ; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2010

Orientador: Newton La Scala Júnior

Co-Orientador: Afonso Lopes

Banca examinadora: José Marques Júnior, Maurício dos Santos
Simões

Bibliografia

1. Preparo do solo. 2. Respiração do solo. 3. Mudança climática.
4. Cana-de-açúcar. I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências
Agrárias e Veterinárias.

CDU 631.4:633.61

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação –
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de Jaboticabal.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

CAMPUS DE JABOTICABAL

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS DE JABOTICABAL

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: EFEITO DO PREPARO SOBRE A EMISSÃO DE CO₂ DO SOLO EM ÁREAS AGRÍCOLAS DESCRITA POR MODELO EXPONENCIAL DECRESCENTE NO TEMPO.

AUTOR: LUIS GUSTAVO TEIXEIRA

ORIENTADOR: Prof. Dr. NEWTON LA SCALA JUNIOR

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. AFONSO LOPES

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE em AGRONOMIA (PRODUÇÃO VEGETAL) pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. NEWTON LA SCALA JUNIOR

Departamento de Ciências Exatas / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal


Prof. Dr. JOSE MARQUES JUNIOR

Departamento de Solos e Adubos / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal


Prof. Dr. MAURICIO DOS SANTOS SIMOES
Engenheiro Agrônomo Autônomo / Botafina Paulista

Data da realização: 21 de junho de 2010.

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

LUÍS GUSTAVO TEIXEIRA – nascido em 10 de janeiro de 1985 em Ribeirão Preto – SP e graduado em Engenharia Agrônômica em 2007 pela Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, da Universidade Estadual Paulista Câmpus Jaboticabal (FCAV-UNESP). Bolsista de iniciação científica pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) de 2004 a 2007, logrou duas menções honrosas em eventos de iniciação científica (XIII SIICUSP, 2005; XVIII CIC UNESP, 2006) pelos trabalhos desenvolvidos sobre preparo e respiração do solo. Ao concluir o curso de Agronomia, recebeu três premiações: melhor classificação no conjunto de disciplinas profissionalizantes (CREA-SP), maior média entre as disciplinas e melhor Trabalho de Graduação (FCAV-UNESP). Reingressou nesta instituição como aluno de Pós-Graduação em 2008, dando continuidade à linha de pesquisa no Mestrado sobre emissão de CO₂ do solo após preparo, com a publicação de dois artigos científicos em 2010. Paralelamente, iniciou suas atividades profissionais como estagiário da Usina São Martinho, no Setor de Qualidade Agrícola (07-12/2007), tendo se transferido para o Setor de Plantio e Tratos Culturais, no qual ocupou os cargos de *trainee* (12/2007-11/2008) e suporte técnico agrícola (12/2008-03/2010). Em abril de 2010, assumiu a Coordenação de Plantio da Usina São Martinho, sendo responsável pelas atividades de preparo de solo, plantio mecanizado e semi-mecanizado, compostagem, sulcação de composto orgânico, recomendação de fertilizantes e corretivos, topografia, terraplanagem, conservação do solo e da água, sistematização agrícola, agricultura de precisão e tecnologia/informatização agrícola.

"A mente que se abre a uma nova idéia,
jamais voltará ao seu tamanho original."

Albert Einstein

"Se não houver frutos
Valeu a beleza das flores
Se não houver flores
Valeu a sombra das folhas
Se não houver folhas
Valeu a intenção da semente."

Henfil

DEDICO

Aos meus amados pais Antônio Carlos Teixeira e Solange Aparecida Gonçalves Teixeira, que tanto admiro, respeito e de quem me orgulho. Dedico também, às mulheres de minha vida, que tanto amo, irmãs Ana Carolina Teixeira, Ana Clara Teixeira e Ana Flávia Teixeira, e Esposa Maristela Braga Martins Teixeira. Pelo companherismo, união, compreensão, incentivo, auxílio, confiança e bem querer.

OFEREÇO

A toda minha família em especial aos meus avós maternos, Oswaldo Gonçalves e Odacy Ferreira Gonçalves, e paternos, José Carlos Teixeira e Ana Rita Taveira Teixeira.

Pelas orações, atenção, dedicação, cuidados e presença na minha vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida, pela família e amigos que me concedeu, pelas oportunidades e desafios, por me conduzir e me guiar, amparando-me nos momentos difíceis, dando-me força e coragem nos momentos de fraqueza e por permitir que mais essa etapa se concretizasse;

Ao Prof. Dr. Newton La Scala Júnior, pelos conselhos, fundamental orientação, paciência, atenção, confiança e acima de tudo, pela grande amizade;

À Usina São Martinho, em especial Luiz Alberto Henriques, Mario Ortiz Gandini e Antônio Carlos Pelizari Pinto, pelo direcionamento e pela oportunidade de cursar a pós-graduação e evoluir como técnico e gestor, assim como, pela disponibilização de área experimental;

A todos os colaboradores da Usina São Martinho, das diversas áreas e setores (COA, Coordenação, CMA, Laboratórios, CALP, Indústria e CSC) que auxiliaram no desafio de trabalhar e cursar a pós-graduação *Stricto Sensu*.

Aos Drs. Afonso Lopes, Carlos Eduardo Angeli Furlani, Gener Tadeu Pereira, José Marques Júnior, Marcílio Vieira Martins Filho e Maurício dos Santos Simões pelo fundamental auxílio no aperfeiçoamento deste trabalho;

Aos meus saudosos mestres, por todo o conhecimento compartilhado no decorrer desta pós-graduação;

Aos funcionários dos Departamentos de Solos e Adubos, Engenharia Rural e principalmente de Ciências Exatas e Estação Agroclimatológica, por toda dedicação ao longo desses anos. Em especial agradeço às amigas Zezé, Juliana e Shirlei;

Aos colegas de laboratório, em especial Adrian Fukuda, Alan R. Panosso e Daniel Teixeira, pelos momentos de campo e partilha de conhecimentos;

À FCAV/UNESP, por disponibilizar ferramentas e docentes para minha formação;

A todos que contribuíram de forma direta ou indireta para o êxito deste trabalho e para com a minha formação como Mestre em Agronomia

SUMÁRIO

	Página
CAPÍTULO 1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	1
1.1. Introdução e Justificativa	1
1.2. Referências.....	7
CAPÍTULO 2 - VARIABILIDADE TEMPORAL DA EMISSÃO DE CO₂ DO SOLO APÓS PREPARO CONVENCIONAL E REDUZIDO DESCRITO POR MODELO EXPONENCIAL DECRESCENTE NO TEMPO	13
2.2. Material e Métodos	16
2.3. Resultados e Discussão	21
2.4. Conclusões	26
2.5. Referências.....	26
CAPÍTULO 3 - EMISSÃO DE CO₂ DO SOLO CONSIDERANDO A INCORPORAÇÃO DE PALHA DE CANA-DE-AÇÚCAR E QUEBRA DE AGREGADOS APÓS PREPARO COM ENXADA ROTATIVA.....	30
3.1. Introdução.....	31
3.2. Material e Métodos	33
3.2.1. Localização e caracterização da área experimental.....	33
3.2.2. Tratamentos e avaliação da respiração, temperatura e umidade do solo	36
3.3. Resultados e Discussão	41
3.4. Conclusões	50
3.5. Referências.....	51

EFEITO DO PREPARO SOBRE A EMISSÃO DE CO₂ DO SOLO EM ÁREAS AGRÍCOLAS DESCRITA POR MODELO EXPONENCIAL DECRESCENTE NO TEMPO

RESUMO – O preparo do solo tem sido apontado como uma das práticas que causam perda adicional de carbono do solo para a atmosfera na forma de CO₂, o principal gás do efeito estufa ampliado. Neste trabalho são estudados alguns aspectos da emissão de CO₂ do solo de áreas agrícolas na região de Jaboticabal, SP, Brasil. Os experimentos foram realizados em duas áreas onde estudou-se o efeito do preparo do solo com arado de disco seguido de grade niveladora (convencional), escarificador de arrasto conjugado com rolo destorroador (reduzido) e enxada rotativa sobre as emissões de CO₂ do solo. No experimento conduzido com a enxada rotativa, foi considerada sua aplicação sobre parcela com e sem palha de cana-de-açúcar, sendo o efeito da presença ou não de palha na superfície do solo sobre as emissões de CO₂ também investigada. Já no experimento que contemplou o preparo convencional e reduzido as emissões totais indicaram que o sistema de preparo arado de disco seguido de grande niveladora foi o mais impactante, resultando em uma perda de carbono do solo próxima a 71 g m⁻² (260 g CO₂ m⁻²) em 2 semanas. Com relação à influência da palha sobre as emissões após preparo, essas foram significativas aumentando a emissão em 36% acima daquela da parcela após preparo sem palha. Os resultados apresentaram, invariavelmente, uma queda da emissão de CO₂ do solo ao longo do tempo após preparo, que foi melhor modelada em um dos experimentos a partir de uma função exponencial decrescente no tempo somente, enquanto no outro experimento por uma função combinada, exponencial decrescente no tempo e dependência linear com temperatura e umidade do solo, foi a que melhor ajustou-se as variações temporais da emissão após preparo.

Palavras-Chave: efeito estufa, mudança climática, palha de cana-de-açúcar, preparo do solo, respiração do solo, variabilidade temporal da emissão de CO₂ do solo

EFFECT OF TILLAGE ON SOIL CO₂ EMISSION IN THE AGRICULTURAL AREAS DESCRIBED BY AN EXPONENTIAL DECAY IN TIME MODEL

SUMMARY – Soil tillage has been presented as one of the practices responsible for the additional release of carbon from soil to atmosphere as CO₂, the major gas of the enhanced greenhouse effect. This work investigates several aspects of soil CO₂ emission in agricultural areas in Jaboticabal region, São Paulo State, Brazil. The experiments were conducted in two fields, where the effect on soil CO₂ emissions was studied for tillage employing disk plow followed by offset disk harrow, chisel plow followed by clod break roller and rotary tillage. In the rotary tillage experiment, plots with and without sugarcane trash on the surface were considered, being the effect of the presence of crop residues on soil CO₂ emission also evaluated. In the experiment comparing conventional and reduced tillage, total emissions indicated that the conventional tillage (disk plow followed by offset disk harrow) was the most impacting tillage system, resulting in a total carbon emission of 71 grams m⁻² (260 g CO₂ m⁻²) in 2 weeks after tillage. Concerning the influence of sugarcane trash on emissions after tillage, emissions were significant, increasing 36% over the plot without residues of the crop. In all cases, results consistently showed a decrease in soil CO₂ emission in time after tillage, which was best modeled by an exponential decay in time after tillage only, for one of the experiments, while a combined function of exponential decay in time and linear dependence on temperature and soil moisture, in the other experiment, was the best for fitting the temporal variation of emission after tillage.

Keywords: greenhouse effect, climate change, sugarcane trash, tillage of soil, soil respiration, temporal variability of CO₂ emission of soil

CAPÍTULO 1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

1.1. Introdução e Justificativa

No período de 250 anos, de 1750 a 2000, a concentração de CO₂ na atmosfera terrestre cresceu abruptamente, de 280 a 367 ppmv (ppmv: partes por milhão volume) (HOUGHTON et al., 2001). De acordo com relatório recente do Painel Intergovernamental de Mudança do Clima – IPCC, lançado em 2007 (IPCC, 2007), nos dias de hoje, a taxa de aumento anual da concentração de CO₂ atmosférico é ainda mais elevada, próxima a 1,9 ppmv, atingindo-se uma concentração de CO₂ na atmosfera de 379 ppmv ao final de 2005. Igualmente, a concentração de outros gases do efeito estufa na atmosfera tem aumentado, sendo os principais gases, em seqüência, o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O), cujos acréscimos estão na faixa de 7,0 e 0,8 ppbv (ppbv: parte por bilhão volume) por ano, respectivamente (HOUGHTON et al., 2001).

Como conseqüência, o forçamento radiativo adicional devido ao aumento da concentração gasosa na atmosfera, nos últimos 150 anos, está próximo a 2,0 W m⁻², sendo a maior parte deste devido ao CO₂, que contribui com 1,45 W m⁻² (Figura 1.1). Tal forçamento equivale a uma lâmpada de baixa potência permanentemente ligada a cada metro quadrado de superfície terrestre, adicionalmente à condição terrestre de alguns séculos atrás, quando as concentrações de tais gases na atmosfera eram inferiores.

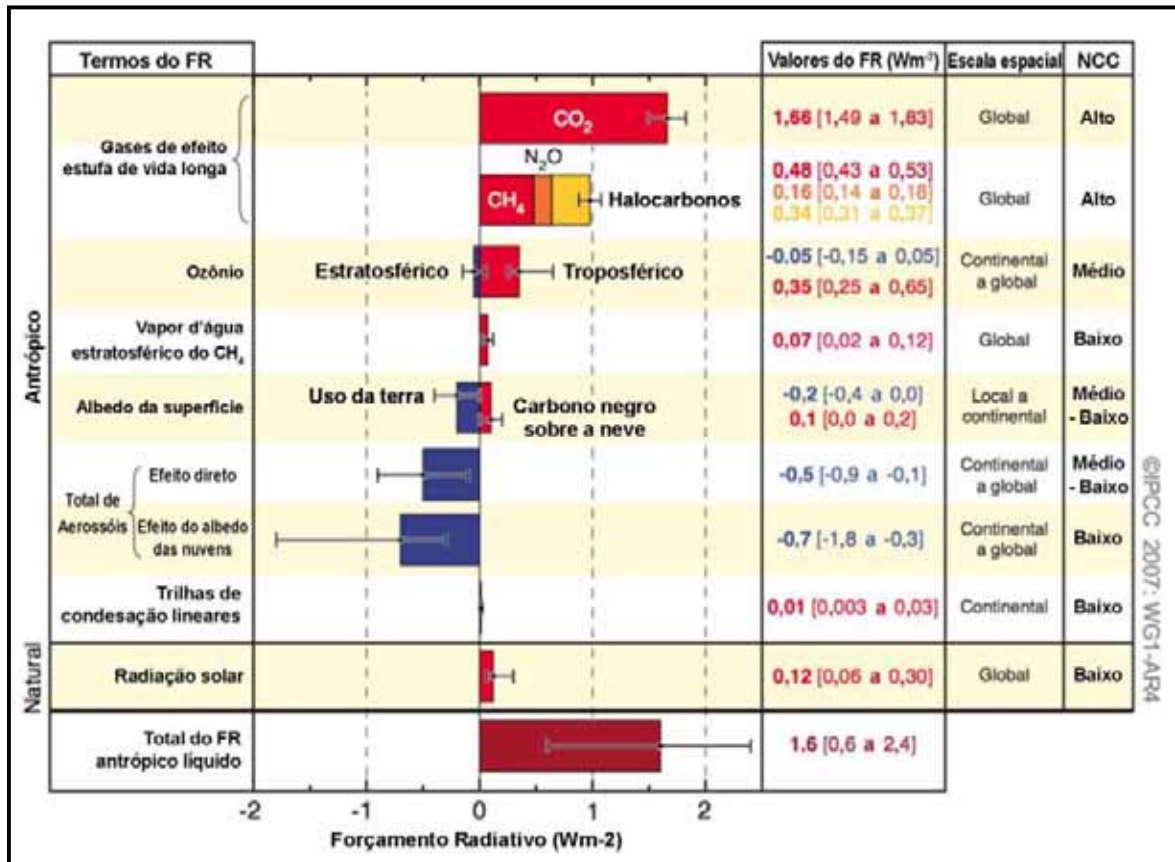


Figura 1.1. Estimativas da média global do forçamento radiativo (FR) e faixas em 2005 para CO₂, CH₄ e N₂O antropóxicos e outros componentes do FR (IPCC, 2007).

Estudos diversos relacionam o aumento na concentração de gases do efeito estufa ao acréscimo na temperatura média da superfície global, que seria em torno de 0,6 °C nos últimos 100 anos (HOUGHTON et al., 2001). O mesmo pode-se dizer a respeito de observações outras, por exemplo, a mudança no perfil de precipitações de chuvas, diminuição das calotas polares e depleção de carbono do solo, todos esses fenômenos como sendo atribuídos a uma possível mudança do clima causada pelo efeito estufa adicional (IPCC, 2007).

As atividades agrícolas contribuem com cerca de 20% das emissões globais de gases do efeito estufa (LOKUPITIYA & PAUSTIAN, 2006). No entanto, o plantio direto aliado com a manutenção dos resíduos culturais na superfície do solo tem sido identificado como uma estratégia importante para o seqüestro de carbono da atmosfera

(LAL, 2007). Dentre as atividades que usam e manejam os solos, estão aquelas que causam aumento na emissão de CO₂ ou respiração do solo. Atividades agrícolas, tais como o desflorestamento, o preparo do solo, a calagem e a irrigação, estão entre as principais atividades humanas que têm causado decréscimo no teor de carbono do solo associado ao aumento na taxa de decomposição da matéria orgânica (CERRI et al., 2001; LAL et al., 1995; READ et al., 2001; SCHLESINGER, 1999). MANN (1986) analisou as perdas globais de carbono do solo seguidas do cultivo de áreas florestais indicando redução de 20% da quantidade inicial de carbono orgânico (1.500 g m⁻² na camada superior de 30 cm do solo) nessas áreas, ocorrida principalmente nos primeiros 5 anos de conversão para atividade agrícola. Porém, estudos têm mostrado que uma mudança racional do manejo com preparo do solo convencional, para aquele sem preparo, ou um preparo mínimo, pode ajudar a seqüestrar até 57 ± 14 g C m⁻² ano⁻¹, com as taxas mais altas nos primeiros 5 a 10 anos de conversão (WEST & POST, 2002).

A perda de carbono induzida pelo preparo do solo tem sido objeto de estudo de muitos autores que têm demonstrado perdas significativas, especialmente em períodos curtos após o preparo do solo. Similarmente ao processo de desflorestamento e queima da biomassa, o preparo do solo acelera as taxas de decomposição da matéria orgânica do solo reduzindo assim o carbono orgânico, liberando grandes quantidades de CO₂ para a atmosfera em algumas semanas (ELLERT & JANZEN, 1999; LA SCALA et al., 2006, 2001; PRIOR et al., 2000; REICOSKY & LINDSTROM, 1993; ROCHETTE & ANGERS, 1999;). A influência de práticas agrícolas na emissão de gases do efeito estufa é um assunto de grande interesse, especialmente quando se trata do CO₂, o principal componente do efeito estufa adicional. Apesar de todos os esforços, a transferência de carbono do solo para a atmosfera, após preparo, ainda é pouco estudada em áreas agrícolas tropicais, dificultando assim a implantação de políticas públicas que estariam disciplinando as melhores práticas, no sentido de privilegiar aquelas que preservam o carbono no solo, ajudando a minimizar o efeito estufa adicional.

O principal fator que contribui para as perdas de carbono do solo está associado à quebra dos agregados e a transferência de parte do carbono de protegido nos agregados para desprotegido e suscetível a mineralização (SIX et al., 1999). JACINTHE & LAL (2005) mostraram que o teor de carbono protegido pelos agregados pode representar cerca de 0,5% do carbono orgânico total na camada superficial de 0-5 cm de solo, nas áreas onde o preparo do solo não tem sido conduzido. Outro fator de acréscimo as emissões de CO₂ após preparo do solo é à presença e incorporação de cobertura vegetal superficial no momento do preparo.

O preparo de solo também reduz a densidade do solo aumentando a porosidade total, melhorando as condições de oxigenação, temperatura e umidade do solo, favorecendo à decomposição da matéria orgânica (MOLINA et al., 1983; SARTORI et al., 2006).

As emissões de CO₂ induzidas pelo preparo estão mais relacionadas à decomposição da matéria orgânica lábil, pois esta tem uma taxa de decaimento mais rápida no solo (DE GRYZE et al., 2004; SWANSTON et al., 2002; WANDER et al., 1994). Em trabalho recente, GRANDY & ROBERTSON (2006) mostraram que a proporção de carbono orgânico lábil intra-agregado decresceu de 28% a 16% em 60 dias após o cultivo em relação ao carbono orgânico total nos macroagregados. Isso suporta a idéia de que o preparo do solo quebra os agregados, expondo parte do carbono lábil antes protegido à decomposição (BRONICK & LAL, 2005; WRIGHT & HONS, 2005) e de que, em conjunto com a melhoria de condições ao processo de mineralização, acelera as taxas de decomposição da matéria orgânica do solo.

Portanto, a prática de preparo do solo altera as emissões de CO₂, via um aumento na porção da matéria orgânica lábil antes protegida no compartimento desprotegido e também a mudança nas taxas de mineralização do carbono do solo.

Em solos desprovidos de vegetação, a emissão de CO₂ do mesmo tem uma relação direta com a taxa de decomposição da matéria orgânica do solo como resultado da atividade microbiana, pois, nesses locais, não há respiração de raízes de plantas. Em estudos separados, mas em um mesmo tipo de solo, LA SCALA et al. (2006, 2005,

2001) avaliaram a emissão de CO₂ do solo após diferentes sistemas de preparo, relativo à emissão da parcela sem distúrbio, onde observaram similaridades nos padrões de variabilidade temporal das emissões, em 3 a 4 semanas após o preparo do solo. Em tais experimentos, nota-se uma semelhança na variação temporal da emissão de CO₂ na parcela sem distúrbio quando comparada àquela proveniente das parcelas onde o preparo do solo foi conduzido. Presumidamente, tais variações temporais advêm das flutuações da temperatura e umidade do solo ao longo do tempo, a mesma em todas as parcelas no local onde o experimento é conduzido, sugerindo então que as emissões na parcela sem distúrbio poderiam ser utilizadas como base para a previsão da variabilidade temporal das emissões após o preparo do solo. Isso é suportado por observações onde as flutuações (aumentos e reduções) da emissão após o preparo do solo estão freqüentemente presentes na curva de emissão da parcela sem distúrbio (FORTIN et al., 1996; FRANZLUEBBERS et al., 1995; LA SCALA et al., 2006, 2005, 2001; PRIOR et al., 1997; REICOSKY, 2002; ROCHETTE & ANGERS, 1999).

O estado de São Paulo possui milhões de hectares utilizados na produção de cana-de-açúcar sendo ainda praticada a queima do canavial antes da colheita, mas estratégias de conservação do solo, da água e do carbono estão sendo cada vez mais adotadas. Estima-se que acima de 50% da área total de cana-de-açúcar no estado estão sendo atualmente manejada sem a queima dos resíduos, anterior a colheita, em uma prática denominada “cana crua” na qual parte dos resíduos vegetais da cultura é deixada sobre o solo. Esta conversão tem auxiliado a mitigar o efeito estufa adicional e também a alterar as características dos solos nas áreas de produção agrícola, aumentando o teor de matéria orgânica do solo, como já previsto e observado em algumas áreas experimentais (BAYER et al. 2000; LAL & LOGAN, 1995). Com a temática da modificação do clima e sua relação com os possíveis emissores e sumidouros de carbono na biosfera, esse assunto ganha um impulso adicional, pois existem aqueles (CERRI et al., 2009) que defendem a possibilidade da utilização de áreas agrícolas de produção como grandes armazenadores de carbono.

As projeções do potencial de seqüestro de carbono para o sul do Brasil, por exemplo, tem indicado que um aumento no teor de carbono do solo de

aproximadamente $90 \text{ g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ poderia ser alcançado nos primeiros anos de adoção de práticas conservacionistas de manejo do solo (SÁ et al., 2001). Resultados de estudos diversos realizados em vários locais no mundo mostram que é possível um aumento no teor de carbono do solo de 34 a $57 \text{ g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ nos primeiros anos após conversão do preparo convencional para plantio direto (MARLAND et al., 2003; WEST & POST, 2002), por exemplo. Este fato é ainda mais relevante nas áreas de produção de cana-de-açúcar sob o sistema de cana crua onde grande aporte de massa de palha é deixada na superfície do solo após colheita, com valores próximos a 15 t ha^{-1} .

Alguns autores têm apresentado uma taxa de seqüestro de carbono médio da ordem de $320 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ nos primeiros 20 cm de solo, e de até $1950 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ nos primeiros 40 cm de solo, uma vez as áreas de cana-de-açúcar convertidas da colheita com queima para cana crua (Figura 1.2). Desta forma, sendo efetivamente considerado um seqüestro de CO_2 no solo, na forma de carbono, auxiliando na mitigação das emissões de gases do efeito estufa nesse setor (CERRI et al., 2009).



Figura 1.2. Sistemas de colheita da cana-de-açúcar. A) Com queima; B) Sem queima, cana crua.

A despeito de todos os esforços tais projeções se baseiam na presença de resíduos vegetais após colheita e na influência dos sistemas de preparo nas emissões de CO₂ do solo (BAYER et al., 2000; LA SCALA JR. et al., 2001; PRIOR et al., 2000; REICOSKY & LINDSTROM, 1993; ROCHETTE & ANGERS, 1999), porém como já abordado, pouco se conhece sobre o impacto do preparo do solo nas emissões em solos tropicais, especialmente onde já se pratica o plantio direto. Neste ponto é importante ressaltar que mesmo áreas onde a cana crua é conduzida os solos podem ser mobilizados mecanicamente, pois dependendo da região existe uma queda na produtividade, havendo a cada 5 ou 6 anos a necessidade da renovação do canavial.

Neste contexto, algumas hipóteses foram estudadas no trabalho. A primeira está ligada à disponibilização de carbono à atividade microbiana, em que a quebra dos agregados do solo e a incorporação de resíduos vegetais afetariam as emissões de CO₂ do solo, disponibilizando uma quantidade adicional de matéria orgânica lábil (carbono lábil) aos microorganismos. Outra é que a emissão após preparo do solo possuiria, inerentemente, um aspecto de queda ao longo do tempo, podendo ser modelada por duas componentes, uma relacionada a temperatura e umidade do solo e a segunda, ao tempo após preparo.

Os objetivos deste estudo foram caracterizar as emissões de CO₂ do solo após preparo com sistemas diferenciados, modelar as emissões de CO₂ do solo após preparo convencional, reduzido e com enxada rotativa e também diferenciar os efeitos da quebra dos agregados e da incorporação de resíduos vegetais sobre as emissões de CO₂ do solo.

1.2. REFERÊNCIAS

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 & Tillage Research**, Amsterdam, vol.54, p.101-109, 2000.

BRONICK, C.J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, Amsterdam, vol.124, p.3-22, 2005.

CERRI C.C.; BERNOUX M.; CARVALHO M.C.S.; VOLKOFF, B. 2001. Emissões e remoções de dióxido de carbono pelos solos por mudanças de uso da terra e calagem. Relatórios de Referência do Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa. Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia, 41 p.

CERRI, C.C.; MAIA, S.M.F.; GALDOS, M.V.; CERRI, C.E.P.; FEIGL, B.J.; BERNOUX, M. Brazilian greenhouse gas emissions: the importance of agriculture and livestock. **Scientia Agricola**, Piracicaba, vol.66, p.831-843, 2009.

DE GRYZE, S.; SIX, J.; PAUSTIAN, K.; MORRIS, S.J.; PAUL, E.A.; MERCKX, R. Soil organic carbon pool changes following land-use conversions. **Global Change Biology**, Malden, vol.10, p.1120-1132, 2004.

ELLERT, B.H.; JANZEN, H.H. Short-term influence of tillage on CO₂ fluxes from a semi-arid soil on the Canadian prairies. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, vol.50, p.21-32, 1999.

FORTIN, M.C.; ROCHETTE, P.; PATTEY, E. Soil carbon dioxide fluxes from conventional and no-tillage small-grain cropping systems. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, vol.60, p.1541-1547, 1996.

FRANZLUEBBERS, A.J.; HONS, F.M.; ZUBERER, D.A. Tillage-induced seasonal changes in soil physical properties affecting soil CO₂ evolution under intensive cropping. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, vol.34, p.41-60, 1995.

GRANDY, A.S.; ROBERTSON, G.P. Initial cultivation of a temperate-region soil immediately accelerates aggregate turnover and CO₂ and N₂O fluxes. **Global Change Biology**, Malden, vol.12, p.1507-1520, 2006.

HOUGHTON, J.T.; DING, Y.; GRIGGS, D.J.; NOGUER, M.; VAN DER LINDEN, P.J.; XIAOSU, D. 2001. Climate Change 2001. The Scientific Basis Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC (Eds.) Cambridge: University Press, 944 p.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. 2007. **Climate Change 2007**. The physical science basis. Geneva: IPCC WGI Fourth Assessment Report. 18 p.

JACINTHE, P.A.; LAL, R. Labile carbon and methane uptake as affected by tillage intensity in a Mollisol. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, vol. 80, p. 35-45, 2005.

LAL, R.; KIMBLE, J.; LEVINE, E.; STEWART, B.A. 1995. **Soil management and greenhouse effect**. Boca Raton: CRC Press Inc.. 400 p.

LAL, R. Soil Science and the Carbon Civilization. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, vol.71, p.1425-1437, 2007.

LA SCALA, N.; BOLONHEZI, D.; PEREIRA, G.T. Short-term soil CO₂ emission after conventional and reduced tillage of a no-till sugar cane area in southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, vol.91, p.244-248, 2006.

LA SCALA, N.; LOPES, A.; MARQUES JR., J.; PEREIRA, G.T. Carbon dioxide emissions after application of tillage systems for a dark red latosol in souther Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, vol.62,p.163-166, 2001.

LA SCALA, N.; LOPES, A.; PANOSSO, A.R.; CÂMARA, F.T.; PEREIRA, G.T. Soil CO₂ efflux following rotary tillage of a tropical soil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, vol.84,p.222-225, 2005.

LA SCALA, N.; LOPES, A.; SPOKAS, K.; ARCHER, D.; REICOSKY, D.C. 2007. Short-term temporal changes of bare soil CO₂ fluxes after tillage described by a first-order decay model. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ORGANIC MATTER DYNAMICS. **Proceedings**. Poitiers, France, p.89-90.

LAL, R.; LOGAN, T.J. 1995. Agricultural activities and greenhouse gas emissions from soils of the tropics. In: Lal, R., Kimble, J., Levine, E., Stewart, B. A. (Eds.), **Soil Management and Greenhouse Effect**. Lewis Publishers, Boca Raton, USA, p.293-307.

LOKUPITIYA, E., PAUSTIAN, K. Agricultural Soil Greenhouse Gas Emissions: A Review of National Inventory Methods. **Journal of Environmental Quality**, Madison, vol.35, p.1413-1427, 2006.

MANN, L.K. Changes in soil carbon storage after cultivation. **Soil Science**, Baton Rouge, vol.142, p.279-288, 1986.

MARLAND, G., WEST, T.O., SCHLAMADINGER, B., CANELLA, L. Managing soil organic carbon in agriculture: the net effect on greenhouse gas emissions. **Tellus Series B – Chemical and Physical Meteorology**, Copenhagen, vol.55, p.613-621, 2003.

MOLINA, J.A.E.; CLAPP, C.E.; SHAFFER, M.J.; CHICHESTER, F.W.; LARSON, W.E. NCSOIL, a model of nitrogen and carbon transformations in soil: description, calibration, and behavior. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, vol.47, p.85-91, 1983.

PRIOR, S.A.; REICOSKY, D.C.; REEVES, D.W.; RUNION, G.B.; RAPER, R.L. Residue and tillage effects on planting implement-induced short-term CO₂ and water loss from a loamy sand soil in Alabama. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, vol.54, p.197-199, 2000.

PRIOR, S.A.; ROGERS, H.H.; RUNION, G.B.; TORBERT, H.A.; REICOSKY, D.C. Carbon dioxide-enriched agroecosystems: influence of tillage on short-term soil carbon dioxide efflux. **Journal of Environmental Quality**, Madison, vol.26, p.244-252, 1997.

READ, D.; BEERLING, D.; CANNELL, M.; COX, P.; CURRAN, P.; GRACE, J.; INESON, P.; JARVIS, P.; MALHI, Y.; POWLSON, D.; SHEPHERD, J.; WOODWARD, I. 2001. **The role of land carbon sinks in mitigating global climate change**. London: Royal Society, 27 p.

REICOSKY, D.C.; LINDSTROM, M.J. Fall tillage method: effect on short-term carbon dioxide flux from soil. **Agronomy Journal**, Madison, vol.85, p.1237-1243, 1993.

REICOSKY, D.C. 2002. Long-term effect of moldboard plowing on tillage-induced CO₂ loss. In: KIMBLE, J.M.; LAL, R. (Ed.). **Agricultural practices and policies for carbon sequestration in soil**, Boca Raton: CRC Press Inc., p.87-97.

ROCHETTE, P.; ANGERS, D.A. Soil surface carbon dioxide fluxes induced by spring, summer and fall moldboard plowing in a sandy loam. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, vol.63, p.621-628, 1999.

SÁ, J.C.D.; CERRI, C.C.; DICK, W.A.; LAL, R.; VENSKE, S.P.; PICCOLO, M.C.; FEIGL, B.E. Organic Matter dynamics and carbon sequestration rates for a tillage chronosequence in a Brazilian oxisol. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, vol.65, p.1486-1499, 2001.

SARTORI, F.; LAL, R.; EBINGER, M.H.; PARRISH, D.J. Potencial soil carbon sequestration and CO₂ offset by dedicated energy crops in the USA. **Critical Reviews in Plant Science**, Londres, vol.25, p.441-472, 2006.

SCHLESINGER, W.H. **Carbon and Agriculture – Carbon sequestration in soils. Science**, Washington, vol.284, p.2095, 1999.

SIX, J.; ELLIOTT, E.T.; PAUSTIAN, K. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, vol.63, p.1350-1358, 1999.

SWANSTON, C.W.; CALDWELL, B.A.; HOMANN, P.S.; GANIO, L.; SOLLINS, P. Carbon dynamics during a long-term incubation of separate and recombined density fractions from seven forest soils. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, vol.34, p.1121-1130, 2002.

WANDER, M.M.; TRAINA, S.J.; STINNER, B.R.; PETERS, S.E. Organic and conventional management effects on biologically active soil organic matter pools. **Soil Science Society of America Journal, Madison**, vol.58, p.1130-1139, 1994.

WEST, T.O.; POST, W.M. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: A global data analysis. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, vol.66, p.1930-1946, 2002.

WRIGHT, A.L.; HONS, L.F.M. Soil carbon and nitrogen storage in aggregates from different tillage and crop regimes. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, vol.69, p.141-147, 2005.

CAPÍTULO 2 - VARIABILIDADE TEMPORAL DA EMISSÃO DE CO₂ DO SOLO APÓS PREPARO CONVENCIONAL E REDUZIDO DESCRITO POR MODELO EXPONENCIAL DECRESCENTE NO TEMPO

RESUMO – A avaliação do impacto das práticas de preparo sobre as perdas de carbono do solo é dependente da habilidade de se descrever a variabilidade temporal da emissão de CO₂ do solo após preparo. Tem sido sugerido que as grandes quantidades de CO₂ emitido após o preparo do solo podem servir como um indicador das modificações nos estoques de carbono do solo em longo termo. Neste trabalho é apresentado um modelo de duas partes, uma baseada na temperatura e na umidade do solo e outra que inclui um termo exponencial decrescente no tempo que é eficiente no ajuste das emissões logo após preparo convencional (arado de disco seguido de uma passagem com a grade niveladora) e reduzido (escarificador de arrasto conjugado com rolo destorroador). As emissões após o preparo do solo são descritas utilizando-se estimativa não linear com um coeficiente de determinação (R^2) de até 0,98, após preparo reduzido. Os resultados indicam que nas previsões da emissão de CO₂ após o preparo do solo é importante considerar um termo exponencial decrescente no tempo após preparo.

Palavras-chave: respiração do solo, modelagem da emissão de CO₂ do solo, preparo do solo, efeito estufa

2.1. Introdução

A emissão de CO₂ do solo em áreas agrícolas é um assunto de interesse especialmente quando se considera o uso e manejo do solo. Devido à elevada variabilidade espacial e temporal da emissão de CO₂ do solo, a incerteza sobre este

tópico é significativa. Entretanto, já é aceito que reduções em intensidade e frequência de preparo poderiam auxiliar na mitigação das perdas de carbono do solo (BRONICK & LAL, 2005). O preparo ocasiona taxas muito elevadas de emissão de CO₂ do solo em períodos curtos, que podem persistir por semanas após o preparo. Em estudos de longo prazo, foi observada a restauração do carbono no solo após adoção de práticas conservacionistas (LAL, 2004). Como consequência, longo dos últimos anos produtores estão adotando o preparo conservacionista e reduzindo o número e a frequência de operações no preparo convencional (REICOSKY & ALLMARAS, 2003).

Quando o preparo é conduzido, a matéria orgânica antes protegida pelos agregados é exposta, aumentando a quantidade de matéria orgânica lábil disponível para a atividade microbiana (SIX et al., 1999). Ainda, mudanças na taxa de decaimento do carbono no solo são esperadas com a diminuição da densidade do solo e o aumento do volume total de poros do solo. Recentemente, modelos conceituais têm sido propostos para descrever a emissão devida ao preparo com base nesses pressupostos. LA SCALA et al. (2008) utilizaram emissão do solo sem preparo como referência para modelar a emissão após o preparo. REICOSKY & ARCHER (2007) sugeriram que o rápido declínio inicial do fluxo de CO₂ seguido de uma variação mais lenta no fluxo requer o uso de uma função de duas partes. Assim, um novo modelo de duas partes é apresentado neste trabalho objetivando ajustar as emissões após o preparo.

A principal hipótese é que a emissão de CO₂ do solo após o preparo é modulada por duas componentes: a primeira diretamente relacionada à temperatura e à umidade do solo, e a segunda relacionada a uma esperada dinâmica rápida do carbono lábil adicional induzida pelo preparo. Portanto, é sugerida a seguinte função para descrever a variabilidade temporal das emissões de CO₂ do solo após o preparo (F_{CO_2}):

$$F_{CO_2}(t) = F_I(T(t), \theta(t)) + F_{II}(C_{l\acute{a}bil}(t)) \quad (\text{Equação 1})$$

O primeiro termo da Equação 1 (F_I) incorpora a variabilidade da temperatura e da umidade do solo. O segundo termo (F_{II}) está relacionado às rápidas mudanças devido ao carbono lábil adicional ($C_{l\acute{a}bil}$) disponibilizado aos microrganismos do solo pelo

preparo. Quando esse termo é levado em conta, considera-se que a dinâmica do carbono lábil é governada pela equação de decaimento de primeira ordem:

$$\frac{dC_T}{dt} = -kC_T$$

Na equação acima, k (dia^{-1}) é a chamada constante de decaimento e C_T é o carbono lábil disponibilizado à atividade microbiana (em g m^{-2}) pelo preparo. O aumento do carbono lábil poderia ser devido aos resíduos da cultura incorporados ao solo através do preparo ou devido à quebra dos agregados e exposição do carbono orgânico, então protegido, para a atividade microbiana. As variações do carbono lábil no solo ao longo do tempo foram modeladas pela seguinte equação de decaimento exponencial:

$$C_T = C_{0T}e^{-kt}$$

Em que C_{0T} é o carbono lábil disponível no tempo inicial e induzido pelo preparo ($\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2}$), k é a taxa de decaimento, e t é o tempo (horas). Um pressuposto razoável é que as perdas de CO_2 do solo são proporcionais ao carbono do solo reduzido após preparo. Matematicamente, isso pode ser descrito como:

$$F_{II}(t) \propto -\frac{dC_T}{dt} = C_{0T}ke^{-kt} \quad (\text{Equação 2})$$

Considerando a eficácia da atividade microbiana em converter o carbono do solo como β , a Equação 2 deixa de ser uma relação de proporcionalidade para ser descrita como:

$$F_{II}(t) = -\beta(C_{0T}ke^{-kt}) = \beta C_{0T}ke^{-kt} \quad (\text{Equação 3})$$

Assumindo $a_3 = \beta C_{0T}k$ e $a_4 = k$, leva a:

$$F_{II}(t) = a_3e^{-a_4t} \quad (\text{Equação 4})$$

A Equação 4 é similar àquela sugerida por ELLERT & JANZEN (1999) que modelou a emissão induzida pelo preparo igualando os fluxos com preparo e sem

preparo a um decaimento exponencial em função do tempo. Mais recentemente, LA SCALA et al. (2009a, b) também utilizaram esta abordagem para modelar a emissão após aplicação de diversos sistemas e ajustes de preparo de solo. Sua principal hipótese foi que o solo contém um reservatório de carbono que é susceptível a liberação pelo preparo, de acordo com um modelo de cinética de primeira ordem.

A dependência da emissão de CO₂ do solo com a temperatura e com a umidade foi estudada por vários autores. Modelos lineares, exponenciais e logarítmicos têm sido propostos em situações diversas, como em solos vegetados e desprovidos de vegetação (JABRO et al., 2008). Neste trabalho, uma dependência linear da emissão com a temperatura e a umidade do solo é considerada em um modelo semi-empírico. Logo, o primeiro termo da Equação 1 pode ser escrito como:

$$F_1 = a_1T + a_2\theta \quad (\text{Equação 5})$$

E o modelo de dois termos proposto poderia ser escrito como:

$$F_{CO_2} = a_1T + a_2\theta + a_3e^{-a_4t} \quad (\text{Equação 6})$$

Dois sistemas de preparo principais são utilizados no Sudeste do Brasil: arado de disco seguido de grade niveladora (convencional) ou escarificador de arrasto acoplado a rolo destorroador (reduzido). O objetivo deste estudo é aplicar as Equações 4 e 5 separadamente para descrever a emissão após preparo, e o modelo de duas partes (Equação 6) para avaliar a emissão de CO₂ do solo em um período de duas semanas.

2.2. Material e Métodos

A área experimental, localizada na FCAV/UNESP (Figura 2.1) de coordenadas 21° 14' 15" S e 48° 17' 06" O - WGS84, tem altitude média de 574 metros, declividade média de 6% e segundo EMBRAPA (2006) o solo é classificado como Latossolo Vermelho eutrófico de textura argilosa.



Figura 2.1. Área experimental (Experimento LGT Mestrado), perímetro em branco, localizada na FCAV/UNESP, município de Jaboticabal – SP.

O clima da região é classificado como Cwa, de acordo com Köppen, subtropical com uma distribuição de chuva concentrada no período de outubro a março, no qual foi realizado o experimento, e relativamente seco de abril a setembro. As normais climatológicas do município (1971 a 2000) são: 1.424,6 mm de chuva, 943,5 hPa de pressão atmosférica, 28,9 °C, 16,8 °C e 22,2 °C de temperaturas máximas, mínima e média do ar, respectivamente, 70,8% de umidade relativa do ar, insolação de 2585,8 horas e um total de 117,5 dias com chuva.

Antes da implantação do experimento, a área foi utilizada ao longo de vários anos com a cultura do milho (*Zea mays L.*) em sistema de preparo convencional (arado de disco seguido de grade niveladora). Na ocasião do experimento o solo estava em pousio com pequena cobertura vegetal. Foi coletada amostra de solo (0-0,20 m) da

área e submetida à análise química, da qual se extraiu valores de pH em CaCl_2 de 4,2 e teor de matéria orgânica de 160 g kg^{-1} , o que equivale a 93 g kg^{-1} de carbono orgânico.

Em duas parcelas adjacentes medindo 10×2 metros cada, foram aplicados dois sistemas de preparo (Figura 2.2): arado de disco seguido de grade niveladora, convencional (Conv); e escarificador de arrasto acoplado a rolo destorroador, reduzido (Red). A profundidade de trabalho em ambas as parcelas foi 30 cm. A grade niveladora e o rolo destorroador trabalharam a 6 e 3 cm de profundidade, respectivamente.



Figura 2.2. Tratamentos avaliados no experimento: (A) e (B) Conv; (C) Red. (A) Arado de disco reversível, (B) Grade niveladora de arrasto e (C) Escarificador de arrasto conjugado com rolo destorroador.

Após o preparo do solo, 6 colares de PVC (diâmetro = 0,1 m) foram distribuídos em cada uma das parcelas e inseridos no solo de forma ordenada na diagonal da parcela, Figura 2.3. As avaliações da emissão de CO_2 do solo iniciaram imediatamente após os procedimentos de preparo, sendo essas realizadas ao longo de 14 dias, sempre no período da manhã.



Figura 2.3. Distribuição dos colares de PVC nas parcelas. A) Convencional; B) Reduzido.

A emissão de CO_2 e a temperatura (0-0,2 m) do solo foram computadas utilizando-se uma câmara de fluxo fabricada pela companhia LI-COR, Nebraska, EUA (HEALY et al., 1996) e sensor de temperatura do sistema LI-6400, respectivamente. A Figura 2.4 mostra alguns detalhes do equipamento.

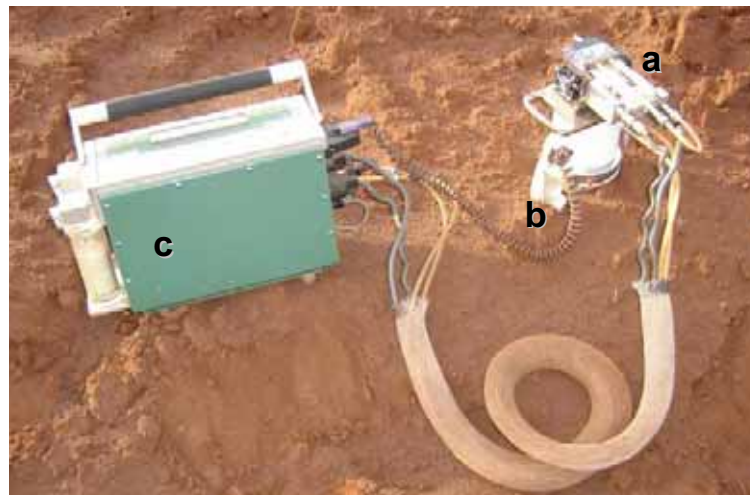


Figura 2.4. Equipamento LI-6400. a) Câmara de solo inserido sobre o colar de PVC; b) Sensor de temperatura inserido no interior do solo; c) Console do sistema LI-6400.

A umidade do solo (0-0,2 m) também foi monitorada, em todos os pontos e dias estudados, sendo utilizado um equipamento de TDR (“Time Domain Reflectometry”), conforme apresentado na Figura 2.5, denominado “Hydrosense System” (Campbell

Scientific, Utha, EUA), que estima a porcentagem de água em volume no interior do solo, a mesma definida na Equação 1 (denominada θ).



Figura 2.5. “Hydrosens”, sistema portátil utilizado para medição da umidade do solo.

Durante o período em que o experimento foi conduzido, ocorreram precipitações pluviométricas na região. A Tabela 2.1 apresenta (em mm) as precipitações do período.

Tabela 2.1. Precipitação pluvial em mm no período do experimento.

	Dias após preparo																			
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Precipitação. (mm)	4,5	0,0	1,2	17,8	0,2	0,5	10,1	0,0	9,8	5,2	8,2	0,0	1,0	0,0	0,0	0,4	0,0	10,6	0,0	0,0

Os elementos meteorológicos, utilizados neste trabalho, foram extraídos de um conjunto de dados pertencentes ao acervo da área de Agrometeorologia do Departamento de Ciências Exatas da FCAV/UNESP. As observações feitas na Estação Agroclimatológica do Câmpus de Jaboticabal são cotadas, digitadas em formato padronizado, realizada a consistência e controle de qualidade. Em seguida são obtidas as médias diárias, mensais e anuais que são repassadas aos usuários.

O software Statistica (STATSOFT, 2004) foi utilizado para ajustar os modelos (Equações 4, 5 e 6) aos dados experimentais, emissão de CO₂ do solo após preparo

convencional e reduzido. Por meio da estimativa de mínimo quadrado não linear com o algoritmo de Gauss-Newton os parâmetros dos modelos (a_1 , a_2 , a_3 e a_4) foram estimados, bem como os coeficientes de determinação (R^2).

2.3. Resultados e Discussão

Os resultados da modelagem da emissão de CO_2 do solo após preparo convencional e reduzido utilizando as funções F_I e F_{II} (Equações 4 e 5) separadamente podem ser observados na Tabela 2.2. A função F_I é uma simples dependência linear da temperatura e da umidade do solo e explica 9% e 2% da variabilidade da emissão nos tratamentos reduzido e convencional, respectivamente. Quando F_{II} apenas é aplicada aos dados, cerca de 30% da variabilidade da emissão são explicados com apenas um parâmetro (a_4) não-significativo ($p > 0,10$). Pode-se notar que os valores de a_4 foram positivos, indicando uma tendência predominante de decaimento exponencial após o preparo.

Tabela 2.2. Parâmetros estimados \pm erro padrão e R^2 dos ajustes para os tratamentos estudados.

Tratamento	Modelo 1:	R^2	Modelo 2:	R^2
	$F_I = a_1 T + a_2 \theta$		$F_{II} = +a_3 e^{-a_4 t}$	
Convencional	$a_1 = 0,0409 \pm 0,0209$	0,02	$a_3 = 1,1712 \pm 0,2100$	0,34
	$a_2 = -0,0091 \pm 0,0226$ NS		$a_4 = 0,0715 \pm 0,0371$	
Reduzido	$a_1 = 0,0196 \pm 0,0083$	0,09	$a_3 = 0,4998 \pm 0,0954$	0,31
	$a_2 = -0,0062 \pm 0,0094$ NS		$a_4 = 0,0724 \pm 0,0397$ NS	

NS: não significativo $p > 0,10$. a_1 em $\text{gCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ e a_2 em $\text{gCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ \%vol}^{-1}$ a_3 em $\text{gCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ e a_4 em dias^{-1} . R^2 : coeficiente de determinação.

Quando a função de duas partes é aplicada ao conjunto de dados de ambos os tratamentos, os parâmetros de ajuste são significativamente melhorados (Tabela 2.3). Os coeficientes de determinação (R^2) para os ajustes foram 0,93 e 0,98 para os tratamentos convencional e reduzido, respectivamente. Portanto, o decaimento exponencial no tempo após o preparo acoplado com um modelo para a dependência linear com temperatura e umidade do solo é um modelo mais adequado para descrever, neste caso, as emissões após preparos do solo convencional e reduzido. Os

parâmetros extraídos (a_1 - a_4) do modelo proposto pela Equação 6 foram significativos ($p < 0,10$) com exceção do parâmetro a_2 para o tratamento convencional. Em sua maior parte, os parâmetros a_1 e a_2 foram positivos, como esperado para a dependência da emissão de CO_2 do solo com a temperatura e a umidade do solo (LIU et al., 2008; SALOKHE & RAMALINGAM, 2001; SAVAGE & DAVIDSON, 2003). Adicionalmente, os valores de a_4 foram positivos, logo, um típico decaimento exponencial é adequado para descrever a emissão do solo após preparo, como tem sido reportado em numerosos estudos conduzidos em condições diferenciadas de solo e clima (LA SCALA et al., 2001, 2005, 2006; FORTIN et al., 1996; REICOSKY, 2002; ROCHETTE & ANGERS, 1999).

Apesar de todos os esforços, apenas poucos autores têm proposto modelos que consideram umidade e temperatura do solo na modelagem da emissão de CO_2 do solo após preparo utilizando um modelo de decaimento exponencial no tempo. Assim, a introdução dessas variáveis, temperatura e umidade do solo, resultou em coeficientes de determinação significativamente superiores àqueles observados por ELLERT & JANZEN (1999) quando a função simples do decaimento no tempo foi aplicada ao ajuste da emissão após preparo do solo. Ainda, é notável que as emissões totais previstas (integral da área sob as curvas da emissão, Figura 2.6) apresentam boa concordância com os dados observados. Os desvios entre os valores previstos e observados foram em torno de 2% nos dois tratamentos: 260,65/254,70 $\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2}$ e 107,19/105,04 $\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2}$ (observado/previsto) após preparo convencional e reduzido, respectivamente (Tabela 2.3).

Tabela 2.3. Parâmetros estimados \pm erro padrão e R^2 dos ajustes para os tratamentos estudados.

Tratamento	Modelo 3	R^2	Emissão Total ($\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2}$) Observado / Previsto
	$F_{\text{CO}_2} = a_1 T + a_2 \theta + a_3 e^{-a_4 t}$		
Convencional	$a_1 = 0,0322 \pm 0,0069$	0,93	260,65 / 254,70
	$a_2 = -0,0068 \pm 0,0077$ NS		
	$a_3 = 1,0792 \pm 0,1379$		
	$a_4 = 1,1416 \pm 0,4853$		
Reduzido	$a_1 = 0,0080 \pm 0,0018$	0,98	107,19 / 105,04
	$a_2 = 0,0041 \pm 0,0019$		
	$a_3 = 0,5191 \pm 0,0372$		
	$a_4 = 1,9618 \pm 0,5130$		

NS: não significativo $p > 0,10$. a_1 em $\text{gCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ e a_2 em $\text{gCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ \%vol}^{-1}$ a_3 em $\text{gCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ e a_4 em dias^{-1} . R^2 : coeficiente de determinação.

A Figura 2.6 apresenta a emissão de CO_2 do solo observada (linhas contínuas) e prevista (linhas pontilhadas) em tratamentos de preparo convencional (triângulos) e reduzido (quadrados) durante o período estudado. No primeiro dia avaliado, as emissões foram tão altas quanto $1,74$ e $0,78 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ no tratamento convencional e no reduzido, respectivamente. Foi possível observar um aspecto de decaimento do tipo exponencial das emissões que, no modelo aqui proposto, é modelada pela função exponencial no tempo.

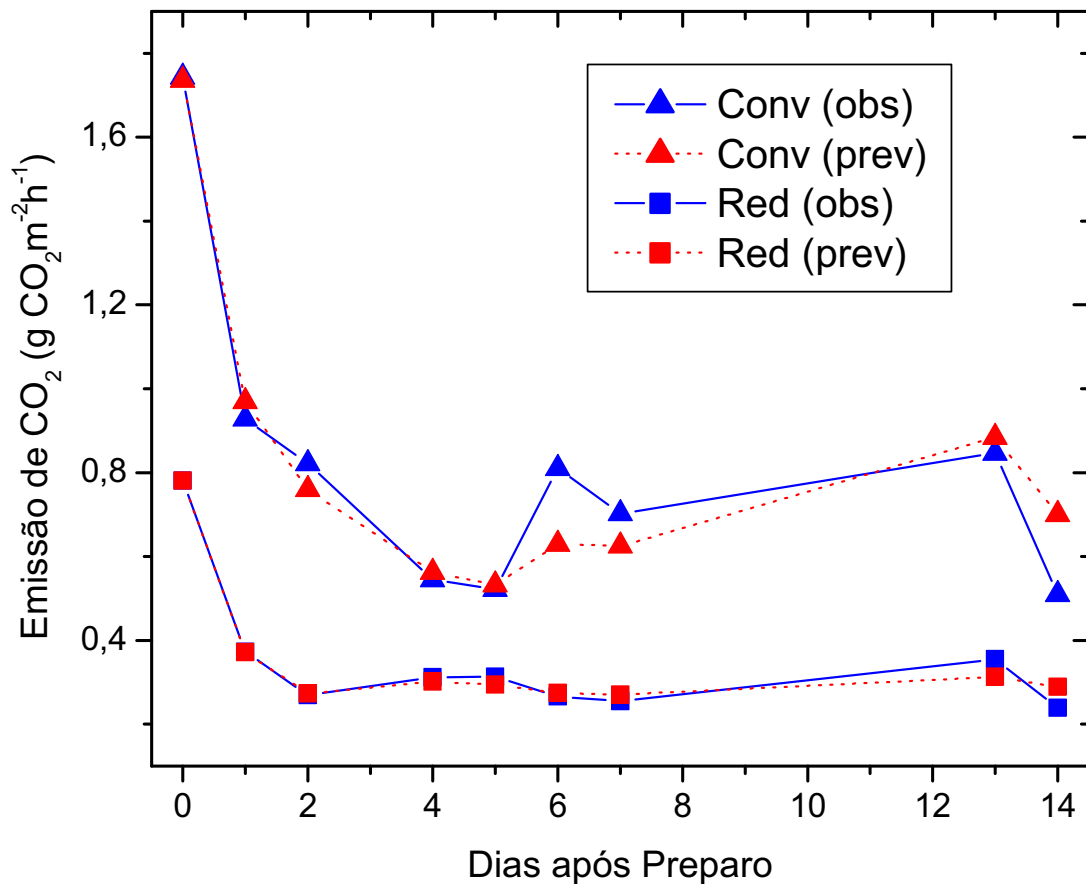


Figura 2.6. Emissão observada (símbolos azuis e linhas contínuas) e prevista (símbolos vermelhos e linhas pontilhadas) de CO_2 do solo após preparo convencional e reduzido.

Pequenas flutuações ao longo do experimento ocorreram devido às mudanças na temperatura do solo e na umidade do solo. Neste experimento ocorreram chuvas (Tabela 2.1) nos dias 1, 3, 4, 5, 7, 10 e 12, com precipitações diárias de até 10 mm. Mudanças na temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e umidade (% volume) do solo podem ser observadas

na Figura 2.7. A temperatura do solo variou de 22 C°, no quinto dia, até 31 C°, no décimo terceiro dia após o preparo (Figura 2.7a). Alterações na umidade do solo também foram grandes ao longo do tempo, como nos tratamentos reduzidos, em que o valor mínimo foi 14% logo após o preparo e o valor máximo foi 29% (Figura 2.7b). A umidade do solo se manteve elevada no tratamento convencional em relação ao reduzido durante todo o período estudado, atingindo os maiores valores no quarto dia após preparo (31,2%). Comparando os valores previstos (linhas pontilhadas) e observados (linhas sólidas) na Figura 2.6, nota-se que o modelo aqui proposto foi capaz de capturar pequenas flutuações de emissão em ambas as parcelas durante o experimento.

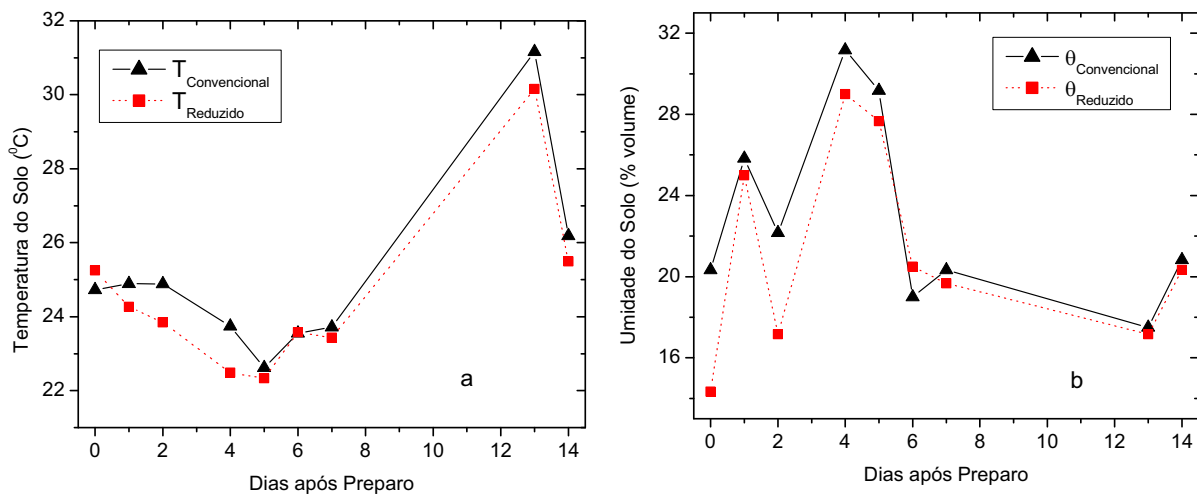


Figura 2.7. Temperatura do solo (a) e umidade do solo (b) nas parcelas preparadas com tratamento reduzido (quadrados vermelhos e linha pontilhada) e convencional (triângulo preto e linha sólida).

Tabela 2.4 e Figura 2.8 apresentam os parâmetros e ajustes de regressão ($p < 0,001$) entre as emissões de CO_2 do solo previstas e observadas após preparo.

Tabela 2.4. Parâmetros \pm erro padrão das regressões ente os dados previstos e observados para os tratamentos estudados.

Tratamento	Prevista = A + B x Observada		R^2
	A	B	
Convencional	$0,0380 \pm 0,0899$	$0,9498 \pm 0,1000$	0,93
Reduzido	$0,0120 \pm 0,0214$	$0,9679 \pm 0,0555$	0,98

A em $\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. B não dimensional. R^2 : coeficiente de determinação.

Como se pode perceber, ambos os ajustes estão próximos à linha reta 1:1 (bisetor), com coeficientes linear e angular de valores próximos a 0 e 1, respectivamente.

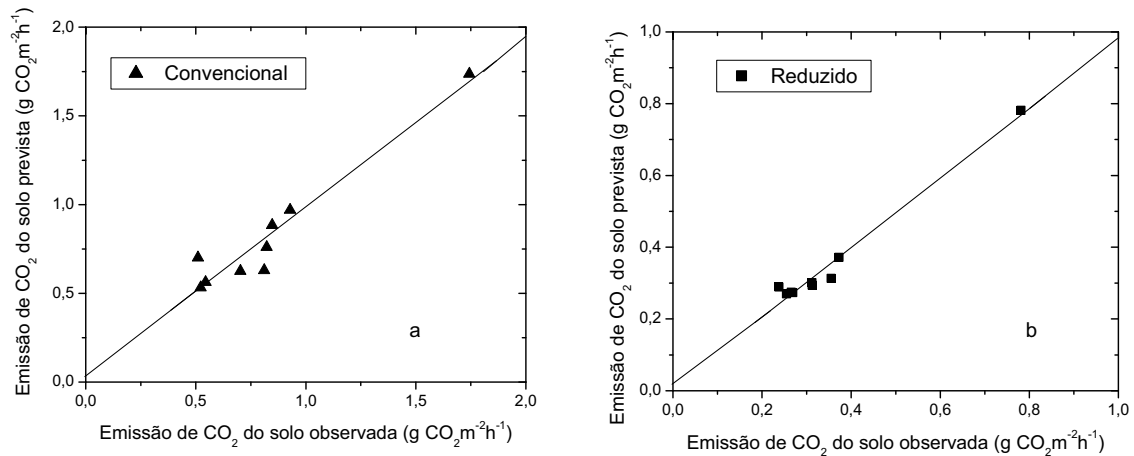


Figura 2.8. Valores observados versus previstos de emissão de CO₂ do solo após preparo convencional (a) e reduzido (b).

Em um estudo de longo prazo, YOO et al. (2006) relataram que a temperatura do solo e seu conteúdo de água, que são os fatores mais influentes na mineralização do carbono orgânico do solo, não explicam com sucesso os impactos do preparo sobre as taxas médias de mineralização de carbono orgânico do solo após preparo convencional. No entanto, o modelo baseado na Equação 6, que leva em consideração a variabilidade da temperatura e da umidade do solo, adicionado a uma função de decaimento exponencial no tempo, foi capaz de explicar satisfatoriamente (coeficientes de determinação de 93% e 98%) as emissões de prazo intermediário de CO₂ do solo após preparo (convencional e reduzido). Neste sentido, o tempo após preparo é uma variável importante para definir os eventos de emissão após preparo, o que está provavelmente associado ao carbono lábil adicional induzido após o evento de preparo e como ele decai ao longo do tempo.

2.4. Conclusões

Um modelo incluindo uma parte de decaimento exponencial no tempo foi capaz de descrever as emissões de curto prazo após preparo. O modelo que leva em consideração temperatura e umidade do solo, combinadas com uma função de decaimento exponencial no tempo (R^2 de 0,93 e 0,98) é mais eficiente para descrever a emissão de CO_2 ao longo do tempo, quando comparado a um modelo simples que considera apenas temperatura e umidade do solo (R^2 de 0,02 e 0,09).

Esforços adicionais devem ser realizados para entender a complexidade da emissão após preparo, mas é sustentado que usar um decaimento exponencial no tempo após preparo é um aspecto importante que deve ser levado em consideração.

2.5. REFERÊNCIAS

BRONICK, C.J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, Amsterdam, v.124, p.3-22, 2005.

ELLERT, B.H.; JANZEN, H.H. Short-term influence of tillage on CO_2 fluxes from a semi-arid soil on the Canadian prairies. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.50, p.21-32, 1999.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.

FORTIN, M.C.; ROCHETTE, P.; PATTEY, E. Soil carbon dioxide fluxes from conventional and no-tillage small-grain cropping systems. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.60, p.1541-1547, 1996.

HEALY, R.W.; STRIEGL, R.G.; RUSSEL, T.F.; HUTCHINSON, G.L.; LIVINGSTON, G.P. Numerical evaluation of static-chamber measurements of soil-atmosphere gas exchange: identification of physical processes. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.60, n.3, p.740-747, 1996.

JABRO, J.D.; SAINJU, U.; STEVENS, W.B.; EVANS, R.G. Carbon dioxide flux as affected by tillage and irrigation in soil converted from perennial forages to annual crops. **Journal of Environmental Management**, Amsterdam, v.88, n.4, p.1478-1484, 2008.

LAL, R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. **Geoderma**, Amsterdam, v. 123, p.1-22, 2004.

LA SCALA, N.; BOLONHEZI, D.; PEREIRA, G.T. Short-term soil CO₂ emission after conventional and reduced tillage of a no-till sugar cane area in southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.91, p.244-248, 2006.

LA SCALA, N.; LOPES, A.; MARQUES JR., J.; PEREIRA, G.T. Carbon dioxide emissions after application of tillage systems for a dark red latosol in souther Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.62, p.163-166, 2001.

LA SCALA, N.; LOPES, A.; PANOSSO, A.R.; CÂMARA, F.T.; PEREIRA, G.T. Soil CO₂ efflux following rotary tillage of a tropical soil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.84, p.222-225, 2005.

LA SCALA, N.; LOPES, A.; SPOKAS, K.; ARCHER, D.; REICOSKY, D.C. Short-term temporal changes of bare soil CO₂ fluxes after tillage described by first-order decay models. **European Journal of Soil Science**, Edinburgh, v.60, p.258-264, 2009a.

LA SCALA, N.; LOPES, A.; SPOKAS, K.; ARCHER, D.; REICOSKY, D.C. First-order decay models to describe soil C-CO₂ loss after rotary tiller. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.66, p.650-657, 2009b.

LA SCALA, N.; LOPES, A.; SPOKAS, K.; BOLONHEZI, D.; ARCHER, D.; REICOSKY, D.C. Short-term temporal changes of soil carbon losses after tillage described by a first-order decay model. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.99, p.108-118, 2008.

LIU, H.; ZHAO, P.; LU, P.; WANG, Y.S.; LIN, Y.B.; RAO, X.Q. Greenhouse gas fluxes from soils of different land-use types in a hilly area of south China. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v.124, n.1-2, p.125-135, 2008.

REICOSKY, D.C. Long-term effect of moldboard plowing on tillage-induced CO₂ loss. In: KIMBLE, J.M.; LAL, R. **Agricultural practices and policies for carbon sequestration in soil**. Boca Raton: CRC Press, 2002. p.87-97.

REICOSKY, D.C.; ALLMARAS, R.R. Advances in tillage research in North American cropping systems. In: SHRESTHA, A. **Cropping systems: trends and advances**. New York: Haworth Press, 2003. p.75-125.

REICOSKY, D.C.; ARCHER, D.W. Moldboard plow tillage depth and short-term carbon dioxide release. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.94, p.109-121, 2007.

ROCHETTE, P.; ANGERS, D.A. Soil surface carbon dioxide fluxes induced by spring, summer and fall moldboard plowing in a sandy loam. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.63, p.621-628, 1999.

SALOKHE, V.M.; RAMALINGAM, N. Effects of direction of rotation of a rotary tiller on properties of Bangkok clay soil. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v.63, p.65-74, 2001.

SAVAGE, K.E.; DAVIDSON, E.A. A comparison of manual and automated systems for soil CO₂ flux measurements: trade-offs between spatial and temporal resolution. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v.54, p.891-899, 2003.

SIX, J.; ELLIOTT, E.T.; PAUSTIAN, K. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.63, p.1350-1358, 1999.

STATSOFT. **STATISTICA Data Analysis Software System**. Versão 7. Disponível em:<www.statsoft.com/textbook>. acesso em: 01 jun. 2010.

YOO G.; NISSEN, T.M.; WANDER, M.M. Use of physical properties to predict the effects of tillage practices on organic matter dynamics in three Illinois soils. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.35, p.1576-1583, 2006.

CAPÍTULO 3 - EMISSÃO DE CO₂ DO SOLO CONSIDERANDO A INCORPORAÇÃO DE PALHA DE CANA-DE-AÇÚCAR E QUEBRA DE AGREGADOS APÓS PREPARO COM ENXADA ROTATIVA

RESUMO – O preparo do solo é um dos processos que aceleram a decomposição da matéria orgânica transferindo carbono para atmosfera, principalmente na forma de CO₂. Neste trabalho investigou-se o efeito do preparo com enxada rotativa sobre as emissões de CO₂ do solo em períodos curto, incluindo-se a presença de resíduos vegetais sobre a superfície. As emissões foram avaliadas por 15 dias após preparo em 3 parcelas: 1) sem preparo e sem palha superficial (SPs), 2) preparada com enxada rotativa sem a presença de palha na superfície (ERs) e 3) preparada com enxada rotativa com a presença de palha superficial (ERc). As emissões provenientes da ERc foram superior as demais, (0,777 g CO₂ m⁻² h⁻¹), sendo as menores emissões registradas na parcela SPs (0,414 g CO₂ m⁻² h⁻¹). As emissões totais indicaram que a diferença de C-CO₂ emitida à atmosfera corresponde a 3% do total de carbono adicional presente na palha na parcela ERc quando comparado a parcela ERs. O aumento da emissão da parcela SPs para ERs foi acompanhado de uma modificação na distribuição do tamanho de agregados, especialmente aqueles com diâmetro médio inferior a 2 mm. O aumento da emissão da parcela ERs para ERc esteve relacionado a uma diminuição da massa de palha na superfície, com fragmentação e incorporação da mesma no interior do solo. Quando se analisa a correlação linear entre emissão de CO₂ versus temperatura e umidade do solo, somente a emissão da ERc foi significativamente correlacionada (p<0,05) com a umidade do solo.

Palavras-chave: dióxido de carbono, preparo do solo, respiração do solo, variabilidade temporal da emissão de CO₂ do solo

3.1. Introdução

O dióxido de carbono (CO₂) é o gás que contribuiu com maior parcela ao efeito estufa adicional, que prevaleceu nas últimas décadas (IPCC, 2007). De acordo com as publicações do IPCC (Painel Intergovernamental de Estudos Sobre as Mudanças Climáticas) as emissões de CO₂ em diversos setores devem ser reduzidas, entre os quais se destaca o setor agrícola.

Mais especificamente, quando se considera o caso do manejo da cana-de-açúcar, especialmente no sudeste do Brasil, são reportadas duas situações contrastantes: o sistema de colheita cana crua (sem queima) e o de cana queimada. Atualmente o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar com 612 milhões de toneladas colhidas no ano de 2009, numa área de aproximadamente 7,5 milhões de hectares (CONAB, 2009). Aproximadamente 50% da área total é colhida sem a queima dos resíduos, sendo que até o ano de 2014 a colheita de cana-de-açúcar deverá ser totalmente sem queima no estado de São Paulo. A colheita tradicional da cultura da cana-de-açúcar envolve a queimada das folhas e resíduos, para facilitar o trabalho de colheita manual. Em contraste, na colheita mecanizada não há necessidade da queima, apenas esse fato já representa uma importante contribuição na diminuição da emissão de gases estufa e em adição, os resíduos da cultura são deixados na superfície do solo, permitindo um possível aumento no teor de matéria orgânica do solo (CERRI et al., 2007).

Assim, a racionalização de atividades agrícolas poderia auxiliar na mitigação do efeito estufa por meio do seqüestro de carbono no solo (CERRI et al., 2007; LAL, 2007), como o preparo do solo, por exemplo, cujo efeito sobre as perdas de carbono do solo tem sido estudado por diversos autores (BAYER et al., 2006; LA SCALA et al. 2005; LA SCALA et al., 2001; SARTORI et al., 2006).

WEST & POST (2002), como exemplo destes estudos, estimaram que a mudança nas práticas de manejo do solo, de convencional para reduzido, poderia resultar num seqüestro na taxa de $57 \pm 14 \text{ g de C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ em áreas agrícolas nos primeiros 5 a 10 anos de conversão. Este resultado é corroborado por diversos estudos

de curta duração no qual a emissão é acompanhada, mostrando que após preparo do solo a perda de carbono via CO_2 para atmosfera é também aumentada (ELLERT & JANZEN, 1999; LA SCALA et al., 2006; PRIOR et al., 2000; REICOSKY & LINDSTROM, 1993; ROCHETTE & ANGERS, 1999). Emissões de até algumas toneladas de $\text{CO}_2 \text{ ha}^{-1}$ têm sido registradas em parcelas onde o preparo do solo foi conduzido em adição aquela da parcela sem distúrbio, em poucas semanas.

A enxada rotativa é um dos implementos de preparo de solo mais utilizados no Brasil, especialmente na horticultura. Número de facas por rotor, rotação das facas, posição da placa de impacto e velocidade de trabalho podem ser ajustadas para promover uma maior fragmentação do solo, proporcionando melhor condição de desenvolvimento aquelas culturas (SALOKHE & RAMALINGAM, 2001). Este intenso preparo do solo promove redução do diâmetro dos agregados do solo e leva a uma rápida oxidação da matéria orgânica do solo e fluxo de CO_2 para a atmosfera (BALOTA et al., 2004).

O preparo do solo é uma das principais atividades agrícolas que influenciam as perdas de carbono do solo via emissão de CO_2 para atmosfera (JACINTHE & LAL, 2005; LAL, 2007). A influência do preparo sobre as emissões imediatas ou quase imediatas de CO_2 para atmosfera tem sido estudada por diversos autores, na qual se varia o sistema de preparo bem como o tipo de solo. A grande maioria dos resultados experimentais indicam aumento da emissão induzida pelo preparo do solo, que perdura por horas, às vezes semanas após preparo. Este aumento tem sido atribuído a dois fatores principais: a) a quebra dos agregados, expondo matéria orgânica antes protegida à atividade microbiana; b) a descompactação do solo e subsequente aumento da constante de decaimento da matéria orgânica lábil (constante k), especialmente via aumento na oxigenação e transporte gasoso no interior do solo, (DE GRYZE et al., 2006; GRANDY & ROBERTSON, 2007; SIX et al., 1999).

O preparo do solo pode provocar um terceiro efeito adicional sobre as emissões quando incorpora e fragmenta material orgânico proveniente de restos da cultura agrícola anterior sobre o solo, como é o caso da presença da palha da cana-de-açúcar.

Neste sentido, objetivou-se neste trabalho caracterizar as emissões de CO₂ do solo induzidas pelo preparo com enxada rotativa em condições de incorporação de palha de cana-de-açúcar. No caso concreto, o interesse foi diferenciar os efeitos do preparo do solo sobre as emissões adicionais, distinguindo-se aqueles oriundos da quebra dos agregados da contribuição dos resíduos incorporados ao solo.

3.2. Material e Métodos

3.2.1. Localização e caracterização da área experimental

O trabalho foi realizado na área experimental (Figura 3.1) pertencente à Fazenda Barrinha localizada no município de Barrinha - SP (21°13'29" S; 48° 6'49" O, WGS84), com altitude média de 542 m. Os experimentos foram realizados no período de 12 à 27 de julho de 2008.



Figura 3.1. Área experimental, perímetro em amarelo, localizada no município de Barrinha, próximo ao Câmpus da FCAV/UNESP.

O clima da região é classificado como mesotérmico com inverno seco (Cwa), de acordo com Köppen. A precipitação média anual é de 1380 mm, com uma distribuição de chuva concentrada no período de outubro a março, enquanto os meses entre abril e setembro são relativamente secos. Ao longo dos experimentos e todo mês de julho não houve chuva, sendo as últimas ocorrências registradas dia 01 e 21 de junho com 3 e 4 mm, respectivamente.

A área experimental (Figura 3.2) é caracterizada por um Latossolo Vermelho distrófico de textura muito argilosa (EMBRAPA, 2006) e um relevo plano com declividade de 0,5%.



Figura 3.2. Visão geral da área experimental, momentos antes da instalação do experimento.

Amostras compostas (0,00 – 0,20 m) de solo da área foram coletadas e submetidas à análise química e física, que indicou valor de pH em CaCl_2 de 5, caracterizando condição de reação ácida do solo, teor de matéria orgânica de 311 g kg^{-1} , o que equivale a aproximadamente 181 g kg^{-1} de carbono orgânico total, teor de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e H+Al de, respectivamente, 19,1, 6,9, 1,1 e $34,3 \text{ mmol}_c\text{dm}^{-3}$, P_{resina} de 15 mg dm^{-3} , capacidade de troca de cátions (CTC) de $61 \text{ mmol}_c\text{dm}^{-3}$, saturação de base (V%) de 440 g kg^{-1} e teor de argila, silte e areia de $644,2 \text{ g kg}^{-1}$, $165,5 \text{ g kg}^{-1}$ e $190,3 \text{ g kg}^{-1}$, respectivamente.

A área experimental está inserida na província geomorfológica do Planalto Ocidental Paulista. O material geológico na área estudada está relacionado aos arenitos do Grupo Bauru, Formação Adamantina limítrofe para o Basalto do Grupo São Bento Formação Serra Geral (IPT, 1981).

Ressalta-se que o local possui histórico de mais de 15 anos na utilização para produção de cana-de-açúcar no sistema de colheita sem queima, preparo de solo reduzido e adubação mineral sem revolvimento da palhada com fórmula contendo nitrogênio e potássio (Figura 3.3).



Figura 3.3. Histórico da área experimental é caracterizado por preparo de solo reduzido (A), colheita da cana-de-açúcar sem queima (B) e adubação sem revolvimento da palhada (C).

No momento da definição das parcelas experimentais estava presente sobre a superfície do solo uma massa de aproximadamente 15 t/ha de palha de cana-de-açúcar

da variedade SP80-1842, de relação C:N próxima a 125:1, como restos da cultura anterior *Saccharum sp.*.

3.2.2. Tratamentos e avaliação da respiração, temperatura e umidade do solo

Foram estabelecidas três parcelas, com as dimensões de 10 x 2 m cada (comprimento e largura, respectivamente), sendo os seguintes tratamentos (Figura 3.4): preparo com enxada rotativa na presença de cobertura vegetal (ERc); preparo com enxada rotativa sem a presença de cobertura vegetal (ERs) e parcela sem preparo e sem presença de cobertura vegetal na superfície (SPs).



Figura 3.4. Tratamentos avaliados no experimento: (A) ERc, (B) ERs e (C) SPs.

O preparo do solo com enxada rotativa é pouco, ou até mesmo, não utilizado na cultura da cana-de-açúcar. No entanto, para fins de verificação das hipóteses do trabalho foi aplicado ao solo.

Em ERc e ERs, utilizou-se um trator Massey Ferguson 290 4x2 TDA de potência no motor de 77,3 kW, cuja velocidade de trabalho empregada foi de aproximadamente de 2,5 km h⁻¹. A enxada rotativa trabalhou com a placa de impacto abaixada, rotação do rotor de aproximadamente 153 rpm e com 32 facas do tipo C, passando 3 vezes em cada tratamento (para intensificar a desagregação do solo e incorporação dos resíduos orgânicos ao solo) na profundidade média de trabalho de 8 cm.

Na remoção da palha, tratamentos ERs e SPs, foi utilizado um trator Massey Ferguson 292 4x2 TDA, acoplado a uma enleiradora de palha conforme apresentado na Figura 3.5.



Figura 3.5. Trator MF 292 TDA acoplado a uma enleiradora de palha. Equipamentos utilizados para remoção da palhada sobre o solo nos tratamentos ERs e SPs.

Após o preparo do solo, 6 colares de PVC foram distribuídos numa diagonal ao formato da parcela (Figura 3.6) e inseridos 3 cm dentro do solo de forma ordenada, com 1,7 m de distância aproximadamente entre eles, com a função de servir de suporte ao equipamento utilizado na mensuração da respiração do solo.



Figura 3.6. Distribuição dos colares de PVC nas parcelas.

A emissão de CO_2 do solo foi computada utilizando-se o sistema LI-8100 (Figura 3.7), fabricado pela companhia LI-COR, Nebraska, EUA (HEALY et al., 1996).

Além da emissão de CO_2 foram também medidas a temperatura (0,0 – 0,2 m) e umidade volumétrica do solo (0,00 – 0,12 m) próximo aos colares, todos os dias de estudo. A temperatura foi acompanhada com sensor do próprio sistema LI-8100, já a umidade do solo foi mensurada utilizando um TDR (“Time Domain Reflectometry”), denominado “Hydrosense System” (Campbell Scientific, Utha, EUA), Figura 3.7. As medições do fluxo de CO_2 , temperatura e umidade ocorreram do dia 12 até o dia 19 de julho de 2008, com intervalos de 24 horas entre as medições. A partir do dia 19 de julho o intervalo entre medições foi de 48 horas, até o dia 27 de julho de 2008, último dia de medição. Sendo assim, foram 12 avaliações em 15 dias de estudo. O horário estabelecido para medição da emissão de CO_2 , umidade e temperatura, foi no período da manhã, a partir das 7h30min.

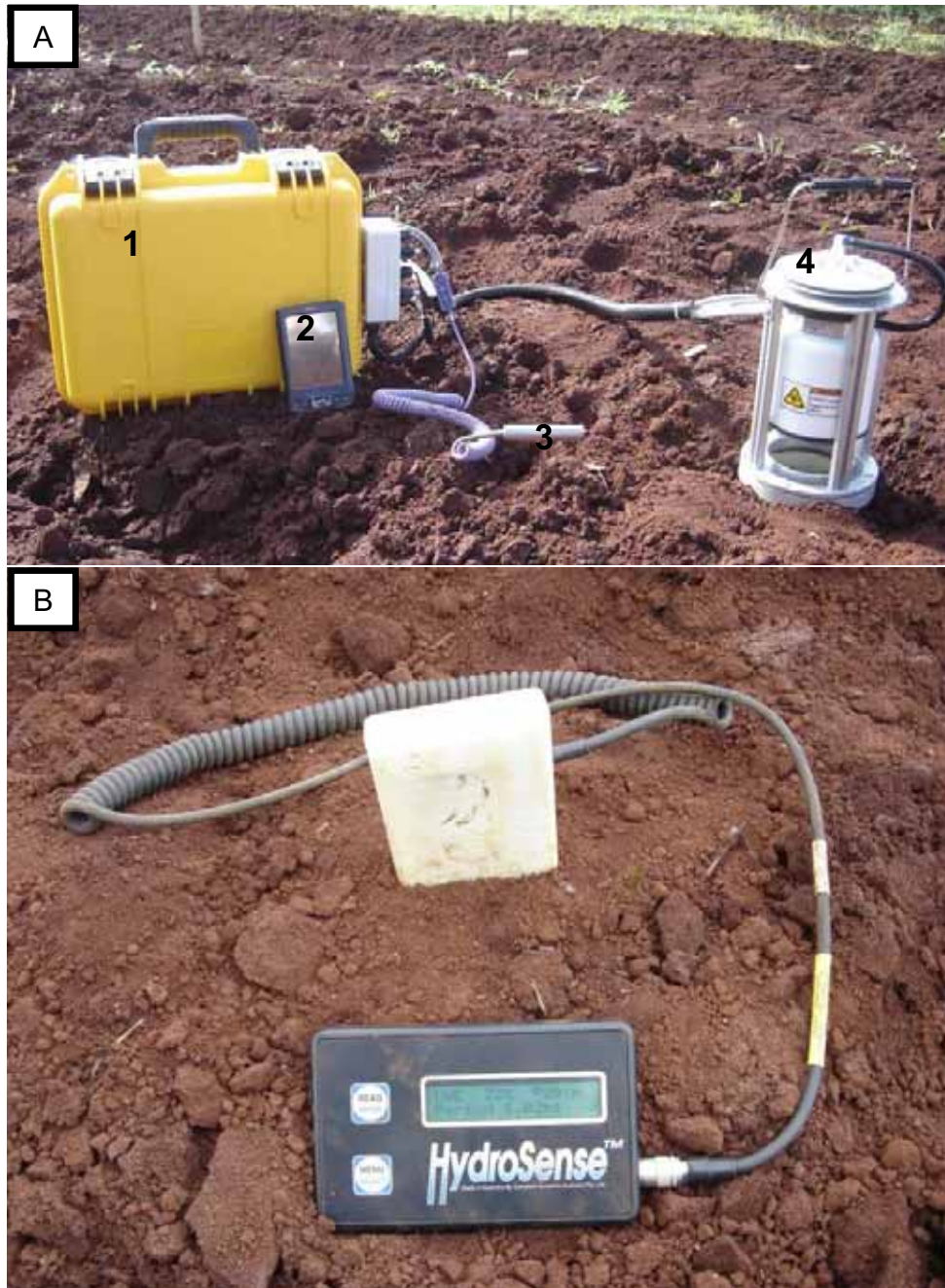


Figura 3.7. A) Equipamento LI-8100 utilizado para avaliar a emissão de CO_2 e temperatura do solo. 1) Console; 2) Palm top; 3) Sensor de temperatura inserido no interior do solo; 4) Câmara para avaliação da emissão de CO_2 do solo inserida sobre o colar de PVC. B) "Hydrosense System" (TDR), sistema portátil utilizado para mensurar a umidade do solo.

Foram retiradas 3 amostras de solo de cada tratamento na profundidade de 0,0 – 0,2 m, para avaliar o estado de agregação do solo. A estabilidade dos agregados foi determinada pelo método descrito por KEMPER & CHEPIL (1965).

O material foi primeiramente seco ao ar e peneirado em malha de 7,93 mm. O conjunto de peneiras utilizado foi composto por malhas de 4, 2, 1, 0,5, 0,250 e 0,125 mm. Em cada jogo de peneiras as subamostras de solo com 50 g foram colocada, sobre a peneira de maior malha (4 mm), e umedecidas com álcool. Em seguida, o conjunto de peneiras foi colocado em tanque com água e submetido à agitação vertical lenta durante 15 min. O solo retido em cada peneira foi transferido para frascos com auxílio de jatos de água, na seqüência foram colocados na estufa para secagem a 105 °C e posteriormente foram pesados, indicando assim a distribuição de agregados retidos em cada uma das peneiras de diâmetro diferenciado, Figura 3.8. Mediante os resultados obtidos, foi calculado o diâmetro médio geométrico (DMG), que é adotado como índice de estabilidade, de acordo com MAZURACK (1950).



Figura 3.8. Equipamentos utilizados na análise da estabilidade do agregado (SIQUEIRA, 2007).

A análise dos dados foi feita com o auxílio dos softwares Microsoft® Excel versão 2007, Microcal™ Origin™ versão 6.1., Sisvar versão 4.6, Statistica versão 6.0. e SAS (“Statistical Analysis Systems”).

Os resultados foram analisados utilizando-se a estatística clássica e análises gráficas. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado (DIC) com medidas repetidas no tempo. Os resultados foram analisados pela estatística descritivas sendo as médias comparadas por diferenças mínimas significativas por meio do procedimento de modelos lineares gerais, PROC GLM, SAS (SAS, 1998). Concomitantemente às análises estatísticas, as pressuposições básicas da análise de variância, normalidade dos erros e homogeneidade das variâncias, foram testadas para as variáveis do estudo: emissão de CO₂, temperatura e umidade do solo.

Para as análises da emissão de CO₂ ao longo do tempo após preparo os dados foram transformados para a base Ln (logaritmo neperiano), de forma a ajustar uma regressão linear.

3.3. Resultados e Discussão

A Figura 3.9 apresenta a emissão de CO₂ (média com metade da barra de erro padrão) após preparo do solo nas parcelas estudadas. Imediatamente após o preparo do solo as maiores emissões chegaram a 1,365 g CO₂ m⁻² h⁻¹ e as menores a 0,829 g CO₂ m⁻² h⁻¹ nas parcelas ERc e SPs, respectivamente. As emissões da parcela ERs estiveram com valores intermediários durante quase todo o período de estudo, abaixo das emissões de ERc e acima de SPs. Um valor similar de emissão foi atingido após 15 dias do preparo do solo, próximo a 0,42 g CO₂ m⁻² h⁻¹, como indicado pela sobreposição das barras de erro padrão da média, inclusive.

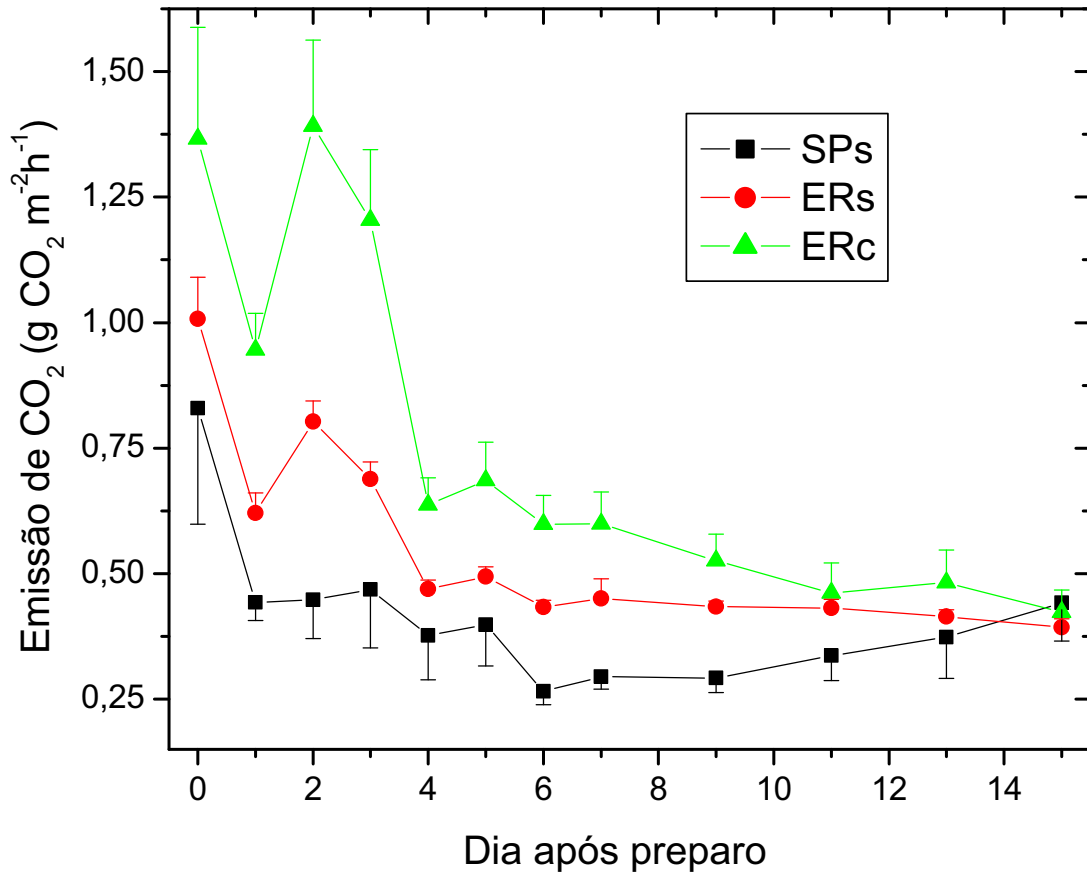


Figura 3.9. Média da emissão de CO₂ do solo (com metade de erro padrão) nas parcelas SPs, ERs e ERc após preparo do solo.

No dia zero, imediatamente após o preparo, pôde-se observar principalmente no tratamento SPs um efeito de perturbação do solo, devido à remoção de resíduos e inserção do colar de PVC no solo.

Nota-se também que as emissões tiveram um aspecto de queda exponencial ao longo do tempo (Figura 3.10), comportamento este característico desse tipo de estudo de emissão após preparo (AL-KAISI & YIN, 2005; FORTIN et al., 1996; LA SCALA et al., 2006, LA SCALA et al., 2005, LA SCALA et al., 2001; LA SCALA et al., 2001a; REICOSKY & LINDSTROM, 1993; ROCHETTE & ANGERS, 1999; TEIXEIRA et al., 2010). A esperada queda exponencial na emissão ao longo do tempo após o preparo é oriunda segundo ELLERT & JANZEN (1999) de uma cinética de decaimento do

carbono lábil do solo, liberado pelo preparo, governada por uma equação de decaimento da emissão de primeira ordem, ao longo do tempo.

Correlação significativa ($p < 0,05$) da emissão de CO_2 do solo com o tempo após preparo foi registrada em ERc e ERs, como pode ser observado na Figura 3.10. O coeficiente de determinação (R^2) da reta nas figuras abaixo, entre o $\text{Ln}(\text{FCO}_2)$ e o tempo, foram de 74 e 66% nos tratamentos ERc e ERs, respectivamente.

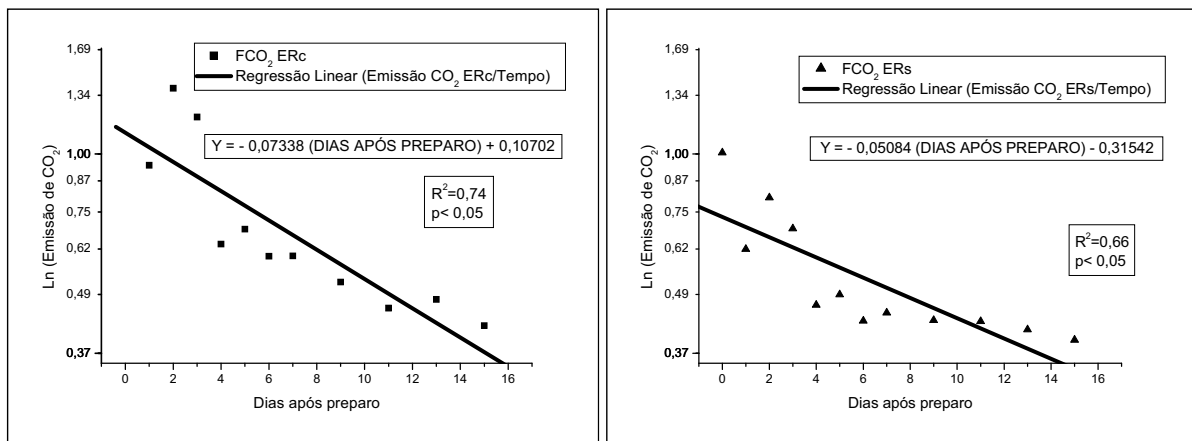


Figura 3.10. Gráficos do logaritmo (Ln) das emissões versus o tempo após preparo, tratamentos ERc e ERs.

A estatística descritiva da emissão de CO_2 , temperatura e umidade do solo ao longo do período de estudo são apresentadas na Tabela 3.1. Assim como já observado na Figura 3.9, o tratamento ERc teve a emissão média superior ($p < 0,1$), $0,777 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, enquanto a menor emissão média foi registrada na parcela SPs, $0,414 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. As análises de máximo, mínimo, desvio e erros padrão indicam ainda que as maiores variações ocorreram também na parcela ERc, que por exemplo apresentou valores de médias diárias variando de $1,391$ a $0,423 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. O tratamento SPs apresentou temperaturas mais baixas ($p < 0,1$) em relação aos outros preparos, com médias diárias variando de $11,2$ a $41,1 \text{ }^\circ\text{C}$. Nos tratamentos com o preparo do solo, a parcela ERs apresentou menores valores de temperatura ($p < 0,1$) em relação à parcela ERc com valores mínimos de $13,3$ e máximo de $38,9 \text{ }^\circ\text{C}$; enquanto em ERc variou entre $14,8$ e $42,4 \text{ }^\circ\text{C}$, mínimos e máximos respectivamente.

A umidade nos três tratamentos mostrou-se baixa, quando comparada à capacidade de campo do solo em questão (REICHARDT, 1988), durante a execução do experimento com os maiores valores observados na parcela SPs ($p < 0,1$), com extremos de 15,5 e 9,5 %, no primeiro e último dia de estudo respectivamente. Pressupõem-se que o preparo do solo proporcionou melhores condições de aeração nas parcelas ERs e ERc, o que facilitou as trocas gasosas para atmosfera, e conseqüente redução ainda maior na umidade do solo. Resultados similares foram observados por LA SCALA et al. (2006), onde a umidade do solo nas parcelas após preparo foi significativamente reduzida quando comparada à parcela sem distúrbio, sendo tal redução persistente ao longo de pelo menos 3 semanas após preparo. Assim, a umidade manteve-se maior na parcela SPs quando comparada com aquelas preparadas com enxada rotativa. Houve dias em que a umidade do solo esteve tão baixa quanto 6,5% na parcela ERs, por exemplo.

Tabela 3.1. Estatística descritiva da emissão de CO₂, temperatura e umidade do solo ao longo dos 15 dias de estudo.

	Média	Desvio Padrão	Erro Padrão	Mínimo	Máximo
Emissão de CO ₂ (g m ⁻² h ⁻¹)					
F-SPs	0,414 c	0,147	0,043	0,265	0,829
F-ERs	0,553 b	0,191	0,055	0,393	1,007
F-ERc	0,777 a	0,357	0,103	0,423	1,391
Temperatura do solo (°C)					
T-SPs	20,6 c	10,1	2,9	11,2	41,1
T-ERs	24,8 b	8,7	2,5	13,3	38,9
T-ERc	30,3 a	7,5	2,2	14,8	42,4
Umidade do solo (% volume)					
U-SPs	13,1 a	1,7	0,5	9,5	15,5
U-ERs	8,5 c	1,4	0,4	6,5	11,2
U-ERc	10,4 b	1,5	0,4	8,0	12,7

N=72. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 10% de probabilidade.

Ao analisar a correlação linear entre emissão de CO₂, temperatura e umidade do solo observou-se que os tratamentos SPs e ERs não apresentaram correlação significativa ($p > 0,05$). Porém, a emissão do tratamento ERc foi significativamente correlacionada ($p < 0,05$) com a umidade do solo nessa parcela ao longo do estudo ($R^2 = 0,72$), no entanto, não apresentou uma correlação linear significativa com a temperatura do solo. A umidade do solo se mostra relacionada às variações da emissão de CO₂ quando, no geral, esta é um fator limitante, controlando especialmente a variabilidade temporal da emissão (EPRON et al., 2004; KANG et al., 2003, KANG et al., 2000). Nos trópicos, uma relação mais significativa com a umidade do solo é mais comumente observada, e não com a temperatura que possui, usualmente, valores próximos à condição ótima para a atividade microbiana (HASHIMOTO et al., 2004; SCHWENDENMANN et al., 2003).

Supostamente, o aumento da emissão de CO₂ da parcela SPs para a parcela ERs está associado ao aumento da constante de decaimento, fator k, e também a introdução de carbono lábil ao processo de decaimento na parcela ERs devido a quebra dos agregados (Figura 3.12) e exposição a atividade microbiana (DE GRYZE et al., 2006; GRANDY & ROBERTSON, 2007; SIX et al., 1999). Em estudos conduzidos recentemente o adicional da emissão de CO₂ do solo após preparo, perante a parcela sem distúrbio, foi modelada a partir das suposições acima descritas (LA SCALA et al., 2009; LA SCALA et al., 2009a, LA SCALA et al., 2008).

Em relação aos resíduos vegetais, no geral, apresentam na sua composição diversos compartimentos de carbono, dentre os quais existem frações rapidamente metabolizáveis por microorganismos do solo (THORBURN et al., 2001). Fração esta que estaria diretamente relacionada ao acréscimo nas emissões devido a presença da palha no momento do preparo e ao longo dos 15 dias de estudo.

As emissões totais de CO₂ do solo, Figura 3.11, nas parcelas SPs, ERs e ERc no período de 15 dias após preparo foram de 136,84, 183,37 e 249,74 g CO₂ m⁻², respectivamente. Esses valores reforçam as hipóteses de que tanto a quebra dos agregados quanto a introdução de carbono lábil no solo via palha aceleram as emissões.

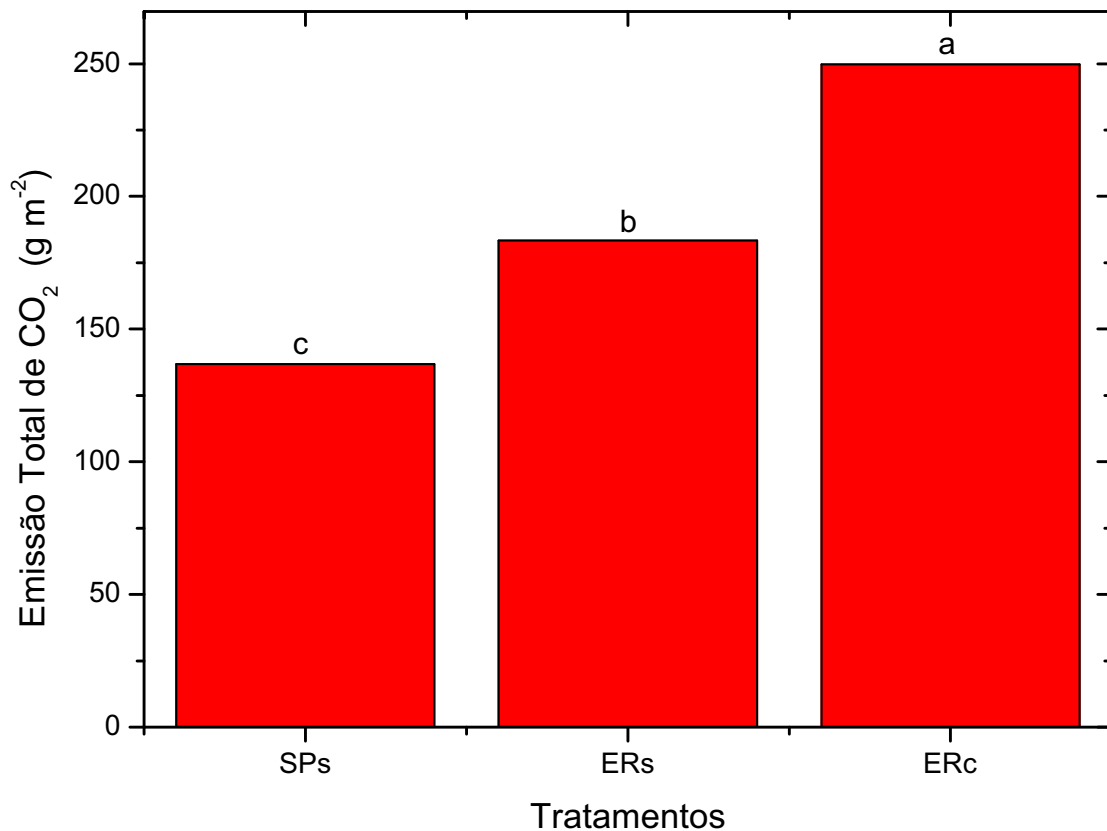


Figura 3.11. Emissão total de CO₂ do solo ao longo do período de 15 dias nas parcelas estudadas, integral das curvas de emissão no tempo. Valores seguidos pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 10% de probabilidade.

O primeiro aumento ocorrido na emissão total de CO₂ do solo, de SPs para ERs é devido ao efeito de aumento na constante k e introdução de carbono lábil, antes protegido, ao processo de decaimento via quebra dos agregados. Este primeiro aumento corresponde a 46,53 g CO₂ m⁻², um acréscimo de 34% sobre as emissões da parcela SPs. Já o segundo aumento observado, de ERs para ERc, é devido somente a introdução de carbono lábil presente na palha ao processo de decaimento, pois o efeito do preparo do solo sobre o aumento da constante k e quebra dos agregados é o mesmo em ambas as parcelas (ERs e ERc), devido a aplicação do mesmo sistema de preparo (enxada rotativa) sob as mesmas condições. Este acréscimo corresponde a 66,37 g CO₂ m⁻², ou 36% de aumento nas emissões sobre aquela da parcela ERs.

A diferença da emissão entre parcelas, quando convertida em C-CO₂, indica que durante o período de duas semanas 37,32, 50,01 e 68,11 gramas de C-CO₂ m⁻² foram emitidas das parcelas SPs, ERs e ERc, respectivamente. Assim, o aumento observado foi de 18,1 g C-CO₂ m⁻² de ERs para ERc, provavelmente, proveniente da massa de palha incorporada no solo. Tal perda corresponde a 181 kg C-CO₂ ha⁻¹, que é pouco, se for considerado que a massa de palha existente na superfície no momento do preparo era de 15 toneladas por hectare, ou 6 toneladas de carbono equivalente por hectare, 40% da massa de palha de cana de açúcar (DE OLIVEIRA et al., 1999). Desse modo, aproximadamente 3% do total de carbono presente na massa de palha foi transferida a atmosfera no período de 15 dias após o preparo do solo, por conta da incorporação e fragmentação promovida pela enxada rotativa.

As Figuras 3.12 e 3.13 apresentam evidências dos principais processos responsáveis pela emissão adicional quando se compara as parcelas SPs e ERs bem como ERs e ERc. A porcentagem de massa de agregados retida em peneiras de diferentes diâmetros (Figura 3.12) nos tratamentos SPs e ERs indica que o solo após preparo com enxada rotativa teve sua distribuição de agregados modificada. Os resultados indicam diminuição na presença de agregados com diâmetros igual ou superior a 4 mm e um aumento na distribuição de agregados com diâmetro abaixo deste valor, em especial entre 2 – 0,125 mm. Em termos percentuais, as peneiras de 0,5 e 0,25 mm tiveram o maior e significativo ($p < 0,05$) aumento de peso retido registrando 79% e 95%, respectivamente. Supostamente, a quebra dos agregados de dimensão igual ou superior a 4 mm foi então responsável pela disponibilização de carbono lábil adicional a atividade microbiana, carbono esse antes aprisionado dentro ou entre os agregados.

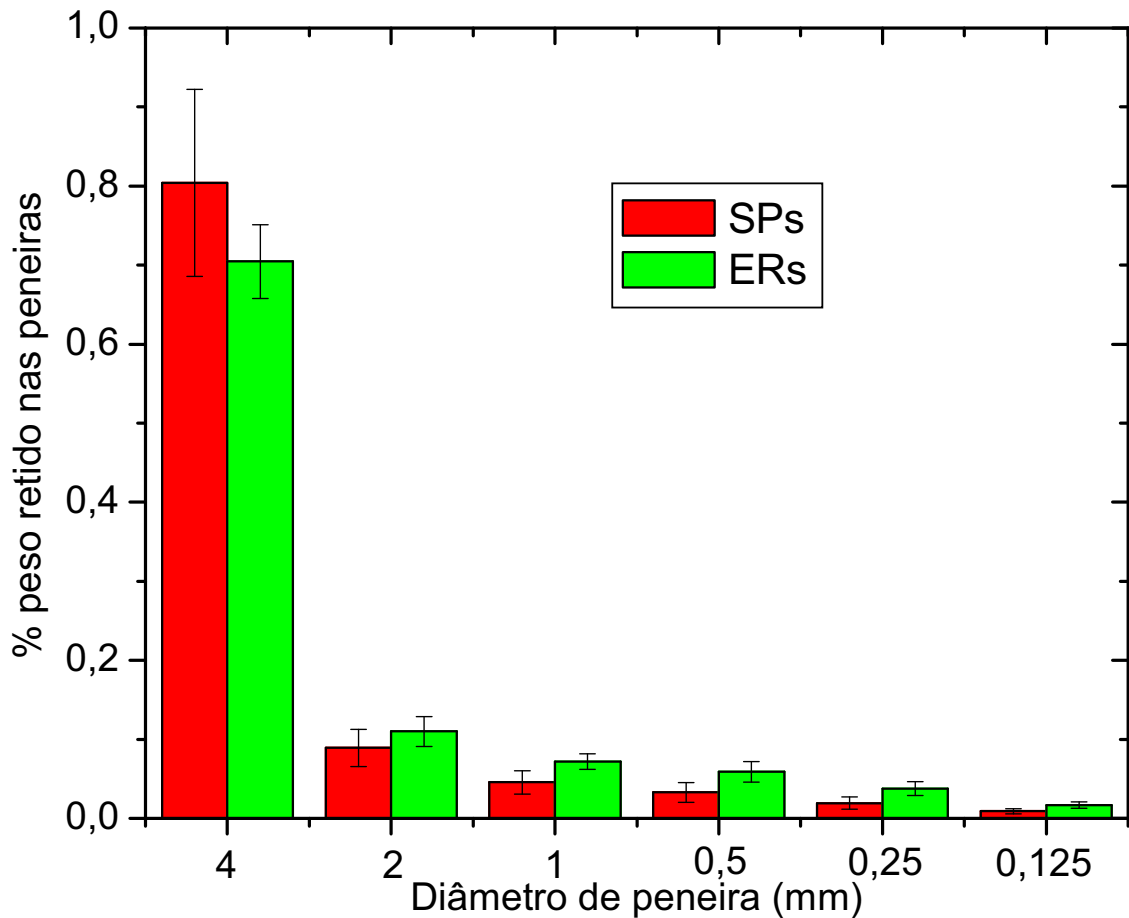


Figura 3.12. Distribuição do peso de agregados (com erro padrão) retidos em peneiras de diferentes diâmetros, de solos coletados nas parcelas SPs e ERs.

A Figura 3.13 apresenta duas fotos retiradas do local de estudo da parcela ERc, antes e após preparo do solo, para comparação. Nota-se que uma expressiva porção da massa de palha presente inicialmente na superfície do solo (Figura 3.13A) foi incorporada devido ao efeito do preparo com enxada rotativa. Ainda, é possível notar também uma diminuição no comprimento da palha, devido ao efeito de fragmentação promovido pela enxada rotativa, comportamentos estes ressaltados por diversos autores (BALOTA et al., 2004; SALOKHE & RAMALINGAM, 2001). A fragmentação dos resíduos bem como a incorporação no interior do solo (Figura 3.13B) são fatores favoráveis a decomposição promovida pela atividade microbiana e subsequente emissão de CO_2 para atmosfera.



Figura 3.13. A) Parcela ERc antes da aplicação do preparo do solo, com grande massa de palha na superfície e de tamanho maior quando comparada a Figura 3.13B; B) Parcela ERc após aplicação do preparo do solo com enxada rotativa, com menor massa de palha na superfície e de tamanho menor, quando comparada a Figura 3.13A.

Similarmente ao realizado no Capítulo 2, a emissão de CO₂ do solo após preparo com enxada rotativa na condição sem e com palha foi ajustada de acordo com as funções F_I e F_{II} (Equações 5 e 4, do Capítulo 2). Os coeficientes de determinação (R^2) para os ajustes (Tabela 3.2), utilizando a função que se baseia nas variações da temperatura e umidade do solo somente (F_I) foram 0,38 e 0,71 para os tratamentos ERs e ERc, respectivamente, com a maioria dos parâmetros estimados significativos. Porém, o decaimento exponencial ao longo do tempo após preparo (F_{II}) melhor se ajustou em ambos os tratamentos, quando comparada a equação baseada na temperatura e umidade do solo, explicando 68 e 76% da variabilidade da emissão após preparo em ERs e ERc, respectivamente.

Tabela 3.2. Parâmetros estimados \pm erro padrão e R^2 dos ajustes para os tratamentos estudados.

Tratamento	Modelo 1:	R^2	Modelo 2:	R^2
	$F_I = a_1 T + a_2 \theta$		$F_{II} = +a_3 e^{-a_4 t}$	
ERs	$a_1 = 0,005768 \pm 0,045136$ NS $a_2 = 0,049322 \pm 0,013777$	0,38	$a_3 = 0,811244 \pm 0,068184$ $a_4 = 0,068875 \pm 0,015651$	0,68
ERc	$a_1 = -0,018198 \pm 0,006073$ $a_2 = 0,128810 \pm 0,018076$	0,71	$a_3 = 1,303782 \pm 0,117946$ $a_4 = 0,097440 \pm 0,019722$	0,76

NS: não significativo $p > 0,10$. a_1 em $\text{gCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ e a_2 em $\text{gCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ \%vol}^{-1}$ a_3 em $\text{gCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ e a_4 em dias^{-1} . R^2 : coeficiente de determinação.

No entanto, a equação F_{CO_2} (Equação 6, do Capítulo 2) contendo o decaimento exponencial no tempo após o preparo acoplado a um modelo para a dependência linear com temperatura e umidade do solo não se ajustou de forma significativa ($p > 0,10$) aos dados de emissão após preparo, apresentando valores de R^2 inferiores (Tabela 3.3), especialmente quando se compara ao ajuste da equação F_{II} somente e com a maioria dos parâmetros estimados não significativos.

Tabela 3.3. Parâmetros estimados \pm erro padrão e R^2 dos ajustes para os tratamentos estudados.

Tratamento	Modelo 3	R^2	Emissão Total (g CO ₂ m ⁻²) Observado / Estimado
	$F_{CO_2} = a_1 T + a_2 \theta + a_3 e^{-a_4 t}$		
ERs	$a_1 = 0,006619 \pm 0,006708$ NS	0,55	183,37 / 186,17
	$a_2 = 0,070913 \pm 0,034152$ NS		
	$a_3 = -0,145604 \pm 0,415383$ NS		
	$a_4 = -0,054245 \pm 0,135787$ NS		
ERc	$a_1 = -0,011578 \pm 0,009842$ NS	0,80	249,74 / 251,03
	$a_2 = 0,135856 \pm 0,054519$		
	$a_3 = -0,181777 \pm 0,785238$ NS		
	$a_4 = -0,063067 \pm 0,207099$ NS		

NS: não significativo $p > 0,10$. a_1 em gCO₂ m⁻² h⁻¹ °C⁻¹ e a_2 em gCO₂ m⁻² h⁻¹ %vol⁻¹ a_3 em gCO₂ m⁻² h⁻¹ e a_4 em dias⁻¹. R^2 : coeficiente de determinação.

3.4. Conclusões

As emissões de CO₂ do solo foram afetadas pela presença de palha superficial no momento do preparo do solo, significando um aumento nas emissões de C-CO₂ correspondente a 3% do total de carbono equivalente da palha.

A emissão total do tratamento ERc foi superior a ERs e SPs, respectivamente, em 36% e 83%.

O efeito da quebra dos agregados associado ao aumento da constante de decaimento (k), proporcionou incremento de 34% na emissão de CO₂ do solo. Já a introdução de carbono lábil presente na palha ocasionou aumento de 36% na emissão.

Foi constatada uma modificação na distribuição do tamanho dos agregados do solo após preparo com enxada rotativa, reduzindo a massa de agregados de diâmetro

maior ou igual a 4 mm e aumentando para diâmetros inferiores a 2 mm, em especial 0,5 mm e 0,25 mm.

A baixa relação da emissão de CO₂ do solo com a temperatura e umidade do solo, e seu aspecto exponencial decrescente ao longo do tempo, indicam que o preparo introduz carbono lábil ao processo de decaimento, seja via quebra dos agregados ou via incorporação de resíduos da cultura no interior do solo.

A variabilidade temporal da emissão de CO₂ após preparo do solo com enxada rotativa melhor se ajustou a um modelo exponencial decrescente no tempo quando comparado a um ajuste em função da temperatura e umidade do solo.

3.5. REFERÊNCIAS

AL-KAISI, M.M.; YIN, X.H. Tillage and crop residue effects on soil carbon and carbon dioxide emission in corn-soybean rotations. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.34, p.437-445, 2005.

BAYER, C.; LOVATO, T.; DIECKOW, J.; ZANATTA, J. A.; MIELNICZUK, J. A method for estimating coefficients of soil organic matter dynamics based on long-term experiments. **Soil Tillage & Research**, Amsterdam, v.91, p.217-226, 2006.

BALOTA, E.L.; COLOZZI FILHO, A.; ANDRADE, D.S.; DICK, R.P. Long-term tillage and crop rotation effects on microbial biomass and C and N mineralization in a Brazilian oxisol. **Soil Tillage & Research**, Amsterdam, v.77, p.137-145, 2004.

CERRI, C. E. P.; SPAROVEK, G.; BERNOUX, M.; EASTERLING, W. E.; MELILLO, J. M.; CERRI, C. C. Tropical agriculture and global warming: impacts and mitigation options. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.64, n.1, p.83-99, 2007.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar, terceiro levantamento. Brasília, dezembro/2009.

DE GRYZE, S.; SIX, J.; MERCKX, S. Quantifying water-stable soil aggregate turnover and its implication for soil organic matter dynamics in a model study. **European Journal of Soil Science**, v.57, p.693-707, 2006.

DE OLIVEIRA, M.W.; TRIVELIN, P.C.O.; PENATTI, C.P.; PICCOLO, M.C. Field decomposition and release of sugar cane trash nutrients. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, p.2359–2362, 1999.

ELLERT, B.H.; JANZEN, H.H. Short-term influence of tillage on CO₂ fluxes from a semi-arid soil on the Canadian prairies. **Soil Tillage & Research**, Amsterdam, v.50, p.21-32, 1999.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, 2006. 306p.

EPRON, D.; NOUVELLON, Y.; ROUPSARD, O.; MOUVONDY, W.; MABIALA, A.; SAINT-ANDRÉ, L.; JOFFRE, R.; JOURDAN, C.; BONNEFOND, J.; BERBIGIER, P.; HAMEL, O. Spatial and temporal variations of soil respiration in a Eucalyptus plantation in Congo. **Forest Ecology and Management**, v.202, p.149-160, 2004.

FORTIN, M.C.; ROCHETTE, P.; PATTEY, E. Soil carbon dioxide fluxes from conventional and no-tillage small-grain cropping systems. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.60, p.1541-1547, 1996.

GRANDY, A. S.; ROBERTSON, G. P. Land-use intensity effects on soil organic carbon accumulation rates and mechanisms. **Ecosystems**, v.10, p.58-73, 2007.

HASHIMOTO, S., TANAKA, N.; SUZUKI, M.; INOUE, A.; TAKIZAWA, H.; KOSAKA, I.; TANAKA, K.; TANTASIRIN, C.; TANGTHAM, N. Soil respiration and soil CO₂ concentration in a tropical forest, **Journal of Forest Research**, v 9, p.75-79, 2004.

HEALY, R. W.; STRIEGL, R. G.; RUSSEL, T. F.; HUTCHINSON, G. L.; LIVINGSTON, G. P. Numerical evaluation of static-chamber measurements of soil-atmosphere gas exchange: identification of physical processes. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.60, p.740-747, 1996.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLOGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT), Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo, 1981. São Paulo, 94p.

IPCC (2007). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M. and Miller, H.L. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 2007

JACINTHE, P.A.; LAL, R. Labile carbon and methane uptake as affected by tillage intensity in a Mollisol. **Soil Tillage & Research**, Amsterdam, v.80, p.35-45, 2005.

KANG, S.; DOH, S.; LEE, D.; LEE, D.; JIN, V.L.; KIMBALL, J. Topographic and climatic controls on soil respiration in six temperate mixed-hardwood forest slopes, Korea. **Global Change Biology**, v.9, p.1427-1437, 2003.

KANG, S.; KIM, S.; OH, S.; LEE, D. Predicting spatial and temporal patterns of soil temperature based on topography, surface cover and air temperature. **Forest Ecology and Management**, v.136, p.173-184, 2000.

KEMPER, W.D.; CHEPIL, W.S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C.A.; EVANS, D.D.; WHITE, J.L.; ENSMINGER, L.E., CLARK, F.E., eds. Methods of soil analysis: Physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling. **American Society of Agronomy**, Madison, p.499-510, 1965.

LAL, R. Soil Science and the Carbon Civilization. **Science Society of America Journal**, Madison, v.71, p.1425-1437, 2007.

LA SCALA, N; LOPES, A.; SPOKAS, K.; ARCHER, D.; REICOSKY, D. C. First-order decay models to describe soil C-CO₂ loss after rotary tiller. **Scientia Agricola**, v.66, p.650-657, 2009.

LA SCALA, N.; LOPES, A.; SPOKAS, K.; ARCHER, D.; REICOSKY, D.C. Short-term temporal changes of bare soil CO₂ fluxes after tillage described by first-order decay models. **European Journal of Soil Science**, v.60, p.258-264, 2009a.

LA SCALA, N.; LOPES, A.; SPOKAS, K.; BOLONHEZI, D.; ARCHER, D., REICOSKY, D.C. Short-term temporal changes of soil carbon losses after tillage described by a first-order decay model. **Soil Tillage & Research**, Amsterdam, v.99, p.108-118, 2008.

LA SCALA, N.; BOLONHEZI, D.; PEREIRA, G. T. Short-term soil CO₂ emission after conventional and reduced tillage of a no-till sugar cane area in southern Brazil. **Soil Tillage & Research**, Amsterdam, v.91, p.244-248, 2006.

LA SCALA, N.; LOPES, A.; PANOSSO, A. R.; CÂMARA, F. T.; PEREIRA, G. T. Soil CO₂ efflux following rotary tillage of a tropical soil. **Soil Tillage & Research**, Amsterdam, v.84, p.222-225, 2005.

LA SCALA, N.; LOPES, A.; MARQUES JR. J.; PEREIRA, G. T. Carbon dioxide emissions after application of tillage systems for a dark red latosol in souther Brazil. **Soil Tillage & Research**, Amsterdam, v.62, p.163-166, 2001.

LA SCALA, N; LOPES, A.; MARQUES JR, J.; PEREIRA, G. T. Emissão de CO₂ do solo em função dos sistemas de preparo. **Engenharia Agrícola**, v. 21, n. 1, p. 270-275, 2001a.

MAZURACK, A.P. Effect of gaseous phase on water-stable synthetic aggregates. **Soil Science**, Baltimore, v.69, p.135-148, 1950.

PRIOR, S.A.; REICOSKY, D.C.; REEVES, D.W.; RUNION, G.B.; RAPER, R.L. Residue and tillage effects on planting implement-induced short-term CO₂ and water loss from a loamy sand soil in Alabama. **Soil Tillage & Research**, Amsterdam, v.54, p.197-199, 2000.

REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.12, n.3, p.211-216, 1988.

REICOSKY, D.C., LINDSTROM, M.J. Fall tillage method: effect on short-term carbon dioxide flux from soil. **Agronomy Journal**, v.85, p.1237-1243, 1993.

ROCHETTE, P.; ANGERS, D.A. Soil surface carbon dioxide fluxes induced by spring, summer and fall moldboard plowing in a sandy loam. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.63, p.621-628, 1999.

SALOKHE, V.M.; RAMALINGAM, N. Effects of direction of rotation of a rotary tiller on properties of Bangkok clay soil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.63, p.65-74, 2001.

SARTORI, F.; LAL, R.; EBINGER, M.H.; PARRISH, D.J. Potential soil carbon sequestration and CO₂ offset by dedicated energy crops in the USA. **Critical Reviews in Plant Sciences**, v.25, p.441-472, 2006.

SAS INSTITUTE. SAS/STAT, 1998: user guide. Cary, 1998.

SCHWENDENMANN, L.; VELDKAMP, E.; BRENES, T.; O'BRIEN, J.; MACKENSEN, J. Spatial and temporal variation in soil CO₂ efflux in an old-growth neotropical rain forest, **La Salva Biogeochemistry**, Costa Rica, v.64, p.111–128, 2003.

SIQUEIRA, D. S. **Relação solo-relevo e a variabilidade do índice tecnológico da fruta cítrica** (Trabalho de Graduação em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2007.

SIX, J.; ELLIOTT, E.T.; PAUSTIAN, K. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.63, p.1350-1358, 1999.

TEIXEIRA, L.G.; LOPES, A; LA SCALA, N. Temporal variability of soil CO₂ emission after conventional and reduced tillage described by an exponential decay in time model. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.30, n.2, p.224-231, 2010.

THORBURN, P.J.; PROBERT, M.E.; ROBERTSON, F. A. Modelling decomposition of sugar cane surface residues with APSIM-Residue. **Field Crops Research**, v.70, p.223-232, 2001.

WEST, T.O.; POST, W.M. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: A global data analysis. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.66, p.1930-1946, 2002.