

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

**ESTRUTURA DE VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DA
EMIÇÃO DE CO₂ E ATRIBUTOS DO SOLO CARACTERIZADA
POR DIMENSÃO FRACTAL EM ÁREA DE CANA-DE-AÇÚCAR**

Elton da Silva Bicalho
Engenheiro Agrônomo

JABOTICABAL – SÃO PAULO – BRASIL
2012

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

**ESTRUTURA DE VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DA
EMISSÃO DE CO₂ E ATRIBUTOS DO SOLO CARACTERIZADA
POR DIMENSÃO FRACTAL EM ÁREA DE CANA-DE-AÇÚCAR**

Elton da Silva Bicalho

Orientador: Prof. Dr. Newton La Scala Júnior

Coorientador: Prof. Dr. Gener Tadeu Pereira

Coorientador: Dr. Alan Rodrigo Panosso

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

JABOTICABAL – SP

Fevereiro – 2012

B583e Bicalho, Elton da Silva
Estrutura de variabilidade espacial e temporal da emissão de CO₂ e atributos do solo caracterizada por dimensão fractal em área de cana-de-açúcar / Elton da Silva Bicalho. -- Jaboticabal, 2012
ix, 55 f. : il. ; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2012

Orientador: Newton La Scala Júnior

Banca examinadora: José Garcia Vivas Miranda, Zigomar Menezes de Souza

Bibliografia

1. Respiração do solo. 2. Fractograma. 3. Isotropia. 4. Anisotropia. I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 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

ELTON DA SILVA BICALHO – nascido em São Paulo no dia 21 de junho de 1985, graduou-se como Engenheiro Agrônomo em fevereiro de 2010 pela Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista – Unesp câmpus de Jaboticabal. Foi bolsista de Iniciação Científica pelo programa PIBIC/CNPq durante o período entre agosto de 2007 a agosto de 2009. Em março de 2010, ingressou no curso de Mestrado no programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração em Produção Vegetal, pela Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista – Unesp câmpus de Jaboticabal.

A pesca milagrosa

Então escrever é o modo de quem tem a palavra como isca: a palavra pescando o que não é palavra. Quando essa não palavra morde a isca, alguma coisa se escreveu. Uma vez que se pescou a entrelinha, podia-se com alívio jogar a palavra fora. Mas aí cessa a analogia: a não palavra, ao morder a isca, incorporou-a. O que salva então é ler “distraidamente”.

Clarice Lispector

*À memória de minha mãe, Sandra
a quem devo tudo que sou*

*Aos meus irmãos Edson e Elaine
pelo apoio e carinho*

*Às minhas tias Carmem, Cleuza e Malba
pela ajuda e apoio nos momentos difíceis*

*Aos meus grandes amigos Giorge, Helton, Leonardo, Maridélia, Paulo e Pedro
pelos conselhos e companhia*

*“Amigo é como um vizinho quando Deus está distraído”
Provérbio africano*

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Newton La Scala Júnior, pela oportunidade para a realização de mais este passo em minha vida profissional.

Aos meus coorientadores Dr. Alan Rodrigo Panosso e Prof. Dr. Gener Tadeu Pereira, sem o auxílio dos quais este trabalho não seria possível.

Aos amigos e companheiros de mestrado do Departamento de Ciências Exatas, Daniel De Bortoli Teixeira, João Fernandes da Silva Júnior, Mara Regina Moitinho e Sísara Rocha Oliveira, pelo convívio por todo este tempo.

Aos amigos e companheiros Juliano Luciani Iamaguti e Luciano Ito Perillo, pela grande ajuda na condução do experimento e sem os quais este trabalho não seria possível.

Aos funcionários do Departamento de Ciências Exatas Adriana, Norival, Shirley e Zezé, por estarem sempre disponíveis para ajudar.

Aos funcionários da Seção de Pós-Graduação da Unesp de Jaboticabal, pela disponibilidade em auxiliar em todos os momentos.

À Usina São Martinho, pela concessão da área experimental.

Ao CNPq, pelo auxílio financeiro.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO.....	viii
SUMMARY.....	ix
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1 Emissão de CO ₂ do solo.....	3
2.2 Dimensão fractal, autossimilaridade e autoafinidade.....	6
2.3 Dimensão fractal aplicada ao estudo do solo.....	9
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	13
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	20
4.1 Variabilidade temporal da emissão de CO ₂ do solo.....	20
4.2 Variabilidade espacial da emissão de CO ₂ e atributos do solo.....	32
5 CONCLUSÕES.....	42
6 REFERÊNCIAS.....	43

ESTRUTURA DE VARIABILIDADE ESPACIAL E TEMPORAL DA EMISSÃO DE CO₂ E ATRIBUTOS DO SOLO CARACTERIZADA POR DIMENSÃO FRACTAL EM ÁREA DE CANA-DE-AÇÚCAR

RESUMO – A emissão de CO₂ do solo (FCO₂) é influenciada por processos físicos, químicos e biológicos que afetam a produção de CO₂ no interior do solo e o seu transporte para a atmosfera, variando no tempo e no espaço em função das condições ambientais e do manejo agrícola da área. O objetivo deste estudo foi investigar a correlação existente entre os padrões de estrutura de variabilidade espacial e temporal de FCO₂ e atributos do solo, em área de cana-de-açúcar sob sistema de manejo cana crua, por meio de dimensão fractal (D_F), derivada a partir de variogramas isotrópicos e anisotrópicos em diferentes escalas espaciais. A área experimental constituiu-se de uma malha regular de 60 × 60 m contendo 141 pontos espaçados em distâncias mínimas que variaram de 0,5 a 10 m. A emissão de CO₂, temperatura e umidade do solo foram avaliadas durante 7 dias, sendo determinados os atributos físico e químicos do solo em amostragem na profundidade de 0,0 a 0,1 m. A média de FCO₂ variou de 1,26 a 1,77 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ao longo dos dias, com dependência temporal na média e longa escalas, em alcances superiores a 20 m. Apesar do comportamento isotrópico observado para FCO₂, seus valores de D_F , calculados para diferentes direções, evidenciaram maior variabilidade temporal na direção paralela à linha de plantio, indicando influência das práticas de manejo adotadas na área. A variabilidade espacial de FCO₂ foi mais bem evidenciada na média (20 a 30 m) e longa (40 a 60 m) escalas, com sua estrutura de variabilidade, caracterizada pelo fractograma, correlacionando-se significativamente com a maioria dos atributos do solo e apresentando comportamento similar à observada para a temperatura do solo e volume total de poros. Além disso, os fractogramas permitiram observar o comportamento da dependência espacial e temporal de FCO₂ e demais atributos do solo ao longo das escalas, direções e dias de estudo, além de seus padrões de homogeneidade e heterogeneidade.

Palavras-chave: anisotropia, fractograma, isotropia, respiração do solo

**SPATIAL AND TEMPORAL VARIABILITY STRUCTURE OF SOIL CO₂ EMISSION
AND SOIL PROPERTIES CHARACTERIZED BY FRACTAL DIMENSION IN
SUGARCANE AREA**

SUMMARY – Soil CO₂ emission (FCO₂) is influenced by physical, chemical and biological factors that affect the production of CO₂ in the soil and its transport to the atmosphere, varying in time and space as a function of environmental conditions and agricultural management. The aim of this study was to investigate the correlation between spatial and temporal variability patterns of FCO₂ and soil properties in sugarcane area under green management by using fractal dimension (D_F), derived from isotropic and anisotropic variogram at different spatial scales. The experimental area consisted of a regular grid of 60 × 60 m containing 141 points spaced at minimum distances ranging from 0.5 to 10 m. Soil CO₂ emission, soil temperature and soil moisture were evaluated over a period of 7 days, and soil physical and chemical properties were determined by sampling at a depth of 0.0 to 0.1 m. The average of FCO₂ ranged from 1.26 to 1.77 mol m⁻² s⁻¹ throughout the days, with temporal dependence in the medium and large scales, at ranges of more than 20 m. Despite the isotropic behavior observed for FCO₂, their D_F values, calculated for different directions, showed greater temporal variability in the direction parallel to the row, indicating the influence of area management. Spatial variability of FCO₂ was better evidenced in the medium (20 to 30 m) and long (40 to 60 m) scales, with its variability structure, characterized by fractogram, significantly correlated with most soil properties and similar behaving to that observed for the soil temperature and total pore volume. In addition, fractograms allowed to observe the behavior of the spatial and temporal dependence of FCO₂ and soil properties along scales, directions and evaluation days, and their homogeneity and heterogeneity patterns.

Keywords: anisotropy, fractogram, isotropy, soil respiration

1 INTRODUÇÃO

As concentrações atmosféricas de gases de efeito estufa (GEE), sobretudo CO₂, CH₄ e N₂O, vêm aumentando desde o início da era industrial, o que pode ser atribuído às atividades humanas relacionadas à queima de combustíveis fósseis e às mudanças no uso da terra (SCHNEIDER et al., 2001). O aumento das concentrações de GEE na atmosfera altera o balanço natural de entrada e saída da radiação solar, aumentando a temperatura da superfície terrestre, o chamado efeito estufa adicional. Neste processo, no qual o CO₂ tem importante papel, os GEE absorvem parte da radiação infravermelha emitida pela superfície da Terra, impedindo seu retorno para o espaço (FORSTER et al., 2007).

A agricultura, como atividade antrópica, pode influenciar a emissão de GEE para a atmosfera, já que as práticas de manejo nos sistemas de produção agrícola alteram a perda ou o acúmulo do carbono dos solos. A quantidade de carbono presente nos solos (2.500 Pg de C) é 3 vezes superior ao encontrado na atmosfera e 4 vezes maior do que o carbono presente na vegetação (LAL, 1999). A matéria orgânica é uma importante fonte de carbono dos solos e, quando decomposta pela atividade microbiana, libera grandes quantidades de CO₂ para a atmosfera. Por esse motivo, dependendo do uso da terra e do manejo dos sistemas de produção, o solo pode ser importante fonte ou reservatório de carbono atmosférico.

A cultura da cana-de-açúcar, com área plantada no Brasil de 8,4 milhões de hectares (CONAB, 2011), tem papel de destaque nesse contexto. Além de proporcionar o acúmulo de CO₂ atmosférico na forma de biomassa, pode contribuir para o aumento do teor de matéria orgânica do solo a partir da deposição dos resíduos vegetais de colheita. Além disso, por meio da conversão das áreas sob sistema cana queimada para o sistema de cultivo cana crua, parte do carbono liberado durante a queima seria mantido e incorporado ao solo (CERRI et al., 2007). Assim, como principal produtor mundial de cana-de-açúcar, o Brasil apresenta grande potencial na mitigação das emissões de GEE, já que os solos sob os quais essa cultura é produzida poderiam funcionar como sumidouros, estocando grande quantidade de carbono.

Sabe-se que a emissão de CO₂ do solo (FCO₂) é resultado da interação entre os processos de produção de CO₂ no interior do solo e o seu transporte para a atmosfera, sofrendo influência das condições ambientais, do manejo da área e da relação com os demais atributos do solo, como temperatura e umidade (LA SCALA et al., 2009). Além de variar no tempo e no espaço, FCO₂ pode apresentar anisotropia, na qual os padrões de variabilidade dependem da direção e da escala de estudo. Como alternativa para avaliar a complexidade e o comportamento desses fatores, a geoestatística tem sido utilizada para descrever, de forma quantitativa, as variações de FCO₂ e atributos do solo. Aliado à geoestatística, o uso da análise fractal é capaz de descrever, de maneira simples e resumida, a estrutura complexa dos solos, além de fornecer informações relacionadas ao efeito do seu manejo sobre a heterogeneidade/homogeneidade dos atributos e padrões de variabilidade do solo (PACHEPSKY & CRAWFORD, 2004).

Considerando que as práticas de manejo na cultura da cana-de-açúcar possam introduzir dependência espacial e sua variação ao longo de diferentes escalas, estudos que avaliem a distribuição espacial e temporal de FCO₂ podem fornecer subsídios para a definição de práticas adequadas de manejo nas áreas agrícolas de produção de cana-de-açúcar, sendo possível quantificar os efeitos da agricultura na manutenção da matéria orgânica do solo e na diminuição das emissões atmosféricas de CO₂. Assim, o objetivo do presente estudo foi investigar a correlação existente entre os padrões de estrutura de variabilidade espacial e temporal de FCO₂ e atributos do solo, em área de cana-de-açúcar sob sistema de manejo cana crua, por meio de dimensão fractal, derivada a partir de variogramas isotrópicos e anisotrópicos em diferentes escalas espaciais.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Emissão de CO₂ do solo

Diversas atividades humanas, principalmente aquelas relacionadas à queima de combustíveis fósseis e às mudanças no uso da terra, vêm modificando de forma significativa a concentração dos constituintes atmosféricos (SCHNEIDER et al., 2001). As concentrações atmosféricas de gases de efeito estufa (GEE), como dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), clorofluorcarbonetos (CFC), ozônio (O₃), entre outros, e de aerossóis (partículas pequenas) vêm aumentando desde o início da era industrial e estão relacionadas com as alterações no balanço de energia que leva ao aquecimento da superfície terrestre (FORSTER et al., 2007), o chamado efeito estufa adicional. Estudos demonstram que as concentrações de CO₂ na atmosfera aumentaram em cerca de 100 ppm ao longo dos últimos 250 anos, passando de 275 a 285 ppm, na era pré-industrial, para a concentração de 379 ppm em 2005 (FORSTER et al., 2007) e 389 ppm em 2010 (CHEN et al., 2011).

A crescente preocupação com esse aumento das concentrações de GEE na atmosfera e, conseqüentemente, o aquecimento global, levou a comunidade científica a considerar o papel dos solos como fonte ou sumidouro de carbono (BERNOUX et al., 2005). O estoque de carbono do solo é dependente do modo de uso das terras e das práticas agrícolas adotadas e qualquer modificação em seu manejo pode conduzir a mudanças importantes (diminuição ou aumento) do estoque de carbono nos horizontes superficiais do solo (ARROUAYS et al., 2002). Essas variações ocorrem principalmente na camada de 0,0 a 0,3 m do solo e são devidas às modificações da quantidade e da qualidade das restituições orgânicas (JENKINSON et al., 1992), às transferências da matéria orgânica sob forma solúvel ou sólida, que podem ocorrer por meio da erosão, escoamento superficial, lixiviação, entre outros processos (CHAN, 2001), e às perdas por mineralização da matéria orgânica do solo (SCHIMMEL, 1995). Em solos tropicais, o conjunto de todas essas variações pode representar até 50% do estoque inicial nos primeiros 0,2 m do solo (FELLER & BEARE, 1997).

As ações humanas relacionadas ao manejo dos solos podem, portanto, interferir nos fluxos de carbono entre os ecossistemas terrestres e a atmosfera (BERNOUX et al., 2005). Estima-se que no ano de 2005 a agricultura tenha sido responsável por uma emissão de 5,1 a 6,1 Gt de CO₂eq ano⁻¹ (Gt = gigatonelada = 10⁹ t), o que representou de 10% a 12% do total das emissões antropogênicas de GEE, ou cerca de 60% das emissões de N₂O e 50% de CH₄ (SMITH et al., 2007). No entanto, apesar das grandes trocas anuais de CO₂ entre a atmosfera e as terras agrícolas, o fluxo líquido de CO₂ é estimado em apenas 0,04 Gt ano⁻¹ de CO₂. No Brasil, nesse mesmo ano, as emissões totais de CO₂ foram estimadas em 1.638 Tg (Tg = teragrama = 10⁶ t), com destaque para o setor de mudança do uso da terra e florestas, que contribuiu com 77% dessas emissões (BRASIL, 2010). Incluídas no total deste setor estão as emissões relativas à aplicação de calcário para a correção da acidez dos solos, que foi responsável por 7,5 Tg de CO₂.

A produção de CO₂ no interior do solo está diretamente relacionada à atividade biológica, como a respiração de raízes, e à decomposição da matéria orgânica pela atividade microbiana, influenciada pela temperatura e umidade do solo (AMUNDSON & DAVIDSON, 1990; LAL et al., 1995; OHASHI & GYOKUSEN, 2007; DOMINY et al., 2002; EPRON et al., 2006; CONCILIO et al., 2009; RYU et al., 2009). Outros fatores relacionados aos processos físicos, químicos e biológicos influenciam a emissão de CO₂ do solo (FCO₂), como o teor de matéria orgânica (DOMINY et al., 2002; KEMMITT et al., 2008; LAL, 2009), a atividade dos micro-organismos (LLOYD & TAYLOR, 1994; FANG et al., 1998; EPRON et al., 2006; RYU et al., 2009), o teor de fósforo disponível (DUAH-YENTUMI et al., 1998), o pH (FUENTES et al., 2006), além de atributos físicos do solo, tais como a densidade e a porosidade, responsáveis por sua oxigenação e transporte de CO₂ para a atmosfera (XU & QI, 2001; SCHWENDENMANN et al., 2003; EPRON et al., 2006). A maior parte da variabilidade temporal de FCO₂ pode ser explicada por alterações na temperatura e umidade do solo, seus principais fatores controladores (EPRON et al., 2006; KOSUGI et al., 2007; CONCILIO et al., 2009), além de outros fatores que alteram o teor de matéria orgânica no interior do solo, como o manejo e a adição de biomassa (LAL, 2009).

Existem dois momentos de forte emissão de CO₂ do solo para a atmosfera relacionada às mudanças no uso da terra: um no desmatamento seguido da queimada e outro com o preparo do solo por meio da aração seguida de sucessivas gradagens niveladoras (MACHADO, 2005). O preparo do solo pela aração pode resultar em até 81 g m⁻² de CO₂ emitidos para a atmosfera em um período de 5 h (REICOSKY, 1997). Além disso, a aração seguida de várias gradagens predispõe o solo à erosão hídrica, o que contribui para o agravamento das emissões globais de CO₂ para a atmosfera, podendo chegar a uma emissão líquida anual de aproximadamente 1 Gt de carbono (LAL et al., 2004).

Dessa forma, as práticas de preparo do solo, ao destruírem os agregados que oferecem proteção física à matéria orgânica contra a ação dos micro-organismos, aumentam sua taxa de decomposição e mineralização, principalmente em áreas de manejo convencional, que apresentam maior potencial de emissão de CO₂ quando comparadas às práticas de manejo menos agressivas ao solo, como o sistema plantio direto (SIX et al., 1999). USSIRI & LAL (2009) estudaram os efeitos dos sistemas de preparo convencional, reduzido e plantio direto sobre o estoque de carbono em área de cultivo de milho e concluíram que o solo sob sistema plantio direto armazenou quase o dobro da quantidade de carbono a 0,3 m de profundidade quando comparado aos sistemas convencional e reduzido.

O manejo de determinadas culturas, particularmente a cana-de-açúcar, pode ter um importante papel no balanço das emissões de CO₂ do solo para a atmosfera. No sistema de manejo cana crua, a colheita é realizada de forma mecânica e os resíduos vegetais são depositados sobre a superfície do solo, favorecendo maior acúmulo de matéria orgânica e redução da emissão de CO₂ quando comparado ao sistema cana queimada (RAZAFIMBELO et al., 2006; CERRI et al., 2007; LUCA et al., 2008). Ao avaliar as emissões de CO₂ do solo em ambos os sistemas de manejo, PANOSSO et al. (2009) observaram, ao longo de 70 dias de estudos, emissão 39% maior no sistema cana queimada quando comparado ao sistema cana crua. Este fato é atribuído à aceleração do processo de mineralização da matéria orgânica do solo devido à queima dos resíduos vegetais.

As práticas de manejo do solo, de forma geral, podem resultar em modificações em seus atributos físicos e químicos, além de afetar diretamente a atividade microbiana e, conseqüentemente, FCO₂ (BLAIR, 2000; SARTORI et al., 2006; CERRI et al., 2007). De acordo com BRITO et al. (2009), a caracterização da variabilidade espacial e temporal de FCO₂, por meio da geoestatística, pode fornecer informações relevantes que ajudam a compreender a dinâmica do CO₂ no sistema solo-atmosfera. Além disso, os atributos do solo envolvidos nos processos de produção e transporte de CO₂ também possuem grande variabilidade espacial e, em alguns casos, temporal, o que torna complexa a tarefa de explicar as variações de FCO₂.

2.2 Dimensão fractal, autossimilaridade e autoafinidade

O termo fractal, concebido por B. B. Mandelbrot para reunir uma grande classe de objetos que possuem formas contínuas, mas não diferenciáveis, é derivado do adjetivo latino *fractus*, cujo correspondente verbo *frangere* significa quebrar ou produzir pedaços irregulares, uma alusão à forma irregular e fragmentada que os objetos fractais apresentam (MANDELBROT, 1982). Fractal é, por definição, um conjunto para o qual a dimensão Hausdorff-Besicovitch excede a dimensão topológica (MANDELBROT, 1977). A importância deste conceito se deve à capacidade da geometria fractal em descrever a forma irregular ou fragmentada de paisagens reais e outros objetos complexos que a geometria Euclidiana tradicional não consegue analisar, além de fornecer uma maneira sistemática de caracterização das paisagens em termos quantitativos (XU et al., 1993; SUN et al., 2006).

De acordo com MANDELBROT (1982), a geometria clássica muitas vezes é vista como “fria” e “seca” devido à sua incapacidade em descrever a forma de fenômenos naturais, tais como nuvens, montanhas, linhas costeiras ou árvores. Ainda segundo este autor, “nuvens não são esferas, montanhas não são cones, linhas costeiras não são círculos, cascas de árvores não são lisas e raios não se deslocam em linha reta”. A natureza, dessa forma, é complexa e a geometria fractal, ao contrário da geometria

Euclidiana, seria capaz de fornecer uma descrição muito mais completa e realista para a maioria dessas estruturas da paisagem, quantificando e prevendo a sua dinâmica multiescala (MEAKIN, 1991; MILNE, 1991).

Uma característica fundamental dos objetos fractais é que a avaliação de suas propriedades de medida, tais como comprimento ou área, são uma função da escala de medição (ABEDINI & SHAGHAGHIAN, 2009). O comprimento da linha costeira de um país é um exemplo clássico e poderia ilustrar essa propriedade (RICHARDSON, 1961; MANDELBROT, 1967). Quando medido a uma dada escala espacial δ , o comprimento total de uma linha costeira $L(\delta)$ é estimado como um conjunto de N segmentos de linhas retas de comprimento δ . Como pequenos detalhes da linha costeira, não reconhecidos em menores resoluções espaciais, tornam-se visíveis em resoluções espaciais maiores, o comprimento medido $L(\delta)$ aumenta à medida que a escala de medição δ diminui. Os resultados empíricos de RICHARDSON (1961) foram generalizados e expandidos por MANDELBROT (1967), que mostrou que a relação entre o comprimento e a escala de medição pode ser descrita por uma lei de potência:

$$L(\delta) = K\delta^{(1-D_F)} \quad (1)$$

onde o expoente D_F é chamado de dimensão fractal e K é uma constante.

O expoente D_F na equação (1) é o parâmetro-chave da geometria fractal para medir a irregularidade de objetos complexos (SUN et al., 2006). MANDELBROT (1977) chamou a dimensão fractal de dimensão Hausdorff-Besicovitch porque seus valores são números reais não inteiros. A dimensão fractal pode ser pensada como uma medida da capacidade de um objeto em preencher o espaço Euclidiano no qual ele reside, sendo uma descrição quantitativa para as características dos objetos investigados (XU et al., 1993). Assim, uma simples linha reta com $D_F \cong 1$ se aproximará de $D_F \cong 2$ quando se tornar tão complexa que ocupe efetivamente todo o plano e, da mesma forma, à medida que uma superfície se aproxima de $D_F \cong 3$, sua topografia irá se parecer cada vez mais acidentada. De forma geral, quanto mais irregular um objeto se torna, mais espaço ele preenche e maior o valor de D_F (ABEDINI & SHAGHAGHIAN, 2009).

Na geometria Euclidiana, dimensões são números inteiros (por exemplo, 0 para pontos, 1 para linhas, 2 para planos e 3 para superfícies) e as dimensões topológicas permanecem constantes, não importando o quão irregular seja uma linha ou superfície (SUN et al., 2006). Assim, uma linha reta ou uma linha costeira tortuosa têm a mesma dimensão topológica 1 e uma superfície lisa e outra com topografia acidentada têm a mesma dimensão topológica 2. A topologia, dessa forma, não consegue diferenciar linhas tortas de linhas retas e, com isso, parte da informação sobre a forma dos objetos irregulares é perdida em representações topológicas (MANDELBROT, 1982). Por outro lado, a geometria fractal é tratada como um *continuum* (SUN et al., 2006). Sendo assim, a dimensão de uma curva, por exemplo, pode assumir qualquer valor não inteiro entre 1 e 2 dependendo do seu grau de irregularidade, já que quanto mais contorcida ou deformada a linha, maior a sua dimensão fractal. De forma análoga, a dimensão fractal de uma superfície pode apresentar valor não inteiro compreendido entre 2 e 3 (SUN et al., 2006; ABEDINI & SHAGHAGHIAN, 2009).

A autossimilaridade é outra propriedade fundamental dos objetos fractais, na qual objetos pequenos são essencialmente versões reduzidas de objetos grandes e objetos grandes são versões ampliadas de objetos pequenos (MANDELBROT, 1977). A propriedade de autossimilaridade implica que a forma de um objeto é invariável com relação à escala espacial, o que significa que um objeto estritamente autossimilar pode ser pensado como construído por um número infinito de cópias de si mesmo (SUN et al., 2006). Porém, estruturas naturais dotadas de características fractais geralmente não exibem autossimilaridade estrita, mas podem apresentar autossimilaridade estatística quando examinadas em diferentes escalas (MANDELBROT, 1977). Nesse caso, cada pequena parte do objeto, quando ampliada, não é *exatamente* como o todo, mas se *parece* com o todo, ou seja, cada parte do objeto é estatisticamente indistinguível do todo (XU et al., 1993).

De acordo com STANLEY (1985), os objetos fractais podem ser divididos em fractais exatos ou estritos e fractais estatísticos. Fractais exatos são fractais regulares que exibem autossimilaridade, são altamente artificiais e na maioria das vezes não são encontrados na natureza. Já os fractais estatísticos apresentam características fractais

quando suas propriedades médias são estatisticamente autossimilares, podendo estar presentes na natureza desde que as partes e o todo, reduzidos por similaridade, tenham distribuições idênticas (MANDELBROT, 1982).

Os objetos que apresentam autossimilaridade, tanto no sentido estrito quanto no sentido estatístico, são isotrópicos sob redimensionamento, ou seja, as variações que ocorrem com as mudanças de escala são as mesmas para todas as direções do espaço (XU et al., 1993; SUN et al., 2006; ABEDINI & SHAGHAGHIAN, 2009). Por outro lado, se essas variações com a escala forem diferentes para cada direção, o objeto é dito autoafim e seu redimensionamento é anisotrópico (MANDELBROT, 1985). Como na natureza é praticamente impossível que uma determinada porção da paisagem seja geometricamente similar ao todo, a autoafinidade é geralmente mais comum e aplicável de forma mais ampla que a autossimilaridade. No entanto, não existem evidências definitivas para concluir se as paisagens são autossemelhantes ou autoafins sob determinado conjunto de escalas (XU et al., 1993).

Apesar de a autossimilaridade prever que para as superfícies verdadeiramente fractais a dimensão fractal calculada deve ser constante em todas as escalas, locais e direções (SUN et al., 2006), muitos estudos têm demonstrado que os valores de D_F estimados para a maioria dos fenômenos naturais são instáveis no que diz respeito à escala, localização e/ou orientação (KLINKENBERG, 1992; XU et al., 1993; SUN et al., 2006; ABEDINI & SHAGHAGHIAN, 2009). Nesse sentido, BURROUGH (1981) também observou que diversos fenômenos naturais exibem certo grau de autossemelhança estatística ao longo das escalas espaciais, embora alguns possam apresentar níveis de variabilidade agrupados em escalas particulares, fato que, no entanto, não os exclui do conceito de fractal.

2.3 Dimensão fractal aplicada ao estudo do solo

O perfil do solo é formado por diversas estruturas naturais, tais como partículas, poros e organismos, que apresentam ampla variedade de tamanhos e formas, dando ao

solo suas características irregulares intrínsecas. Devido a essa complexidade, diversos atributos físicos, químicos e biológicos dos solos não permanecem constantes ao longo do tempo e do espaço e ocorrem em diferentes escalas espaciais (PERFECT & KAY, 1995; EGHBALL et al., 1999). Nesse contexto, a geometria fractal pode ser usada para descrever de maneira simples a estrutura complexa do solo, por meio da utilização de um pequeno número de parâmetros fractais, como a dimensão fractal, que juntamente com as alterações em outros parâmetros, refletem os efeitos do manejo nos atributos do solo (PACHEPSKY & CRAWFORD, 2004).

O método do variograma é uma técnica eficaz e amplamente utilizada no cálculo da dimensão fractal de superfícies, possibilitando estudar o efeito da escala na variação dos atributos do solo e caracterizar as estruturas que apresentam autossimilaridade e autoafinidade (ABEDINI & SHAGHAGHIAN, 2009). A partir da plotagem do gráfico da semivariância em função da distância, chamado variograma, é possível identificar as diferentes escalas em que a dependência espacial está presente, assim como o alcance em que os atributos do solo deixam de estar correlacionados e a forma geral da variação espacial e temporal das variáveis analisadas (MANDELROT, 1982; MARK & ARONSON, 1984). Para muitos fenômenos naturais, incluindo a emissão de CO₂ e atributos do solo, os valores da semivariância tendem a aumentar com os intervalos de amostragem, atingindo um valor máximo para depois se estabilizar em um patamar (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989).

Por meio deste método, a semivariância é estimada para diferentes distâncias e D_F é calculado a partir da inclinação da reta de regressão no gráfico do logaritmo da semivariância em função do logaritmo da distância (MARK & ARONSON, 1984):

$$D_F = 3 - \frac{b}{2} \quad (2)$$

em que b é o coeficiente angular da reta de regressão. A definição prévia de certos parâmetros para o cálculo de D_F , como alcance, distância de separação e direção de estudo, são essenciais, pois podem influenciar diretamente a inclinação da reta de

regressão e, conseqüentemente, b (SUN et al., 2006). Com relação à direção em que o cálculo de D_F é realizado, segundo ABEDINI & SHAGHAGHIAN (2009) é importante analisar se existe anisotropia nos parâmetros do variograma (alcance ou patamar) e se este fato poderia levar à anisotropia da dimensão fractal e vice-versa, já que nesses casos a análise fractal pode ser considerada uma ferramenta útil para delinear a anisotropia em geoestatística. A partir da análise da dimensão fractal obtida para um conjunto de dados da superfície topográfica em diferentes direções, esses autores não observaram variação significativa de uma direção para outra. LA SCALA et al. (2009), no entanto, observaram que o manejo dos solos na agricultura leva à anisotropia, que afetam diversos atributos tais como teor de carbono, porosidade e umidade do solo que, entre outros, estão diretamente relacionados à produção e transporte de CO_2 do solo para a atmosfera.

Devido à facilidade de utilização, o método do variograma tem sido utilizado para o cálculo de D_F em diversos estudos (BURROUGH, 1981; MARK & ARONSON, 1984; PALMER, 1988; KLINKENBERG, 1992; CANTERO et al., 1998; LAM et al., 2002; ABEDINI & SHAGHAGHIAN, 2009; LA SCALA et al., 2009; USOWICZ & LIPIEC, 2009; VIDAL VÁZQUEZ et al., 2010; PANOSSO, 2011), chegando a diferentes conclusões em relação ao seu desempenho. KLINKENBERG (1992), por exemplo, observou que o método foi capaz de produzir estimativas consistentes de D_F quando aplicado a dados topográficos. Por outro lado, LAM et al. (2002) constataram que este método foi um estimador pobre para todas as superfícies utilizadas no estudo comparativamente à outros métodos para o cálculo de D_F . No entanto, PACHEPSKY & CRAWFORD (2004) sugerem que os valores de dimensão fractal obtidos por diferentes métodos não devem ser comparados para estudos em Ciência do Solo.

Outros estudos têm citado a relação existente entre o comportamento de D_F e os atributos do solo, que são influenciados por diversos fatores, como relevo, cobertura vegetal, precipitação, práticas de manejo e preparo do solo, dentre outros (EGHBALL et al., 1999; LA SCALA et al., 2009; USOWICZ & LIPIEC, 2009; VIDAL VÁZQUEZ et al., 2010). Esses fatores podem afetar, conseqüentemente, outras variáveis que estão diretamente relacionadas à produção e transporte de CO_2 do solo para a atmosfera, tais

como teor de carbono, porosidade e umidade do solo (LA SCALA et al., 2009).

Quantificar a complexidade dos solos é uma tarefa de grande importância para que se entendam os reflexos do manejo sobre a variabilidade espacial e temporal em seus atributos. Embora se espere que os modelos fractais levem a uma descrição mais precisa dos solos do que os métodos da geometria clássica, os parâmetros fractais não devem ser considerados como definitivos para descrever a heterogeneidade do sistema solo e sim como uma ferramenta mais precisa que pode nos auxiliar a obter percepções sobre as fontes e as consequências da complexidade observada (PACHEPSKY & CRAWFORD, 2004).

3 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido em área de cultivo de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.), localizada na Fazenda Santa Olga (21°21' de latitude sul e 48°11' de longitude oeste), município de Guariba, São Paulo, pertencente à Usina São Martinho. De acordo com Köppen, o clima local é classificado como Aw, definido como tropical de verão chuvoso e inverno seco, com temperatura média anual de 22,2 °C. A precipitação média anual registrada para o município é de 1.438 mm, com período de maior concentração entre outubro e março, e precipitações mais espaçadas, de menores intensidades, de abril a setembro.

O solo da área foi classificado como um Latossolo Vermelho eutroférico, textura argilosa (LVef) (EMBRAPA, 2006), há 8 anos em sistema de manejo cana crua, sobre o qual é depositado anualmente 12 t ha⁻¹ de resíduos da cultura. A variedade cultivada na área foi a SP86-155, que estava no oitavo corte. Nessa área, no dia 13 de julho de 2010, foi instalada uma malha regular de 60 x 60 m contendo 141 pontos, com distância mínima de separação de 0,5 m entre os pontos adensados do centro da malha amostral e de 10 m entre os demais (Figura 1). Esses pontos foram utilizados na caracterização da estrutura de variabilidade espacial e temporal da emissão de CO₂ (FCO₂) e atributos do solo.

As avaliações de FCO₂ foram conduzidas no período da manhã, das 8h às 9h30, nos dias 14, 15, 16, 19, 20, 23 e 26 de julho de 2010, correspondente aos dias Julianos 195, 196, 197, 200, 201, 204 e 207, respectivamente. Foram utilizados três sistemas portáteis LI-COR, modelo LI-8100, que monitoraram as variações da concentração de CO₂ no interior da câmara de solos por meio de espectroscopia de absorção óptica na região espectral do infravermelho (Figura 2). A câmara de solos é um sistema fechado com volume interno de 854,2 cm³ e área circular de 83,7 cm², sendo acoplada sobre os colares de PVC inseridos no solo em cada um dos 141 pontos amostrais (Figura 3). O modo de medida para a determinação de FCO₂ levou 90 segundos em cada um dos pontos da malha amostral e a concentração de CO₂ dentro da câmara foi determinada a cada 2,5 segundos, aproximadamente.

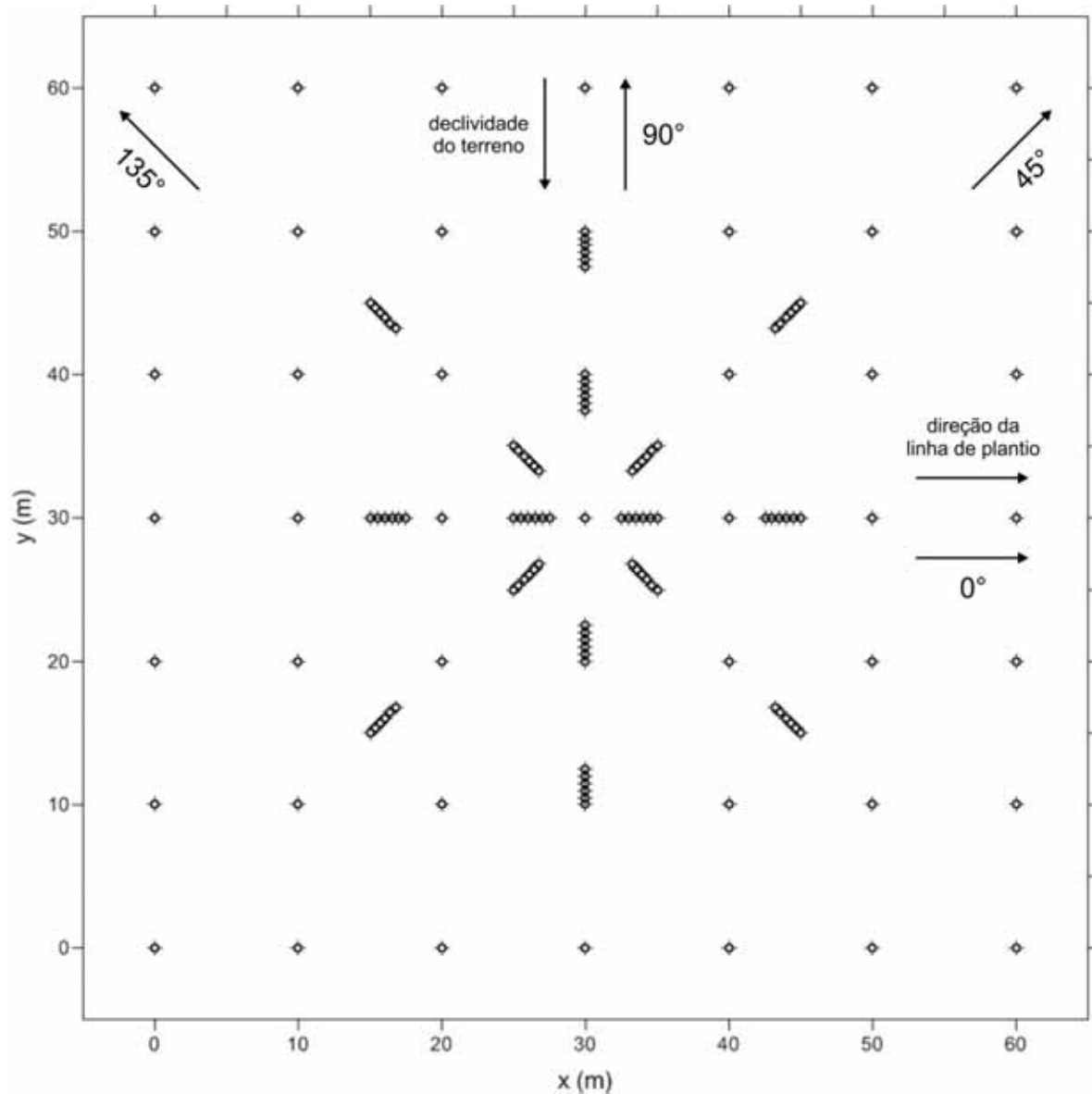


Figura 1. Representação esquemática da malha amostral com o posicionamento dos 141 pontos utilizados nas avaliações da variabilidade espacial e temporal da emissão de CO_2 e atributos do solo na área experimental.

A temperatura do solo (T_s) foi monitorada por meio de um sensor de temperatura que é parte integrante do sistema LI-8100. Consiste de uma haste de 0,20 m que foi inserida a 0,05 m no interior do solo, na região próxima ao local onde foram instalados os colares de PVC para a avaliação de FCO_2 . A umidade do solo (U_s) foi registrada utilizando-se um aparelho TDR, Time Domain Reflectometry (Hydrosense TM, Campbell

Scientific, Austrália), constituído por uma sonda com duas hastes de 0,12 m que foram inseridas no interior do solo, perpendicular em relação à superfície, também na região próxima aos colares de PVC. O valor de U_s é derivado a partir do tempo que uma corrente elétrica leva para percorrer a distância de 32 mm de uma haste a outra. As avaliações de T_s e U_s foram realizadas nos mesmos dias e períodos em que FCO_2 foi avaliado.

Ao final das avaliações de FCO_2 , T_s e U_s , foi conduzida amostragem de solo na camada de 0,0 a 0,1 m em cada um dos 141 pontos do gradeado. As amostras foram secas ao ar, destorroadas e peneiradas em peneira com abertura de 2 mm antes de serem submetidas às análises de rotina para a determinação dos teores de matéria orgânica (MO) e fósforo disponível (P), K, Ca, Mg e H+Al (RAIJ et al., 2001). O teor de nitrogênio total foi obtido pelo método da combustão a 1.440 °C com oxigênio em via seca. O estoque de carbono (EstC), por sua vez, foi calculado com base na massa de solo equivalente (BAYER et al., 2000), sendo expresso em função de camadas de solo com a mesma espessura, mas massas diferentes. É calculado por meio da expressão $EstC = (CO \times D_s \times E) / 10$, em que EstC é o estoque de carbono ($Mg\ ha^{-1}$), CO é o teor de carbono orgânico ($g\ kg^{-1}$), D_s é a densidade do solo ($kg\ dm^{-3}$) e E é a espessura da camada estudada (cm).

A granulometria (areia, silte e argila) foi determinada pelo método da pipeta, com o emprego de NaOH $0,1\ mol\ L^{-1}$ como dispersante químico e agitação em baixa rotação por 16 horas (EMBRAPA, 1997). A densidade do solo (D_s) foi determinada a partir de 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 D_s , com a distribuição de poros por tamanho determinada por meio de funil de placa porosa sob tensão de 0,6 m de coluna d'água em amostras previamente saturadas (EMBRAPA, 1997). O volume de poros retidos na amostra correspondeu aos microporos e a diferença calculada entre VTP e microporos foi correspondente aos macroporos. Já a porosidade livre de água (PLA) foi determinada considerando-se a diferença entre VTP e a fração da porosidade preenchida por água, que é equivalente à U_s .



Figura 2. Sistema LI-8100 utilizado nas avaliações da emissão de CO₂ do solo em área de cana-de-açúcar sob manejo cana crua.



Figura 3. Colares de PVC inseridos no solo para a avaliação da emissão de CO₂ em área de cana-de-açúcar sob manejo cana crua.

A dependência espacial de FCO₂ e demais atributos do solo foi determinada por meio da análise do variograma experimental (WEBSTER & OLIVER, 1990), em que a estimativa da semivariância, em uma dada distância de separação h , é definida como:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (3)$$

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 $Z(x_i + h)$ corresponde ao valor da variável Z no ponto $x_i + h$.

A dimensão fractal (D_F), que resume a dependência espacial, foi estimada pelo método do variograma (VIDAL VÁZQUEZ et al., 2005), em que a estrutura espacial das superfícies fractais pode ser descrita por meio de uma relação de lei de potência:

$$|z(x) - z(x + h)| \propto h^H \quad (4)$$

sendo z o valor do atributo analisado, x a sua localização espacial, h a distância de separação e H a codimensão fractal ou expoente de Hölder (HUANG & BRADFORD, 1992). Se $0 < H \leq 1$, a codimensão fractal é definida como:

$$H = d - D_F \quad (5)$$

onde D_F é a dimensão fractal e d é a dimensão Euclidiana do sistema no qual a distribuição fractal é descrita. Para linhas, planos e superfícies, respectivamente, $d = 1$, 2 e 3. Assim, para a distribuição de um determinado atributo no solo, sua dimensão fractal é dada por:

$$D_F = 3 - H \quad (6)$$

Dessa forma, comparando as equações (3) e (4), podemos dizer que, quando os

dados apresentam comportamento fractal em determinada escala, temos a seguinte proporção:

$$\hat{\gamma}(h) \propto h^{2H} \quad (7)$$

ou que

$$\log[\hat{\gamma}(h)] \propto 2H \log[h] \quad (8)$$

De acordo com a equação (8), a inclinação do variograma experimental na escala logarítmica é igual a $2H$. O expoente H pode ser obtido por meio da análise de regressão linear no gráfico dessa equação (PERFECT & KAY, 1995).

$$H = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\log[\hat{\gamma}(h)]}{2 \log[h]} \quad (9)$$

A presença dessa relação linear indica que o modelo fractal é apropriado para simular a dependência espacial na escala estudada (PACHEPSKY & CRAWFORD, 2004). Quando $H=0$, D_F assume valor igual a 3, o que representa ausência de estrutura de variabilidade espacial ou não existe relação entre a forma como o atributo varia no espaço e h . Neste caso, não existe dimensão fractal e a metodologia não se aplica. Por outro lado, quando $0 < H < 3$, a dimensão fractal assume valores que caracterizam a presença de estrutura de variabilidade espacial e dependência do atributo estudado com h (PALMER, 1988).

O cálculo de D_F , derivado a partir dos variogramas experimentais isotrópicos e anisotrópicos, foi realizado a partir de metodologia desenvolvida por MIRANDA (2000). Foram consideradas as escalas (a/h) com alcances a de 5, 10, 20, 30, 40, 50 e 60 m e distâncias de separação h de 0,5, 1,0, 2,0, 3,0, 4,0, 5,0 e 6,0 m, respectivamente. Os variogramas experimentais anisotrópicos foram calculados para as direções 0° , 45° , 90° e 135° (Figura 1), com $\pm 45^\circ$ de tolerância. A direção 0° representou o sentido paralelo

à linha de plantio da cultura, 90° a declividade do terreno e as direções 45° e 135° corresponderam ao sentido da operação de eliminação da soqueira da cana-de-açúcar por ocasião da reforma do canavial. Posteriormente, foram construídos fractogramas, que mostram os valores D_F em função de diferentes distâncias ou ao longo dos dias de estudo, sendo utilizados na análise da dependência espacial e temporal entre FCO₂ e os demais atributos do solo. Para o estudo da variabilidade temporal, foram utilizados os dados diários de FCO₂, Ts, Us e PLA. Já para a análise da variabilidade espacial, foram consideradas as médias das avaliações de FCO₂ e dos demais atributos do solo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Variabilidade temporal da emissão de CO₂ do solo

A média da emissão de CO₂ do solo (FCO₂) variou de 1,26 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (dia 197) a 1,77 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (dia 195) (Tabela 1), sendo semelhantes àquelas observadas em outros estudos conduzidos na mesma região e em solo sob cultivo de cana-de-açúcar (PANOSSO et al., 2008; BRITO et al., 2010). Os coeficientes de variação (CV) de FCO₂, de forma geral, aumentaram à medida que FCO₂ diminuiu, variando de 38,16% (1,77 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) a 90,87% (1,26 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Com exceção dos dias 196 e 197, foram observados valores de CV similares aos citados na literatura para FCO₂ (LA SCALA et al., 2000a; SCHWENDENMANN et al., 2003; EPRON et al., 2004; KONDA et al., 2008; BRITO et al., 2009; PANOSSO et al., 2011; TEIXEIRA et al., 2011).

Tabela 1. Estatística descritiva para a emissão de CO₂ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e demais atributos do solo: temperatura (°C), umidade (%) e porosidade livre de água (%), em todos os dias de avaliações.

Dia	Emissão de CO ₂		Temperatura		Umidade		PLA	
	Média	CV	Média	CV	Média	CV	Média	CV
195	1,77	38,16	19,32	1,79	20,29	25,46	33,74	19,28
196	1,42	80,70	18,84	1,97	20,85	23,11	33,05	17,63
197	1,26	90,87	20,08	3,04	19,05	21,99	34,84	18,49
200	1,47	73,40	20,29	4,30	20,70	20,89	33,06	19,17
201	1,48	48,08	19,03	3,25	19,00	20,61	34,51	16,52
204	1,61	47,48	19,61	2,65	20,23	20,27	33,48	16,77
207	1,50	51,74	18,67	3,19	17,62	22,53	36,21	16,50

N = 141. CV = coeficiente de variação (%); PLA = porosidade livre de água.

Em solo sem cobertura vegetal e sob cultivo de trigo em Ottawa, Canadá, foram observados valores de CV que variaram de 25% a 69% em estudo que levou em consideração a variabilidade espacial de FCO₂ (ROCHETTE et al., 1991). Da mesma forma, na região central da Itália, em área de floresta de carvalho, o CV da respiração do solo variou entre 31% e 48% (TEDESCHI et al., 2006). Em solo sob cultivo de cana-de-açúcar em sistema cana crua, no município de Jaboticabal, São Paulo, os valores

de FCO₂ variaram de 1,39 a 2,15 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ em função da topografia do terreno e apresentaram CV entre 24,5% e 34,2% (BRITO et al., 2010). Ainda, em estudo sobre a variabilidade espacial e temporal de FCO₂, conduzido em área sob cultivo de cana-de-açúcar no município de Guariba, São Paulo, o CV de FCO₂ variou de 22,6% a 63,5% (PANOSSO et al., 2009). Neste estudo, quando considerado o sistema de manejo da cultura, o CV variou entre 22,6% e 26,2% para cana crua (1,97 a 2,16 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e entre 43,6% e 63,5% para cana queimada (2,03 a 5,29 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

A média da temperatura do solo (Ts) apresentou pequena variação de 1,62 °C ao longo dos dias avaliados, ficando entre 18,67 °C (dia 207) e 20,29 °C (dia 200). A umidade do solo (Us), por sua vez, variou de 17,62% a 20,85% para os dias 207 e 196, respectivamente. Já a porosidade livre de água (PLA), variou entre 33,05% (dia 196) e 36,21% (dia 207), com média de 33,97% (Tabela 1). Os valores de CV, de acordo com a classificação de WARRICK & NIELSEN (1980) para a variabilidade espacial dos atributos do solo, foram considerados baixos para Ts (CV < 12%) e moderados para Us e PLA (12% < CV < 24%), com exceção do dia 195, que apresentou Us de 25,46%, sendo considerado alto. Para FCO₂, em todos os dias avaliados, o CV foi classificado como alto (CV > 24%), o que representa grande variação espacial e justifica o uso da geoestatística na modelagem de sua dependência espacial.

As pequenas variações nas amplitudes de Ts, Us e PLA provavelmente se devem à presença da palhada sobre a superfície do solo, o que pode ter tornado a distribuição desses atributos mais homogênea e refletido nas variações de FCO₂ ao longo dos dias. Sabe-se que os principais fatores que controlam as variações temporais de FCO₂ são Ts e Us (TEDESCHI et al., 2006; KOSUGI et al., 2007; OHASHI & GYOKUSEN, 2007; CONCILIO et al., 2009) e, dessa forma, a presença de resíduos de cultura sobre a superfície do solo pode favorecer menores valores de Ts, além de tornar as variações em FCO₂ menos sensíveis a Us após a ocorrência de precipitações pluviométricas, quando comparadas às áreas sob sistema de manejo com queima (PANOSSO et al., 2009).

Em estudo realizado em área de floresta na região Amazônica foi observado que a taxa de respiração do solo foi alta no período das chuvas e baixa durante o período

seco (DAVIDSON et al., 2000). Da mesma forma, LA SCALA et al. (2000a) observaram, em solo sem cobertura vegetal em Jaboticabal, São Paulo, aumento de 63% em FCO₂ após período chuvoso. Na região de Guariba, São Paulo, em área de cana-de-açúcar, foram encontrados resultados que indicaram que Us determinou as variações temporais de FCO₂, tanto em área sob sistema de cultivo cana crua, quanto em área de manejo com queima (PANOSSO et al., 2009). Em estudo conduzido em área de floresta na Guiana Francesa, EPRON et al. (2006) encontraram correlação positiva entre FCO₂ e Ts, o que se deve provavelmente ao aumento da atividade dos micro-organismos do solo com o aumento da temperatura (LLOYD & TAYLOR, 1994; EPRON et al., 1999; BURTON & PREGITZER, 2003; EPRON et al., 2006; RYU et al., 2009).

A análise da dimensão fractal (D_F) de FCO₂, derivada a partir dos variogramas isotrópicos, apresentou valores de D_F com significado topológico ($D_F < 3$) apenas para as escalas com alcances de 20 a 60 m na maioria dos dias avaliados, com exceção do dia 195, em que $D_F < 3$ apenas nas escalas de 50 e 60 m (Tabela 2). Sabe-se que D_F não é função constante da escala e que seu padrão de variação pode não se repetir de uma escala para outra (PALMER, 1988). Assim, é possível observar uma tendência geral de diminuição de D_F ao longo dos dias avaliados, principalmente nas escalas onde $D_F < 3$, e também com o aumento da escala, evidenciando melhor estrutura de variabilidade na média e longa escalas. O erro padrão da estimativa da dimensão fractal (EP) também apresentou tendência de diminuição com o aumento da escala, o que pode ser atribuído à presença de menor dependência espacial na curta escala. Em escalas menores, com alcances de até 10 m, não foram observados valores de D_F com significado topológico. Nesses casos, quando $D_F \geq 3$, os valores de inclinação da reta do logaritmo da semivariância em função do logaritmo da distância (Figuras 4 e 5) são pequenos, o que indica ausência de estrutura espacial ou temporal.

Em estudo conduzido em área de cultivo convencional de soja, no município de Jaboticabal, São Paulo, não foram observados valores de D_F com significado topológico para a estrutura de variabilidade espacial isotrópica de FCO₂ na escala/distância de separação 8/2 m (LA SCALA et al., 2009). As variações temporais de D_F observadas no estudo são atribuídas às mudanças na heterogeneidade da variabilidade espacial e, no

caso de FCO₂, essas alterações ocorrem devido às modificações nos padrões de variabilidade de seus fatores controlantes, como Ts e Us (EPRON et al., 2006). Além disso, para a maioria dos fenômenos naturais, diversos estudos têm demonstrado que a escala, a localização ou mesmo a orientação dos pontos amostrais podem tornar instável a estimativa de D_F (BURROUGH, 1981; KLINKENBERG, 1992; XU et al., 1993; SUN et al., 2006; ABEDINI & SHAGHAGHIAN, 2009).

Tabela 2. Valores da dimensão fractal (D_F) \pm o erro padrão (EP) da emissão de CO₂ do solo (FCO₂), derivados a partir dos variogramas experimentais isotrópicos em diferentes escalas (m), em todos os dias de avaliação.

a/h	Dia						
	F195	F196	F197	F200	F201	F204	F207
5/0,5	3,06 \pm 0,07	3,03 \pm 0,07	3,07 \pm 0,05	3,13 \pm 0,07	3,18 \pm 0,05	3,09 \pm 0,08	3,06 \pm 0,05
10/1,0	3,01 \pm 0,07	3,02 \pm 0,02	3,03 \pm 0,02	3,00 \pm 0,04	3,04 \pm 0,04	2,98 \pm 0,04	3,01 \pm 0,03
20/2,0	2,97 \pm 0,03	2,96 \pm 0,03*	2,95 \pm 0,03*	2,95 \pm 0,02*	2,93 \pm 0,04*	2,93 \pm 0,03*	2,94 \pm 0,03*
30/3,0	2,97 \pm 0,03	2,96 \pm 0,02*	2,93 \pm 0,02*	2,93 \pm 0,02*	2,90 \pm 0,03*	2,90 \pm 0,02*	2,90 \pm 0,03*
40/4,0	2,99 \pm 0,01	2,95 \pm 0,02*	2,91 \pm 0,02*	2,90 \pm 0,02*	2,89 \pm 0,02*	2,89 \pm 0,02*	2,89 \pm 0,02*
50/5,0	2,98 \pm 0,01*	2,95 \pm 0,02*	2,91 \pm 0,01*	2,90 \pm 0,01*	2,87 \pm 0,02*	2,88 \pm 0,01*	2,88 \pm 0,02*
60/6,0	2,97 \pm 0,01*	2,95 \pm 0,01*	2,91 \pm 0,02*	2,89 \pm 0,01*	2,85 \pm 0,01*	2,86 \pm 0,01*	2,86 \pm 0,01*

* Valores de D_F com significado topológico ($D_F < 3$). a = alcance; h = distância de separação.

O estudo da variabilidade temporal de FCO₂, Ts, Us e PLA foi realizado por meio da construção de fractogramas, em que os valores de D_F , derivados a partir dos variogramas experimentais isotrópicos, foram analisados ao longo dos dias de estudos para a curta (10 m), média (30 m) e longa (60 m) escalas (Figuras 6 e 7). Para FCO₂, a média e longa escalas mostraram valores de D_F com significado topológico ($D_F < 3$) e com tendência de diminuição ao longo dos dias de avaliações. Já na curta escala, foram observados apenas valores de D_F sem significado topológico ($D_F \geq 3$), indicando ausência de dependência temporal para FCO₂ durante todo o período. Os demais atributos do solo avaliados não apresentaram estrutura de variabilidade com padrão de comportamento semelhante à FCO₂. De forma geral, os menores valores de D_F para Ts, Us e PLA foram observados na curta escala e os maiores na longa e média escalas. Ainda, os valores de D_F apresentaram significado topológico ou não dependendo do dia e da escala analisada (Figuras 6 e 7).

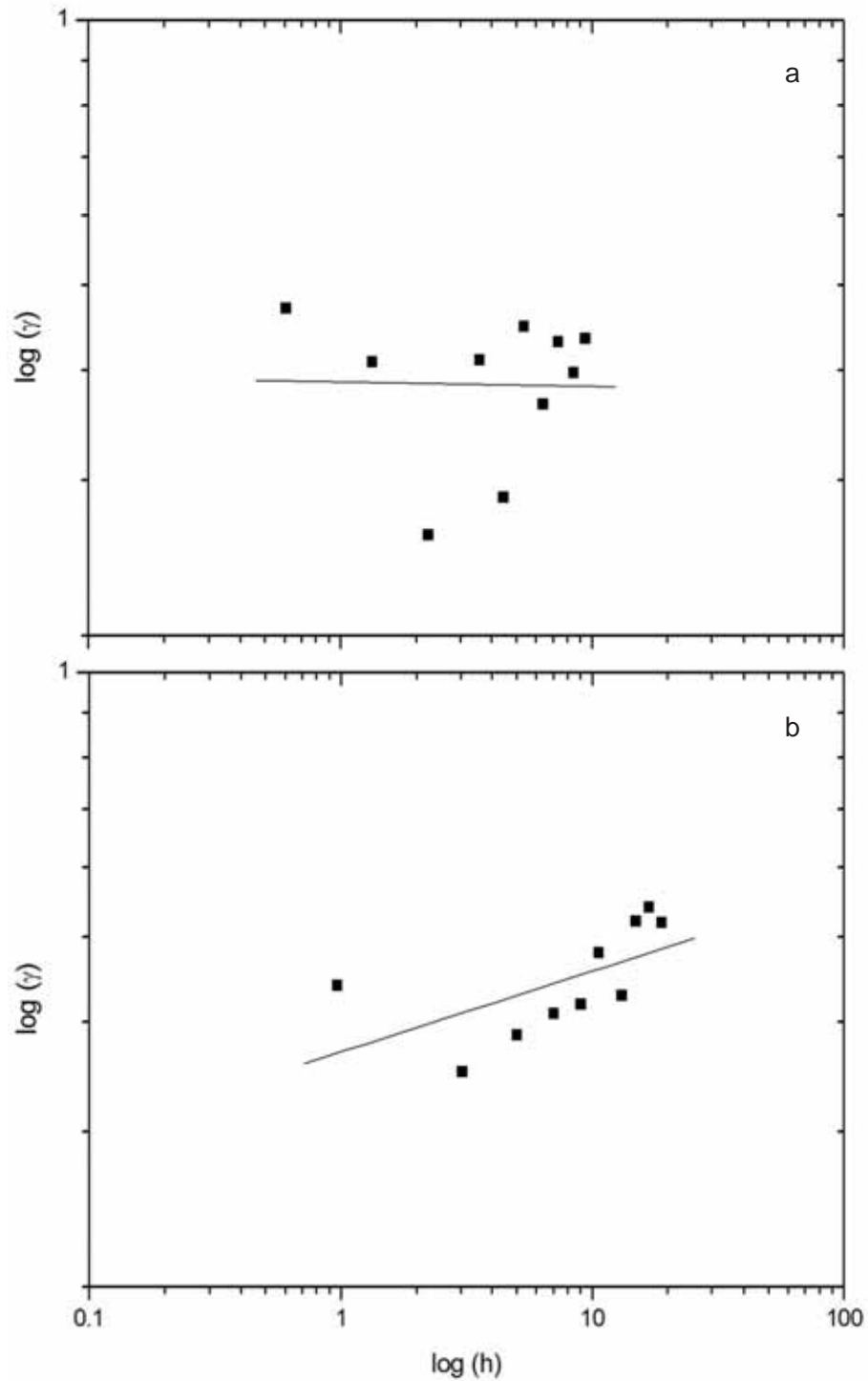


Figura 4. Logaritmo da semivariância em função do logaritmo da distância para a emissão de CO_2 do solo no dia 200 em diferentes escalas: a) 10 m, $D_F = 3,00$; e b) 20 m, $D_F = 2,95$. Note que em (a) o ângulo de inclinação da reta de regressão é próximo de 0° , o que torna D_F sem significado topológico.

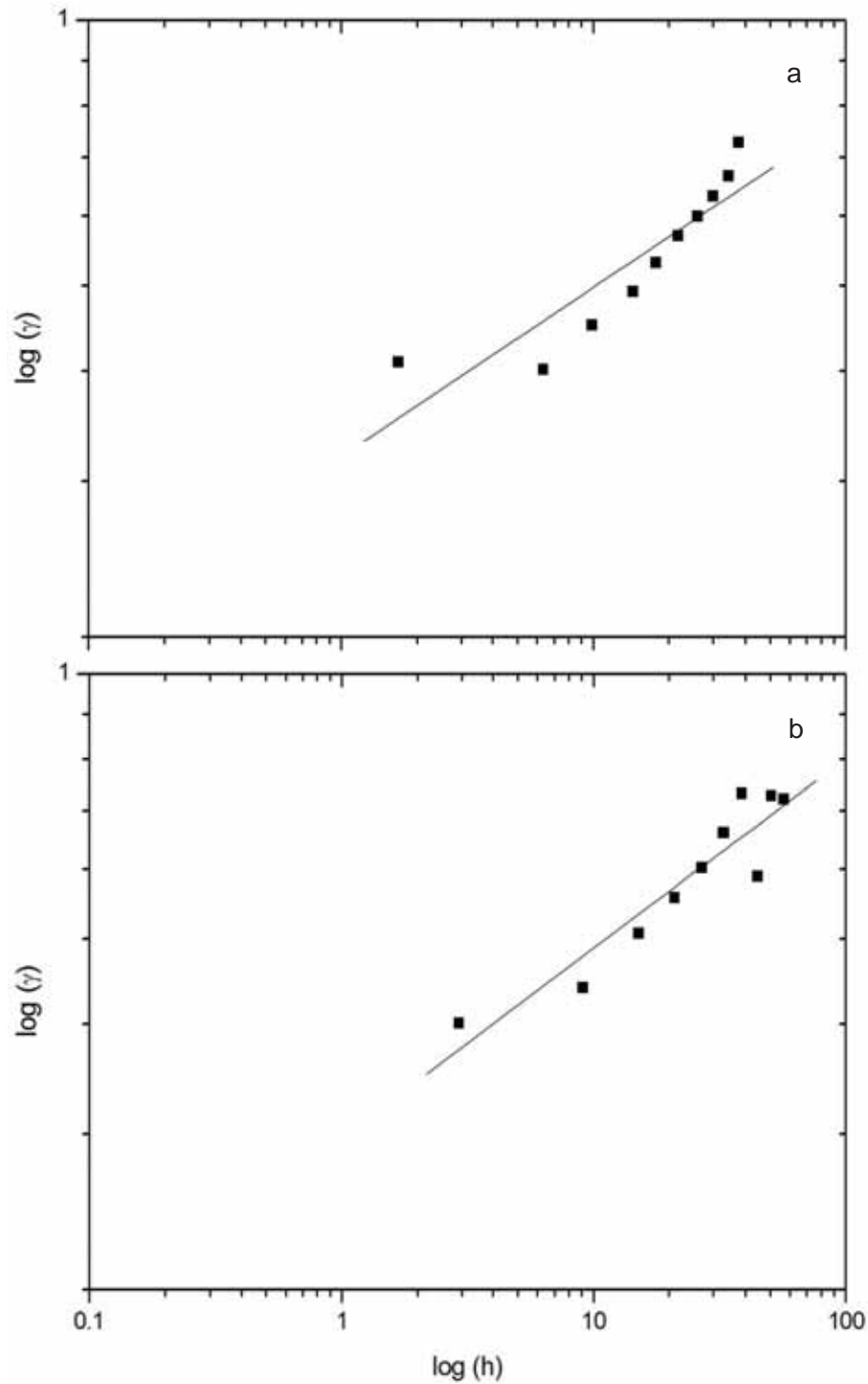


Figura 5. Logaritmo da semivariância em função do logaritmo da distância para a emissão de CO_2 do solo no dia 200 em diferentes escalas: a) 40 m, $D_F = 2,90$; e b) 60 m, $D_F = 2,89$. Note que em (a) e (b) o ângulo de inclinação da reta de regressão torna o valor de D_F com significado topológico.

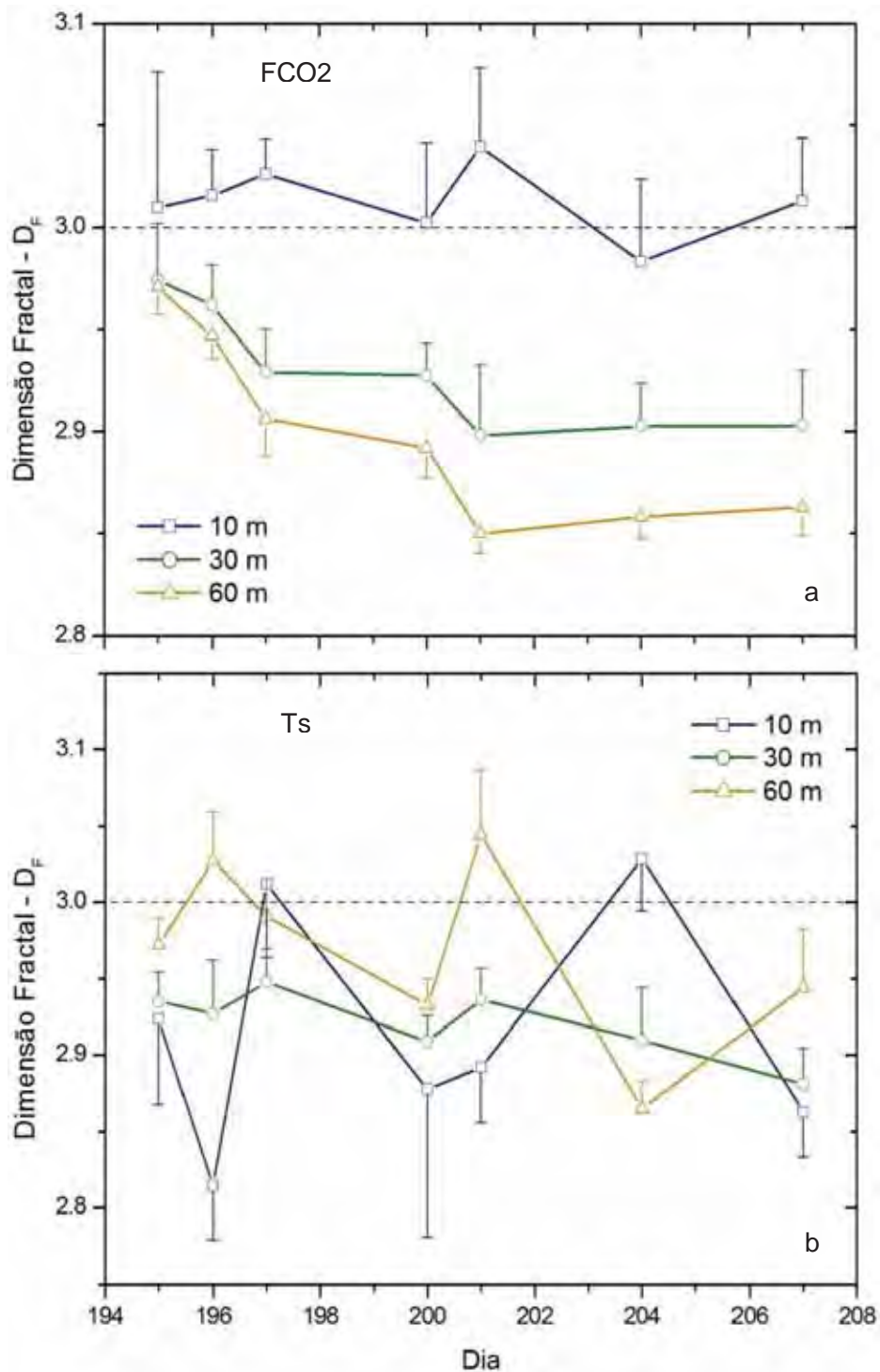


Figura 6. Fractogramas calculados a partir dos variogramas experimentais isotrópicos, com os valores de dimensão fractal (D_F) em função do dia de avaliação, para curta (10 m), média (30 m) e longa (60 m) escalas. a) FCO2 = emissão de CO_2 do solo; e b) Ts = temperatura do solo.

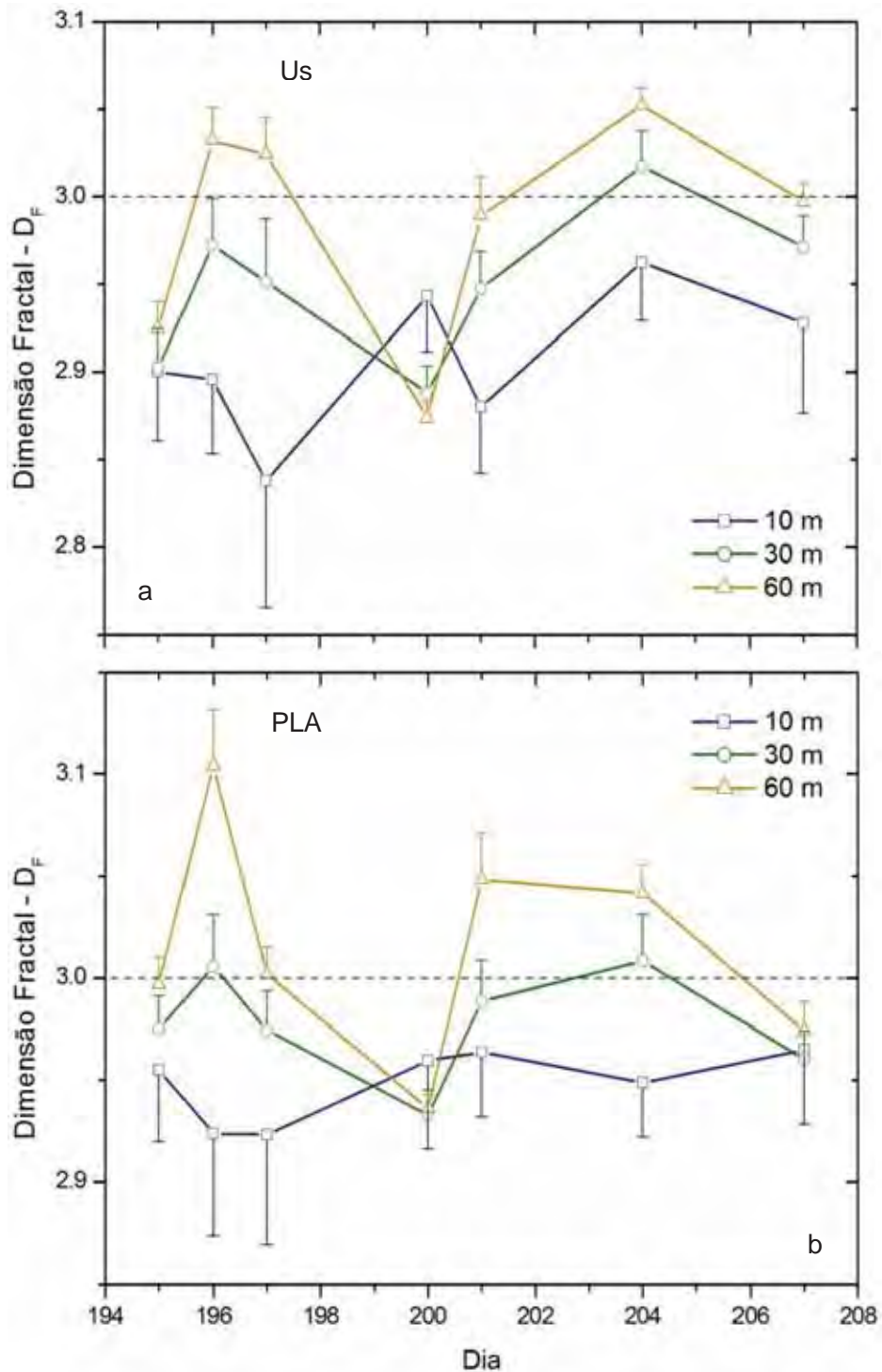


Figura 7. Fractogramas calculados a partir dos variogramas experimentais isotrópicos, com os valores de dimensão fractal (D_F) em função do dia de avaliação, para curta (10 m), média (30 m) e longa (60 m) escalas. a) Us = umidade do solo; e b) PLA = porosidade livre de água.

Para avaliar se os padrões de variabilidade temporal de FCO₂, Ts, Us e PLA dependem da direção de estudo, foi realizada uma caracterização anisotrópica da área. As direções 0°, 45°, 90° e 135° foram comparadas inicialmente por meio de análise de variância, não sendo observadas diferenças significativas entre as médias de FCO₂ ao longo do período estudado, com exceção do dia 196, em que a direção 0° diferiu significativamente de 45° pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade (Tabela 3). Da mesma forma, as médias de Ts, Us e PLA também não apresentaram diferenças estatísticas significativas para as diferentes direções (Tabela 3). É provável que a presença da palhada sobre a superfície do solo, aliada à ausência de chuva durante o período, tenham contribuído para homogeneizar a distribuição desses atributos na área para as diferentes direções. PANOSSO (2011), ao caracterizar a anisotropia em área sob sistema cana crua, no entanto, observou valores significativamente menores para FCO₂ e PLA e significativamente maiores para Us na direção 0°. Para Ts, no entanto, não encontrou diferença significativa ao analisar as diferentes direções.

Tabela 3. Estatística descritiva para a emissão de CO₂ ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e demais atributos do solo: temperatura (°C), umidade (%) e porosidade livre de água (%), para as diferentes direções de estudo.

	0°		45°		90°		135°	
	Média	CV	Média	CV	Média	CV	Média	CV
F195	1,91 a	35,72	1,70 a	41,87	1,73 a	36,09	1,80 a	35,19
F196	1,87 a	74,26	1,00 b	84,10	1,40 ab	73,03	1,35 ab	70,78
F197	1,08 a	80,26	1,06 a	106,67	1,40 a	78,36	1,52 a	91,08
F200	1,36 a	71,40	1,35 a	80,84	1,54 a	63,75	1,70 a	65,18
F201	1,32 a	44,66	1,49 a	49,25	1,47 a	44,59	1,72 a	39,69
F204	1,60 a	39,83	1,75 a	50,10	1,43 a	43,81	1,80 a	45,48
F207	1,46 a	50,68	1,56 a	55,70	1,49 a	46,86	1,65 a	43,98
Fm*	1,80 a	57,61	1,72 a	62,35	1,51 a	48,42	1,82 a	52,27
Ts*	19,44 a	1,33	19,41 a	1,52	19,55 a	1,53	19,38 a	1,35
Us*	19,66 a	11,44	18,76 a	11,48	18,86 a	15,30	20,29 a	13,87
PLA*	33,30 a	18,33	35,49 a	14,83	34,06 a	14,49	34,87 a	11,41

N = 141, exceto em (*), onde N = 7 x 141. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. CV = coeficiente de variação (%); Fm = emissão média de CO₂ do solo; Ts = temperatura do solo; Us = umidade do solo; PLA = porosidade livre de água.

Para a maioria dos dias avaliados, os menores e os maiores valores de FCO₂ foram observados, respectivamente, nas direções 45° e 135°, que correspondem ao

sentido da operação de eliminação da soqueira da cultura (Tabela 3). As emissões de CO₂, calculadas ao final do período de treze dias, considerando-se a área abaixo da curva de emissão para as diferentes direções, também indicam que o ângulo de 135° foi o que apresentou o maior valor, com emissão de 0,76 Mg ha⁻¹ de CO₂. Nas demais direções, as emissões de CO₂ foram de 0,66, 0,65 e 0,67 Mg ha⁻¹ de CO₂ para 0°, 45° e 90°, respectivamente. Estes resultados, no entanto, são distintos dos encontrados em estudo realizado em área de cultivo de cana-de-açúcar sob sistema cana crua na mesma região e tipo de solo, onde os menores valores de FCO₂ foram observados na direção 0°, sendo 29% inferiores aos registrados nas direções 45° e 135° (PANOSSO, 2011).

A partir dos variogramas experimentais anisotrópicos, foi calculada a dimensão fractal ($\log(\gamma) \times \log(h)$) de FCO₂ para as direções 0°, 45°, 90° e 135°. Por meio dos fractogramas apresentados nas Figuras 8 e 9 é possível observar que, de forma geral, todas as direções apresentaram valores de D_F sem significado topológico (D_F ≥ 3) na curta escala (de 5 a 10 m), tendência geral de diminuição dos valores de D_F com o aumento da escala e comportamento distinto dos fractogramas para cada direção em estudo. Apesar dos resultados da análise de variância para as diferentes direções terem evidenciado comportamento isotrópico para FCO₂ na área, é possível observar maior estrutura de variabilidade temporal dessa variável na direção 0°, que representa o sentido paralelo à linha de plantio da cultura. Nessa direção, foram observados os menores valores de D_F ao longo dos dias, principalmente na média e longa escalas, caracterizando maior dependência espacial acima de 20 m (Figuras 8 e 9).

De forma semelhante, em estudo conduzido na mesma região e em área sob cultivo de cana crua, os menores valores de D_F foram encontrados na direção 0°, que também representava a linha de plantio da cultura (PANOSSO, 2011). Ainda nesse estudo, os fractogramas de FCO₂ mostraram tendência de aumento dos valores de D_F com o aumento da escala. Por outro lado, em área de cultivo convencional de soja no município de Jaboticabal, São Paulo, os menores valores de D_F foram observados principalmente na direção perpendicular à linha de plantio, indicando possível influência do manejo nos padrões de variabilidade de FCO₂ (LA SCALA et al., 2009).

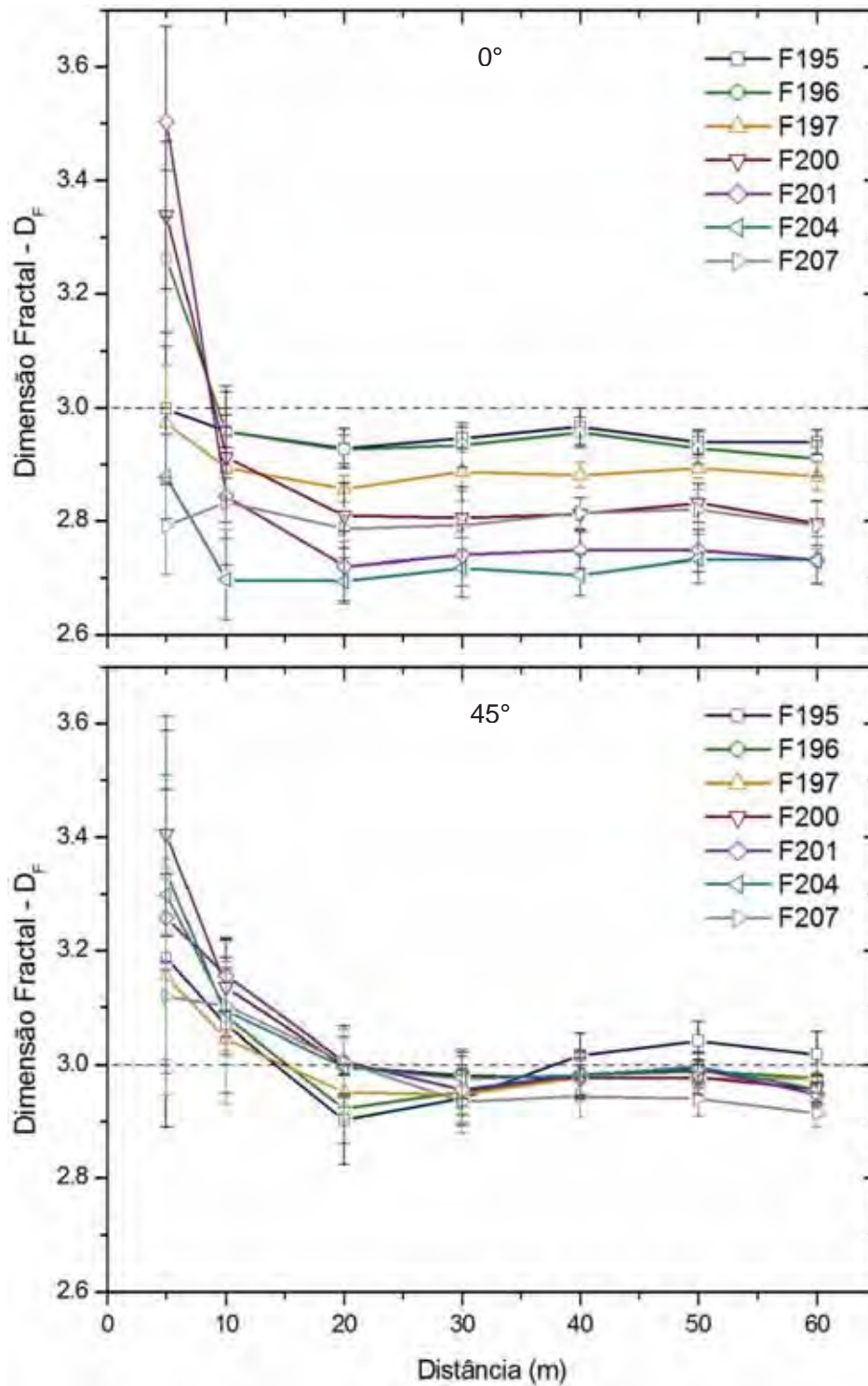


Figura 8. Fractogramas da emissão de CO_2 do solo para todos os dias de avaliações, calculados a partir de variogramas anisotrópicos para as direções 0° e 45° , com os valores de dimensão fractal (D_F) em função da escala.

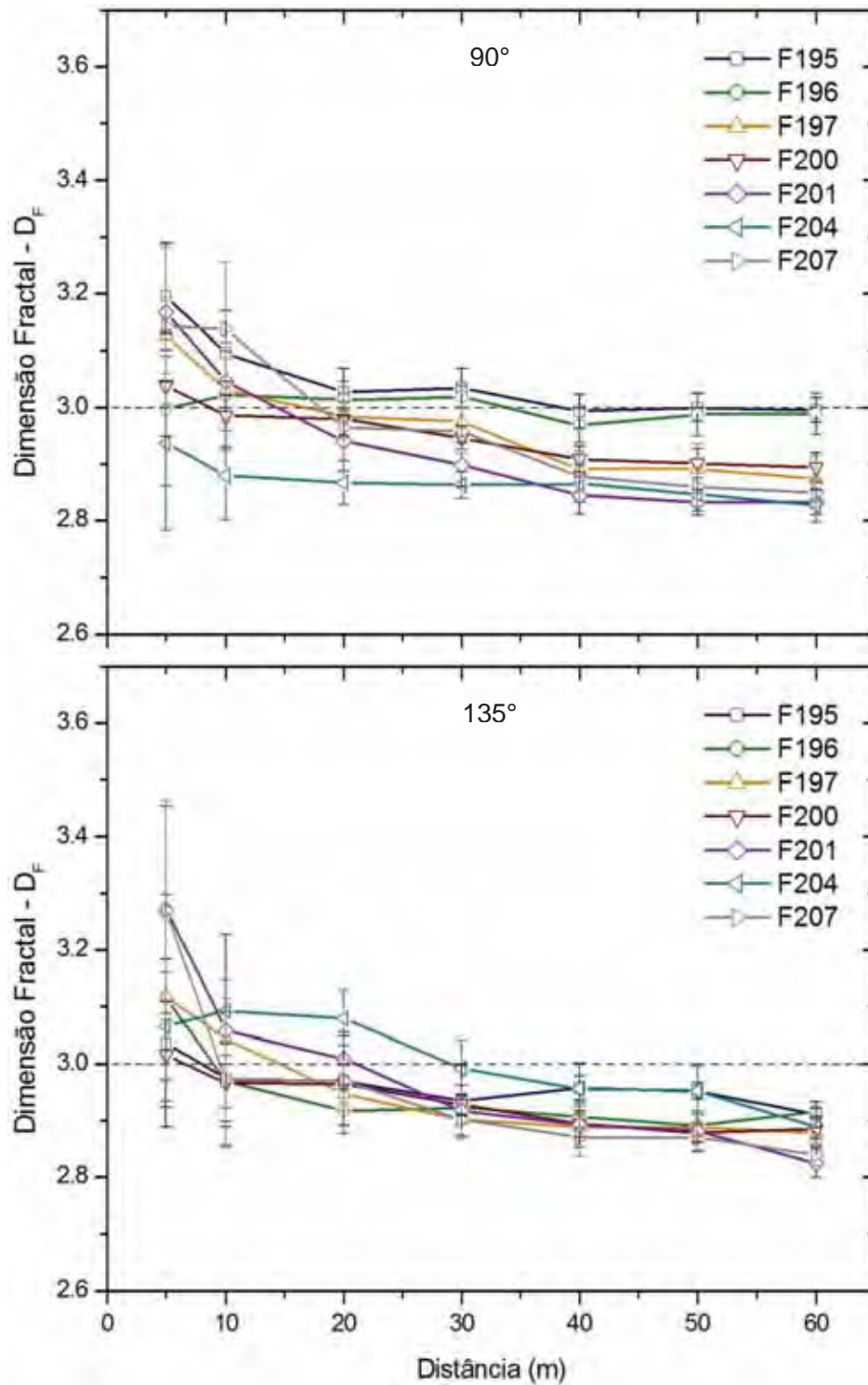


Figura 9. Fractogramas da emissão de CO_2 do solo para todos os dias de avaliações, calculados a partir de variogramas anisotrópicos para as direções 90° e 135° , com os valores de dimensão fractal (D_F) em função da escala.

Assim, os resultados observados no presente estudo indicam que as práticas de manejo relacionadas ao preparo e plantio na área seriam as responsáveis pelas alterações nas relações entre FCO₂ e outros atributos do solo, tais como Ts, Us e PLA, influenciando a variabilidade temporal da emissão de CO₂ do solo.

4.2 Variabilidade espacial da emissão de CO₂ e atributos do solo

Quando considerada ao longo dos sete dias de avaliações, FCO₂ apresentou valor médio de 1,51 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, com valor mínimo de 0,02 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e máximo de 5,28 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, além de CV de 61,46%. Os valores de Ts, por sua vez, variaram de 16,99 °C a 23,61 °C, com média de 19,40 °C e CV de 4,18%. Já Us apresentou valor mínimo de 8% e máximo de 35%, com média de 19,68% e CV de 22,84% (Tabela 4). Essas médias, semelhantes às apresentadas na Tabela 1, são menores que as obtidas em estudo realizado em Ribeirão Preto, São Paulo, em área de cana-de-açúcar sob sistema cana crua, em que foi observada variação de 2,97 a 7,01 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e média de 4,99 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para FCO₂, além de valores médios para Ts de 25,3 °C e para Us de 43,1% (LA SCALA et al., 2006). Este estudo, no entanto, foi conduzido em período no qual as médias de temperatura e precipitação são normalmente maiores, o que poderia justificar os valores mais elevados de FCO₂.

O teor de matéria orgânica (MO) e o estoque de carbono do solo (EstC) também são importantes fatores relacionados à FCO₂. De forma geral, MO é uma das principais fontes de produção de CO₂ no solo, promovida pela atividade microbiológica (BALL et al., 1999; DOMINY et al., 2002; KEMMITT et al., 2008). A média de 47,65 g dm⁻³ para MO (Tabela 4) foi superior à encontrada em outros estudos conduzidos em área de cana-de-açúcar em sistema de cultivo cana crua (BLAIR, 2000; PANOSSO et al., 2011) e, por outro lado, semelhante à estudo realizado em Pradópolis, São Paulo, também em área com colheita mecanizada (RAZAFIMBELO et al., 2006). Ainda, a facilidade com que o carbono presente no solo pode ser decomposto pelos micro-organismos, medida por meio da relação C/N, também pode influenciar FCO₂. Quanto maior o valor dessa

relação, maior será a dificuldade para que a matéria orgânica seja decomposta e menor será o fluxo de CO₂ do solo para a atmosfera. No caso da área em estudo, o valor elevado observado para a relação C/N, de 44,52 (Tabela 4), aliado a outros fatores, pode ter contribuído para que MO apresentasse essa média relativamente alta.

Tabela 4. Estatística descritiva da emissão de CO₂, temperatura e umidade do solo, ao longo dos sete dias de avaliação, e atributos físicos e químicos do solo na profundidade de 0,0 a 0,1 m.

	Média	DP	EP	Mínimo	Máximo	CV
FCO ₂ (μmol m ⁻² s ⁻¹)*	1,51	0,93	0,03	0,02	5,28	61,46
Ts (°C)*	19,40	0,81	0,03	16,99	23,61	4,18
Us (%)*	19,68	4,50	0,14	8,00	35,00	22,84
Ds (g cm ⁻³)	1,50	0,14	0,01	1,11	1,86	9,19
PLA (%)*	33,97	5,06	0,43	22,00	46,36	14,90
VTP (%)	53,89	4,33	0,37	43,67	65,15	8,03
Macro (%)	14,72	4,87	0,41	6,47	28,13	33,09
Micro (%)	39,21	2,66	0,23	33,35	45,10	6,78
Areia (g kg ⁻¹)	365,17	13,97	1,20	335,90	404,27	3,83
Silte (g kg ⁻¹)	130,14	22,39	1,89	73,16	186,76	17,21
Argila (g kg ⁻¹)	506,80	22,63	1,91	456,55	561,48	4,47
pH	5,12	0,21	0,02	4,50	5,50	4,16
MO (g dm ⁻³)	47,65	5,49	0,47	34,78	61,26	11,53
EstC (Mg ha ⁻¹)	1268,80	177,90	15,10	865,80	1727,70	14,02
C/N	44,52	29,18	2,59	10,42	138,82	65,54
P (mg dm ⁻³)	23,21	4,45	0,38	12,00	35,26	19,17
SB (mmol _c dm ⁻³)	65,65	6,57	0,56	46,55	79,95	10,01
CTC (mmol _c dm ⁻³)	108,55	5,53	0,47	94,66	122,24	5,10
V (%)	60,97	5,01	0,43	48,33	74,99	8,22

N = 141, exceto em (*), onde N = 7 x 141. DP = desvio padrão; EP = erro padrão; CV = coeficiente de variação (%); FCO₂ = emissão de CO₂ do solo; Ts = temperatura do solo; Us = umidade do solo; Ds = densidade do solo; PLA = porosidade livre de água; VTP = volume total de poros; Macro = macroporosidade; Micro = microporosidade; Areia = teor de areia; Silte = teor de silte; Argila = teor de argila; MO = teor de matéria orgânica; EstC = estoque de carbono; C/N = relação C/N; P = fósforo disponível; SB = soma de bases; CTC = capacidade de troca de cátions; V = saturação por bases.

A melhoria das condições químicas do solo também contribui para o aumento da atividade microbológica e, conseqüentemente, das emissões de CO₂ para a atmosfera. A elevação do pH do solo, em decorrência da calagem, afeta a população de micro-organismos por proporcionar um ambiente mais favorável à sua atividade, elevando a respiração do solo a partir do momento da aplicação de calcário e com o aumento de

suas doses (FUENTES et al., 2006). O teor de fósforo disponível também é considerado um fator limitante à atividade microbiana por ser um elemento essencial em seu metabolismo (DUAH-YENTUMI et al., 1998). Em adição, a preservação da palhada sobre a superfície do solo em áreas de cana-de-açúcar favorece o incremento de MO, que por sua vez altera os atributos químicos e melhora a fertilidade do solo (CANELLAS et al., 2003), além de contribuir com 56% a 82% da CTC de solos sob condições tropicais, retendo cátions e evitando perdas por lixiviação (RAIJ, 1981).

Os atributos físicos do solo, de forma geral, apresentaram CV moderado ou baixo, com exceção da macroporosidade (Tabela 4). A presença de cobertura vegetal sobre a superfície do solo pode ter contribuído de forma a homogeneizar a distribuição espacial de alguns atributos na área. Resultados semelhantes foram observados em outros estudos na mesma região e em área de cana-de-açúcar sob sistema cana crua (BRITO et al., 2009; PANOSSO et al., 2011). A densidade do solo (D_s) apresentou valor médio de $1,50 \text{ g cm}^{-3}$ (Tabela 4), o que pode ser devido ao número elevado de cortes desde o plantio da cultura e pelo tráfego mais intenso de máquinas agrícolas na área, característica desse sistema de cultivo e que leva à maior compactação do solo. Sabe-se que a porosidade e D_s são responsáveis pela oxigenação e transporte de CO_2 para a atmosfera (XU & QI, 2001; JASSAL et al., 2004; EPRON et al., 2006). Valores altos de D_s poderiam limitar a difusão de oxigênio no perfil do solo devido à diminuição do número de poros. Por outro lado, uma maior porosidade total facilitaria a oxigenação do solo, favorecendo a atividade microbiológica e o aumento de FCO_2 (FANG et al., 1998).

Os coeficientes de correlação linear entre FCO_2 e demais atributos do solo foram significativos ($p < 0,05$) apenas para algumas variáveis relacionadas à porosidade do solo (Tabela 5). Os atributos D_s e microporosidade apresentaram correlação negativa, enquanto a macroporosidade e a PLA correlacionaram-se positivamente com FCO_2 . Correlações negativas entre FCO_2 e D_s têm sido citadas em alguns estudos sugerindo a importância da porosidade do solo para a atividade microbiana e para as trocas gasosas entre o solo e a atmosfera (XU & QI, 2001; EPRON et al., 2006). Correlações positivas entre FCO_2 e as variáveis macroporosidade e PLA indicam que quando o volume de poros do solo ocupado por água é alto, isto é, quando os valores de PLA são

baixos, a atividade microbiológica é prejudicada devido à limitação de oxigênio no perfil do solo e, conseqüentemente, FCO₂ diminui (FANG & MONCRIEFF, 1999).

Tabela 5. Coeficientes de correlação linear entre a emissão de CO₂ do solo (FCO₂) e a temperatura, umidade e atributos físicos e químicos do solo.

Atributo	r	Atributo	r
Ts	0,046	Argila	0,049
Us	-0,052	MO	0,110
Ds	-0,316*	EstC	0,066
Macro	0,214*	C/N	0,031
Micro	-0,178*	pH	-0,111
VTP	0,117	P	-0,013
PLA	0,180*	SB	0,035
Areia	0,014	CTC	0,149
Silte	-0,094	V	-0,044

* Valores significativos do coeficiente de correlação de Pearson ($p < 0,05$). Ts = temperatura do solo; Us = umidade do solo; Ds = densidade do solo; Macro = macroporosidade; Micro = microporosidade; VTP = volume total de poros; PLA = porosidade livre de água; Areia = teor de areia; Silte = teor de silte; Argila = teor de argila; MO = teor de matéria orgânica; EstC = estoque de carbono; C/N = relação C/N; P = fósforo disponível; SB = soma de bases; CTC = capacidade de troca de cátions; V = saturação por bases.

Outros estudos, entretanto, têm reportado correlações significativas entre FCO₂ e atributos do solo. Em solo de floresta tropical na Guiana Francesa, foram observados coeficientes de correlação significativos e negativos entre FCO₂ e as variáveis Us e pH, e positivos com Ts e carbono do solo (EPRON et al., 2006). A contribuição de Ts e Us para a respiração do solo, no entanto, pode ser considerada menos importante quando a variabilidade espacial é analisada (YIM et al., 2003; TEDESCHI et al., 2006). Nesse sentido, em estudo conduzido em área de cana-de-açúcar no município de Guariba, São Paulo, não foi encontrada relação na estrutura de variabilidade espacial entre FCO₂, Ts e Us no sistema cana crua (PANOSSO et al., 2008). Porém, no sistema de cultivo cana queimada, foi constatada relação entre esses atributos, sendo os maiores valores de Ts e os menores de Us observados nas regiões com os maiores valores de FCO₂. Da mesma forma, em estudo realizado na mesma região, com solo e condições climáticas similares, a correlação entre a respiração do solo e Ts foi não significativa, indicando que esta variável sozinha não é capaz de responder pelas mudanças que ocorreram em FCO₂ (LA SCALA et al., 2003). Já em solo sem cobertura vegetal, a CTC

e o carbono total correlacionaram-se positivamente com FCO₂, ao contrário dos teores de óxido de ferro livre da fração argila do solo, que apresentou correlação negativa com FCO₂ (LA SCALA et al., 2000b). De acordo com os autores deste estudo, os resultados sugerem uma relação complexa entre os minerais de argila e a atividade microbiana do solo, já que a argila pode promover proteção física ao adsorver moléculas orgânicas em sua superfície, protegendo o carbono orgânico da ação microbiana e impedindo a mineralização da matéria orgânica do solo (DOMINY et al., 2002).

Quando os valores de D_F são analisados em função de diferentes escalas tem-se um fractograma, por meio do qual é possível observar o alcance em que o sistema apresenta dependência espacial (PALMER, 1988; CANTERO et al., 1998). Além disso, o fractograma permite interpretar as escalas em que a estrutura de variabilidade espacial pode ser considerada homogênea ($D_F \geq 3$, ou seja, sem significado topológico) ou heterogênea ($D_F < 3$) (PALMER, 1988). Para FCO₂, os valores de D_F variaram de 3,05 na curta escala (5/0,5 m) a 2,89 na longa escala (60/6,0 m), mostrando estrutura de variabilidade espacial heterogênea somente a partir de 20 m (Figura 10a). As variáveis Ts (Figura 10a) e VTP (Figura 10b) se comportaram de forma semelhante à FCO₂, com tendência geral de diminuição dos valores de D_F ao longo da escala. Este comportamento pode ser confirmado por meio da análise dos coeficientes de correlação positivos e significativos entre o fractograma de FCO₂ e os fractogramas desses atributos (Tabela 6), que mostram a semelhança entre a dependência espacial dessas variáveis ao longo das diferentes escalas analisadas. Assim, mesmo não havendo correlação significativa entre FCO₂ e outras variáveis que controlariam suas alterações, como observado na Tabela 5, os atributos Ts e VTP variaram de forma similar à FCO₂ ao longo do gradeado estudado, com estruturas de variabilidade espacial semelhantes.

Os atributos Us (Figura 10a), microporosidade (Figura 10b) e teores de silte e argila (Figura 11a) mostraram comportamento distinto ao de FCO₂, com tendência geral de aumento de D_F com o aumento do alcance e valores com significado topológico ($D_F < 3$) em todas as escalas para Us e teores de silte e argila. Esse aspecto pode ser observado por meio dos valores significativos e negativos do coeficiente de correlação linear entre o fractograma de FCO₂ e aqueles obtidos para esses atributos (Tabela 6).

Nesses casos, os valores decrescentes da dimensão fractal da emissão de CO₂ do solo ao longo das escalas estão associados aos valores crescentes da dimensão fractal para essas variáveis, mostrando que a estrutura de variabilidade espacial difere ao longo das escalas, mas apresenta relação entre si.

De acordo com PALMER (1988), a correlação existente entre duas variáveis em uma determinada escala é provavelmente resultado da relação intrínseca existente entre elas e não apenas devido a uma coincidência em seus padrões de dependência espacial. Assim, a forma dos fractogramas e a correlação existente entre eles poderiam sugerir os fatores que influenciariam a estrutura de variabilidade espacial de FCO₂. Em estudo que levou em conta a variação temporal de FCO₂, alguns pontos da malha amostral correlacionaram-se linearmente e de forma significativa ao longo do tempo (LA SCALA et al., 2009). De acordo com os autores, nos pontos onde esse padrão foi semelhante, é mais provável que a diferença entre o fluxo de CO₂ de um ponto para o outro ao longo do tempo seja mais próxima do que nos pontos onde não foi observada relação significativa. Ainda, a manutenção da estrutura de variabilidade de determinado atributo é mais provável quando existe um padrão de comportamento semelhante em sua variação.

Tabela 6. Coeficientes de correlação linear entre o fractograma da emissão de CO₂ do solo (FCO₂) e os fractogramas da temperatura, umidade e atributos físicos e químicos do solo, derivados dos variogramas experimentais isotrópicos para as diferentes escalas estudadas.

Atributo	r	Atributo	r
Ts	0,849*	Argila	-0,965*
Us	-0,969*	MO	-0,549
Ds	-0,772*	EstC	0,525
Macro	0,084	C/N	0,266
Micro	-0,911*	pH	-0,913*
VTP	0,760*	P	-0,985*
PLA	-0,840*	SB	-0,814*
Areia	-0,391	CTC	-0,715
Silte	-0,905*	V	-0,886*

* Valores significativos do coeficiente de correlação de Pearson ($p < 0,05$). Ts = temperatura do solo; Us = umidade do solo; Ds = densidade do solo; Macro = macroporosidade; Micro = microporosidade; VTP = volume total de poros; PLA = porosidade livre de água; Areia = teor de areia; Silte = teor de silte; Argila = teor de argila; MO = teor de matéria orgânica; EstC = estoque de carbono; C/N = relação C/N; P = fósforo disponível; SB = soma de bases; CTC = capacidade de troca de cátions; V = saturação por bases.

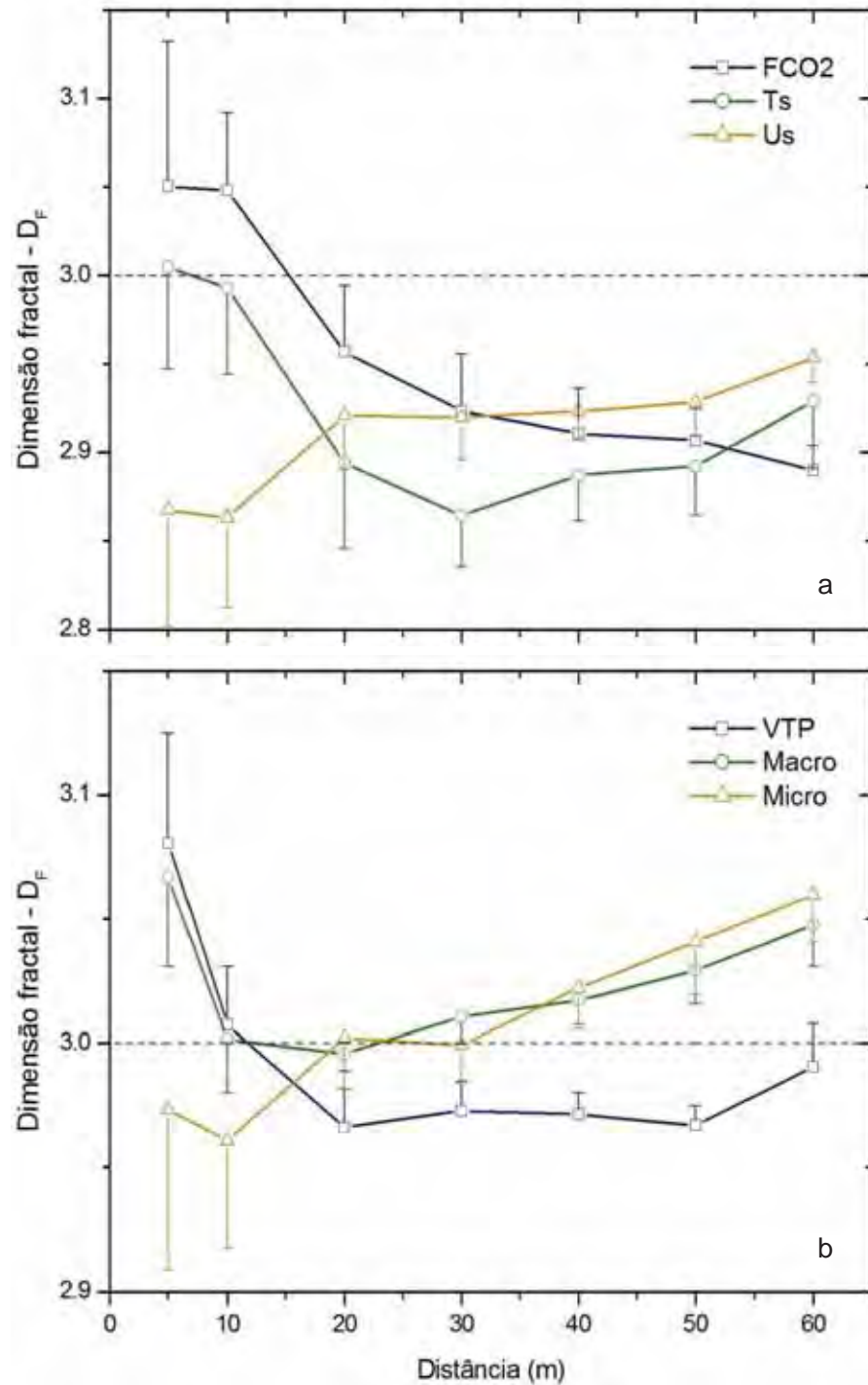


Figura 10. Fractogramas calculados a partir de variogramas isotrópicos, com os valores de dimensão fractal (D_F) em função da escala para diferentes atributos: a) FCO₂ = emissão de CO₂ do solo; Ts = temperatura do solo; Us = umidade do solo; b) VTP = volume total de poros; Macro = macroporosidade; Micro = microporosidade.

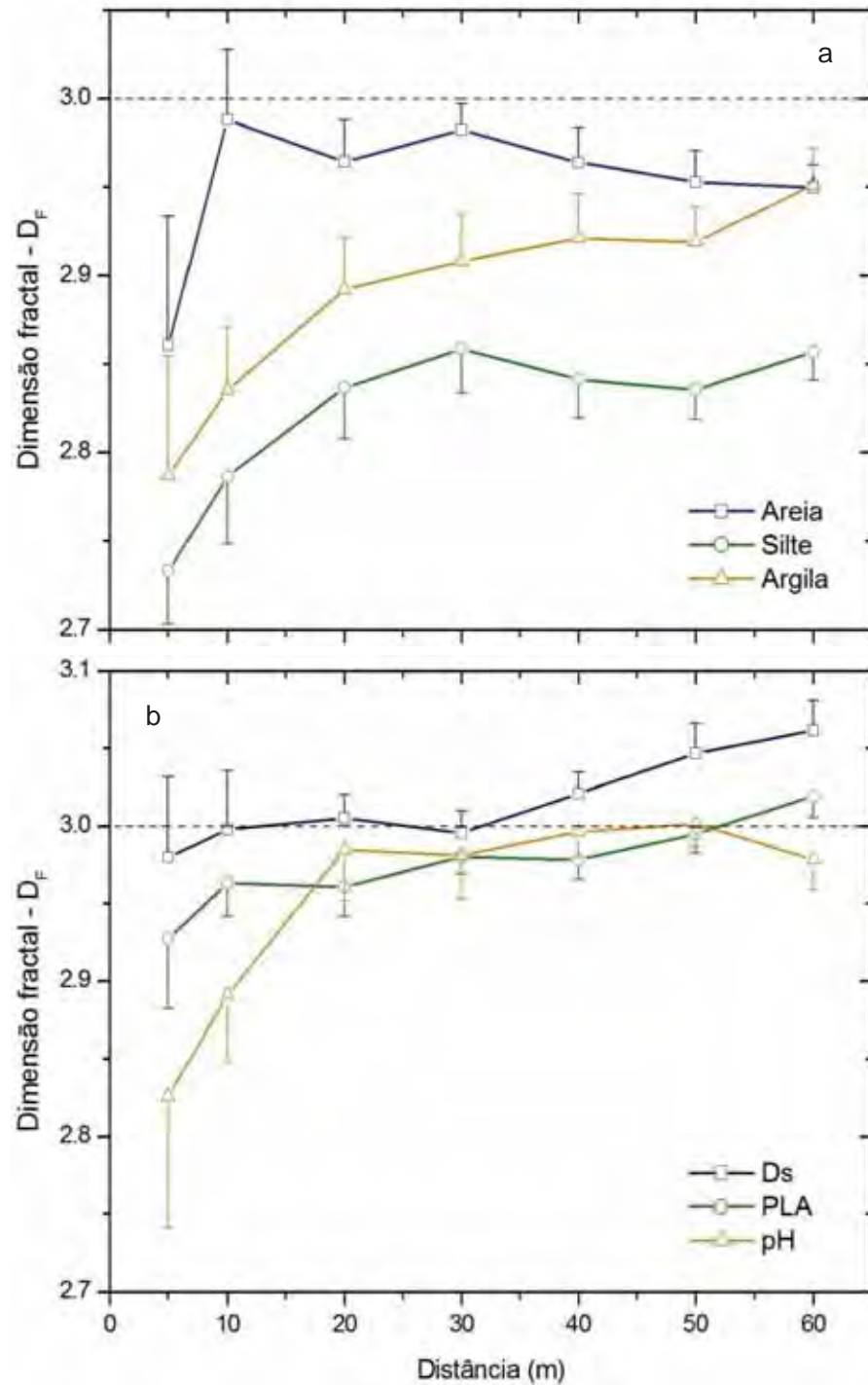


Figura 11. Fractogramas calculados a partir de variogramas isotrópicos, com os valores de dimensão fractal (D_F) em função da escala para diferentes atributos: a) Areia = teor de areia do solo; Silte = teor de silte do solo; Argila = teor de argila do solo; b) Ds = densidade do solo; PLA = porosidade livre de água; pH = pH do solo.

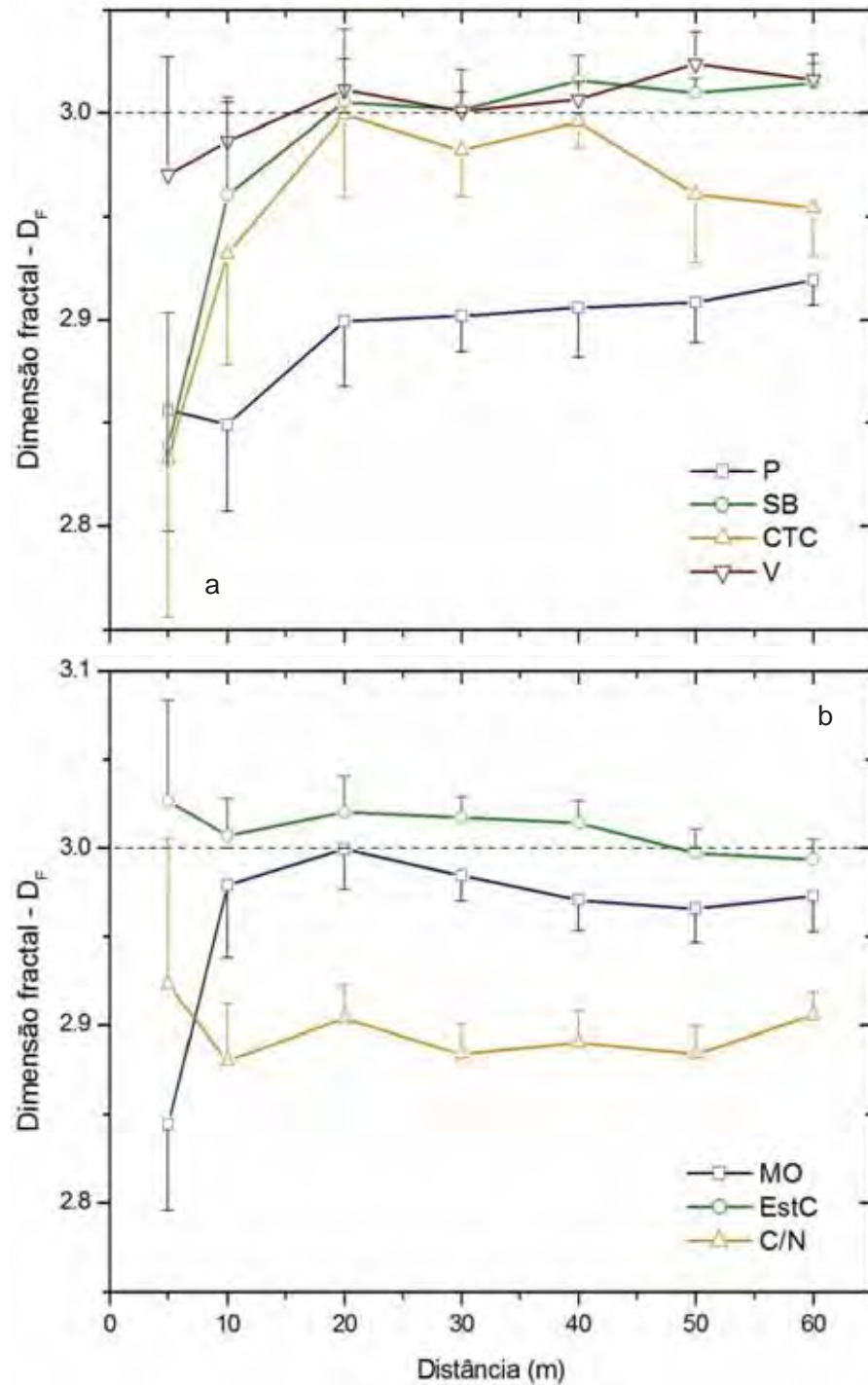


Figura 12. Fractogramas calculados a partir de variogramas isotrópicos, com os valores de dimensão fractal (D_F) em função da escala para diferentes atributos: a) P = fósforo disponível; SB = soma de bases; CTC = capacidade de troca de cátions; V = saturação por bases; b) MO = teor de matéria orgânica; EstC = estoque de carbono; C/N = relação C/N.

De forma análoga, a correlação entre a estrutura de dependência espacial de FCO₂ e aquelas associadas às variáveis D_s (-0,772), PLA (-0,840), pH (-0,913), fósforo disponível (-0,985), soma de bases (-0,814) e saturação por bases (-0,886) (Figuras 11b e 12a), caracterizada pelo fractograma, foi também negativa e significativa (Tabela 6), com o comportamento de D_F ao longo da escala diferindo daquele observado para FCO₂. Para o pH do solo, D_F apresentou significado topológico na curta (5/0,5 m e 10/1,0 m) e na longa (60/6,0 m) escalas, respectivamente com valores de 2,83, 2,89 e 2,97. A variável PLA, por sua vez, apresentou estrutura de variabilidade espacial heterogênea na curta e média escalas, e a soma de bases apenas na curta escala (5/0,5 m), com ausência de valores de D_F < 3 em escalas maiores. Por outro lado, o atributo fósforo disponível apresentou valores de D_F com significado topológico em todos os alcances, ao contrário de D_s e saturação por bases, para os quais não foi observada dependência espacial em nenhuma das escalas avaliadas, indicando uma estrutura de variabilidade espacial completamente homogênea.

Assim, de forma geral, a maior parte dos atributos do solo analisados apresentou estrutura de variabilidade espacial similar àquela observada para a respiração do solo ($p < 0,05$), com exceção das variáveis macroporosidade (Figura 10b), teor de areia (Figura 11a), CTC (Figura 12a) e matéria orgânica, EstC e relação C/N (Figura 12b). Para os atributos Ts e VTP foram observadas correlações positivas entre os padrões de fractogramas, indicando uma estrutura de variabilidade semelhante à encontrada para FCO₂. Por outro lado, os demais atributos apresentaram coeficientes de correlação linear negativos e significativos entre os fractogramas, o que indica um comportamento dissimilar ao de FCO₂.

5 CONCLUSÕES

A variabilidade temporal da emissão de CO₂ do solo (FCO₂) para a área de cana-de-açúcar sob sistema de manejo cana crua apresenta comportamento isotrópico, com maior dependência temporal na média e longa escalas, em alcances superiores a 20 m. Apesar do comportamento isotrópico, os valores de dimensão fractal de FCO₂, calculados para diferentes direções, evidenciam maior variabilidade temporal na direção paralela à linha de plantio, indicando que as práticas de manejo seriam as responsáveis pelas alterações na variabilidade temporal de FCO₂. Além disso, os fractogramas permitem identificar os padrões de dependência temporal dessa variável ao longo das escalas, direções e dias de estudo.

A variabilidade espacial de FCO₂ está mais evidenciada na média (20-30 m) e longa (40-60 m) escalas. Sua estrutura de variabilidade espacial, caracterizada pelo fractograma, correlaciona-se significativamente com a maioria dos atributos do solo, apresentando comportamento similar ou dissimilar ao de FCO₂ ao longo das escalas, dependendo da variável em estudo. Além disso, os fractogramas permitem observar o comportamento da dependência espacial de FCO₂ e demais atributos do solo ao longo das escalas e seus padrões de homogeneidade e heterogeneidade.

6 REFERÊNCIAS

ABEDINI, M. J.; SHAGHAGHIAN, M. R. Exploring scaling laws in surface topography. **Chaos, Solitons & Fractals**, Oxford, v. 42, n. 4, p. 2373-2383, 2009.

AMUNDSON, R. G.; DAVIDSON, E. A. Carbon dioxide and nitrogenous oxide gases in the soil atmosphere. **Journal of Geochemical Exploration**, Amsterdam, v. 38, n. 1-2, p. 13-41, 1990.

ARROUAYS, D.; BALESSENT, J.; GERMON, J. C.; JAYET, P. A.; SOUSSANA, J. F.; STENGEL, P. (Ed.). **Increasing carbon stocks in French agricultural soils?** Paris: INRA, 2002. 32 p.

BALL, B. C.; SCOTT, A.; PARKER, J. P. Field N₂O, CO₂ and CH₄ fluxes in relation to tillage, compaction and soil quality in Scotland. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 53, n. 1, p. 29-39, 1999.

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.; CERRI, C. C.; VOLKOFF, B.; CARVALHO, M. C. S.; CERRI, C. E. P.; ESCHENBRENNER, V.; PICCOLO, M. C.; FEIGL, B. Gases do efeito estufa e estoques de carbono nos solos: inventário do Brasil. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, Brasília, v. 22, n. 1, p. 235-246, 2005.

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.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. MCT. **Segunda comunicação nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre mudança do clima.** Brasília: MCT, 2010. 520 p.

BRITO, L. F.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; LA SCALA, N. Spatial variability of soil CO₂ emission in different topographic positions. **Bragantia**, Campinas, v. 69, supl., p. 19-27, 2010.

BRITO, L. F.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; SOUZA, Z. M.; LA SCALA, N. Soil CO₂ emission of sugarcane fields as affected by topography. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 66, n. 1, p. 77-83, 2009.

BURROUGH, P. A. Fractal dimensions of landscapes and other environmental data. **Nature**, London, v. 294, n. 5838, p. 240-242, 1981.

BURTON, A. J.; PREGITZER, K. S. Field measurements of root respiration indicate little to no seasonal temperature acclimation for sugar maple and red pine. **Tree Physiology**, Oxford, v. 23, n. 4, p. 273-280, 2003.

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 palhicho e adição de vinhaça por longo tempo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 5, p. 935-944, 2003.

CANTERO, J. J.; LEON, R.; CISNEROS, J. M.; CANTERO, A. Habitat structure and vegetation relationships in central Argentina salt marsh landscapes. **Plant Ecology**, Dordrecht, v. 137, n. 1, p. 79-100, 1998.

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. 83-89, 2007.

CHAN, K. Y. Soil particulate organic carbon under different land use and management. **Soil Use and Management**, Oxford, v. 17, n. 4, p. 217-221, 2001.

CHEN, W.; HOU, Y.; HUNG, C. A theoretical analysis of the capture of greenhouse gases by single water droplet at atmospheric and elevated pressures. **Applied Energy**, Oxford, v. 88, n. 12, p. 5120-5130, 2011.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar, terceiro levantamento, dezembro/2011**. Brasília, 2011. 20 p.

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.

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.

DOMINY, C. S.; HAYNES, R. J.; VAN ANTWERPEN, R. Loss of soil organic matter and related soil properties under long-term sugarcane production on two contrasting soils. **Biology and Fertility of Soils**, Heidelberg, 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, p. 349-362, 1999.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212 p.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.

EPRON, D.; BOSCH, 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**, Cambridge, v. 22, n. 5, p. 565-574, 2006.

EPRON, D.; FARQUE, L.; LUCOT, E.; BADOT, P. Soil CO₂ efflux in a beech forest: dependence on soil temperature and soil water content. **Annals of Forest Science**, Paris, v. 56, n. 3, p. 221-226, 1999.

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.; MONCRIEFF, J. B. A model for soil CO₂ 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 CO₂ efflux and its spatial variation in a Florida slash pine plantation. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 205, n.

2, p. 135-146, 1998.

FELLER, C.; BEARE, M. H. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. **Geoderma**, Amsterdam, v. 79, n. 1-4, p. 69-116, 1997.

FORSTER, P.; RAMASWAMY, V.; ARTAXO, P.; BERNTSEN, T.; BETTS, R.; FAHEY, D. W.; HAYWOOD, J.; LEAN, J.; LOWE, D. C.; MYHRE, G.; NGANGA, J.; PRINN, R.; RAGA, G.; SCHULZ, M.; VAN DORLAND, R. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. In: SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, M.; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K.; TIGNOR, M. M. B.; MILLER, H. L. (Ed.). **Climate Change 2007: the physical science basis**. New York: Cambridge University Press, 2007. p. 129-234.

FUENTES, J. P.; BEZDICEK, D. F.; FLURY, M.; ALBRECHT, S.; SMITH, J. L. Microbial activity affected by lime in a long-term no-till soil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 88, n. 1-2, p. 123-131, 2006.

HUANG, C.; BRADFORD, J. M. Applications of a laser scanner to quantify soil microtopography. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, n. 1, p. 14-21, 1992.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. 561 p.

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 CO₂ in soil: predicting soil CO₂ concentrations and CO₂ efflux from a forest floor. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 124, n. 3-4, p. 219-236, 2004.

JENKINSON, D. S.; HARKNESS, D. D.; VANCE, E. D.; ADAMS, D. E.; HARRISON, A. F. Calculating net primary production and annual input of organic matter to soil from the

amount and radiocarbon content of soil organic matter. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 24, n. 4, p. 295-308, 1992.

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.

KLINKENBERG, B. Fractals and morphometric measures: is there a relationship? **Geomorphology**, Amsterdam, v. 5, n. 1-2, p. 5-20, 1992.

KONDA, R.; OHTA, S.; ISHIZUKA, S.; ARAI, S.; ANSORI, S.; TANAKA, N.; HARDJONO, A. Spatial structures of N₂O, CO₂ and CH₄ fluxes from *Acacia mangium* plantation during a relatively dry season in Indonesia. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 40, n. 12, p. 3021-3030, 2008.

KOSUGI, Y.; MITANI, T.; ITOH, M.; NOGUCHI, S.; TANI, M.; MATSUO, N.; 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.

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. World soils and the greenhouse effect. **Global Change Newsletter**, Stockholm, n. 37, p. 4-5, 1999.

LAL, R.; FAUSEY, N. R.; ECKERT, D. J. Land use and soil management effects on emissions of radiatively active gases from two soils in Ohio. In. LAL, R.; KIMBLE, J.; LEVINE, E.; STEWART, B. A. (Ed.). **Soil management and greenhouse effect**. Boca

Raton: Lewis Publishers, 1995. p. 41-59.

LAL, R.; GRIFFIN, M.; APT, J.; LAVE, L.; MORGAN, M. G. Managing soil carbon. **Science**, Washington, v. 304, n. 5669, p. 393, 2004.

LAM, N. S.; QIU, H.; QUATTROCHI, D. A.; EMERSON, C. W. An evaluation of fractal methods for characterizing image complexity. **Cartography and Geographic Information Science**, Gaithersburg, v. 29, n. 1, p. 25-35, 2002.

LA SCALA, N.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; CORÁ, J. E. Short-term temporal changes in the spatial variability model of CO₂ emissions from a brazilian bare soil. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 32, n. 10, p. 1459-1462, 2000a.

LA SCALA, N.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; CORÁ, J. E. Carbon dioxide emission related to chemical properties of a tropical bare soil. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 32, n. 10, 1469-1473, 2000b.

LA SCALA, N.; PANOSSO, A. R.; PEREIRA, G. T. Modelling short-term temporal changes of bare soil CO₂ emissions in a tropical agrosystem by using meteorological data. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 24, n. 1, p. 113-116, 2003.

LA SCALA, N.; BOLONHEZI, D.; PEREIRA, G. T. Short-term soil CO₂ emission after conventional and reduced tillage of a no-till sugar cane area in southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 91, n. 1-2, p. 244-248, 2006.

LA SCALA, N.; PANOSSO, A. R.; PEREIRA, G. T.; PAZ GONZÁLEZ, A.; MIRANDA, J. G. V. Fractal dimension and anisotropy of soil CO₂ emission in na agricultural field during fallow. **International Agrophysics**, Lublin, v. 23, n. 4, p. 353-358, 2009.

LLOYD, J.; TAYLOR, A. On the temperature dependence of soil respiration. **Functional**

Ecology, Oxford, v. 8, n. 3, p. 315-323, 1994.

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, v. 32, n. 2, p. 789-800, 2008.

MACHADO, P. L. O. A. Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. **Química Nova**, São Paulo, v. 28, n. 2, p. 329-334, 2005.

MANDELBROT, B. B. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension. **Science**, Washington, v. 156, n. 3776, p. 636-638, 1967.

MANDELBROT, B. B. **Fractals: form, chance, and dimension**. San Francisco: W.H. Freeman, 1977. 365 p.

MANDELBROT, B. B. **The fractal geometry of nature**. New York: W.H. Freeman, 1982. 469 p.

MANDELBROT, B. B. Self-affine fractals and fractal dimension. **Physica Scripta**, Bristol, v. 32, n. 4, p. 257-260, 1985.

MARK, D. M.; ARONSON, P. B. Scale-dependent fractal dimensions of topographic surfaces: an empirical investigation, with applications in geomorphology and computer mapping. **Mathematical Geology**, Heidelberg, v. 16, n. 7, p. 671-683, 1984.

MEAKIN, P. Fractal aggregates in geophysics. **Reviews of Geophysics**, Washington, v. 29, n. 3, p. 317-354, 1991.

MILNE, B. T. Lessons from applying fractal models to landscape patterns. In: TURNER,

M. G.; GARDNER, R. H. (Ed.). **Quantitative methods in landscape ecology: the analysis and interpretation of landscape heterogeneity**. New York: Springer, 1991. p. 199-235.

MIRANDA, J. G. V. **Análisis fractal del microrrelieve del suelo**. 2000. 313 f. Tese (Doutorado em Edafologia) – Faculdade de Ciências, Universidade de A Coruña, A Coruña, Espanha, 2000.

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.

PACHEPSKY, Y.; CRAWFORD, J. W. Fractal analysis. In: HILLEL, D. (Ed.). **Encyclopedia of soils in the environment**. Waltham: Academic Press, 2004. v. 2, p. 85-98.

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. **Variabilidade espacial da emissão de CO₂ e sua relação com propriedades do solo em área de cana-de-açúcar no Sudeste do Brasil**. 2011. 107 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2011.

PANOSSO, A. R.; MARQUES JÚNIOR, J.; MILORI, D. M. B. P.; FERRAUDO, A. S.; BARBIERI, D. M.; PEREIRA, G. T.; LA SCALA, N. Soil CO₂ emission and its relation to soil properties in sugarcane areas under slash-and-burn and green harvest. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 111, n. 2, p. 190-196, 2011.

PANOSSO, A. R.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; LA SCALA, N. Spatial and

temporal variability of soil CO₂ emission in a sugarcane area 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 JÚNIOR, J.; LA SCALA, N. Variabilidade espacial da emissão de CO₂ em latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar em diferentes sistemas de manejo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 2, p. 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. Mecanismos de interação entre solos e nutrientes. In: _____ (Ed.). **Avaliação da fertilidade do solo**. Piracicaba: Instituto da Potassa e Fosfato, 1981. p. 17-31.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. (Ed.). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2001. 284 p.

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, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 115, n. 1-4, p. 285-289, 2006.

REICOSKY, D. C. Tillage-induced CO₂ emission from soil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 49, n. 1-3, p. 273-285, 1997.

RICHARDSON, L. F. The problem of contiguity: an appendix to statistics of deadlly

quarrels. **General Systems Yearbook**, Michigan, v. 6, p. 139-187, 1961.

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.

RYU, S.; CONCILIO, A.; CHEN, J.; NORTH, M.; MA, S. Prescribed burning and mechanical effects on belowground conditions and soil respiration in a mixed-conifer forest, California. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 257, n. 4, p. 1324-1332, 2009.

SARTORI, F.; LAL, R.; EBINGER, M. H.; PARRISH, D. J. Potential soil carbon sequestration and CO₂ offset by dedicated energy crops in the USA. **Critical Reviews in Plant Sciences**, Philadelphia, v. 25, n. 5, p. 441-472, 2006.

SCHIMMEL, D. S. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle. **Global Change Biology**, Oxford, v. 1, n. 1, p. 77-91, 1995.

SCHNEIDER, S.; SARUKHAN, J.; ADEJUWON, J.; AZAR, C.; BAETHGEN, W.; HOPE, C.; MOSS, R.; LEARY, N.; RICHELIS, R.; YPERSELE, J. van. Overview of impacts, adaptation, and vulnerability to climate change. In: MCCARTHY, J. J.; CANZIANI, O. F.; LEARY, N. A.; DOKKEN, D. J.; WHITE, K. S. (Ed.). **Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability**. New York: Cambridge University Press, 2001. p. 75-103.

SCHWENDENMANN, L.; VELDKAMP, E.; BRENES, T.; O'BRIEN, J. J.; MACKENSEN, J. Spatial and temporal variation in soil CO₂ efflux in an old-growth neotropical rain forest, La Selva, Costa Rica. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 64, n. 1, p. 111-128, 2003.

SIX, J.; ELLIOTT, E. T.; PAUSTIAN, K. Aggregate and soil organic matter dynamics

under conventional and no-tillage systems. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 63, n. 5, p. 1350-1358, 1999.

SMITH, P.; MARTINO, D.; CAI, Z.; GWARY, D.; JANZEN, H.; KUMAR, P.; MCCARL, B.; OGLE, S.; O'MARA, F.; RICE, C.; SCHOLLES, B.; SIROTENKO, O. Agriculture. In: METZ, B.; DAVIDSON, O. R.; BOSCH, P. R.; DAVE, R.; MEYER, L. A. (Ed.). **Climate change 2007: mitigation**. New York: Cambridge University Press, 2007. p. 497-540.

STANLEY, H. E. Form: an introduction to self-similarity and fractal behaviour. In: STANLEY, H. E.; OSTROWSKI, N. (Ed.). **On growth and form: fractal and non-fractal patterns in physics**. Berlin: Springer-Verlag, 1985. p. 21-53. (Series E: Applied Sciences, 100)

SUN, W.; XU, G.; GONG, P.; LIANG, S. Fractal analysis of remotely sensed images: a review of methods and applications. **International Journal of Remote Sensing**, Essex, v. 27, n. 22, p. 4963-4990, 2006.

TEDESCHI, V.; REY, A.; MANCA, G.; VALENTINI, R.; JARVIS, P. G.; 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.

TEIXEIRA, D. B.; PANOSSO, A. R.; CERRI, C. E. P.; PEREIRA, G. T.; LA SCALA, N. Soil CO₂ emission estimated by different interpolation techniques. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 345, n. 1-2, p. 187-194, 2011.

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, D. A. N.; LAL, R. 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.

VIDAL VÁZQUEZ, E.; MIRANDA, J. G. V.; PAZ GONZÁLEZ, A. 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.

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.; OLIVER, M. A. **Statistical methods in soil and land resource survey**. New York: Oxford University Press, 1990. 328 p.

XU, M.; QI, Y. Soil-surface CO₂ 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.

XU, T.; MOORE, I. D.; GALLANT, J. C. Fractals, fractal dimensions and landscapes – a review. **Geomorphology**, Amsterdam, v. 8, n. 4, p. 245-262, 1993.

YIM, M. H.; JOO, S. J.; SHUTOU, K.; NAKANE, K. Spatial variability of soil respiration in a larch plantation: estimation of the number of sampling points required. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 175, n. 1-3, p. 585-588, 2003.