

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

**VARIABILIDADE ESPACIAL DA EMISSÃO DE CO<sub>2</sub> E SUA  
RELAÇÃO COM PROPRIEDADES DO SOLO EM ÁREA DE  
CANA-DE-AÇÚCAR NO SUDESTE DO BRASIL**

**Alan Rodrigo Panosso**

Engenheiro Agrônomo

JABOTICABAL – SÃO PAULO – BRASIL

2011

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

**VARIABILIDADE ESPACIAL DA EMISSÃO DE CO<sub>2</sub> E SUA  
RELAÇÃO COM PROPRIEDADES DO SOLO EM ÁREA DE  
CANA-DE-AÇÚCAR NO SUDESTE DO BRASIL**

**Alan Rodrigo Panosso**

**Orientador: Prof. Dr. Newton La Scala Júnior**

**Co-orientador: Prof. Dr. Gener Tadeu Pereira**

**Co-orientador: Prof. Dr. José Marques Júnior**

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

JABOTICABAL – SP  
Fevereiro – 2011

P195v      Panosso, Alan Rodrigo  
Variabilidade espacial da emissão de CO<sub>2</sub> e sua relação com  
propriedades do solo em área de cana-de-açúcar no Sudeste do  
Brasil / Alan Rodrigo Panosso. – – Jaboticabal, 2011  
xiii, 107 f. : il. ; 28 cm

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de  
Ciências Agrárias e Veterinárias, 2011  
Orientador: Newton La Scala Júnior  
Banca examinadora: Carlos Eduardo Pellegrino Cerri, Zigomar  
Menezes de Souza, José Garcia Vivas Miranda, José Eduardo Corá  
Bibliografia

1. Respiração do solo. 2. Fluxo de CO<sub>2</sub> do solo. 3. Geoestatística.  
4. Anisotropia. 5. Dimensão fractal. 6. Manejo da cana-de-açúcar. I.  
Título. II. Jaboticabal - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 633.61:631.433.3

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

## **DADOS CURRICULARES DO AUTOR**

ALAN RODRIGO PANOSSO – Filho de Gino Panosso e Deuci Terezinha Marcelino de Oliveira Panosso, nasceu em Ribeirão Preto, São Paulo, no dia 29 de setembro de 1980. Em março de 2000 ingressou no Curso de Agronomia pela Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Câmpus de Jaboticabal – SP. Foi bolsista de iniciação científica pelo programa PIBIC/CNPq durante o período de agosto de 2001 até agosto de 2004. Em setembro de 2006, obteve o título de Mestre em Agronomia (Ciência do Solo) pela Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Câmpus de Jaboticabal – SP. Em março de 2007, ingressou no Curso de Doutorado em Agronomia (Produção Vegetal) pela Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Câmpus de Jaboticabal – SP. No mês de fevereiro de 2011, submeteu-se à banca para a defesa de Tese, sendo aprovado como Doutor em Agronomia.

*“Talvez não tenhamos conseguido fazer o melhor, mas lutamos para que o melhor fosse feito.  
Não somos o que deveríamos ser, não somos o que iremos ser... Mas graças a Deus,  
não somos o que éramos.”*

Martin Luther King

Aos meus amados pais  
Gino Panosso e  
Deuci T. M. de Oliveira Panosso

## **DEDICO**

À minha irmã Lisliane  
Panosso e aos bondosos  
avós Maria Máximo  
Panosso, Herophelo  
Marcelino de Oliveira e  
Elsa Char de Oliveira

## **OFEREÇO**

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, fonte infinita de esperança, fé e consolação, mas especialmente por iluminar o meu caminho com a chama da amizade e bondade dos amigos que me ajudaram nesta jornada. Para todos os amigos, mestres e companheiros, gostaria de expressar, de forma simples, porém sincera, minha gratidão.

Aos meus pais, a quem devo a minha vida e todo o meu caminho profissional, sem os quais eu não chegaria até aqui, obrigado por todo o amor, carinho e incentivo.

Ao Professor Newton La Scala Júnior, grande responsável pela minha formação intelectual e moral, agradeço pelos ensinamentos, paciência, companheirismo, confiança, ajuda nas diversas publicações e, principalmente, pela grande amizade e todos os conselhos, profissionais e pessoais, sem os quais teria sido impossível concluir esta jornada, obrigado por todos esses anos de convívio.

Ao Professor Gener Tadeu Pereira, pelas oportunidades profissionais, pelos conselhos, confiança, amizade e, principalmente, por todas as horas de aulas e ensinamentos teóricos, onde aprendi um pouco a respeito dos fundamentos estatísticos utilizados nas análises do presente estudo.

Ao Professor José Marques Júnior, grande mestre, pelas aulas, amizade e ensinamentos, principalmente pela grande ajuda na condução do experimento, preparo das hipóteses e parceria nas discussões e publicações.

Ao Professor José Garcia Vivas Miranda, cuja simples presença engrandeceu não somente nosso grupo de pesquisa, mas também o nosso espírito. Obrigado pelo acolhimento, por toda a ajuda, paciência, ensinamentos, oportunidades e principalmente pela amizade e dedicação com nossa pesquisa.

Aos professores membros da Banca de Qualificação, Dilermando Perecin, Carlos Eduardo Angeli Furlani e Marcílio Vieira Martins Filho, mestres e amigos, cujas críticas e sugestões contribuíram, de forma significativa, para a melhoria do presente estudo.

Aos professores de Banca de Defesa, José Garcia Vivas Miranda, Zigomar Menezes de Souza, Carlos Eduardo Pellegrino Cerri e José Eduardo Corá, amigos, mestres

companheiros e exemplos a serem seguidos, que disponibilizaram seu precioso tempo para ajudar nosso estudo, pelas críticas e sugestões que contribuíram não somente para o enriquecimento do trabalho, mas também para nosso avanço profissional e pessoal. Deixo aqui toda a minha gratidão e admiração pelos senhores.

Professor Afonso Lopes, grande amigo e mestre, por todos os conselhos e toda a ajuda nos experimentos ao longo dos 11 anos de vida acadêmica, pelas parcerias nas publicações, pelas aulas e ensinamentos, pelos exemplos de força e perseverança e, principalmente, pela preocupação e amizade.

À doutora Débora Marcondes Bastos Pereira Milori, pela disponibilização dos equipamentos para a caracterização óptica da matéria orgânica do solo, pela paciência e compreensão, pela grande ajuda na interpretação, discussão dos resultados e parceria nas publicações.

Ao professor Antônio Sergio Ferraudo, grande mestre e amigo, cujos ensinamentos e ajuda foram essenciais para a compreensão e discussão dos resultados, por todo o convívio, pelas conversas e conselhos, pela preocupação, pela confiança, pelas inúmeras oportunidades profissionais e, principalmente, pela parceria nos trabalhos e publicações.

Ao mestre e amigo Professor Euclides Braga Malheiros, por todo o conhecimento, aulas, pela paciência, conselhos, ajuda, oportunidades profissionais e, principalmente, pela grande confiança e amizade em nossos trabalhos.

Aos demais professores e amigos do Departamento de Ciências Exatas, pela amizade, bom convívio, conselhos, preocupações, oportunidades profissionais e, principalmente, pela confiança. São eles: Adhemar Sanches, Andreia da Silva Meyer, Danísio Prado Munari, Glauco Eduardo Pereira Cortez, João Ademir de Oliveira, José Carlos Barbosa e Nelson José Peruzzi. Muito devo a todos os professores e amigos do departamento de Ciências Exatas, os quais terão minha amizade e gratidão eterna.



Ao querido amigo e mestre Clovis Alberto Volte, “In Memoriam”, pelos exemplos de profissionalismo, colaboração, oportunidades profissionais e, principalmente, pela amizade e presença que fazem muita falta em nossas vidas.

Aos professores Arthur Bernardes Cecílio Filho e Pedro Luís da Costa A. Alves, coordenadores do curso de Pós-Graduação em Agronomia, Produção Vegetal, por toda compreensão, paciência e ajuda durante os 4 anos de trabalho.

Ao amigo Nilceu Piffer Cardozo, grande companheiro, com quem pude contar em todos os momentos desta jornada. Obrigado por todas as conversas, bom humor, ideias, preocupação, incentivo e, principalmente, pela amizade sincera e respeito.

A todos os companheiros com quem convivi durante a XXVII Operação Antártica, 2008 - Projeto Criossolos. Aos professores Carlos Ernesto Goncalves Reynaud Schaefer, Eduardo de Sá Mendonça, André Luiz Lopes de Faria e Alberto Setzer, por todo o trabalho, disponibilidade, ajuda, oportunidade e parceria. Aos oficiais da Marinha Brasileira, responsáveis pela logística e proteção dos pesquisadores participantes da XXVII Operação Antártica. Ao Grupo Base da Estação Antártica “Comandante Ferraz”, por todo o apoio em campo, logística, ajuda e confiança, deixando um agradecimento especial ao Chefe Macedo Júnior e ao “Velho” Roque, pelo apoio, confiança e principalmente, pela grande amizade. Ao querido amigo e exemplo de caráter e bondade, Luciano Marani, pelos inesquecíveis momentos de trabalho e diversão durante a Operação Antártica, pelas conversas, incentivos e sincera amizade.

Ao Professor Vitório Barato Neto, pela grande ajuda na correção gramatical, de acordo com as novas regras da Academia Brasileira de Letras.

Aos amigos Felipe e Adolfo, irmãos de graduação e amigos fiéis, pelas conversas, ajuda, conselhos e, principalmente, pelo exemplo de perseverança.

Ao precioso amigo Norival Ignácio, em especial, por toda ajuda ao longo de 11 anos de boa convivência, por todas as conversas, risadas e conselhos, pela infinita disposição e camaradagem, pela preocupação e, principalmente, pela grande amizade.

Ao amigo Diogo Mazza Barbieri, amigo de graduação, pela ajuda nos experimentos de campo, fornecimento de dados, pela atenção e principalmente por todas as discussões, que foram fundamentais para o trabalho e publicações.

Ao grande amigo Diego Silva Siqueira, pela amizade, preocupação, incentivo, camaradagem, bom humor, confiança, parceria profissional e, principalmente, pelas conversas e ideias que, mais uma vez, me ajudaram no entendimento de vários pontos da pesquisa.

Ao meu primo Sergio Geraldini Marcelino de Oliveira, pelo eterno bom humor e pela grande ajuda na amostragem de campo.

Ao amigo Ademilson Soares de Oliveira, grande músico e compositor, companheiro de todas as horas e parceiro musical, pelo eterno incentivo.

Ao amigo Yuri Moraes, pela amizade, conselhos, exemplos de esperança e perseverança, pelos churrascos, bom humor, ajuda profissional e, principalmente, por todo o apoio e incentivo, dignos de um zeloso irmão mais velho, ao qual serei eternamente grato.

Ao amigo Eduardo Barretto de Figueiredo, pela confiança, bom convívio, conversas e parceria nos trabalhos.

Aos amigos Marcelo, Daniela, Fabrício, Diego, Vinícius e Myrko, por toda a ajuda na montagem e condução dos experimentos de campo, verdadeiros amigos, cujos bons momentos foram fundamentais para a condução desta jornada.

À amiga Liziane de Figueiredo Brito, por toda a ajuda e disponibilidade.

Aos amigos e funcionários do Departamento de Ciências Exatas, pelo maravilhoso convívio, por toda a ajuda, paciência, conversas, bons momentos, apoio e confiança que ajudaram, em muito, na condução do trabalho, são eles os valiosos amigos: Zezé, Shirley, Carlão, Vanessa e Adriana.

Para a amiga Juliana, por todo o carinho, amizade, conselhos, dedicação e, principalmente, pela confiança e incentivo.

Aos acadêmicos Daniel De Bortoli Teixeira e Luciano Ito Perillo por toda a ajuda na condução dos experimentos de campo, bom convívio e disponibilidade, parcerias nas publicações e inúmeras amostragens de solo e análises de laboratório, amizade e bom convívios, amigos sem os quais não teria sido possível a condução das pesquisas.

À amada namorada, amiga e companheira Flávia Cristina Dall'Acqua, pelo apoio, amizade, paciência, compreensão e, principalmente, por ser uma das razões que me fizeram concluir esta jornada.

À Usina São Martinho, por todo o apoio logístico e concessão da área experimental.

Aos engenheiros agrônomos Marcos Marcari e Luís Gustavo Teixeira, pela disponibilidade de áreas e dados referentes à Fazenda São Bento.

Ao programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, por acreditar em minha capacidade.

Ao CNPq, pela ajuda financeira.

## SUMÁRIO

|  | Página      |
|--|-------------|
| <b>RESUMO.....</b>   | <b>xii</b>  |
| <b>SUMMARY .....</b>   | <b>xiii</b> |
| <b>CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS .....</b>   | <b>1</b>    |
| 1.1 - INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA .....   | 1           |
| 1.1.1 - O efeito estufa adicional.....   | 1           |
| 1.1.2 - Emissão de CO <sub>2</sub> do solo .....   | 2           |
| 1.1.3 - O papel da agricultura no processo de emissão de CO <sub>2</sub> do solo .....   | 3           |
| 1.1.4 - Manejo da cana-de-açúcar e a dinâmica do carbono do solo .....   | 5           |
| 1.1.5 - A variabilidade espacial da emissão de CO <sub>2</sub> do solo .....   | 9           |
| 1.2- HIPÓTESE .....  | 11          |
| 1.3- OBJETIVOS .....   | 11          |
| <b>CAPÍTULO 2 - VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DA EMISSÃO DE CO<sub>2</sub> EM<br/>ÁREA DE CANA-DE-AÇÚCAR EM SISTEMAS DE MANEJO DE CANA CRUA E<br/>QUEIMADA.....</b>      | <b>12</b>   |
| RESUMO .....   | 12          |
| 2.1- INTRODUÇÃO.....   | 13          |
| 2.2- MATERIAL E MÉTODOS.....   | 15          |
| 2.3- RESULTADOS E DISCUSSÃO .....  | 24          |
| 2.3.1 - Estudo da variabilidade temporal .....   | 24          |
| 2.3.2 - Estudo da variabilidade espacial.....  | 30          |
| 2.4- CONCLUSÕES .....  | 38          |
| <b>CAPÍTULO 3 - EMISSÃO DE CO<sub>2</sub> E SUA RELAÇÃO COM PROPRIEDADES DO SOLO<br/>EM ÁREAS DE CANA-DE-AÇÚCAR SOB SISTEMAS DE MANEJO DE CANA<br/>QUEIMADA E CRUA .....</b> | <b>39</b>   |
| RESUMO .....   | 39          |
| 3.1- INTRODUÇÃO.....   | 40          |

|   |           |
|---|-----------|
| 3.2- MATERIAL E MÉTODOS.....  | 41        |
| 3.3- RESULTADOS E DISCUSSÃO .....   | 48        |
| 3.4- CONCLUSÕES .....   | 60        |
| <b>CAPÍTULO 4 - DIMENSÃO FRACTAL E ANISOTROPIA DA EMISSÃO DE CO<sub>2</sub> EM<br/>ÁREA DE CANA-DE-AÇÚCAR .....</b> | <b>61</b> |
| RESUMO .....  | 61        |
| 4.1- INTRODUÇÃO.....  | 62        |
| 4.2- MATERIAL E MÉTODOS.....  | 65        |
| 4.3- RESULTADOS E DISCUSSÃO .....   | 72        |
| 4.4- CONCLUSÕES .....   | 84        |
| <b>CAPÍTULO 5 - IMPLICAÇÕES .....</b>   | <b>85</b> |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>   | <b>86</b> |
| <b>APÊNDICE .....</b>   | <b>99</b> |

## VARIABILIDADE ESPACIAL DA EMISSÃO DE CO<sub>2</sub> E SUA RELAÇÃO COM PROPRIEDADES DO SOLO EM ÁREA DE CANA-DE-AÇÚCAR NO SUDESTE DO BRASIL

**RESUMO** – Neste trabalho, foram avaliados aspectos diversos da emissão de CO<sub>2</sub> (FCO<sub>2</sub>) em um Latossolo Vermelho em áreas de cana-de-açúcar sobre os sistemas de manejo de cana queimada (CQ) e cana crua (CC), no nordeste do Estado de São Paulo. No experimento 1 (ano de 2007), a média da FCO<sub>2</sub> foi 39% superior na área de CQ (2,87  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) quando compara à CC (2,06  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) ao longo de um período de 70 dias de avaliação. Os modelos ajustados aos semivariogramas experimentais de FCO<sub>2</sub> foram, na sua maioria, exponenciais em ambas as áreas. Os mapas de emissão foram homogêneos após um período de seca. O teor de matéria orgânica do solo e o estoque de carbono do solo (0-0,25 m) foram 13 e 20%, respectivamente, superiores em CQ quando comparados à CC. O grau de humificação da matéria orgânica do solo e a sua interação com a densidade do solo foi um importante fator, não somente na diferenciação da emissão de CO<sub>2</sub> entre os diferentes sistemas de manejo. No experimento 2 (ano de 2008), foi conduzida a caracterização anisotrópica das variáveis estudadas por meio da dimensão fractal ( $D_F$ ), para diferentes direções (0°, 45°, 90° e 135°) em relação às linhas de plantio (0°). A propriedade porosidade livre de água (PLA) foi um dos principais fatores relacionados à variabilidade espacial de FCO<sub>2</sub>, independentemente das direções. Os valores de  $D_F$  foram significativamente inferiores no sentido de plantio da cultura da cana-de-açúcar, indicando, além de anisotropia dessa propriedade, maior homogeneidade de FCO<sub>2</sub> na direção de 0°. A PLA mostrou ser uma importante propriedade na compreensão da variabilidade espaçotemporal de FCO<sub>2</sub>, especialmente nas áreas de cana queimada.

**Palavras-chave:** respiração do solo, fluxo de CO<sub>2</sub> do solo, geoestatística, anisotropia, dimensão fractal, manejo da cana-de-açúcar.

## SPATIAL VARIABILITY OF SOIL CO<sub>2</sub> EMISSION AND ITS RELATION WITH SOIL PROPERTIES IN A SUGARCANE AREA IN SOUTHERN BRAZIL

**SUMMARY** – In this work was studied various aspects of soil CO<sub>2</sub> emission (FCO<sub>2</sub>) of a bare Dark Red Latosol in sugarcane areas submitted to burned (B) and green (G) management systems in northeastern of São Paulo State. In the experiment 1 (year 2007), mean FCO<sub>2</sub> emission was 39% higher in the B plot ( $2.87 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) when compared to the G plot ( $2.06 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) throughout the 70-day period after harvest. FCO<sub>2</sub> Semivariogram models were mostly exponential in both areas. The emission maps are clearly more homogeneous after a drought period in both sites. Organic matter content and carbon stock (0-25 cm) were 13% and 20% higher in B, respectively, when compared to G. Regression analysis indicates that the humification index of soil organic matter, and its interaction with soil bulk density, is an important factor not just to differentiate emissions in each plot. In the experiment 2 (2008) the anisotropic characterization of the studied variables, was performed by deriving the fractal dimension ( $D_F$ ) calculated for different directions (0°, 45°, 90° and 135°) in relation to the crop line (0°). The air-filled pore space (AFPS) was the main factor affecting the spatial variability of FCO<sub>2</sub> in all directions. The FCO<sub>2</sub>  $D_F$  values were significantly lower in the direction of planting of sugarcane crop, indicating anisotropy of this property and greater homogeneity in this direction. The AFPS was an important property in understanding the spatio-temporal variability of FCO<sub>2</sub>, especially in the areas submitted to burn.

**Keywords:** soil respiration, soil CO<sub>2</sub> flux, geostatistic, anisotropy, fractal dimension, sugarcane management.

## **CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS**

### **1.1 - Introdução e Justificativa**

#### **1.1.1 - O efeito estufa adicional**

Todos os corpos com temperatura acima de 0 K emitem energia radiativa, ou seja, são fontes de radiação eletromagnética de espectro contínuo. A intensidade e a característica espectral de tal radiação são dependentes da sua temperatura. Nesse contexto, o comprimento de onda do máximo de intensidade da curva de emissão espectral ( $\lambda_{\max}$ ) é inversamente proporcional à temperatura do corpo em questão. A superfície do Sol apresenta temperaturas próximas a 6.000 K, sendo  $\lambda_{\max}$  deste corpo próximo a 0,58  $\mu\text{m}$  (ondas curtas). O sol aquece o planeta a uma temperatura média em torno de 300 K. Os objetos aquecidos na superfície da terra emitem radiação de volta ao espaço em um  $\lambda_{\max}$  na faixa de 9,6  $\mu\text{m}$  (ondas longas). Apesar de 99% da atmosfera do planeta serem constituídos basicamente por nitrogênio ( $\text{N}_2$  – 78%) e oxigênio ( $\text{O}_2$  – 21%), são os chamados gases do efeito estufa (GEE) que possuem grande importância no balanço de radiação da Terra. Tais gases apresentam linhas de absorção na faixa espectral do infravermelho, com comprimento de onda principalmente em torno de 8 a 14  $\mu\text{m}$  (ondas longas). Entre os principais gases do efeito estufa estão o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), o ozônio ( $\text{O}_3$ ), o metano ( $\text{CH}_4$ ) e o óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), juntamente com o vapor d'água ( $\text{H}_2\text{O}$ ).

A absorção de ondas longas, realizada por esses gases, e a emissão de volta para a superfície do planeta têm um efeito de dificultar o escape da energia emitida pela superfície do planeta, aprisionando-a na atmosfera terrestre, causando o chamado efeito estufa. Nesse contexto, uma das modificações ambientais mais importantes que está em progresso é o aumento da concentração dos GEEs na atmosfera, causando alterações climáticas e trazendo sérias consequências à vida no planeta (FOLLETT, 2001).

De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2007), o aumento da concentração de  $\text{CO}_2$  na atmosfera terrestre é a principal causa do



aquecimento global, representando cerca de 60% das emissões totais. A concentração atmosférica continua aumentando, e atualmente é quase 100 ppm acima daquela observada no período pré-industrial. Em escala global, a queima de combustíveis fósseis é considerada a principal fonte de CO<sub>2</sub> para a atmosfera. No setor agrícola, 22% das emissões de CO<sub>2</sub> podem ser atribuídos principalmente a atividades relacionadas às mudanças do uso da terra. Estima-se que, na década de 80, de 0,6 a 2,5 bilhões de toneladas de carbono tenham sido emitidas para a atmosfera devido a atividades diversas que envolvem o uso e o manejo dos solos (HOUGHTON et al., 1992). Tais valores evidenciam uma incerteza de como as diversas atividades agrícolas contribuem para o aumento da emissão de carbono na atmosfera.

### **1.1.2 - Emissão de CO<sub>2</sub> do solo**

Os solos estocam cerca de 1.550 Pg de carbono orgânico, mais de duas vezes a quantidade de carbono presente na atmosfera (720 Pg) e cerca de três vezes mais que o carbono da biota terrestre (LAL, 2001; FOLLETT, 2001). Os níveis de carbono orgânico nos solos são os resultados das complexas interações entre variáveis relacionadas aos processos de produção e transporte do gás do solo para a atmosfera. De acordo com SARTORI et al. (2006), tais variáveis podem ser subdivididas em: alocação de biomassa, qualidade e quantidade de material orgânico depositado e/ou incorporado aos solos e os regimes de temperatura e umidade.

O processo de perda de carbono do solo para a atmosfera é dominado pelo fluxo de CO<sub>2</sub> para a superfície, resultante da atividade microbiana (oxidação química) e respiração das raízes. O processo de emissão de CO<sub>2</sub> do solo, também conhecido como respiração do solo, é a segunda maior fonte de emissão de CO<sub>2</sub> para a atmosfera (50 – 75 Pg C ano<sup>-1</sup>), sendo a queima de combustíveis fósseis a principal responsável antrópica por essas emissões. Mudanças do uso do solo, como a conversão de áreas de florestas, cerrados e campos para áreas agrícolas ou pastagem, geralmente diminuem o teor de matéria orgânica nos solos tropicais e subtropicais devido às consequências de curto e longo prazos dos distúrbios ocasionados pelas operações de preparo associados a baixos níveis de adição de material orgânico ao solo. A

temperatura do solo e o regime de umidade são de extrema importância, uma vez que eles influenciam na atividade de decomposição microbiana em escalas milimétrica, afetando o ciclo do carbono orgânico em escalas quilométricas, regional e até mesmo em escala global (RODRIGO et al., 1997). Estima-se que um aquecimento global de 0,03 °C por ano poderia aumentar as taxas de respiração do solo, produzindo uma liberação adicional de 60 Pg C do solo para a atmosfera entre 1990 e 2050 (XU & QI, 2001).

Segundo RAICH & SCHLESINGER (1992), a taxa de transferência do CO<sub>2</sub> do solo para a atmosfera é controlada pela taxa de produção do CO<sub>2</sub>, o gradiente de concentração da molécula do gás entre o solo e atmosfera, e propriedades como o tamanho, distribuição e conectividade dos poros do solo, temperatura do ar e velocidade do vento. Portanto, pequenas variações no balanço da respiração do solo podem afetar a concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera, alterando, por exemplo, a temperatura média anual do planeta bem como a quantidade e a distribuição de chuvas (BORKEN et al., 2002).

### **1.1.3 - O papel da agricultura no processo de emissão de CO<sub>2</sub> do solo**

No Brasil, as atividades relacionadas à agricultura, principalmente aquelas relacionadas às mudanças de uso da terra, como o desflorestamento, são responsáveis por 70% das emissões totais de CO<sub>2</sub> equivalente do País. Assim, a caracterização de como as principais práticas de uso e manejo do solo afetam a dinâmica da emissão de carbono ao longo do espaço e do tempo, é de grande importância, sobretudo em regiões tropicais, para a determinação, de forma quantitativa, do impacto dessas práticas no clima do planeta.

De acordo com BRITO et al. (2009), a importância da agricultura neste cenário não está relacionada apenas aos processos de perda de carbono do solo via respiração, mas também está relacionada ao seu significativo potencial de mitigação de carbono atmosférico. Dependendo do uso e manejo, os solos agrícolas podem atuar como fontes ou sumidouros de carbono da atmosfera (USSIRI & LAL, 2009).

O balanço de carbono em um ecossistema é, frequentemente, a diferença entre duas grandes componentes, similares em magnitude, mas opostas em sentido, ou seja, o carbono absorvido pela fotossíntese e a perda de carbono pela respiração. Consequentemente, pequenos incrementos nas taxas de respiração do solo podem ser suficientes para um ecossistema mudar de sumidouro a fonte de carbono para a atmosfera (RAYMENT & JARVIS, 2000). Em áreas agrícolas e florestas, a estratégia principal para o aumento do sequestro de carbono é minimizar a decomposição e a mineralização do carbono orgânico do solo, por meio de medidas que promovam a proteção desse carbono. Distúrbios no solo podem provocar perdas de matéria orgânica no solo devido ao aumento da aeração, a qual pode acelerar a atividade bacteriana do solo.

Práticas de preparo do solo destroem seus agregados, que protegem a matéria orgânica da ação dos microrganismos, aumentam a taxa de decomposição e mineralização desta. USSIRI & LAL (2009), estudando os efeitos dos sistemas de preparo convencional reduzido e o plantio direto no estoque de carbono e emissão de CO<sub>2</sub> no cultivo de milho, em Ohio, EUA, concluíram que solos sobre sistema de plantio direto, ou seja, sem distúrbio mecânico e com deposição de resíduos, armazenaram aproximadamente o dobro da quantidade de C na profundidade de 0,3 m, quando comparado aos sistemas convencional e reduzido. Além disso, estudos têm demonstrado um aumento do grau de humificação da matéria orgânica quando solos de mata nativa são convertidos para agricultura convencional, e uma tendência inversa quando áreas de agricultura convencional são convertidas para plantio direto (DIECKOW et al., 2009).

Estudando o estoque de carbono e a emissão de CO<sub>2</sub> do solo nos sistemas de preparo do solo convencional e plantio direto, em Argissolo Vermelho distrófico, no município de Eldorado do Sul (RS), COSTA et al. (2008) observaram que a adição diferenciada de resíduos vegetais ao solo afetou os estoques de carbono orgânico no solo; além disso, solos cultivados no sistema de preparo convencional atuaram como fontes de C-CO<sub>2</sub> para a atmosfera. Os autores observaram, também, que solos em preparo convencional, apresentaram tendência de maior emissão de CO<sub>2</sub>, quando

comparados a solos do plantio direto, sobretudo em preparo convencional onde o contato solo/resíduo foi aumentado pelo seu revolvimento, permitindo a rápida decomposição dos tecidos das plantas de cobertura.

#### **1.1.4 - Manejo da cana-de-açúcar e a dinâmica do carbono do solo**

Sistemas de cultivo associados à produção de energia, como exemplo a cultura da cana-de-açúcar, podem capturar o CO<sub>2</sub> atmosférico na forma de biomassa (sequestro), retornando para o solo quantidades adicionais de carbono orgânico do solo. O Brasil é o principal produtor mundial de cana-de-açúcar, com 630 milhões de toneladas produzidas em 2009, em uma área plantada de aproximadamente 8 milhões de hectares (CONAB, 2009). A produção da cultura está concentrada principalmente na região Centro-Sul, sendo que a área total cultivada no Estado de São Paulo é 4,87 milhões de hectares (19,6% do território do Estado de São Paulo), e o Estado é responsável por 60% da produção total do País (UNICA, 2010; RUDORFF et al., 2010). No entanto, no Sudeste do Brasil, mudanças nas práticas de manejo da cultura da cana-de-açúcar têm sido consideradas mais importantes que a atual expansão da fronteira agrícola (CERRI et al., 2007), uma vez que grandes áreas estão sendo convertidas de um sistema de manejo da queima para colheita mecanizável.

Em áreas de cana queimada (CQ), o canavial é queimado alguns dias antes da operação de colheita manual, com o intuito da remoção das folhas, insetos e animais que possam representar riscos aos trabalhadores. No sistema de cana crua (CC), a colheita utilizando máquinas proporciona um retorno dos resíduos vegetais para a superfície do solo, favorecendo, assim, o acúmulo de matéria orgânica e uma redução na emissão de gases em comparação ao sistema de cana queimada (RAZAFIMBELO et al., 2006; CERRI et al., 2007; LUCA et al., 2008). Atualmente, 50% da produção total são colhidas de forma mecanizada, no sistema de cana crua, e estima-se que, nos próximos 10 anos, esse valor chegue a 80% (GALDOS et al., 2009). No sistema de cana crua, a palha que fica sobre a superfície do solo pode funcionar como um mitigador de carbono para o ambiente, onde, mesmo ocorrendo liberação de CO<sub>2</sub>

durante o processo de decomposição microbiana, parte do carbono que seria liberado durante a queima é incorporado ao solo.

Em estudo para a comparação do balanço do carbono nos sistemas de colheita com e sem queima prévia do canavial, em Latossolo Vermelho, na região do município de Ribeirão Preto, CAMPOS (2003) não observou diferenças significativas quanto à média anual de emissão de  $\text{CO}_2$  entre os sistemas; entretanto, a emissão de gases do efeito estufa foi maior no sistema de cana queimada, principalmente devido à operação de queima do canavial. O sistema de cana crua deixou de liberar para a atmosfera cerca de  $5.000 \text{ kg em equivalente-}\text{CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ . Assim, práticas de manejo podem resultar em modificações nas propriedades físicas e químicas do solo, afetando diretamente a atividade microbiana e, conseqüentemente, a emissão  $\text{CO}_2$  do solo (BLAIR, 2000; SARTORI et al., 2006; CERRI et al., 2007).

Em estudo dos efeitos dos sistemas de cana crua e cana queimada sobre os teores da matéria orgânica, estabilidade de agregados e densidade do solo, em três tipos de solos (Latossolo Vermelho distrófico, Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico e Neossolo Quartzarênico órtico), LUCA et al. (2008) observaram que, após quatro anos sem queima, os resultados mostraram que houve formação de camadas orgânicas sobre o solo em diversos graus de decomposição, havendo elevação significativa nos teores de C no Latossolo Vermelho distrófico e no Neossolo Quartzarênico órtico, ocorrendo aumentos dos estoques de carbono na camada de 0-0,2 m, nos três solos estudados. Tais valores representam uma taxa de sequestro de C de  $2,1 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ . Os autores afirmam que, diante desses resultados, e levando-se em consideração a porcentagem de áreas com cana crua atualmente no País, a estimativa do potencial de sequestro de C devido ao manejo sem queima do Brasil seja de aproximadamente  $2,61 \text{ Tg ano}^{-1}$ , equivalente a  $9,57 \text{ Tg ano}^{-1}$  em  $\text{CO}_2$ .

Segundo DOMINY et al. (2002), o principal fator associado à degradação do solo sobre cultivo de cana-de-açúcar é a perda de matéria orgânica do solo, que pode ser prejudicial nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. O preparo do solo induz o rompimento do agregado e a exposição do material orgânico, até então fisicamente protegida, à ação microbiana. A absorção das moléculas orgânicas pela

superfície dos minerais de argila provê um mecanismo de proteção do C orgânico contra o ataque microbiano.

Segundo BLAIR (2000), o sistema de cana crua tem potencial de aumentar o teor de C orgânico bem como promover uma melhoria na estrutura do solo. Em experimento realizado na Austrália, num Luvissolo crômico, após quatro anos de cultivo de cana-de-açúcar, os autores observaram que, em áreas de queima de canavial, houve diminuição no teor de C lábil do solo, comparado ao sistema de cana crua; entretanto, foi observado efeito oposto para o teor de C total e C não lábil do solo, indicando que o sistema de cana crua está liberando mais C lábil dos resíduos culturais que o sistema de cana queimada. Compostos de carbono, particularmente a fração mais lábil, fornecem energia para os organismos do solo e estimulam sua atividade, a qual contribui para a liberação de nutrientes dos resíduos de plantas e animais, e síntese de substâncias húmicas, que afetam ambas, propriedades físicas e químicas do solo. A adição de matéria orgânica no solo geralmente resulta, também, em aumento na estrutura do solo. Assim, práticas que promovem manutenção ou mesmo aumento dos níveis de C no solo, especialmente de sua fração lábil, são de grande interesse, uma vez que proporcionam melhores condições físicas e químicas do solo.

Segundo CANELLAS et al. (2003), as diferentes frações de carbono orgânico humificado do solo apresentam característica químicas, físicas e morfológicas diferenciadas entre si, e a distribuição destas frações no solo pode indicar a qualidade da matéria orgânica. Os ácidos húmicos representam a fração intermediária entre a estabilização dos compostos pela interação com a matéria mineral (huminas) e a ocorrência de ácidos orgânicos oxidados livres na solução do solo (ácidos fúlvicos livres ou associados). Os autores estudaram o efeito de longo prazo da preservação da palha sobre as propriedades químicas de um Cambissolo em área de cultivo de cana-de-açúcar e concluíram que a adição de matéria orgânica alterou as propriedades químicas do solo e proporcionou melhoria na sua fertilidade e na qualidade da matéria orgânica do solo. Os autores relataram que o cultivo continuado de cana crua alterou significativamente os teores de  $K^+$  e  $Ca^{2+}$  na camada superficial, e os teores desses nutrientes aumentaram em profundidade na área de cana crua em relação à queimada.

Avaliando o efeito dos sistemas de cana crua e cana queimada sobre algumas propriedades físicas de um Argissolo, em área de tabuleiro, no Estado do Espírito Santo, CEDDIA et al. (1999) observaram que o sistema de cana queimada apresentou maior degradação das propriedades do solo, evidenciada pela redução do diâmetro médio ponderado dos agregados estáveis e pelo aumento da densidade do solo e diminuição da porosidade total na profundidade de 0-0,5 m.

Técnicas de manejo da cultura da cana utilizam um vigoroso revolvimento do solo por ocasião do plantio, com o uso de arados, grades pesadas e subsoladores. Ao fim do ciclo de produção, a queima da palha da cana antes da colheita é considerada prejudicial à manutenção dos níveis de matéria orgânica do solo. Nessas condições, o aporte de matéria orgânica bruta é reduzido, e a prática da queima favorece a mineralização da matéria orgânica já existente. Além disso, o solo permanece descoberto por um período relativamente longo, o que acelera o processo erosivo e culmina com a depauperação de suas propriedades físicas e químicas.

Os autores observaram que a adição de maior massa de resíduos orgânicos proporcionada pelo sistema de cana crua proporcionou maior interação entre as frações orgânicas e minerais do solo, bem como a proteção da superfície do terreno contra o impacto de gotas da chuva e da água de irrigação. A decomposição da palha origina uma série de compostos orgânicos (açúcares, aminoácidos, ceras, fenóis, ligninas e ácidos) que promovem a ligação entre as partículas e/ou reduzem a molhabilidade da superfície do agregado e o aumento significativo no teor de humina e carbono da fração ácidos fúlvicos.

As vantagens do sistema de cana crua é a manutenção de uma cobertura vegetal sobre o solo durante um período de tempo no ano, em que as chuvas são mais intensas, deste modo reduzindo o processo de erosão. NOBLE et al. (2003) estudaram a influência das mudanças no manejo da cana-de-açúcar em algumas propriedades químicas em solo na Austrália, e observaram diminuição nos valores de pH do solo nas camadas superficiais do solo (0-0,05 m), na área de cana crua, quando comparada à cana queimada, atribuindo tal efeito à maior atividade biológica nessa camada, onde o processo de mineralização e consequente acidificação do meio foi maior. Além disso,

os autores observaram uma tendência de aumento nos teores de Ca, Mg, K e da CTC efetiva do solo, apenas na camada de 0-0,02 m, na área de cana crua, acompanhada também de um aumento significativo do teor de matéria orgânica do solo.

Estudando o efeito dos sistemas de manejo de cana crua com e sem incorporação da palha e cana queimada nas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, no município de Jaboticabal, SOUZA et al. (2005) verificaram que o sistema de cana crua com incorporação da palha proporcionou maiores teores de matéria orgânica, maior estabilidade de agregados, macroporosidade e teor de água, e menores valores de resistência do solo à penetração e densidade do solo, quando comparado aos demais sistemas de manejo de cana queimada. Quanto ao teor de matéria orgânica do solo, o sistema de cana queimada apresentou menores teores em relação ao sistema de cana crua.

#### **1.1.5 - A variabilidade espacial da emissão de CO<sub>2</sub> do solo**

De acordo com DASSELAAR et al. (1998), na estatística clássica, assume-se que a variabilidade ao redor da média é aleatória e espacialmente independente. Contudo, a variabilidade de várias propriedades do solo, frequentemente, apresenta uma componente espacialmente dependente, ou seja, a variabilidade pode ser descrita como uma função da distância de separação entre as amostras (TRANGMAR et al., 1985; ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989). Segundo BRITO et al. (2009), a caracterização da variabilidade espacial da emissão de CO<sub>2</sub>, por meio da geoestatística, fornece informações relevantes a respeito da sua distribuição espacial, ajudando a compreender a dinâmica do CO<sub>2</sub> entre o solo e a atmosfera. As propriedades envolvidas nos processos de produção e transporte de CO<sub>2</sub> também possuem grande variabilidade espacial, o que torna complexa a tarefa de explicar as variações espaciais da emissão de CO<sub>2</sub>.

Estudando a variabilidade espacial e a dependência espacial das emissões de CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O e CO<sub>2</sub> e suas relações com as propriedades do solo, DASSELAAR et al. (1998) observaram altos valores de coeficiente de variação (CV) para as emissões, com uma pobre relação com as propriedades do solo. Entretanto, os autores concluíram que



significativas alterações na variabilidade espacial das emissões, em um curto espaço de tempo, sugerem que os principais fatores controladores desta variabilidade apresentam grande dinâmica ou as emissões são altamente sensíveis a pequenas alterações destes fatores, como, por exemplo, a umidade do solo.

Estudando a variabilidade espacial e temporal da respiração solo na cultura do milho, ROCHETTE et al. (1991) observaram que os padrões espaciais da respiração do solo foram diferentes em função do teor de água no solo, sendo altamente influenciados pela ocorrência de chuvas, principalmente após o período de secas. Por outro lado, FANG et al. (1998), avaliando a variabilidade espacial da respiração do solo em áreas de *Pinus elliotti*, no estado da Flórida, EUA, observaram que a maior parte da variabilidade espacial do fluxo de CO<sub>2</sub> do solo pode ser explicada pelas variações da biomassa dos organismos vivos e mortos associados à porosidade total. Em estudo das variações espaçotemporais do fluxo de CO<sub>2</sub> em área de floresta boreal no Canadá, RAYMENT & JARVIS (2000) observaram alto grau de autocorrelação entre valores de respiração do solo medido em locais separados por distância menores de 1 m, sendo que a maior parte da heterogeneidade, observada em distâncias maiores do que 1 m, foi proveniente das variações da microtopografia da área experimental.

A umidade do solo e sua interação com a temperatura do solo apresentam forte influência nas variações temporais da emissão de CO<sub>2</sub> do solo, especialmente em estações do ano em que o teor de água no solo é baixo. XU & QI (2001), na avaliação de FCO<sub>2</sub> em *Pinus ponderosa*, concluíram que, apesar de a temperatura e a umidade do solo serem importantes na previsão da variabilidade temporal do fluxo de CO<sub>2</sub> do solo, elas são inadequadas para a explicação das variações espaciais do fluxo de CO<sub>2</sub> do solo. Propriedades do solo, como nitrogênio, biomassa microbiana, teor de matéria orgânica, densidade do solo e teor de magnésio trocável, foram as melhores variáveis para a modelagem da variabilidade espacial de FCO<sub>2</sub>.

## **1.2 – Hipótese**

As alterações causadas nas propriedades físicas e químicas do solo, devido à conversão de áreas do sistema de cana queimada para o sistema de cana crua, modificam a dinâmica do carbono do solo, expresso pelas variações espaçotemporais da emissão de CO<sub>2</sub> do solo.

## **1.3 – Objetivos**

O objetivo do trabalho foi caracterizar a variabilidade espacial e temporal da emissão de CO<sub>2</sub> do solo e sua relação com as propriedades físicas e químicas de um Latossolo Vermelho em áreas de cana-de-açúcar.

## **CAPÍTULO 2 - VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DA EMISSÃO DE CO<sub>2</sub> EM ÁREA DE CANA-DE-AÇÚCAR EM SISTEMAS DE MANEJO DE CANA CRUA E QUEIMADA**

**RESUMO** – Práticas de manejo causam mudanças nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, que, consequentemente, afetam a emissão de CO<sub>2</sub> do solo (FCO<sub>2</sub>). Neste trabalho, foi avaliada a dinâmica do carbono do solo em áreas de produção de cana-de-açúcar no nordeste do Estado de São Paulo, em dois diferentes sistemas de manejo: cana crua (CC), consistindo de colheita mecanizada, que produz uma grande quantidade de resíduos da cultura (palha) sobre a superfície do solo, e cana queimada (CQ), onde o canavial é queimado antes da operação de colheita manual, não havendo deposição de resíduos sobre a superfície do solo. O experimento foi conduzido durante o período pós-colheita, no estágio de crescimento da cultura, em dois gradeados (60 pontos cada um) instalados em áreas adjacentes. A média da FCO<sub>2</sub> foi 39% superior na área de CQ ( $2,87 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) quando comparada à média do sistema CC ( $2,06 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) ao longo de um período de 70 dias de avaliação. Uma equação quadrática entre os valores de emissão e de umidade do solo foi capaz de explicar 73% e 50% da variabilidade temporal de FCO<sub>2</sub> nos sistemas de CQ e CC, respectivamente. Tal efeito aparenta estar relacionado à sensibilidade de FCO<sub>2</sub> à ocorrência de chuvas, que causaram aumentos significativos das emissões na área de CQ; por outro lado, não houve nenhuma alteração significativa nos valores de FCO<sub>2</sub> na área de CC. Modelos ajustados aos semivariogramas experimentais de FCO<sub>2</sub> foram exponenciais, na sua maioria, em ambas as áreas, com alcances variando de 72,6 – 73,8 m e 64,7 e 64,7 m para CC e CQ, respectivamente. Esses resultados indicam que o sistema CC, onde a palha é deixada sobre a superfície do solo, resulta em maior homogeneidade espaçotemporal de FCO<sub>2</sub>. A análise de variabilidade espacial da temperatura do solo e da umidade do solo indicou que essas propriedades não explicaram adequadamente a variabilidade espacial de FCO<sub>2</sub>; entretanto, os mapas de emissão foram mais homogêneos após um período de seca.

**Palavras-chave:** respiração do solo, manejo de cana-de-açúcar, geoestatística, propriedades do solo.

## 2.1 - Introdução

Atualmente, o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) com 8,0 milhões de hectares plantados, sendo o Estado de São Paulo o maior produtor nacional, responsável por 4,87 milhões de hectares. Considerando que a área cultivada total com cana-de-açúcar aumentou aproximadamente 13% no Estado de São Paulo, no ano de 2008 (CONAB, 2008), o estudo das mudanças na variabilidade espacial e temporal da emissão de CO<sub>2</sub> do solo (FCO<sub>2</sub>) em áreas de cultivo de cana-de-açúcar, no Estado de São Paulo, é de grande interesse.

No entanto, no Sudeste do Brasil, mudanças das práticas de manejo da cultura da cana-de-açúcar têm sido consideradas mais importantes que a atual expansão da fronteira agrícola. Uma vez que a cultura está cada vez mais associada à alimentação e à produção de energia, essa vem sendo considerada uma importante alternativa quando o problema das mudanças climáticas é levado em consideração (CERRI et al., 2007). Grandes áreas estão sendo convertidas de um sistema de manejo (cana queimada) para outro (cana crua). Em áreas de cana queimada (CC), o canavial é queimado antes da operação de colheita manual, com o intuito da remoção das folhas e insetos.

A operação de queima tem um efeito imediato e direto em propriedades físicas e hidrológicas do solo (ARE et al., 2009). Por outro lado, no sistema de cana crua, a colheita utilizando máquinas proporciona um retorno dos resíduos vegetais para a superfície do solo, favorecendo assim o acúmulo de matéria orgânica e uma redução na emissão de gases em comparação ao sistema de cana queimada (RAZAFIMBELO et al., 2006; CERRI et al., 2007; LUCA et al., 2008). Assim, práticas de manejo podem resultar em modificações nas propriedades físicas e químicas do solo, afetando diretamente a atividade microbiana e, conseqüentemente, a emissão CO<sub>2</sub> do solo (BLAIR, 2000; SARTORI et al., 2006; CERRI et al., 2007). Apesar de todos os esforços,

é pouco o conhecimento a respeito das mudanças nas propriedades do solo quando consideramos a conversão do agrossistema de CQ para CC, e como essa conversão pode afetar as perdas de C do solo por meio da emissão de CO<sub>2</sub> (FCO<sub>2</sub>).

O Fluxo de carbono do solo, influenciado pelo uso ou manejo, pode causar impactos na concentração atmosférica de CO<sub>2</sub> (EPRON et al. 2004; SARTORI et al., 2006). Estima-se que, no Brasil, o estoque de C no solo, na profundidade de 0,3 m, seja de aproximadamente  $36,4 \pm 3,4$  Pg C. Em adição, mudanças no uso da terra e práticas agrícolas são responsáveis por mais que dois terços do total de gases do efeito estufa emitidos (BERNOUX et al., 2002).

A magnitude de FCO<sub>2</sub> varia no tempo e no espaço, dependendo das condições ambientais, das características do solo e do tipo de manejo agrícola adotado. O coeficiente de variação (CV) de FCO<sub>2</sub> é o primeiro indicativo de sua variabilidade; entretanto, ele sozinho não é suficiente para comparar a variabilidade de FCO<sub>2</sub> em diferentes estudos devido à falta de informações a respeito da distribuição espacial dos pontos amostrais (FANG et al., 1998). A análise geoestatística pode ser uma alternativa a essa dificuldade, uma vez que fornece as bases para uma descrição quantitativa da variação espacial de uma propriedade no solo e pode ser utilizada para estimativas dessa mesma propriedade em locais não amostrados (WEBSTER, 1985; WEBSTER & OLIVER, 1990).

A análise geoestatística tem sido utilizada nos estudos de várias propriedades do solo, sendo, na sua maioria, físicas e químicas (CAMBARDELLA et al., 2000; WANG et al., 2002), e algumas biológicas, como a emissão de CO<sub>2</sub> em vários ecossistemas, desde florestas a solos desprovidos de vegetação (LA SCALA Jr. et al., 2000; ISHIZUKA et al., 2005; OHASHI & GYOKUSSEN, 2007; KONDA et al., 2008). Entretanto, poucos trabalhos têm usado a análise geoestatística com o objetivo de avaliar a estrutura espacial da emissão de CO<sub>2</sub> em solos cultivados com a cultura da cana-de-açúcar (PANOSSO et al., 2008). Entender a variabilidade espacial da emissão de CO<sub>2</sub> em áreas agrícolas é importante para a condução de um manejo controlado e sustentável da cultura para a preservação do carbono no solo, contribuindo assim para a redução do efeito estufa.

Para melhores estimativas da respiração do solo, é necessário, primeiramente, descrever sua variabilidade temporal e as relações entre a respiração do solo e as variáveis ambientais que podem ser continuamente monitoradas, como a temperatura e a umidade do solo. Em solos de regiões tropicais, onde as variações sazonais na temperatura do solo são pequenas, a umidade do solo deve ser testada e levada em consideração como um índice mais efetivo na estimativa das variações sazonais das taxas de respiração do solo (KOSUGI et al., 2007).

A hipótese do trabalho é que diferentes práticas de manejo podem resultar em diferenças na dinâmica do carbono no solo, que por sua vez poderia ser expresso em termos da variabilidade espacial e temporal e das relações com os principais fatores de controle dessa respiração: temperatura e umidade do solo. O objetivo do estudo foi a caracterização das variações temporais e espaciais da emissão de CO<sub>2</sub> do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar nos sistemas de cana crua e cana queimada.

## **2.2 - Material e Métodos**

O estudo foi conduzido na fazenda São Bento, pertencente à Usina São Martinho, em área destinada à produção de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) por mais de 35 anos, localizada no município de Guariba, São Paulo (Figura 2.1). As coordenadas geográficas são 21° 24' de latitude sul e 48° 09' de longitude oeste, com elevação média de 550 m acima do nível do mar. O clima da região é classificado como Aw (de acordo com Köppen), tropical de verão chuvoso e inverno seco. A precipitação média é de 1.425 mm, concentrada entre os meses de outubro e março, com 22,2 °C de temperatura média anual registrada na região, nos últimos 30 anos. A vegetação natural era constituída por floresta tropical subcaducifólia.

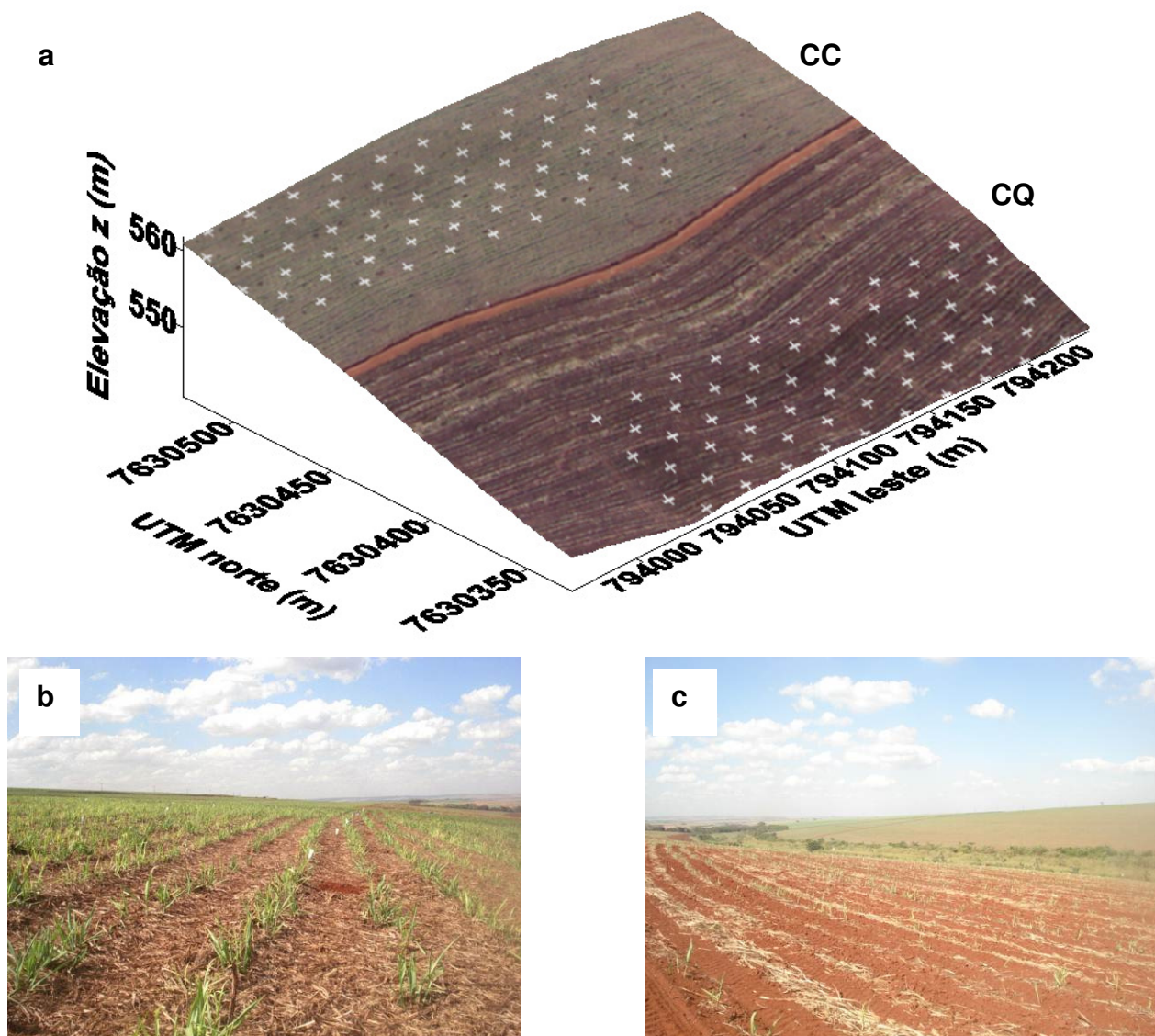


Figura 2.1. a) Foto aérea combinada ao modelo de elevação digital das áreas de estudo, indicando a localização dos 60 pontos amostrais em cada talhão; b) aspectos gerais da área de cana crua (CC), e c) aspectos gerais da área de cana queimada (CQ) no momento da instalação do experimento, dia 07 de julho de 2007.

Esta área está inserida na província geomorfológica do Planalto Ocidental Paulista, próximo ao limite das Cuestas Basálticas, no divisor litoestratigráfico arenito-basáltico (área limítrofe entre o Basalto do Grupo São Bento, Formação Serra Geral e o Arenito do Grupo Bauru, Formação Adamantina). O solo da área, segundo a

classificação proposta pela EMBRAPA (2006), é um Latossolo Vermelho eutroférico, textura muito argilosa (LVef), cultivado com cana-de-açúcar por mais de 30 anos.

Foram utilizados dois talhões vizinhos, com baixa declividade (3 a 4%), apresentando diferentes sistemas de manejo da cana-de-açúcar: cana crua (CC) com histórico de sete anos sem queima do canavial, com grande quantidade de resíduos da cultura ( $12 \text{ t ha}^{-1}$ ), deixados sobre a superfície do solo após a colheita mecanizada, que ocorreu no dia 16 de maio de 2007 (representado pelo dia Juliano 136); e cana queima (CQ) com histórico de cultivo de cana desde 1970, com queima do canavial, com colheita manual realizada no dia 9 de junho de 2007 (representado pelo dia Juliano 160). Os canaviais instalados nas áreas foram renovados no ano de 2006. Por ocasião da renovação do canavial, foi realizada uma operação de subsolagem e a erradicação química da soqueira. Logo após, foram aplicadas  $2 \text{ t ha}^{-1}$  de calcário dolomítico e  $1 \text{ t ha}^{-1}$  de gesso agrícola para a correção do solo, em área total sem incorporação dos mesmos. A adubação de plantio foi realizada na sulcação, sendo utilizado  $500 \text{ kg ha}^{-1}$  da fórmula 10-25-25, e o plantio realizado de forma manual. Em ambas as áreas, foi aplicado em soqueira, ao longo dos anos,  $100 \text{ m}^{-3}$  de vinhaça,  $300 \text{ kg ha}^{-1}$  de ureia na cana queimada e  $200 \text{ kg ha}^{-1}$  de nitrato de amônia na cana crua. Na cana queimada, o adubo nitrogenado é incorporado a aproximadamente 20 cm de profundidade, enquanto na área de cana crua a aplicação é realizada superficialmente ao lado da linha de plantio. Foram instalados dois gradeados idênticos de  $190 \times 50 \text{ m}$  contendo 60 pontos, um em cada área, com distância mínima entre os pontos amostrais de 13,3 m (Figura 2.1).

A emissão de  $\text{CO}_2$  do solo ( $\text{FCO}_2$ ) foi registrada com um sistema automatizado portátil de fluxo de  $\text{CO}_2$  do solo LI-COR (LI-8100), durante os estágios iniciais do crescimento da cultura da cana-de-açúcar (Figura 2.2). Em seu modo de medição, o sistema LI-8100 (Figura 2.2 item a) monitora as mudanças na concentração de  $\text{CO}_2$  dentro da câmara (Figura 2.2 item c), por meio de espectroscopia, na região do infravermelho (IRGA Infrared Gas Analyzer). A câmara para solos tem um volume interno de  $854,2 \text{ cm}^3$ , com área de contato de  $83,7 \text{ cm}^2$ , e foi colocada sobre colares de PCV previamente inseridos no solo, a uma profundidade de 0,03 m (Figura 2.3).



A temperatura do solo ( $T_s$ ) foi monitorada concomitantemente às avaliações de respiração do solo, utilizando-se de um sensor de temperatura, que é parte integrante do sistema ao LI-8100 (Figura 2.2 item b). Tal sensor consiste em uma haste de 0,2 m que é inserida no interior do solo, na região próxima ao local onde foram instalados os colares de PVC.

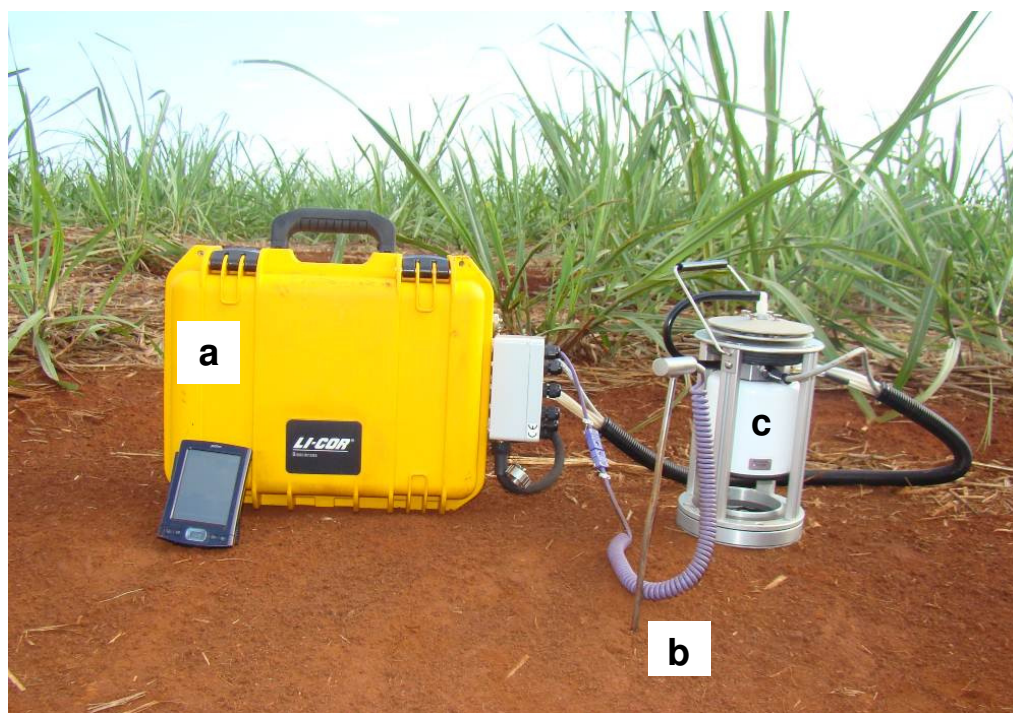


Figura 2.2. Sistema LI-8100 interligado à câmara de solos (a), sensor de temperatura do solo (b) e câmara para solo inserida sobre o colar de PVC (c).



Figura 2.3. Colares de PVC inseridos no solo das áreas de: a) cana crua, e b) cana queimada.

A umidade do solo (Us) foi registrada utilizando-se de um aparelho TDR (Time Domain Reflectometry) - Campbell® (Hydrosense TM, Campbell Scientific, Austrália – Figura 2.5). Foram escolhidos 20 do total de 60 pontos, em cada gradeado, para a condução do estudo da variabilidade temporal de FCO<sub>2</sub>, que ocorreu durante um período de aproximadamente 70 dias após a colheita da cultura. As avaliações foram realizadas nos dias Julianos 190; 191; 192; 195; 200; 201; 204; 208; 209; 215; 227; 234; 241; 255 e 260, no período da manhã (7 às 9 horas), durante o ano de 2007. Para o estudo da variabilidade espacial, onde as avaliações foram realizadas nos 60 pontos em cada gradeado, as medidas foram realizadas nos dias 191; 200 e 248 (CC) e 192; 201 e 246 (CQ), no período da manhã (7 às 10 horas). A Figura 2.4 indica os dias em que foram avaliadas a emissão de CO<sub>2</sub>, temperatura e umidade do solo nas áreas experimentais juntamente com os eventos de chuva nas áreas de cana crua e queimada.

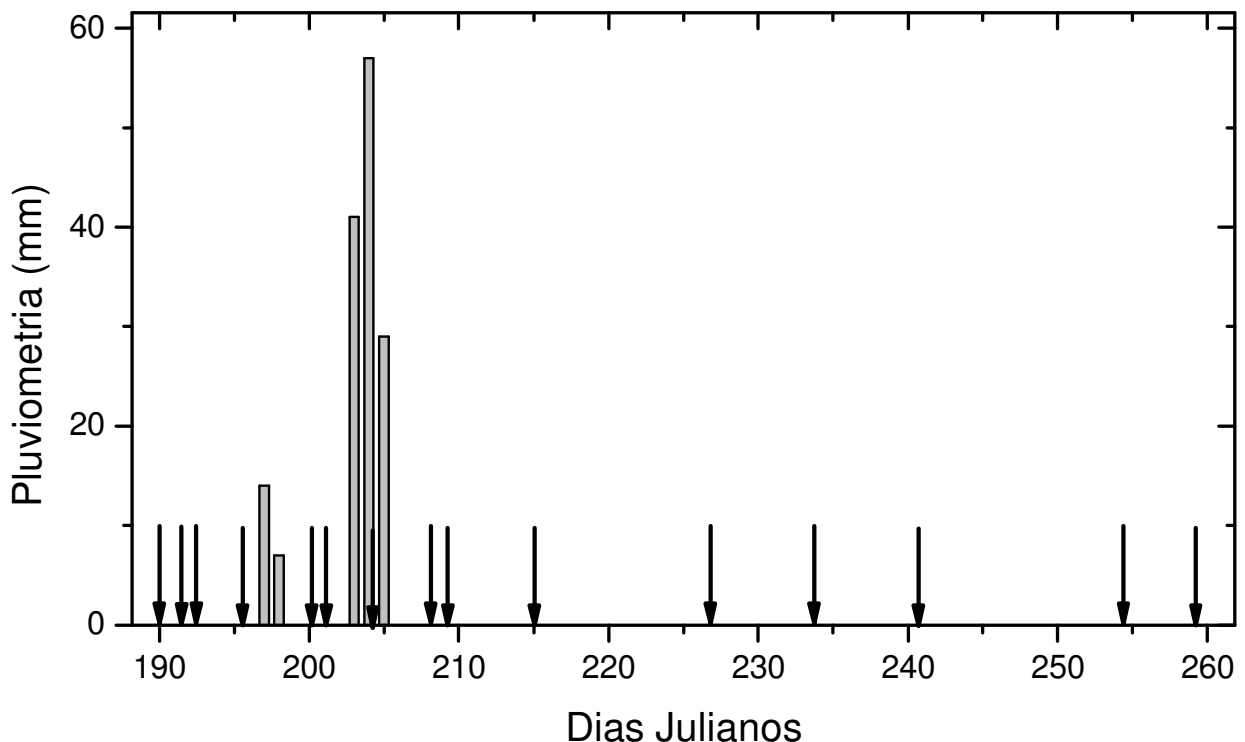


Figura 2.4. Pluviometria durante o período de avaliação do experimento. Flechas indicam os dias de avaliação da emissão de CO<sub>2</sub>, temperatura e umidade do solo.

A estatística descritiva (média, desvio-padrão, erro-padrão da média, mínimo, máximo e coeficiente de variação) foi utilizada para a classificação da variabilidade de FCO<sub>2</sub>, Ts e Us, assim como a análise de variância (medidas repetidas no tempo), e a regressão não linear foi utilizada para a análise da variabilidade temporal dos dados. A dependência espacial foi avaliada por meio da técnica de geoestatística (WEBSTER & OLIVER, 1990) aplicada para todas as variáveis estudadas.

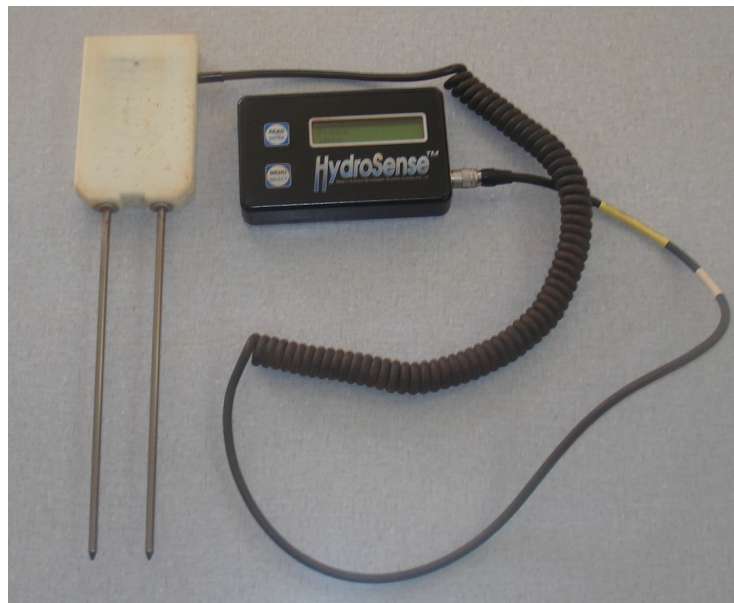


Figura 2.5. TDR - Hydrosense system, sistema portátil utilizado para avaliação da umidade do solo.

A análise geoestatística é baseada na teoria das variáveis regionalizadas, que é uma função numérica com distribuição espacial, que varia de um ponto a outro com continuidade aparente, mas cujas variações não podem ser representadas por uma função matemática simples. Uma variável regionalizada é uma variável aleatória que assume diferentes valores, de acordo com a sua posição na área de estudo, é considerada a realização de um conjunto de variáveis aleatórias. Se todos os valores de uma variável regionalizada forem considerados em todos os pontos dentro de uma área amostral, a variável regionalizada é apenas uma de infinitas variáveis aleatórias. Esse

conjunto é chamado de função aleatória e é simbolizado por  $Z(x_i)$ . Na prática, quando retiramos uma amostra de solo em um local com coordenadas definidas, temos apenas uma única realização da função aleatória. Para estimar valores em locais não amostrados, devemos introduzir as restrições de estacionaridade estatística. A existência de estacionaridade permite que o experimento possa ser repetido mesmo que as amostras sejam coletadas em pontos diferentes, pois elas pertencem à mesma população, com os mesmos momentos estatísticos (VIEIRA, 2000).

Uma função aleatória é considerada estacionária quando o valor esperado para a sua realização é o mesmo para todos os pontos na área de estudo, ou seja,

$$E [Z(x_i)] = m \quad (1.1)$$

Sendo  $Z(x_i)$  a função aleatória e  $m$  a média dos valores da variável, o qual não depende da distância de separação  $h$ . Se escolhermos dois pontos distintos na área, separados pelo vetor  $h$ , o valor médio da diferença  $[Z(x_i) - Z(x_i + h)]$  será:

$$E [Z(x_i) - Z(x_i + h)] = 0 \quad (1.2)$$

Assim, temos a estacionaridade de primeira ordem, também conhecida como a estacionaridade da média. Entretanto, para a análise geoestatística, é necessário também a estacionaridade de segunda ordem e implica que, para cada par de uma variável aleatória, a função de covariância  $Cov(h)$  existe e é dependente da distância  $h$  (VAUCLIN et al., 1983).

$$Cov(h) = E [Z(x_i).Z(x_i + h)] - m^2 \quad (1.3)$$

A estacionaridade de segunda ordem, não é uma condição fácil de ser satisfeita na prática, pois implica a existência de uma variância finita dos valores medidos, suposição essa difícil de ser verificada. Portanto, uma suposição alternativa e mais simples é assumida, denominada de hipótese intrínseca. A hipótese intrínseca requer que, para todo vetor  $h$ , a variância do incremento  $Z(x_i) - Z(x_i + h)$  seja finita e independente da posição dentro da área de estudo (TRANGMAR et. al, 1985), e temos assim a função:

$$Var [Z(x_i) - Z(x_i + h)] = E [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 = 2\gamma(h) \quad (1.4)$$

que é denominada de variograma. Na prática, a forma do variograma não é muito utilizada e sim a forma  $\gamma(h)$ , denominada de semivariograma, que é estimado como a média do quadrado das diferenças entre todas as observações separadas pela distância  $h$ . Assim, quando a pressuposição da hipótese intrínseca é satisfeita, o semivariograma apresenta a seguinte forma (BURROUGH & McDONNELL, 1998):

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (1.5)$$

em que,  $\hat{\gamma}(h)$  é a estimativa da semivariância na distância de separação  $h$ ;  $N$  é o número de pares de pontos separados pela distância  $h$  (neste trabalho a semivariância para uma dada distância foi calculada com  $N$  maior que 50);  $Z(x_i)$  é o valor da variável  $Z$  no ponto  $x_i$ ;  $Z(x_i + h)$  é o valor da variável  $Z$  no ponto  $x_i + h$ . O gráfico de  $\hat{\gamma}(h)$ , em função de  $h$ , é o chamado semivariograma experimental (Figura 2.6), o qual exibe um comportamento puramente aleatório ou sistemático que pode ser descrito por modelos teóricos (linear, esférico, exponencial, gaussiano e lei de potência).

Os coeficientes dos modelos foram determinados pelo melhor ajuste para todos os dados de semivariância. Para variáveis que apresentam dependência espacial, espera-se que os valores de  $Z(x_i) - Z(x_i + h)$  aumentem com a distância  $h$  até determinada distância, a partir da qual os valores estabilizam. O valor de semivariância, na qual ocorre a estabilização do semivariograma, é denominado de patamar, representado pelo símbolo  $C_0 + C_1$ , sendo aproximadamente igual ao valor da estimativa da variância dos dados analisados. A distância na qual ocorre a estabilização do semivariograma é denominada de alcance, simbolizado por  $a$ , e define o limite da dependência espacial (autocorrelação). O valor  $C_1$  representa a estrutura de variabilidade espacial dos dados. O efeito pepita, representado pelo símbolo  $C_0$ , é o valor de semivariância encontrado no intercepto do modelo ajustado com o eixo Y. Teoricamente, este valor deve ser zero para uma distância de separação ( $h$ ) igual a zero; entretanto, erros de amostragem e a variabilidade na pequena escala podem causar desvio do zero para esse parâmetro. Portanto, o efeito pepita representa a quantidade de variância não explicada ou modelada como correlação espacial.

Os parâmetros  $C_0$ ,  $C_0 + C_1$  geralmente são utilizados nas equações de ajuste nos semivariogramas experimentais e, neste trabalho, foram utilizados para a comparação dos modelos de variabilidade espacial da emissão de  $\text{CO}_2$ , temperatura e umidade do solo (TRANGMAR et al., 1985; ISAACS & SRIVASTAVA, 1989). A razão entre o efeito pepita e o patamar ( $C_0/(C_0+C_1)$ ), expressa em porcentagem, foi utilizada para classificar a dependência espacial das propriedades estudadas, de acordo com o proposto por CAMBARDELLA et al. (1994): dependência espacial forte ( $C_0/(C_0+C_1) \leq 0,25$ ), moderada ( $0,25 < C_0/(C_0+C_1) < 0,75$ ) ou fraca ( $C_0/(C_0+C_1) \geq 0,75$ ). Antes da análise geoestatística, uma transformação lognormal foi aplicada para a normalização da assimetria da frequência de distribuição de FCO2 (GONÇALVES et al., 2001).

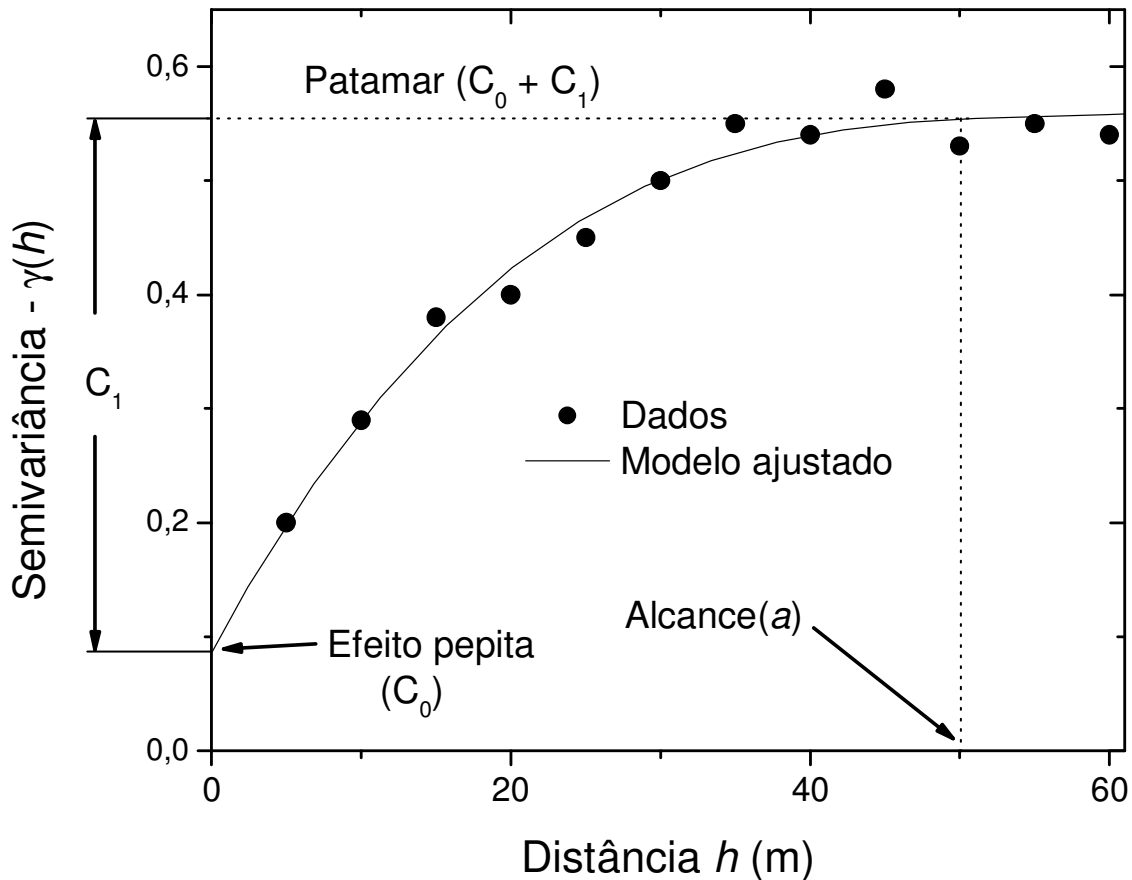


Figura 2.6. Semivariograma experimental  $\hat{\gamma}(h)$ , em função da distância de separação  $h$ , calculado, usando a equação (1.5).

Somente semivariogramas isotrópicos foram considerados neste estudo. Os semivariogramas experimentais foram ajustados pelo método dos mínimos quadrados, aos seguintes modelos matemáticos teóricos: (a) modelo exponencial  $\hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1\{1 - \exp[-3(h/a)]\}$ ,  $h > 0$ ; (b) modelo esférico:  $\hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1[3/2(h/a) - 1/2(h/a)^3]$ ,  $0 \leq h \leq a$  e  $\hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1$ ,  $h > a$ . O processo de validação cruzada, que consiste na remoção de cada observação pertencente ao conjunto de dados com subsequente estimativa do seu valor, pelo método de interpolação (krigagem ordinária), foi utilizado para a verificação da confiabilidade do modelo matemático ajustado. O modelo escolhido foi aquele que melhor estimou os valores observados, ou seja, aquele que produziu uma equação de regressão linear entre os valores observados, em função dos valores estimados o mais próximo da bissetriz (intercepto igual a zero e coeficiente angular = 1) (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989). Os cálculos da semivariância e os subsequentes ajustes dos modelos aos semivariogramas experimentais foram realizados no programa GS+ (GAMMA DESIGN SOFTWARE, 1998). Após o ajuste dos modelos, foi realizada a estimativa da emissão de CO<sub>2</sub> em locais não amostrados, por meio do método de interpolação da krigagem ordinária (TRANGMAR et al., 1985). A construção dos mapas de padrões espaciais (interpolação pela krigagem) foi realizada pelo programa SURFER versão 9.11.947 (Golden Software Inc, Golden, CO, EUA).

## 2.3 - Resultados e Discussão

### 2.3.1 - Estudo da variabilidade temporal

A variabilidade temporal de FCO<sub>2</sub>, Ts e Us, nos sistemas de CC e CQ, é apresentada na Figura 2.7, enquanto as estatísticas descritivas são apresentadas na Tabela 2.1. Valores médios  $\pm$  erro-padrão da média indicam que a média de FCO<sub>2</sub> foi 39% maior no sistema CQ ( $2,87 \pm 0,28 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) e significativamente diferente ( $p < 0,05$ ), quando comparado ao sistema CC ( $2,06 \pm 0,06 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) durante o período de 70 dias de estudo. Os valores de emissão do presente estudo foram similares aos registrados na mesma época e região, em áreas de cultivo de cana-de-

-açúcar, no sistema de cana crua (BRITO et al., 2009). As emissões totais para cada sistema de manejo, ao final do período de 70 dias, calculadas a partir das áreas embaixo das curvas de emissão (Figura 2.7a), foram de 692 e 537 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> para CQ e CC, respectivamente. Portanto, um adicional de 42,3 g C-CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> foi liberado para a atmosfera no sistema de CQ, quando comparado ao sistema de CC. Os resultados corroboram McCOOL et al. (2008), que observaram maior respiração microbiana nos primeiros 0,05 m de solos submetidos à queima dos resíduos, comparado ao manejo convencional, na cultura do trigo.

Tabela 2.1. Estatísticas descritivas para emissão de CO<sub>2</sub> do solo (FCO<sub>2</sub>), temperatura do solo (Ts) e umidade do solo (Us).

|  | Média | DP   | EP   | Mínimo | Máximo | CV (%) |
|--|-------|------|------|--------|--------|--------|
| Cana crua  |       |      |      |        |        |        |
| FCO <sub>2</sub> (μmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ) | 2,06  | 0,24 | 0,06 | 1,81   | 2,67   | 11,7   |
| Ts (°C)  | 19,44 | 2,22 | 0,57 | 16,29  | 23,90  | 11,4   |
| Us (%)   | 21,95 | 7,96 | 2,05 | 8,30   | 35,80  | 36,2   |
| Cana queimada  |       |      |      |        |        |        |
| FCO <sub>2</sub> (μmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ) | 2,87  | 1,07 | 0,28 | 1,79   | 5,11   | 37,2   |
| Ts (°C)  | 20,35 | 2,79 | 0,72 | 15,58  | 25,54  | 13,7   |
| Us (%)   | 20,00 | 9,85 | 2,54 | 7,90   | 37,00  | 49,3   |

N=20. DP = desvio-padrão; EP= erro-padrão da média; CV= coeficiente de variação.

As médias da temperatura do solo foram 20,35 e 19,44 °C, enquanto as médias da umidade do solo foram 20 e aproximadamente 22%, nas áreas de CQ e CC, respectivamente (Tabela 2.1). A Figura 2.7 apresenta a variabilidade temporal das propriedades estudadas, indicando que FCO<sub>2</sub> e Ts foram maiores no sistema CQ que no CC, enquanto Us manteve baixos valores na cana crua, na maioria dos dias estudados. Diferenças significativas em FCO<sub>2</sub> foram mais frequentemente observadas nos primeiros 20 dias dos 70 dias de estudo, durante o período de crescimento inicial da cultura da cana-de-açúcar. O máximo valor médio de FCO<sub>2</sub> foi registrado no dia 208, no sistema de CQ e CC (Figura 2.7a), coincidindo com o dia em que Us atingiu seus maiores valores (Figura 2.7c). As variáveis estudadas em CQ apresentaram altos valores de CV, quando comparados aos observados em CC. Todavia, os valores de CV encontrados são similares àqueles observados em florestas (FANG et al., 1998; XU & QI, 2001; OHASHI & GYOKUSEN, 2007; KONDA et al., 2008) e reportados em estudo



prévios, conduzidos em solos desprovidos de vegetação (LA SCALA Jr. et al., 2000). A deposição de resíduos da cultura sobre a superfície do solo, no sistema CC, favorece menores temperaturas e maiores umidades, como o observado, por exemplo, no dia 195, quando  $T_s$  foi 3 °C menor, e a umidade foi 10% maior em CC, em comparação ao sistema CQ (Figura 2.7b e c). Consequentemente, como a variabilidade temporal de  $FCO_2$  é governada pelas mudanças de  $T_s$  e  $U_s$  (XU & QI, 2001; TEDESCHI et al., 2006; KOSUGI et al., 2007; OHASHI & GYOKUSEN, 2007; CONCILIO et al., 2009), os menores valores de  $FCO_2$ , associados aos seus baixos valores de CV, podem estar relacionados à presença da palha sobre a superfície do solo, especialmente durante as primeiras semanas do estudo.

A análise de variância de medidas repetidas no tempo indicou significância ( $p < 0,0001$ ) da interação entre os sistemas de manejo e o tempo (dias) para todas as variáveis estudadas (Tabela 2.2). Portanto,  $FCO_2$  não apresentou o mesmo padrão de variabilidade temporal quando os dois sistemas de manejo foram comparados. Para o sistema de CC, não foram observadas diferenças significativas ( $p > 0,05$ ) em  $FCO_2$  a longo dos dias de avaliação, sendo o oposto observado para o sistema de CQ, o qual apresentou grandes oscilações nos valores de  $FCO_2$  durante o período de estudo ( $p < 0,01$ ). Tal efeito pode ser associado ao fato de que  $FCO_2$  em CQ apresentou maior sensibilidade por eventos climáticos, como a ocorrência de chuvas durante o período experimental. Aumentos na respiração do solo foram observados depois da ocorrência de chuvas nos dias 198 e 205, de 21 e 127 mm, respectivamente. Estes eventos ocorreram antes do dia no qual a emissão atingiu valor máximo de  $5,11 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (dia 208). EPRON et al. (2004) não observaram efeito das chuvas sobre  $FCO_2$ , resultado similar ao observado na área de CC. Mudanças de  $FCO_2$  após a precipitação indicam maior sensibilidade de  $FCO_2$  em relação à  $U_s$  no sistema CQ, em comparação ao sistema CC. As variações de  $FCO_2$  após a ocorrência de chuvas podem estar associadas as variações de outras propriedades do solo, não avaliadas no presente estudo, como, por exemplo, variações nos valores da biomassa microbiana, respiração radicular e variações na granulometria da área, principalmente quanto aos teores de argila (XU & QI, 2001).

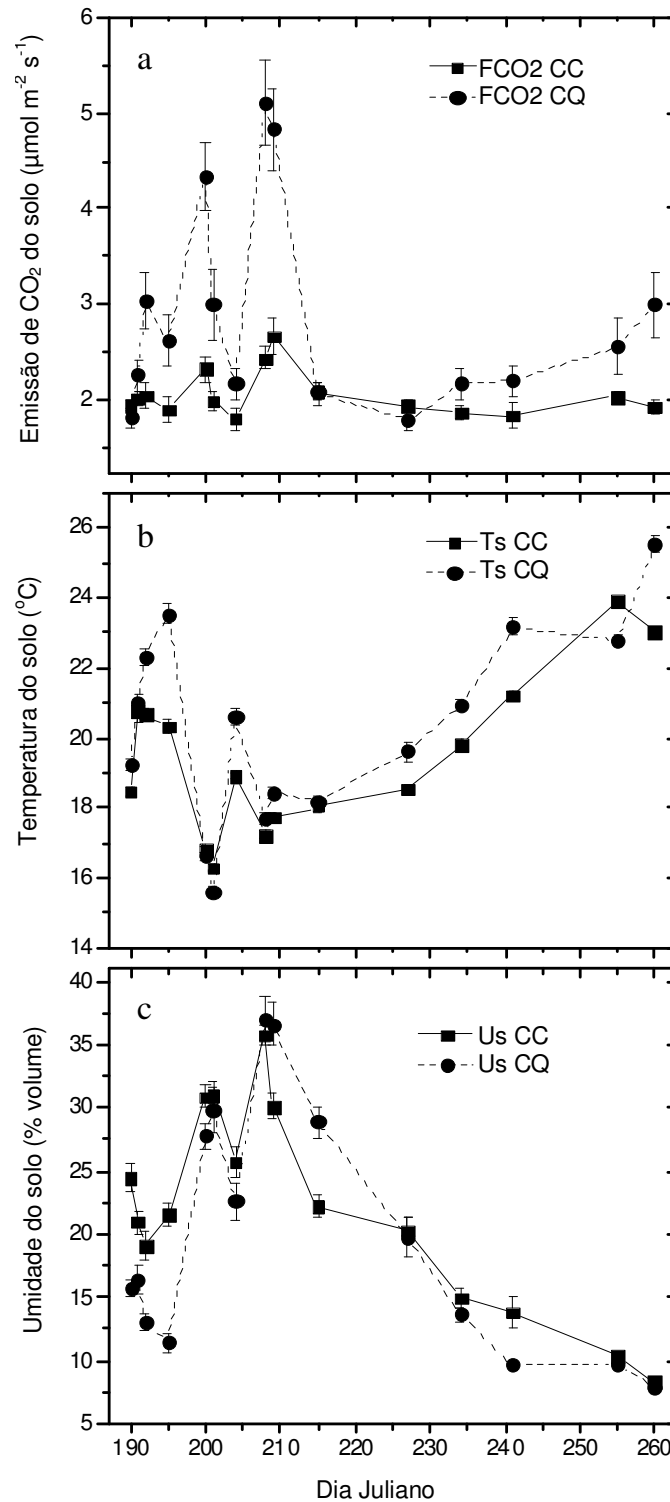


Figura 2.7. Variabilidade temporal de: a) emissão de CO<sub>2</sub> do solo; b) temperatura do solo; c) umidade do solo nos sistemas de cana crua e cana queimada, durante o período de 70 dias de estudo.

Tabela 2.2. Desdobramento da interação entre os sistemas de manejo e o tempo (dias) para emissão de CO<sub>2</sub>, temperatura e umidade do solo.

| Sistema de manejo | Dias Julianos  |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|-------------------|--|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                   | 190  | 191     | 192     | 195     | 200     | 201     | 204     | 208     | 209     | 215     | 227     | 234     | 241     | 255     | 260     |
|                   | Emissão de CO <sub>2</sub> do solo (μmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ) |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| Cana crua         | 1,94 a   | 2,02 a  | 2,05 b  | 1,90 b  | 2,33 b  | 1,99 b  | 1,81 a  | 2,44 b  | 2,67 b  | 2,09 a  | 1,94 a  | 1,87 a  | 1,84 a  | 2,04 a  | 1,93 b  |
| Cana queimada     | 1,81 a   | 2,25 a  | 3,04 a  | 2,63 a  | 4,34 a  | 2,99 a  | 2,16 a  | 5,11 a  | 4,83 a  | 2,08 a  | 1,79 a  | 2,18 a  | 2,21 a  | 2,57 a  | 2,99 a  |
|                   | Temperatura do solo (°C)   |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| Cana crua         | 18,45 b  | 20,76 a | 20,66 b | 20,32 b | 16,80 a | 16,29 a | 18,91 b | 17,23 a | 17,72 b | 18,04 a | 18,55 b | 19,81 b | 21,20 b | 23,90 a | 23,03 b |
| Cana queimada     | 19,22 a  | 20,97 a | 22,28 a | 23,53 a | 16,63 a | 15,58 b | 20,61 a | 17,69 a | 18,44 a | 18,21 a | 19,62 a | 20,94 a | 23,15 a | 23,97 a | 25,05 a |
|                   | Umidade do solo (%)  |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
| Cana crua         | 24,45 a  | 21,00 a | 19,10 a | 21,50 a | 30,85 a | 30,95 a | 25,65 a | 35,80 a | 30,10 b | 22,20 b | 20,25 a | 15,00 a | 13,80 a | 10,35 a | 8,30 a  |
| Cana queimada     | 15,75 b  | 16,40 b | 13,10 b | 11,45 b | 27,75 b | 29,75 a | 22,60 b | 37,00 a | 36,60 a | 28,90 a | 19,80 a | 13,70 a | 9,60 b  | 9,65 a  | 7,90 a  |

Médias seguidas pela mesma letra nas colunas não diferem entre si, pelo teste Tukey, ao nível de 1% de probabilidade.

Para a melhor compreensão das relações entre a sensibilidade de FCO<sub>2</sub> e as mudanças na umidade do solo, causadas pela precipitação, foi realizada a análise de regressão polinomial entre FCO<sub>2</sub> e Us (Tabela 2.3 e Figura 2.8). Os resultados indicaram que a umidade do solo determinou as variações temporais de FCO<sub>2</sub> em ambas as áreas. Por outro lado, não foram encontradas correlações significativas entre a emissão e a temperatura do solo ( $p > 0,10$ ) nos sistemas de manejo estudados. Essa falta de correlação pode ser atribuída ao fato de que, durante o desenvolvimento do experimento, a temperatura do solo não apresentou valores que poderiam comprometer a atividade microbiana em ambas as áreas (aproximadamente 20 °C nos primeiros 0,2 m de profundidade). Neste caso, os resultados foram similares àqueles encontrados por EPRON et al. (2004), nos quais um modelo bivariado, incluindo Ts e Us, não explicou as variações temporais da respiração do solo melhor que um modelo univariado, considerando a umidade do solo.

No presente estudo, apenas a variável Us explicou 37% e 42% da variabilidade temporal de FCO<sub>2</sub> nas áreas de CC e CQ, respectivamente. Todavia, melhores resultados foram obtidos para uma relação quadrática entre FCO<sub>2</sub> e Us (Figura 2.8), similar a outros estudos (SCHWENDENMANN et al., 2003; EPRON et al., 2004; KOSUGI et al., 2007). O coeficiente de determinação foi tão alto quanto 0,73 para CQ na previsão das mudanças temporais de FCO<sub>2</sub>, baseada na Us (Tabela 2.3). Como pode ser observado pelos parâmetros estimados  $\pm$  erro-padrão, apresentados na Tabela 2.3, estes foram, em sua maioria, significativos ( $p < 0,05$ ) para a regressão no sistema de cana queimada. Deve-se salientar que os parâmetros a1 e a2, estimados para modelo da cana queimada, são mais altos do que aqueles do modelo da cana crua, indicando assim maior sensibilidade de FCO<sub>2</sub> a Us nesse sistema. Esse efeito é semelhante àquele observado por USSIRI & LAL (2009), que relataram maior sensibilidade em sistema de preparo convencional, quando comparado ao sem distúrbio, quanto às relações da emissão de CO<sub>2</sub>, temperatura e umidade do solo consideradas.

Tabela 2.3. Parâmetros da regressão quadrática entre a emissão de CO<sub>2</sub> do solo (FCO<sub>2</sub>) e a umidade do solo (Us), para ambos os sistemas de manejo.

| Sistema de Manejo | Regressão quadrática<br>$FCO_2 = a_0 + a_1 \times Us + a_2 \times Us^2$ |                                |                               | R <sup>2</sup> |
|-------------------|---|--------------------------------|-------------------------------|----------------|
|                   | a <sub>0</sub>  | a <sub>1</sub>                 | a <sub>2</sub>                |                |
| Cana crua         | 2,1983 ± 0,3416   | -0,0388 ± 0,0331 <sup>NS</sup> | 0,0013 ± 0,0007 <sup>NS</sup> | 0,50           |
| Cana queimada     | 4,6367 ± 0,9169   | -0,2820 ± 0,0951               | 0,0079 ± 0,0021               | 0,73           |

<sup>NS</sup> não significativo (p>0,05). a<sub>0</sub>: μmol m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>. a<sub>1</sub>: μmol m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup> (vol.%)<sup>-1</sup>. a<sub>2</sub>: μmol m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup> (vol.%)<sup>-2</sup>.

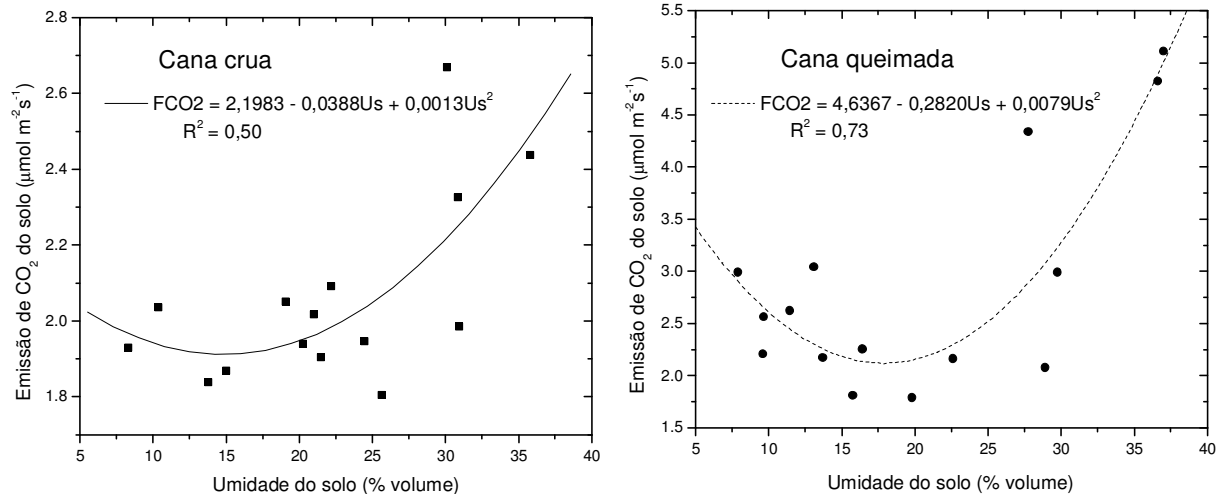


Figura 2.8. Relação quadrática entre a emissão de CO<sub>2</sub> e a umidade do solo nas áreas de cana crua e cana queimada.

### 2.3.2 - Estudo da variabilidade espacial

Os valores médios de FCO<sub>2</sub> observados no gradeado instalado na cana crua foram de 1,97; 2,03 e 2,18 μmol m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>, nos dias 192; 201 e 246, respectivamente (Tabela 2.4). Para o gradeado da cana queimada, as médias foram 2,03; 5,29 e 2,86 μmol m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>, nos dias 191; 200 e 248, respectivamente (Tabela 2.4). Esses valores são comparáveis aos resultados obtidos por XU & QI (2001), que encontraram altos valores de emissão de CO<sub>2</sub> do solo em estudos realizados em solos de florestas (4,7; 3,4 e 4,2 μmol m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>), porém superiores a KONDA et al. (2008), que relataram valores de FCO<sub>2</sub> ao redor de 0,739 μmol m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup> em áreas de cultivo de leguminosas. A média diária máxima de FCO<sub>2</sub> observada em CQ foi 5,29 μmol m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup> para o dia 200. A precipitação de 21 mm ocorrida entre os dias 197 e 198 pode ser a razão para o aumento de 160% da emissão do dia 191 para o dia 200, em CQ. Em estudo similar, LA SCALA Jr. et al. (2000) observaram aumento de 63% em FCO<sub>2</sub> de um solo desprovido

de vegetação após período chuvoso (14,4 mm). O mesmo não foi observado em CC, onde os valores de FCO<sub>2</sub> estiveram ao redor de 2,05  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  durante o período experimental, sem aumentos significativos (teste  $t$   $p > 0,05$ ) após a ocorrência de chuva. Com base nos valores médios  $\pm$  erro-padrão, apresentados na Tabela 2.4, e no teste  $t$  ( $p < 0,05$ ), é possível afirmar que as emissões no sistema de cana queimada apresentam maiores diferenças diárias, enquanto as emissões no sistema de cana crua são mais constantes e ao redor de 2,05  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , podendo tal efeito ser atribuído principalmente à presença da palha sobre a superfície do solo.

Os coeficientes de variação (CV) observados para FCO<sub>2</sub> nos 60 pontos amostrais do gradeado experimental, variaram de um mínimo de 22,6% a um máximo de 63,5% observados em CC (dia 246) e CQ (dia 200), respectivamente (Tabela 2.4). Os valores de CV de FCO<sub>2</sub> estão de acordo com os citados na literatura (ROCHETTE et al., 1991; DASSELAAR et al., 1998; LA SCALA Jr. et al., 2000; SCHWENDENMANN et al., 2003; EPRON et al., 2004; TEDESCHI et al., 2006; KONDA et al., 2008). Baixos valores de CV foram encontrados para Ts (3,5 a 6,5%), enquanto intermediários valores de CV foram encontrados para Us (18 a 33%), em ambas as áreas. De maneira geral, os valores de CV diminuíram ao longo dos dias estudados para todas as propriedades. Com base nos valores de CV, a variação espacial de Ts foi inferior à de FCO<sub>2</sub>, sugerindo um mínimo efeito dessa variável nas variações espaciais de FCO<sub>2</sub>. A umidade do solo decaiu quase que de maneira monotônica durante os dias 208 a 260, devido ao período de seca, sem ocorrência de precipitações (Figura 2.7c).

De acordo com os critérios de classificação da variabilidade espacial das propriedades do solo, proposto por WARRICK & NIELSEN (1980), os CVs encontrados para FCO<sub>2</sub> podem ser considerados moderados para CC somente nos dia 246 ( $12\% < \text{CV} < 24\%$ ). Para os demais dias de estudo, os valores de CV de FCO<sub>2</sub> podem ser considerados altos ( $\text{CV} > 24\%$ ). Os valores de CV para Ts foram baixos ( $\text{CV} < 12\%$ ) para todos os dias estudados, em ambas as áreas. Us, por sua vez, apresentou moderados valores de CV, exceto para o dia 191, na área de cana queimada, quando o valor de CV foi considerado alto (33,2%).

Tabela 2.4. Média  $\pm$  erro-padrão, CV, modelos e estimativas dos parâmetros ajustados aos semivariogramas experimentais para a emissão de CO<sub>2</sub> do solo, temperatura do solo e umidade do solo nos sistemas de manejo de cana crua e cana queimada.

| Dia   | Média $\pm$ EP   | CV   | Modelo | $C_0$ | $C_0+C_1$ | $a$ (m) | SQR      | $r^2$ | GDE  |
|---|------------------|------|--------|-------|-----------|---------|----------|-------|------|
| Emissão de CO <sub>2</sub> do solo ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) |                  |      |        |       |           |         |          |       |      |
| Cana crua   |                  |      |        |       |           |         |          |       |      |
| 192   | 1,97 $\pm$ 0,07  | 26,1 | Exp    | 0,018 | 0,079     | 73,8    | 2,62E-4  | 0,72  | 0,23 |
| 201   | 2,03 $\pm$ 0,07  | 26,2 | Exp    | 0,022 | 0,056     | 72,6    | 1,76E-5  | 0,91  | 0,39 |
| 246   | 2,16 $\pm$ 0,06  | 22,6 | EPP    | ----  | ----      | ----    | ----     | ----  | ---- |
| Cana queimada   |                  |      |        |       |           |         |          |       |      |
| 191   | 2,03 $\pm$ 0,12  | 45,6 | Exp    | 0,016 | 0,122     | 63,0    | 1,27E-3  | 0,67  | 0,13 |
| 200   | 5,29 $\pm$ 0,43  | 63,5 | Exp    | 0,019 | 0,147     | 64,7    | 1,50E-3  | 0,77  | 0,12 |
| 248   | 2,86 $\pm$ 0,16  | 43,6 | EPP    | ----  | ----      | ----    | ----     | ----  | ---- |
| Temperatura do solo ( $^{\circ}\text{C}$ )                                  |                  |      |        |       |           |         |          |       |      |
| Cana crua   |                  |      |        |       |           |         |          |       |      |
| 192   | 20,06 $\pm$ 0,12 | 4,5  | Esf    | 0,278 | 0,585     | 54,0    | 8,10E-4  | 0,97  | 0,47 |
| 201   | 16,93 $\pm$ 0,14 | 6,4  | Esf    | 0,147 | 0,749     | 53,9    | 1,71 E-2 | 0,87  | 0,20 |
| 246   | 22,82 $\pm$ 0,11 | 3,8  | Esf    | 0,375 | 0,773     | 59,2    | 9,31E-3  | 0,83  | 0,48 |
| Cana queimada   |                  |      |        |       |           |         |          |       |      |
| 191   | 19,87 $\pm$ 0,17 | 6,5  | Esf    | 0,148 | 1,950     | 51,4    | 2,61E-1  | 0,84  | 0,08 |
| 200   | 17,29 $\pm$ 0,12 | 5,5  | Esf    | 0,154 | 0,807     | 57,4    | 1,36E-2  | 0,94  | 0,19 |
| 248   | 24,90 $\pm$ 0,11 | 3,5  | Esf    | 0,258 | 0,730     | 42,7    | 4,92E-2  | 0,58  | 0,35 |
| Umidade do solo (% volume)  |                  |      |        |       |           |         |          |       |      |
| Cana crua   |                  |      |        |       |           |         |          |       |      |
| 192   | 18,98 $\pm$ 0,54 | 22,2 | EPP    | ----  | ----      | ----    | ----     | ----  | ---- |
| 201   | 33,30 $\pm$ 0,81 | 18,9 | EPP    | ----  | ----      | ----    | ----     | ----  | ---- |
| 246   | 11,22 $\pm$ 0,29 | 20,1 | EPP    | ----  | ----      | ----    | ----     | ----  | ---- |
| Cana queimada   |                  |      |        |       |           |         |          |       |      |
| 191   | 17,17 $\pm$ 0,74 | 33,2 | Exp    | 1,70  | 25,330    | 48,9    | 2,96E+1  | 0,78  | 0,07 |
| 200   | 28,97 $\pm$ 0,78 | 20,8 | Exp    | 10,42 | 28,500    | 48,9    | 6,53E+1  | 0,49  | 0,37 |
| 248   | 9,03 $\pm$ 0,20  | 17,5 | Esf    | 1,00  | 2,552     | 45,5    | 2,79E-1  | 0,72  | 0,39 |

N = 60; GDE: grau de dependência espacial =  $C_0/(C_0+C_1)$ , forte para valores menores que 0,25; moderado para valores entre 0,25 e 0,75; fraco para valores maiores que 0,75 (CAMBARDELLA et al., 1994); SQR: soma de quadrados do resíduo; Exp = exponencial; Esf = esférico; EPP = efeito pepita puro.

Os sistemas de manejo interferiram diretamente na variabilidade, como observado pelos altos valores de CV em FCO<sub>2</sub>, quando o sistema de CQ é comparado ao sistema de CC, especialmente após a chuva no período anterior ao dia 199. Portanto, o sistema de manejo, associado à ocorrência de chuvas, causa altos valores de FCO<sub>2</sub> e até mesmo alta variabilidade da emissão no sistema de CQ, em comparação a CC. O aumento dos valores de FCO<sub>2</sub> após precipitações pluviométricas tem sido apontado em outros estudos (ROCHETTE et al., 1991; DAVIDSON et al., 2000). Nos casos em que os valores de CV são considerados altos, justifica-se o uso da

técnica de geoestatística com o objetivo de caracterizar os padrões de variabilidade espacial das propriedades estudadas.

Os modelos ajustados aos semivariogramas para FCO<sub>2</sub>, em ambas as áreas, foram, em sua maioria, exponenciais (Tabela 2.4 e Figura 2.9), com exceção para os dias 246 (CC) e 248 (CQ), que não apresentaram estrutura de variabilidade espacial (efeito pepita puro). A maioria dos modelos ajustados apresentou altos valores de coeficiente de determinação, expressos pelos valores de  $R^2$ .

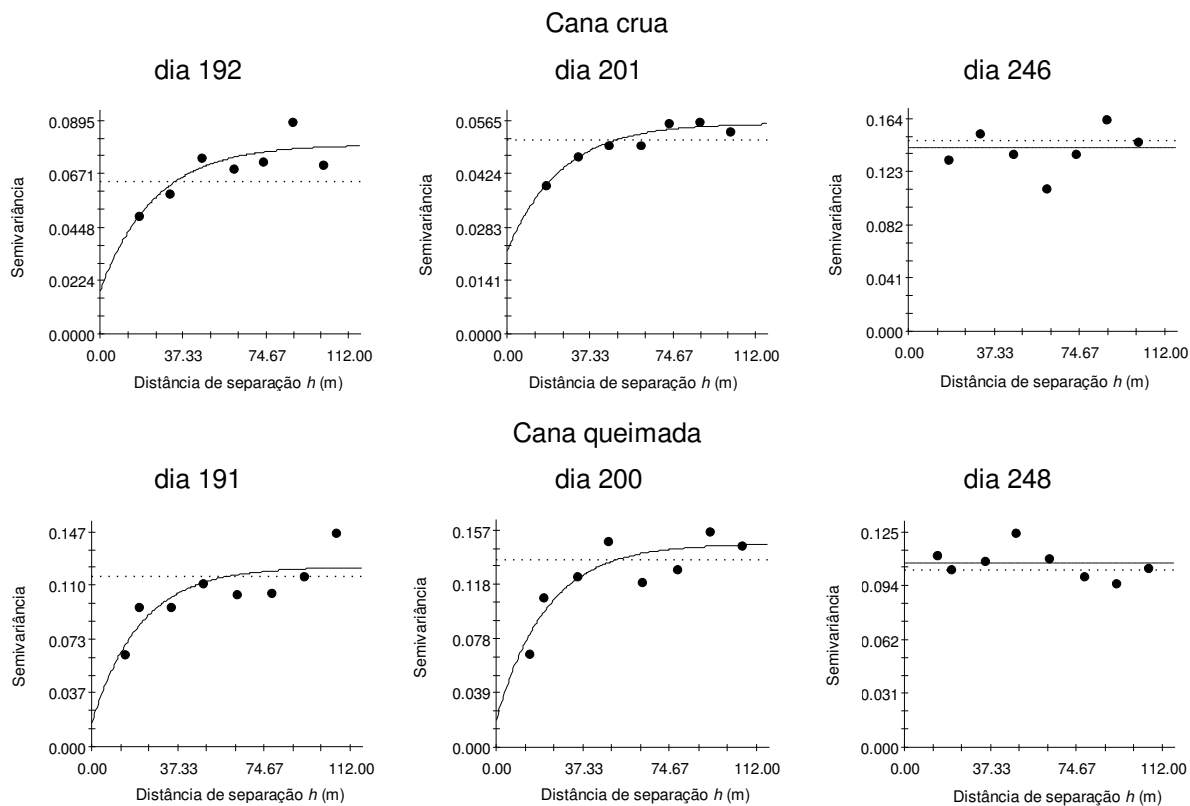


Figura 2.9. Semivariogramas da emissão de CO<sub>2</sub> do solo para os dias estudados. Cana crua: dias 192; 201 e 246; Cana queimada: dias 191; 200 e 246.

Os modelos exponenciais são mais bem ajustados a fenômenos erráticos na pequena escala, enquanto os modelos esféricos descrevem propriedades com alta continuidade espacial, ou menos erráticos na curta distância (ISAACS & SRIVASTAVA, 1989). STOYAN et al. (2000) ajustaram modelos exponenciais para os semivariogramas calculados para FCO<sub>2</sub> em áreas de álamo e trigo. A maioria dos modelos de variabilidade espacial de FCO<sub>2</sub> tem sido descrita por modelos esféricos (DASSELAR



et al., 1998; LA SCALA Jr. et al., 2000; ISHIZUKA et al., 2005; KOSUGI et al., 2007; KONDA et al., 2008) ou alternâncias entre modelos esféricos e exponenciais (TEDESCHI et al., 2006; OHASHI & GYOKUSEN, 2007). A falta de uma estrutura de variabilidade espacial também coincide com os dias em que CV apresentou seus menores valores, durante o período seco, quando não houve ocorrência de chuvas no período de aproximadamente 50 dias. Mudanças nos padrões de variabilidade e modelos de FCO2 foram similares em ambos os sistemas de manejo (Figura 2.9), com modificação de exponencial para efeito pepita puro após um período de seca, também caracterizado por grandes reduções de Us dos dias 201 para 246, e 200 para 248, para CC e CQ, respectivamente. Os modelos ajustados aos semivariogramas da temperatura do solo foram esféricos para todos os dias, em ambas as áreas com estruturas de variabilidade espacial semelhantes (Figura 2.10, Tabela 2.4).

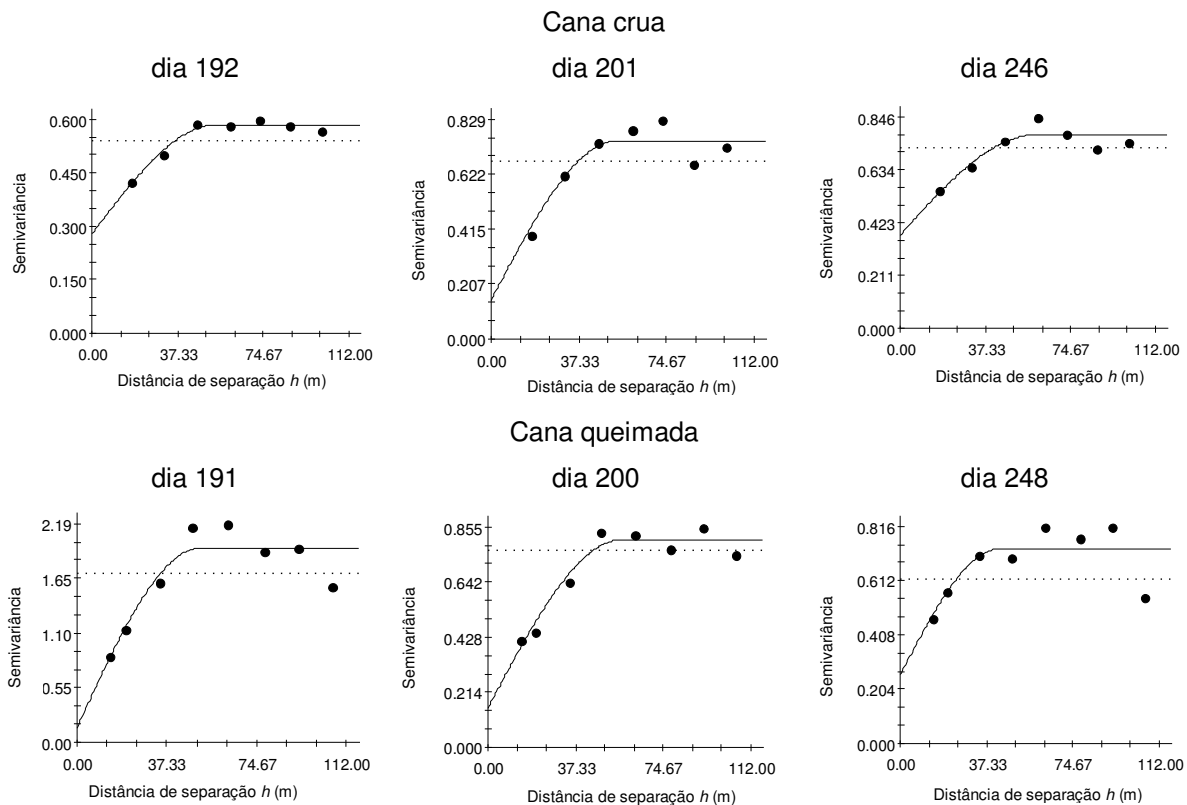


Figura 2.10. Semivariogramas da temperatura do solo para os dias estudados. Cana crua: dias 192; 201 e 246; Cana queimada: dias 191; 200 e 246.

Para Us, os modelos de variabilidade espacial foram exponenciais para os dias 191 e 208, e esféricos para o dia 248, no sistema de CQ. Por outro lado, o sistema de CC, Us apresentou efeito pepita puro para todos os dias estudados (Figura 2.11, Tabela 2.4). Semelhantemente aos resultados apresentados neste trabalho, PANOSSO et al. (2008), estudando a variabilidade espacial da emissão de CO<sub>2</sub>, temperatura e umidade do solo em áreas de cana crua e cana queimada, observaram modelo exponencial para Us em área de cana queimada e falta de estrutura de variabilidade espacial (EPP), para a mesma propriedade, em área de cana crua.

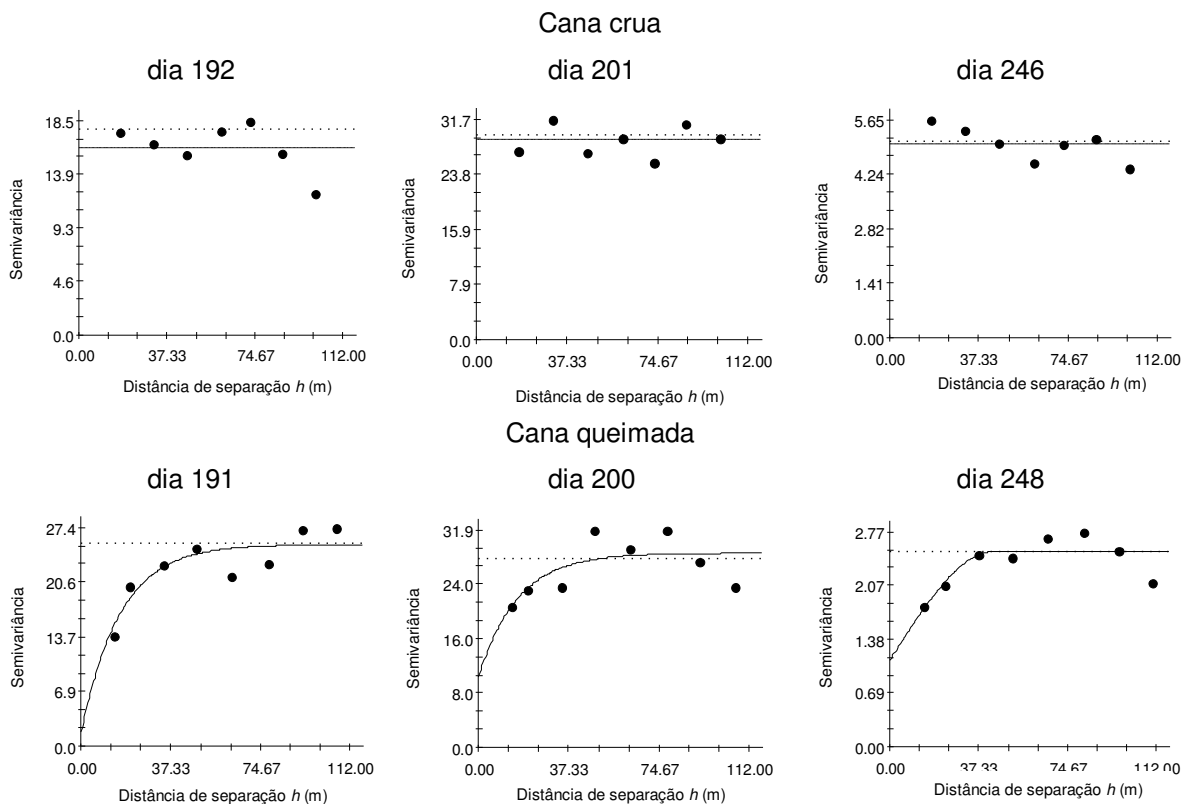


Figura 2.11. Semivariogramas da umidade do solo para os dias estudados. Cana crua: dias 192; 201 e 246; Cana queimada: dias 191; 200 e 246.

A variabilidade espacial de FCO<sub>2</sub> na pequena escala foi semelhante para ambos os sistemas de manejo, uma vez que apresentaram semelhantes valores de CV. A análise da estrutura de variabilidade espacial, expressa pelos valores de  $C_1$ , indicou que os valores mais elevados foram encontrados em CQ, de acordo com a sua caracterização de CV, também apresentando altos valores. O grau de dependência

espacial (GDE), expresso pela razão entre o efeito pepita ( $C_0$ ) e a variância total ( $C_0 + C_1$ ) ou patamar (CAMBARDELLA et al., 1994), foi classificado como forte para FCO<sub>2</sub> na área de CQ (dias 191 e 200), enquanto para a área de CC, estes valores foram classificados como forte e moderado para os dias 192 e 201, respectivamente. Outros estudos apresentam fraco grau de dependência espacial para FCO<sub>2</sub> (ISHIZUKA et al., 2005) ou moderado (LA SCALA Jr. et al., 2000; STOYAN et al., 2000), nos quais as variações dependeram das estações do ano (OHASHI & GYOKUSEN, 2007), ou do tamanho do gradeado amostral (KONDA et al., 2008).

Os alcances de FCO<sub>2</sub>, Ts e Us dos modelos ajustados aos semivariogramas experimentais apresentaram pequenas mudanças entre os dias (Tabela 2.4). Isso foi observado principalmente para CQ, onde Ts e Us variaram de 42,7 a 57,4 m, e 45,5 a 48,9 m, respectivamente. Pequenas mudanças foram observadas nos valores de alcance dos dias 192-201 (CC) e 191-200 (CQ), até os últimos dias de estudo, quando não foi observada estrutura de variabilidade espacial de FCO<sub>2</sub> para as áreas estudadas. Alterações nos alcances dos modelos de variabilidade espacial de FOC<sub>2</sub> têm sido observadas entre estações do ano (OHASHI & GYOKUSEN, 2007), meses (STOYAN et al., 2000), após eventos de precipitação (LA SCALA Jr. et al., 2000), ou mesmo de acordo com o tamanho da malha amostral (RAYMENT & JARVIS, 2000; KONDA et al., 2008). KOSUGI et al. (2007) encontraram alcances para a respiração do solo variando de 4,4 m em período chuvoso para 7,9 e 14,1 m em período seco, com valores de alcance para Us variando de 5,3 m no período seco e 16,6 m no período chuvoso. No presente estudo, Us apresentou variações nos limites de autocorrelação depois do período de chuva, de 48,9 m e 45,5 m, mesmo após 50 dias sem chuva. Entretanto, este comportamento foi observado apenas para o sistema CQ. Foi observada variabilidade espacial na emissão de CO<sub>2</sub> do solo, contudo essa variabilidade não pode ser atribuída à variabilidade espacial da temperatura e umidade do solo, na área de cana queimada.

Os valores médios de alcances dos modelos de variabilidade foram ao redor de 73,2 e 63,9 m para as emissões de CC e CQ, respectivamente (Tabela 2.4.). Tais valores podem fornecer informações a respeito da heterogeneidade da distribuição

espacial em relação às propriedades estudadas em cada sistema de manejo (TRANGMAR et al., 1985). O maior valor de alcance médio da estrutura de variabilidade espacial de FCO<sub>2</sub>, encontrado em CC, em relação à CQ, indica uma distribuição mais homogênea de FCO<sub>2</sub> no sistema onde os resíduos da cultura são deixados sobre a superfície do solo, resultado similar àquele observado na variabilidade temporal. Portanto, um menor número de pontos seria necessário para a estimativa de valores médios de FCO<sub>2</sub> no sistema de cana crua, que no sistema de cana queimada. Este resultado está de acordo com um estudo similar conduzido em diferentes áreas, em Latossolo Vermelho eutroférico, onde foi observado efeito pepita puro para o semivariograma do sistema de CQ e um alcance de 33 m para o sistema de cana crua (PANOSSO et al., 2008).

Os modelos ajustados aos semivariogramas experimentais de FCO<sub>2</sub> foram utilizados para obter a estimativa desta propriedade nos locais não amostrados por meio do processo de interpolação denominado de krigagem (Figura 2.12). A análise dos padrões de variabilidade espacial indica alta descontinuidade espacial de FCO<sub>2</sub> no sistema de cana queimada, em comparação ao sistema de cana crua, como foi confirmado pelos altos valores de CV para todos os dias estudados. A variabilidade espacial de FCO<sub>2</sub> aparenta ser também mais homogênea, em ambos os sistemas estudados, após o período de seca, quando não houve chuvas por 50 dias aproximadamente. Este efeito pode ser devido ao aumento na respiração das raízes, no total de CO<sub>2</sub> emitido ao longo dos 70 dias do período pós-colheita, mostrando, mais uma vez, a complexidade desse fenômeno. Os mapas de erros, das estimativas de krigagem de FCO<sub>2</sub>, indicaram maior continuidade dos erros na área de cana crua. Após a ocorrência de chuvas, foi observado um aumento dos valores de emissão de CO<sub>2</sub> na área de cana queimada (dia 200), acompanhado por um aumento no erro da estimativa desses valores nesse mesmo dia.

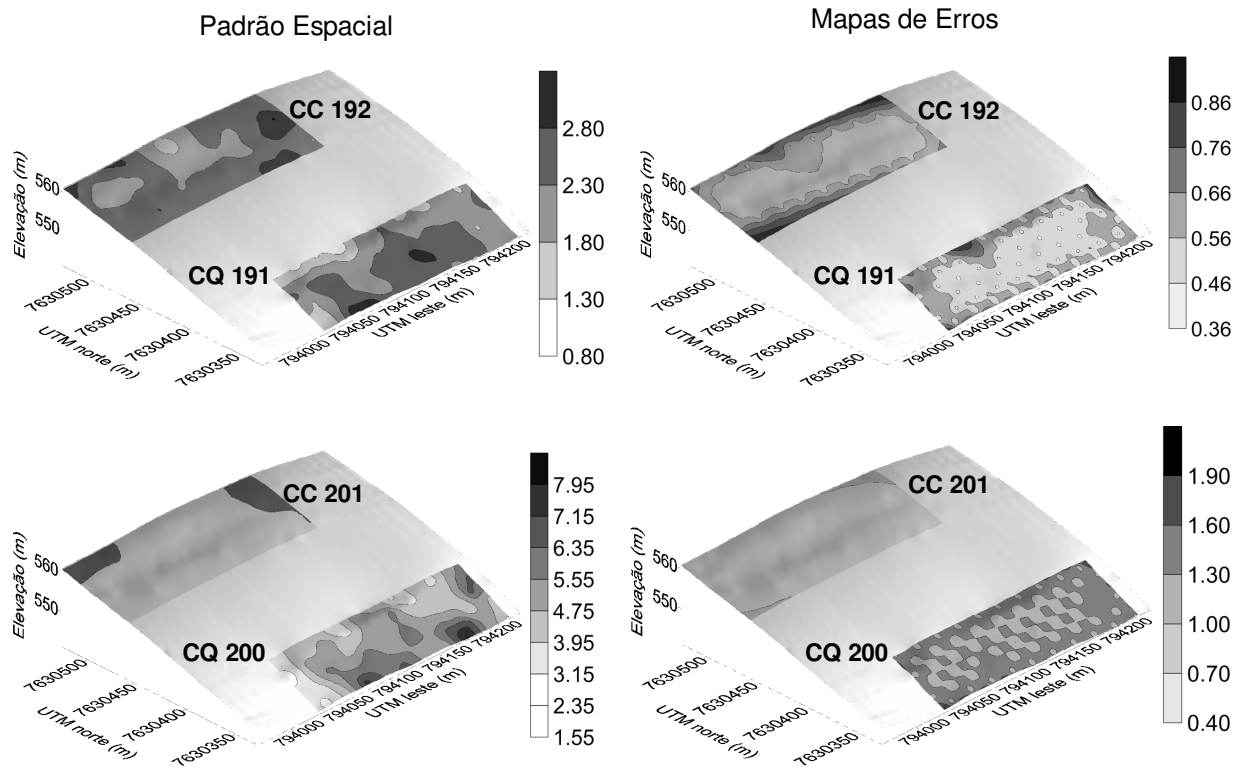


Figura 2.12. Mapas do padrão espacial e mapas de erros da emissão de CO<sub>2</sub> do solo ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) em cana crua (CC) e cana queimada (CQ).

## 2.4 - Conclusões

A área de cana queimada apresentou os maiores valores de emissões de CO<sub>2</sub> do solo, além de apresentar as maiores variações temporais devido a maior sensibilidade às alterações da umidade do solo, principalmente após a ocorrência de chuvas. A temperatura do solo não apresentou correlação linear significativa com a respiração do solo, seja ao longo do espaço e do tempo. Os modelos ajustados aos semivariogramas de FCO<sub>2</sub> foram exponenciais em ambos os sistemas de manejo, indicando uma distribuição mais homogênea na área de cana crua, na qual um menor número de pontos é necessário para a caracterização da emissão nesse sistema, quando comparado ao sistema de cana queimada.

### **CAPÍTULO 3 - EMISSÃO DE CO<sub>2</sub> E SUA RELAÇÃO COM PROPRIEDADES DO SOLO EM ÁREAS DE CANA-DE-AÇÚCAR SOB SISTEMAS DE MANEJO DE CANA QUEIMADA E CRUA**

**RESUMO** – A emissão de CO<sub>2</sub> do solo (FCO<sub>2</sub>) tem sido relacionada a diferentes propriedades do solo que são fortemente influenciadas pelo manejo de áreas agrícolas. O objetivo deste trabalho foi estudar FCO<sub>2</sub> e sua relação com propriedades do solo, em áreas cultivadas com cana-de-açúcar, nos sistemas de manejo de cana queimada (CQ) e crua (CC). A média da emissão de CO<sub>2</sub> foi significativamente maior ( $p < 0,01$ ) na área de cana queimada ( $2,74 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  em CQ e  $2,07 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  em CC). A emissão total no período de 70 dias após a colheita foi superior na área de cana queimada ( $729 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2}$ ) em relação ao sistema sem queima ( $557 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2}$ ). Os valores médios do teor de matéria orgânica do solo e o estoque de carbono do solo (0-0,25 m) foram 13 e 20%, respectivamente, superiores em CQ quando comparados à CC. Outras propriedades do solo que apresentaram diferenças significativas entre as áreas foram pH, fósforo disponível, soma de bases, capacidade de troca de cátions, textura (areia, silte e argila) e o grau de humificação da matéria orgânica do solo. A área de CQ apresentou maior variação espacial para a maioria das propriedades estudadas quando compara à área de CC. A análise de componentes principais discriminou dois grupos, formados pelas amostras oriundas da área de CC, e outro para CQ. A análise de regressão múltipla foi capaz de explicar 75% e 45% das variações espaciais de FCO<sub>2</sub> nas áreas de CQ e CC, respectivamente, indicando o grau de humificação da matéria orgânica do solo e sua interação com a densidade do solo, como um importante fator, não somente na diferenciação da emissão de CO<sub>2</sub> entre os diferentes sistemas de manejo. A correlação linear entre FCO<sub>2</sub> e o grau de humificação da matéria orgânica do solo foi positiva ( $p < 0,10$ ) na área de cana crua e negativa ( $p < 0,05$ ) na área de cana queimada. Em adição, a interação entre o grau de humificação da matéria orgânica do solo e a densidade do solo apresentou melhor relação com FCO<sub>2</sub>, sendo a propriedade mais importante na explicação da variabilidade da emissão de CO<sub>2</sub> do solo na área de cana queimada.

**Palavras-chave:** respiração do solo, manejo de cana-de-açúcar, grau de humificação, propriedades do solo.

### 3.1 - Introdução

Práticas de manejo dos sistemas de produção agrícola podem afetar a emissão de CO<sub>2</sub> do solo (FCO<sub>2</sub>) e, conseqüentemente, o efeito estufa adicional (SARTORI et al., 2006; LAL, 2009). Para o manejo da cana-de-açúcar, especialmente no Sudeste do Brasil, são reportadas duas situações contrastantes: o sistema de colheita de cana crua e cana queimada. Atualmente, o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar com 630 milhões de toneladas colhidas no ano de 2009, numa área de aproximadamente 8 milhões de hectares (CONAB, 2009). Aproximadamente 50% da área total são colhidos sem a queima dos resíduos, sendo estimado que cerca de 80% da área plantada nas maiores regiões produtoras de cana-de-açúcar do País deverão estar sob o sistema com colheita mecanizada nos próximos 10 anos (GALDOS et al., 2009). A colheita tradicional da cultura envolve a queimada das folhas e de resíduos para facilitar a colheita manual (CQ); em contraste, no sistema CC, a colheita é mecanizada, não havendo necessidade da queima do canavial antes da operação.

Apenas a conversão de áreas de cana queimada para cana crua representa uma redução significativa na emissão de gases do efeito estufa e também contribui para o aumento, em longo prazo, nos teores de matéria orgânica do solo, uma vez que os resíduos da cultura que não foram queimados podem ser incorporados ao solo (RAZAFIMBELO et al., 2006; CERRI et al., 2007). De acordo com LUCA et al. (2008), estima-se que o potencial de sequestro de carbono no Brasil, devido ao manejo sem queima do canavial, seja de 2,6 Tg ano<sup>-1</sup>. Assim, mudanças no manejo dessa cultura podem ter resultados notórios no balanço regional de carbono (RAZAFIMBELO et al., 2006). Isso pode ser mais bem compreendido a partir de estudos diversos mostrando que a queima dos resíduos vegetais tem um efeito direto nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (WOOD, 1991; BLAIR, 2000; ARE et al., 2009). Por outro

lado, a prática de colheita mecânica, com deposição de resíduos na superfície do solo, altera a qualidade da matéria orgânica do solo (GRAHAM et al., 2002; BAUER et al., 2006; DEICOW et al., 2009; CERRI et al., 2009).

A emissão de CO<sub>2</sub> do solo em áreas agrícolas tem-se mostrado um fenômeno complexo, pois possui grande variabilidade espacial devido a sua relação com diversas propriedades do solo (LA SCALA Jr. et al., 2000; SHIBISTOVA et al., 2002; SCOTT-DENTON et al., 2003). Em adição, FCO<sub>2</sub> em áreas tropicais apresenta magnitude superior quando comparado às áreas de clima temperado (HASHIMOTO et al., 2004; SOTTA et al., 2004; KOSUGI et al., 2007; PANOSSO et al., 2008), aumentando ainda mais a complexidade na sua estrutura de variabilidade espacial. Assim, é de grande importância entender como a conversão do sistema de cana queimada para o sistema de cana crua altera a dinâmica da emissão de CO<sub>2</sub> e sua relação com as propriedades do solo.

A hipótese do trabalho foi que mudanças no sistema de colheita da cana-de-açúcar provocam alterações nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, que, por sua vez, interferem no processo de emissão de CO<sub>2</sub> do solo. O objetivo do trabalho foi estudar a relação entre FCO<sub>2</sub> e as propriedades do solo em áreas sob o cultivo de cana-de-açúcar, nos sistemas de cana crua e cana queimada, observando a correlação das propriedades do solo com FCO<sub>2</sub> em cada um dos sistemas de manejo.

### **3.2 - Material e Métodos**

O estudo foi conduzido na fazenda São Bento, pertencente à Usina São Martinho, em áreas com mais de 35 anos de cultivo da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.), localizada na cidade de Guariba, São Paulo. As coordenadas geográficas da área são 21° 24' de latitude sul e 48° 09' de longitude oeste, com elevação ao redor de 550 m acima do nível do mar. O clima da região é classificado como Aw (de acordo com Köppen), tropical de verão chuvoso e inverno seco. A precipitação média é de 1.425 mm, concentrada entre os meses de outubro e março, com 22,2 °C de temperatura



média anual registrada na região, nos últimos 30 anos. A vegetação natural era constituída por floresta tropical subcaducifólia.

Esta área está inserida na província geomorfológica do Planalto Ocidental Paulista, próximo ao limite das Cuestas Basálticas, no divisor litoestratigráfico arenito-basáltico (área limítrofe entre o Basalto do Grupo São Bento, Formação Serra Geral e o Arenito do Grupo Bauru, Formação Adamantina). O solo da área, segundo a classificação proposta pela EMBRAPA (2006), é um Latossolo Vermelho eutroférico, textura muito argilosa (LVef), cultivado com cana-de-açúcar por mais de 30 anos. O relevo em ambas as áreas é suave ondulado, com declividades variando de 3 a 4%. As áreas utilizadas neste estudo foram localizadas em dois talhões vizinhos, com diferentes históricos de manejo: cana crua (CC), com sete anos de colheita mecanizada, com grande quantidade de resíduos da cultura sobre a superfície do solo (média de  $12 \text{ t ha}^{-1}$ ), e última operação de colheita realizada no dia 16 de maio de 2007 (dia 136); cana queimada (CQ), com histórico de queima e colheita manual da cultura desde 1970, sendo a última queima realizada no dia 9 de junho de 2007 (dia 160). Deve-se salientar que, anteriormente à conversão para o sistema de cana crua, ambas as áreas apresentavam o mesmo histórico de manejo. A variedade de cana-de-açúcar plantada nos dois talhões, nos anos anteriores, foi a CTC-6. No dia 25 de junho de 2007 (dia 176), duas malhas amostrais regulares e idênticas, de  $190 \times 10 \text{ m}$ , contendo 20 pontos, foram instaladas nas áreas experimentais, uma em cada talhão, com mínima distância entre os pontos de 13,3 m (Figura 3.1).

Os canaviais instalados nas áreas foram renovados no ano de 2006, sendo que a coleta das amostras para análises químicas e físicas foi realizada logo após o primeiro corte, em junho de 2007. Por ocasião da renovação do canavial, foi realizada uma operação de subsolagem e a erradicação química da soqueira. Logo após, foram aplicadas  $2 \text{ t ha}^{-1}$  de calcário dolomítico e  $1 \text{ t ha}^{-1}$  de gesso agrícola para a correção do solo em área total sem incorporação dos mesmos. A adubação de plantio foi realizada na sulcação, sendo utilizado  $500 \text{ kg ha}^{-1}$  da fórmula 10-25-25; e o plantio, realizado de forma manual. Em ambas as áreas, foi aplicado em soqueira, ao longo dos anos,  $100 \text{ m}^{-3}$  de vinhaça,  $300 \text{ kg ha}^{-1}$  de ureia na cana queimada e  $200 \text{ kg ha}^{-1}$  de nitrato de

amônia na cana crua. Na cana queimada, o adubo nitrogenado é incorporado a aproximadamente 20 cm de profundidade, enquanto na área de cana crua a aplicação é realizada superficialmente, ao lado da linha de plantio.

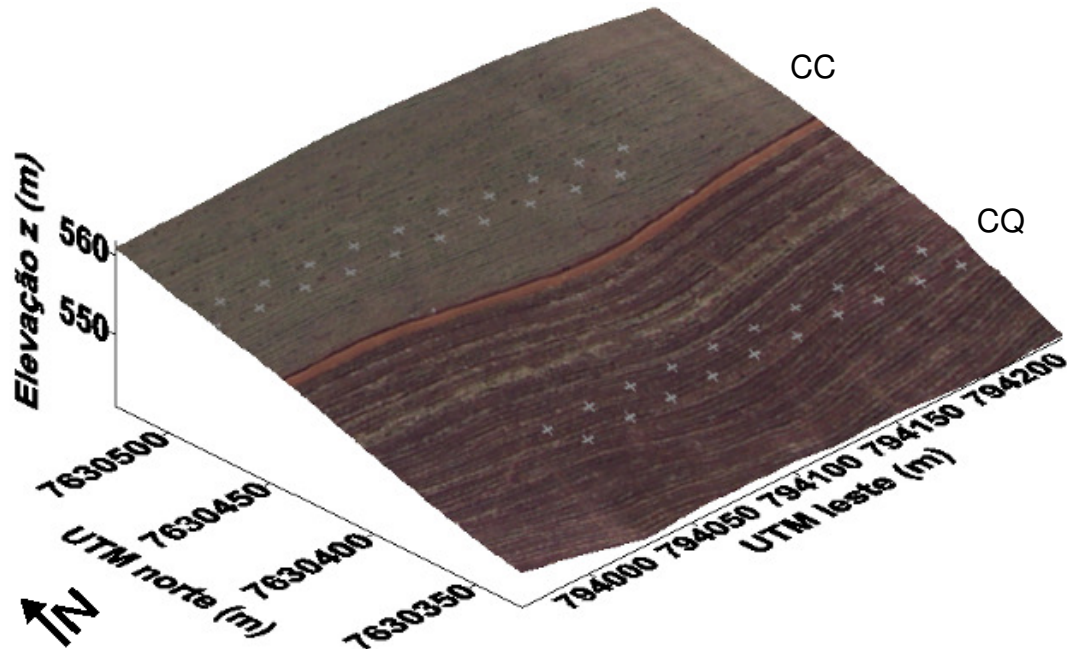


Figura 3.1. Mapa esquemático mostrando a localização da área experimental e modelo de elevação digital, indicando a posição dos gradeados instalados na área de cana crua (CC) e queimada (CQ).

A emissão de  $\text{CO}_2$  do solo foi registrada por meio de um sistema portátil LI-COR (LI-8100) (HEALY et al., 1996), durante o período pós-colheita e inicial de crescimento da cultura. O sistema LI-8100 monitora as variações da concentração de  $\text{CO}_2$  no interior da câmara por meio de espectroscopia de absorção óptica, na região espectral do infravermelho (IRGA). A câmara de solos é um sistema fechado, com volume interno de  $854,2 \text{ cm}^3$ , e área de contato com o solo de  $83,7 \text{ cm}^2$ , que foi acoplada sobre um colar de PVC, previamente inserido na profundidade de 0,03 m no solo, em cada um dos pontos amostrais. Uma vez a câmara fechada, o modo de medida levou 1 min 30 s, em cada ponto, para a determinação de  $\text{FCO}_2$ , onde a concentração de  $\text{CO}_2$  dentro da câmara foi determinada a cada 2 s 30. Para evitar maior participação da respiração das raízes da cultura, as avaliações da emissão foram realizadas entre as linhas de plantio da cultura.

A temperatura do solo ( $T_s$ ) foi monitorada por um sensor de temperatura, parte integrante do sistema do LI-8100. Tal sensor consiste em uma haste de 0,20 m que foi inserida no interior do solo, próxima ao local onde foram instalados os colares de PVC para a avaliação da emissão de  $\text{CO}_2$ . A umidade volumétrica do solo ( $U_s$ ) foi avaliada por um equipamento de TDR (Time Domain Reflectometry) - Campbell® (Hydrosense TM, Campbell Scientific, Austrália). As avaliações de  $\text{FCO}_2$ ,  $T_s$  e  $U_s$  foram realizadas nos dias Julianos 190; 200; 209; 215; 227; 234; 241; 255 e 260, compreendendo o período entre os dias 09 de julho e 17 de setembro de 2007 (70 dias), durante o período das manhãs, das 7 às 9 h.

A amostragem do solo (0 a 0,25 m) foi realizada nos 20 pontos onde  $\text{FCO}_2$  foi avaliada nas áreas de CC e CQ. As amostras coletadas foram secas, destorroadas e peneiradas (na peneira de 2 mm) antes de serem submetidas às seguintes análises: determinação do teor de matéria orgânica (MO), disponibilidade de fósforo (P) e teores de K, Ca, Mg e  $\text{H} + \text{Al}$  (RAIJ, 2001), soma de bases (SB) e capacidade de troca de cátions do solo (CTC). O estoque de carbono (EstC) foi calculado com base na massa de solo equivalente (BAYER et al., 2000), nas profundidades de 0,00 a 0,25 m, pela expressão  $\text{EstC} = (\text{CO} \times \text{Ds} \times \text{E}) / 10$ , sendo EstC o estoque de carbono ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ), CO é o teor de carbono orgânico oxidável ( $\text{g kg}^{-1}$ ), Ds é a densidade do solo ( $\text{kg dm}^{-3}$ ) e E a espessura da camada estudada (cm).

A análise granulométrica (areia, silte e argila) foi realizada por meio do método da pipeta, empregando-se  $\text{NaOH } 0,1 \text{ mol L}^{-1}$  como dispersante químico e agitação mecânica de baixa rotação, por 16 horas (EMBRAPA, 1997). A densidade do solo ( $D_s$ ) foi determinada em amostras indeformadas coletadas com amostrador adaptado a cilindros com dimensões médias de 0,05 m de diâmetro interno e 0,04 m de altura (EMBRAPA, 1997). O volume total de poros (VTP) foi calculado com base no valor de densidade. A distribuição de poros por tamanho, macroporosidade (Macro) e microporosidade foi determinada utilizando-se de funil de placa porosa sob a tensão de 0,6 m de altura de coluna d'água em amostras previamente saturadas. O volume de água retido na amostra, nesta condição, corresponde aos microporos, e os macroporos foram calculados por diferença (EMBRAPA, 1997). A porosidade livre de água (PLA) foi

calculada pela diferença entre a porosidade total (VTP) e a fração da porosidade preenchida por água, equivalente à umidade do solo ( $U_s$ ) definida previamente, pela expressão  $PLA = VTP - U_s$ .

Para a determinação do grau de humificação da matéria orgânica ( $H_{LIFS}$ ) e do teor de carbono das amostras de solos, foram utilizadas as análises de fluorescência induzida por laser (LIFS) e espectroscopia de emissão óptica com plasma induzido por laser (LIBS), respectivamente. Anteriormente à condução das análises, foram preparadas duas pastilhas por amostra de solo com dimensões de 10 mm de diâmetro e 2 mm de espessura (Figura 3.2). As pastilhas, com massa de aproximadamente 0,5 g, foram produzidas por meio de uma prensa hidráulica, aplicando-se uma carga de 12 toneladas, durante 3 minutos. A espectroscopia de emissão óptica com plasma induzido por laser (LIBS) é uma técnica analítica avançada para análise elementar semiquantitativa, baseada na medida da emissão de espécies excitadas em um plasma produzido por um laser (FERREIRA et al., 2009).

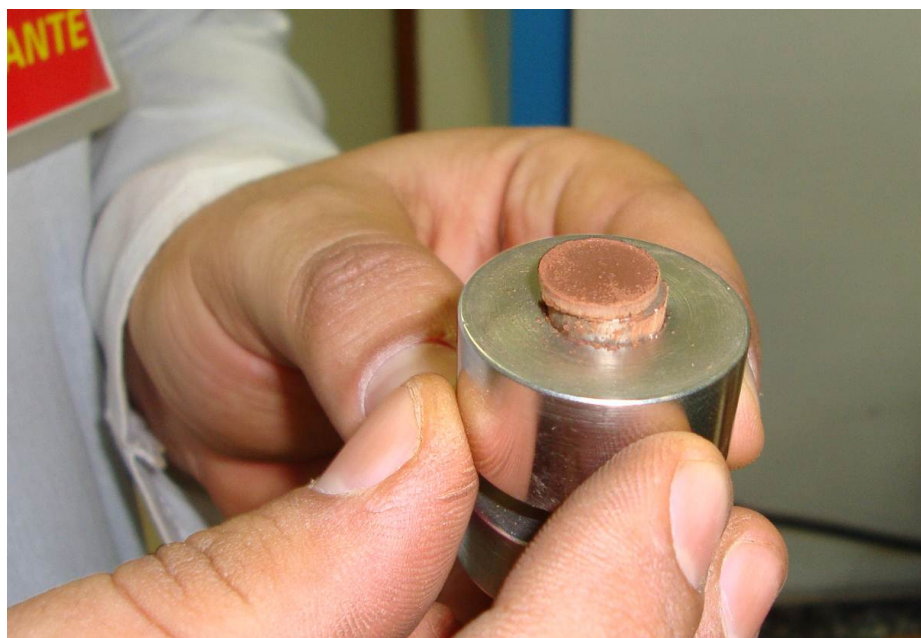


Figura 3.2. Pastilha de 10 mm de diâmetro e 2 mm de espessura utilizada nas análises de fluorescência induzida por laser (LIFS) e espectroscopia de emissão óptica com plasma induzido por laser (LIBS).

Os espectros LIBS foram capturados utilizando um sistema comercial modelo LIBS2500, da Ocean Optics (USA) (Figura 3.3). A energia do pulso utilizada foi 50 mJ; e a duração, de 1 ns. O tempo de atraso entre o disparo do laser e a captura do espectro foi da ordem de 1  $\mu$ s. A região espectral analisada foi de 190 a 900 nm. Um pulso prévio sempre foi utilizado antes da captura do espectro para garantir a limpeza da superfície da pastilha. Dez espectros foram capturados por pastilha, sendo cada espectro correspondente a diferentes regiões da pastilha. A média desses espectros em cada pastilha foi considerada uma única medida.

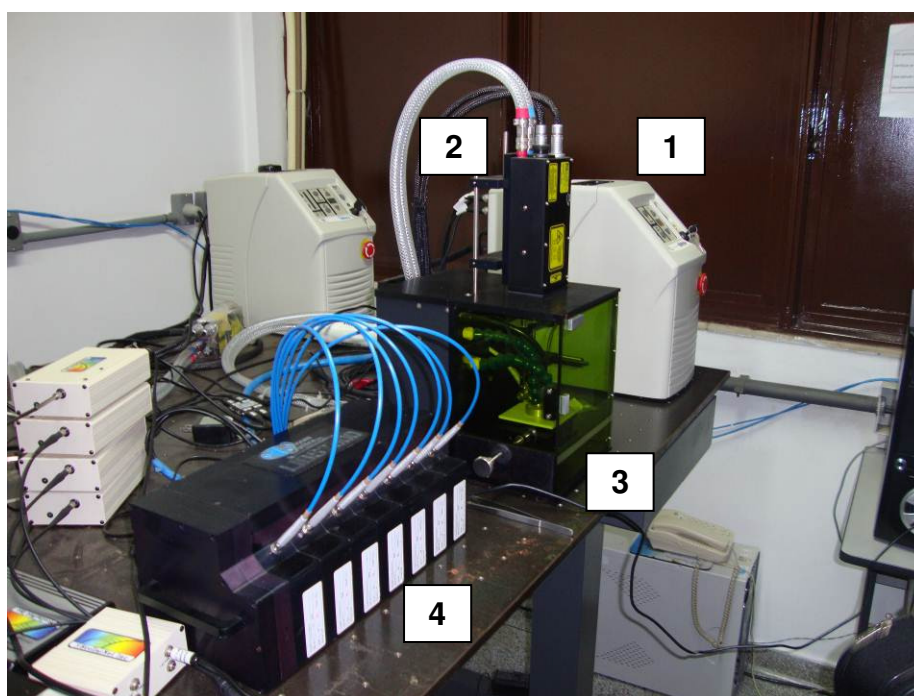


Figura 3.3. Sistema LIBS de bancada modelo LIBS2500plus: (1) fonte de energia do laser; (2) laser; (3) câmara de ablação; (4) conjunto de espectrômetros.

A técnica de fluorescência induzida por laser (LIFS) tem como princípio básico a excitação das amostras do solo com um laser de emissão, na região do ultravioleta/azul, resultando na fluorescência de grupos funcionais da matéria orgânica, relacionados com o processo de humificação. Essa fluorescência ocorre na região do visível com pico em aproximadamente 510 nm. A fluorescência total (área sob a curva) correlaciona-se aos teores de carbono do solo e, quando ponderada a partir dos teores



de C orgânico da amostra (obtidos pelo LIBS), traz informações a respeito do grau de humificação da matéria orgânica. Neste estudo, os espectros LIFS foram capturados utilizando um sistema montado pela Embrapa Instrumentação Agropecuária (Figura 3.4). Um laser de argônio cw com emissão em 458 nm e potência de 300 mW foi direcionado para a pastilha de solo, conforme descrito por MILORI et al. (2006). A região espectral analisada foi de 470 a 650 nm. A resolução espectral foi ajustada para 4 nm. A área do espectro LIFS de cada amostra de solo foi dividida pelo teor de carbono correspondente, obtida no LIBS, calculando-se assim os sinais de fluorescência normalizada, que então foram definidos como o grau de humificação da matéria orgânica do solo ( $H_{LIFS}$ ).



Figura 3.4. Sistema de medida de Fluorescência Induzida por Laser (LIFS) - Embrapa Instrumentação Agropecuária, São Carlos – SP.

Os resultados foram apresentados em termos da estatística descritiva (média, erro-padrão da média, mínimo, máximo e coeficiente de variação). As diferenças entre

as médias das propriedades do solo para os diferentes sistemas de manejo foram testadas pelo teste  $t$  de Student ( $p < 0,01$ ). A análise de componentes principais (ACP) foi aplicada a todas as propriedades do solo, com o objetivo de condensar a informação relevante em um conjunto menor de variáveis latentes ortogonais que são os componentes principais (autovetores) gerados por combinações lineares das propriedades estudadas.

A análise de regressão múltipla foi realizada para cada sistema de manejo, CC e CQ, por meio do método “stepwise” de seleção de variáveis. O fator de inflação da variância (FIV), para cada variável exploratória, foi utilizado para examinar a multicolinearidade e escolher o conjunto de propriedades do solo, previamente selecionadas pela ACP, a serem utilizadas na análise de regressão múltipla ( $FIV < 10$ ) (DER & EVERITT, 2001). O método de seleção “stepwise” foi aplicado em cada um dos sistemas de manejo para diferentes subconjuntos de propriedades do solo. Neste método, os níveis de significância do teste  $F$  utilizados para o julgamento da entrada e/ou saída de uma variável, em um modelo, foram iguais a 15% ( $p = 0,15$ ).

Simultaneamente às análises estatísticas, as pressuposições básicas da análise de variância e regressão múltipla, normalidade dos erros e homogeneidade das variâncias foram testadas para todas as propriedades avaliadas (dados não apresentados). As análises estatísticas foram conduzidas nos programas SAS (SAS versão 9, SAS institute, Cary, NC, USA) e STATISTICA 7.0 (StatSoft. Inc., Tulsa, OK, USA).

### 3.3 - Resultados e Discussão

A Tabela 3.1 apresenta a estatística descritiva das propriedades estudadas e os resultados da comparação de médias, pelo teste  $t$  ( $p < 0,01$ ), entre os diferentes sistemas de manejo. Após sete anos de conversão do sistema CQ ( $2,74 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) para o sistema CC, FCO<sub>2</sub> foi 32% superior na área de CQ quando, comparada à média da área de CC ( $2,07 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ). Outras propriedades foram afetadas pela conversão do sistema CQ para CC. As propriedades foram: temperatura do solo (Ts), pH, teor de

matéria orgânica do solo (MO), estoque de carbono (EstC), fósforo disponível (P), soma de bases (SB), capacidade de troca de cátions (CTC), granulometria (areia, silte e argila), grau de humificação da matéria orgânica do solo ( $H_{LIFS}$ ) e interação do grau de humificação com a densidade do solo ( $H_{LIFS} \times Ds$ ), mostrando-se diferenciadas quando os sistemas de manejo são comparados. As diferenças observadas em  $T_s$ , provavelmente, estão relacionadas à presença da palha da cultura na superfície do solo em CC, a qual favorece menor temperatura média em relação à CQ, possivelmente resultando em menores valores de FCO<sub>2</sub>. Esse efeito tem sido observado em estudos similares conduzidos em áreas de cana-de-açúcar na mesma região (PANOSSO et al., 2008).

Outro importante aspecto que pode ser relacionado às diferenças observadas em FCO<sub>2</sub> são os maiores valores médios de MO e EstC observados em CQ, cujos valores foram, respectivamente, 13 e 20% superiores, quando comparados à área do sistema CC. É bem conhecido que, de maneira geral, a matéria orgânica do solo é uma das principais fontes de produção de CO<sub>2</sub> no solo, promovida pela atividade microbiana (BALL et al., 1999; DOMINY et al., 2002; KEMMITT et al., 2008). Entretanto, é importante considerar que os altos valores médios de MO e EstC na área de CQ diferem daqueles reportados por RAZAFIMBELO et al. (2006), que observaram um maior valor de teor de carbono orgânico (15% superior) nos 10 primeiros centímetros de profundidade de um Latossolo sob cultivo de CC, quando comparado ao sistema CQ, depois de seis anos de conversão. Por outro lado, BLAIR (2000), em experimento conduzido na Austrália em um Luvisolo crômico, observaram maiores valores de teor de matéria orgânica do solo na área de CQ, quando comparado à CC, após quatro anos de conversão. Os resultados indicam que a temperatura do solo e as variáveis relacionadas à matéria orgânica do solo são importantes fatores no entendimento dos maiores níveis de FCO<sub>2</sub> observados na área de CQ, quando comparado ao sistema de CC.



Tabela 3.1. Estatística descritiva da emissão de CO<sub>2</sub>, temperatura, umidade e propriedades físicas e químicas do solo na profundidade de 0-0,25 m, nos sistemas de cana crua e cana queimada.

|  | Cana crua |       |                |      | Cana queimada |       |                 |      |
|--|-----------|-------|----------------|------|---------------|-------|-----------------|------|
|  | Média     | EP    | Mín/Máx        | CV   | Média         | EP    | Mín/Máx         | CV   |
| FCO <sub>2</sub> (μmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ) | 2,07 b    | 0,06  | 1,66/2,74      | 13,8 | 2,74 a        | 0,14  | 1,45/3,96       | 23,0 |
| Ts (°C)  | 19,72 b   | 0,07  | 18,88/20,18    | 1,6  | 20,50 a       | 0,07  | 20,11/20,91     | 1,5  |
| Us (% volume)  | 19,50 a   | 0,50  | 14,90/22,90    | 11,7 | 18,90 a       | 0,50  | 14,00/23,10     | 10,9 |
| Ds (g cm <sup>-3</sup> )                                 | 1,25 a    | 0,02  | 1,13/1,36      | 12,1 | 1,28 a        | 0,03  | 1,08/1,55       | 15,6 |
| Us×Ds (g cm <sup>-3</sup> )                              | 24,30 a   | 0,70  | 18,88/29,92    | 5,5  | 24,20 a       | 0,80  | 15,89/0,43      | 11,1 |
| VTP (%)  | 52,00 a   | 0,60  | 47,10/56,45    | 4,9  | 50,50 a       | 2,30  | 39,00/87,80     | 20,1 |
| PLA (%)  | 32,5 a    | 0,70  | 27,2/ 39,6     | 9,7  | 31,7 a        | 2,30  | 20,78/67,5      | 32,1 |
| Macro (%)  | 16,50 a   | 0,90  | 11,50/21,92    | 23,1 | 13,98 a       | 2,24  | 3,56/49,77      | 71,7 |
| pH   | 4,54 b    | 0,05  | 4,00/4,90      | 4,8  | 5,30 a        | 0,05  | 4,90/5,70       | 4,6  |
| MO (g dm <sup>-3</sup> )                                 | 23,79 b   | 0,85  | 14,88/32,35    | 15,9 | 26,86 a       | 0,70  | 19,84/31,94     | 11,6 |
| EstC (Mg ha <sup>-1</sup> )                              | 1659,00 b | 64,00 | 956,70/2252,20 | 17,1 | 1987,00 a     | 71,00 | 1373,10/2619,30 | 16,0 |
| P (mg dm <sup>-3</sup> )                                 | 15,70 b   | 0,90  | 8,07/27,93     | 26,8 | 107,00 a      | 9,00  | 56,12/203,49    | 35,1 |
| SB (mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )                 | 3,00 b    | 0,20  | 1,75/4,64      | 23,9 | 5,40 a        | 0,20  | 3,23/6,89       | 17,1 |
| CTC (mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )                | 6,90 b    | 0,20  | 5,18/8,44      | 12,3 | 8,11 a        | 0,20  | 5,25/9,59       | 13,2 |
| Areia (g kg <sup>-1</sup> )                              | 290 b     | 3,0   | 220/380        | 8,4  | 329 a         | 2,0   | 293,00/370,00   | 5,4  |
| Silte (g kg <sup>-1</sup> )                              | 74 a      | 3,0   | 61/160         | 30,0 | 58 b          | 2,0   | 30,00/92,00     | 22,7 |
| Argila (g kg <sup>-1</sup> )                             | 636 a     | 3,0   | 584/713        | 3,4  | 613 b         | 3,0   | 562,00/652,00   | 3,5  |
| H <sub>LIFS</sub> (u.a.)                                 | 231a      | 5,0   | 198/ 2801      | 9,0  | 180 b         | 3,0   | 158/204         | 8,0  |

N= 40; Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, pelo teste *t*, ao nível de 1% de probabilidade. EP = erro-padrão da média; Mín = mínimo; Máx = máximo; CV = coeficiente de variação; FCO<sub>2</sub> = emissão de CO<sub>2</sub> do solo; Ts = temperatura do solo; Us = umidade do solo; Ds = densidade do solo; Us×Ds = umidade gravimétrica do solo; VTP = volume total de poros; PLA = porosidade livre de água; Macro = macroporosidade; MO = teor de matéria orgânica; EstC = estoque de carbono; P = fósforo disponível; SB = soma de bases; CTC = capacidade de troca de cátions; Areia = teor de areia total; Silte = teor de silte; Argila = teor de argila; H<sub>LIFS</sub> = grau de humificação da matéria orgânica do solo; u.a. = unidade arbitrária.

Similar aos resultados encontrados por BLAIR (2000), as propriedades químicas do solo apresentaram diferenças significativas quando os sistemas de manejo foram comparados; em contraste, o mesmo não foi observado para as propriedades físicas do solo, as quais não apresentaram diferenças significativas entre cana crua e cana queimada (Tabela 3.1). Esse efeito pode ser explicado por um aumento dos processos de erosão (RESENDE et al., 2006; LUCA et al., 2008), uma vez que áreas sem cobertura vegetal (CQ) são mais vulneráveis à perda de solo que aquelas áreas cobertas pelos resíduos das culturas (CC).

Outros aspectos podem também ser relacionados à maior emissão de CO<sub>2</sub> observada na área de CQ. Por exemplo, os teores de fósforo disponível (P) foram superiores na cana queimada (Tabela 3.1), e essa variável pode ser um fator limitante à atividade microbiana (DUAH-YENTUMI et al., 1998). Os teores de P foram maiores na

área de cana queimada, provavelmente devido à rápida mineralização da matéria orgânica pela queima, o que proporciona maior liberação destes íons para o solo. MENDONZA et al. (2000), comparando os efeitos de CQ e CC na propriedades químicas de um Argissolo de textura arenosa, no município de Linhares (ES), Brasil, após seis anos de cultivo da cana-de-açúcar, reportaram maiores teores P no sistema CQ. Adversamente, CANELLAS et al. (2003) e BUSATO et al. (2005) encontraram maiores valores de P em áreas de cana crua e atribuíram a diferença ao retorno das formas de fósforo acumuladas na biomassa vegetal. Segundo ARE et al. (2009), os benefícios da prática da queima são específicos a algumas propriedades químicas, degradando a maioria das propriedades físicas do solo, como a ação dos processos erosivos, a qual é maior nas áreas queimadas.

O pH do solo também apresentou diferenças significativas quando os sistemas foram comparados (Tabela 3.1), com menores valores na área de cana crua, sendo o mesmo efeito observado por NOBEL et al. (2003) após a conversão de áreas de cana-de-açúcar do sistema de CQ para CC na Austrália. MENDONZA et al. (2000) e CANELLAS et al. (2003) não encontraram diferença significativa para esta propriedade quando compararam áreas de cana crua e queimada. Deve-se salientar que, na comparação da fertilidade do solo de áreas com cana crua e cana queimada, é importante investigar a forma como o adubo foi aplicado no solo. Para a cana crua, a aplicação superficial sem incorporação do adubo encontra uma barreira física (palha) para chegar até o solo. No sistema de cana queimada, o contato com o solo é mais rápido, o que proporciona maior velocidade de reação com a solução do solo e, conseqüentemente, maior e mais rápida disponibilidade de nutrientes. Em adição, no presente estudo, a aplicação de gesso, calcário e vinhaças, nas duas áreas, foi realizada em área total sem incorporação. Porém, na área de cana queimada, o adubo nitrogenado em soqueira foi aplicado com recobrimento do solo ao lado da linha de plantio. Assim, esse procedimento incorporou não só o adubo nitrogenado, mas também o gesso, o calcário e a vinhaça presentes na camada superficial.

Para as propriedades SB e CTC, os maiores valores encontrados foram na área de cana queimada (Tabela 3.1), confirmando a melhor fertilidade do solo nesta área.

MENDONZA et al. (2000) não encontraram diferença significativa para a SB e para V%, comparando os dois sistemas de colheita de cana, enquanto CANELLAS et al. (2003) encontraram os maiores valores de CTC para áreas de cana crua. Os maiores valores de SB e pH encontrados para cana queimada podem aumentar a disponibilidade de fósforo, confirmando os resultados apresentados na Tabela 3.1.

A interação entre a densidade de solo e o grau de humificação da matéria orgânica do solo ( $H_{LIFS} \times Ds$ ) expressa melhor a quantidade total de ácidos húmicos em cada ponto amostral, que  $H_{LIFS}$  sozinho. Este procedimento é semelhante ao que é geralmente feito na conversão de valores de carbono orgânico para estoque de carbono.  $H_{LIFS} \times Ds$  também apresentou diferenças quando ambos os sistemas foram comparados, apresentando maiores valores para a área de cana crua. Poucos estudos têm relatado o efeito dos sistemas de manejo na qualidade da matéria orgânica do solo; entretanto, recentemente, DEICKOW et al. (2009) observaram diferenças no grau de humificação da matéria orgânica do solo sendo principalmente afetado pelos sistemas de preparo e plantio na região Sul do Brasil.

A estrutura multivariada contida no conjunto inicial de dados foi avaliada pela análise de componentes principais a qual condensa a informação relevante em um conjunto menor de variáveis latentes ortogonais que são os componentes principais (autovetores) gerados por combinações lineares das variáveis originais a partir dos autovalores da matriz de covariância. Cada par de componentes principais gera uma representação bidimensional do espaço amostral original, denominado biplot, onde é possível explicar a estrutura de variáveis direcionando feixes de variáveis nas regiões de máxima variabilidade (Figura 3.5). Neste estudo, foram considerados os dois primeiros componentes principais, CP1 e CP2, cujos autovalores são superiores à unidade (KAISER, 1958), os quais conseguiram reter, em conjunto, 70,6% da variabilidade das propriedades do solo. O primeiro componente principal, CP1, explicou 52,1% da variância total das propriedades do solo, enquanto 18,5% foram explicados por CP2.

A representação gráfica biplot, que expressa correlação das variáveis com os componentes principais (Figura 3.5), indica a formação de, pelo menos, dois grupos

distintos: grupo I, localizado no lado esquerdo do gráfico biplot, com maior agrupamento de pontos, formado, principalmente, pelas amostras provenientes da área de CC; e grupo II, localizado à direita do primeiro componente principal, menos agrupado (ou seja, maior dispersão dos pontos na representação bidimensional) e constituído das amostras de solo provenientes da área de CQ. O poder discriminatório de cada variável dentro do componente é medido pelas correlações lineares entre cada propriedade do solo e o respectivo componente principal. No primeiro componente principal e por ordem de importância, as propriedades que apresentaram maiores coeficientes de correlação foram SB (0,93),  $H_{LIFS}$  (-0,86), MO (0,81), P (0,80), CTC (0,80), EstC (0,78), Argila (-0,73) e Ts (0,78). No segundo componente principal e por ordem de importância, têm-se as variáveis Ds (-0,83), PLA (0,77), FCO2 (0,59) e EstC (-0,52).

As correlações são apresentadas na Figura 3.5 e representadas pelas setas de cada propriedade, e a sua projeção no gráfico,  $H_{LIFS}$  e Argila, que apresentaram correlação negativa com CP1, foram as propriedades do solo responsáveis pela discriminação do grupo I. Por outro lado, o grupo II foi discriminado basicamente por Ts, MO, P, SB, CTC e EstC, em sua maioria de amostras provenientes de CQ, localizado no lado direito de CP1, ou seja, correlação positiva com esse vetor. FCO2 e PLA foram as propriedades que apresentaram coeficiente de correlação positiva com CP2, como indicado na parte superior da Figura 3.5, enquanto Ds e EstC apresentaram uma correlação negativa com CP2. Assim, aquelas propriedades do solo que apresentaram uma correlação linear positiva com CP1 foram principalmente da área de CQ, enquanto aquelas que apresentaram correlação negativa com o vetor PC1 foram basicamente da área de CC. SCOTT-DENTON et al. (2003), estudando a variabilidade espacial da respiração do solo em floresta de coníferas, Colorado, EUA, utilizaram a análise de componentes principais e encontraram 06 componentes independentes, os quais explicaram 74% da variância total dos dados, onde o primeiro componente principal foi principalmente relacionado a variáveis ligadas ao carbono do solo. No presente trabalho, o primeiro componente principal foi relacionado, principalmente, às propriedades químicas do solo, com exceção da temperatura (Ts) e do teor de argila do solo (Argila).

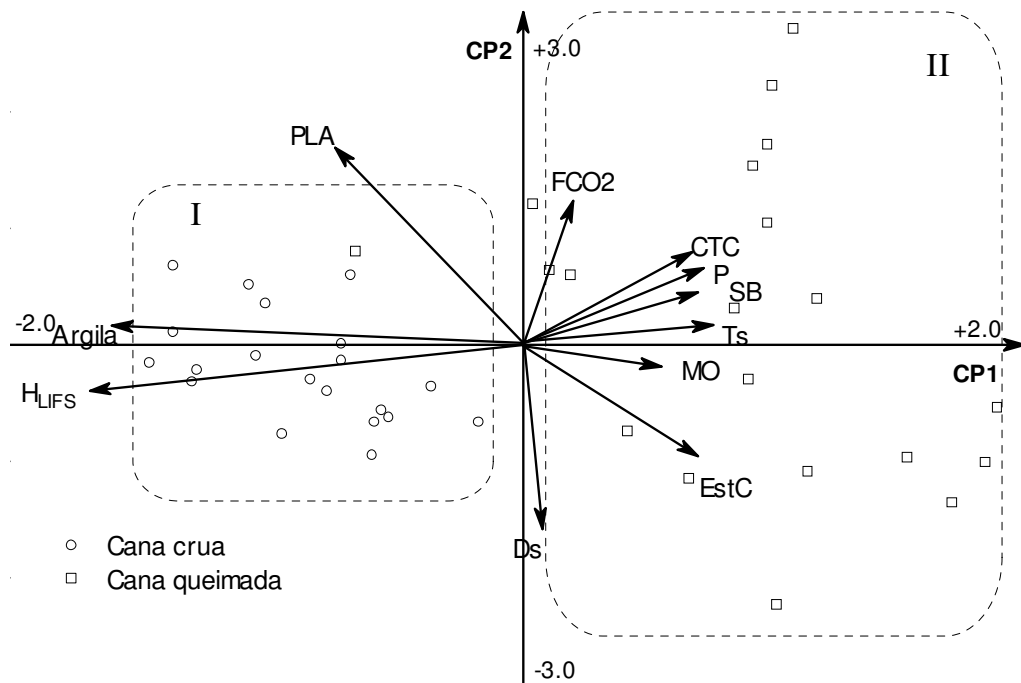


Figura 3.5. Gráfico Biplot dos componentes principais CP1 e CP2 da análise de componentes principais com todos os pontos amostrais e as seguintes variáveis: emissão (FCO2); temperatura do solo (Ts); densidade do solo (Ds); porosidade livre de água (PLA); matéria orgânica do solo (MO); estoque de carbono (EstC); fósforo disponível (P); soma de bases (SB); capacidade de troca de cátions (CTC); teor de argila (Argila) e o grau de humificação da matéria orgânica do solo ( $H_{LIFS}$ ).

Os altos coeficientes de variação das propriedades do solo, indicados na Tabela 3.1, bem como a maior dispersão ao longo das componentes principais do grupo II (Figura 3.5), indicam maior variabilidade das propriedades do solo na área de CQ quando comparados a CC. FCO2 apresentou uma das maiores variações espaciais (de acordo com o critério de classificação do CV proposto por WARRICK & NIELSEN (1980), em conjunto com as variáveis P, VTP e EstC na área de CQ. Entretanto, na área CC, FCO2 foi uma das propriedades com um dos menores valores de CV. Este é um aspecto típico da emissão de  $CO_2$  em área de cana crua quando comparada com a cana queimada, e foi previamente observada em outros estudos conduzidos na mesma região (PANOSSO et al., 2008; BRITO et al., 2009). A Figura 3.6 apresenta a emissão total de  $CO_2$  calculada em cada um dos pontos amostrais para os sistemas de manejo avaliados. Não somente o total de emissão foi inferior na área de cana crua

(557 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup>) em relação à cana queimada (729 g CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup>), mas também FCO<sub>2</sub> total apresentou menores variações espaciais quando em CC, quando comparada a CQ (Figura 3.6). Aparentemente, a presença de resíduos na superfície do solo resultou em menor variabilidade de diversas propriedades do solo quando comparados com CQ, incluso FCO<sub>2</sub> (NOBLE et al., 2003).

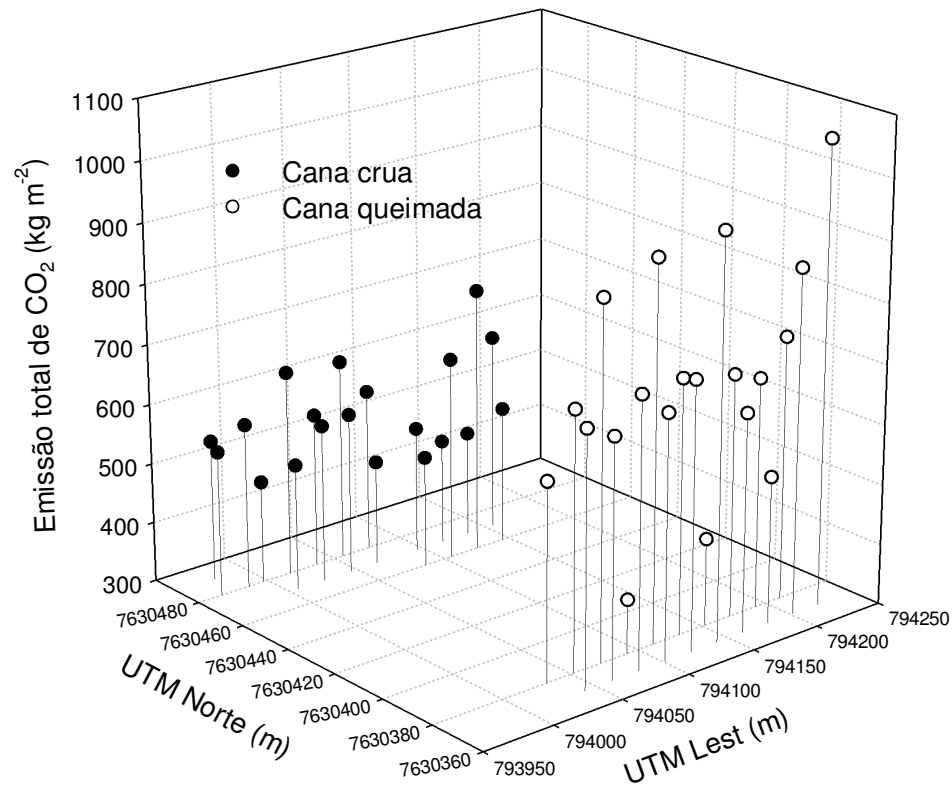


Figura 3.6. Representação espacial da emissão total de CO<sub>2</sub> após 70 dias de avaliação para cada ponto amostral nos sistemas de cana crua e cana queimada.

Os coeficientes de correlação entre FCO<sub>2</sub> e algumas variáveis do solo foram significativos ( $p < 0,10$ ) para ambos os sistemas (Tabela 3.2). As propriedades Ts, Us, Us×Ds, pH, H<sub>LIFS</sub> e H<sub>LIFS</sub>×Ds mostram-se correlacionadas a FCO<sub>2</sub> na área de CC, enquanto as propriedades Ds, Us×Ds, Silte, H<sub>LIFS</sub> e H<sub>LIFS</sub>×Ds correlacionam-se a FCO<sub>2</sub> na CQ. A umidade gravimétrica do solo (Us×Ds) tem sido apontada com uma variável importante na caracterização da variabilidade temporal de FCO<sub>2</sub>; entretanto, alguns

estudos têm observado que esta propriedade é também relacionada à caracterização das variações espaciais de FCO<sub>2</sub> (KOSUGI et al., 2007). RYU et al. (2009), estudando o efeito da queima em áreas de floresta de coníferas, na Califórnia, observaram índice de correlação negativo e significativo entre FCO<sub>2</sub> e umidade do solo na área sem queima, sendo esta variável capaz de explicar 7 e 14% das variações espaciais de FCO<sub>2</sub> nas áreas sem e com queima, respectivamente. Os resultados do presente estudo indicam que, no sistema CC, a variável  $Us \times Ds$  explicou 31%, enquanto essa mesma propriedade em CQ foi capaz de explicar 35% da variabilidade de FCO<sub>2</sub>. Entretanto, a maior variabilidade explicada pode ser atribuída às variações espaciais da densidade do solo ( $Ds$ ), principalmente em CQ. Nessas condições, o transporte de CO<sub>2</sub> pode ser limitado pela diminuição no coeficiente de difusão efetivo com o aumento de  $Us$  (FANG & MONCRIEFF, 1999; JASSAL et al., 2004).

A interação entre o grau de humificação da matéria orgânica do solo e a densidade do solo ( $H_{LIFS} \times Ds$ ) também se correlacionou com FCO<sub>2</sub> em ambas as áreas (Tabela 3.2). Diferentemente da umidade do solo,  $H_{LIFS} \times Ds$  apresentou correlação linear negativa com FCO<sub>2</sub> na área de CQ e positiva na área de CC (Figura 3.7). Os resultados indicam a interação entre grau de humificação da matéria orgânica do solo, e a densidade do solo explicou 68% das variações espaciais de FCO<sub>2</sub> na área de cana queimada ( $p < 0,01$ ), enquanto a mesma propriedade explicou 16% da variabilidade de FCO<sub>2</sub> no sistema cana crua ( $p < 0,10$ ). O teor de matéria orgânica apresenta valor médio do grau de humificação significativamente superior na área de CC quando comparado a CQ (Tabela 3.1). Ao contrário do reportado na literatura (MENDONZA et al., 2000; CANELLAS et al., 2003), foram observados altos valores de  $H_{LIFS}$  na área de CC, representando níveis inferiores de carbono lábil na matéria orgânica, quando comparado ao solo do sistema CQ. Assim, neste trabalho, os menores valores de FCO<sub>2</sub> em CC podem estar associados com os menores valores de estoque de carbono e teor de matéria orgânica do solo e com os altos valores do grau de humificação da MO, comparadas à CQ.

Tabela 3.2. Coeficientes de correlação linear entre a emissão de CO<sub>2</sub> do solo e as propriedades físicas e químicas do solo na profundidade de 0-0,25 m, nos sistemas de cana crua e cana queimada.

| Propriedades          | Cana crua | Cana queimada |
|-----------------------|-----------|---------------|
| Ts                    | -0,46*    | 0,21          |
| Us                    | -0,58*    | -0,27         |
| Ds                    | 0,02      | -0,55*        |
| UsxDs                 | -0,56*    | -0,59*        |
| VTP                   | -0,07     | 0,20          |
| PLA                   | 0,37      | 0,25          |
| Macro                 | -0,09     | 0,18          |
| pH                    | -0,45*    | 0,06          |
| MO                    | -0,02     | -0,04         |
| EstC                  | -0,02     | -0,32         |
| P                     | 0,12      | -0,32         |
| SB                    | 0,10      | 0,14          |
| CTC                   | 0,28      | 0,21          |
| Areia                 | -0,09     | 0,05          |
| Silte                 | 0,23      | -0,53*        |
| Argila                | -0,05     | -0,01         |
| H <sub>LIFS</sub>     | 0,42*     | -0,53*        |
| H <sub>LIFS</sub> xDs | 0,40*     | -0,82*        |

\* Significativo ao nível de 10% de probabilidade.

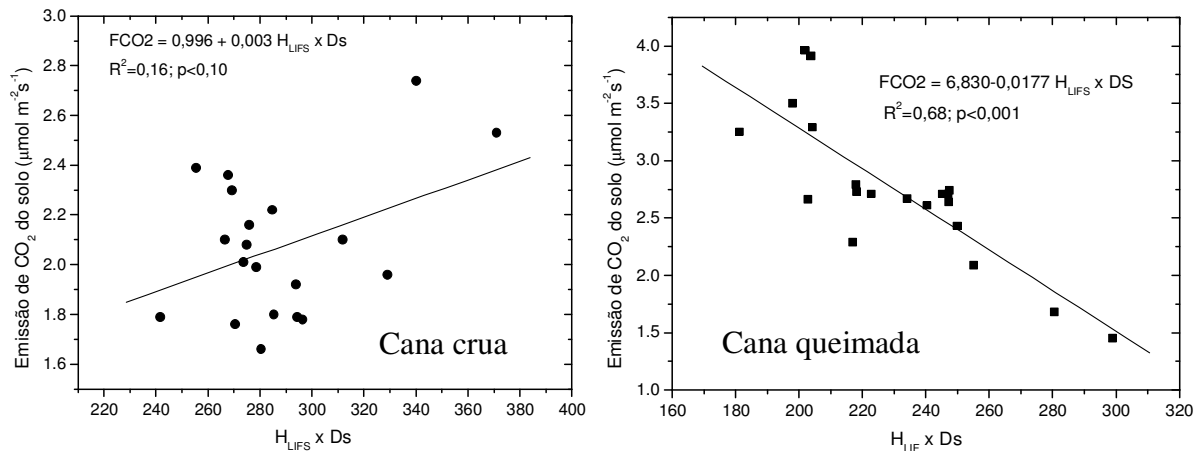


Figura 3.7. Relação linear entre a emissão de CO<sub>2</sub> do solo e a interação entre o grau de humificação da matéria orgânica do solo e a densidade do solo nas áreas de cana crua e queimada.

A correlação positiva entre FCO2 e H<sub>LIFS</sub>xDs na área de CC (Tabela 3.2) está de acordo com FONTAINE et al. (2007), que observaram que a adição de biomassa fresca no solo pode estimular o processo de mineralização do carbono estável presente nas



substâncias húmicas. Portanto, sob essa condição, a fonte de energia de carbono utilizada pelos microrganismos também envolveria o decaimento do carbono estável, ou as partes mais humificadas da matéria orgânica do solo, que seria emitida na forma de  $\text{CO}_2$  pela respiração do solo. Tal fenômeno explicaria a correlação positiva entre o grau de humificação da matéria orgânica e  $\text{FCO}_2$ ; assim, a matéria orgânica humificada seria também uma importante fonte para a atividade microbiana na área de cana crua. Por outro lado, a correlação negativa significativa entre  $\text{FCO}_2$  e  $H_{\text{LIFS}} \times \text{Ds}$ , na área de cana queimada, sugere que matéria orgânica humificada não é a principal fonte de carbono em  $\text{FCO}_2$  na área de CQ. O suprimento de energia utilizado pelos microrganismos na área de CQ estaria relacionado apenas ao carbono lábil, uma vez que o aumento do carbono não lábil (aumento de  $H_{\text{LIFS}}$  ou  $H_{\text{LIFS}} \times \text{Ds}$ ) resultaria em redução de  $\text{FCO}_2$ . Portanto, o carbono emitido no fluxo de  $\text{CO}_2$  do solo seria proveniente do decaimento do carbono lábil na área de CQ, enquanto na área de CC a respiração do solo seria associada às partes humificadas da matéria orgânica. Em adição aos presentes resultados, outros manejos específicos de cada área, como a utilização de diferentes fontes de adubação nitrogenada e/ou a incorporação dos adubos na área de cana queimada, podem estar contribuindo para as diferenças encontradas neste estudo.

Para melhor entendimento das variações de  $\text{FCO}_2$  em cada uma das áreas, foi realizada a análise de regressão múltipla, na qual  $\text{FCO}_2$  foi relacionada a outras propriedades do solo estudadas (Tabela 3.3). Para o sistema de CC, a primeira propriedade selecionada pelo modelo foi  $H_{\text{LIFS}} \times \text{Ds}$ , a qual explicou 16% da variabilidade de  $\text{FCO}_2$ . Quando a PLA foi incluída no modelo, a quantidade de variação explicada aumentou para 18%. Finalmente, o EstC foi selecionado adicionando 12% e totalizando  $r^2 = 0,46$ , ou 46% da variabilidade de  $\text{FCO}_2$ . Os parâmetros estimados para todas as variáveis foram positivos, confirmando suas correlações individuais com  $\text{FCO}_2$ . O parâmetro positivo para PLA pode ser relacionado ao efeito negativo da umidade do solo no processo de difusão gasosa, como anteriormente reportado (DAVIDSON et al., 2000; SCHWENDENMANN et al., 2003; KOSUGI et al., 2007). Além disso, o carbono é conhecido como o elemento básico utilizado pelos microrganismos do solo durante o processo de decomposição (SINGH & GUPTA, 1977). A associação positiva entre

emissão de CO<sub>2</sub> e teor de carbono orgânico no solo foi observada por XU & QI (2001) e BRITO et al. (2009). O modelo de regressão múltipla ajustado em CQ incluiu  $H_{LIFS} \times Ds$  como a primeira variável, que sozinha explica 68% da variabilidade de FCO<sub>2</sub>.

De acordo com GALDOS et al. (2009), o estoque de carbono é uma variável mais apropriada que o teor de carbono, uma vez que a primeira é uma medida da massa de carbono total em um volume de solo específico. Assim, a interação entre o grau de humificação da MO e a densidade do solo apresenta melhor relação com FCO<sub>2</sub>, sendo esta propriedade mais importante para a compreensão da variabilidade de FCO<sub>2</sub> em CQ. Em seguida, PLA foi incluída no modelo relacionando-se de forma negativa com FCO<sub>2</sub>, contribuindo com 5% para explicar FCO<sub>2</sub> em CQ. Os resultados indicam maior capacidade de previsão das variações espaciais de FCO<sub>2</sub> em CC. Este efeito pode estar relacionado ao fato de que o sistema de cana queimada apresenta maior variabilidade espacial em quase todas as propriedades aqui estudadas. RYU et al. (2009), examinando o efeito da queima em áreas de floresta de coníferas, na Califórnia, EUA, encontraram melhores coeficientes de determinação dos modelos de regressão múltipla ajustados às parcelas com queima, sendo a temperatura, a umidade e o teor total de C no solo as principais propriedades na modelagem da variabilidade de FCO<sub>2</sub>.

Tabela 3.3. Modelos da regressão linear múltipla da emissão de CO<sub>2</sub> do solo (FCO<sub>2</sub>) para as áreas de cana crua e cana queimada.

| Variável             | Parâmetro estimado | EP         | Valor <i>p</i> | R <sup>2</sup> |
|----------------------|--------------------|------------|----------------|----------------|
| Cana crua            |                    |            |                |                |
| Intercepto           | -2,14710           | 1,20584    | 0,094          |                |
| $H_{LIFS} \times Ds$ | 0,00523            | 0,00182    | 0,076          | 0,16           |
| PLA                  | 0,06132            | 0,02057    | 0,009          | 0,34           |
| EstC                 | 4,3434 E-04        | 0,00022893 | 0,011          | 0,46           |
| Cana queimada        |                    |            |                |                |
| Intercepto           | 8,12203            | 0,93182    | <0,0001        |                |
| $H_{LIFS} \times Ds$ | -0,02097           | 0,00320    | <0,0001        | 0,73           |
| PLA                  | -0,01718           | 0,00921    | 0,0793         | 0,75           |

EP = Erro-padrão da média; R<sup>2</sup> = coeficiente de determinação.

### 3.4 - Conclusões

Após sete anos de conversão do sistema de cana queimada para o sistema de cana crua foram observadas mudanças significativas nas propriedades do solo, não só em seus valores médios, mas também em sua variabilidade. Os menores valores de FCO<sub>2</sub> observados no sistema de cana crua podem relacionar-se às mudanças observadas no grau de humificação da matéria orgânica do solo e na porosidade livre de água. A relação entre o grau de humificação e a emissão de CO<sub>2</sub> indica que as perdas de carbono no solo na cana crua podem ser devidas à decomposição da matéria orgânica mais humificada. Futuras pesquisas são importantes para elucidar como a qualidade da matéria orgânica do solo estaria relacionada com as perdas de carbono no solo por meio da emissão de CO<sub>2</sub>, em ambas as áreas de estudos em longo prazo.

## **CAPÍTULO 4 - DIMENSÃO FRACTAL E ANISOTROPIA DA EMISSÃO DE CO<sub>2</sub> EM ÁREA DE CANA-DE-AÇÚCAR**

**RESUMO** – A emissão de CO<sub>2</sub> do solo, além de apresentar dependência espacial, apresenta variações na estrutura de variabilidade em diferentes direções da superfície dos solos (anisotropia). Essa anisotropia, resultado de fatores pedológicos diversos, em áreas agrícolas, pode ser resultante das práticas de preparo e manejo do solo, que afetam propriedades diretamente relacionadas à dinâmica do carbono no ambiente agrícola. Neste trabalho, foi determinada anisotropia da estrutura da variabilidade espacial da emissão de CO<sub>2</sub> (FCO<sub>2</sub>) e demais propriedades do solo em área de cana-de-açúcar sobre o sistema de cana crua, no nordeste do Estado de São Paulo. A caracterização anisotrópica das variáveis foi realizada pela derivação dos valores de dimensão fractal ( $D_F$ ) a partir dos semivariogramas experimentais calculados para as direções de 0°, 45°, 90° e 135° em relação ao sentido da linha de plantio do canavial. A média geral de FCO<sub>2</sub> foi de 2,19  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , com valores inferiores para a direção do plantio (0°). A análise de componentes principais discriminou as amostras retiradas na direção de 0°, sendo o primeiro componente principal relacionado principalmente às propriedades físicas do solo e FCO<sub>2</sub>. A análise de regressão múltipla indicou a propriedade porosidade livre de água (PLA) como um dos principais fatores relacionados à variabilidade espacial de FCO<sub>2</sub>, independentemente das direções. Os valores de  $D_F$  foram inferiores no sentido de plantio da cultura da cana-de-açúcar, indicando, além de anisotropia dessa propriedade, maior homogeneidade de FCO<sub>2</sub> na direção de 0°. Não foram observadas mudanças na estrutura de variabilidade espacial, expressa pelos valores de  $D_F$ , mesmo após a ocorrência de chuvas.

**Palavras-Chave:** respiração do solo, geoestatística, autocorrelação, semivariograma, heterogeneidade.

## 4.1 - Introdução

De acordo com o IPCC (2007), 60% do efeito estufa adicional pode ser atribuído ao aumento da concentração de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) na atmosfera. A emissão de  $\text{CO}_2$  do solo ( $\text{FCO}_2$ ) é uma das principais componentes do ciclo do carbono no planeta, influenciado pela dinâmica do carbono no solo. Estima-se que, no Brasil, nos primeiros 0,3 m de profundidade do solo, estejam armazenados cerca de  $33,4 \pm 3,4 \text{ Pg C}$  (BERNOUX et al., 2002). O Brasil é o principal produtor mundial de cana-de-açúcar, com 630 milhões de toneladas produzidas em 2009, em uma área plantada de aproximadamente 8 milhões de hectares (CONAB, 2009). A produção da cultura está concentrada principalmente na região Centro-Sul, sendo que a área total cultivada no Estado de São Paulo é 4,87 milhões de hectares (19,6% do território do Estado de São Paulo), e, o Estado é responsável por 60% da produção total do País (UNICA, 2010; RUDORFF et al., 2010).

Atualmente, 50% da produção total são colhidos de forma mecanizada e estima-se que, nos próximos 10 anos, esse valor chegue a 80% da área plantada no Brasil (GALDOS et al., 2009). No Estado de São Paulo, espera-se que 90% das áreas produtoras de cana-de-açúcar estejam sob o sistema de colheita mecanizada até o ano de 2014. Assim, entender a variabilidade espacial e a temporal da emissão de  $\text{CO}_2$  do solo em áreas de cana crua é importante para a compreensão do potencial desse sistema na mitigação de gases do efeito estufa.

A emissão de  $\text{CO}_2$  do solo é o resultado da interação dos processos de produção do gás no interior do solo e do transporte desse gás para a atmosfera. Portanto,  $\text{FCO}_2$  é dependente de uma série de fatores inerentes ao solo, como a temperatura e a umidade (EPRON et al., 2006; RYU et al., 2009), o teor de carbono orgânico (KEMMITT et al., 2008), o teor de fósforo (DUAH-YENTUMI et al., 1998) e as propriedades físicas, como a densidade e a porosidade do solo, principalmente por serem responsáveis pela oxigenação do solo e pelo transporte do gás para a atmosfera (FANG & MONCRIEFF, 1999; XU & QI, 2001; JASSAL et al., 2004).

A geoestatística pode permitir analisar não somente a variabilidade espacial das propriedades físicas e químicas dos solos, mas também é capaz de inferir a respeito da relação ecológica entre o solo e o ambiente (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989). Portanto, identificar e entender as relações entre a variabilidade espacial de FCO<sub>2</sub> em áreas agrícolas e a variabilidade espacial das propriedades do solo é de grande interesse, uma vez que, além de possibilitar a determinação de futuros esquemas amostrais, contribui para a diminuição das incertezas nas estimativas de FCO<sub>2</sub> (MARTIN & BOLSTAD, 2009).

Apesar de todos os esforços, a caracterização da variabilidade espacial de FCO<sub>2</sub> torna-se subjetiva ao levar em consideração apenas o parâmetro alcance, derivado dos modelos ajustados aos semivariogramas experimentais, pois vários trabalhos indicam diferentes valores desse parâmetro para os diferentes tipos de solos e cobertura vegetal (STOYAN et al., 2000; LA SCALA Jr. et al., 2000; RAYMENT & JARVIS, 2000; OHASHI & GYOKUSEN, 2007; KOSUGI et al., 2007; KONDA et al., 2008). Isso pode ser atribuído ao fato de que a forma do semivariograma experimental é altamente dependente das características da malha amostral, como a direção de amostragem e os intervalos entre as amostras (BURROUGH, 1981; PALMER, 1988).

As propriedades do solo, além de possuírem dependência espacial, podem apresentar, muitas vezes, anisotropia, ou seja, apresentam diferentes padrões de variabilidade espacial em diferentes direções. A anisotropia ocorre, uma vez que a distribuição espacial das propriedades do solo, incluso FCO<sub>2</sub>, é resultante de uma complexa interação dos processos de formação do solo, os quais atuam com intensidade variável nas diferentes direções e em várias escalas espaciais (TRANGMAR et al., 1986; MARTIN & BOLSTAD, 2009). De acordo com LA SCALA Jr. et al. (2009), espera-se que o manejo do solo em áreas agrícolas resulte em anisotropia, afetando propriedades como o carbono, porosidade e teor de água do solo, as quais estão diretamente relacionadas aos processos de produção e de transporte do CO<sub>2</sub> do solo para a atmosfera.

A geometria fractal fornece novos conceitos para a descrição matemática de medidas heterogêneas, como no caso das propriedades do solo. Segundo

BURROUGH (1981) a dimensão fractal ( $D_F$ ) pode ser utilizada como um indicativo útil da complexidade da autocorrelação sobre várias escalas dos fenômenos naturais. A teoria fractal oferece a possibilidade de quantificar e integrar informações a respeito dos fenômenos físicos, químicos e biológicos dos solos, medidos em diferentes escalas espaciais (PERFECT & KAY, 1995; EGHBALL et al., 1999). O termo fractal pode ser utilizado para definir objetos ou fenômenos espaciais e/ou temporais que são contínuos e não diferenciáveis, apresentando correlações espaciais em diversas escalas (MANDELBROT, 1983).

A dimensão fractal é um fator utilizado para a caracterização da anisotropia em várias propriedades do solo, uma vez que esse parâmetro tem-se mostrado sensível às atuações de elementos externos, como relevo, chuva, cobertura vegetal e ações antrópicas, como práticas de manejo e o preparo do solo (ELTZ & NORTON, 1997; EGHBALL et al., 1999; VIDAL-VÁZQUEZ et al., 2005; USOWICZ & LIPIEC, 2009; VIDAL-VÁZQUEZ et al., 2010). VIDAL-VÁZQUEZ et al. (2010), na caracterização da dimensão fractal do microrrelevo de um Latossolo submetido a diferentes tipos de preparo do solo, confirmaram a existência da relação entre a dimensão fractal e os parâmetros dos modelos do semivariograma, como efeito pepita e o alcance da dependência espacial. LA SCALA Jr. et al. (2009) observaram uma complexa estrutura anisotrópica da emissão de  $\text{CO}_2$  do solo, com a maioria da dependência espacial na direção de aproximadamente  $90^\circ$  em relação ao sentido do preparo do solo (linha de plantio). Desta forma, o conhecimento da anisotropia de  $\text{FCO}_2$  em áreas agrícolas é de fundamental importância em sua estimativa, especialmente em grandes áreas, principalmente devido a uma melhoria do processo de amostragem no campo.

A hipótese do trabalho é que práticas de manejo da cultura de cana-de-açúcar introduzem uma anisotropia espacial de várias propriedades do solo, que por sua vez, controlam a variabilidade espacial da emissão de  $\text{CO}_2$  do solo. Diante do exposto, o objetivo do trabalho foi caracterizar, por meio da dimensão fractal, a anisotropia da emissão de  $\text{CO}_2$  e outras propriedades do solo em área de cultivo mecanizado de cana-de-açúcar.

## 4.2 - Material e Métodos

O estudo foi conduzido em área com 38 anos de cultivo de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.), na Fazenda São Bento, localizada na cidade de Guariba – SP, pertencente à Usina São Martinho. As coordenadas geográficas são 21° 24' de latitude sul e 48° 09' de longitude oeste, com altitude ao redor de 550 m acima do nível do mar, com relevo suave ondulado. O clima da região foi classificado como Aw, de acordo com Köppen, definido como tropical de verão chuvoso e inverno seco, com temperatura média anual de 22,2 °C. A precipitação média anual é de 1.425 mm, com período de maior concentração de outubro a março e com precipitações mais espaçadas, e de menores intensidades, de abril a setembro. A vegetação natural era constituída por floresta tropical subcaducifolia.

Esta área está inserida na província geomorfológica do Planalto Ocidental Paulista, próximo ao limite das Cuestas Basálticas, no divisor litoestratigráfico arenito-basáltico (área limítrofe entre o Basalto do Grupo São Bento, Formação Serra Geral e o Arenito do Grupo Bauru, Formação Adamantina). O solo da área, segundo a classificação proposta pela EMBRAPA (2006), é um Latossolo Vermelho eutroférico, textura muito argilosa (LVef), cultivado com cana-de-açúcar por mais de 30 anos.

A área utilizada neste estudo foi localizada em talhão com histórico de manejo no sistema cana crua, com oito anos de colheita mecanizada e 12 t ha<sup>-1</sup> de resíduos da cultura (palha) sobre a superfície do solo. O canavial instalado na área foi renovado no ano de 2006. Por ocasião da renovação do canavial, foi realizada uma operação de subsolagem e a erradicação química da soqueira. Logo após, foram aplicadas 2 t ha<sup>-1</sup> de calcário dolomítico e 1 t ha<sup>-1</sup> de gesso agrícola para a correção do solo em área total sem incorporação dos mesmos. A adubação de plantio foi realizada na sulcação, sendo utilizados 500 kg ha<sup>-1</sup> da fórmula 10-25-25; e o plantio, realizado de forma manual, sendo aplicados em soqueira, ao longo dos anos, 100 m<sup>3</sup> de vinhaça e 200 kg ha<sup>-1</sup> de nitrato de amônia. O adubo nitrogenado é aplicado de forma superficial, ao lado da linha de plantio. A operação de colheita foi realizada no dia 05 de agosto de 2008 (representado pelo dia Juliano 218); e o plantio da cultura, realizado no dia 1º de



setembro de 2008 (representado pelo dia Juliano 245), e a variedade plantada na área foi a CTC-6.

Para a caracterização da variabilidade espacial nas diferentes direções, foi instalada uma grade de 50 × 50 m, com distâncias mínimas de separação entre pontos de 0,50 m, contendo 89 pontos amostrais (Figura 4.1). A disposição dos pontos foi orientada em relação à linha de plantio da cultura, onde 0° é o sentido da linha, 90° o sentido da declividade e 45° o sentido da operação de eliminação da soqueira utilizada para a reforma do canal.

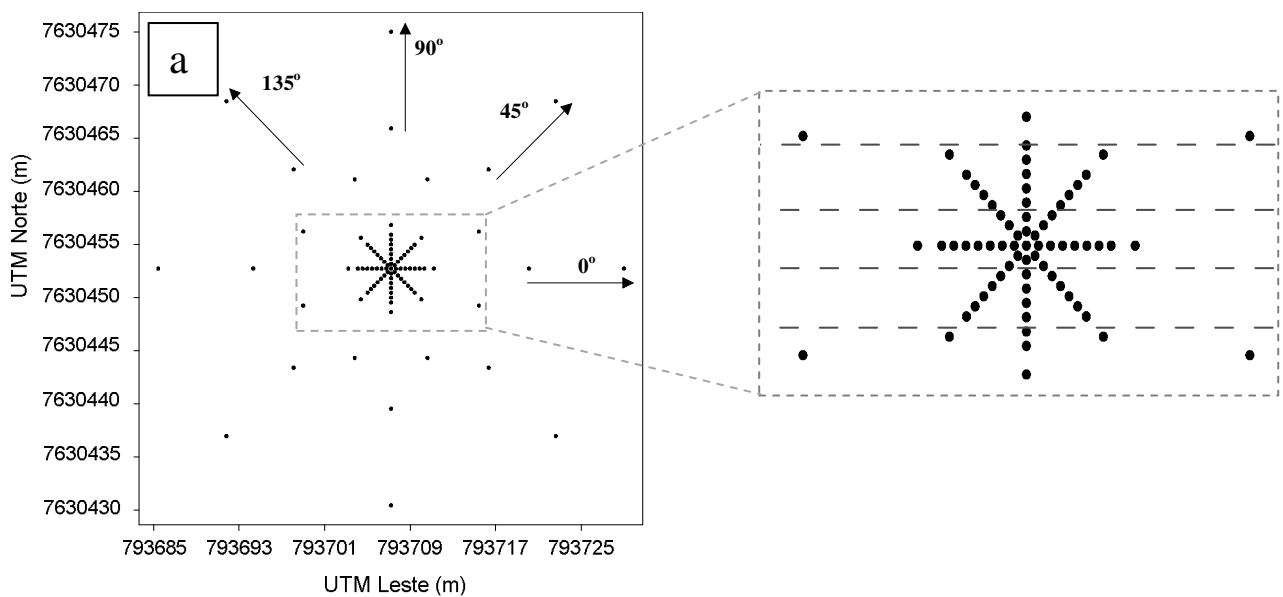


Figura 4.1. a) Área (50 × 50 m), gradeado amostral contendo 89 pontos dispostos nas diferentes direções e posição das linhas de plantio da cultura (— — —); b) imagem aérea, e c) aspectos gerais da área no início do experimento.

Para a avaliação da emissão de  $\text{CO}_2$  do solo ( $\text{FCO}_2$ ), foram utilizados dois sistemas portáteis LI-COR (LI-8100), durante o período inicial de crescimento da cultura. O sistema LI-8100 monitorou as variações da concentração de  $\text{CO}_2$  no interior da câmara por meio de espectroscopia de absorção óptica, na região espectral do infravermelho. A câmara de solos é um sistema fechado com volume interno de 854,2  $\text{cm}^3$  e área circular de 83,7  $\text{cm}^2$  que foi acoplada sobre um colar de PVC, previamente inserido no solo, em cada um dos pontos amostrais. Uma vez a câmara fechada, o modo de medida levou 1min 30 s, em cada ponto, para a determinação de  $\text{FCO}_2$ , tal que a concentração de  $\text{CO}_2$  dentro da câmara foi determinada a cada 2 s 30.

Para a avaliação da temperatura do solo ( $T_s$ ), foi utilizado o sensor de temperatura, parte integrante do sistema do LI-8100, que consiste em uma haste de 0,2 m que foi inserida no interior do solo, a 0,05 m do local onde foram instalados os colares de PVC para a avaliação da emissão de  $\text{CO}_2$ . A umidade do solo ( $U_s$ ) foi determinada por meio de um equipamento de TDR (Time Domain Reflectometry) (Hydrosense TM, Campbell Scientific, Austrália). O aparelho de TDR é constituído por uma sonda, apresentando duas hastes de 0,12 m que devem ser inseridas no interior do solo, perpendicular em relação à sua superfície, a 0,05 m dos colares de PVC. As avaliações de  $\text{FCO}_2$ ,  $T_s$  e  $U_s$  foram realizadas nos dias Julianos 299; 301; 302; 308; 313 e 322 que contemplam o período do dia 25 de outubro a 17 de novembro de 2008, durante o período da manhã (M), nos dias 301; 302; 308 e 322 e no período da tarde (T), nos dias 299; 301; 302 e 313. A Figura 4.2 indica os dias em que foram avaliadas a emissão de  $\text{CO}_2$ , temperatura e umidade do solo na área de cana crua.

A amostragem do solo (0,0 a 0,1 m) foi realizada nos 89 pontos após o término das avaliações. As amostras coletadas foram secas ao ar, destorroadas e passadas na peneira de malha 2,0 mm. Após este processo, as amostras foram acondicionadas em caixas de papelão e etiquetadas para conservação. Foram feitas as seguintes análises de rotina: determinação do teor de matéria orgânica (MO) de P disponível, K, Ca, Mg e H + Al. Foram calculadas a soma de bases (SB) e a capacidade de troca de cátions (CTC). Cálcio, magnésio e potássio trocáveis e fósforo disponível foram extraídos, utilizando-se do método da resina trocadora de íons (RAIJ, 2001).

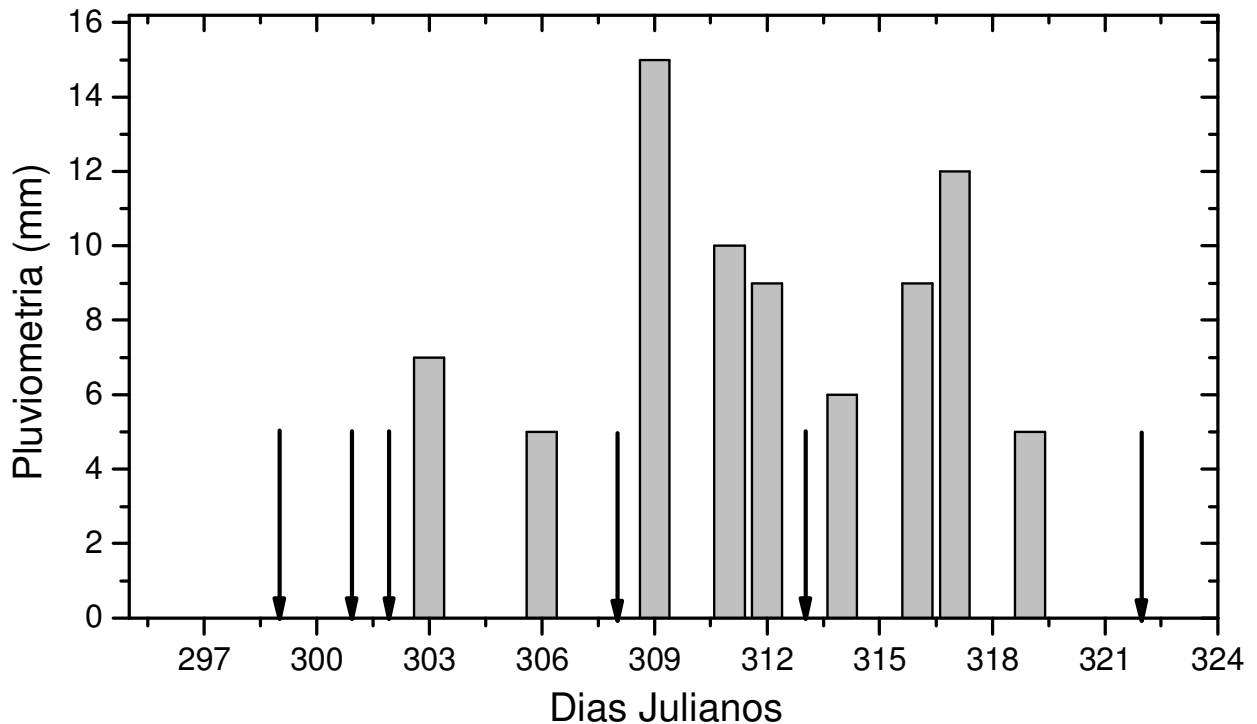


Figura 4.2. Pluviometria durante o período de avaliação do experimento. Flechas em vermelho indicam os dias de avaliação da emissão de CO<sub>2</sub>, temperatura e umidade do solo.

A análise granulométrica (areia, silte e argila) foi realizada por meio do método da pipeta, empregando-se NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> como dispersante químico e agitação mecânica de baixa rotação, por 16 horas (EMBRAPA, 1997). A densidade do solo (Ds) foi determinada em amostras indeformadas, coletadas com amostrador adaptado a cilindros com 0,05 m de diâmetro interno e 0,04 m de altura (EMBRAPA, 1997). O volume total de poros (VTP) foi calculado com base no valor de densidade. A distribuição de poros, por tamanho, macroporosidade (Macro) e microporosidade (Micro), foi determinada utilizando-se de funil de placa porosa sob a tensão de 0,6 m de altura de coluna d'água, em amostras previamente saturadas. O volume de água retido na amostra, nesta condição, corresponde aos microporos, e os macroporos foram calculados por diferença (EMBRAPA, 1997). O estoque de carbono (EstC) foi calculado com base na massa de solo equivalente (BAYER et al., 2000), pela expressão

$EstC = (CO \times Ds \times E) / 10$ , em que  $EstC$  é o estoque de carbono ( $Mg\ ha^{-1}$ );  $CO$  é o teor de carbono orgânico oxidável ( $g\ kg^{-1}$ );  $Ds$  é a densidade do solo ( $kg\ dm^{-3}$ ), e  $E$  a espessura da camada estudada (cm).

A dependência espacial de cada propriedade do solo foi determinada pela análise do semivariograma experimental (WEBSTER & OLIVER, 1990). A estimativa da semivariância, em uma dada distância de separação  $h$ , foi determinada pela fórmula:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (4.1)$$

em que  $N$  é o número de pares de pontos separados pela distância  $h$ ;  $Z(x_i)$  é o valor da variável  $Z$  no ponto  $x_i$ , e  $Z(x_i + h)$  é o valor da variável  $Z$  no ponto  $x_i + h$ . Os semivariogramas experimentais de todas as propriedades foram calculados para as quatro direções:  $0^\circ$  para a direção da linha de plantio;  $90^\circ$  para a direção perpendicular à linha de plantio;  $45^\circ$  e  $135^\circ$  direções da operação de eliminação das soqueiras da cana, realizada a cada seis anos na região (última realizada no ano de 2006). Os semivariogramas para cada direção foram calculados com  $\pm 45^\circ$  de tolerância. Anteriormente à determinação dos semivariogramas, foi retirada a tendência ou não estacionaridade de todas as variáveis estudadas, por meio do ajuste de uma superfície em função das coordenadas  $x$  e  $y$  aos dados. A tendência foi removida pela aplicação da fórmula  $Z_{res}(x,y) = Z(x,y) - Z_{est}(x,y)$ , sendo  $Z_{res}(x,y)$  o resíduo no ponto de coordenadas  $x,y$ ;  $Z(x,y)$  o valor observado da variável, e  $Z_{est}(x,y)$  o valor estimado pelo ajuste da superfície da variável  $Z$ , sendo o semivariograma calculado para  $Z_{res}(x,y)$ .

A estrutura espacial de superfícies fractais pode ser descrita pela seguinte relação de lei de potência (VIVAS-MIRANDA, 2000):

$$|z(x) - z(x + h)| \propto h^H \quad (4.2)$$

em que  $z$  é o valor da propriedade;  $x$  denota a sua localização espacial;  $h$  é a distância de separação, e  $H$  é a codimensão fractal ou expoente de Hölder (HUANG & BRADFORD, 1992). Se  $0 < H \leq 1$ , a codimensão fractal é definida como (PALMER, 1988):

$$H = d - D_F \quad (4.3)$$

em que  $D_F$  é a dimensão fractal, e  $d$  é a dimensão Euclidiana do sistema dentro do qual a distribuição fractal é descrita, ou seja, valores iguais a 1; 2 e 3 para linhas, áreas e volumes, respectivamente. Assim, para uma propriedade distribuída no solo, sua dimensão fractal será representada como  $D_F = 3 - H$  (VIVAS-MIRANDA, 2000).

Comparando as equações (4.1) e (4.2), podemos dizer que, quando os dados apresentam um comportamento fractal em uma determinada escala, temos a seguinte proporção (PALMER, 1988):

$$\hat{\gamma}(h) \propto h^{2H} \quad (4.4a)$$

ou,

$$\log[\hat{\gamma}(h)] \propto 2H \log[h] \quad (4.4b)$$

Identificado pela equação (4.4b) que a inclinação do semivariograma experimental na escala logarítmica é igual a  $2H$ . Portanto, o expoente  $H$  foi obtido por meio da análise de regressão linear no gráfico da referida equação (PERFECT & KAY, 1995):

$$H = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\log[\hat{\gamma}(h)]}{2 \log[h]} \quad (4.5)$$

Se  $H=0$ ,  $D_F = 3$ , falta estrutura de variabilidade espacial (efeito pepita) ou nenhuma relação entre a forma com que a propriedade varia no espaço em função de  $h$ , indicando a não existência da dimensão fractal; neste caso, a metodologia não se aplica. Quando  $0 < H < 3$ , a dimensão fractal assume valores que caracterizam a presença de estrutura de variabilidade espacial e dependência da propriedade com  $h$  (PALMER, 1988).

A análise de variância com um único fator foi realizada com o intuito de verificar a diferença entre as médias das propriedades físicas, químicas e emissão de  $\text{CO}_2$  do solo para as diferentes direções. Concomitantemente às análises estatísticas, as pressuposições básicas da análise de variância, a normalidade dos erros e a homogeneidade das variâncias foram testadas para todas as variáveis.

A estrutura multivariada contida no conjunto inicial de dados foi avaliada pela análise de componentes principais que condensa a informação relevante em um conjunto menor de variáveis latentes ortogonais que são denominados componentes principais (autovetores), gerados por combinações lineares das variáveis originais a

partir dos autovalores da matriz de covariância. ACP é uma técnica estatística multivariada, que condensa as variáveis medidas em novas variáveis não medidas, na tentativa de avaliar o poder discriminatório das variáveis originais. Cada par de componentes principais (CPs) gera uma representação bidimensional do espaço amostral original, denominado biplot, onde é possível explicar a estrutura de variáveis direcionando feixes de variáveis nas regiões de máxima variabilidade. Foram considerados os componentes principais cujos autovalores foram superiores à unidade (KAISER, 1958). Os coeficientes das funções lineares, que definem os CPs, foram utilizados na interpretação de seu significado, usando o sinal e o tamanho relativo dos coeficientes como uma indicação do peso a ser atribuído para cada variável. Somente coeficientes com altos valores foram considerados para a interpretação, usualmente aqueles maiores ou iguais a 0,50 em valor absoluto. Cada componente principal, para cada uma das observações (scores) das variáveis originais, foi usado como uma nova variável na análise de variância com um único fator: a direção.

A análise de regressão múltipla foi realizada com o objetivo de verificar quais as propriedades que melhor explicaram a variabilidade da emissão de CO<sub>2</sub> nas diferentes direções. O método de seleção de variáveis “stepwise” foi inicialmente aplicado para todo o conjunto de dados e, posteriormente, para cada direção. O fator de inflação da variância (FIV) para cada variável exploratória foi utilizado para examinar a multicolinearidade e escolher o conjunto de propriedades do solo a serem utilizadas na análise de regressão múltipla ( $FIV < 10$ ) (DER & EVERITT, 2001). Durante o procedimento de seleção de variáveis, “stepwise”, o nível de significância do teste  $F$ , para a entrada ou a saída de uma variável no modelo, foi de 0,10. As estatísticas descritivas, análise de variância, análise de regressão múltipla e comparação de médias, pelo teste  $t$  de Student, foram realizadas no software SAS (SAS versão 9, SAS institute, Cary, NC, USA). A análise de componentes principais foi conduzida no programa STATISTICA 7.0 (StatSoft. Inc., Tulsa, OK, USA). A determinação dos semivariogramas experimentais, em diferentes escalas e direções, e posterior cálculo da dimensão fractal, foi realizada pelos programas TREND e SISOT (VIVAS-MIRANDA, 2000).

### 4.3 - Resultados e Discussão

Inicialmente, foi conduzida uma análise para a avaliação da influência da respiração das raízes da cana-de-açúcar pela análise de diferença ou similaridade da média da emissão de  $\text{CO}_2$  do solo, em pontos posicionados entre as linhas de plantio e sobre a linha de plantio (Figura 4.1). Não foram observadas diferenças significativas (teste  $t$  de Student;  $p > 0,05$ ) entre as médias de  $\text{FCO}_2$ , em todos os dias de avaliação, nas diferentes posições. Os valores de  $\text{FCO}_2$  registrados foram semelhantes aos observados em diversos estudos conduzidos em solos sobre o cultivo de cana-de-açúcar (PANOSSO et al., 2008; BRITO et al., 2009,) (Tabela 4.1). As maiores médias de  $\text{FCO}_2$ ,  $2,68 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (dia 313) e  $2,33 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (dia 322), foram registradas após a ocorrência de precipitações de 34 e 32 mm, respectivamente, representando um aumento médio de 26% em comparação aos valores de  $\text{FCO}_2$  registrados anteriormente às precipitações. Vários autores têm relatado a dependência de  $\text{FCO}_2$  quanto à umidade do solo e sua relação com as precipitações pluviométricas (SCHWENDENMANN et al., 2003; EPRON et al., 2004; KOSUGI et al., 2007). LA SCALA Jr. et al. (2000) observaram um aumento de 63% nos valores médios de  $\text{FCO}_2$  após uma precipitação de 14 mm, em um Latossolo sem vegetação.

A variabilidade diurna da emissão de  $\text{CO}_2$  foi avaliada nos dias 301 e 302 por meio da comparação entre os valores observados nos períodos da manhã e da tarde. Para o dia 301, não foram observadas diferenças diurnas (teste  $t$  de Student,  $p < 0,05$ ) para  $\text{FCO}_2$ ,  $T_s$  e  $U_s$  (Tabela 4.1). Entretanto, o mesmo não ocorreu no dia 302, quando as médias de  $\text{FCO}_2$  apresentaram diferenças entre os períodos da manhã e da tarde,  $1,90 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  e  $2,15 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , respectivamente. Tal diferença pode ser atribuída ao provável aumento da atividade microbiana do solo, possivelmente devido ao aumento significativo de  $T_s$ . Pode-se dizer que, apesar da presença de palhada sobre a superfície do solo, a variação significativa de  $T_s$  proporcionou um aumento na taxa de evapotranspiração da cultura, acarretando assim uma diminuição significativa na  $U_s$ . Com a diminuição da umidade, parte da porosidade do solo passou a ser ocupada por

ar, melhorando assim as condições de oxigenação, fator favorável à atividade microbiana, o que aumentou o coeficiente de difusão efetivo do meio, favorecendo assim o processo de transporte da molécula do interior do solo para a atmosfera (FANG & MONCRIEFF, 1999; JASSAL et al., 2004).

Os valores do coeficiente de variação (CV) de FCO<sub>2</sub> estiveram entre 32,9% e 48,9%, respectivamente, na manhã do dia 302 e na tarde do dia 313 (Tabela 4.1), estando de acordo com aqueles reportados na literatura (DASSELAAR et al., 1998; LA SCALA Jr. et al., 2000; EPRON et al., 2004; TEDESCHI et al., 2006; KONDA et al., 2008; PANOSSO et al., 2008). HERBST et al. (2009), estudando a variabilidade espaçotemporal da respiração do solo em áreas agrícolas desprovidas de vegetação, encontraram valores de CV ao redor de 33%, indicando uma estrutura relativamente heterogênea da respiração do solo em pequena escala. Os valores de CV de FCO<sub>2</sub> podem ser considerados um primeiro indicativo da variabilidade espacial dessa propriedade; entretanto, de acordo com FANG et al. (1998), este não é suficiente para a comparação das emissões de CO<sub>2</sub> em diferentes estudos, principalmente pela falta de informações disponíveis a respeito dos pontos amostrais, justificando assim a utilização da geoestatística.

Para a caracterização inicial da anisotropia de FCO<sub>2</sub> e das demais propriedades do solo estudadas, foi realizada a análise de variância com um único fator (direções), sendo as diferenças significativas entre as médias para as direções quando comparadas pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade (Tabela 4.2). Os menores valores médios de FCO<sub>2</sub> foram observados na direção de 0°, com exceção das tardes dos dias 301 e 302, onde não foram observadas diferenças entre as médias de FCO<sub>2</sub> nas diferentes direções. A emissão média para a direção de 0° foi de 1,72  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , 29% inferior àquela registrada para os ângulos de 45° e 135° (2,42  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ). Deve-se salientar, que mesmo após os eventos de precipitações, a direção de 0° continuou apresentando os menores valores de emissão.



Tabela 4.1. Estatística descritiva da emissão de CO<sub>2</sub> ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), temperatura do solo ( $^{\circ}\text{C}$ ) e umidade do solo (%) para todas as avaliações, em que M representa o período da manhã, e T representa o período da tarde.

| Dias | Emissão de CO <sub>2</sub> |      | Temperatura do solo |      | Umidade do solo |       |
|------|----------------------------|------|---------------------|------|-----------------|-------|
|      | Média                      | CV   | Média               | CV   | Média           | CV    |
| 299T | 2,27                       | 38,8 | 25,95               | 4,1  | 30,85           | 35,09 |
| 301M | 2,08                       | 36,3 | 24,78               | 5,0  | 23,93           | 17,58 |
| 301T | 2,01                       | 37,9 | 26,76               | 4,2  | 26,36           | 20,78 |
| 302M | 1,90                       | 32,9 | 24,77               | 4,5  | 24,49           | 25,76 |
| 302T | 2,15                       | 37,6 | 27,12               | 2,8  | 21,34           | 19,58 |
| 308M | 2,12                       | 42,2 | 24,38               | 4,0  | 33,93           | 36,45 |
| 313T | 2,68                       | 48,9 | 26,66               | 2,6  | 32,60           | 11,26 |
| 322M | 2,33                       | 44,5 | 27,46               | 14,1 | 28,61           | 23,47 |

N = 89. CV = coeficiente de variação (%).

Outras propriedades do solo apresentaram diferenças das médias nas diferentes direções, e tais atributos foram: Us, Ds, VTP, PLA, Argila, Silte, pH, EstC e CTC. As propriedades que não apresentaram diferenças quanto às diferentes direções foram: Ts, Areia, MO e SB. A similaridade entre os valores de Ts, para as diferentes direções, pode ser atribuída à presença dos resíduos da cultura depositados sobre a superfície do solo que impedem a incidência direta da radiação solar, promovendo uma homogeneização da temperatura do solo.

Vários trabalhos têm reportado o aumento dos teores de matéria orgânica em áreas sobre o manejo de cana crua (RAZAFIMBELO et al., 2006; GALDOS et al., 2009), devido à adição de matéria orgânica na lavoura de cana-de-açúcar por meio da preservação da palhada sobre a superfície do solo. Tal fato pode contribuir para a homogeneização das propriedades químicas do solo, sendo responsáveis pela semelhança entre as médias para as diferentes direções da maioria de suas propriedades químicas (MO, SB, P, K, Ca e Mg). Os menores valores de FCO<sub>2</sub> observados no sentido da linha da cultura podem ser atribuídos aos menores valores de PLA observados para essa mesma direção, sendo esse fato relacionado aos maiores valores de umidade do solo observados na direção de 0°, quando comparado às outras direções, na profundidade de 0,0 a 0,1 m.

Tabela 4.2. Médias da emissão de CO<sub>2</sub> do solo e das demais propriedades do solo e coeficiente de variação (CV) para as diferentes direções de estudo (0,0 a 0,1 m).

| Propriedade   | 0°        |       | 45°       |      | 90°      |      | 135°     |      |
|---|-----------|-------|-----------|------|----------|------|----------|------|
|   | Média     | CV    | Média     | CV   | Média    | CV   | Média    | CV   |
| FCO2 299T ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )  | 1,85 b    | 24,8  | 2,43 ab   | 40,1 | 2,31 ab  | 26,5 | 2,64 a   | 47,0 |
| FCO2 301M ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )  | 1,67 b    | 37,2  | 2,18 ab   | 34,4 | 2,23 ab  | 35,4 | 2,31 a   | 34,0 |
| F CO2 301T ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) | 1,70 a    | 35,0  | 2,00 a    | 49,0 | 2,15 a   | 27,0 | 2,32 a   | 35,4 |
| FCO2 302M ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )  | 1,55 b    | 29,19 | 2,09 a    | 37,2 | 1,96 ab  | 26,3 | 2,04 ab  | 32,6 |
| FCO2 302T ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )  | 1,87 a    | 26,4  | 2,34 a    | 42,9 | 2,35 a   | 41,5 | 2,16 a   | 32,3 |
| FCO2 308M ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )  | 1,44 b    | 42,6  | 2,47 a    | 44,9 | 2,19 a   | 29,9 | 2,39 a   | 36,6 |
| FCO2 313T ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )  | 2,01 b    | 44,9  | 3,34 a    | 57,8 | 2,66 ab  | 34,6 | 2,84 ab  | 39,9 |
| FCO2 322M ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )  | 1,63 b    | 43,3  | 2,53 a    | 50,9 | 2,50 a   | 32,1 | 2,68 a   | 40,4 |
| FCO2 ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )       | 1,72 b    | 32,1  | 2,42 a    | 41,1 | 2,29 ab  | 24,4 | 2,42 a   | 35,2 |
| Ts (°C)   | 26,24 a   | 1,6   | 25,78 a   | 1,6  | 25,96 a  | 2,8  | 25,96 a  | 2,4  |
| Us (%)  | 31,07 a   | 21,7  | 26,68 b   | 11,1 | 27,07 b  | 9,6  | 26,74 b  | 14,4 |
| PLA (%)   | 9,34 b    | 68,5  | 16,75 a   | 27,2 | 16,84 a  | 21,5 | 17,03 a  | 29,2 |
| Ds ( $\text{g cm}^{-3}$ )                           | 1,22 a    | 2,7   | 1,15 b    | 6,38 | 1,15 b   | 4,9  | 1,15 b   | 5,8  |
| VTP (%)   | 40,40 b   | 2,4   | 43,43 a   | 5,22 | 43,91 a  | 4,8  | 43,77 a  | 4,4  |
| Areia ( $\text{g kg}^{-1}$ )                        | 141,81 a  | 2,4   | 142,00 a  | 3,24 | 141,55 a | 1,9  | 142,60 a | 2,2  |
| Silte ( $\text{g kg}^{-1}$ )                        | 244,69 bc | 3,3   | 256,10 ab | 7,5  | 267,60 a | 4,3  | 239,33 c | 6,8  |
| Argila ( $\text{g kg}^{-1}$ )                       | 613,50 ab | 1,2   | 601,90 bc | 3,0  | 590,85 c | 2,2  | 618,08 a | 2,8  |
| pH  | 4,5 b     | 6,6   | 4,6 ab    | 3,9  | 4,6 ab   | 4,1  | 4,7 a    | 5,3  |
| MO ( $\text{g dm}^{-3}$ )                           | 24,90 a   | 8,6   | 23,50 a   | 10,0 | 23,85 a  | 8,8  | 23,65 a  | 8,4  |
| EstC ( $\text{Mg ha}^{-1}$ )                        | 860,16 a  | 7,7   | 769,95 b  | 9,1  | 774,57 b | 7,3  | 770,86 b | 8,3  |
| Pr ( $\text{mg dm}^{-3}$ )                          | 17,76 a   | 9,8   | 17,25 a   | 39,6 | 20,05 a  | 61,4 | 16,20 a  | 27,2 |
| SB ( $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ )               | 43,34 a   | 25,2  | 44,47 a   | 16,1 | 44,77 a  | 17,0 | 45,15 a  | 27,9 |
| CTC ( $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ )              | 106,34 a  | 7,9   | 102,37 a  | 5,31 | 106,87 a | 11,2 | 97,95 a  | 7,6  |
| V (%)   | 40,83 a   | 23,4  | 43,47 a   | 15,5 | 42,09 a  | 16,6 | 46,04 a  | 27,1 |

N=89; Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade; FCO2= emissão de CO<sub>2</sub> média do solo; Ts = temperatura média do solo; Us = umidade média do solo; PLA= porosidade livre de água; Ds = densidade do solo; VTP = volume total de poros; Areia = teor de areia; Silte = teor de silte; Argila = teor de argila; MO = matéria orgânica; EstC = estoque de carbono; SB = soma total de bases; CTC = capacidade de troca de cátions; V%= saturação de bases do solo.

A Tabela 4.3 apresenta os resultados da análise de componentes principais e da análise de variância, juntamente com os resultados do teste de comparação múltipla. Neste estudo, 36,6% da variabilidade total foi explicada por CP1, 17,7% por CP2 e 12,5% por CP3, totalizando 66,8% da variabilidade contida nos dados originais. O CP1 apresentou correlação positiva com o grupo das variáveis físicas do solo (Macro, VTP e PLA), correlacionadas ao processo de transporte de CO<sub>2</sub> do solo para a atmosfera (JASSAL et al., 2004; FANG & MONCRIEFF, 1999), favorecendo assim FCO2.

Tabela 4.3. Coeficientes de correlação entre as propriedades do solo e os três primeiros componentes principais, análise de variância e teste de comparações múltiplas para as variáveis em diferentes direções.

| Componentes principais  | CP1                                     | CP2                                    | CP3    |
|-------------------------|---|--|--------|
| Autovalores             | 3,3                                     | 1,6                                    | 1,1    |
| Variância explicada (%) | 36,6                                    | 17,7                                   | 12,5   |
|                         | Correlações <sup>a</sup>                |  |        |
| Macro                   | 0,75*                                   | -0,16                                  | 0,28   |
| VTP                     | 0,84*                                   | -0,01                                  | 0,35   |
| Argila                  | -0,42                                   | 0,62*                                  | 0,37   |
| pH                      | 0,37                                    | 0,05                                   | -0,83* |
| CTC                     | -0,15                                   | -0,79*                                 | 0,24   |
| EstC                    | -0,31                                   | -0,72*                                 | -0,10  |
| FCO2                    | 0,77*                                   | -0,10                                  | 0,09   |
| Ts                      | -0,50*                                  | -0,12                                  | 0,12   |
| PLA                     | 0,88*                                   | 0,08                                   | -0,05  |
| Interpretação           | FCO2 + Ts+ propriedades físicas do solo | Propriedades químicas do solo e Argila | pH     |
| Análise de Variância    |   |  |        |
| <i>F</i>                | 15,39                                   | 3,22                                   | 4,61   |
| <i>p</i>                | <0,0001                                 | 0,0273                                 | 0,0051 |
| Comparação de média     |   |  |        |
| 0°                      | a                                       | a                                      | b      |
| 45°                     | b                                       | ab                                     | ab     |
| 90°                     | b                                       | ab                                     | ab     |
| 135°                    | b                                       | b                                      | a      |

N = 89; <sup>a</sup> correlações precedidas por asterisco (>0,50 em valor absoluto) foram considerados na interpretação do componente principal; valores seguidos pela mesma letra nas colunas não diferem entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 5%. FCO2= emissão de CO<sub>2</sub> média do solo; Ts = temperatura média do solo; PLA= porosidade livre de água; VTP = volume total de poros; Argila = teor de argila; EstC = estoque de carbono; CTC = capacidade de troca de cátions.

A análise de variância dos scores de CP1 (Tabela 4.3) indicou um efeito significativo do fator direção ( $F=15,39$ ;  $p<0,0001$ ), ou seja, a relação existente entre as variáveis de maior poder discriminatório, nesse componente, não é a mesma para todas as direções. A análise de comparação múltipla indicou diferença significativa ( $p<0,05$ ) dessa relação para a direção de 0°, quando comparada às demais direções de estudo. Resultados semelhantes foram observados para os demais componentes principais. O estoque de carbono do solo (EstC) e a CTC do solo, propriedades químicas do solo, correlacionaram-se negativamente com CP2, enquanto o teor de argila se correlacionou positivamente a este componente. A análise de variância dos scores de CP2 indicou que a relação entre as variáveis não foi a mesma para todas as direções ( $F=3,22$ ;  $p=0,0273$ ), mostrando diferenças significativas entre as direções de 0° (direção do

plantio) e 135° (eliminação da soqueira da cana-de-açúcar). O pH do solo apresentou índice de correlação negativo com CP3 e, mais uma vez, foram observadas diferenças significativas entre os ângulos de 0° e 135° ( $F=4,61$ ;  $p=0,0051$ ). Assim, os resultados sugerem que práticas de manejo podem causar alterações nas relações espaciais entre as propriedades físicas do solo, em áreas de cultivo de cana-de-açúcar, no sistema de cana crua.

A representação bidimensional dos dois primeiros componentes principais explicou 54,3% da variabilidade das variáveis originais, que consta da Figura 4.3, onde se visualiza a separação das amostras provenientes dos pontos situados na direção de 0° das demais direções. As variáveis EstC, Argila e CTC foram as responsáveis pela discriminação desse grupo, localizado à esquerda de CP1 (correlação negativa). Por outro lado, as variáveis FCO2, PLA, VT e Macro localizaram-se à direita de CP1 (correlação positiva), podendo ser consideradas antagonistas aos pontos localizados na direção de 0°. As variáveis PLA (0,88), VTP (0,84), FCO2 (0,77) e Macro (0,75), nessa ordem, foram as que apresentaram poder discriminatório em CP1; as variáveis CTC (-0,79), EstC (-0,72) e Argila (0,62) em CP2, e pH (0,83) a única em CP3. SCOTT-DENTON et al. (2003), estudando a variabilidade espacial da respiração do solo em floresta de coníferas, Colorado, EUA, utilizaram a análise de componentes principais e encontraram seis componentes independentes, os quais explicaram 74% da variância total dos dados, em que a primeira componente principal foi especialmente relacionada às variáveis ligadas ao carbono do solo. No presente estudo, em área de cana crua, a primeira componente principal foi relacionada às propriedades físicas do solo, especialmente a PLA, que expressa o volume poroso não ocupado pela água.

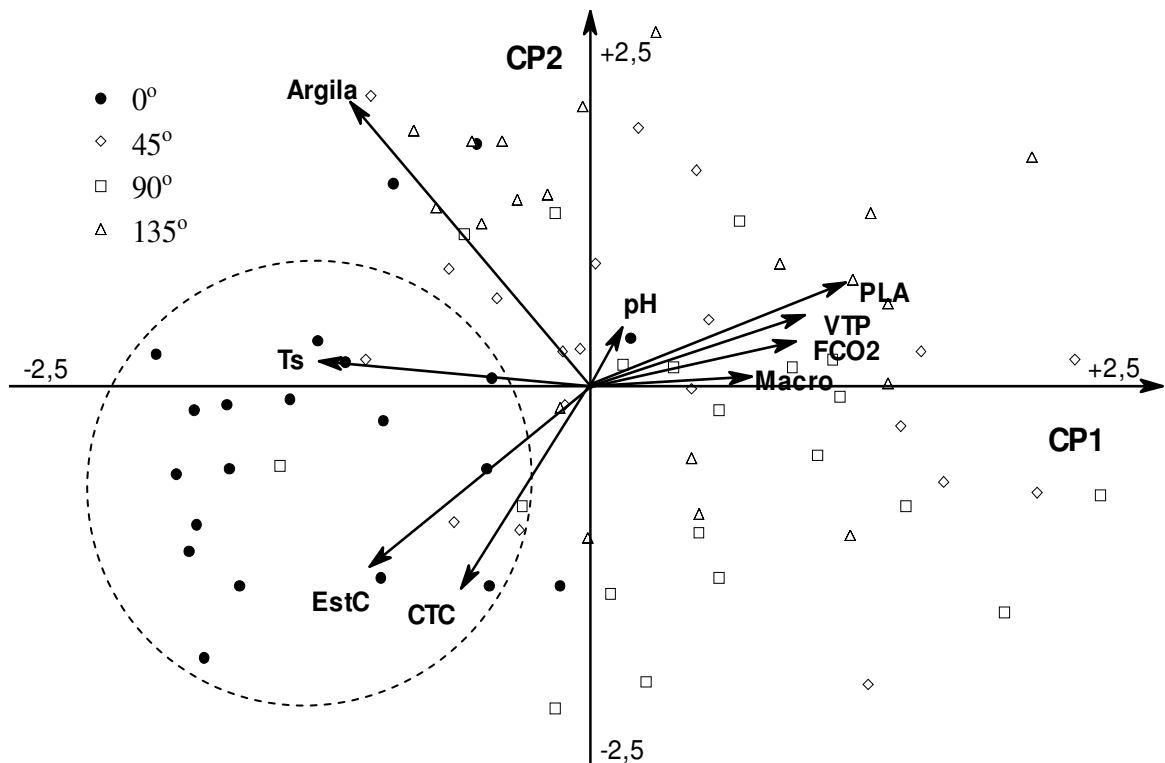


Figura 4.3. Representação bidimensional dos componentes principais 1 e 2 (biplot) da análise de componentes principais. FCO2= emissão de CO<sub>2</sub> média do solo; Ts = temperatura média do solo; PLA= porosidade livre de água; VTP = volume total de poros; Argila = teor de argila; EstC = estoque de carbono; CTC = capacidade de troca de cátions.

A Tabela 4.4 apresenta os valores da dimensão fractal de FCO<sub>2</sub>, derivados dos semivariogramas experimentais ( $\log(\gamma) \times \log(h)$ ), na escala de alcance/distância de separação = 5/0,5 m (Figuras 1A a 8A). Nessa escala foram observados valores de  $D_F$  significativos ( $D_F < 3$ ,  $p < 0,05$ ) para a maioria das direções estudadas, com exceção das direções de 135° na manhã do dia 302, e 90° na manhã do dia 308. Ao longo dos dias de avaliação, foram observados valores médios de  $D_F$  significativamente inferiores (teste de Tukey,  $p < 0,01$ ) para as direções de 0° e 45° ( $D_F = 2,73$ ), quando comparados às direções de 90° e 135° (iguais a 2,83 e 2,89, respectivamente). Os valores de  $D_F$  foram semelhantes aos observados por LA SCALA Jr. et. al (2009) que, em estudo da dimensão fractal e anisotropia de FCO<sub>2</sub>, em áreas agrícolas, observaram  $D_F$  menor do que 3,0, principalmente na direção perpendicular ao sentido do plantio da cultura (soja).

A estrutura de variabilidade, quando expressa pelos valores de  $D_F$ , mostrou-se constante para essa escala, uma vez que, mesmo após a ocorrência de chuvas, os valores de  $D_F$  mantiveram-se estáveis, diferentemente do observado por LA SCALA Jr. et al. (2000), que relataram alterações temporais nos padrões de variabilidade espacial de FCO<sub>2</sub>, caracterizada pelo semivariograma, após a ocorrência de chuvas. As variações temporais da dimensão fractal de FCO<sub>2</sub> podem estar relacionadas às mudanças nos padrões de variabilidade espacial dessa propriedade, associadas aos fatores como a temperatura e a umidade do solo (EPRON et al., 2006). A estimativa de  $D_F$  para muitos fenômenos naturais pode ser considerada instável com respeito à escala, localização e/ou orientação dos pontos amostrais (ABEDINI & SHAGHAGHIAN, 2009). Em estudo conduzido em solo desprovido de vegetação, HERBST et al. (2009) observaram distâncias de autocorrelação da respiração do solo próximas a 2,7 m, indicando a presença de estrutura de variabilidade relativamente heterogênea nessa escala, e que o adensamento da malha amostral proporciona melhorias na caracterização da variabilidade espacial da respiração do solo. Assim, valores de  $D_F$  significativos ao longo das diferentes direções podem ser atribuídos ao maior número de pontos amostrais e às menores distâncias de separação entre pontos, quando comparado ao estudo de LA SCALA Jr. et al. (2009).

Tabela 4.4. Valores de dimensão fractal ( $D_F$ ) da emissão de CO<sub>2</sub> do solo, derivados dos semivariogramas experimentais, para as diferentes direções para as escalas (h/a) de 0,5/5 m, em todas as avaliações.

| Direção (°) | Avaliações |      |      |             |      |             |      |      |
|-------------|------------|------|------|-------------|------|-------------|------|------|
|             | 299T       | 301M | 301T | 302M        | 302T | 308M        | 313T | 322M |
| 0           | 2,70       | 2,85 | 2,75 | 2,60        | 2,76 | 2,74        | 2,76 | 2,69 |
| 45          | 2,66       | 2,87 | 2,78 | 2,81        | 2,75 | 2,75        | 2,50 | 2,72 |
| 90          | 2,77       | 2,95 | 2,82 | 2,81        | 2,77 | <u>2,96</u> | 2,75 | 2,80 |
| 135         | 2,87       | 2,91 | 2,91 | <u>3,00</u> | 2,89 | 2,83        | 2,89 | 2,78 |

Valores sublinhados apresentam  $D_F > 3$ .

O gráfico da dimensão fractal de FCO<sub>2</sub> ( $\pm$  erro-padrão) derivada para diferentes escalas (Figura 4.4a) permite a interpretação daquela escala na qual o sistema pode ser considerado homogêneo (PALMER, 1988). Para FCO<sub>2</sub>,  $D_F$  variou de 2,5 na direção

0°, na pequena escala (0,5/5 m), até 3,1 na direção de 135°, na grande escala (5/50 m). Apesar da tendência geral de aumento de  $D_F$  com o aumento da escala,  $D_F$  apresentou um comportamento distinto para as diferentes direções. Em escalas inferiores a 10 metros, todas as direções apresentaram valores de  $D_F$  significativos ( $D_F < 3$ ); entretanto, com a aproximação de um alcance de 10 m, os valores de  $D_F$  aproximaram-se de 3,0. O mesmo não ocorreu para a direção de 0°, pois nessa direção a taxa de aumento de  $D_F$  com o aumento da escala não é tão acentuada como nas outras direções, atingindo-se o valor de 3,0 somente próximo ao alcance de 20 metros. Os resultados evidenciam anisotropia, de modo que a estrutura espacial da emissão de CO<sub>2</sub> do solo não pode ser avaliada com apenas um único valor de dimensão fractal. VIDAL-VÁZQUEZ et al. (2005), estudando a utilização de modelos fractais para a caracterização da anisotropia e heterogeneidade da superfície microtopológica, afirmam que a anisotropia é oriunda de alguma tendência no processo de produção ou modificação da propriedade do solo, como direção do preparo, tipo de implemento utilizado e sentido da declividade.

A Figura 4.4b e c apresentam os valores de  $D_F$  para as diferentes direções em função da escala de trabalho, calculadas para as propriedades PLA e Argila, similar ao realizado para FCO<sub>2</sub>. Quando esta característica é levada em consideração, observa-se que algumas propriedades apresentam comportamento semelhante a FCO<sub>2</sub>, como no caso da PLA (Figura 4.4b), onde se pode identificar uma taxa de aumento de  $D_F$  com a distância inferior para a direção de 0°, em comparação às outras direções. Por outro lado, algumas propriedades, como a Argila (Figura 4.4c), apresentam comportamento diferente daquele observado para FCO<sub>2</sub> e PLA, havendo justamente na direção de 0° uma  $D_F$  não significativamente inferior a 3,0 para distâncias próximas de 20 m. Deve-se salientar que, nessas condições, a análise da dimensão fractal não se aplica. SOUZA et al. (2003), em estudo da influência do relevo na variação anisotrópica de atributos químicos (pH, P, K, Ca, Mg, H+Al, SB, CTC, V% e MO) e granulométricos (areia, silte e argila) de um Latosso relataram a presença de anisotropia para todas as propriedades estudadas, condicionada principalmente pela forma da paisagem e pelas práticas de manejo adotadas. USOWICZ & LIPIEC (2009), estudando a dimensão fractal da

resistência do solo à penetração, em áreas compactadas devido ao tráfego de tratores, concluíram que a dimensão fractal foi um indicativo para o aumento da resistência do solo à penetração, devido ao tráfego de implementos e de veículos sobre a área.

Assim, a anisotropia da estrutura de variabilidade espacial de FCO<sub>2</sub>, especialmente para a direção de 0°, é muito provavelmente devida à anisotropia observada para as propriedades físicas do solo, em especial PLA (Figura 4.4b). Assim, os resultados estão de acordo com MARTIN & BOLSTAD (2009), ou seja, variações espaciais da respiração do solo em pequenas escalas podem ser a soma de não somente os efeitos da temperatura e da umidade do solo, mas também das propriedades físicas, biológicas e químicas de cada ponto amostral.

Para o melhor entendimento das relações espaciais entre FCO<sub>2</sub> e as demais propriedades do solo, foi realizada a análise de regressão linear múltipla, inicialmente para todos os pontos do gradeado (modelo geral) e posteriormente para as diferentes direções (Tabela 4.5). Para o modelo geral, a primeira propriedade selecionada foi a PLA, que, sozinha, explicou 48% da variabilidade de FCO<sub>2</sub>. Uma vez que PLA estava no modelo, a próxima variável selecionada foi a areia, aumentando a porcentagem de variação de FCO<sub>2</sub> explicada pelo modelo para 52%. Finalmente, o EstC foi selecionado, e a porcentagem de variação explicada chegou a 54%. Os parâmetros estimados para as variáveis PLA e EstC foram positivos, e o parâmetro estimado para areia foi negativo. O parâmetro positivo estimado para PLA pode estar relacionado ao efeito negativo da umidade do solo na difusão gasosa (DAVIDSON et al., 2000; SCHWENDENMANN et al., 2003; KOSUGI et al., 2007). Já a relação positiva observada com EstC pode ser explicada pelo fato de o carbono ser o elemento básico utilizado pelo microrganismo durante o processo de decomposição (SINGH & GUPTA, 1977; BRITO et al., 2009).



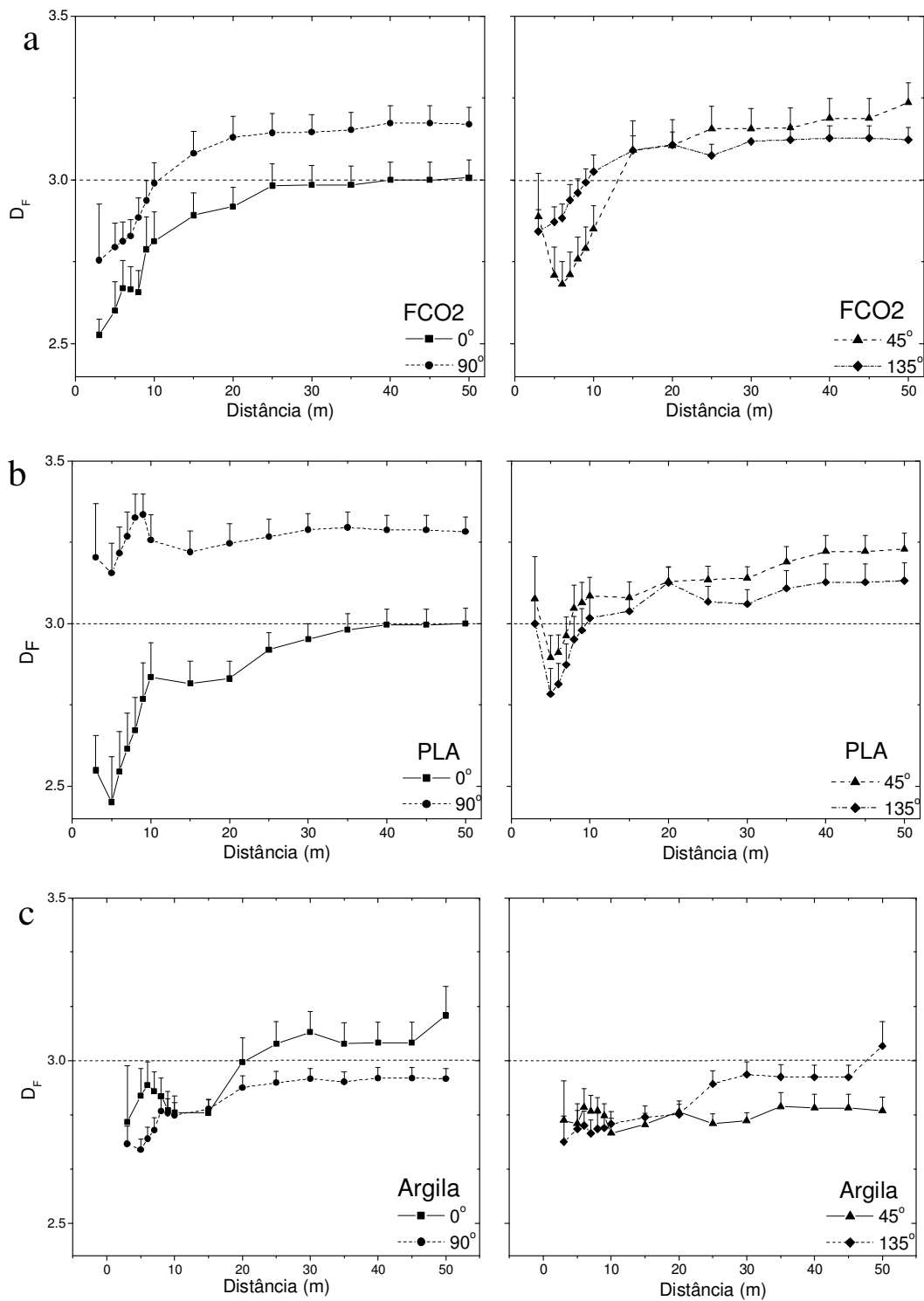


Figura 4.4. Fractogramas: valores de dimensão fractal ( $D_F$ ) versus a escala para as diferentes direções, para: a) emissão de CO<sub>2</sub> do solo; b) porosidade livre de água, e c) teor de argila do solo.

Para a direção de 0°, a PLA foi a única variável selecionada para o modelo, que, sozinha, foi capaz de explicar 34% da variabilidade de FCO<sub>2</sub> e apresentou parâmetro estimado positivo (Tabela 4.5). Para a direção de 45°, as variáveis selecionadas foram PLA e Areia; para essa direção, 74% da variabilidade de FCO<sub>2</sub> foram explicados pelo modelo contendo apenas essas duas variáveis. Para a direção de 90°, as variáveis PLA e EstC foram primeiramente selecionadas e explicaram 53% da variabilidade de FCO<sub>2</sub>. Após a entrada dessas variáveis, foram selecionados o pH, a CTC e Ts, o que elevou a porcentagem de variação explicada para 77%. Para a direção de 135°, as variáveis selecionadas foram a PLA e Ts. Para as direções de 90° e 135°, os parâmetros estimados para a temperatura do solo foram negativos, sendo essa propriedade um dos principais fatores relacionados à atividade microbiana do solo e geralmente apresenta correlação positiva com FCO<sub>2</sub> (SCOTT-DENTON et al., 2003; RYU et al., 2009). As propriedades CTC e pH apresentaram parâmetros estimados positivos para a direção de 90°. Estudos têm demonstrado uma complexa relação entre FCO<sub>2</sub> e as propriedades químicas do solo, como o pH, teor de carbono do solo e a disponibilidade de nutrientes (SAVIN et al., 2001; EKBLAD & NORDGREN, 2002).

Os modelos obtidos pela análise de regressão linear múltipla não foram os mesmos para as diferentes direções, Esses resultados indicam uma complexa relação entre a emissão de CO<sub>2</sub> do solo e a variação espacial das propriedades químicas e físicas do solo (RYU et al., 2009). Apesar de diferentes variáveis selecionadas para os modelos, a variável PLA esteve presente em todos e foi aquela que explicou a maior quantidade de variação de FCO<sub>2</sub>. Assim, em áreas de cana crua, a porosidade livre de água é um dos principais fatores associados às variações espaciais da respiração do solo. Os resultados corroboram a hipótese anteriormente mencionada de que FCO<sub>2</sub> e PLA apresentam estruturas de variabilidade bastante semelhantes, expressas pelos valores de dimensão fractal calculados para as diferentes direções e, principalmente, para as diferentes escalas (Figura 4.4).

Tabela 4.5. Modelos de regressão linear múltipla da emissão de CO<sub>2</sub> (μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) para todo o gradeado (modelo geral; n=89) e para as diferentes direções (n=20).

| Variável     | Parâmetro | EP      | p       | R <sup>2</sup> |
|--------------|-----------|---------|---------|----------------|
| Modelo geral |           |         |         |                |
| Intercepto   | 6,68833   | 2,54548 | 0,0104  |                |
| PLA          | 0,10141   | 0,01103 | <0,0001 | 0,49           |
| Areia        | -0,05073  | 0,01793 | 0,0059  | 0,52           |
| EstC         | 0,00152   | 0,00088 | 0,0881  | 0,54           |
| Direções     |           |         |         |                |
| 0°           |           |         |         |                |
| Intercepto   | 1,24495   | 0,18013 | <0,0001 |                |
| PLA          | 0,05042   | 0,01603 | 0,0053  | 0,34           |
| 45°          |           |         |         |                |
| Intercepto   | 12,09932  | 3,99780 | 0,0076  |                |
| PLA          | 0,15099   | 0,02759 | <0,0001 | 0,58           |
| Areia        | -0,08596  | 0,02737 | 0,0060  | 0,74           |
| 90°          |           |         |         |                |
| Intercepto   | -1,89127  | 3,99971 | 0,6436  |                |
| PLA          | 0,06461   | 0,02693 | 0,0309  | 0,34           |
| EstC         | 0,00472   | 0,00135 | 0,0036  | 0,53           |
| pH           | 1,02807   | 0,38060 | 0,0172  | 0,63           |
| CTC          | 0,01413   | 0,00602 | 0,0341  | 0,71           |
| Ts           | -0,26134  | 0,13368 | 0,0708  | 0,77           |
| 135°         |           |         |         |                |
| Intercepto   | 13,91188  | 6,70965 | 0,0536  |                |
| PLA          | 0,08317   | 0,03206 | 0,0189  | 0,47           |
| Ts           | -0,49707  | 0,24660 | 0,0599  | 0,57           |

EP = Erro-padrão da estimativa dos parâmetros; R<sup>2</sup> = Coeficiente de determinação.

#### 4.4 - Conclusões

Em áreas de cana-de-açúcar crua, as variações da emissão de CO<sub>2</sub> do solo são explicadas principalmente pelas variações da umidade do solo, expressa pela porosidade livre de água do solo. Os valores de dimensão fractal de propriedades do solo, calculados para as diferentes direções, evidenciam anisotropia em FCO<sub>2</sub> e outras propriedades do solo em área de cana crua. A emissão de CO<sub>2</sub> do solo apresenta dependência espacial na pequena escala (0,5 m), em todas as direções, mas em média escala (até 2 m), especialmente na direção de 0°. Práticas de manejo como colheita e/ou plantio são responsáveis pela anisotropia observada, principalmente nas propriedades físicas do solo, em consequência na emissão de CO<sub>2</sub>.

## **CAPÍTULO 5 - IMPLICAÇÕES**

O processo de conversão de áreas produtoras de cana-de-açúcar, do sistema de colheita baseado na cana queimada para o sistema de cana crua, afeta não somente a magnitude da emissão de  $\text{CO}_2$  do solo, mas também, seus padrões de variabilidade espaçotemporais. A proteção do solo, devido à deposição dos resíduos vegetais da cultura sobre a superfície deste, ocorrida no sistema de cana crua, altera as relações existentes entre a emissão de  $\text{CO}_2$  com várias propriedades, especialmente, com a umidade do solo. O controle da umidade do solo, no processo de emissão de  $\text{CO}_2$ , ocorre devido às variações na porosidade livre de água do solo, atuando no suprimento de oxigênio para a atividade microbiana e no processo de transporte do  $\text{CO}_2$  para a atmosfera.

Especificamente para as áreas estudadas nesse trabalho, após sete anos de conversão entre sistemas, não houve um aumento significativo dos teores de matéria orgânica, nas camadas mais superficiais do solo, no sistema de cana crua, ocorrendo, inclusive, o inverso. Quando levamos em consideração não somente os teores de matéria orgânica do solo, mas também sua qualidade, por meio do grau de humificação, observamos diferenças significativas entre os sistemas de manejo, sendo maiores valores de grau de humificação observados na área de cana crua. Entretanto, outros fatores, além do processo de conversão, podem ter sido responsáveis por essas diferenças. Nesse sentido, são necessárias novas pesquisas para melhor entendimento da relação entre as variações do grau de humificação da matéria orgânica do solo e a perda de carbono do solo via emissão de  $\text{CO}_2$ , nessas áreas.

Os menores valores de emissão de  $\text{CO}_2$ , bem como a menor sensibilidade do processo de emissão às variações da umidade do solo, observados na área de cana crua, evidenciam a grande potencialidade desse sistema para as diminuições do fluxo de  $\text{CO}_2$  para a atmosfera, uma vez que grandes áreas deverão ser convertidas para o sistema de cana crua nos próximos anos com gradual extinção da queima dos canaviais.

A estrutura de variabilidade espacial da emissão de CO<sub>2</sub> do solo apresentou maior homogeneidade na área de cana crua. Entretanto, mesmo quando consideramos esse sistema, a condição de anisotropia foi verificada, ou seja, algumas direções do gradeado possuem estrutura de variabilidade espacial bem definida ao longo de direções específicas, o que pode estar relacionado ao manejo adotado nessas mesmas direções. A análise multivariada dos dados indicou, inclusive, que as relações entre as propriedades físicas e químicas do solo, consequentemente, as suas relações com o fluxo de CO<sub>2</sub> do solo, não foram similares para as direções, dificultando, portanto, a construção de um modelo geral para a previsão dessa componente. Assim, a ação antrópica, ou mesmo a atuação da respiração das raízes da cultura, podem influenciar na anisotropia dessas relações na área de cana crua. Em adição, a emissão de CO<sub>2</sub> do solo possui alta complexidade em pequena, média e larga escala, expressa pela dimensão fractal.

Esses fatores contribuem para a grande incerteza de como o manejo da cultura da cana-de-açúcar afeta perda de carbono para a atmosfera via emissão de CO<sub>2</sub>. Assim, visando à melhoria nas estimativas da emissão de CO<sub>2</sub> do solo deve-se levar em consideração, não somente o manejo da cultura, mas também, as condições de anisotropia direcional, principalmente em processos de interpolação, como a krigagem ordinária.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABEDINI, M. J.; SHAGHAGHIAN, M. R. Exploring scaling laws in surface topography. **Chaos, Solitons and Fractals**, Oxford, v. 42, n. 4, p.2373-2383, 2009.
- ARE, K.S.; OLUWATOSIN, G.A.; ADEYOLANU, O.D.; OKE, A.O. Slash and burn effect on soil quality of an Alfisol: Soil physical properties. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 103, n. 1, p.4-10, 2009.
- BALL, B. C.; SCOTT, A.; PARKER, J.P. Field N<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> fluxes in relation to tillage, compaction and soil quality in Scotland. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 53, n. 1, p.29-39, 1999.

- BAUER, P. J.; FREDERICK, J. R.; NOVAK, J. M.; HUNT P. G. Soil CO<sub>2</sub> flux from a norfolk loamy sand after 25 years of conventional and conservation tillage. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 90, n. 1-2, p.205-211, 2006.
- 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, v. 54, n. 1-2, p.101-109, 2000.
- BERNOUX, M; CARVALHO, M.C.S; VOLKOFF, B.; CERRI, C.C. Brazil's soil carbon stocks. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 66, n. 3, p.888-896, 2002.
- BLAIR, N. Impact of cultivation and sugar-cane green trash management on carbon fractions and aggregate stability for a Chromic Luvisol in Queensland, Australia. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 55, n. 3-4, p. 183-191, 2000.
- BRITO, L.F.; MARQUES Jr., J.; PEREIRA, J.T.; SOUZA, Z. M.; LA SCALA Jr., N. Soil CO<sub>2</sub> emission of sugarcane field as affected by topography. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.66, n. 1, p.77-83, 2009.
- BORKEN, W.; XU, J.; DAVIDSON, E. A.; BEESE, F. Site and temporal variation of soil respiration in European beech, Norway spruce, and Scots pine forests. **Global Changes Biology**, Oxford, v.8, n. 12, p.1205-1216, 2002.
- BURROUGH, P. A. Fractal dimensions of landscapes and other environmental data. **Nature**, Londres, v. 294, n. 5838, p.240-242, 1981.
- BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R. A. **Principles of geographical information system**. Oxford: University Press, 333 p. 1998.
- BUSATO, J G.; CANELLAS, L. P.; VELLOSO, A. C. X. Fósforo num Cambissolo cultivado com cana-de-açúcar por longo tempo. I - fracionamento seqüencial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.29, p.935-944, 2005.
- CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK J. M.; PARKIN T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994.

CAMPOS, D.C. Potencialidade do sistema de colheita sem queima de cana-de-açúcar para o seqüestro de carbono. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiros, 2003. 103p. (Tese de Doutorado).

CANELLAS, L. P.; VELLOSO, A. C. X.; MARCIANO, C. R.; RAMALHO, J. F. G. P.; RUMJANEK, V. M.; REZENDE, C. E.; SANTOS, G. A. Propriedades químicas de um cambissolo cultivado com cana-de-açúcar, com preservação do palhço e adição de vinhaça por longo tempo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 27, n. 5, p. 935-944, 2003.

CEDDIA, M. B.; ANJOS, L. H. C.; LIMA, E. RAVELLI NETO, A.; SILVA, L. A. Sistemas de colheita da cana-de-açúcar e alterações nas propriedades físicas de um solo Podzólico amarelo no estado do Espírito Santo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n.8, p.1467-1473, 1999.

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, v. 66, n. 6, p. 831-843, 2009.

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.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar – safra 2008 segundo levantamento, agosto/2008.** Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conabweb/download/safra/cana.pdf>>. Acesso em: 23 nov. 2008.

CONAB. **Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar, primeiro levantamento, abril/2009.** Disponível em: <[http://www.conab.gov.br/conabweb/download/safra/1cana\\_de\\_acucar.pdf](http://www.conab.gov.br/conabweb/download/safra/1cana_de_acucar.pdf)>, Acesso em 11 jun. 2009.

CONCILIO, A.; CHEN, J.; MA, S.; NORTH, M. Precipitation drives interannual variation in summer soil respiration in a Mediterranean-climate, mixed-conifer forest. **Climatic Change**, Dordrecht, v. 92, n. 1-2, p. 109-122, 2009.

- COSTA, F. S.; BAYER, C.; ZANATTA, J. A.; MIELNICZUK, J. Estoque de carbono orgânico no solo e emissões de dióxido de carbono influenciadas por sistemas de manejo no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 1, p.323-332, 2008.
- DASSELAAR, A. V. P. V.; CORRÉ, W. J.; PRIEMÉ, A.; KLEMEDTSSON, Å. K.; WESLIEN, P.; STEIN, A.; KLEMEDTSSON, L.; OENEMA, O. Spatial variability of methane, nitrous oxide and carbon dioxide emissions from drained grassland. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v. 62, n. 33, p. 810-817, 1998.
- DAVIDSON, E. A.; VERCHOT, L. V.; CATTÂNIO, J. H.; ACKERMAN, I. L.; CARVALHO, J. E. M. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 48, n. 1, p. 53-69, 2000.
- DER, G.; EVERITT, B. S. **A handbook of statistical analyses using SAS**. Boca Raton: CRC Press, 2001. 360 p.
- DIECKOW, J.; BAYER, C.; CONCEIÇÃO, P. C.; ZANATTA, J.A.; MARTIN-NETO, L.; MILORI, D.B.M.; SALTON, J.C.; MACEDO, M. M.; MIELNICZUK, J.; HERNANI, L.C. Land use, tillage, texture and organic matter stock and composition in tropical and subtropical Brazilian soils. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 60, n. 2, p.240-249, 2009.
- DOMINY, C. S.; HAYNES, R. J.; van ANTWERPN, R. Loss of soil organic matter and related soil properties under long-term sugarcane production on two contrasting soil. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 36, n. 5, p.350-356, 2002.
- DUAH-YENTUMI, S.; RONN, R.; CHRISTENSEN, S. Nutrients limiting microbial growth in a tropical forest soil of Ghana under different management. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 8, n. 1-3, p.19-24, 1998.
- EGHBALL, B.; HERGERT, G. W.; LESOING, G. W.; FERGUSON, R. B. Fractal analysis of spatial and temporal variability. **Geoderma**, Amsterdam, v. 88, n. 3-4, p349-362, 1999.
- EKBLAD, A.;NORDGREN, A. Is growth of soil microorganisms in boreal forests limited by carbon or nitrogen availability? **Plant Soil**, Dordrecht, v. 242, n. 1, p.115–122, 2002.



ELTZ, F. L. F.; NORTON, L. D. Surface roughness changes as affected by rainfall erosivity tillage and canopy cover. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, n. 6, p.1746–1755, 1997.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Brasília: Ministério da Agricultura e do Abastecimento / EMBRAPA-CNPq, 1997. 212 p.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, 2006. 412p.

EPRON, D.; BOSC, A.; BONAL, D.; FREYCON, V. Spatial variation of soil respiration across a topographic gradient in a tropical rain forest in French Guiana. **Journal of Tropical Ecology**, Nova York, v. 22, n. 5, p.565-574, 2006.

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**, Amsterdam, v. 202, n. 1-3, p. 149-160, 2004.

FANG, C.; MONCRIEF, J. B. A model for soil CO<sub>2</sub> production and transport 1: Model development. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 95, n. 4, p. 225-236, 1999.

FANG, C.; MONCRIEFF, J. B.; GHOLZ, H. L.; CLARK, K. L. Soil CO<sub>2</sub> efflux and its spatial variation in a Florida slash pine plantation. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 205, n. 2, p. 135-146, 1998.

FEDER, J. **Fractals**. Plenum Press, New York, 1988. 282p.

FERREIRA E. C.; ANZANO J. M.; MILORI D. M. B. P.; FERREIRA E. J.; LASHERAS R. J.; BONILLA B.; MONTULL-IBOR, B.; CASAS J.; MARTIN-NETO, L. Multiple response optimization of laser-induced breakdown spectroscopy parameters for multi-element analysis of soil samples. **Society for Applied Spectroscopy**, Frederick, v.63, n. 9, p.1081-1088, 2009.

- FOLLETT, R. F. Soil management concepts and carbon sequestration zin cropland soils. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 61, n. 1-2, p. 77-92, 2001.
- FONTAINE, S.; BAROT, S.; BARRE, P.; BDIOUI, N.; MARY, B.; RUMPEL, C. Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply. **Nature**, Londres, v. 450, n. 7167, p.277-280, 2007.
- GALDOS, M. V.; CERRI, C. C.; CERRI C. E. P. Soil carbon stocks under burned and unburned sugarcane in Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v.153, n.3-4, p.347–352, 2009.
- GAMMA DESIGN SOFTWARE. **GS+: geostatistics for the environmental sciences**. Version 3.07. Michigan, Gamma Design Software, 1998.
- GONÇALVES, A. C. A.; FOLEGATTI, M. V.; MATA, J. D. V. Análises exploratória e geoestatística da variabilidade de propriedades físicas de um Argissolo Vermelho. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 23, n. 5, p.1149-1157, 2001.
- GRAHAM, M. H.; HAYNES, R. J.; MEYER, J. H. Soil organic matter content and quality: Effects of fertilizer applications, burning and trash retention on a long-term sugarcane experiment in South Africa. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 34, n.1, p.93-102, 2002.
- HARRISON, K.G.; BROECKER, W.S.; BONANI, G. The effect of changing land use on soil radiocarbon. **Science**, Washington, v. 262, n.5234, p. 725-726, 1993.
- HASHIMOTO, S.; TANAKA, N.; SUZUKI, M.; INOUE, A.; TAKIZAWA, H.; KOSAKA, I.; TANAKA, K.; TANTASIRIN, C.; TANGTHAM, N. Soil respiration and soil CO<sub>2</sub> concentration in a tropical forest, Thailand. **Journal of Forest Research**, Tokyo, v. 9, n. 1, p.75–79, 2004.
- HERBST, M.; PROLINGHEUER, N.; GRAF, A.; HUISMAN, J.A.; WEIHRMÜLLER, L.; VANDEBORGHT, J. Characterization and understanding of bare soil respiration spatial variability at plot scale. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 8, n. 3, p.762-771, 2009.
- HOUGHTON, J. T.; CALLANDER, B. A.; VARNEY, S. K. **Climate change 1992: the supplementary report to the IPCC Scientific Assessment**. Nova York: Cambridge University Press,1992. 230 p.

HUANG, C.; BRADFORD, J.M. Applications of a laser scanner to quantify soil microtopography. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.56, p.14-21, 1992.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2007: **The physical science basis. Summary for policymakers**, Geneva, Suíça. Disponível em: <[http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/publications\\_ipcc\\_fourth\\_assessment\\_report\\_wg1\\_report\\_the\\_physical\\_science\\_basis.htm](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_wg1_report_the_physical_science_basis.htm)>. Acesso em 29 set. 2007.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **Applied geostatistics**. Nova York: Oxford University Press, 1989. 561 p.

ISHIZUKA, S.; ISWANDI, A.; NAKAJIMA, Y.; YONEMURA, S.; SUDO, S.; TSURUTA, H.; MURIYARSO, D. Spatial patterns of greenhouse gas emission in a tropical rainforest in Indonesia. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 71, n. 1, p. 55-62, 2005.

JASSAL, R. S.; BLACK, T. A.; DREWITT, G. B.; NOVAK, M. D.; GAUMONT-GUAY, D.; NESIC, Z. A model of the production and transport of CO<sub>2</sub> in soil: predicting soil CO<sub>2</sub> concentrations and CO<sub>2</sub> efflux from a forest floor. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 124, n. 3-4, p. 219-236, 2004.

KAISER, H. F. The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. **Psychometrika**, Urbana, v.23, n.3, p.187-200, 1958.

KEMMITT, S. J.; LANYON, C. V.; WAITE, I. S.; WEN, Q.; ADDISCOTT, T. M.; BIRD, N. R. A.; O'DONNELL, A. G.; BROOKES, P. C. Mineralization of native soil organic matter is not regulated by the size, activity or composition of the soil microbial biomass – a new perspective. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 40, n. 1, p.61–73, 2008.

KONDA, R.; OHTA, S.; ISHIZUKA, S.; ARIA, S.; ANSORI, S.; TANAKA, N.; HARDJONO, A. Spatial structures of N<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, and CH<sub>4</sub> fluxes from Acacia mangium plantation soils during a relatively dry season in Indonesia. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 40, n. 12, p. 3021-3030, 2008.

KOSUGI, Y.; MITANI, T.; LTOH, M.; NOGUCHI, S.; TANI, M.; MATSUO, N.; TAKANASHI, S.; OHKUBO, S.; NIK, A. R. Spatial and temporal variation in soil

respiration in a Southeast Asian tropical rainforest. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 147, n. 1-2, p. 35-47, 2007.

LA SCALA Jr., N.; PANOSSO, A. R.; PEREIRA, G. T.; GONZALEZ, A. P.; MIRANDA, J. G. V. Fractal dimension and anisotropy of soil CO<sub>2</sub> emission in an agricultural field during fallow. **International Agrophysics**, Lublin, v. 23, n. 4, p.353-358, 2009.

LA SCALA JÚNIOR, N.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; CORÁ, J. E. Short-term temporal changes in the spatial variability model of CO<sub>2</sub> emissions from a Brazilian bare soil. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 32, n. 10, p. 1459-1462, 2000.

LAL, R. Challenges and opportunities in soil organic matter research. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 60, n. 2, p.158-169, 2009.

LAL, R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. **Geoderma**, Amsterdam, v. 123, n. 1-2, p.1-22, 2004.

LAL, R. World cropland soils as a source or sink for atmospheric carbon. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 71, p. 145-191, 2001.

LUCA, E. F.; FELLER, C.; CERRI, C. C.; BARTHÈS, B.; CHAPLOT, V.; CAMPOS, D. C.; MANECHINI, C. Avaliação de atributos físicos e estoques de carbono e nitrogênio em solos com queima e sem queima de canavial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 2, p.789-800, 2008.

MANDELBROT, B. **The fractal geometry of nature**. New York: Freeman, 1983. 468p.

MARTIN, J. G.; BOLSTAD, P. V. Variation of soil respiration at three spatial scales: Components within measurements, intra-site variation and patterns on the landscape. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 41, n.3, p.530-543, 2009.

McCOOL, D. K.; PANNKUK, C. D.; KENNEDY, A. C.; FLETCHER, P. S. Effects of burn/low-till on erosion and soil quality. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 101, n. 1-2, p. 2-9, 2008.

MENDONZA, H. N. S.; LIMA, E.; ANJO, L. H. C.; SILVA, L. A.; CEDDIA, M. B.; ANTUNES, M. V. M. Propriedades químicas e biológicas de solo de tabuleiro cultivado com cana-de-açúcar com e sem queima da palhada. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, Viçosa, MG, v. 24, n.1, p.201-207, 2000.

- MILORI, D. M. B. P.; GALETI, H. V. A.; MARTIN-NETO, L.; DIECKOW, J.; GONZÁLEZ-PÉREZ, M.; BAYER, C.; SALTON J., Organic matter study of whole soil samples using laser-induced fluorescence spectroscopy. **Soil Science Society of America journal**, Madison, v. 70, n.1, p.57-63, 2006.
- NOBLE, A. D.; MOODY, P.; BERTHELSEN, S. Influence of changed management of sugarcane on some chemical properties in the humid wet tropics of north Queensland. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 41, n. 6, p.1133-1144, 2003.
- OHASHI, M.; GYOKUSEN, K. Temporal change in spatial variability of soil respiration on a slope of Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) forest. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 39, n. 5, p. 1130-1138, 2007.
- PALMER, M. W. Fractal geometry: a tool for describing spatial patterns of plant communities. **Vegetatio**, Dordrecht, v. 75, n. 1-2, p.91-102, 1988.
- PANOSSO, A. R.; MARQUES Jr., J.; MILORI, D. M. B. P.; FERRAUDO, A. S.; BARBIERI, D. M.; PEREIRA, G. T.; LA SCALA Jr., N. Soil CO<sub>2</sub> emission and its relation to soil properties in sugarcane areas under Slash-and-burn and Green harvest. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, (article in press), 2010.
- PANOSSO, A. R.; MARQUES Jr., J.; PEREIRA, G. T.; LA SCALA Jr., N. Spatial and temporal variability of soil CO<sub>2</sub> emission in a sugarcane área under green and slash-and-burn managements. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 105, n. 2, p.275-282, 2009.
- PANOSSO, A. R.; PEREIRA, G. T.; MARQUES Jr., J.; LA SCALA Jr., N. Variabilidade espacial da emissão de CO<sub>2</sub> em latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar em diferentes sistemas de manejo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 2, 227-236, 2008.
- PERFECT, E.; KAY, B. D. Applications of fractals in soil and tillage research: a review. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 36, n.1-2, p.1-20, 1995.
- RAIJ, B. van. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas, Instituto Agronômico, 2001. 285p.
- RAICH, J. W.; SCHLESINGER, W. H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. **Tellus Series B-chemical and physical meteorology**, Copenhagen, v. 44, n. 2, p.81-91, 1992.

- RAYMENT, M. B.; JARVIS, P. G. Temporal and spatial variation of soil CO<sub>2</sub> efflux in a Canadian boreal forest. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 32, n. 1, p. 35-45, 2000.
- RAZAFIMBELO, T.; BARTHÈS, B.; LARRÉ-LARROUY, M. C.; DE LUCA, E. F.; LAURENT, J. Y.; CERRI, C. C.; FELLER, C.; Effect of sugarcane residue management (mulching versus burning) on organic matter in a clayey Oxisol from southern Brazil. **Agriculture Ecosystem & Environment**, Amsterdam, v. 115, n. 1-4, p.285-289, 2006.
- RESENDE, A. S.; XAVIER, R. P.; OLIVEIRA, O. C.; URQUIAGA, S.; ALVES, B. J. R.; BODDEY, R. M. Long-term effects of pre-harvest burning and nitrogen and vinasse application in Pernambuco, N.E. Brazil. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 281, n. 1-2, p.339-351, 2006.
- ROCHETTE, P.; DESJARDINS, R. L.; PATTEY, E. Spatial and temporal variability of soil respiration in agricultural fields. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 71, n. 2, p. 189-196, 1991.
- RODRIGO, A.; RECOUS, S.; NEEL, C.; MARY, B. Modelling temperature and moisture effects on C-N transformations in soils: comparison of nine models. **Ecological Modeling**, Amsterdam, v. 102, n.2-3, p.325-339, 1997.
- RUDORFF, B. F. T.; AGUIAR, D. A.; SILVA, W. F.; SUGAWARA, L. M.; ADAMI M.; MOREIRA M. A. Studies on the Rapid Expansion of Sugarcane for Ethanol Production in São Paulo State (Brazil) Using Landsat Data. **Remote Sensing**, Ottawa, v. 2, n. 4, p.1057-1076, 2010.
- RYU, S.; CONCILIO, A.; CHEN, J.; NORTH, M.; MA, S. Prescribed burning and mechanical thinning effects on belowground conditions and soil respiration in a mixed-conifer forest, California. **Forest Ecology and Management**, Kidlington, v. 257, n. 4, p.1324-1332, 2009.
- SARTORI, F.; LAL, R.; EBINGER, M. H.; PARRISH, D. J. Potential soil carbon sequestration and CO<sub>2</sub> offset by dedicated energy crops in the U.S.A. **Critical Reviews in Plant Sciences**, Philadelphia, v. 25, n.5, p. 441-472, 2006.

SAVIN, M .C.; GORRES, J. H.; NEHER, D. A.; AMADOR, J. A. Biogeophysical factors influencing soil respiration and mineral nitrogen content in an old field soil. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 33, n. 4-5, p.429–438, 2001.

SCHWENDENMANN, L.; VELDKAMP, E.; BRENES, T.; O'BRIEN, J. J.; MACKENSEN, J. Spatial and temporal variation in soil CO<sub>2</sub> efflux in an old-growth neotropical rain forest, La Selva, Costa Rica. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 64, n. 1, p. 111-128, 2003.

SCOTT-DENTON, L.E.; SPARKS, K.L.; MONSON, R.K. Spatial and temporal controls of soil respiration rate in a high-elevation, subalpine forest. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 35, n. 4, p.525–534, 2003.

SHIBISTOVA, O.; LLOYD, J.; EVGRAFOVA, S.; SAVUSHKINA, N.; ZRAZHEVSKAYA, G.; ARNETH, A.; KNOHL, A.; KOLLE, O.; SCHULZE, E. D. Seasonal and spatial variability in soil CO<sub>2</sub> efflux rates for a central Siberian *Pinus sylvestris* forest. **Tellus. Series B, Chemical and physical meteorology**, Copenhagen, v. 54, n. 5, p.552– 567, 2002.

SINGH, J. S.; GUPTA, S. R. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems. **Botanical Review**, Bronx, v. 43, n. 4, p.499-528, 1977.

SOTTA, E. D.; MEIR, P.; MALHI, Y.; NOBRE, A. D.; HODNETT, M.; GRACE, J. Soil CO<sub>2</sub> efflux in a tropical forest in the central Amazon. **Global Change Biology**, Oxford, v. 10, n. 5, p.601–617, 2004.

SOUZA, C. K.; MARQUES Jr., J.; MARTINS FILHO, M. V.; PEREIRA, G. T. Influência do relevo na variação anisotrópica dos atributos químicos e granulométricos de um latossolo em Jaboticabal – SP. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 23, n. 3, p.486-495, 2003.

SOUZA, Z. M.; PRADO, R. M.; PAIXÃO, A. C. S.; CESARIN, L. G. Sistemas de colheita e manejo da palhada de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.40, n.3, p.271-278, 2005.

STOTZKY, G.; REM, L.T. Influence of clay minerals on microorganisms. 3. Effect of particle size, cation exchange capacity and surface area on bacteria. **Canadian Journal of Microbiology**, Ottawa, v. 12, n. 6, p.1235-1246, 1966.

- STOYAN, H.; DE-POLLI, H.; BÖHM, S.; ROBERTSON, G. P.; PAUL, E. A. Spatial heterogeneity of soil respiration and related properties at the plant scale. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 222, n. 1-2, p. 203-214, 2000.
- TEDESCHI, V.; REY, A.; MANCA, G.; VALENTINI, R.; JARVIS, P.L.; BORGHETTI, M. Soil respiration in a Mediterranean oak forest at different developmental stages after coppicing. **Global Change Biology**, Oxford, v. 12, n. 1, p.110-121, 2006.
- TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; UEHARA G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 38, n. 1, p. 45-94, 1985.
- TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; UEHARA G. Spatial dependence and interpolation of soil properties in West Sumatra, Indonesia .1. anisotropic variation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 50, n. 6, p.1391-1395, 1986.
- UNICA (União da Indústria de Cana-de-açúcar). **Dados e Cotações—Estatísticas**. Disponível em < <http://www.unica.com.br/dadosCotacao/estatistica>>. Acesso em: 18 out. 2010.
- USOWICZ, B.; LIPIEC, J. Spatial distribution of soil penetration resistance as affected by soil compaction: The fractal approach. **Ecological Complexity**, Amsterdam, v. 6, n. 3, p.263-271, 2009.
- USSIRI, A. N.; LAL, R., 2009. Long-term tillage effects on soil carbon storage and carbon dioxide emissions in continuous corn cropping system from an alfisol in Ohio. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 104, n. 1, p. 39-47, 2009.
- VAUCLIN, M.; VIEIRA, S.R.; VAUCHAUD, G.; NIESLSEN, D.R. The use of cokriging with limited field observation. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v. 47, n. 2, p. 175-184, 1983.
- VIDAL-VÁZQUEZ, E.; PAZ-GONZÁLEZ, A.; VIVAS-MIRANDA, J. G. Characterizing anisotropy and heterogeneity of soil surface microtopography using fractal models. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 182, n. 3-4, p.337–353, 2005.
- VIDAL-VÁZQUEZ, E.; VIEIRA, S. R.; DE MARIA, I. C.; PAZ-GONZÁLEZ, A. Fractal dimension and geostatistical parameters for soil microrelief as a function of cumulative precipitation. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 67, n. 1, p.78-83, 2010.



- VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; SCHAEFER, C. E. (Ed.) **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p. 1-54.
- VIVAS-MIRANDA, J.G. **Análisis fractal del microrrelieve del suelo**. Coruña, Universidad de a Coruña, 2000. 313p. (Tese de Doutorado).
- WANG, G.; GERTNER, G.; SINGH, V.; SHINKAREVA, S.; PARYSOW, P.; ANDERSON, A. Spatial and temporal prediction and uncertainty of soil loss using the revised universal soil loss equation: a case study of the rainfall-runoff erosivity R factor. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 153, n. 1-2, p. 143-155, 2002.
- WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Applications of soil physics**. New York: Academic Press, 1980. p. 319-344.
- WEBSTER, R. Quantitative spatial analysis of soil in the field. In: STEWART, B.A. (Ed.). **Advances in Soil Science**. New York: Springer, 1985. p.1-70.
- WEBSTER, R.; OLIVER M. A. **Statistical methods in soil and land resource survey**. New York: Oxford University Press, 1990. 328 p.
- WOOD, A.W. Management of crop residues following green harvesting of sugarcane in north Queensland. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 20, n. 1, p.69–85, 1991.
- XU, M.; QI, Y. Soil-surface CO<sub>2</sub> efflux and its spatial and temporal variations in a Young ponderosa pine plantation in northern California. **Global Change Biology**, Oxford, v. 7, n. 6, p. 667-677, 2001.

## APÊNDICE

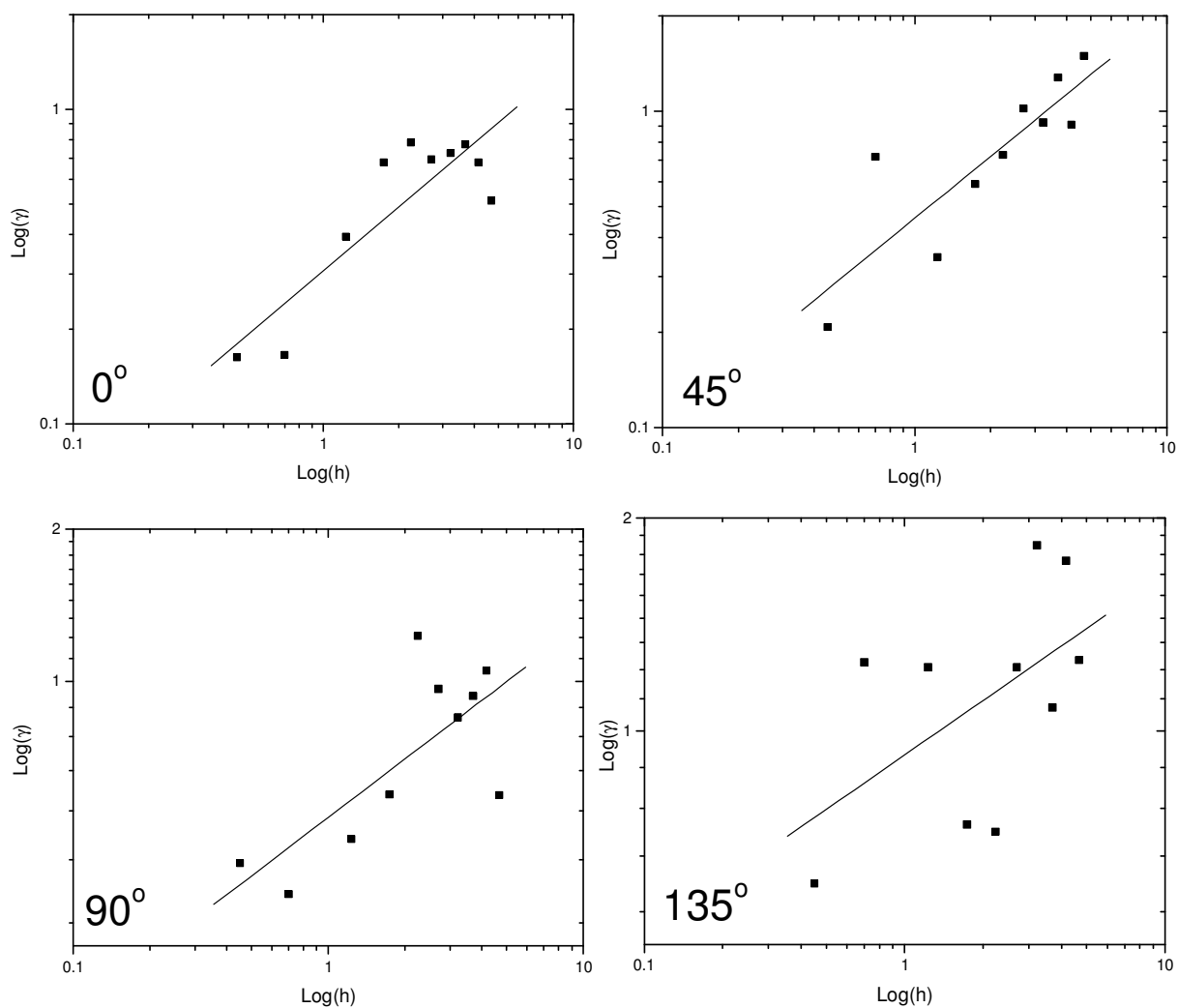


Figura 1A. Logaritmo da semivariância versus o logaritmo da distância de separação ( $h/a=0,5/5$  m) para o dia 299T para as diferentes direções.

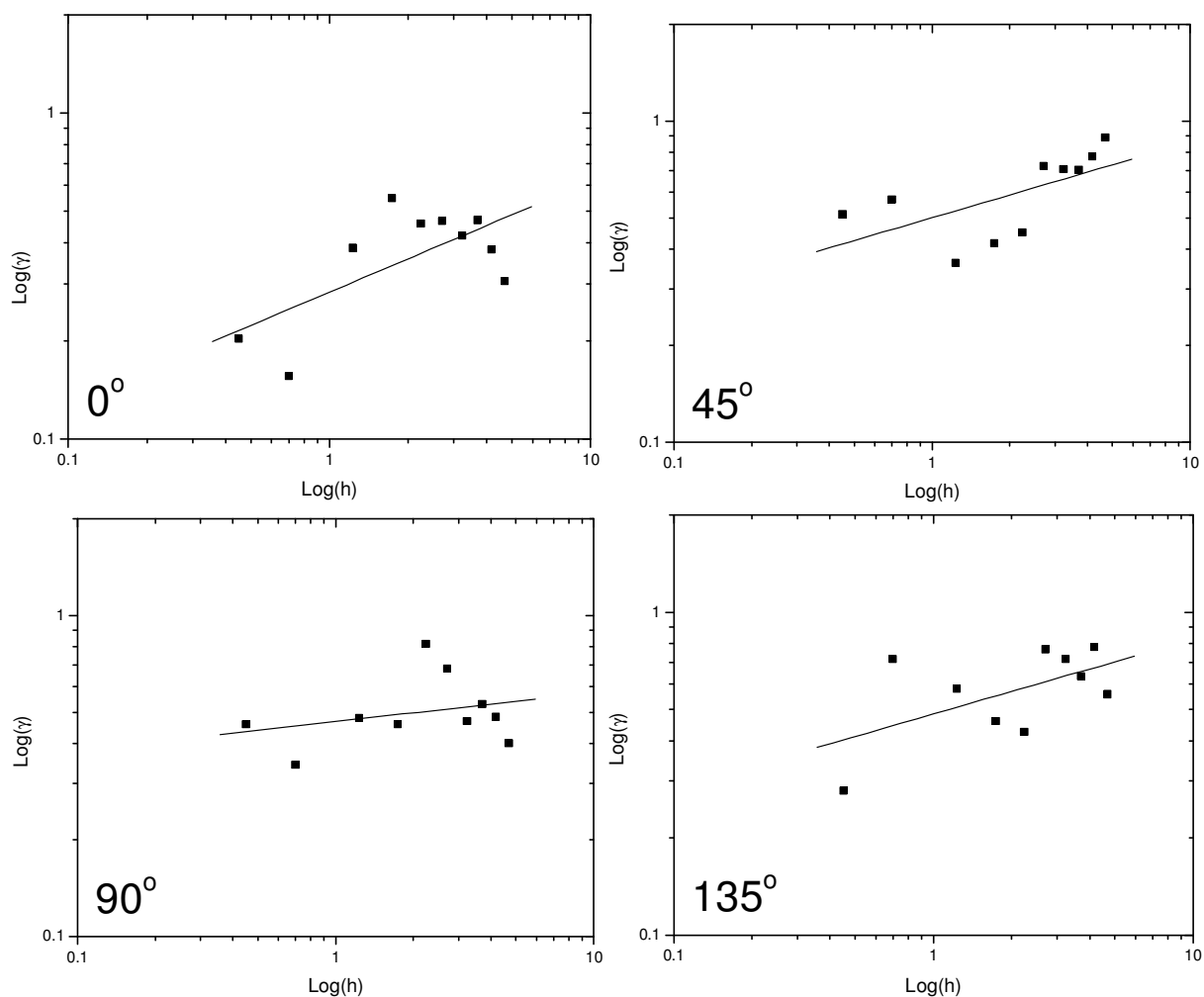


Figura 2A. Logaritmo da semivariância versus o logaritmo da distância de separação ( $h/a=0,5/5$  m) para o dia 301M para as diferentes direções.

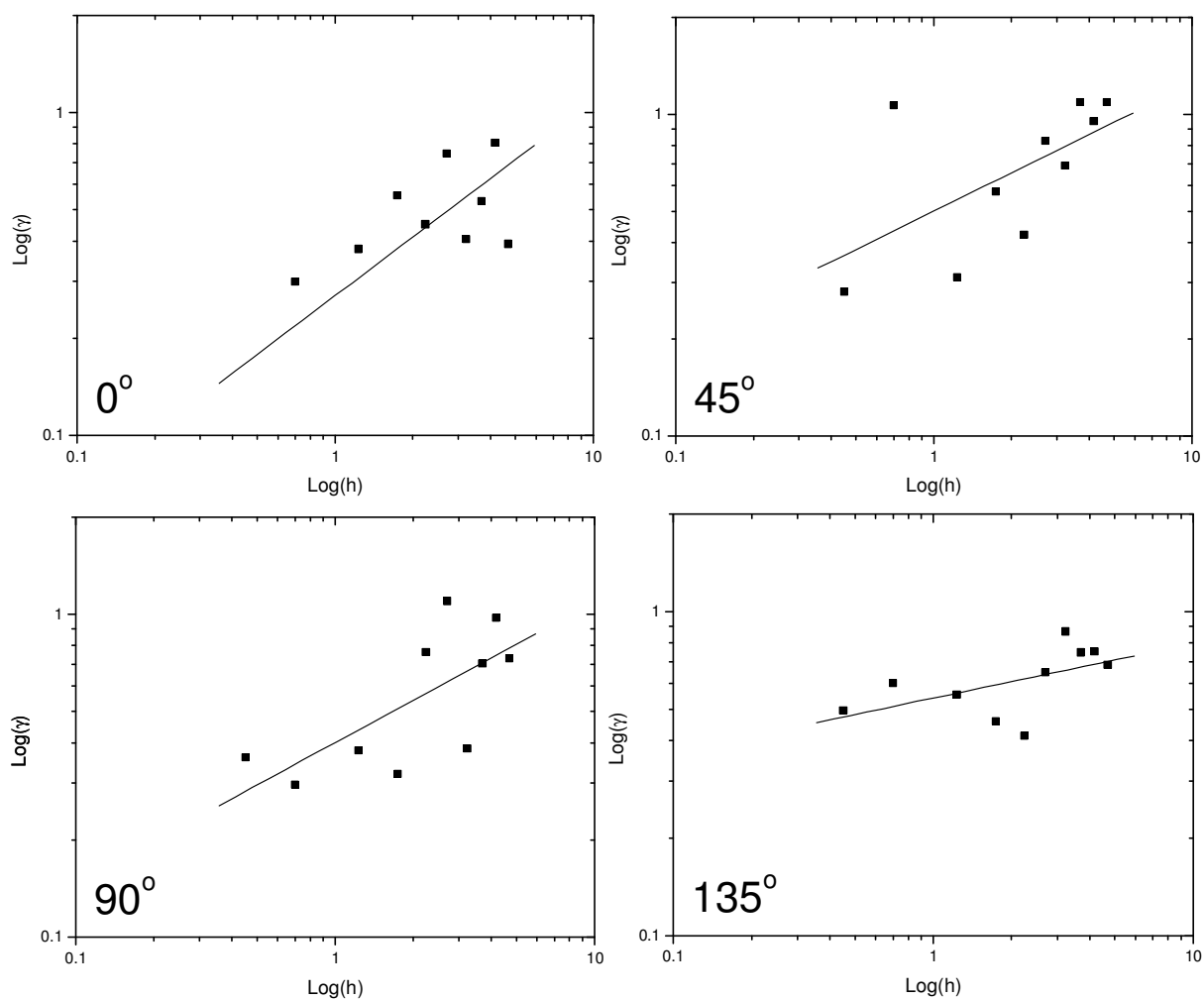


Figura 3A. Logaritmo da semivariância versus o logaritmo da distância de separação ( $h/a=0,5/5$  m) para o dia 301T para as diferentes direções.

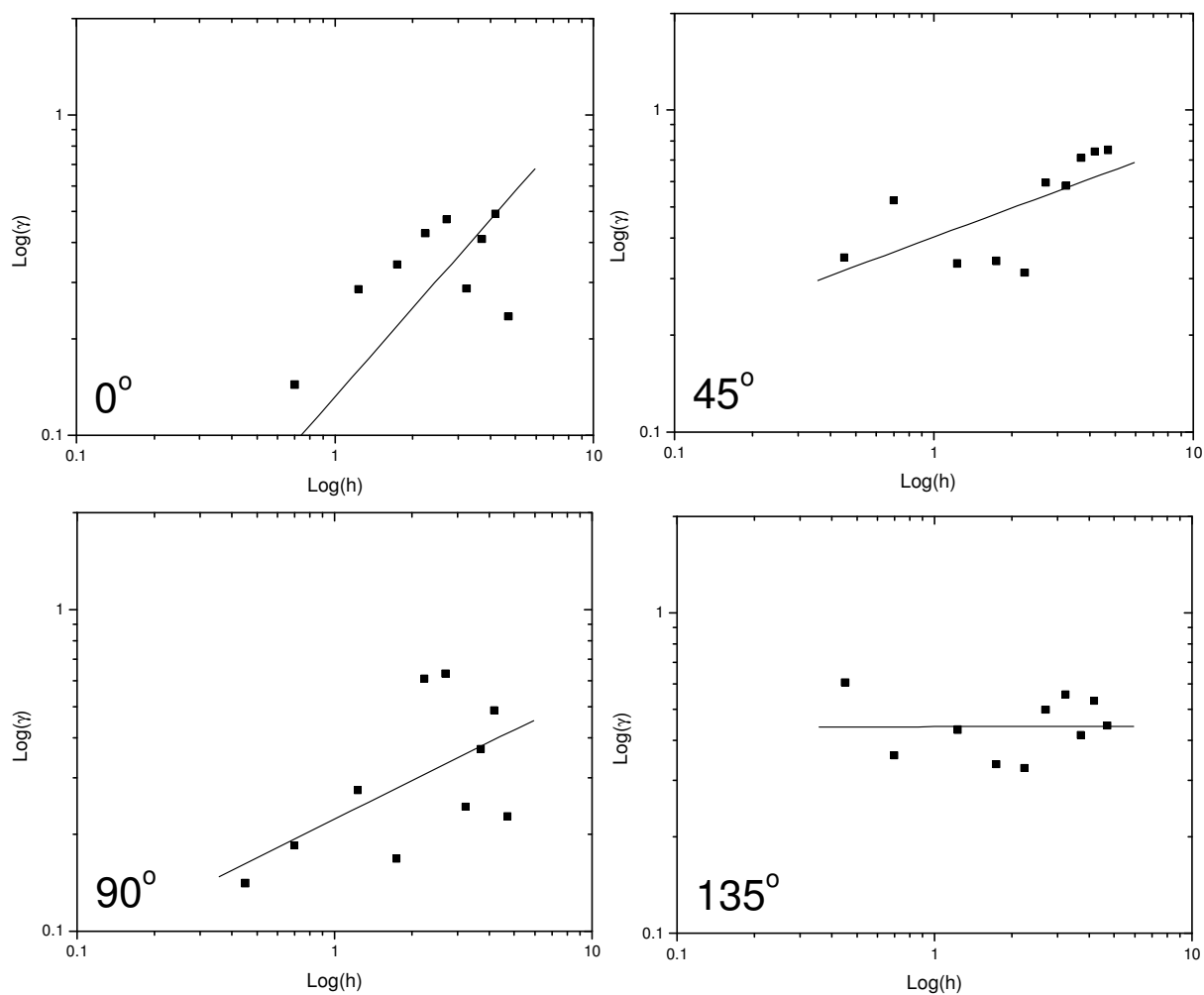


Figura 4A. Logaritmo da semivariância versus o logaritmo da distância de separação ( $h/a=0,5/5$  m) para o dia 302M para as diferentes direções.

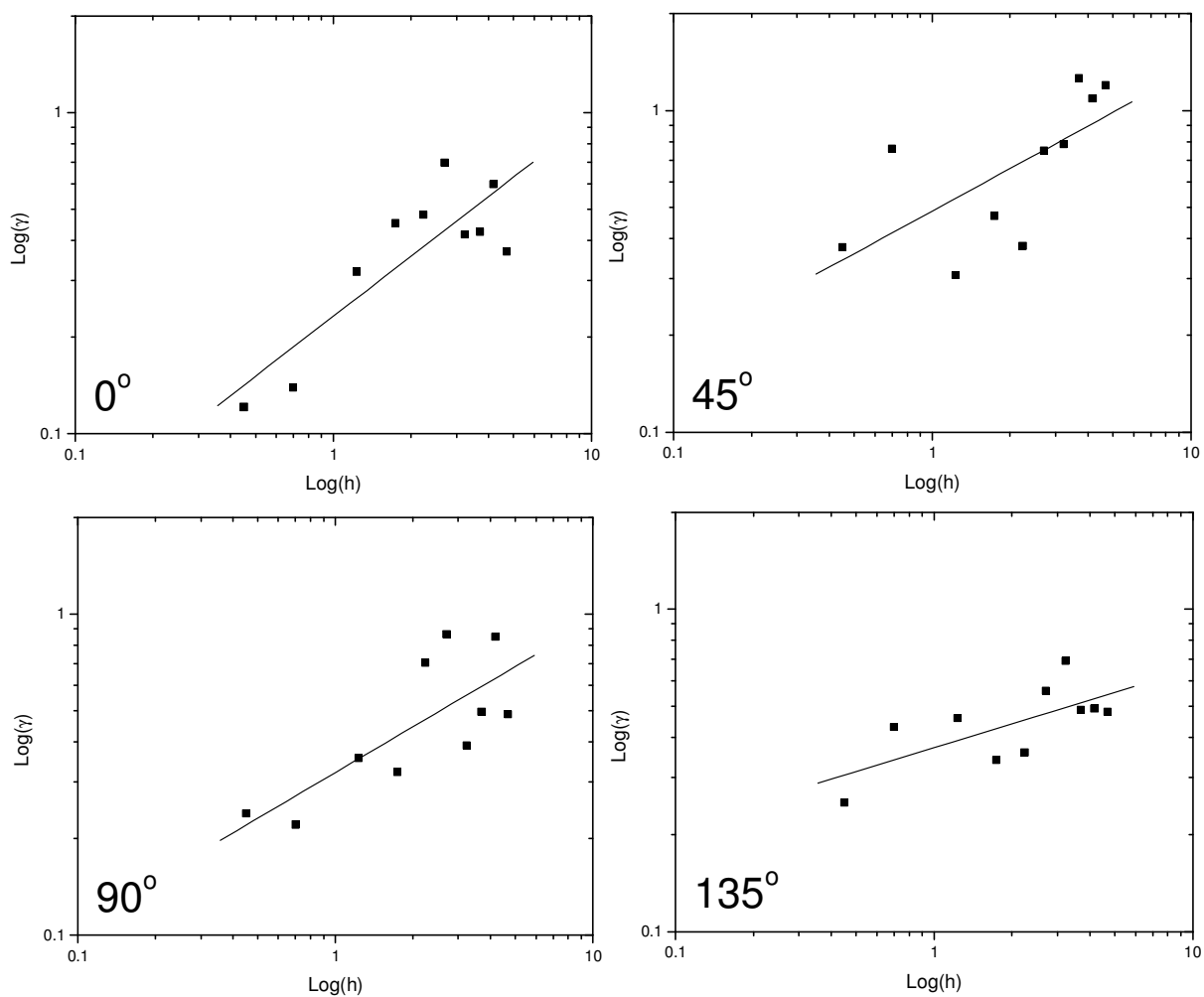


Figura 5A. Logaritmo da semivariância versus o logaritmo da distância de separação ( $h/a=0,5/5$  m) para o dia 302T para as diferentes direções.

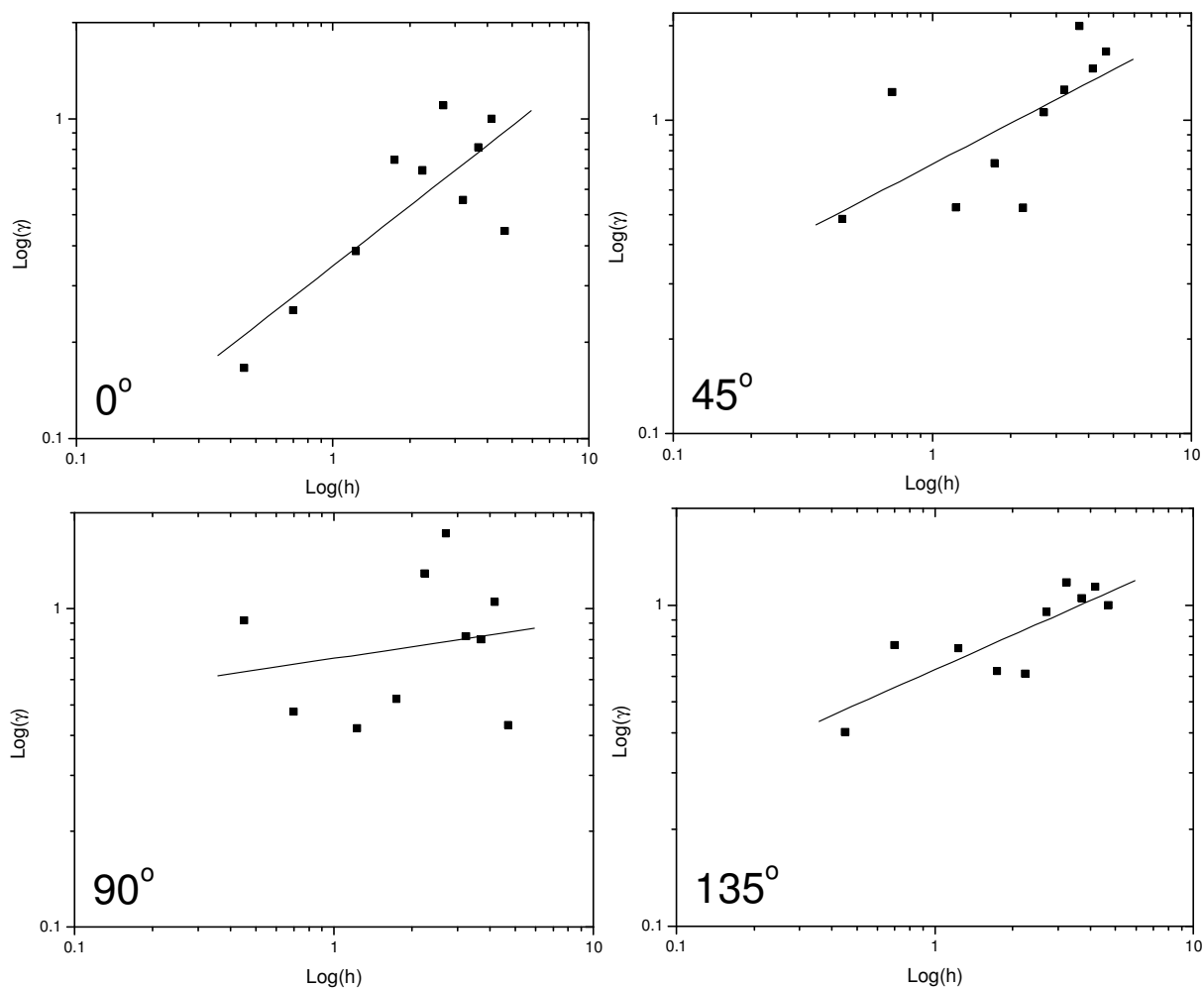


Figura 6A. Logaritmo da semivariância versus o logaritmo da distância de separação ( $h/a=0,5/5$  m) para o dia 308M para as diferentes direções.



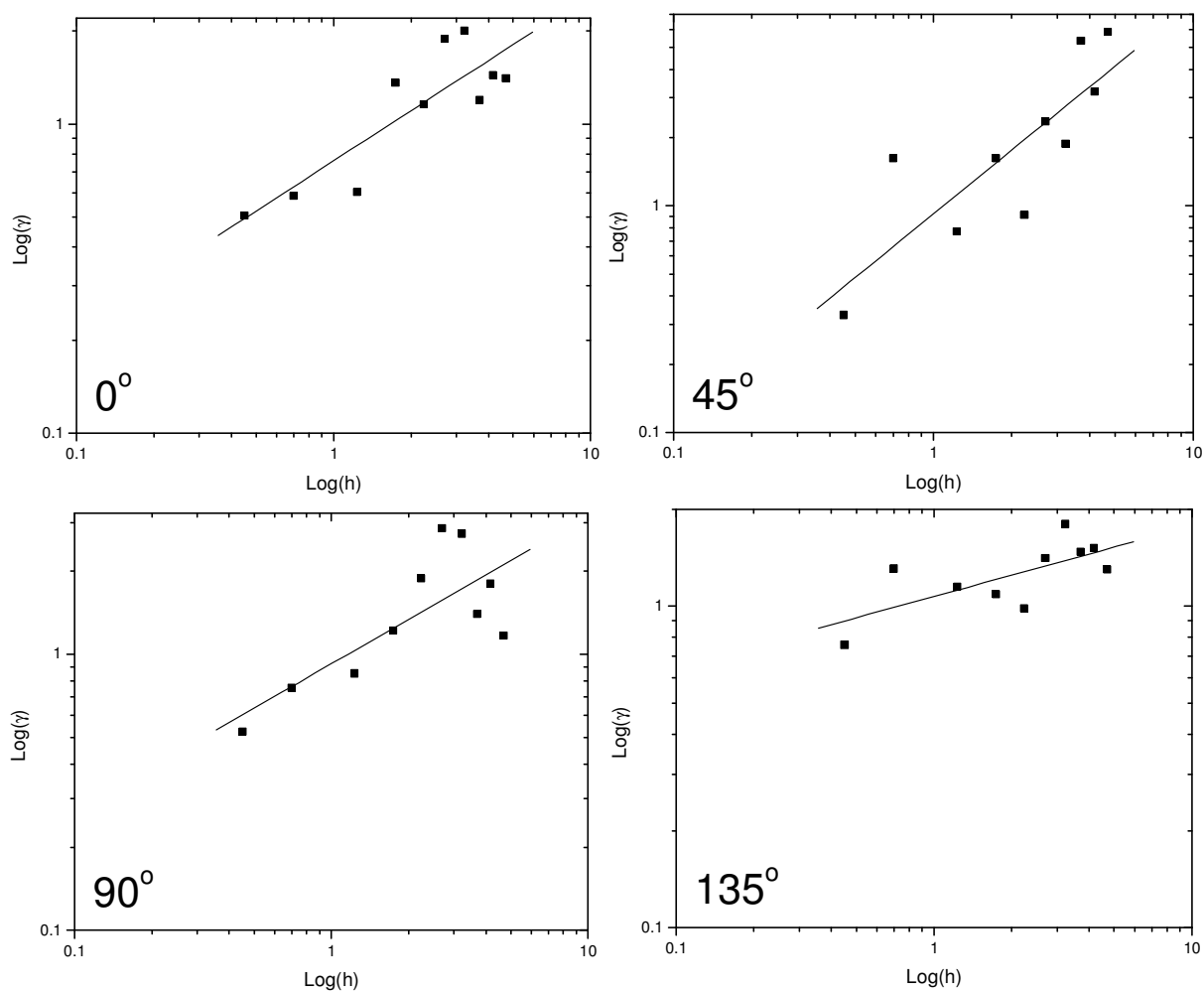


Figura 7A. Logaritmo da semivariância versus o logaritmo da distância de separação ( $h/a=0,5/5$  m) para o dia 313T para as diferentes direções.

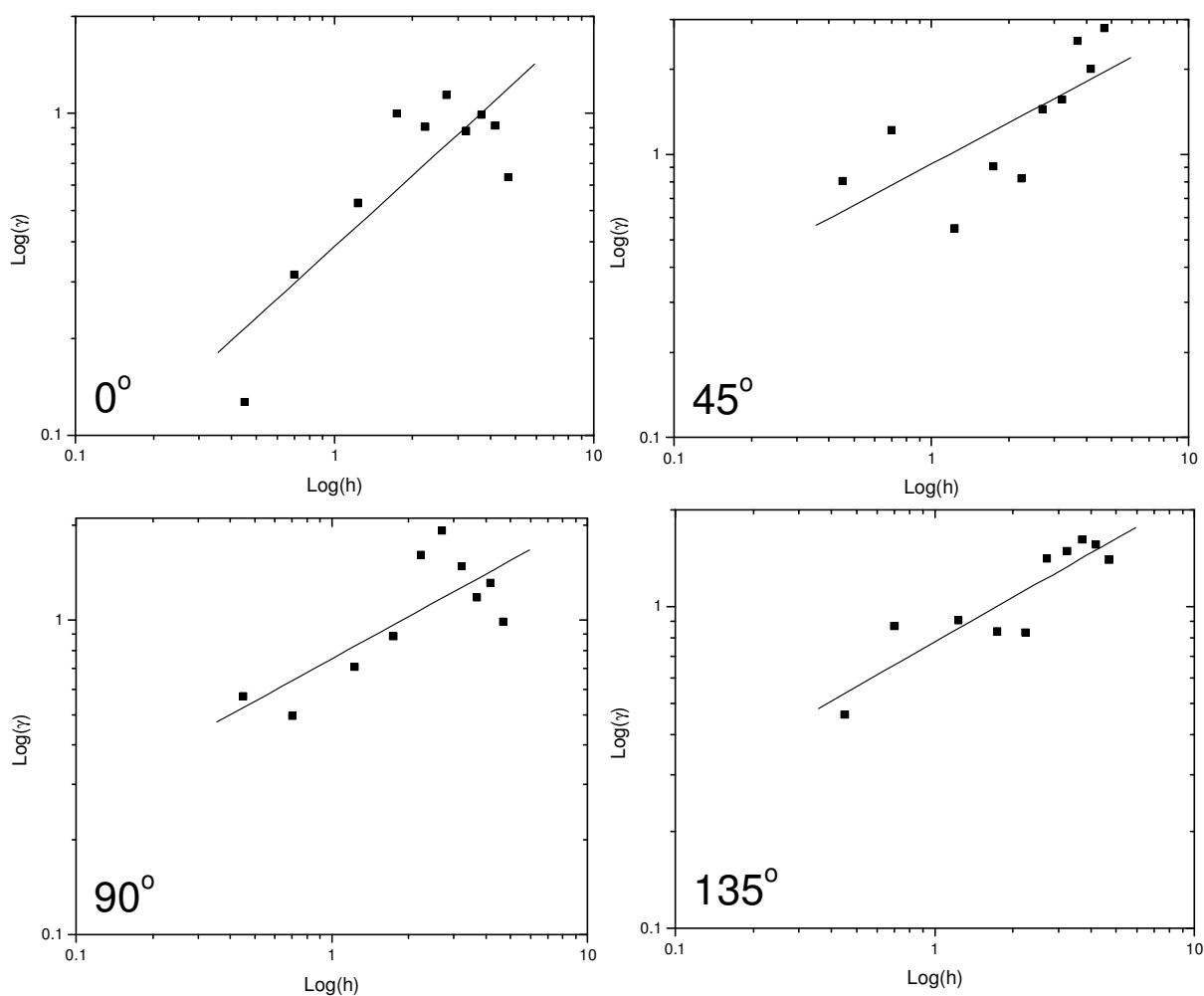


Figura 8A. Logaritmo da semivariância versus o logaritmo da distância de separação ( $h/a=0,5/5$  m) para o dia 322M para as diferentes direções.