

58451

049930

ALEXANDRE FONSECA D'ANDRÉA

**FLUXO DE CO₂ DO SOLO
EM ÁREAS COM CAFEZEIROS
E POVOAMENTOS FLORESTAIS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração Solos e Nutrição de Plantas, para a obtenção do título de Doutor.

Orientador:

Prof. Marx Leandro Naves Silva

LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL
2004

**Ficha catalográfica preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca Central da UFLA**

d'Andréa, Alexandre Fonseca

Fluxo de CO₂ do solo em áreas com cafeeiros e povoamentos florestais /
Alexandre Fonseca d'Andréa. -- Lavras: UFLA, 2004.

97 p. : il.

Orientador: Marx Leandro Naves Silva

Tese (Doutorado) -- UFLA.

Bibliografia.

1. Ciclo do carbono. 2. Efeito estufa. 3. Gás carbônico. 4. Latossolo. 5. Café. 6. Eucalipto. 7. Mata nativa. 8. Qualidade do solo. 9. Geostatística. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD-631.45

ALEXANDRE FONSECA D'ANDRÉA

**FLUXO DE CO₂ DO SOLO
EM ÁREAS COM CAFEZEIROS
E POVOAMENTOS FLORESTAIS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração Solos e Nutrição de Plantas, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 28 de maio de 2004

Prof. Nilton Curi

Prof. Carlos Alberto Silva

Pesq. Renato Roscoe

Pesq. Paulo Tácito Gontijo Guimarães

UFLA

UFLA

EMBRAPA/CPAO

EPAMIG


Prof. Marx Leandro Naves Silva - UFLA
Orientador

**LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL**

A meus pais, Iracema e Ronaldo, pela
acolhida. À minha esposa, Rosicléa, pelo
seu amor. À minha irmã, Renata, pelo
aprendizado na convivência. À minha
cunhada, Renata Priscylla, pela dedicação.

OFEREÇO

A Ana Clara, minha filha,
que trouxe mais luz
à nossa casa.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus pela minha vida e à minha família por me fazer feliz em minha existência. A meus pais, minha gratidão pela presença constante, em especial nos momentos de maior importância. Sem seu apoio próximo, em Lavras ou Belo Horizonte, não teria sido possível concluir este treinamento no tempo desejado. Ao Dr. Mário Cândido Ribeiro, meu tio em Goiás, meu reconhecimento pelo empenho apresentado para meu ingresso nesta etapa de qualificação profissional.

Agradeço o apoio institucional recebido do Centro Federal de Educação Tecnológica (CEFET) de Urutaí, pela liberação das atividades profissionais; da Universidade Federal de Lavras (UFLA), pela oportunidade concedida na pós-graduação e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos.

Ao professor Marx Leandro Naves Silva, agradeço a confiança depositada enquanto orientador. Ao professor Nilton Curi, um agradecimento especial pelos ensinamentos proporcionados durante os anos de mestrado e doutorado, sempre com transparência e ética profissional. Ao professor Carlos Alberto Silva, agradeço a co-orientação na pesquisa. Ao pesquisador Renato Roscoe, o incentivo oferecido durante diversas etapas no doutorado (mesmo estando à distância) e a disponibilidade e atenção sempre despendidas. Ao pesquisador Paulo Tácito Gontijo Guimarães, agradeço a presteza no auxílio às dúvidas emergentes.

À professora Ângela Maria Soares, pela cooperação e cessão do analisador de gás utilizado nas medições de campo, e a João Paulo R.A.D. Barbosa, pela orientação inicial para a operação do mesmo. Obrigado pela disponibilidade em esclarecer minhas dúvidas. A Sandro Manuel C. Hurtado,

pela ajuda em etapas importantes da análise estatística e a Cláudio R.F.S. Soares, pelo auxílio oferecido na fase de correção final e impressão do trabalho.

Aos professores do Departamento de Ciência do Solo (DCS) da UFPA, em especial a Luiz Roberto G. Guilherme, José Maria de Lima, Vicente Gualberto, Mozart M. Ferreira, João José G.S.M. Marques, José Oswaldo Siqueira, Fátima M.S. Moreira, Janice Guedes de Carvalho, Alfredo Scheid Lopes e Maria da Glória B. F. Mesquita, com os quais aprendi, mesmo não estando constantemente próximo. Aos funcionários do DCS, principalmente José Roberto Fernandes (Pezão, pelos momentos descontraídos e pelo apoio oferecido), Manoel (fundamental nas análises microbiológicas), Roberto, Humberto, Carlinhos, Adriana, Maria Alice, Marlene, Delanne e Dulce.

Aos colegas que conviveram comigo, na pós-graduação, especialmente Alexandre Barberi, Alexandre Romeiro de Araújo, Alex Teixeira Andrade, Álvaro Vilela de Resende, Antonio Claret de O. Jr., Antonio Marcos da Silva, Adriana S. Lima, Adriana M.A. Accioly, Alessandra M. Tokura, Ana Rosa R. Bastos, Carolina C. Lisboa, Carlos Rogério de Mello, Cláudio R.F.S. Soares, Elka Élice V. de Miranda, Enrique Pouyú Rojas, Fátima E.F. Brito (Fatinha), Flávia A. de Alcântara, Geraldo César de Oliveira, Gislene Aparecida dos Santos, Ivan Bedin, João Bosco V. Gomes, Jonas Jacob Chiaradia, Liziane F. Brito, Leyser R. Oliveira, Lislane S. Pires, José Geraldo D. Santos, José Tadeu A. Silva, Juliano Maly, Júlio César A. Nóbrega e Rafaela S.A. Nóbrega, Marcos Koiti Kondo, Marcos Aurélio C. de Sá, Maurício Möller Parry, Mateus Rosas R. Filho, Maria Aparecida P. Pierangeli, Mari Lúcia Campos, Otacílio J.P. Rangel, Reginaldo B. da Silva, Renato F. de Souza, Regina C. Oliveira, Rodrigo de Souza Martins, Sérgio Gualberto Martins, Silvana da Silva, Thais R. Coser, Vinícius M. Ferreira, Walfredo M. Albernaz e Wellington W. Rocha.

Aos estudantes que cooperaram neste trabalho como estagiários ou voluntários, especialmente Ricardo Carvalho, Fabiana Silva de Souza, Carlos

Ribeiro Pereira, Daniela C. da Silva, Michele D. Menezes, Téo, Danilo e Junior César Avanzi, pelo auxílio indispensável nas etapas práticas de campo e laboratório. Espero ter contribuído, de alguma maneira, para o seu crescimento profissional.

No campo pessoal, aos insubstituíveis Cláudio e Serginho, pela fraterna amizade. Juntos, estudamos, fizemos peixadas, viajamos, tocamos e cantamos no palco livre e brindamos à vida. Aos amigos Juliano e Liziane, pelo convívio sadio e companheirismo compartilhado em grandes eventos, no Circuito, no postinho ou na magia do girassol. Aos amigos Gilvan C. Martins, Edilson C. Brasil e Rubens R. da Silva, e a Jonas Jacob Chiaradia, Ivan Bedin e Dyeme A.V. Bento (saudades do som nas sextas-feiras, aguardado ansiosamente a cada semana), pelas boas recordações de momentos distantes no tempo mas ainda vivos na lembrança. Um agradecimento especial a Jonas e Maria Elaine C. Chiaradia, por compartilharem comigo e com minha esposa momentos familiares significativos. Aos amigos Adriana Accioly, Marcos Kondo, Gigi e Guadalupe, Gislene C. de Castro e a todos da república dos Gabirus, em especial a Luciano T. de Oliveira (Bodinho), Nélio R. A. Castro (Nelinho) e Edmilson S. Cruz, por atenderem sempre aos nossos convites.

Por fim, mas não menos importante, aos meus parceiros e amantes da boa música, Serginho, Cláudio, Rosi d'Andréa (minha meiga senhorita, que sempre me incentivou, obrigado pela nossa filhinha), Juliano, Ivan, Jonas e Dyeme, Marquinhos (meu professor nas seis cordas), Denise, Gi e Andréa De Grandi (Déia). Vocês tornaram belos e eternos os momentos de descontração.

BIOGRAFIA

Alexandre Fonseca d'Andréa nasceu em Cataguases, MG, a 28 de agosto de 1969, filho de Iracema Maria Fonseca d'Andréa e Ronaldo Ribeiro d'Andréa. Ingressou no curso de Graduação em Agronomia em 1987 na Universidade Federal de Viçosa, colando grau em 1992. Em janeiro de 1993, foi contratado como docente pela Escola Agrotécnica Federal (EAF) de Urutá, GO. Naquele ano, cursou disciplinas de formação especial, como Graduação, no curso de Licenciatura no Setor de Técnicas Agropecuárias da Universidade Federal Rural de Pernambuco, colando grau em 1994. Em 1995, foi aprovado em concurso público, passando a integrar o quadro efetivo de professores da EAF em Goiás. De 1997 a 1998, dirigiu ações acadêmicas e administrativas na Unidade de Ensino Descentralizada de Morrinhos, GO. Em 1999, foi admitido no Mestrado em Agronomia, área de concentração Solos e Nutrição de Plantas, na Universidade Federal de Lavras, MG, concluído em 2001. Nesse ano, ingressou no Doutorado em Agronomia, na mesma instituição e área de concentração. Obteve o título em 2004, ano em que retornou às atividades no então Centro Federal de Educação Tecnológica de Urutá.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO GERAL	i
GENERAL ABSTRACT	ii
CAPÍTULO 1	1
1 Introdução Geral	1
2 Referencial Teórico	4
2.1 O ciclo global do carbono e as emissões de CO ₂ do solo	4
2.2 Fatores que afetam as emissões de CO ₂ do solo.....	6
2.3 Variabilidade das emissões de CO ₂ do solo.....	8
2.4 Uso da terra e emissões de CO ₂ do solo	9
3 Referências Bibliográficas	13
CAPÍTULO 2: Variações de curto prazo nas emissões de CO₂ do solo em sistemas de manejo de cafeeiro (<i>Coffea arabica</i> L.) na região de Lavras, MG	17
1 Resumo	17
2 Abstract	19
3 Introdução	20
4 Material e Métodos	22
4.1 Descrição da área de estudo	22
4.2 Medição do fluxo de gases do solo	25
4.3 Coleta e preparo das amostras de solos	26
4.4 Análises de laboratório	27
4.5 Delineamento experimental e análise estatística	27

5 Resultados e Discussão.....	29
5.1 Fluxo de CO ₂ do solo	29
5.2 Evaporação de água e temperatura do solo	30
6 Conclusões	36
7 Referências Bibliográficas	37
CAPÍTULO 3: Variabilidade espacial do fluxo de CO₂ do solo em povoamentos florestais	41
1 Resumo	41
2 Abstract	43
3 Introdução	44
4 Material e Métodos	46
4.1 Descrição da área de estudo	46
4.2 Medição do fluxo de gases do solo	48
4.3 Medição da temperatura e umidade do solo	49
4.4 Coleta e preparo das amostras de solos	50
4.5 Análises de laboratório	51
4.6 Análise estatística	52
5 Resultados e Discussão	57
6 Conclusões	85
7 Considerações Finais	86
8 Referências Bibliográficas	88
Anexo	93

RESUMO GERAL

D'ANDRÉA, Alexandre Fonseca. Fluxo de CO₂ do solo em áreas com cafeeiros e povoamentos florestais. 2004. 97 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, MG.¹

As emissões de CO₂ do solo são um componente importante do ciclo global do carbono. No entanto, existem muitas incertezas sobre os fatores que afetam o processo, principalmente em solos tropicais submetidos a uso agrícola. O objetivo deste trabalho foi avaliar os padrões de variação temporal e espacial do fluxo de CO₂ do solo em sistemas de manejo agrícola e florestal, num Latossolo Vermelho distroférrico da região de Lavras, MG. Para tal, foram feitas medições em parcelas experimentais de cafeeiro adensado com as cultivares Acaia Cerrado e Rubi, submetidas a um manejo diferenciado de podas. Foram selecionados os tratamentos: A_{R1}: Acaia Cerrado, com recepagem em 2001; A_{R3}: Acaia Cerrado, com recepagem em 2003; R_{R2}: Rubi, com recepagem em 2002; R_{NR}: Rubi não submetido a podas. O fluxo diurno de CO₂ do solo foi maior na parcela R_{NR}, com um pico de emissão das 9 às 11 horas. Os tratamentos que sofreram recepagem recente apresentaram baixo fluxo de gás carbônico do solo, o que foi devido, possivelmente, à morte de raízes finas das plantas, em decorrência das operações de poda. Ficou constatado que práticas de manejo que afetam o sistema radicular do cafeeiro interferem diretamente nas emissões de CO₂ do solo. Adicionalmente, a variabilidade espacial do fluxo de CO₂ do solo foi avaliada em uma grade regular de 15×35 m com 32 pontos, demarcada em um fragmento de mata nativa remanescente e num povoamento de eucalipto. Análises de correlação linear indicaram que as emissões de CO₂ do solo são um fenômeno de natureza complexa, não podendo ser explicadas satisfatoriamente por um único atributo do solo ou do ambiente. No entanto, no povoamento de eucalipto, parte das variações do fluxo de CO₂ pode ser associada ao efeito conjunto do teor de carbono orgânico do solo, da biomassa da serrapilheira e da presença de árvores no terreno ($R^2=0,45$, $P<0,01$). Na mata nativa, não foi possível detectar um componente espacialmente estruturado para a variabilidade do fluxo de CO₂ do solo, cuja distribuição foi considerada aleatória. Por outro lado, houve dependência espacial do fluxo de CO₂ no povoamento de eucalipto até a distância média de 20 m. A introdução de espécies florestais em área originalmente coberta por vegetação nativa alterou sensivelmente a estrutura da variabilidade espacial das emissões de CO₂ do solo.

¹ Comitê Orientador: Marx Leandro Naves Silva – UFLA (Orientador), Nilton Curi – UFLA, Carlos Alberto Silva – UFLA, Renato Roscoe – EMBRAPA e Paulo Tácito Gontijo Guimarães – EPAMIG.

GENERAL ABSTRACT

D'ANDRÉA, Alexandre Fonseca. Soil CO₂ flux in areas with coffee and forest settlements. 2004. 97 p. Thesis (Doctorate on Soil Science and Plant Nutrition) – Federal University of Lavras, MG, Brazil.¹

Soil CO₂ emissions are an important component of carbon global cycle. However, there are many doubts about the factors that affect the process, mainly in tropical soils submitted to agricultural use. The objective of this work was to evaluate the patterns of temporal and spatial variation of soil CO₂ flux in agricultural and forest management systems, in a dystroferic Red Latosol (Oxisol) at Lavras-MG region. For that purpose, measurements were performed in dense coffee experimental plots with Acaia Cerrado and Rubi cultivars, submitted to differential managements of pruning. The following treatments were selected: A_{R1}: Acaia Cerrado with low pruning in 2001; A_{R3}: Acaia Cerrado with low pruning in 2003; R_{R2}: Rubi with low pruning in 2002; and R_{NR}: Rubi without pruning. The soil CO₂ daily flux was higher in R_{NR} parcel, with an emission peak from 9 am to 11 am. The treatments which received recent low pruning presented low soil carbon dioxide flux, what was, possibly, related to death of plant fine roots, as consequence of pruning operations. It was observed that management practices which affect the coffee root system directly influence soil CO₂ emissions. In addition, it was evaluated the spatial variability of soil CO₂ on a 15×35 m grid with 32 points, delimited in a remaining native forest fragment and in an eucalyptus settlement. Linear correlation analysis indicated that the soil CO₂ emissions are a complex phenomenon, being not satisfactorily explained by a solo soil or environmental attribute. However, in the eucalyptus settlement, part of the CO₂ flux may be associated with a combined effect of soil organic carbon content, litter biomass, and proximity of trees on terrain ($R^2=0.45$, $P<0.01$). In the native forest, it was not possible to detect a spatially structured component of soil CO₂ flux variability, whose distribution was considered randomized. On the other side, there was spatial dependence of soil CO₂ flux with eucalyptus up to the average distance of 20 m. The introduction of forest species in an area originally covered by native vegetation substantially altered the structure of spatial variability of soil CO₂ emissions.

¹ Guidance Committee: Marx Leandro Naves Silva – UFLA (Major Professor), Nilton Curi – UFLA, Carlos Alberto Silva – UFLA, Renato Roscoe – EMBRAPA and Paulo Tácito Gontijo Guimarães – EPAMIG.

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO GERAL

Atualmente, um dos aspectos de grande destaque nos estudos de matéria orgânica do solo é a avaliação das perdas de gás carbônico (CO_2) em função do uso e manejo da terra. Muitos trabalhos têm sido conduzidos buscando melhorar o entendimento sobre a dinâmica de mineralização dos componentes orgânicos e a magnitude dos processos heterotróficos que ocorrem no solo. Numa escala mais abrangente, as emissões de CO_2 do solo assumem uma importância que ultrapassa os limites do ecossistema e passam a constituir, na interface solo-atmosfera, um componente significativo do ciclo global do carbono.

Em tempos de grande preocupação com alterações climáticas globais resultantes do aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera, entre os quais, o gás carbônico (IPCC, 2001), parte das atenções no meio científico está centrada sobre o solo e o uso da terra. Como ainda são incertas as consequências do aumento da concentração do CO_2 atmosférico em pontos chave como a fixação líquida de carbono pelas plantas e a decomposição da matéria orgânica do solo (Norby & Cotrufo, 1998; Copley, 2000), conhecer com detalhes os fatores que determinam as perdas de CO_2 em diferentes situações de uso e manejo é fundamental para a compreensão do fenômeno de aquecimento global.

Grande parte dos estudos sobre fluxos de CO_2 do solo foi desenvolvida em condições de clima temperado, com destaque para trabalhos em áreas de florestas (Russell & Voroney, 1998; Gärdenäs, 2000; Longdoz et al., 2000; Maljanen et al., 2001) e cultivo agrícola (Reicosky & Lindstrom, 1993; Reicosky et al., 1997, 1999). Nas regiões mais quentes do globo, tem sido crescente o interesse a respeito do assunto, estando disponíveis informações

sobre a dinâmica de carbono em ambientes florestais (Noordwijk et al., 1997; Lira et al., 1999) e, mais recentemente, sobre as emissões de CO₂ em solos descobertos ou preparados para plantio (La Scala Jr et al., 2000a, b; La Scala Jr et al., 2001). Apesar disso, alguns pontos importantes permanecem pouco elucidados, como a contribuição dos fatores que afetam os fluxos de CO₂ em diferentes condições de uso e manejo, nos agroecossistemas. Adicionalmente, a existência de diversos métodos de avaliação das emissões de CO₂ torna difícil a obtenção de resultados passíveis de serem comparados, situação que deve se estender até que se torne consenso a adoção de um dos métodos atualmente disponíveis como o padrão.

O presente trabalho foi desenvolvido na região de Lavras, MG, em áreas agrícolas e florestais, buscando respostas para certas questões relacionadas às emissões de gás carbônico do solo para a atmosfera em sistemas de uso da terra, e consideradas relevantes sobre o tema: a) como ocorrem as variações de curto prazo dos fluxos de CO₂ do solo em sistemas agrícolas de longa duração com características distintas de manejo?; b) qual a estrutura da variabilidade espacial das emissões de CO₂ em solos cobertos por vegetação de floresta?; c) que atributos do solo ou fatores do ambiente estão mais estreitamente associados às emissões de CO₂ em diferentes situações de uso e manejo? Para tal, foram selecionadas áreas de um Latossolo Vermelho muito argiloso cultivado com cafeeiros e mantido sob povoamentos de mata nativa e eucalipto. A cultura do cafeeiro foi escolhida pela sua importância histórica, econômica e sócio-cultural para Minas Gerais e para o Brasil, e a cultura do eucalipto, pelos investimentos e avanços obtidos na tecnologia de produção de madeira, carvão e celulose, representando importante segmento para a economia do país (CONAB, 2004).

Adicionalmente, deve-se destacar que os sistemas de uso escolhidos são responsáveis por uma parcela significativa da área agrícola cultivada no país, já

que os cafezais cobrem cerca de 2,4 milhões de hectares (Anuário Estatístico..., 2003) e os plantios de eucalipto, 3,0 milhões de hectares (SBS, 2000). Identificar os fatores que afetam as emissões de CO₂ do solo nestes sistemas significa melhorar a compreensão do processo em setores representativos da agricultura brasileira, contribuindo para a geração de modelos regionais de quantificação das emissões de CO₂ do solo, cuja magnitude, em escala global, não é, ainda, plenamente conhecida (Lal, 2001). Além disso, a redução das emissões de CO₂ é uma das estratégias para diminuir a taxa de aumento da concentração de gás carbônico na atmosfera, ao lado do seqüestro de carbono em sistemas terrestres e, nesse sentido, um manejo agrícola adequado pode constituir uma ação efetiva de mitigação do efeito estufa antropogênico.

A tese foi organizada em dois capítulos principais, que seguem ao introdutório. O Capítulo 2 trata das emissões de CO₂ do solo, no período diurno, em parcelas cultivadas com cafeeiros das cultivares Acaia Cerrado e Rubi, adaptadas para Minas Gerais. No Capítulo 3, a variabilidade espacial das emissões de CO₂ do solo foi estudada, por meio das ferramentas da geoestatística, em um povoamento antigo de *Eucalyptus* sp, tomando um fragmento de vegetação nativa da região como referência. Nos dois sistemas, foram feitas medições das perdas de CO₂ em pontos espaçados regularmente no campo e conduzidas determinações em laboratório de atributos biológicos, químicos e físicos. As áreas estudadas nos dois capítulos estavam localizadas no *campus* da Universidade Federal de Lavras e mereceram diversos estudos em linhas de pesquisa nos departamentos de Ciência do Solo, Agricultura e Engenharia Florestal.

Este trabalho buscou oferecer uma contribuição adicional, em termos de investigação científica no domínio da Ciência do Solo, aos conhecimentos

previamente adquiridos, em especial no que se refere ao efeito do manejo sobre as perdas de CO₂ do solo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 O ciclo global do carbono e as emissões de CO₂ do solo

O armazenamento de carbono (C) no globo terrestre ocorre em quatro compartimentos principais, denominados oceânico, atmosférico, terrestre e geológico. O maior reservatório é o geológico, a crosta terrestre, com cerca de 90.000.000 Pg* de C. Apesar dessa grande quantidade, a maior parte do carbono geológico não participa da ciclagem do elemento, a não ser uma pequena fração, constituída pelo carbono fóssil (cerca de 4.000 Pg de C), utilizado na geração de energia (Sundquist, 1993). No compartimento oceânico, o segundo em tamanho, existe em torno de 38.000 Pg de C (Schlesinger, 1995), principalmente na forma inorgânica de íons bicarbonato. No reservatório terrestre, o carbono está estocado no solo (2.500 Pg, segundo Lal, 1999) e na biomassa vegetal (550 Pg, segundo Eswaran et al., 1993). De todos os compartimentos, a atmosfera é o que possui a menor quantidade de carbono, 750 Pg (Eswaran et al., 1993), fato que não a torna menos importante, dada a atual preocupação com alterações climáticas globais (como a elevação de temperatura e o aumento do nível estático dos oceanos), relacionadas diretamente com aumentos na concentração

* Pg : petagramas (10¹⁵g).

de gases de efeito estufa na atmosfera, entre os quais está presente o CO₂ (IPCC, 2001).

A maior parte do carbono contido no compartimento terrestre pertence à matéria orgânica do solo, num total estimado em cerca de 1.576 Pg, distribuídos em 12,8 bilhões de hectares, nos continentes (Eswaran et al., 1993), constituindo cerca de três vezes a quantidade de carbono na biomassa da vegetação e duas vezes a presente na atmosfera do planeta. Deste total, a maioria é encontrada sob solos com florestas (787 Pg) (Dixon et al., 1994) e, em seguida, nas áreas com gramíneas (500 Pg) e terras cultivadas (140 Pg) (Scharpenseel, 1997). Por causa de condições climáticas favoráveis à decomposição da matéria orgânica, os solos das regiões tropicais tendem a armazenar menos carbono que as regiões mais frias do globo. Apesar disso, alguns fatores podem contribuir para a proteção da matéria orgânica nos solos tropicais, como o teor e a mineralogia da fração argila, por meio da oclusão da matéria orgânica no interior de agregados e da formação de ligações ou complexos estáveis entre as partículas minerais e as substâncias orgânicas do solo (Christensen, 1996; Noordwijk et al., 1997; Rosenzweig & Hillel, 2000). Em valores totais, os solos dos trópicos acumulam o considerável montante de cerca de 506 Pg de carbono orgânico, o equivalente a 32% do total mundial (Eswaran et al., 1993).

O carbono não está contido de maneira definitiva nos compartimentos do globo, mas, ao contrário, está sujeito a movimentações, principalmente entre os reservatórios terrestre, oceânico e atmosférico, que interagem continuamente por meio de transferências mediadas por processos químicos e biológicos, formando o que se conhece como o ciclo do carbono (Eswaran et al., 1993). A maior transferência de carbono no ciclo global ocorre na interface entre a atmosfera e o compartimento terrestre, onde os organismos vegetais fixam cerca de 120 Pg C ano⁻¹ via fotossíntese, mas respiram metade desse montante, o que

resulta numa produção primária líquida anual de 60 Pg C (Schlesinger, 1995). Esse aparente dreno de carbono é compensado pela emissão média de outros 60 Pg C ano⁻¹ pelo solo, pela oxidação do carbono de compostos orgânicos e pela respiração de raízes. Assim, do balanço entre as adições dos resíduos vegetais [que chegam a 55 Pg ano⁻¹, segundo Schlesinger (1995), descontadas as emissões por ação do fogo e consumo por herbívoros] e as perdas de carbono por erosão e decomposição, resultam os estoques de carbono orgânico do solo.

2.2 Fatores que afetam as emissões de CO₂ do solo

A produção de gás carbônico no solo ocorre por meio de processos biológicos, como a decomposição de resíduos orgânicos e a respiração de organismos e do sistema radicular das plantas. O CO₂ produzido fica sujeito a trocas gasosas com a atmosfera, que são governadas por dois principais mecanismos: a difusão, o movimento de um gás de uma zona de maior concentração para outra de menor concentração e o fluxo de massa, que ocorre quando o gás se move junto com o ar em que está misturado, em resposta a um gradiente de pressão (Ball & Smith, 1991). Quase todo o CO₂ produzido no solo é conduzido à superfície e daí liberado, por difusão (Lundegårdh, 1927; Kimball & Lemon, 1971). A concentração de CO₂ nos poros do solo é significativamente maior do que na atmosfera, por causa da presença de raízes e organismos, o que origina um fluxo ascendente do gás das camadas mais profundas até a superfície do solo (Ball & Smith, 1991).

As variáveis climáticas influenciam diretamente os fluxos de CO₂ para a atmosfera, e os seus principais fatores condicionantes são a temperatura (do ar e do solo) e a umidade do solo (Anderson, 1982; Russell & Voroney, 1998; Duiker & Lal, 2000; Longdoz et al., 2000; Janssens et al., 2001). Aumentos na

temperatura podem elevar exponencialmente as taxas de respiração do solo (Fang & Moncrieff, 2001; Yim et al., 2002). Relações significativas entre a temperatura do solo ou do ar e as emissões de CO₂ têm sido encontradas em diversos trabalhos: Janssens et al. (2001) verificaram que até 80% das variações temporais nas emissões de CO₂ foram explicadas por variações na temperatura, em situação de baixo estresse hídrico; Longdoz et al. (2000) observaram que 73% da variação nos fluxos de CO₂ ocorreu em função da temperatura; Duiker & Lal (2000) calcularam que 60% das variações nas emissões de CO₂ foram explicadas pela temperatura média diária do solo a 5cm de profundidade; Yim et al. (2002) verificaram correlações positivas entre o fluxo médio diário de CO₂ e a temperatura média diária do ar e do solo no horizonte A. Russell & Voroney (1998) sugeriram a utilização de medições de temperatura do solo a 10 cm, por ser uma profundidade padrão em muitas estações meteorológicas e unidades de pesquisa ao redor do mundo, facilitando a comparação de resultados.

Por causa das diferenças de temperatura em diversas regiões do globo, a produção de CO₂ no solo também é variável, geograficamente. Em regiões mais quentes, a taxa de respiração do solo aumenta e, anualmente, a emissão de carbono pode chegar a 1.400 Mg km⁻² (14 Mg ha⁻¹) em localidades presentes nas regiões tropicais (Raich et al., 2003). Além das diferenças espaciais, a sazonalidade da temperatura ao longo do ano também impõe uma oscilação, no tempo, sobre a magnitude das emissões de CO₂ do solo. Em média, o fluxo anual de CO₂ do solo é maior em baixas latitudes, mas em junho (solstício de verão no hemisfério norte), as emissões podem ser maiores em alguns países localizados fora da zona tropical.

Em algumas situações específicas, no entanto, não existe relação evidente entre as emissões de CO₂ e a temperatura ou a umidade do solo. Numa floresta de clima temperado, com pequena oscilação térmica durante o período

experimental, Gärdenäs (2000) verificou que a maioria das variações na respiração do solo foi explicada pelo teor de água da espessa serrapilheira ($R^2 = 0,70$, $P < 0,01$), tendo sido obtido um melhor ajuste da regressão efetuada quando o teor de matéria orgânica dessa camada foi incluído no modelo ($R^2 = 0,85$, $P < 0,03$). Adicionalmente, o autor sugeriu a existência de uma conexão entre as taxas de respiração e as de evaporação de água do solo, cuja transferência para a atmosfera também é governada pela difusão gasosa (Ball & Smith, 1991). La Scala Jr et al. (2000a) não verificaram correlações significativas da temperatura ou umidade do solo com as emissões de CO_2 , mas sim com atributos como carbono orgânico total, capacidade de troca catiônica e teor de ferro livre do solo. Assim, apesar da importância da temperatura e da umidade, é possível que diversos outros fatores também exerçam influência significativa sobre as emissões de CO_2 do solo. O conhecimento de como isto ocorre, especialmente em casos em que existe carência de dados, como em condições de clima tropical, é fundamental para a identificação de diferenças nos padrões de fluxo de CO_2 em solos distintos quanto à sua gênese ou quanto a condições de uso e manejo.

2.3 Variabilidade das emissões de CO_2 do solo

Além das variações impostas pelos fatores que afetam as emissões de CO_2 do solo, existe uma variabilidade espacial e temporal dos fluxos, diretamente relacionada à variabilidade dos atributos do solo que interferem no processo, como a porosidade, a drenagem, o teor de carbono orgânico e as populações de microrganismos (Duiker & Lal, 2000). La Scala Jr et al. (2000a) identificaram similaridade, num Latossolo brasileiro sem cobertura vegetal, entre os padrões de variabilidade espacial das emissões de CO_2 e de atributos relacionados, como o teor de carbono orgânico do solo. Numa floresta

temperada, as diferenças na distribuição espacial do fluxo de CO₂ foram atribuídas à heterogeneidade de fatores como biomassa da serrapilheira, relação C:N, relação lignina:N, densidade do sistema radicular, acidez do solo e textura (Longdoz et al., 2000).

Russell & Voroney (1998) relataram variações temporais nos padrões das emissões de CO₂ do solo e destacaram a necessidade de um monitoramento constante do processo, alertando para limitações na aplicação de resultados obtidos em períodos curtos (de poucas semanas) em estudos globais do balanço de carbono, por causa da possibilidade de variação significativa dos valores em algumas épocas do ano. Em clima temperado, os autores verificaram que, na primavera, a variabilidade foi maior do que no verão, possivelmente em decorrência de uma alteração nos padrões de emissão de CO₂: de locais mais quentes, isolados e aleatórios na superfície do solo (na primavera) para emissões mais uniformes vindas de raízes ativas em crescimento (sustentadas pela energia de compostos fotoassimilados) e da difusão de CO₂ a partir das camadas mais profundas do solo (no verão). Esta variação, no entanto, pode ocorrer de maneira diferente nos solos dos trópicos, em função da dissimilaridade das condições climáticas das duas regiões, ponto que necessita ser investigado.

2.4 Uso da terra e emissões de CO₂ do solo

A conversão de ecossistemas naturais em áreas manejadas com cultivo agrícola tem levado, via de regra, a reduções no armazenamento de carbono dos sistemas terrestres e, em geral, sistemas agrícolas com maior movimentação de solo apresentam maiores taxas de emissão de CO₂ do que os formados por culturas de ciclo longo ou aqueles que utilizam práticas conservacionistas. Em regiões tropicais, os teores de carbono orgânico do solo podem variar em função

do uso da terra, tendo sido relatada por Noordwijk et al. (1997) uma tendência de decréscimo no sentido: floresta primária – floresta secundária – áreas de culturas com espécies de ciclo longo – áreas de agricultura itinerante ("slash and burn"). Os autores indicaram algumas condições existentes nas áreas agrícolas que favorecem as perdas de carbono do solo, como a elevação do pH por meio da calagem, em decorrência do manejo da fertilidade do solo.

Em região de clima temperado, Maljanen et al. (2001) verificaram um menor fluxo de CO₂ do solo em povoamentos florestais antigos (23 anos), em relação aos recém-implantados (1 e 6 anos), indicando que a idade dos sistemas florestais pode afetar a magnitude das emissões de gás carbônico do solo. A mesma tendência foi verificada para a temperatura do solo, sugerindo uma relação estreita entre as duas variáveis. No Brasil, Lira et al. (1999) observaram aumento nos fluxos de CO₂ do solo nos meses mais quentes do ano. Trabalhando a cultura do eucalipto, os autores identificaram que o manejo com corte das árvores, seguido de queima, resultou em perdas mais elevadas de CO₂ do solo. As menores emissões foram verificadas no solo com eucalipto não submetido ao corte, inclusive quando comparado com uma área sob vegetação natural de cerrado. Nesta, no entanto, o fluxo elevado de CO₂ foi relacionado a uma maior diversidade de microrganismos, a temperaturas mais amenas e à umidade mais constante, no solo. Apesar de terem sido observadas taxas elevadas de emissão de CO₂ do solo tanto no cerrado como no tratamento de eucalipto com queima, existia uma grande diferença entre o manejo de ambos, pois, enquanto a queima liberava nutrientes sem reposição, na vegetação nativa, o retorno de resíduos na mata garantia uma efetiva ciclagem de nutrientes.

Em termos quantitativos, Gärdenäs (2000) obteve fluxos diários acumulados da ordem de 26 a 40 g CO₂ m⁻² dia⁻¹, na primavera, na zona temperada. Numa floresta boreal, Russell & Voroney (1998) chegaram a valores

de emissões anuais de gás carbônico entre 809 e 905 g C m⁻² ano⁻¹ e sugeriram que a maioria do fluxo de CO₂ do solo (cerca de 60%) devia-se à presença de raízes e não à decomposição dos resíduos da floresta. De maneira similar, Longdoz et al. (2000) estimaram emissões anuais de 438 ± 68 a 870 ± 140 g C m⁻² ano⁻¹ para dois sítios de florestas temperadas e, para o que teve o maior fluxo, indicaram que mais de 90% da respiração do ecossistema pode ter se originado do solo.

Em áreas com uso agrícola, estudos variados conduzidos em diversas situações de manejo têm concluído que a movimentação do solo por ação mecânica é um dos principais fatores responsáveis por aumentar as perdas de CO₂ (Reicosky & Lindstrom, 1993; Reicosky et al., 1997, 1999). No Brasil, La Scala Jr. et al. (2001) investigaram emissões de CO₂ em solo submetido a diferentes sistemas de manejo convencional e verificaram que a intensidade de preparo foi um fator determinante das perdas de CO₂ do solo.

As emissões de CO₂ do solo também são afetadas pela cobertura vegetal, que impõe diferenças tanto pelo tipo como pela quantidade de resíduos orgânicos deixados sobre o solo. Em experimento de laboratório, Flessa et al. (2002) verificaram que a aplicação de cobertura morta de resíduos frescos triturados de gramínea (*Poa pratensis*) em quantidade equivalente a 100 g C m⁻² ocasionou um pico de emissão de CO₂, após uma semana, da ordem de 281 e 241 mg CO₂ m⁻² h⁻¹, em colunas preenchidas por solo e areia de quartzo, respectivamente. Neste trabalho, o solo sem tratamento emitiu valores constantes de cerca de 24 mg de CO₂ m⁻² h⁻¹. Os resultados indicaram que as emissões de gás carbônico também foram governadas pela deposição de material orgânico sobre a superfície, decomposto, principalmente, pelos microrganismos indígenas do próprio resíduo.

Adições de matéria orgânica à superfície do solo resultam num aumento das emissões de CO₂ por aumentar a taxa de respiração, em decorrência do fornecimento de substrato para a degradação por microrganismos (Ball & Smith, 1991). Duiker & Lal (2000) investigaram a influência de adições de resíduos orgânicos sobre o fluxo de CO₂, em área submetida ao sistema de plantio direto. Trabalhando com quantidades que variavam de 0 a 16 Mg ha⁻¹ de palhada de trigo, os autores constataram que houve, entre os tratamentos, efeito significativo sobre a temperatura do solo ao meio-dia, que foi maior no solo sem cobertura vegetal, mas sem que houvesse aumento das emissões de CO₂ do solo. A explicação foi que a falta de substrato no tratamento sem adição de resíduos e uma superfície do solo mais seca impediram que os aumentos de temperatura tivessem efeito sobre as emissões de CO₂, mostrando a importância, para a produção de gás carbônico no solo, da presença de um material decomponível e de condições favoráveis à sua decomposição.

Apesar das informações existentes, ainda permanecem pouco esclarecidos pontos importantes a respeito das emissões de CO₂ do solo. Nos dois capítulos seguintes deste trabalho serão apresentados resultados de um estudo envolvendo as variações temporais de curto prazo do fluxo de CO₂ do solo em sistemas agrícolas cultivados com cultura perene e submetidos a situações distintas de manejo (Capítulo 2), e de um experimento sobre os padrões de variabilidade espacial das emissões de CO₂ do solo e de atributos correlatos, em povoamentos florestais implantados e com vegetação nativa (Capítulo 3).

3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, J. P. Soil respiration. In: PAGE, A. L.; MILLER, R. H.; KEENEY, D. R. (Ed.) **Methods of soil analysis**. Part 2. Chemical and microbiological properties. 2. Ed. Madison, 1982. p. 831-871.

ANUÁRIO ESTATÍSTICO DO CAFÉ 2002/2003. Rio de Janeiro: Coffee Business, 2003. 101 p.

BALL, B. C.; SMITH, K. A. Gas movement. In : SMITH, K. A.; MULLINS, C. E. (Ed.). **Soil analysis: physical methods**. New York: Marcel Dekker, 1991. p. 511-549.

CHRISTENSEN, B. T. Matching measurable soil organic matter fractions with conceptual pool in simulation models of carbon turnover: revision of model structure. In: POWLSON, D. S.; SMITH, P.; SMITH, J. V. (Ed.). **Evaluation of soil organic matter models**. Berlin: Springer-Verlag, 1996. p. 143-159. (NATO ASI Series, v. I, 38).

CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento). **Balança comercial do agronegócio**. <http://www.conab.gov.br/download/indicadores/0205-balanca-exportacao.pdf>. Acesso em: abr. 2004.

COPLEY, J. Ecology goes underground. *Nature*, London, v. 406, n. 6795, p. 452-454, Aug. 2000.

DIXON, R. K.; BROWN, S.; HOUGHTON, R. A.; SOLOMON, A. M.; TREXLER, M. C.; WISNIEWSKI, J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, Washington, v. 263, n. 5169, p. 185-190, July 1994.

DUIKER, S. W.; LAL, R. Carbon budget study using CO₂ flux measurements from a no till system in central Ohio. *Soil and Tillage Research*, Wellington, v. 54, n. 1/2, p. 21-30, Mar. 2000.

ESWARAN, H.; VAN DEN BERG, E.; REICH, P. Organic carbon in soils of the world. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 57, n. 1, p. 192-194, Jan./Feb. 1993.

FANG, C.; MONCRIEFF, J. B. The dependence of soil CO₂ efflux on temperature. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 33, n. 2, p. 155-165, Feb. 2001.

FLESSA, H.; POTTHOFF, M.; LOFTFIELD, M. Greenhouse estimations of CO₂ and N₂O emissions following surface application of grass mulch: importance of indigenous microflora of mulch. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 34, n. 6, p. 875-879, June 2002.

GÄRDENÄS, A. I. Soil respiration fluxes measured along a hydrological gradient in a Norway spruce stand in south Sweden (Skogaby). **Plant and Soil**, The Hague, v. 221, n. 2, p. 273-280, 2000.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). **Climate Change 2001: synthesis report - Summary for Policymakers**, Third Assessment Report. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2001. 34 p.

JANSSENS, I. A.; KOWALSKI, A. S.; CELEUMANS, R. Forest floor CO₂ fluxes estimated by eddy covariance and chamber-based model. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 106, n. 1, p. 61-69, Jan. 2001.

KIMBALL, B. A.; LEMON, E. R. Air turbulence effects upon soil gas exchange. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 35, n. 1, p. 16-21, Jan./Feb. 1971.

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

LAL, R. World soils and the greenhouse effect. **IGBP Global Change Newsletter**, Stockholm, v. 37, n. 1, p. 4-5, 1999.

LA SCALA Jr., N.; LOPES, A.; MARQUES Jr., J.; PEREIRA, G. T. Carbon dioxide emissions after application of tillage systems for a dark red latosol in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 62, n. 3/4, p. 163-166, Nov. 2001.

LA SCALA Jr., N.; MARQUES Jr., J.; PEREIRA, G. T.; CORA, J. E. Carbon dioxide emission related to chemical properties for a tropical bare soil. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 32, n. 10, p. 1469-1473, Oct. 2000a.

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

LIRA, A. C. S de; POGGIANI, F.; GONÇALVES, J. L. de. Respiração do solo sob eucalipto e cerrado. *Scientia Florestalis*, Piracicaba, v. 56, p. 15-28, dez. 1999.

LONGDOZ, B.; YERNAUX, M.; AUBINET, M. Soil CO₂ efflux measurements in a mixed forest: impact of chamber disturbances, spatial variability and seasonal evolution. *Global Change Biology*, Oxford, v. 6, n. 11, p. 907-917, Nov. 2000.

LUNDEGÅRDH, H. Carbon dioxide evolution of soil and crop growth. *Soil Science*, Baltimore, v. 23, p. 417-453, 1927.

MALJANEN, M.; HYTÖNEN, J.; MARTIKAINEN, P. J. Fluxes of N₂O, CH₄ and CO₂ on afforested boreal agricultural soils. *Plant and Soil*, Dordrecht, v. 231, n. 1, p. 113-121, Apr. 2001.

NOORDWIJK, M. van; CERRI, C.; WOOMER, P. L.; NUGROHO, K.; BERNOUX, M. Soil carbon dynamics in the humid tropical forest zone. *Geoderma*, Amsterdam, v. 79, n. 1/4, p. 187-225, Sept. 1997.

NORBY, R. J.; COTRUFO, M. F. A question of litter quality. *Nature*, London, v. 396, n. 6706, p. 17-18, Nov. 1998.

RAICH, J. W.; POTTER, C. S.; BHAGAWATI, D. Interannual variability in global soil respiration on a 0.5 degree grid cell basis. ORNL/CDIAC-144, NDP-081. [<http://cdiac.ornl.gov/epubs/ndp/ndp081/ndp081.html>], acesso em março de 2004, Carbon Dioxide Analysis Information Center, U. S. Department of Energy, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, USA, 2003.

REICOSKY, D. C.; DUGAS, W. A.; TORBERT, H. A. Tillage-induced soil carbon dioxide loss from different cropping systems. *Soil and Tillage Research*, Wallingford, v. 41, n. 1/2, p. 105-118, Mar. 1997.

REICOSKY, D. C.; LINDSTROM, M. J. Fall tillage method: effect on short-term carbon dioxide flux from soil. *Agronomy Journal*, Madison, v. 85, n. 6, p. 1237-1243, Nov./Dec. 1993.

REICOSKY, D. C.; REEVES, D. W.; PRIOR, S. A.; RUNION, G. B.; ROGERS, H. H.; RAPER, R. L. Effects of residue management and controlled traffic on carbon dioxide and water loss. *Soil and Tillage Research*, Wallington, v. 52, n. 3/4, p. 153-165, Oct. 1999.

ROSENZWEIG, C.; HILLEL, D. Soils and global climate change: challenges and opportunities. *Soil Science*, Baltimore, v. 165, n. 1, p. 47-56, Jan. 2000.

RUSSELL, C. A.; VORONEY, R. P. Carbon dioxide efflux from the floor of a boreal aspen forest. I. Relationship to environmental variables and estimates of C respired. *Canadian Journal of Soil Science*, Ottawa, v. 78, n. 2, p. 301-310, May 1998.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE SILVICULTURA – SBS. Área plantada com pinus e eucaliptos no Brasil (ha) - 2000. Disponível em: <http://www.sbs.org.br/area_plantada.htm>. Acesso em: abr. 2004.

SCHARPENSEEL, H. W. Preface to workshop 'Management of carbon in tropical soils under global change: science, practice and policy'. *Geoderma*, Amsterdam, v. 79, n. 1/4, p. 1-8, Sept. 1997.

SCHLESINGER, W. H. An overview of the carbon cycle. In : LAL, R.; KIMBLE, J.; LEVINE, E.; STEWART, B. A. Soils and global change. *Advances in Soil Science*. Chelsea: Lewis Publishers, 1995. Cap 2, p. 9-25.

SUNDQUIST, E. T. The global carbon dioxide budget. *Science*, Washington, v. 259, n. 5097, p. 934-941, Feb. 1993.

YIM, M. H.; JOO, S. J.; NAKANE, K. Comparison of field methods for measuring soil respiration: a static alkali absorption method and two dynamic closed chamber methods. *Forest Ecology and Management*, Amsterdam, v. 170, n. 1/3, p. 189-197, Oct. 2002.

CAPÍTULO 2

VARIAÇÕES DE CURTO PRAZO NAS EMISSÕES DE CO₂ DO SOLO EM SISTEMAS DE MANEJO DE CAFEIEIRO (*Coffea arabica* L.) NA REGIÃO DE LAVRAS, MG

1 RESUMO

D'ANDRÉA, Alexandre Fonseca. **Variações de curto prazo nas emissões de CO₂ do solo em sistemas de manejo de cafeeiro (*Coffea arabica* L.) na região de Lavras, MG. 2004. Cap. 2, 24 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, MG.¹**

As emissões de CO₂ do solo representam um importante componente do ciclo global do carbono. No entanto, informações sobre alterações de curto prazo nos fluxos de CO₂ em solos de regiões tropicais são escassas, mesmo nos cultivados com culturas de grande importância econômica, como o cafeeiro. No Brasil, o plantio de cafezais em espaçamento adensado tem sido adotado recentemente por apresentar vantagens na redução de custos e liberação de área útil. Neste sistema, a condução de operações de poda é necessária para garantir a manutenção da produtividade das plantas, afetadas pelo sombreamento e perda de ramos basais produtivos. O objetivo deste estudo foi avaliar as variações de curto prazo no fluxo de CO₂ do solo em cafezais e verificar o efeito do manejo diferenciado de podas drásticas (recepta) neste processo. Para tal, foram selecionadas parcelas com cafeeiros plantados em espaçamento adensado com as cultivares Acaíá Cerrado e Rubi, em área de Latossolo Vermelho distroférrico de textura muito argilosa. Foram definidos os seguintes tratamentos, num delineamento inteiramente casualizado: A_{R1}, cultivar Acaíá Cerrado, com recepagem em 2001; A_{R3}, cultivar Acaíá Cerrado, com recepagem em 2003; R_{R2}: cultivar Rubi, com recepagem em 2002; R_{NR}: cultivar Rubi não submetida à poda. As emissões de CO₂ do solo foram influenciadas pelo manejo de podas, sendo tanto menores quanto mais recente a recepagem, o que pode estar relacionado à morte de raízes finas do cafeeiro, em decorrência de alterações na relação parte aérea/raiz. A média diurna do fluxo de CO₂ do solo foi maior no

¹ Comitê Orientador: Marx Leandro Naves Silva – UFLA (Orientador), Nilton Curi – UFLA, Carlos Alberto Silva – UFLA, Renato Roscoe – EMBRAPA e Paulo Tácito Gontijo Guimarães – EPAMIG.

sistema R_{NR} , com pico de emissão das 9 às 11 horas. As emissões de CO_2 não foram afetadas por fatores abióticos do ambiente, como a temperatura e a evaporação de água do solo, mas estiveram significativamente correlacionadas com o teor de carbono da biomassa microbiana ($R=0,90$, $P<0,05$). Os resultados indicam a existência de uma estreita relação entre a atividade do sistema radicular das plantas e as emissões de CO_2 do solo em cafezais.

2 ABSTRACT

D'ANDRÉA, Alexandre Fonseca. **Short-term variations of soil CO₂ emissions in coffee management systems at Lavras-MG region, Brazil.** 2004. Cap. 2, 24 p. Thesis (Doctorate in Soil Science and Plant Nutrition) – Federal University of Lavras, MG, Brazil.¹

Soil CO₂ emissions represent an important component of carbon global cycle. However, information about short-term alterations of CO₂ fluxes in soils of tropical regions is rare, even those cultivated with great economical importance crops, such as coffee. In Brazil, the planting of coffee in dense spacing has been recently adopted by presenting advantages in costs reduction and useful area release. In this system, the conduction of pruning operations is necessary in order to guarantee the maintenance of productivity of plants, which are affected by shadow and loss of productive basal branches. The objective of this study was to evaluate short-term variations of soil CO₂ flux in coffee plantations and to verify the effect of differential management of drastic pruning (low pruning) in this process. For that purpose, there were selected parcels with coffee planted in dense spacing with Acaiá Cerrado and Rubi cultivars, in an area of very clayey dystroferric Red Latosol (Oxisol). Using a totally randomized design, the following treatments were defined: A_{R1}: Acaiá Cerrado cultivar with low pruning in 2001; A_{R3}: Acaiá Cerrado cultivar with low pruning in 2003; R_{R2}: Rubi cultivar with low pruning in 2002; R_{NR}: Rubi cultivar without pruning. Soil CO₂ emissions were influenced by pruning management, being as smaller as more recent the low pruning, what can be related to the death of coffee plant fine roots, as consequence of alterations in aerial part/root ratio. The daily average of soil CO₂ flux was higher in R_{NR} system, with emission peak from 9 am to 11 am. The CO₂ emissions were not affected by environmental abiotic factors, such as temperature and soil water evaporation, but they were significantly correlated with the carbon content of microbial biomass ($R=0.90$, $P<0.05$). The results indicate the existence of a close relationship between activity of plants root system and soil CO₂ emissions in coffee plantations.

¹ Guidance Committee: Marx Leandro Naves Silva – UFLA (Major Professor), Nilton Curi – UFLA, Carlos Alberto Silva – UFLA, Renato Roscoe – EMBRAPA and Paulo Tácito Gontijo Guimarães – EPAMIG.

3 INTRODUÇÃO

O armazenamento de carbono no globo terrestre ocorre em quatro compartimentos principais, denominados oceânico, atmosférico, terrestre e geológico, este último representado pela crosta terrestre (Sundquist, 1993). À exceção do compartimento geológico, os demais interagem continuamente por meio de transferências mediadas por processos químicos e biológicos, constituindo o que se conhece como o ciclo do carbono (Eswaran et al., 1993). A maior transferência global do elemento ocorre entre os compartimentos terrestre e atmosférico e, neste fluxo, dos cerca de 120 Pg de C movimentados anualmente ($1 \text{ Pg} = 10^{15} \text{ g}$), o solo contribui com a emissão de aproximadamente 60 Pg, produzidos pela oxidação de constituintes orgânicos e pela respiração do sistema radicular das plantas (Schlesinger, 1995).

Nos países em desenvolvimento, o fator que mais contribui para a emissão de CO_2 do compartimento terrestre para o atmosférico é o uso da terra (Scholes & van Breemen, 1997). Segundo Houghton (1995), as emissões de carbono, em 1980, provocadas por alterações no uso da terra, foram de 1,4 Pg (1,3 Pg nos trópicos e 0,1 Pg fora dessa região) e, em 1990, de 1,7 Pg (essencialmente em regiões tropicais). O entendimento sobre a dinâmica de CO_2 em função de mudanças no uso da terra ainda é considerado insuficiente (Dixon et al., 1994) e, apesar de fatores como a temperatura e umidade do solo serem tidos como os mais importantes para determinar as emissões de CO_2 do solo (Bowden et al., 1998; Duiker & Lal, 2000; Longdoz et al., 2000; Janssens et al., 2001), pouco se sabe sobre as alterações de curto prazo em solos tropicais submetidos ao uso agrícola. No Brasil, as informações são escassas, mesmo em culturas de grande importância econômica, como a do cafeeiro, que representa o maior produto primário de exportação (FAO, 2000). O país produz, atualmente, em torno de 38,3 milhões de sacas de café anuais (previsão média para a safra

2004/2005), com mais de 45% da produção no estado de Minas Gerais (CONAB, 2004), além de ser o segundo principal consumidor mundial do produto (Anuário Estatístico..., 2003). Ainda assim, não existem registros sistemáticos das emissões de CO₂ em solos cultivados com cafeeiros.

Recentemente, o plantio de cafezais em espaçamento adensado tem sido adotado como alternativa para a redução de custos em função do aumento de produtividade e economia de área, que se torna disponível para cultivos alternativos (Bartholo et al., 1998; Rena et al., 1998a). No entanto, algumas particularidades estão implícitas na condução de lavouras adensadas de cafeeiros, como as operações de poda, indispensáveis para o restabelecimento da sua capacidade produtiva, quando afetada pelo fechamento das copas e perda de ramos na base da planta (Melles & Guimarães, 1985; Rena et al., 1998a, b).

Uma vez que o desenvolvimento do sistema radicular do cafeeiro é condicionado não só pelo potencial genético da planta, mas também em função de determinadas condições ambientais (Rena e Guimarães, 2000), é possível que práticas de manejo que afetem o sistema radicular, como no caso das podas (Miguel et al., 1984; Rena et al., 1998b), possam também influenciar as emissões de CO₂ do solo. O presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de quantificar as variações de curto prazo no fluxo de CO₂ do solo em cafezais adensados e verificar o efeito do manejo diferenciado de podas sobre as emissões deste gás.



4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Descrição da área de estudo

O trabalho foi desenvolvido no município de Lavras, MG, em área localizada nas coordenadas 21°13'40" de latitude Sul e 44°57'50" de longitude Oeste, a 925 m acima do nível do mar. O clima da região é Cwa na classificação climática de Köppen, com médias anuais para precipitação e temperatura de, respectivamente, 1.530 mm e 19,4 °C (Brasil, 1992).

A área em estudo estava localizada no *campus* da Universidade Federal de Lavras, num Latossolo Vermelho distroférico de textura muito argilosa (68% de argila), fase floresta tropical subperenifólia, ocupada com cafeeiros pertencentes ao programa "Melhoramento Genético do Cafeeiro" (parceria Bioex/CNPq–Conselho Nacional do Café/UFLA/EPAMIG–PROCAFÉ/MMA). Cafeeiros das cultivares Acaia Cerrado ("Campo de seleção da cultivar Acaia Cerrado") e Rubi ("Ensaio de progênes da cultivar Rubi") foram implantados no campo em parcelas experimentais adjacentes. A área possuía um histórico de uso com culturas anuais (milho e feijão) a partir de 1982 e com cafeeiros a partir de 1986. Em 1995, um talhão antigo com cafeeiros foi eliminado e a área foi preparada para receber os ensaios de melhoramento genético. As mudas foram plantadas no espaçamento adensado de 2,0 × 0,6 m, com adubação básica de 150 g por metro linear de superfosfato simples, 50 g de cloreto de potássio, 150 g de calcário e 5 L por metro linear de composto orgânico. As adubações de manutenção foram feitas nos anos subseqüentes, com quatro aplicações anuais em quantidades que variaram de 40 a 120 g da formulação 20-0-20 por planta de café, de acordo com seu estágio de desenvolvimento. Os tratamentos culturais nas

parcelas foram feitas por meio de capinas manuais e herbicidas e a aplicação de micronutrientes e de produtos químicos fitossanitários, via foliar. Por causa do espaçamento adensado, a superfície do solo estava, muitas vezes, coberta por uma camada de folhas e outros resíduos vegetais.

As diferenças no manejo das parcelas se restringiram, praticamente, à existência ou não de operações de poda drástica nas plantas (recepagem a 40 cm da superfície do solo) e ao período em que estas foram realizadas. Em cada parcela, após a remoção total da parte aérea, os galhos maiores eram retirados da área e os resíduos orgânicos compostos por folhas e ramos mais finos distribuídos na entrelinha de maneira a funcionar como cobertura morta. A partir das características de condução do cafezal nos talhões, foram definidos os seguintes tratamentos: (A_{R3}) cultivar Acaiá Cerrado, com recepagem em agosto de 2003, 75 dias antes das medições do fluxo de gases do solo; (A_{R1}) cultivar Acaiá Cerrado, com recepagem em dezembro de 2001; (R_{R2}) cultivar Rubi, com recepagem em dezembro de 2002; (R_{NR}) cultivar Rubi, com plantas não recepadas e de maior desenvolvimento vegetativo (altura média das copas: 1,8 a 2,0 m). As parcelas experimentais mediam 30×70 m, exceto a do tratamento R_{R2} , que possuía as dimensões de 30×35 m. Para as medições de campo e coleta das amostras de solo, foram desprezadas as linhas de plantio externas e uma faixa limítrofe de 3 m à frente e ao fundo das parcelas, consideradas bordaduras. Uma visão geral das áreas cultivadas com as parcelas selecionadas para o desenvolvimento do presente estudo é apresentada na Figura 1.

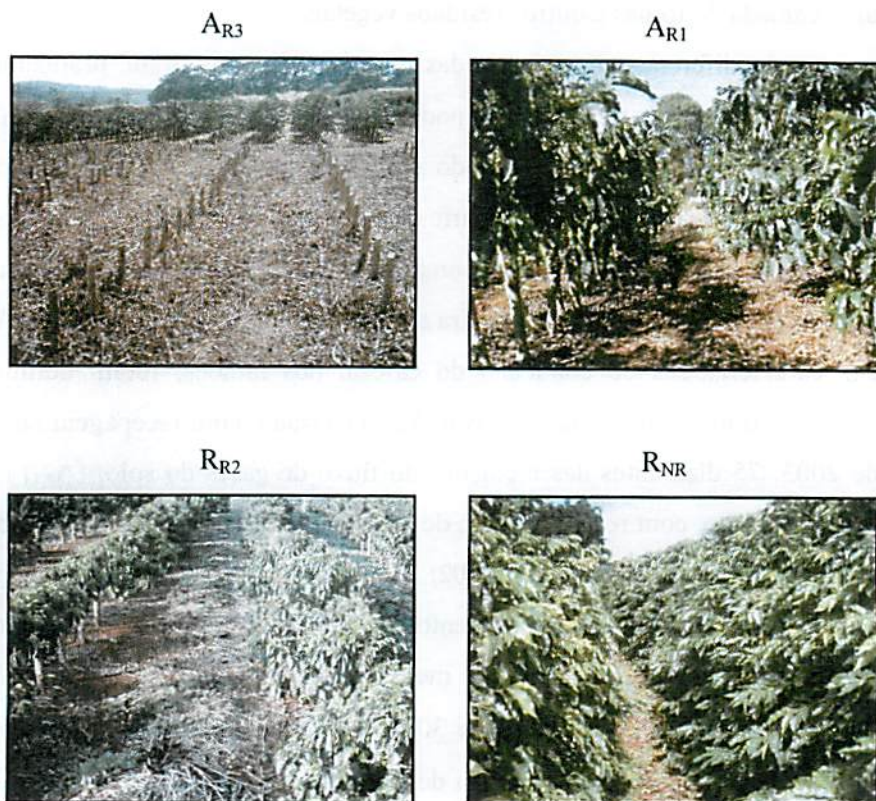


FIGURA 1. Visão geral das parcelas estudadas com cafeeiros plantados em espaçamento adensado. A_{R3} : cultivar Acaia Cerrado, com recepagem em 2003; A_{R1} : cultivar Acaia Cerrado, com recepagem em 2001; R_{R2} : cultivar Rubi, com recepagem em 2002; R_{NR} : cultivar Rubi não submetida a operações de poda.

4.2 Medição do fluxo de gases do solo

Foram feitas medições dos fluxos de CO₂ e vapor d'água do solo nos períodos de 6-8, 9-11, 12-14, 15-17 e 18-20 horas (horário de verão do Brasil) do dia 9 de novembro de 2003, com cinco repetições por tratamento. Foi utilizado um analisador de gás por absorção na faixa do infravermelho (IRGA) modelo *ADC LCA-4*, acoplado a uma campânula cilíndrica de polieteno modelo *ADC Soil Hood* (ambos fabricados por *Analytical Development Company Bioscientific Ltd, Hoddesdon, England*). A campânula utilizada possuía área superficial de 98,5 cm² e volume interno de 926 mL, sendo equipada com mini-ventilador para mistura do ar. O IRGA foi operado no modo diferencial, com fluxo de ar nas tubulações de entrada e saída da campânula de 240 μmol s⁻¹ (302 mL min⁻¹) mantido por meio de um sistema de bombeamento localizado no interior do aparelho. O equipamento foi previamente calibrado em laboratório com um padrão de concentrações conhecidas dos dois gases.

Nas medições de campo, os resíduos vegetais porventura existentes em cada ponto foram cuidadosamente removidos e a campânula posicionada sobre a superfície do solo, deixando ligeiramente enterrado um alongamento da borda até um ressalto que delimita o volume efetivo da câmara, a fim de melhorar o selamento da interface campânula-solo e evitar perdas ou enriquecimento lateral de CO₂, possibilidade levantada por Reicosky et al. (1997). As leituras foram tomadas na projeção da copa das plantas e na parcela recém-podada (A_{RS}), na posição que teria sido a projeção da copa antes da recepagem. Em cada ponto de medição do fluxo de gases, foi registrada a temperatura do solo a 12 cm de profundidade, com o uso de um termômetro de solo.

As emissões de CO₂ e de vapor d'água do solo foram calculadas por meio da diferença entre a concentração dos gases presentes no ar que entra na campânula e no ar que deixa a mesma, após ter sido atingido um estado de equilíbrio dinâmico (Mosier, 1990; Field et al., 1992). Testes preliminares realizados no campo indicaram que a estabilização das leituras de fluxo de CO₂ no IRGA ocorreu de 60 a 240 segundos após o posicionamento das campânulas na superfície do solo (Figura 1A, Anexo). Com base nos resultados, foi adotado um tempo de leitura de 3 a 4 minutos, considerado longo o suficiente para o equilíbrio gasoso no interior da campânula e breve o bastante para evitar interferências microclimáticas significativas em decorrência da presença da câmara.

4.3 Coleta e preparo das amostras de solos

Em cada parcela de cafeeiros, foi coletada uma amostra composta na profundidade de 0-10 cm (obtida a partir de seis simples) para caracterização química e física do solo. O material foi seco ao ar e peneirado para a obtenção da fração terra fina (< 2 mm). As amostras para avaliação da biomassa microbiana foram coletadas no mesmo dia das medições do fluxo de gases, no horário de 12 às 14 horas, com cinco repetições por tratamento, na profundidade de 0-10 cm. As amostras foram transportadas para o laboratório e, em 24 horas, passadas em peneira de 4 mm para a retirada de raízes e outros resíduos orgânicos visíveis, como restos de animais e vegetais. Depois de armazenadas por 10 dias em câmara fria a 4°C, foram incubadas no escuro à temperatura ambiente por uma semana para estabilização da atividade microbiana. Após esse período, foram realizadas as análises de laboratório.

4.4 Análises de laboratório

A determinação das frações granulométricas do solo foi feita pelo método do densímetro de Bouyoucos (Embrapa, 1997). O pH em água e os teores de fósforo disponível e dos componentes do complexo sortivo do solo foram determinados segundo Vettori (1969) e Embrapa (1997). O carbono orgânico total foi determinado por oxidação a quente com dicromato de potássio e titulação com sulfato ferroso amoniacal, segundo método modificado de Walkley e Black (1934). Na Tabela 1 é apresentada uma síntese dos atributos físicos e de fertilidade avaliados para a caracterização do solo.

A determinação do teor de carbono da biomassa microbiana foi feita pelo método da fumigação-extração (Vance et al., 1987), com uso de K_2SO_4 $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ como extrator, oxidação a quente com $K_2Cr_2O_7$ $0,0667 \text{ mol L}^{-1}$ + $H_2SO_4:H_3PO_4$ (2:1) e titulação com $(NH_4)_2Fe(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ $0,0333 \text{ mol L}^{-1}$. Foi utilizado o fator 0,26 para conversão do carbono extraído a carbono da biomassa microbiana.

4.5 Delineamento experimental e análise estatística

A análise de variância foi feita considerando um delineamento inteiramente casualizado (DIC), com os sistemas de manejo dos cafeeiros e os horários de realização das leituras como as fontes de variação. Para o carbono da biomassa microbiana do solo, apenas a primeira fonte de variação foi considerada, já que as amostras foram coletadas em um único período do dia. A comparação múltipla de médias foi feita pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade e, quando necessário, foi realizado o desdobramento do efeito das

fontes de variação. Análises de correlação simples foram feitas no sentido de verificar o grau de associação linear entre variáveis, e os coeficientes obtidos (R) foram submetidos ao teste t. Quando pertinente, foi conduzida análise de regressão linear simples, sendo utilizados os testes t e F para a verificação da significância dos parâmetros do modelo e do coeficiente de determinação (R^2), respectivamente.

TABELA 1. Atributos de fertilidade e frações granulométricas de um Latossolo Vermelho distroférico submetido a diferentes sistemas de manejo de cafeeiros, na região de Lavras, MG.

Atributos [†]	Sistemas			
	A _{R1}	A _{R3}	R _{NR}	R _{R2}
pH	4,5	4,1	4,9	4,8
P (mg kg ⁻¹)	83	53	59	54
K (mg kg ⁻¹)	300	335	217	199
Ca (cmol _c dm ⁻³)	1,5	1,1	3,8	2,9
Mg (cmol _c dm ⁻³)	1,1	0,8	0,6	1,5
Al (cmol _c dm ⁻³)	0,8	1,4	0,2	0,3
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	8,8	11,0	5,6	6,3
S (cmol _c dm ⁻³)	4,2	4,2	5,1	4,9
T (cmol _c dm ⁻³)	12,2	13,8	10,5	11,2
V (%)	28	20	47	44
CO (g kg ⁻¹)	15,1	12,8	14,5	15,7
Arcia (g kg ⁻¹)	220	160	230	180
Silte (g kg ⁻¹)	60	130	120	170
Argila (g kg ⁻¹)	720	710	650	650

[†] S: soma de bases; T: saturação por bases; CO: carbono orgânico. A_{R1}: cultivar Acaia Cerrado com recepagem em 2001; A_{R3}: cultivar Acaia Cerrado com recepagem em 2003; R_{R2}: cultivar Rubi com recepagem em 2002; R_{NR}: cultivar Rubi sem recepagem.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Fluxo de CO₂ do solo

A variação diurna das emissões de CO₂ do solo avaliadas para as duas cultivares de cafeeiros utilizadas no estudo está representada na Figura 2. O fluxo diurno de gás carbônico do solo (FCO₂) sofreu influência significativa do manejo de podas adotado nas parcelas (análise de variância, P<0,01). Em média, a maior emissão de gás carbônico ocorreu no solo da parcela com a cultivar Rubi não submetida à poda (R_{NR}), com 0,393 g CO₂ m⁻² h⁻¹, seguida da cultivar Acaia Cerrado recepada em 2001 (A_{R1}), com 0,308 g CO₂ m⁻² h⁻¹. Por outro lado, as parcelas com plantas podadas em 2002 (Rubi, R_{R2}) e 2003 (Acaia Cerrado, A_{R3}), as mais recentes, apresentaram as menores médias diurnas de FCO₂, que foram, respectivamente, 0,215 e 0,183 g CO₂ m⁻² h⁻¹.

Não houve efeito do horário de medição sobre as emissões médias de gás carbônico do solo (análise de variância). No entanto, no sistema R_{NR}, foi observada uma elevação significativa do fluxo de CO₂ do solo no período de 9-11 horas (análise de variância, P<0,02), atingindo um pico de emissão da ordem de 0,537 g CO₂ m⁻² h⁻¹ (Figura 2). Esse valor foi cerca de 58% maior do que o observado no sistema A_{R1}, superando em 1,5 vez as emissões do sistema R_{R2} e em quase 2,5 vezes as do A_{R3}, considerando o mesmo horário de medição. Por outro lado, nos sistemas que sofreram manejo de poda, as emissões de gás carbônico do solo foram mais constantes no tempo, variando pouco em relação à média diurna.

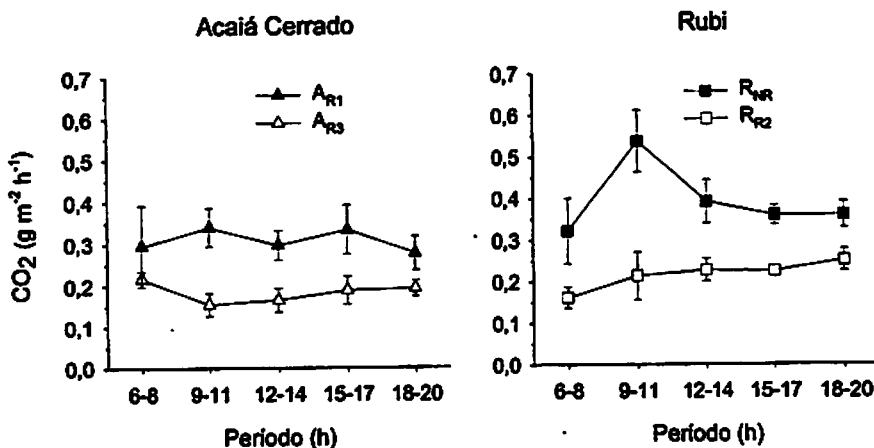


FIGURA 2. Variação diurna das taxas de emissão de CO₂ do solo em parcelas de café submetidas a manejo diferenciado de poda. A_{R1} e A_{R3}: cultivar Acaia Cerrado com recepagem (poda drástica) em 2001 e 2003, respectivamente; R_{NR} e R_{R2}: cultivar Rubi sem recepagem e com recepagem em 2002, respectivamente. As barras verticais indicam o erro padrão da média (n=5).

5.2 Evaporação de água e temperatura do solo

De maneira semelhante ao FCO₂, o manejo também afetou as taxas de evaporação de água do solo (E). No entanto, houve efeito significativo do horário de medição para todos os sistemas (análise de variância, P<0,01), com valores destacadamente elevados no período da tarde (Figura 3), sendo máximos das 15-17 horas. Neste horário, as diferenças entre os sistemas de manejo ficaram mais evidentes e a evaporação de água no R_{NR} foi significativamente menor do que nas parcelas submetidas à poda (26,8 g H₂O m⁻² h⁻¹, contrastando com valores que oscilaram entre 40,3 e 44,5 g H₂O m⁻² h⁻¹).

A temperatura do solo (T) variou segundo o mesmo padrão temporal apresentado pela E, sendo mais elevada a partir 12-14 horas para todas as parcelas (Figura 3). No entanto, o aumento da temperatura do solo no R_{NR} foi menos intenso que nos demais sistemas, estacionando em valores significativamente menores no horário de 15-17 horas (análise de variância, $P < 0,01$).

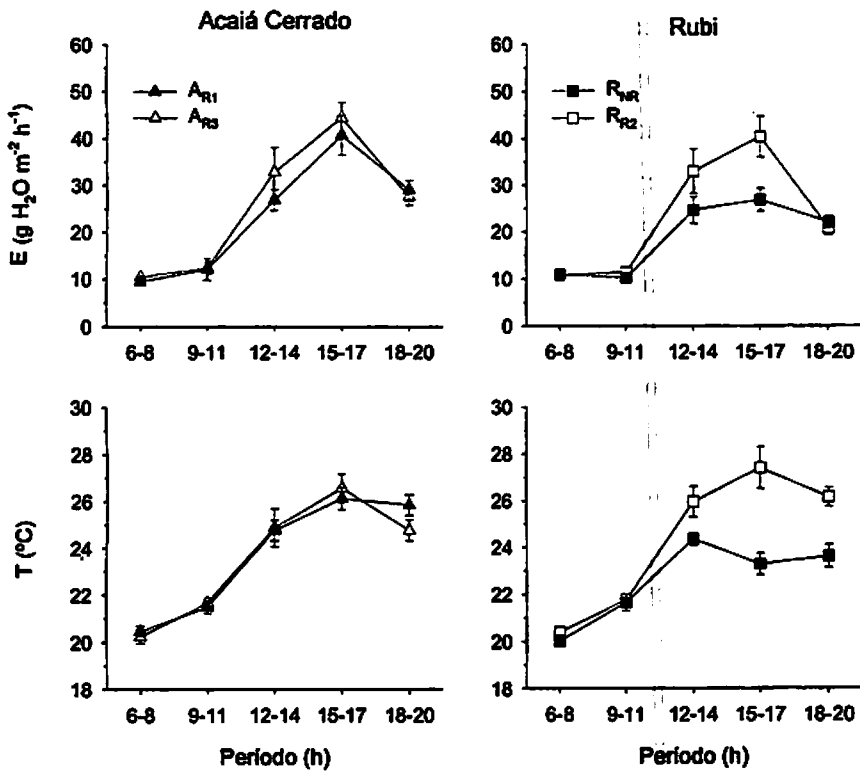


FIGURA 3. Variação diurna das taxas de evaporação de água (E) e da temperatura do solo (T) em parcelas de café submetidas a manejo diferenciado de poda. A_{R1} e A_{R3} : cultivar Acaia Cerrado com recepagem (poda drástica) em 2001 e 2003, respectivamente; R_{NR} e R_{R2} : cultivar Rubi sem recepagem e com recepagem em 2002, respectivamente. Barras verticais indicam o erro padrão da média ($n=5$).

As emissões de CO₂ do solo foram tanto menores quanto mais recentes as operações de poda. A cultivar com plantas não recepadas (R_{NR}), de copa mais exuberante, foi a que emitiu a quantidade mais elevada de CO₂, com destaque para o período das 9-11 horas. Entre as cultivares submetidas à poda, o maior fluxo médio ocorreu naquela com maior tempo decorrido desde a recepagem (A_{R1}). A parcela com a cultivar submetida à poda em 2003 (A_{R3}), poucas semanas antes das medições efetuadas em campo, apresentou a mais baixa emissão de CO₂ do solo, mesmo tendo à superfície grande quantidade de massa vegetal seca, deixada no campo após a recepagem. Este fato é uma evidência de que, neste caso, o aporte de resíduos orgânicos ao solo parece não ter sido tão importante na determinação das emissões de gás carbônico, sugerindo a existência de outro fator mais diretamente envolvido no processo.

Nesse sentido, é conhecido o fato de que a poda drástica com remoção total da parte aérea provoca morte acentuada de parte do sistema radicular da planta, sendo que, a partir dos 60 dias após a recepagem, mais da metade das raízes finas absorventes das plantas pode estar morta, na projeção da copa (Miguel et al., 1984). Nesta situação, os cafeeiros das parcelas A_{R3} e R_{R2}, recepados mais recentemente, teriam um sistema radicular menos abundante, produzindo menor quantidade de gás carbônico no solo em decorrência do processo de respiração das raízes. Além disso, considerando que a rizosfera é um local enriquecido com compostos oxidáveis de natureza variada, incluindo exsudatos, mucilagens, lisados e secreções, que podem ser utilizados pelos diversos grupos de microrganismos do solo no seu metabolismo, em interações desenvolvidas com o sistema radicular (Brimecombe et al., 2001; Neumann & Römheld, 2001; Moreira & Siqueira, 2002), alterações na quantidade de raízes da planta podem causar um impacto sensível sobre a microbiota do solo. De

fato, análises efetuadas em laboratório indicaram que a biomassa microbiana do solo se desenvolveu melhor nas parcelas que apresentaram as maiores emissões de CO₂, que foram a R_{NR} e a A_{R1} (Figura 4). A correlação significativa encontrada entre a média diurna das emissões de CO₂ do solo e o teor de carbono da biomassa microbiana (R=0,90, P<0,05, n=4) corrobora a hipótese de que, ao restringir a atividade do sistema radicular do cafeeiro, as podas também provocaram diminuição da microbiota do solo. Além disso, reforça a existência de uma inter-relação entre a parte aérea da planta, o sistema radicular e os fluxos de CO₂, com participação direta dos microrganismos do solo, o que tem sido relatado com freqüência no caso de sistemas florestais (Russel & Voroney, 1998; Longdoz et al., 2000; Högberg et al., 2001).

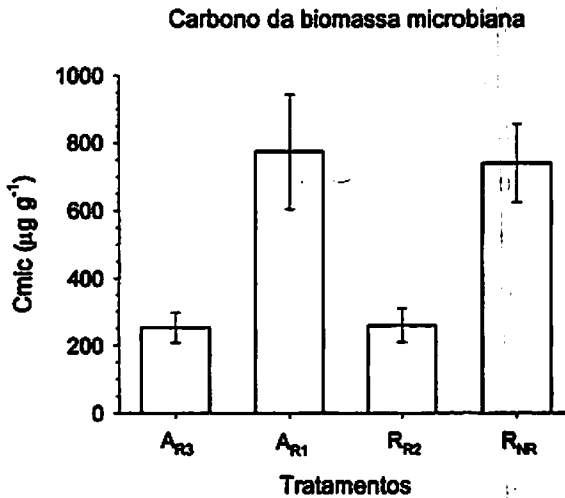


FIGURA 4. Teor de carbono da biomassa microbiana do solo (C_{mic}) em parcelas de cafeeiro submetidas a manejo diferenciado de poda. Tratamentos: cultivar Acaiaá Cerrado, com recepagem (poda drástica) em 2001 (A_{R1}) e 2003 (A_{R3}); cultivar Rubi, com recepagem em 2002 (R_{R2}) e sem recepagem (R_{NR}). As barras verticais indicam o erro padrão da média (n=5).

Estudos relacionando aspectos ecofisiológicos com as emissões de CO₂ do solo conduzidos recentemente têm mostrado a importância do metabolismo de carbono na planta neste processo. Craine et al. (1999) investigaram as emissões de CO₂ do solo em gramíneas, em parcelas submetidas a condições de sombreamento, verificando que a redução de 95% da intensidade luminosa provocou uma queda de 35% a 39% no fluxo de CO₂, independentemente de variações na temperatura do ar ou do solo. Nesse experimento, a roçagem das plantas a dois centímetros da superfície causou uma redução de 19% nas emissões de CO₂ do solo, indicando que a prática interfere no processo não só por causar alterações na biomassa do sistema radicular, mas também, por alterar o fornecimento de carboidratos produzidos na parte aérea.

No presente estudo, o maior fluxo de gás carbônico do solo ocorreu na parcela de cafeeiros não recepados na parte da manhã, período que coincide com as maiores taxas fotossintéticas da planta, que é fisiologicamente adaptada a condições de sombreamento (Rena et al., 1998a). Desse modo, é bastante provável que o fator determinante das emissões de CO₂ do solo, nestes cafezais, esteja diretamente relacionado ao metabolismo da planta como um todo e à atividade do sistema radicular, em particular. Por outro lado, a dinâmica de água no solo e as oscilações de temperatura não parecem ter influência marcante sobre o processo.

Ao contrário dos fluxos de gás carbônico, as taxas de evaporação de água (E) acompanharam sensivelmente a variação da temperatura do solo (T) (Figura 5). A associação entre os valores das duas variáveis ($R=0,80$, $P<0,01$, $n=100$) e a falta de correlação significativa entre as médias de evaporação e o carbono da biomassa microbiana do solo ($R=-0,61$, $P=0,19$, $n=4$) indicam que as perdas de vapor d'água foram um fenômeno predominantemente físico, com variações governadas pelas oscilações térmicas do solo. Nesse sentido, as

parcelas com cafeeiros menos expostas à insolação direta por possuírem plantas com copas mais desenvolvidas (A_{RI} e, principalmente, R_{NR}), foram também as que promoveram uma maior conservação de água no sistema, pelo maior sombreamento do solo. Os resultados indicam que a temperatura do solo pode ser utilizada, com relativa confiabilidade, em estimativas indiretas das taxas de evaporação de água do solo.

Apesar dos resultados obtidos neste estudo, é necessário investigar se as variações de curto prazo no fluxo diurno de CO_2 observadas no sistema R_{NR} se repetem com a mesma tendência em meses ou períodos do ano diferentes daquele avaliado. Estudos complementares relacionando a atividade do sistema radicular do cafeeiro ou de sua parte aérea com o fluxo de CO_2 do solo serão importantes para determinar a participação efetiva do vegetal neste processo. De qualquer modo, os resultados deste trabalho apontam para a necessidade de se levar em consideração o efeito do manejo sobre o sistema radicular das plantas, em estudos sobre emissões de gás carbônico do solo conduzidos em áreas com culturas perenes.

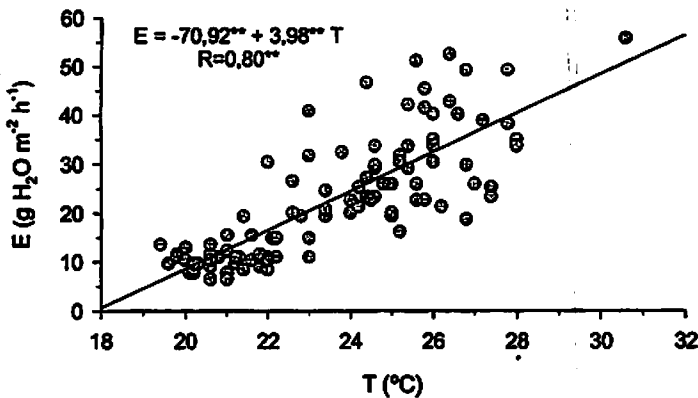


FIGURA 5. Gráfico de dispersão com valores de taxa de evaporação de água (E) e temperatura do solo (T), em sistemas de manejo de cafeeiros submetidos ou não a operações de poda drástica ($n=100$).

6 CONCLUSÕES

1. As emissões diurnas de CO₂ do solo em cafezais sofreram influência direta do manejo de podas na cultura. O processo foi afetado pelo estágio de desenvolvimento da planta após a recepagem, possivelmente por causa de diferenças na quantidade e atividade do sistema radicular do cafeeiro, que diminuem em decorrência da remoção da parte aérea.
2. Os fatores abióticos do ambiente (temperatura e água) não foram os principais determinantes dos fluxos de CO₂ do solo em áreas com cafeeiros. Por outro lado, os fatores bióticos (plantas e microbiota do solo) são os que parecem condicionar as emissões de CO₂ do solo, nestes ecossistemas.
3. As variações temporais de curto prazo nos fluxos de CO₂ do solo foram menores em plantas submetidas ao manejo de podas. Ao contrário, em plantas não recepadas, existiu um pico de emissão de CO₂ das 9 às 11 horas da manhã, o que pode estar relacionado ao metabolismo da planta, já que o período coincide com o horário de atividade fotossintética mais elevada do cafeeiro.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANUÁRIO ESTATÍSTICO DO CAFÉ 2002/2003. Rio de Janeiro: Coffee Business, 2003. 101 p.

BARTHOLO, G. F.; MELO, B. de; MENDES, A. N. G. Evolução na adoção de espaçamentos na cultura do café. *Informe Agropecuário*, Belo Horizonte, v. 19, n. 193, p. 49-60, 1998.

BOWDEN, R. D.; NEWKIRK, K. M.; RULLO, G. M. Carbon dioxide and methane fluxes by a forest soil under laboratory-controlled moisture and temperature conditions. *Soil Biology and Biochemistry*, Oxford, v. 30, n. 12, p. 1591-1597, Dec. 1998.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. *Normais climatológicas (1961-1990)*. Brasília: Secretaria Nacional de Irrigação. Departamento Nacional de Meteorologia, 1992. 84 p.

BRIMECOMBE, M. J.; DE LEIJ, F. A.; LYNCH, J. M. The effect of root exudates on rhizosphere microbial populations. In: VARANINI, R. P. Z.; NANNIPIERI, P. (Ed.). *The Rhizosphere - biochemistry and organic substances at the soil-plant interface*. New York: Marcel Dekker, 2001. Cap 4. p. 95-140.

CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento). *Safras*. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/download/safra/safracafe.pdf>. Acesso em: jun. 2004.

CRAINE, J. M.; WEDIN, D. A.; STUART CHAPIN, III, F. Predominance of ecophysiological controls on soil CO₂ flux in a Minnesota grassland. *Plant and Soil*, Dordrecht, v. 207, n. 1, p. 77-86, 1999.

DIXON, R. K.; BROWN, S.; HOUGHTON, R. A.; SOLOMON, A. M.; TREXLER, M. C.; WISNIEWSKI, J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, Washington, v. 263, n. 5169, p. 185-190, July 1994.

DUIKER, S. W.; LAL, R. Carbon budget study using CO₂ flux measurements from a no till system in central Ohio. *Soil and Tillage Research*, Wallingford, v. 54, n. 1/2, p. 21-30, Mar. 2000.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Manual de métodos de análise de solo. Brasília: EMBRAPA-SPI; EMBRAPA-CNPS, 1997. 212 p.

ESWARAN, H.; BERG, E. van den; REICH, P. Organic carbon in soils of the world. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 57, n. 1, p. 192-194, Jan/Feb. 1993.

FAO. Chapter on "Brazil". In: *FAO. Agriculture, trade and food security*. Rome, 2000. v. 2, chap. 3.

FIELD, C. B.; BALL, J. T.; BERRY, J. A. Photosynthesis: principles and field techniques. In: *PEARCY, R. W.; EHLERINGER, J; MOONEY, H. A.; RUNDEL, P. W. (Ed.). Plant physiological ecology*. London: Chapman & Hall, 1992. Cap. 11, p. 209-253.

HÖGBERG, P.; NORDGREN, A.; BUCHMANN, N.; TAYLOR, A. F. S.; EKBLAD, A.; HÖGBERG, M. N.; NYBERG, G.; OTTOSSON-LÖFVENIUS, M.; READ, D. J. Large-scale forest girdling shows that current photosynthesis drives soil respiration. *Nature*, London, v. 411, n. 6839, p. 789-792, June 2001.

HOUGHTON, R. A. Changes in the storage of terrestrial carbon since 1850. In: *LAL, R.; KIMBLE, J. LEVINE, E.; STEWART, B. A. Soils and global change*. Boca Raton: CRC Press, 1995. Cap. 4, p. 45-65. (Advances in Soil Science).

JANSSENS, I. A.; KOWALSKI, A. S.; CELEUMANS, R. Forest floor CO₂ fluxes estimated by eddy covariance and chamber-based model. *Agricultural and Forest Meteorology*, Amsterdam, v. 106, n. 1, p. 61-69, Jan. 2001.

LONGDOZ, B.; YERNAUX, M.; AUBINET, M. Soil CO₂ efflux measurements in a mixed forest: impact of chamber disturbances, spatial variability and seasonal evolution. *Global Change Biology*, Oxford, v. 6, n. 11, p. 907-917, Nov. 2000.

MELLES, C. do C. de A.; GUIMARÃES, P. T. G. Podas do cafeeiro. *Informe Agropecuário*, Belo Horizonte, v. 11, n. 126, p. 69-75, jun. 1985.

MIGUEL, A. E.; OLIVEIRA, J. A.; MATIELLO, J. B.; FIORAVANTE, N.; FREIRE, A. C. F. Efeitos dos diferentes tipos de podas na morte de raízes do

cafeeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEIEIRAS, 11., 1984, Londrina. Anais... Rio de Janeiro: IBC, 1984. p. 240-241.

MOREIRA, F. M. de S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras: Ed. UFLA, 2002. 626 p.

MOSIER, A. R. Gas flux measurements techniques with special reference to techniques suitable for measurements over large ecologically uniform areas. In: BOUWMAN, A. F. (Ed.). **Soils and the greenhouse effect**. Wageningen: John Wiley & Sons, 1990. Cap. 13, p. 289-301.

NEUMANN, G.; RÖMHELD, V. The release of root exudates as affected by the plant's physiological status. In: VARANINI, R. P. Z.; NANNIPIERI, P. (Ed.). **The Rhizosphere - biochemistry and organic substances at the soil-plant interface**. New York: Marcel Dekker, 2001. Cap 3. p. 41-93.

REICOSKY, D. C.; DUGAS, W. A.; TORBERT, H. A. Tillage-induced soil carbon dioxide loss from different cropping systems. **Soil and Tillage Research**, Wallingford, v. 41, n. 1/2, p. 105-118, Mar. 1997.

RENA, A. B.; GUIMARÃES, P. T. G. **Sistema radicular do cafeeiro: estrutura, distribuição, atividade e fatores que o influenciam**. Belo Horizonte: EPAMIG, 2000. 80 p. (Série Documentos, 37).

RENA, A. B.; NACIF, A. DE P.; GUIMARÃES, P. T. G.; BARTHOLO, G. F. Plantios adensados de café: aspectos morfológicos, ecofisiológicos, fenológicos e agrônômicos. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 19, n. 193, p. 61-70, 1998a.

RENA, A. B.; NACIF, A. DE P.; GUIMARÃES, P. T. G.; PEREIRA, A. A. Poda do cafeeiro: aspectos morfológicos, ecofisiológicos e agrônômicos. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 19, n. 193, p. 71-80, 1998b.

RUSSELL, C. A.; VORONEY, R. P. Carbon dioxide efflux from the floor of a boreal aspen forest. I. Relationship to environmental variables and estimates of C respired. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 78, n. 2, p. 301-310, May 1998.

SCHLESINGER, W. H. An overview of the carbon cycle. In : LAL, R.; KIMBLE, J.; LEVINE, E.; STEWART, B. A. **Soils and global change: advances in soil science**. Chelsea: Lewis Publishers, 1995. 440p. Cap 2, p. 9-25.

SCHOLES, R. J.; van BREEMEN, N. The effects of global change on tropical ecosystems, **Geoderma**, Amsterdam, v. 79, n. 1/4, p. 9-24, Sept. 1997.

SUNDQUIST, E. T. The global carbon dioxide budget. **Science**, Washington, v. 259, n. 5097, p. 934-941, 1993.

VANCE, E. D.; BROOKES, P. C.; JENKINSON, D. S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. **Soil Biology Biochemistry**, Oxford, v. 19, n. 6, p. 703-707, Apr./June 1987.

VETTORI, L. **Métodos de análise de solos**. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura, 1969. 24 p. (Boletim Técnico, 7).

WALKLEY, A.; BLACK, I. A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Science**, Baltimore, v. 37, n. 1, p. 29-38, 1934.

CAPÍTULO 3

VARIABILIDADE ESPACIAL DO FLUXO DE CO₂ DO SOLO EM POVOAMENTOS FLORESTAIS

1 RESUMO

D'ANDRÉA, Alexandre Fonseca. *Variabilidade espacial do fluxo de CO₂ do solo em povoamentos florestais*. 2004. Cap. 3, 52 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, MG.¹

O solo é um importante compartimento de carbono no globo terrestre, armazenando quantidade expressiva desse elemento em formas orgânicas, principalmente em áreas florestais. Compreender os fatores que afetam as perdas de CO₂ do solo é fundamental para a condução de um manejo sustentado, do ponto de vista da preservação da matéria orgânica do solo e da redução das emissões de gases de efeito estufa para a atmosfera. O objetivo deste trabalho foi avaliar os padrões de variabilidade espacial do fluxo de CO₂ do solo (FCO₂) em ambientes florestais. Para tal, foram selecionadas áreas com mata nativa e eucalipto, num Latossolo Vermelho distroférrico, textura muito argilosa, no município de Lavras, MG. Nos dois sistemas, foi delimitada uma grade com 32 pontos, espaçados regularmente pela distância de cinco metros, na qual foram avaliados o FCO₂ e fatores ambientais (evaporação de água, temperatura e umidade do solo), assim como atributos relacionados à fertilidade (pH, soma de bases e alumínio trocável), estrutura (densidade do solo e porosidade total) e matéria orgânica do solo (carbono orgânico total, carbono da biomassa microbiana e serrapilheira). Análises de correlação linear simples indicaram que as emissões de CO₂ do solo são um fenômeno de natureza complexa, não podendo ser explicadas de maneira satisfatória por um único atributo do solo ou do ambiente. No entanto, no povoamento de eucalipto, parte da variabilidade do fluxo de CO₂ está relacionada ao efeito conjunto do teor de carbono orgânico do solo, da biomassa da serrapilheira e da presença das árvores no terreno ($R^2=45$, $P<0,01$), indicando contribuição de fatores bióticos. Na área com mata nativa, o

¹ Comitê Orientador: Marx Leandro Naves Silva – UFLA (Orientador), Nilton Curi – UFLA, Carlos Alberto Silva – UFLA, Renato Roscoe – EMBRAPA e Paulo Tácito Gontijo Guimarães – EPAMIG.

FCO_2 não apresentou variabilidade espacialmente estruturada na escala de amostragem adotada, com distribuição considerada aleatória. Por outro lado, no povoamento de eucalipto, a dependência espacial do FCO_2 ocorreu até a distância média de 20 m, o que é indicativo de maior continuidade espacial. A introdução de espécies florestais em área originalmente coberta por vegetação nativa alterou sensivelmente a estrutura da variabilidade espacial das emissões de CO_2 do solo.

2 ABSTRACT

D'ANDRÉA, Alexandre Fonseca. **Spatial variability of soil CO₂ flux in forest settlements.** 2004. Cap. 3, 52 p. Thesis (Doctorate on Soil Science and Plant Nutrition) – Federal University of Lavras, MG, Brazil.¹

Soil is an important compartment of carbon in terrestrial ecosystem, retaining substantial quantity of element in organic forms, mainly in forest areas. To understand the factors that affect losses of soil CO₂ is fundamental for conduction of a sustainable management, keeping in mind organic matter conservation and reduction of emissions of greenhouse effect gases to the atmosphere. The objective of this work was to evaluate the patterns of spatial variability of soil CO₂ flux (FCO₂) in distinct use forest environments. For that purpose, there were selected areas with native forest and eucalyptus in a very clayey dystroferric Red Latosol (Oxisol). In both systems, it was delimited a grid with 32 points, regularly spaced by 5 m distance, in which the FCO₂ and environmental factors (water evaporation, temperature and moisture of soil) were evaluated, as well as attributes related to fertility (exchangeable aluminium, pH and basis soil saturation), structure (bulk density and total porosity) and soil organic matter (total organic carbon, microbial biomass carbon and litter). Simple linear correlation analyses indicated that the soil CO₂ emissions are a complex phenomenon, being not satisfactorily explained by a sole soil or environment attribute. However, in the eucalyptus settlement, part of the soil CO₂ flux variability is related to the combined effect of the content of soil organic carbon, the litter biomass and the presence of trees on terrain ($R^2=0.45$, $P<0.01$), indicating contribution of biotic factors. In the native forest area, the FCO₂ did not present spatially structured variability in the scale of adopted sampling, having distribution considered randomized. On the other hand, in the eucalyptus settlement, the spatial dependence of FCO₂ occurred up to 20 m average distance, which is indicative of a condition of greater spatial continuity. The introduction of forest species in an area originally covered by native vegetation substantially altered the structure of spatial variability of soil CO₂ emissions.

¹ Guidance Committee: Marx Leandro Naves Silva – UFLA (Major Professor), Nilton Curi – UFLA, Carlos Alberto Silva – UFLA, Renato Roscoe – EMBRAPA and Paulo Tácito Gontijo Guimarães – EPAMIG.



3 INTRODUÇÃO

A matéria orgânica do solo armazena a maior parte do carbono contido nos sistemas terrestres do planeta, com aproximadamente 1.576 Pg de C (1Pg=10¹⁵g), distribuídos em 12,8 bilhões de hectares de solos continentais (Eswaran et al., 1993). Desse montante, que representa cerca de duas vezes o carbono presente na atmosfera e três vezes o da biomassa da vegetação, a maioria é encontrada nos solos com florestas, que contribuem com 787 Pg de C (Dixon et al., 1994). Apesar dessa grande quantidade armazenada, intervenções humanas nos ambientes florestais podem alterar sensivelmente o quadro apresentado, já que estimativas atuais indicam que práticas como atividades de desmatamento de áreas sob vegetação nativa podem desencadear reduções da ordem de 20% a 50% do carbono nos solos tropicais (Brown & Lugo, 1984).

Compreender os fatores que governam as perdas de carbono do solo na forma de CO₂ tem sido um desafio nos mais diferentes ecossistemas. Apesar de a temperatura e a umidade serem consideradas os principais determinantes das emissões de CO₂ do solo, principalmente em se tratando de variações temporais (Fang et al., 1998; Xu & Qi, 2001; Scott-Denton et al., 2003; Schwendenmann et al., 2003), existem situações em que são outras as variáveis mais estreitamente relacionadas ao processo, como o teor de carbono orgânico do solo, a umidade da serrapilheira e a capacidade de troca catiônica (Gärdenäs, 2000; La Scala Jr et al., 2000a). A variabilidade espacial do fluxo de CO₂ do solo tem sido constantemente atribuída à heterogeneidade de fatores como densidade do sistema radicular, biomassa da serrapilheira, acidez do solo, porosidade e atividade e quantidade de microrganismos (Duiker & Lal, 2000; Longdoz et al., 2000).

Em região de clima temperado, Russell & Voroney (1998) verificaram variações nos padrões temporais das emissões de CO₂ do solo, de locais mais quentes, isolados e aleatórios (na primavera) para emissões mais uniformes relacionadas a raízes ativas em crescimento e à difusão de CO₂ das camadas mais profundas do solo (no verão). Essas alterações, no entanto, podem ocorrer de maneira diferente nos solos dos trópicos, em função da dissimilaridade das condições climáticas das duas regiões. No Brasil, foi registrada uma variação das médias mensais do fluxo de CO₂ do solo em florestas com mata nativa e eucalipto, com aumento das emissões nos meses mais quentes do ano (de outubro a fevereiro), o que foi atribuído às condições favoráveis à atividade dos microrganismos do solo (Lira et al., 1999). La Scala Jr et al. (2000b) mostraram que a precipitação pluviométrica também causou interferências no padrão das emissões de CO₂ do solo.

Recentemente, estudos de variabilidade espacial têm sido conduzidos com maior frequência nas regiões tropicais, principalmente para atributos físicos ou de fertilidade do solo (Schlindwein & Anghinoni, 2000; Alvarez V. & Guarçoni, 2003; Carvalho et al., 2003). Apesar disso, ainda existem poucas informações disponíveis sobre a continuidade espacial de atributos do solo, especialmente os relacionados a processos bioquímicos (Cambardella et al., 1994) e menos ainda sobre os padrões de variabilidade das emissões de CO₂ do solo e de seus fatores condicionantes (Fang et al., 1998; La Scala Jr et al., 2000b; Rayment & Jarvis, 2000). O presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar a estrutura da variabilidade espacial de curta escala das emissões de CO₂ de um Latossolo da região de Lavras, MG, coberto por povoamentos florestais e identificar atributos do solo ou fatores do ambiente mais estreitamente relacionados ao processo.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Descrição da área de estudo

O trabalho foi realizado em dois povoamentos florestais localizados no *campus* da Universidade Federal de Lavras, MG, num Latossolo Vermelho distroférico típico, textura muito argilosa, fase floresta tropical subperenifólia. Foram selecionadas áreas em um experimento antigo de eucalipto (Teste de Procedência de *Eucalyptus* sp) plantado em janeiro de 1975, no espaçamento 3 × 2 m, com diversas espécies. Em adição, um fragmento remanescente de mata nativa do tipo floresta estacional semidecídua montana (Oliveira-Filho et al., 1994) foi tomado como referência, por se tratar de um sistema mais preservado, do ponto de vista de intervenções humanas. As áreas selecionadas nos dois povoamentos eram semelhantes em declividade e ocupavam a mesma posição na paisagem (topo). Uma visão geral de ambas é apresentada na Figura 1. Informações adicionais sobre os sistemas, incluindo a composição florística da mata nativa, podem ser obtidas em consulta aos trabalhos de Chagas (2000) e Martins et al. (2002).

Em cada sistema florestal, foi selecionada, ao acaso, uma área retangular com as dimensões de 15 × 35 m, na qual foram delimitados 32 pontos dispostos sobre um eixo cartesiano, espaçados numa grade regular pela distância de cinco metros em direções perpendiculares chamadas convencionalmente de X e Y (Figura 2). Apesar de este número de pontos estar distante do ideal para a verificação de dependência espacial, sua adoção levou em consideração o aspecto operacional e a viabilidade dos recursos disponíveis para a realização do trabalho. Todas as medições realizadas em campo e as amostragens para determinação em laboratório de atributos químicos, físicos e biológicos do solo foram tomadas seguindo a localização dos pontos da grade.

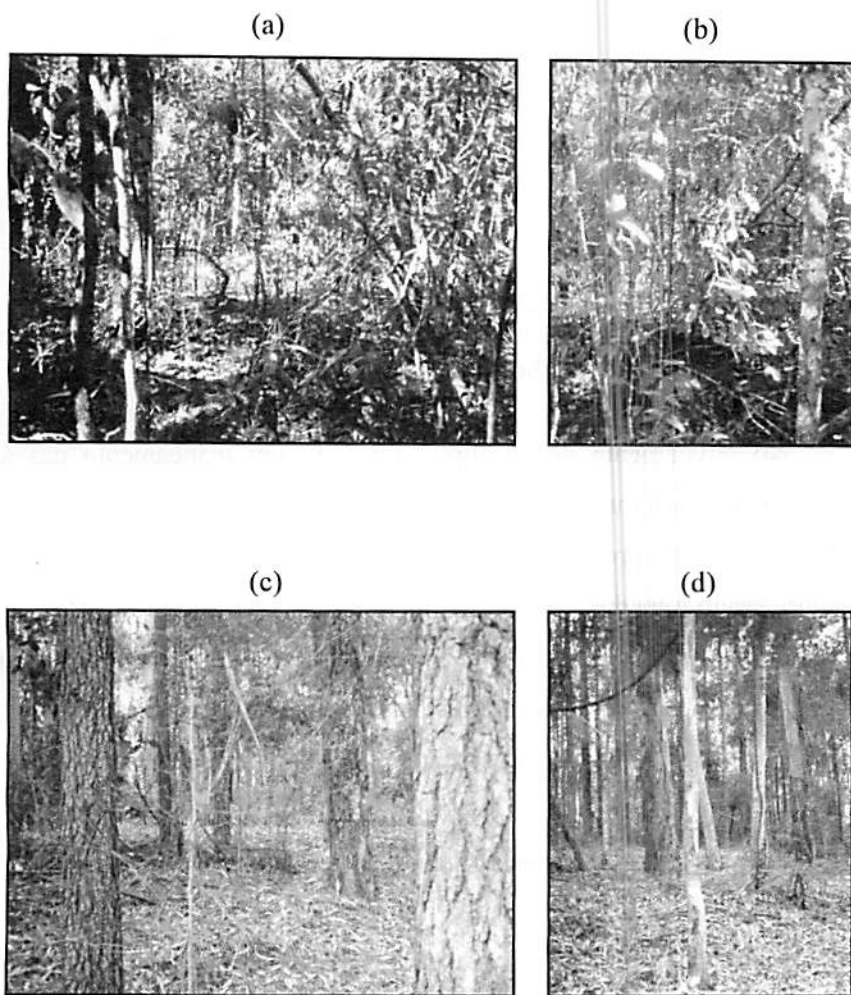


FIGURA 1. Visão geral das áreas com povoações de mata nativa (a, b) e eucalipto (c, d) selecionadas em Latossolo Vermelho distroférico muito argiloso de Lavras, MG para análises geoestatísticas do fluxo de CO_2 do solo e de atributos do solo e do ambiente.

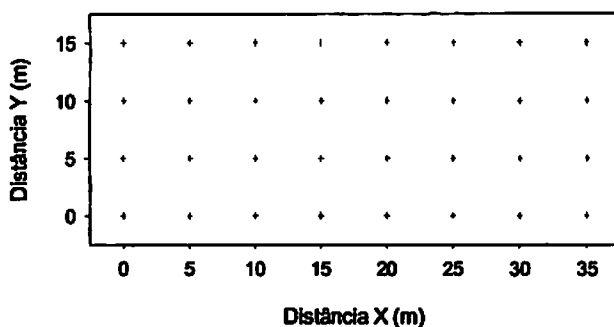


FIGURA 2. Croqui da localização dos pontos de amostragem numa grade regular delimitada em povoamentos de eucalipto e mata nativa, para análises de variabilidade espacial de atributos do solo.

No povoamento de eucalipto, foi feito um mapeamento das árvores segundo o seu posicionamento em relação à grade regular. Além da localização no terreno, as árvores também foram caracterizadas com relação ao seu tamanho, sendo tomadas medidas da circunferência à altura do peito, que foram transformadas, posteriormente, em diâmetro à altura do peito (DAP). Para fins de caracterização, as árvores foram classificadas nas seguintes categorias: com diâmetro pequeno ($DAP < 0,2$ m), médio ($DAP 0,2-0,4$ m) e grande ($DAP > 0,4$ m).

4.2 Medição do fluxo de gases do solo

As medições dos fluxos de CO_2 e vapor d'água do solo foram feitas nos dias 5 e 6 de fevereiro de 2004, nas florestas de eucalipto e mata nativa, respectivamente, com leituras iniciadas por volta das 14:00 horas. Foi utilizado um analisador de gás por absorção na faixa do infravermelho, modelo *ADC LCA-4 (Analytical Development Company Bioscientific Ltd, Hoddesdon, England)*, portátil, acoplado a uma campânula cilíndrica de polieteno (modelo

ADC Soil Hood, do mesmo fabricante) com área superficial de 98,5 cm² e volume de 926 mL, equipada com mini-ventilador para mistura interna do ar. O analisador por infravermelho foi operado no modo diferencial, com fluxo de ar nas tubulações de entrada e saída da campânula de 240 µmol s⁻¹, mantido por meio de um sistema de bombeamento presente no interior do equipamento.

Nos dois sistemas florestais, a serrapilheira em cada ponto da grade foi cuidadosamente removida imediatamente antes das medições e a campânula ligeiramente pressionada sobre a superfície do solo, aprofundando um alongamento até um ressalto que delimita o volume efetivo da câmara, a fim de melhorar o selamento da interface campânula-solo e evitar perdas ou enriquecimento lateral de CO₂, possibilidade levantada por Reicosky et al. (1997). Os fluxos de CO₂ e de vapor d'água do solo foram calculados por meio da diferença entre a concentração dos gases no ar que entra na campânula e no ar que deixa a mesma, após ter sido atingido um estado de equilíbrio dinâmico (Mosier, 1990; Field et al., 1992). O tempo de leitura adotado foi de 3 a 4 minutos, tomado com base em testes preliminares realizados no campo com o intuito de verificar o intervalo decorrido desde a inserção da campânula no solo até a estabilização do valor medido (Figura 1A, Anexo).

4.3 Medição da temperatura e umidade do solo

Em cada ponto da grade, a temperatura do solo foi medida com um termômetro de bulbo de mercúrio, posicionado a 12 cm de profundidade, e a umidade do solo média da faixa de 0-12 cm determinada com um reflectômetro de domínio no tempo (TDR, modelo *Field Scout TDR 300 Soil Moisture Meter*, *Spectrum Technologies, IL, USA*). A calibração das leituras do TDR foi feita a partir de dados de umidade gravimétrica (determinada pelo método padrão de

estufa) e densidade do solo (Blake & Hartge, 1986), coletados na área. Os resultados foram convertidos em umidade em base volume e, em seguida, submetidos à análise de regressão linear simples com os valores de umidade volumétrica lidos no TDR (Figura 2A, Anexo). A equação obtida foi usada para corrigir todas as leituras de umidade feitas no campo com o equipamento, com expressão final dos resultados em $\text{cm}^3 \text{ } 100 \text{ cm}^{-3}$ de solo, a partir deste ponto referido como % vol.

4.4 Coleta e preparo das amostras de solos

Cerca de três meses antes da medição das emissões de CO_2 do solo foi feita uma coleta do material orgânico à superfície do solo (serrapilheira) no povoamento de eucalipto, ao lado de cada ponto da grade, com o uso de um esquadro de madeira com dimensões $0,5 \times 0,5 \times 0,1$ m. Foi considerado “horizonte orgânico” (HO_o) o resíduo orgânico superficial fresco ou em estado parcial de decomposição, composto por folhas e pequenos galhos ainda não incorporados ao solo. O material orgânico localizado abaixo do HO_o e imediatamente acima do primeiro horizonte mineral do solo foi identificado como “horizonte orgânico d” do solo (HO_d) e amostrado segundo o mesmo procedimento acima descrito.

Na semana seguinte às medições dos fluxos de gases do solo (em fevereiro de 2004), foram coletadas amostras de solos nos dois sistemas florestais, em cada ponto da grade, para a realização de análises químicas e físicas (fração terra fina, < 2 mm). A avaliação da biomassa microbiana foi realizada em amostras passadas em peneira de 4 mm para a retirada de raízes e outros resíduos orgânicos visíveis, como restos de animais e vegetais. Depois de armazenadas por 10 dias em câmara fria a 4°C , as amostras foram incubadas no

escuro, à temperatura ambiente, por uma semana para estabilização da atividade microbiana, sendo então realizadas as análises de laboratório. O teor de água do solo das amostras coletadas na mata nativa e no eucalipto foi semelhante, variando de 0,257 a 0,266 g kg⁻¹, não tendo sido necessária nenhuma padronização da umidade do material. Para as análises de porosidade total e densidade do solo, foram coletadas amostras indeformadas em 16 pontos da grade, espaçados pela distância de 5 m na direção Y e 10 m na direção X, com o uso do amostrador de Uhland, em cilindros com dimensões médias de 8,26 cm de altura por 6,96 cm de diâmetro interno. Todas as amostragens foram feitas na faixa de profundidade de 0-10 cm.

4.5 Análises de laboratório

Os componentes do complexo sortivo do solo foram determinados de acordo com Embrapa (1997) e o carbono orgânico total, por oxidação a quente com dicromato de potássio e titulação com sulfato ferroso amoniacal, segundo método modificado de Walkley & Black (1934). A determinação do teor de carbono da biomassa microbiana foi feita pelo método da fumigação-extração (Vance et al., 1987), com uso de K₂SO₄ 0,5 mol L⁻¹ como extrator, oxidação a quente com K₂Cr₂O₇ 0,0667 mol L⁻¹ + H₂SO₄:H₃PO₄ (2:1) e titulação com (NH₄)₂Fe(SO₄)₂.6H₂O 0,0333 mol L⁻¹. Foi utilizado o fator 0,26 para conversão do carbono extraído a carbono da biomassa microbiana (Feigl et al., 1995).

A porosidade total do solo foi determinada a partir da massa de água retida após saturação e de valores de densidade do solo, obtidos em amostras com estrutura indeformada (Blake & Hartge, 1986), sendo expressa em % vol. A biomassa da serrapilheira (HO_o e HO_d) do sistema eucalipto foi estimada pelo

método gravimétrico de estufa (65°C por 72 h), com resultados expressos em termos de massa de matéria seca por unidade de área.

4.6 Análise estatística

A análise da variabilidade espacial dos atributos estudados foi verificada por meio das ferramentas da geoestatística, utilizando-se o programa GS+ Professional Edition Versão 5.0.3 Beta (Gamma Design Software, MI, USA), com geração de semivariogramas, ajuste de modelos teóricos, estimação de dados em pontos não amostrados e construção de mapa de isolinhas.

Para o correto tratamento dos dados espacialmente referenciados, foi assumida a hipótese intrínseca de estacionariedade, que exige a existência e a estacionariedade do variograma, mas não aponta restrições quanto a uma variância finita dos valores medidos (Vieira, 2000). A estacionariedade do variograma implica que a correlação entre duas variáveis aleatórias depende apenas da distância que as separa, qualquer que seja a sua localização (Soares, 2000). Essa pressuposição permite que a continuidade espacial de um determinado atributo possa ser verificada por meio do semivariograma, que possui a seguinte expressão (Trangmar et al., 1985):

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

em que $\gamma(h)$: semivariância para pares de pontos separados pela distância h ; $N(h)$: número de pares de pontos em determinada classe de distância de separação; $Z(x_i)$ e $Z(x_i + h)$: valores do atributo em estudo nos pontos x_i e x_i+h . A partir do uso da equação acima, foram gerados semivariogramas experimentais para os atributos avaliados nos dois sistemas florestais.

Um semivariograma típico apresenta os seguintes componentes (Trangmar et al., 1985; Isaaks & Srivastava, 1989): patamar ($C+Co$), que representa a semivariância máxima do semivariograma; alcance (A), distância na qual o patamar é atingido e que define o limite da dependência espacial; efeito pepita (Co), intercepto do modelo do semivariograma e indicativo da variabilidade a distâncias menores do que a amostrada. O valor C representa a variabilidade espacialmente estruturada dos dados (Figura 3).

Para que os variogramas oferecessem uma descrição o mais nítida possível da continuidade espacial dos atributos avaliados, a existência de valores erráticos foi verificada a partir da análise das estatísticas descritivas e da nuvem de variância dos pares de pontos no semivariograma (Isaaks & Srivastava, 1989). Foram considerados erráticos e removidos do conjunto de dados os valores extremos que limitaram o ajuste do modelo matemático, sendo identificados por meio do seguinte critério: extremo = valor $> Ls+3 \times (Ls-Li)$ ou $< Li-3 \times (Ls-Li)$, em que Ls : média + erro padrão da média e Li : média - erro padrão da média. Para o fluxo de CO_2 , foi adotada a transformação lognormal dos dados originais, buscando maior proximidade da distribuição normal de frequência, identificada por valores de assimetria iguais a 0 e de curtose iguais a 3 (Vieira, 2000).

Na elaboração dos semivariogramas, foram adotadas seis classes de distância de separação, espaçadas em intervalos uniformes até 30 m, a fim de garantir o maior número de pares de pontos no cálculo da semivariância média em cada classe de distância. Aos semivariogramas gerados foram ajustados modelos matemáticos escolhidos dentre os seguintes:

- a) linear: $\gamma(h) = Co + [(C/A)h]$, $0 \leq h \leq A$; $\gamma(h) = Co + C$, $h > A$;
- b) exponencial: $\gamma(h) = Co + \{C [1 - e^{-h/A}]\}$, para $h > 0$;
- c) gaussiano: $\gamma(h) = Co + \{C [1 - e^{-3(h/A)^2}]\}$, $h > 0$ e

d) esférico: $\gamma(h) = C_0 + \{C[3/2 (h/A) - 1/2 (h/A)^3]\}$, $0 \leq h \leq A$; $\gamma(h) = C_0 + C$, $h > A$.

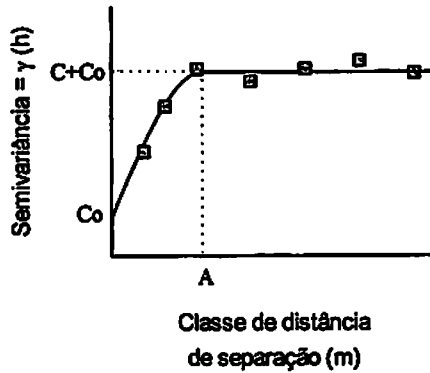


FIGURA 3. Representação de um semivariograma típico com um modelo matemático ajustado (linha cheia) aos valores de semivariância em cada classe de distância de separação (símbolos). C_0 : variância de efeito pepita; $C+C_0$: patamar; A : alcance da dependência espacial.

Os modelos foram selecionados com base nos valores da soma dos quadrados dos resíduos (SQR) e do coeficiente de determinação (R^2), sendo desejados valores mínimos para SQR e máximos para R^2 . A fim de verificar a conformidade na escolha do modelo matemático ajustado, foi utilizado o procedimento de validação cruzada, que consiste na remoção individual de cada observação pertencente ao conjunto de dados e na posterior estimativa do seu valor por interpolação (Isaaks & Srivastava, 1989; Voltz & Webster, 1990). Quanto mais próximos forem os valores estimado e observado para o atributo em questão, e sendo significativo o coeficiente de correlação entre eles (cuja significância foi verificada com o teste t), mais confiável terá sido o modelo matemático escolhido.

Apesar de limitações existentes no uso da validação cruzada como ferramenta quantitativa, considerada tendenciosa e otimista, seu emprego é o

mais apropriado na situação do presente estudo, dado o número reduzido de pontos amostrais disponíveis (Isaaks & Srivastava, 1989; Voltz & Webster, 1990). A fim de facilitar a apresentação dos resultados e a comparação da estrutura da variabilidade espacial dos diversos atributos avaliados, foram construídos semivariogramas com valores relativizados ao seu patamar, o que foi obtido por meio da divisão dos coeficientes do modelo matemático ajustado e das variâncias em cada classe de distância de separação pelo valor de $C+Co$ (Isaaks & Srivastava, 1989).

A partir dos modelos gerados e dentro dos limites máximos de distância da grade delimitada no campo, foram feitas estimativas dos fluxos de CO_2 do solo por meio de interpolação por krigagem pontual normal, assumindo que os valores em pontos não medidos são realizações da mesma função estacionária aleatória (Trangmar et al., 1985; Voltz & Webster, 1990; Soares, 2000). Neste procedimento, foram utilizados 16 pontos vizinhos, ponderados pela distância e pelo grau de autocorrelação definido pelo modelo do semivariograma, respeitando o alcance da dependência espacial. Os valores obtidos foram utilizados na construção de um mapa de isolinhas, a representação gráfica da distribuição espacial do atributo em estudo.

Em complemento às análises descritivas dos dados georreferenciados, foi calculado o número mínimo necessário para a obtenção de amostras representativas para cada um dos atributos avaliados nos sistemas florestais, dentro de um determinado limite de tolerância para os desvios em torno da média, com o uso da seguinte expressão (Cline, 1944):

$$N = [(t_{5\%} \times DP) / E]^2,$$

em que N: número de amostras; $t_{5\%}$: estatística t de Student ao nível de significância $\alpha=5\%$ ($n=32$ observações, exceto para porosidade total e densidade

do solo, em que $n=16$); DP: desvio padrão dos dados; E: erro tolerado em torno da média (foram utilizados valores de E para 5%, 10%, 15%, 20% e 25% de desvio em relação à média).

Adicionalmente, foram conduzidas análises de correlação linear simples entre o fluxo de CO_2 do solo e os demais atributos, a fim de verificar o seu grau de associação, tendo os coeficientes de correlação (R) obtidos sido submetidos ao teste t. Os valores do fluxo de CO_2 do solo nos povoamentos de mata nativa e eucalipto foram, ainda, submetidos à análise de regressão linear múltipla com acréscimo seqüencial de variáveis, em função de atributos relacionados ao ambiente, à fertilidade, à estrutura e à matéria orgânica do solo. Os testes t e F foram utilizados, respectivamente, para a verificação da significância dos parâmetros do modelo multivariado ajustado e do coeficiente de determinação (R^2).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As estatísticas descritivas para os atributos avaliados nos povoamentos com mata nativa e eucalipto são apresentadas nas Tabelas 1 e 2. Em ambos os casos, houve alto coeficiente de variação (CV) do fluxo de CO₂ do solo (52% e 60%, para mata e eucalipto, respectivamente), tendo os valores mínimo e máximo para este atributo sido maiores no conjunto de dados da mata nativa. As médias de temperatura, umidade do solo e pH foram bastante próximas nos dois povoamentos, assim como seu desvio padrão. Por outro lado, o carbono da biomassa microbiana (Cmic) foi mais variável no solo com eucalipto, com CV de 69%, apesar da menor amplitude dos dados em relação à da mata nativa.

Uma elevada heterogeneidade do fluxo de CO₂ do solo tem sido freqüentemente encontrada em trabalhos de campo sobre variabilidade espacial conduzidos em ambientes florestais (Longdoz et al., 2000; Rayment et al., 2000), algumas vezes com coeficiente de variação bastante semelhante aos do presente estudo (Fang et al., 1998). No entanto, Yim et al. (2003) reportaram uma variabilidade menor para o fluxo de CO₂ do solo em 50 pontos localizados numa área de 30 × 30 m de uma floresta temperada, apesar de os autores terem utilizado um método de avaliação distinto do empregado neste trabalho.

A pequena variabilidade encontrada para a temperatura e a umidade do solo era esperada, uma vez que as medições foram tomadas, tanto na mata nativa como no povoamento de eucalipto, num período da tarde de um único dia. Com relação ao teor de carbono microbiano, a grande amplitude dos dados indica que as estimativas deste atributo não foram obtidas com a precisão desejada, embora existam autores que também relatem um coeficiente de variação relativamente elevado para a biomassa microbiana na camada superficial de solos tropicais florestais (Geraldes et al., 1995).

TABELA 1. Estatísticas descritivas para taxa de emissão de CO₂ do solo (FCO₂), evaporação de água (E), temperatura (T), umidade (U), teor de alumínio trocável (Al), pH, soma de bases (SB), porosidade total (PT), densidade do solo (Ds), carbono orgânico (CO) e carbono da biomassa microbiana (Cmic), em área de mata nativa.

Estatística	FCO ₂	E	T	U	Al	pH	SB	PT	Ds	CO	Cmic
n [†]	32	32	32	32	32	32	32	16	16	32	32
mínimo	0,67	2,59	21,6	22,1	1,1	4,0	0,6	56,1	0,8	18,0	94
máximo	4,05	17,50	22,8	34,4	2,2	4,5	1,7	64,2	1,1	31,3	1629
média	1,55	12,98	22,3	28,7	1,6	4,2	0,8	60,6	1,0	25,1	991
DP ^{††}	0,81	2,79	0,34	2,53	0,25	0,13	0,24	1,99	0,07	3,26	312,25
CV ^{†††}	52,1	21,5	1,5	8,8	15,3	3,2	28,7	3,3	7,0	13,0	31,5
assimetria	1,27	-1,33	-0,27	-0,23	0,25	-0,13	1,46	-0,32	-0,63	0,25	-0,38
curtose	1,24	4,34	-0,78	0,41	-0,11	-0,75	2,98	-0,02	0,32	-0,41	0,62

Unidades: FCO₂, E (g m⁻² h⁻¹); T (°C); U, PT (% vol); Al, SB (cmol_edm⁻³); Ds (kg dm⁻³); CO (g kg⁻¹); Cmic (µg g⁻¹). † número de observações; †† desvio padrão; ††† coeficiente de variação (%).

TABELA 2. Estatísticas descritivas para taxa de emissão de CO₂ do solo (FCO₂), evaporação de água (E), temperatura (T), umidade (U), teor de alumínio trocável (Al), pH, soma de bases (SB), porosidade total (PT), densidade do solo (Ds), carbono orgânico (CO), carbono da biomassa microbiana (Cmic) e biomassa da serrapilheira (HO_o e HO_d), em área de floresta de eucalipto.

Estatística	FCO ₂	E	T	U	Al	pH	SB	PT	Ds	CO	Cmic	HO _o	HO _d
n [†]	32	32	32	32	32	32	32	16	16	32	32	32	32
mínimo	0,32	11,02	20,0	24,4	1,9	3,9	0,4	44,5	0,9	18,0	0	9,20	15,20
máximo	2,68	22,03	23,6	36,4	2,9	4,5	0,9	60,3	1,2	26,7	1038	25,60	96,40
média	0,95	17,67	22,2	28,4	2,4	4,3	0,6	56,3	1,1	22,4	411	17,07	54,16
DP ^{††}	0,58	2,69	0,55	2,67	0,24	0,16	0,15	4,02	0,10	2,32	284,11	3,53	18,75
CV ^{†††}	60,4	15,2	2,5	9,4	10,3	3,6	25,4	7,1	9,1	10,4	69,1	20,7	34,6
assimetria	1,27	-0,87	-1,53	0,99	0,22	-0,63	0,33	-1,55	-0,29	-0,01	0,24	0,15	0,21
curtose	1,01	0,38	7,54	1,05	-0,80	-0,13	-0,88	2,52	-1,16	-0,45	-0,61	0,13	0,04

Unidades: FCO₂, E (g m⁻² h⁻¹); T (°C); U, PT (% vol); Al, SB (cmol_edm⁻³); Ds (kg dm⁻³); CO (g kg⁻¹); Cmic (µg g⁻¹); HO_o, HO_d (Mg ha⁻¹). [†]número de observações; ^{††}desvio padrão; ^{†††}coeficiente de variação (%).

A variabilidade dos atributos no campo influencia aspectos práticos importantes, como o esquema experimental de amostragem, ponto relevante para a obtenção de estimativas confiáveis das emissões médias de CO₂ do solo em diferentes ecossistemas terrestres. Nesse sentido, considerando diversos níveis de tolerância para os desvios em torno da média, foi calculado o número mínimo de amostras representativas dos atributos em estudo (Tabela 3).

Para os fluxos de CO₂ do solo, os 32 pontos amostrais demarcados na grade regular foram suficientes apenas para garantir médias dentro da tolerância de 20% e 25% para a mata nativa e eucalipto, respectivamente. Por sua vez, atributos do ambiente, como a temperatura e a umidade do solo, e os relacionados à estrutura (porosidade e densidade do solo) foram quantificados com médias que atenderam ao estreito limite de 5% de desvio. Para os atributos relacionados à matéria orgânica do solo, o número de amostras foi suficiente para uma média bastante precisa do teor de carbono orgânico, enquanto que, para o carbono da biomassa microbiana, houve uma incerteza bem maior, principalmente na área com eucalipto, em decorrência da variabilidade indicada anteriormente. Apesar de útil na determinação do número adequado de amostras, esta abordagem não permite inferências sobre o espaçamento mínimo entre elas, o que é contemplado apenas com a análise geoestatística dos dados.

No sentido de verificar o grau de associação linear dos fluxos de CO₂ do solo com os demais atributos avaliados, foram efetuadas análises de correlação simples em cada sistema florestal (Tabela 4). Na mata nativa, não foi possível identificar um único atributo que, isoladamente, estivesse correlacionado com as emissões de gás carbônico do solo de maneira significativa. Em contrapartida, no povoamento de eucalipto, o teor de alumínio trocável foi o atributo mais estreitamente associado às emissões de CO₂, em termos individuais ($R=0,47$, $P<0,01$, $n=32$). Apesar disso, levando-se em conta que os teores de alumínio

variaram dentro da amplitude de 1,9 a 2,9 cmol_c dm⁻³ (Tabela 2), relativamente pequena, mas suficiente para caracterizar uma condição de solo sempre muito ácido, é pouco provável que este atributo possa explicar de maneira adequada as variações observadas no fluxo de CO₂ do solo, sendo mais razoável supor que estejam apenas associados sem que haja relação de causa e efeito entre ambos.

TABELA 3. Número mínimo de amostras para a obtenção de estimativas representativas para atributos avaliados em povoamentos de mata nativa e eucalipto, num Latossolo Vermelho distroférico típico da região de Lavras, MG, considerando o nível de significância $\alpha=5\%$ e diversas porcentagens de desvios em torno da média (Cline, 1944).

Atributo	Número de amostras:									
	Mata nativa					Eucalipto				
	5%†	10%	15%	20%	25%	5%	10%	15%	20%	25%
FCO ₂	455	114	51	28	18	620	155	69	39	25
E	77	19	9	5	3	39	10	4	2	2
T	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
U	13	3	1	1	1	15	4	2	1	1
Al	41	10	5	3	2	17	4	2	1	1
pH	2	1	1	1	1	2	1	1	1	1
SB	150	37	17	9	6	104	26	12	7	4
PT	2	1	1	1	1	9	2	1	1	1
Ds	9	2	1	1	1	15	4	2	1	1
CO	28	7	3	2	1	18	4	2	1	1
Cmic	165	41	18	10	7	794	198	88	50	32
HO _o	-	-	-	-	-	71	18	8	4	3
HO _d	-	-	-	-	-	200	50	22	12	8

FCO₂: fluxo de CO₂ do solo; E: taxa de evaporação de água do solo; T: temperatura do solo; U: umidade do solo; Al: teor de alumínio trocável; SB: soma de bases; PT: porosidade total; Ds: densidade do solo; CO: carbono orgânico; Cmic: carbono da biomassa microbiana; HO_o, HO_d: biomassa da fração da serrapilheira menos decomposta e mais decomposta, respectivamente.

†Porcentagem de tolerância para o erro em torno da média.

No povoamento de eucalipto, também foi verificada uma correlação positiva do fluxo de CO₂ com a temperatura do solo e negativa com a umidade e com a densidade do solo (Tabela 4). Neste caso, é possível que teores mais elevados de água no solo dificultem a movimentação do CO₂ nos poros (Edwards, 1975), embora, nas condições do presente estudo, a umidade não tenha atingido valores considerados limitantes para a aeração do solo. Nessa situação, os efeitos do teor de água sobre as emissões de CO₂ do solo não são muito claros (Fang & Moncrieff, 2001).

TABELA 4. Coeficientes de correlação (R) entre o fluxo de CO₂ do solo e atributos do solo e do ambiente, em povoamentos de eucalipto e mata nativa, num Latossolo Vermelho distroférico típico da região de Lavras, MG.

Atributo	R	
	Mata nativa	Eucalipto
E	0,27 ^{NS}	-0,06 ^{NS}
T	0,10 ^{NS}	0,31*
U	-0,08 ^{NS}	-0,32*
Al	-0,18 ^{NS}	0,47**
pH	0,25 ^{NS}	0,14 ^{NS}
SB	0,26 ^{NS}	0,15 ^{NS}
CO	-0,05 ^{NS}	0,27 ^{NS}
Cmic	-0,19 ^{NS}	-0,12 ^{NS}
PT	0,10 ^{NS}	0,36 ^{NS}
Ds	0,03 ^{NS}	-0,43*
HO _o	-	0,37*
HO _d	-	-0,08 ^{NS}

^{NS}: não significativo; * e **: significativo a 5% e 1% pelo teste t. E: taxa de evaporação de água do solo; T: temperatura do solo; U: umidade do solo; Al: teor de alumínio trocável; SB: soma de bases; CO: carbono orgânico; Cmic: carbono da biomassa microbiana; PT: porosidade total; Ds: densidade do solo; HO_o, HO_d: biomassa da fração da serrapilheira menos e mais decomposta, respectivamente. (n= 16 para PT, Ds; n=32 para os demais atributos).

Diversos estudos apontam relações diretas entre o teor de carbono orgânico total ou da biomassa microbiana e as emissões de gás carbônico do solo. Correlações significativas foram verificadas entre os fluxos de CO₂ de um solo descoberto e o teor de carbono orgânico (La Scala Jr et al., 2000a) e, em florestas de coníferas, o carbono microbiano foi apontado como um dos fatores mais altamente correlacionados com as emissões de CO₂ do solo (Xu & Qi, 2001; Scott-Denton et al., 2003). Apesar disso, no presente estudo, dentre os atributos relacionados à matéria orgânica do solo, apenas a biomassa da fração menos decomposta da serrapilheira de eucalipto (HO₆) apresentou correlação significativa com o fluxo de CO₂ (Tabela 4).

Buscando compreender a influência das plantas no processo de emissão de CO₂ do solo, as árvores no povoamento de eucalipto foram classificadas em função do diâmetro à altura do peito (DAP) e mapeadas segundo sua posição no terreno (Figura 4-a). Àquelas próximas de qualquer ponto de leitura na grade regular traçada no campo (Figura 2) em até 1,5 m, foram atribuídos valores que variaram de acordo com seu diâmetro: 3 para árvores com DAP > 0,4 m, 2 para DAP 0,2-0,4 m e 1 para DAP < 0,2 m. Árvores cuja distância ao ponto de medição mais próximo excedeu 1,5 m receberam o valor 0, independentemente do DAP (Figura 4-b). Por fim, cada ponto da grade foi relacionado a um número correspondente ao somatório dos valores atribuídos às árvores mais próximas (Figura 4-c). Análises de correlação linear simples efetuadas entre estes números e os fluxos de CO₂ indicaram que as emissões de gás carbônico do solo estão significativamente associadas com a posição e o diâmetro das árvores de eucalipto (R=0,55, P<0,01, n=32). Neste sentido, os maiores fluxos ocorreram nos locais com presença de mais árvores ou com árvores maiores e, ao contrário, nas clareiras ou áreas com árvores de diâmetro muito reduzido, houve pequena emissão de CO₂ do solo.

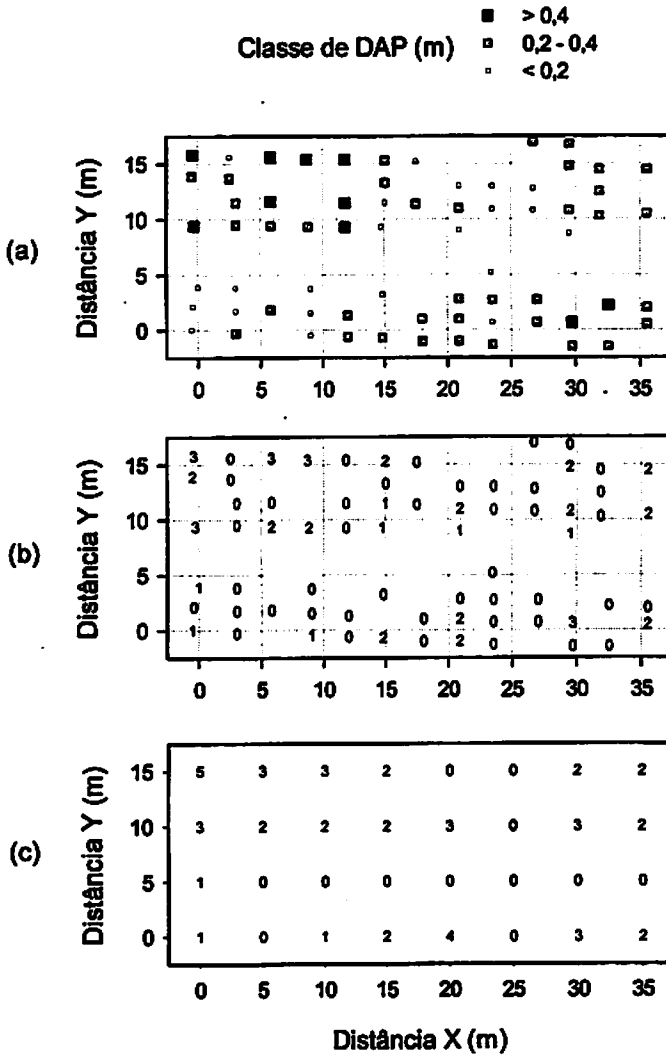
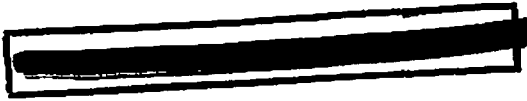


FIGURA 4. Distribuição espacial das árvores no povoamento de eucalipto. (a) localização das árvores segundo o diâmetro à altura do peito (DAP); (b) valores atribuídos às árvores em função do DAP e da posição relativa aos pontos da grade regular; (c) valores atribuídos aos pontos da grade regular em função das árvores mais próximas.

Comparando-se a posição dos locais de medições na grade do povoamento de eucalipto aos valores de emissão de gás carbônico a eles associados (conjunto de dados, não apresentado), é possível verificar que os pontos que não possuíam em sua proximidade nenhuma árvore com DAP mínimo de 0,2 m apresentaram um fluxo de CO₂ sempre menor do que a média obtida na grade inteira (que foi de 0,95 g m⁻² h⁻¹, Tabela 2), variando entre 0,37 e 0,86 g m⁻² h⁻¹, valores considerados baixos. Estudos recentes têm indicado a importância efetiva das plantas no processo de produção de CO₂ em solos florestais. Litton et al. (2003) verificaram que, numa floresta de pinheiros com 13 anos de idade, os talhões com menor espaçamento de plantio apresentaram as maiores emissões de CO₂ do solo. Do mesmo modo, a liberação de CO₂ foi maior em parcelas com árvores antigas (mais de 100 anos), em relação aos povoamentos jovens, o que foi relacionado à presença de um maior compartimento de carbono na biomassa microbiana e nas raízes. No mesmo sentido, Russell & Voroney (1998) indicaram que a maior parte das emissões de CO₂ do solo numa floresta boreal foi devida à presença de raízes e não à decomposição de resíduos orgânicos; Schwendenmann et al. (2003) encontraram que as emissões de CO₂ numa floresta tropical úmida da Costa Rica estavam relacionadas, em parte, à biomassa de raízes finas.

A participação da fisiologia da planta nas emissões de CO₂ do solo foi investigada por Högberg et al. (2001) em talhões de *Pinus sylvestris* do norte da Suécia submetidos ao anelamento (remoção da casca até a profundidade do xilema, interrompendo o fornecimento de fotoassimilados da parte aérea às raízes através do floema). A prática reduziu, no curto prazo, a respiração do solo em relação ao tratamento controle (até 37% em cinco dias e, em média, 54% em 2 meses), mostrando a estreita relação entre a atividade fotossintética e respiração do sistema radicular (e, conseqüentemente, do solo). No local do



mesmo experimento, no segundo ano após a prática, Bhupinderpal-Singh et al. (2003) refinaram as estimativas (já que, no primeiro ano, as plantas utilizaram as reservas de amido das raízes), indicando que o sistema radicular e suas associações ectomicorrízicas contribuíram com mais de 65% das emissões totais de CO₂ do solo.

A importância do suprimento de substratos de carbono produzidos pela fotossíntese e translocados para as raízes também foi apontada por Craine et al. (1999) em sistemas com gramíneas submetidas a condições variadas de intensidade luminosa. Os fluxos de CO₂ do solo foram reduzidos em 40% após dois dias de sombreamento das plantas, independentemente de variações na temperatura do ar ou do solo. Quando as plantas foram podadas a 2 centímetros da superfície, as emissões de CO₂ do solo foram 19% menores, indicando que o processo é afetado não apenas pela biomassa do sistema radicular, mas também pelo fornecimento de carboidratos produzidos na parte aérea da planta. Os resultados destes experimentos auxiliam a interpretação dos coeficientes de correlação significativos obtidos entre as emissões de CO₂ do solo e os valores representativos do tamanho e do posicionamento das árvores no terreno, no caso do presente estudo e permitem associar parte da produção de gás carbônico no solo à presença do sistema radicular das plantas de eucalipto.

A fim de verificar a influência conjunta dos atributos avaliados sobre as emissões de CO₂ do solo, foram conduzidas análises de regressão linear múltipla com acréscimo seqüencial de variáveis, utilizando fatores relacionados ao ambiente (evaporação de água, temperatura e umidade do solo e presença das árvores), à fertilidade do solo (teor de alumínio, pH e soma de bases), à estrutura (porosidade total e densidade do solo) e à matéria orgânica do solo (teor de carbono orgânico total, carbono da biomassa microbiana e serrapilheira). Na mata nativa, os baixos coeficientes de correlação obtidos entre os atributos

avaliados e o fluxo de CO₂ do solo (Tabela 4) foram confirmados por equações de regressão com ajuste pequeno e não significativo (Tabela 5). Por outro lado, no povoamento de eucalipto, os atributos do ambiente explicaram cerca de 39% das variações do fluxo de CO₂, grande parte (21% do total) por influência do efeito isolado das árvores presentes no terreno (Tabela 6). O mesmo pode ser dito com relação aos teores de alumínio, que contribuíram com a maior parte do ajuste do modelo do fluxo de CO₂ do solo em função de variáveis relacionadas à fertilidade do solo. Enquanto os atributos da estrutura do solo contribuíram pouco para explicar a variabilidade das emissões de CO₂, a fração menos decomposta da serrapilheira (HO_o) foi, neste sentido, o mais importante atributo relacionado à matéria orgânica do solo.

A biomassa da serrapilheira foi apontada por Longdoz et al. (2000) como um bom indicador da quantidade de matéria orgânica fresca em sistemas florestais. Por sua vez, a espessura da camada orgânica foi considerada por Scott-Denton et al. (2003) como um dos melhores fatores para prever a liberação de CO₂ do solo. De fato, no presente estudo, quando a serrapilheira (HO_o), o teor de carbono orgânico (CO) e as árvores do povoamento de eucalipto (Arv) foram incluídos num único modelo de regressão, a equação obtida apresentou ajuste significativo ($FCO_2 = -1,75 + 0,07 \cdot CO + 0,05 \cdot HO_o + 0,20 \cdot Arv$, $R^2 = 0,45$, $P < 0,01$). Isso indica que, dentro dos limites impostos pelas condições existentes neste trabalho, em áreas com teor de carbono orgânico do solo semelhante, o fluxo de CO₂ será maior onde houver maior quantidade de serrapilheira depositada à superfície e maior população de árvores, indicando a participação de fatores bióticos no processo. Mesmo trabalhando em região de situação climática muito diferente, Scott-Denton et al. (2003) conseguiram explicar cerca de 50% das variações do fluxo de CO₂ do solo (percentual próximo aos 45% indicados pelo coeficiente de determinação do modelo acima),

em uma floresta subalpina, por meio de um modelo multivariado composto por seis variáveis relacionadas aos compartimentos de carbono do solo, entre as quais a biomassa do sistema radicular e a espessura e a umidade da serrapilheira.

TABELA 5. Equações obtidas por regressão linear múltipla com acréscimo seqüencial de variáveis para fluxo de CO₂ do solo (Y, em g m⁻² h⁻¹) em função de atributos relacionados ao ambiente, à fertilidade, à estrutura e à matéria orgânica do solo, em povoamentos de mata nativa (MN) e eucalipto (EUC).

Modelo	Equação	R ²	P	n
Ambiente				
MN	Y = -2,43 + 0,08 E + 0,18 T - 0,04 U	0,09	NS [†]	32
EUC	Y = -3,99 + 0,01 E + 0,25 T - 0,04 U + 0,19** Arv	0,39	0,01	32
Fertilidade				
MN	Y = -3,07 + 0,03 Al + 0,96 pH + 0,62 SB	0,09	NS	32
EUC	Y = -5,58 + 1,19** Al + 0,85 pH + 0,13 SB	0,27	0,03	32
Estrutura				
MN	Y = -7,15 + 0,10 PT + 2,48 Ds	0,03	NS	16
EUC	Y = 2,08 + 0,02 PT - 1,91 Ds	0,19	0,25	16
MOS				
MN	Y = 2,00 + 2×10 ⁻³ CO - 5×10 ⁻⁴ Cmic	0,04	NS	32
EUC	Y = -2,05 + 0,08 [†] CO - 1×10 ⁻⁴ Cmic + 0,07 [†] HO _o + 2×10 ⁻³ HO _d	0,24	0,11	32

E: evaporação de água (g m⁻² h⁻¹); T: temperatura do solo (°C); U: umidade do solo (% vol); Arv: árvores no povoamento de eucalipto; Al: teor de alumínio trocável (cmol_c dm⁻³); SB: soma de bases (cmol_c dm⁻³); PT: porosidade total (% vol); Ds: densidade do solo (kg dm⁻³); CO: carbono orgânico (g kg⁻¹); Cmic: carbono da biomassa microbiana (µg g⁻¹); HO_o, HO_d: biomassa da fração menos e mais decomposta da serrapilheira (Mg ha⁻¹), respectivamente. MOS: matéria orgânica do solo. * e **: significativo a 5% e 1%, respectivamente, pelo teste t. [†]NS: não significativo (valor de F<1).

TABELA 6. Coeficientes de determinação (R^2) da regressão linear obtidos com o acréscimo seqüencial de variáveis para o fluxo de CO_2 do solo em função de atributos relacionados ao ambiente, à fertilidade, à estrutura e à matéria orgânica do solo (MOS), em povoamentos de mata nativa e eucalipto.

Modelo	Variável	Sistema			
		Mata nativa		Eucalipto	
		R^2	efeito isolado	R^2	efeito isolado
Ambiente	E	0,07	0,07	0,00	0,00
	T	0,08	0,01	0,10	0,10
	U	0,09	0,01	0,18	0,08
	Arv	-	-	0,39	0,21
Fertilidade	Al	0,03	0,03	0,22	0,22
	pH	0,06	0,03	0,27	0,05
	SB	0,09	0,03	0,27	0,00
Estrutura	PT	0,01	0,01	0,13	0,13
	Ds	0,03	0,02	0,19	0,06
MOS	CO	0,00	0,00	0,07	0,07
	Cmic	0,04	0,03	0,08	0,01
	HO _o	-	-	0,23	0,15
	HO _d	-	-	0,24	0,01

E: evaporação de água; T: temperatura do solo; U: umidade do solo; Arv: árvores no povoamento de eucalipto; Al: teor de alumínio trocável; SB: soma de bases; PT: porosidade total; Ds: densidade do solo; CO: carbono orgânico; Cmic: carbono da biomassa microbiana; HO_o, HO_d: biomassa da fração menos e mais decomposta da serrapilheira, respectivamente.

A dificuldade encontrada ao se tentar estabelecer relações diretas entre os atributos do solo e os fluxos de CO₂ é um indício da natureza complexa do fenômeno. Neste trabalho, não existiram condições ambientais limitantes, ao contrário de diversos estudos realizados em regiões temperadas, principalmente sobre variações temporais, nos quais a temperatura ou a umidade foi indicada como o fator mais influente nas emissões de CO₂ do solo (Longdoz et al., 2000; Rayment & Jarvis, 2000; Yim et al., 2003; Schwendenmann et al., 2003; Scott-Denton et al., 2003). Além disso, os fatores que afetam o fluxo de CO₂ do solo estão, com frequência, fortemente inter-relacionados, covariando com a matéria orgânica e a respiração do sistema radicular das plantas (Xu e Qi, 2001). Como as emissões de CO₂ refletem diferentes fenômenos no solo (respiração de raízes, atividade de microrganismos e a própria difusão física do CO₂), é bem provável que não haja um único determinante do processo (Schwendenmann et al., 2003).

A estrutura da distribuição espacial das emissões de CO₂ do solo foi comparada com a dos demais atributos por meio de análises geoestatísticas conduzidas com os resultados obtidos nos dois povoamentos florestais. Para facilitar a comparação entre os diversos atributos avaliados, foram construídos variogramas com valores no eixo das ordenadas relativizados ao patamar determinado pelo modelo matemático ajustado (Co+C). Os semivariogramas gerados a partir das amostras georreferenciadas indicaram uma estrutura de variabilidade espacial bastante distinta entre a mata nativa e o povoamento de eucalipto, para a maior parte dos atributos em estudo.

No sistema com vegetação nativa, o fluxo de CO₂ do solo (FCO₂) não apresentou dependência espacial na escala de amostragem adotada, assim como a evaporação de água (E), a umidade (U) e os atributos relacionados à estrutura (porosidade total, PT e densidade do solo, Ds) (Figura 5). Por outro lado, houve dependência espacial para os atributos de fertilidade (Al, pH e SB) e os

relacionados à matéria orgânica do solo (CO e Cmic) (Figura 6). De maneira oposta ao observado na mata nativa, o FCO₂ do solo no povoamento de eucalipto apresentou padrão de variabilidade espacialmente estruturada, assim como a maior parte dos atributos avaliados nesse ambiente, embora os variogramas para PT e Ds também tenham indicado ausência de dependência espacial (Figuras 7 a 9).

Os semivariogramas nos dois povoamentos florestais foram ajustados, principalmente, a modelos esféricos, encontrados com frequência em estudos de variabilidade espacial de propriedades do solo (Cambardella et al., 1994; La Scala Jr et al., 2000a; Carvalho et al., 2003). Dentre os variogramas com modelo linear, aqueles relativos à PT e Ds mostraram grande dispersão dos pontos em relação à curva ajustada (Figuras 5 e 7), indicando que as medições realizadas em 16 locais da grade regular delimitada no campo não foram suficientes para uma determinação precisa da estrutura de variabilidade espacial destes atributos.

Na mata nativa, a validação cruzada (realizada nos casos em que houve dependência espacial) indicou um ajuste razoável dos modelos para os atributos de fertilidade do solo, com coeficientes de correlação significativos e uma relação próxima da 1:1 entre os valores observados e estimados (Figura 10). No entanto, a maior dispersão dos pontos na validação cruzada para T, CO e Cmic aponta restrições quanto a estimativas feitas com base nos modelos ajustados, ainda que o coeficiente angular da regressão para Cmic ($b=0,90$), por exemplo, tenha estado próximo da linha 1:1 (Figura 11). No povoamento de eucalipto, apenas para T e pH não houve correlação significativa na validação cruzada, tendo o melhor ajuste dos pontos sido obtido para o fluxo de CO₂ do solo, sugerindo que o modelo matemático escolhido descreve adequadamente a variabilidade espacial deste atributo no campo (Figuras 12 a 14).

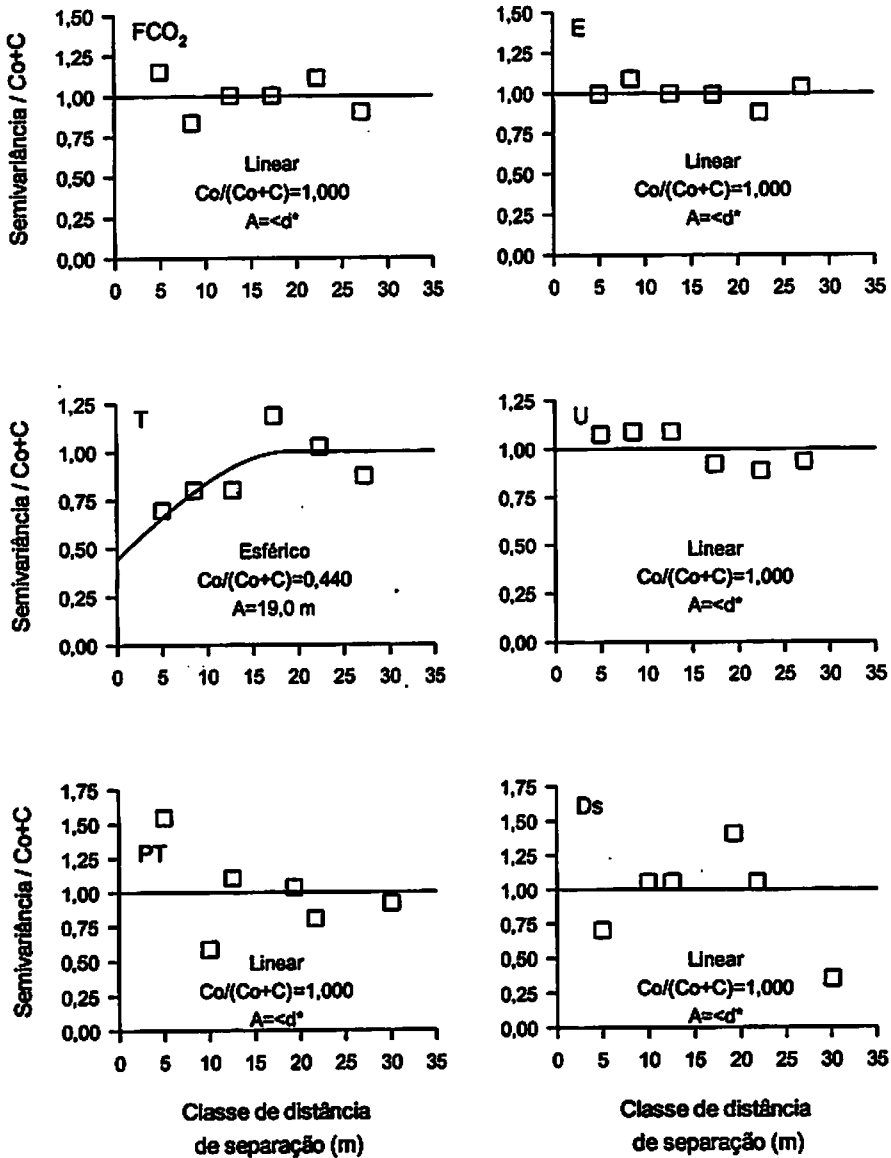


FIGURA 5. Semivariogramas relativizados e modelos matemáticos ajustados para fluxo de CO₂ (FCO₂), evaporação de água (E), temperatura (T), umidade (U), porosidade total (PT) e densidade do solo (Ds), em área com povoamento de mata nativa. Co: efeito pepita; Co+C: patamar; A: alcance; * d: menor distância entre pontos amostrados.

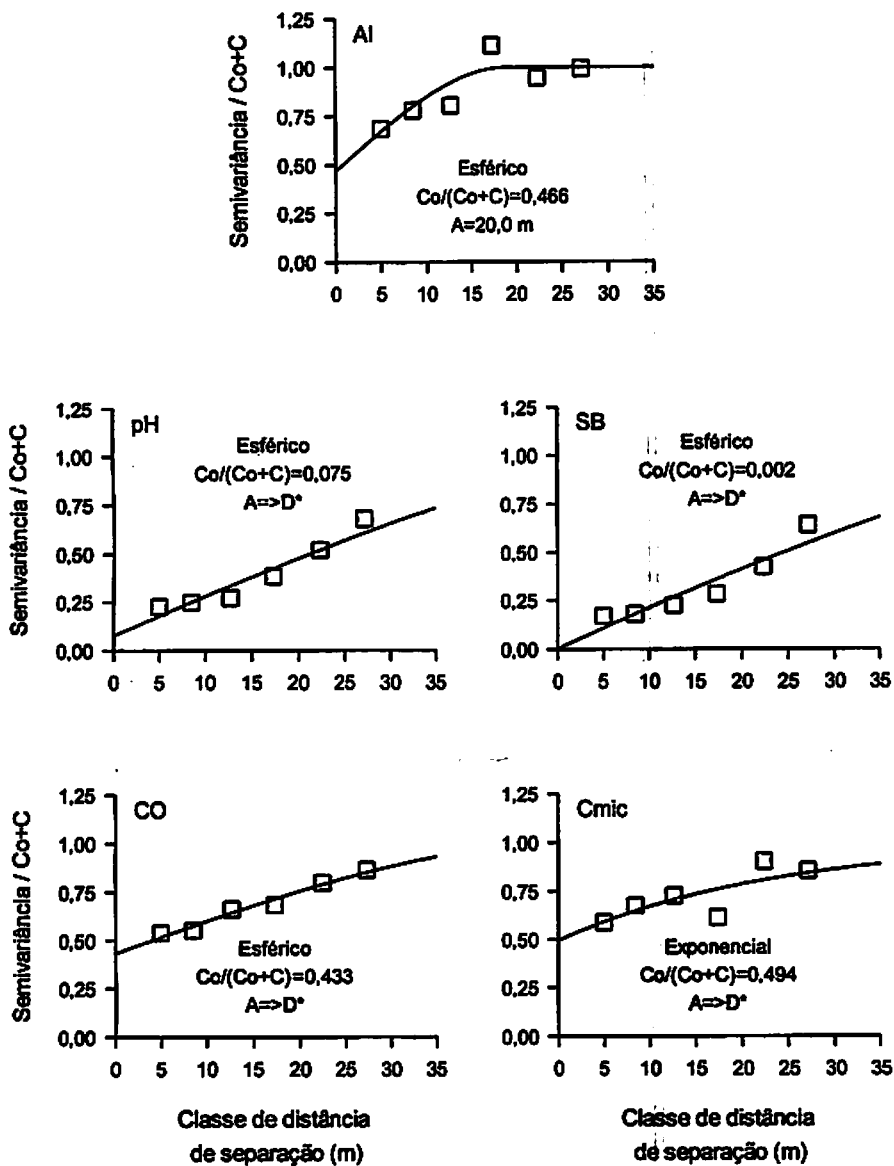


FIGURA 6. Semivariogramas relativizados para teor de alumínio trocável (Al), pH, soma de bases (SB), carbono orgânico (CO) e carbono da biomassa microbiana (Cmic), em área com povoamento de mata nativa. Co: efeito pepita; Co+C: patamar; A: alcance. *D: maior distância entre pontos amostrados.

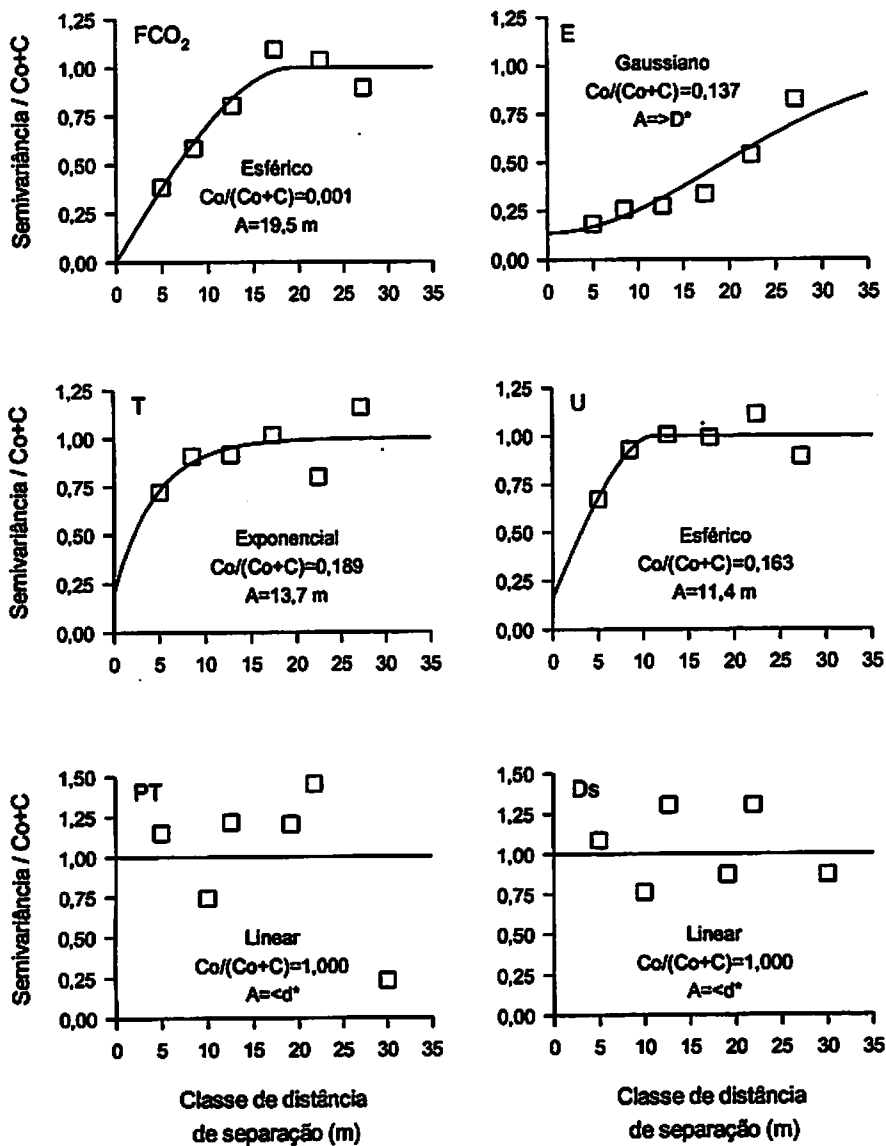


FIGURA 7. Semivariogramas relativizados para fluxo de CO₂ do solo (FCO₂), evaporação de água (E), temperatura (T), umidade (U), porosidade total (PT) e densidade (Ds), em área com povoamento de eucalipto. Co: efeito pepita; Co+C: patamar; A: alcance; * D, d: maior e menor distância entre pontos amostrados.

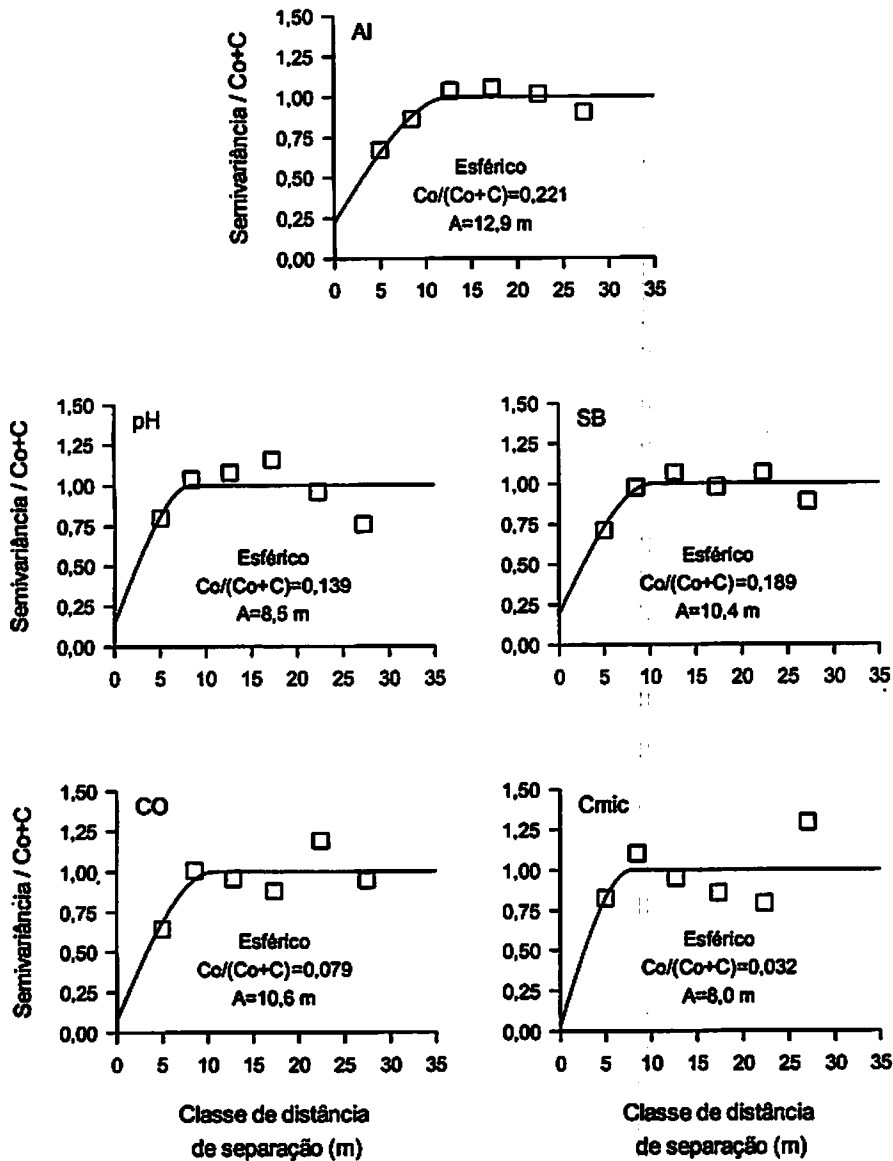


FIGURA 8. Semivariogramas relativizados para teor de alumínio trocável (Al), pH, soma de bases trocáveis (SB), carbono orgânico (CO) e carbono da biomassa microbiana (Cmic), em área com povoamento de eucalipto. Co: efeito pepita; Co+C: patamar; A: alcance.

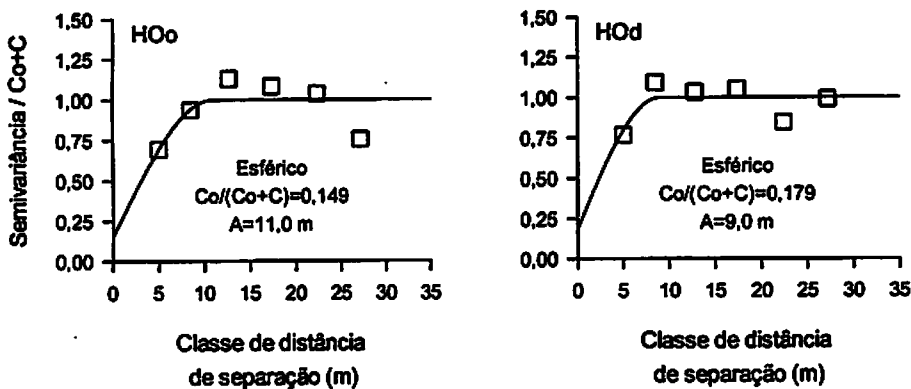


FIGURA 9. Semivariogramas relativizados para biomassa da serrapilheira na fração menos (HO_o) e mais decomposta (HO_d), em área com povoamento de eucalipto. Co: efeito pepita; Co+C: patamar; A: alcance.

O grau de dependência espacial (GDE) dos atributos em estudo foi avaliado pela razão entre a variância de efeito pepita (Co) e a variância total (Co+C), e não foi o mesmo nos dois povoamentos florestais (Figuras 5 a 9; Tabelas 1A e 2A, Anexo). Na mata nativa, houve predominância de um GDE moderado, de acordo com a classificação apresentada por Cambardella et al. (1994), devido a valores relativamente mais elevados para a variância de efeito pepita (Co), especialmente no caso de T, Al, CO e Cmic, que representou de 43% a 49% da variabilidade total dos dados. Por outro lado, as variações de pH e soma de bases (SB) foram quase que inteiramente influenciadas pela posição dos pontos no espaço, com forte GDE. No povoamento de eucalipto, para todos os atributos com dependência espacial, predominou o componente da variabilidade espacialmente estruturada, já que a contribuição de Co foi de, no máximo, 22% do total, no caso do teor de alumínio do solo.

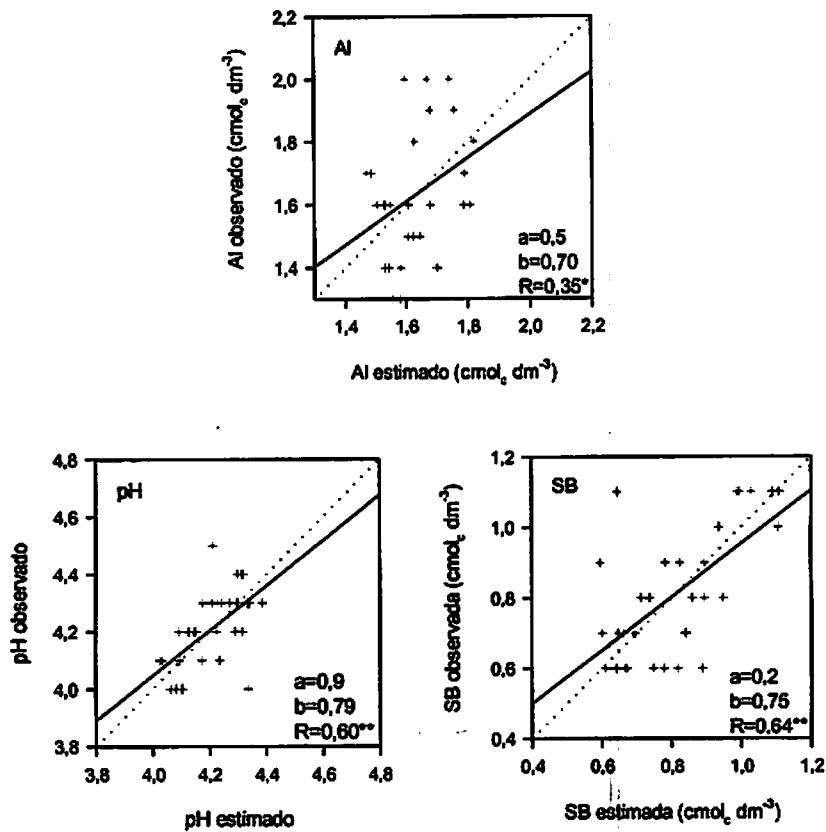


FIGURA 10. Gráficos de validação cruzada para teor de alumínio trocável (Al), pH e soma de bases (SB), num Latossolo com povoamento de mata nativa. Curva cheia: regressão linear; a: intercepto; b: coeficiente angular; R: coeficiente de correlação. Curva pontilhada: relação 1:1. * e **: significativo a 5% e 1%, pelo teste t.

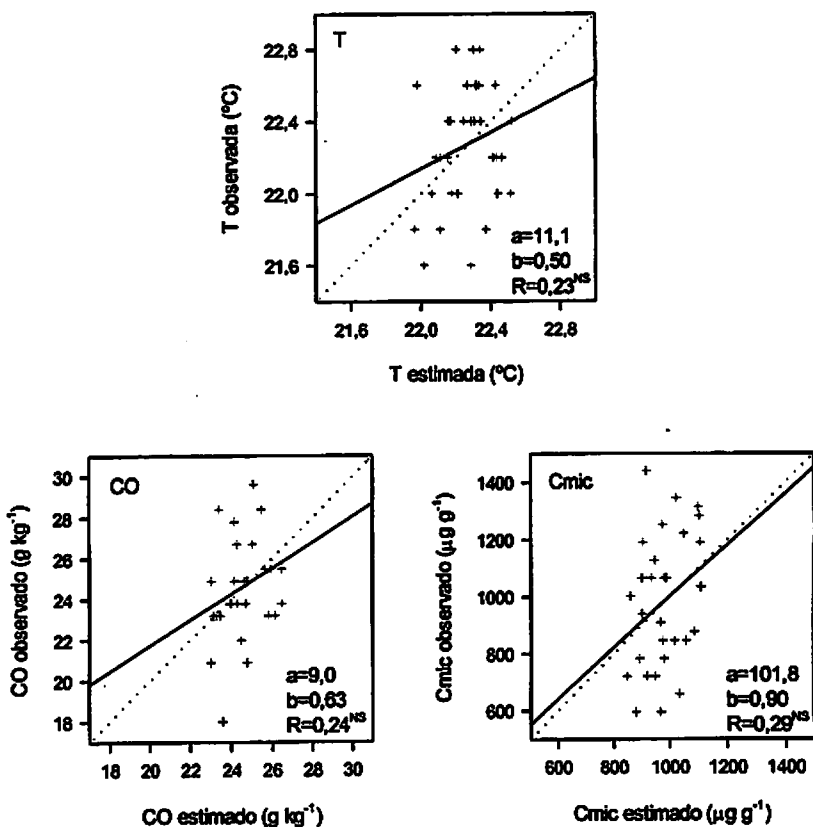


FIGURA 11. Validação cruzada para temperatura do solo (T), teor de carbono orgânico total (CO) e teor de carbono da biomassa microbiana (Cmic), num Latossolo com povoamento de mata nativa. Curva cheia: regressão linear; a: intercepto; b: coeficiente angular; R: coeficiente de correlação. Curva pontilhada: relação 1:1. ^{NS}: não significativo, pelo teste t.

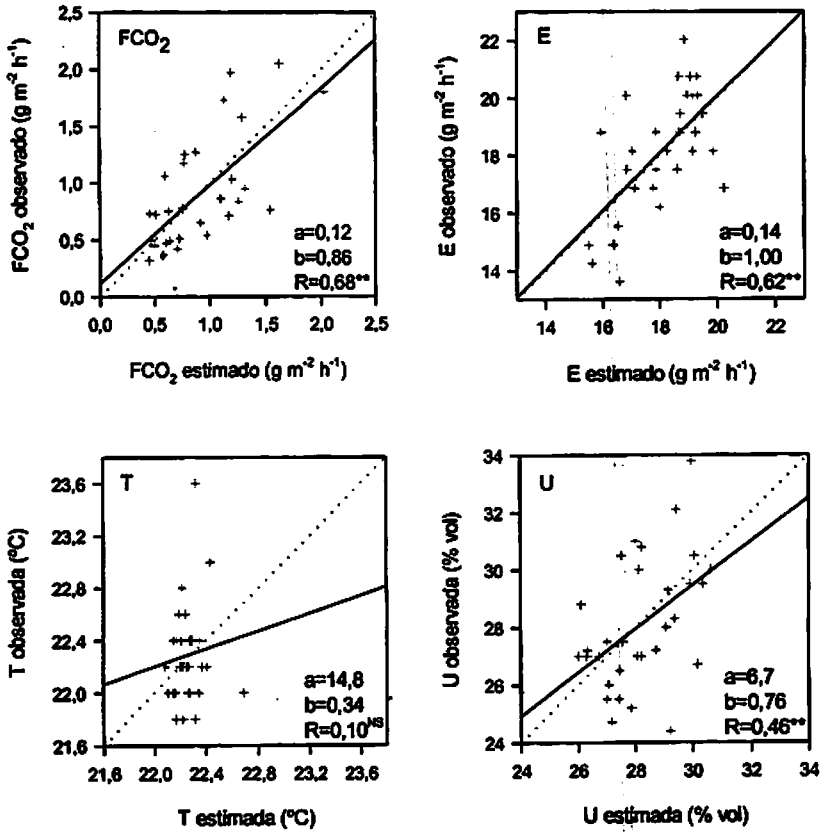


FIGURA 12. Gráficos de validação cruzada para o fluxo de CO₂ do solo (FCO₂), taxa de evaporação de água (E), temperatura (T) e umidade do solo (U), num Latossolo com povoamento de eucalipto. Curva cheia: regressão linear; a: intercepto; b: coeficiente angular; R: coeficiente de correlação. Curva pontilhada: relação 1:1. ^{NS} e **: não significativo e significativo a 1%, pelo teste t.

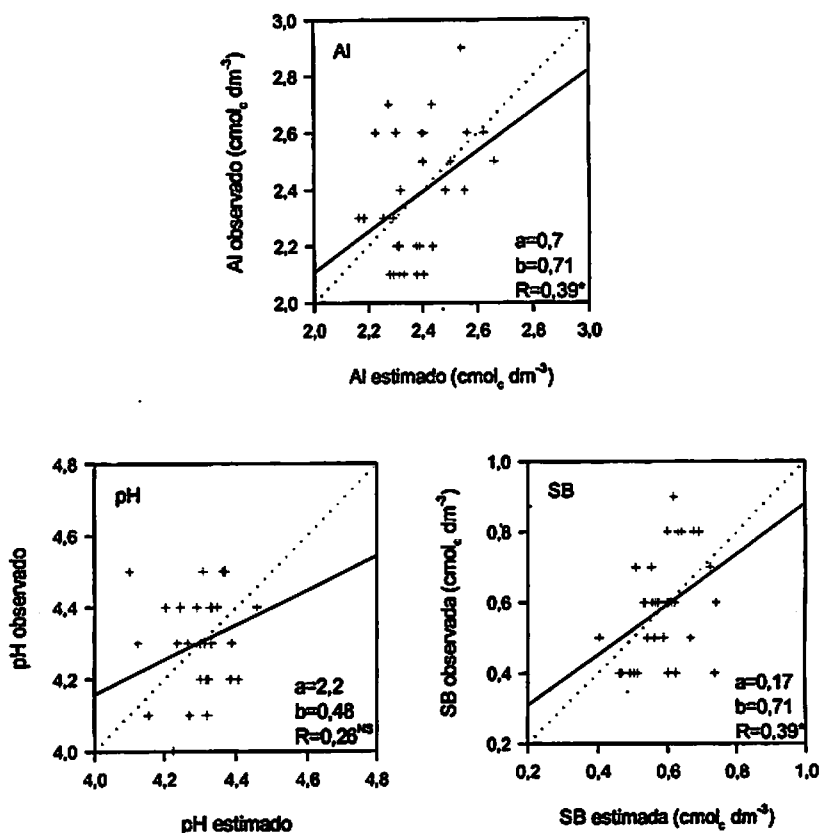


FIGURA 13. Gráficos de validação cruzada para teor de alumínio trocável (Al), pH e soma de bases (SB), num Latossolo com povoamento de eucalipto. Curva cheia: regressão linear; a: intercepto; b: coeficiente angular; R: coeficiente de correlação. Curva pontilhada: relação 1:1. ^{NS} e *: não significativo e significativo a 5%, pelo teste t.

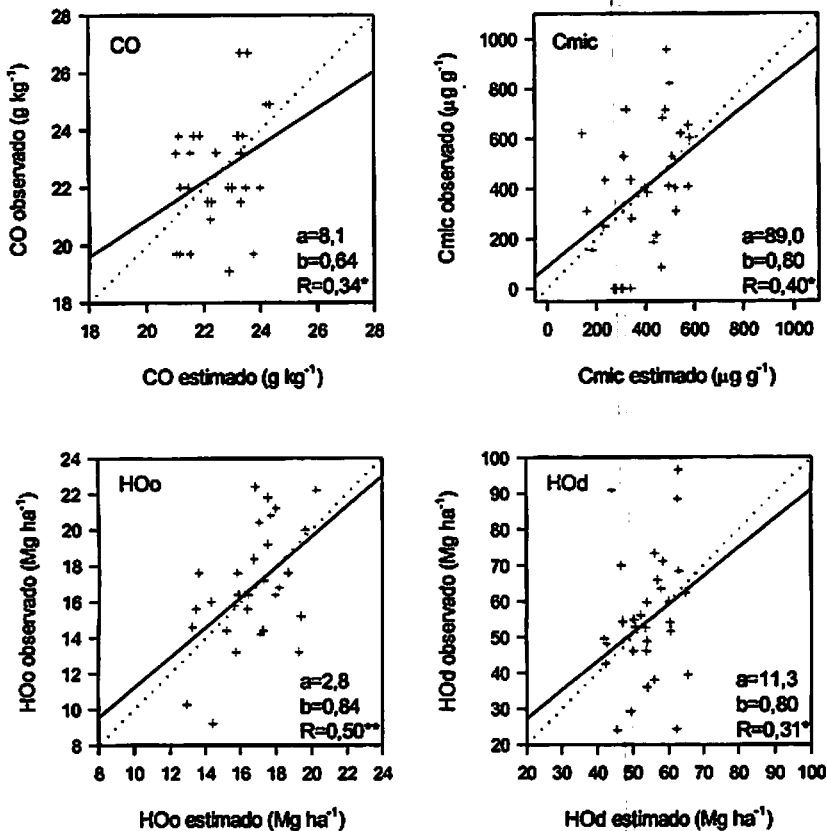


FIGURA 14. Validação cruzada para teor de carbono orgânico total (CO), teor de carbono da biomassa microbiana (Cmic) e biomassa da serrapilheira menos decomposta (HO_o) e mais decomposta (HO_d), num Latossolo com povoamento de eucalipto. Curva cheia: regressão linear; a: intercepto; b: coeficiente angular; R: coeficiente de correlação. Curva pontilhada: relação 1:1. * e **: significativo a 5% e 1%, pelo teste t.

O valor do alcance indicado nos semivariogramas define a distância de separação a partir da qual as amostras de um determinado atributo são consideradas independentes, apresentando variação aleatória (Trangmar et al., 1985). Na mata nativa, o alcance da continuidade espacial do FCO₂ não pôde ser detectado, uma vez que o modelo ajustado indicou uma variância de efeito pepita puro [modelo linear, com $Co/(Co+C)=1$, Figura 5]. Caso exista, a dependência espacial das emissões de CO₂ do solo ocorre, nesse ambiente, em distâncias muito curtas, menores do que cinco metros, que é o espaçamento mínimo entre os pontos de leitura na grade regular delimitada no campo. A presença de variabilidade em curta distância também foi verificada numa floresta boreal canadense por Rayment & Jarvis (2000), que mediram o fluxo de CO₂ do solo numa área com 30 m de raio e observaram que pontos separados por 1 metro já apresentavam variabilidade tão grande quanto os separados por distâncias maiores.

No povoamento de eucalipto, a dependência espacial do FCO₂ foi mais contínua no espaço, ocorrendo até cerca de 20 m (Figura 7). Nesse ecossistema, leituras tomadas em pontos separados por distâncias menores do que esse alcance não devem ser utilizadas para cálculos da taxa média de emissão de CO₂, por estarem correlacionadas espacialmente. No presente trabalho, na maior parte das vezes, foi verificado um comportamento espacial semelhante para atributos relacionados: na mata nativa, pH e SB apresentaram similaridade na forma do variograma e nos valores dos parâmetros, assim como CO e Cmic (Figura 6). O mesmo pode ser dito no sistema com eucalipto, com relação à distribuição espacial dos atributos de fertilidade (Al, pH e SB) e daqueles associados à matéria orgânica do solo (CO, Cmic, HO_o e HO_d) (Figuras 8 e 9).

As diferenças na estrutura dos variogramas obtidos para os dois sistemas de manejo avaliados são um indício de que as alterações no ambiente causadas

pela introdução de uma floresta de eucalipto em área originalmente coberta por vegetação de mata nativa modificaram de maneira sensível a distribuição espacial do fluxo de CO_2 do solo e de parte dos atributos estudados. A vegetação do fragmento de mata nativa é mais diversificada do que na área com eucalipto e não está concentrada em locais definidos, como nos pontos correspondentes às linhas de plantio presentes na floresta implantada. Além disso, existe a presença marcante de sub-bosque na mata nativa, com a ocorrência de um grande entrelaçamento de ramos (observações de campo, Figura 1-a, b) e, bem provavelmente, do sistema radicular das plantas. Essas considerações podem auxiliar a interpretação da grande variabilidade observada em curta distância para o fluxo de CO_2 do solo na mata nativa, um ambiente bem mais heterogêneo que a floresta de eucalipto.

A partir do modelo ajustado para o semivariograma do FCO_2 no sistema com eucalipto, foi construído um mapa de superfície mostrando a distribuição espacial do atributo na grade delimitada no campo (Figura 15), sendo possível observar uma grande faixa clara na porção central do terreno, relativa a locais de baixa emissão de CO_2 do solo. Nos extremos da área, por outro lado, houve uma tendência de ocorrer um fluxo de CO_2 do solo mais elevado, principalmente em pontos com maior proximidade de árvores com diâmetro grande, conforme indicado na Figura 4. Para a mata nativa, como o FCO_2 não apresentou estrutura de dependência espacial, a média aritmética dos valores medidos no campo é a melhor estimativa para este atributo na área estudada.

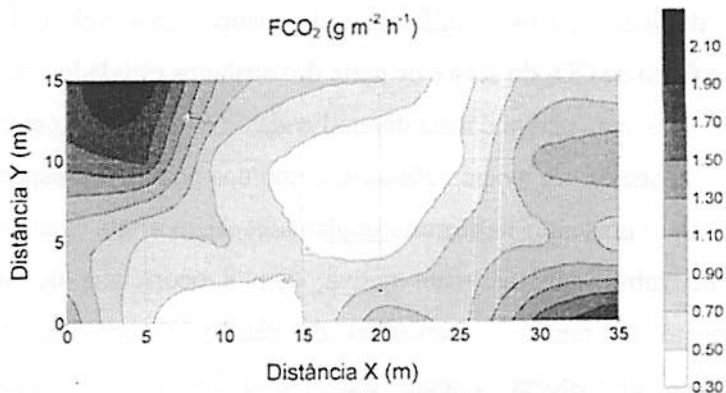


FIGURA 15. Mapa de isolinhas com a distribuição espacial do fluxo de gás carbônico do solo (FCO₂) na grade regular delimitada no povoamento de eucalipto, num Latossolo Vermelho distroférico de Lavras, MG.

6 CONCLUSÕES

1. Alterações no ambiente, causadas pela introdução de uma floresta plantada em área originalmente sob mata nativa, provocaram modificações na estrutura da variabilidade espacial dos fluxos de CO₂ do solo, que passaram de um padrão mais aleatório e altamente variável a curta distância para uma distribuição mais contínua e com forte dependência da posição no espaço.
2. As emissões de gás carbônico do solo em sistemas florestais manejados nas condições do presente estudo são um fenômeno de natureza complexa, não sendo possível identificar um único atributo do solo ou do ambiente que, isoladamente, explique sua variação no espaço. No entanto, no povoamento de eucalipto, parte da sua variabilidade pode ser explicada pelo efeito conjunto do teor de carbono orgânico do solo, da biomassa da serrapilheira e da presença de árvores no terreno, indicativo da participação de fatores bióticos no processo.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados do presente estudo indicam a influência direta da presença de plantas no ambiente sobre as emissões de CO₂ do solo. Nas avaliações do Capítulo 2, o maior fluxo de gás carbônico do solo ocorreu na parcela de cafeeiros não recepados na parte da manhã, período que coincide com as maiores taxas fotossintéticas da planta, fisiologicamente adaptada a condições de sombreamento (Rena et al., 1998). Nesse sentido, contribuições adicionais podem ser oferecidas com o estudo de pontos que fugiram ao escopo deste trabalho, como a dinâmica de translocação de fotoassimilados das folhas para o sistema radicular do cafeeiro e o metabolismo dos produtos orgânicos recebidos da parte aérea, resultando na produção de CO₂ no solo. É possível que a interação entre a Ciência do Solo e a Fisiologia Vegetal forneça uma compreensão mais completa sobre o assunto.

Metodologicamente, foi verificada a importância de se padronizar um horário para as medições dos fluxos de CO₂ do solo em cultivos de cafeeiros, para fins comparativos. Adicionalmente, a definição adequada da posição de tomada das leituras no campo pode evitar tendências nos resultados, já que é esperada uma diferença entre os valores medidos na projeção da copa das plantas e na entrelinha da cultura. No mesmo sentido, no experimento do Capítulo 3, ficou constatado que o diâmetro das árvores de eucalipto e a sua posição relativa no terreno influenciaram as emissões de CO₂ do solo. Experimentos conduzidos com leituras tomadas em locais com distância crescente a partir do tronco das árvores em florestas de eucalipto podem auxiliar o entendimento da distribuição espacial das emissões de CO₂ do solo nesses sistemas.

Entender a estrutura de variabilidade espacial é um ponto fundamental para a obtenção de valores médios confiáveis para a emissão de CO₂ da superfície de ecossistemas terrestres (Xu & Qi, 2001). Neste sentido, estimativas do fluxo médio de CO₂ do solo devem ser feitas a partir de leituras tomadas em pontos com distância mínima de 5 e 20 m na mata nativa e no povoamento de eucalipto, respectivamente, a fim de garantir independência entre os valores medidos. Nas condições do presente estudo, o número de amostras necessário para a obtenção de médias com erro em torno de 10% é bastante alto, em torno de 114 e 155 para mata nativa e eucalipto, respectivamente (Tabela 3, Capítulo 3). Considerando o aspecto operacional e de custos, medições simultâneas feitas por equipes diferentes de trabalho em duas áreas com 25 pontos na mata nativa e com 35 pontos no povoamento de eucalipto seriam suficientes para a obtenção de um fluxo médio de CO₂ do solo com erro em torno de 15%. Outra alternativa viável é aumentar o nível de significância para o cálculo do número mínimo de amostras representativas de $\alpha = 5\%$ para $\alpha = 10\%$. Neste caso, um total de 48 pontos de leitura no eucalipto e apenas 35 na mata nativa são suficientes para o cálculo de médias razoáveis, dentro da tolerância de 15% de desvio.

Apesar de relações encontradas entre o fluxo de CO₂ do solo e alguns compartimentos da matéria orgânica (carbono orgânico total e serrapilheira, no eucalipto), é possível que frações mais lábeis, como o carbono solúvel em água ou a fração leve livre, que tende a ser mais abundante em horizontes superficiais de ambientes florestais (Roscoe et al., 2001), estejam mais diretamente ligadas ao processo. Por fim, é importante avaliar a variabilidade dos fluxos de CO₂ do solo em outras escalas de observação, tanto no espaço quanto no tempo. O estudo da variabilidade das emissões de CO₂ em áreas maiores do que as selecionadas neste trabalho e em diferentes estações do ano é necessário para o cálculo do fluxo anual de CO₂ do solo em ecossistemas com florestas tropicais.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVAREZ V., V. H.; GUARÇONI, M. Variabilidade horizontal da fertilidade do solo de uma unidade de amostragem em sistema plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 27, n. 2, p. 297-310, mar./abr. 2003.
- BHUPINDERPAL-SINGH; NORDGREN, A.; OTTOSSON LÖFVENIUS, M.; HÖGBERG, M. N.; MELLANDER, P. E.; HÖGBERG, P. Tree root and soil heterotrophic respiration as revealed by girdling of boreal Scots pine forest: extending observations beyond the first year. *Plant, Cell and Environment*, Oxford, v. 26, n. 8, p. 1287-1296, Aug. 2003.
- BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density, In: KLUTE, A. (Ed.). *Methods of soil analysis*. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. v. 1, p. 363-375.
- BROWN, S.; LUGO, A. E. Biomass of tropical forests. A new estimate based on forest volumes. *Science*, Washington, v. 223, n. 4642, p. 1290-1293, Mar. 1984.
- CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soil. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, Sept./Oct. 1994.
- CARVALHO, M. P.; TAKEDA, E. Y.; FREDDI, O. S. Variabilidade especial de atributos de um solo sob videira em Vitória Brasil (SP). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 27, n. 4, p. 695-703, jul./ago. 2003.
- CHAGAS, R. K. Dinâmica de populações e prognóstico de produção de espécies arbóreas em um fragmento de floresta estacional semidecidual montana, em Lavras Minas Gerais. 2000. 66 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.
- CLINE, M. G. Principles of soil sampling. *Soil Science*, Baltimore, v. 58, n. 4, p. 275-288, June/Dec. 1944.
- CRAINE, J. M.; WEDIN, D. A.; STUART CHAPIN, III, F. Predominance of ecophysiological controls on soil CO₂ flux in a Minnesota grassland. *Plant and Soil*, Dordrecht, v. 207, n. 1, p. 77-86, 1999.

DIXON, R. K.; BROWN, S.; HOUGHTON, R. A.; SOLOMON, A. M.; TREXLER, M. C.; WISNIEWSKI, J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, Washington, v. 263, n. 1/2, p. 185-190, Mar. 1994.

DUIKER, S. W.; LAL, R. Carbon budget study using CO₂ flux measurements from a no till system in central Ohio. *Soil and Tillage Research*, Wallington, v. 54, n. 1/2, p. 21-30, Mar. 2000.

EDWARDS, N. T. Effects of temperature and moisture on carbon dioxide evolution in a mixed deciduous forest floor. *Soil Science Society of America Proceedings*, Madison, v. 39, n. 2, p. 361-365, Mar./Apr. 1975.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). *Manual de métodos de análise de solo*. Brasília: EMBRAPA-SPI; EMBRAPA-CNPq, 1997. 212 p.

ESWARAN, H.; VAN DEN BERG, E.; REICH, P. Organic carbon in soils of the world. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 57, n. 2, p. 192-194, Mar./Apr. 1993.

FANG, C.; MONCRIEFF, J.B. The dependence of soil CO₂ efflux on temperature. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 33, p. 155-165, 2001.

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, Aug. 1998.

FEIGL, B. J.; SPARLING, G. P.; ROSS, D. J.; CERRI, C. C. Soil microbial biomass in Amazonian soils: evaluation of methods and estimates of pool sizes. *Soil Biology and Biochemistry*, Oxford, v. 27, n. 11, p. 1467-1472, Nov. 1995.

FIELD, C. B.; BALL, J. T.; BERRY, J. A. Photosynthesis: principles and field techniques. In: PEARCY, R. W.; EHLERINGER, J.; MOONEY, H. A.; RUNDEL, P. W. (Ed.). *Plant physiological ecology*. London: Chapman & Hall, 1992. Cap. 11, p. 209-253.

GÄRDENÄS, A. I. Soil respiration fluxes measured along a hydrological gradient in a Norway spruce stand in south Sweden (Skogaby). *Plant and Soil*, Dordrecht, v. 221, n. 2, p. 273-280, 2000.

GERALDES, A. P. A.; CERRI, C. C.; FEIGL, B. J. Biomassa microbiana de solo sob pastagens na Amazônia. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 19, n. 1, p. 55-60, jan./mar. 1995.

HÖGBERG, P.; NORDGREN, A.; BUCHMANN, N.; TAYLOR, A. F. S.; EKBLAD, A.; HÖGBERG, M. N.; NYBERG, G.; OTTOSSON-LÖFVENIUS, M.; READ, D. J. Large-scale forest girdling shows that current photosynthesis drives soil respiration. *Nature*, London, v. 411, n. 6839, p. 789-792, June 2001.

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

LA SCALA Jr., N.; MARQUES Jr., J.; PEREIRA, G. T.; CORA, J. E. Carbon dioxide emission related to chemical properties for a tropical bare soil. *Soil Biology and Biochemistry*, Oxford, v. 32, n. 10, p. 1469-1473, Oct. 2000a.

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

LIRA, A. C. S de; POGGIANI, F.; GONÇALVES, J. L. de. Respiração do solo sob eucalipto e cerradão. *Scientia Florestalis*, Piracicaba, v. 56, p. 15-28, dez. 1999.

LITTON, C. M.; RYAN, M. G.; KNIGHT, D. H. STAHL, P. D. Soil-surface carbon dioxide efflux and microbial biomass in relation to tree density 13 years after a stand replacing fire in a lodgepole pine ecosystem. *Global Change Biology*, Oxford, v. 9, n. 5, p. 680-696, May 2003.

LONGDOZ, B.; YERNAUX, M.; AUBINET, M. Soil CO₂ efflux measurements in a mixed forest: impact of chamber disturbances, spatial variability and seasonal evolution. *Global Change Biology*, Oxford, v. 6, n. 11, p. 907-917, Nov. 2000.

MARTINS, S. G.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; FERREIRA, M. M. Avaliação de atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico sob diferentes povoamentos florestais. *Cerne*, Lavras, v. 8, n. 1, p. 32-41, 2002.

MOSIER, A. R. Gas flux measurements techniques with special reference to techniques suitable for measurements over large ecologically uniform areas. In: BOUWMAN, A. F. *Soils and the greenhouse effect*. Wageningen: John Wiley & Sons, 1990. Cap. 13, p. 289-301.

OLIVEIRA-FILHO, A. T.; SCOLFORO, J. R. S.; MELLO, J. M. de. Composição florística e estrutura comunitária de um remanescente de floresta semidecídua montana em Lavras, MG. *Revista Brasileira de Botânica*, São Paulo, v. 17, n. 2, p. 167-182, dez. 1994.

RAYMENT, M. B.; JARVIS, P. G. Temporal and spatial variation of soil CO₂ efflux in a Canadian boreal forest. *Soil Biology and Biochemistry*, Oxford, v. 32, n. 1, p. 35-45, Jan. 2000.

REICOSKY, D. C.; DUGAS, W. A.; TORBERT, H. A. Tillage-induced soil carbon dioxide loss from different cropping systems. *Soil and Tillage Research*, Wallingford, v. 41, n. 1/2, p. 105-118, Mar. 1997.

RENA, A. B.; NACIF, A. de P.; GUIMARÃES, P. T. G.; BARTHOLO, G. F. Plantios adensados de café: aspectos morfológicos, ecofisiológicos, fenológicos e agronômicos. *Informe Agropecuário*, Belo Horizonte, v. 19, n. 193, p. 61-70, 1998.

ROSCOE, R.; BUURMAN, P.; VELTHORST, E. J.; VASCONCELLOS, C. A. Soil organic matter dynamics in density and particle size fractions as revealed by the ¹³C/¹²C isotopic ratio in a Cerrado's Oxisol. *Geoderma*, Amsterdam, v.104, n.3/4, p.185-202, Dec. 2001.

RUSSELL, C. A.; VORONEY, R. P. Carbon dioxide efflux from the floor of a boreal aspen forest. I. Relationship to environmental variables and estimates of C respired. *Canadian Journal of Soil Science*, Ottawa, v. 78, n. 2, p. 301-310, May 1998.

SCHENDENMANN, 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, June 2003.

SCHLINDWEIN, J. A.; ANGHINONI, I. Variabilidade horizontal de atributos de fertilidade e amostragem do solo no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 1, p. 85-91, jan./mar. 2000.

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

SOARES, A. **Geoestatística para as ciências da terra e do ambiente**. Lisboa: IST Press, 2000. 206 p.

TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. In: BRADY, N. C. (Ed.). **Advances in agronomy**. New York: Academic Press, 1985. v. 38, p. 45-94, 1985.

VANCE, E. D.; BROOKES, P. C.; JENKINSON, D. S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. **Soil Biology Biochemistry**, Oxford, v. 19, n. 6, p. 703-707, Apr./June 1987.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade especial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V.; V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 1, p. 1-54.

VOLTZ, M.; WEBSTER, R. A comparison of kriging, cubic splines and classification for predicting soil properties from sample information. **Journal of Soil Science**, London, v. 41, n. 3, p. 473-490, Sept. 1990.

WALKLEY, A.; BLACK, I. A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Science**, Baltimore, v. 37, n. 1, p. 29-38, 1934.

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. 4, p. 667-677, Nov. 2001.

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, Oct. 2003.

ANEXO

ANEXO A

Página

- FIGURA 1A.** Variação das emissões de CO₂ do solo com analisador de gás por infravermelho em função do tempo de leitura (modelo *ADC LCA-4, Analytical Development Company Bioscientific Ltd, Hoddesdon, England*). As retas pontilhadas indicam o momento em que as emissões de CO₂ para o interior da câmara atingiram um estado de equilíbrio dinâmico..... 94
- FIGURA 2A.** Gráfico de dispersão com curva obtida por regressão linear simples para o ajuste dos pontos de calibração do TDR (reflectômetro de domínio no tempo, modelo *Field Scout TDR 300 Soil Moisture Meter, Spectrum Technologies, IL, USA*) utilizado nas medições de umidade do solo (U). O eixo das ordenadas indica valores calculados a partir de resultados de umidade gravimétrica e densidade do solo da área experimental (n=26)..... 95
- TABELA 1A.** Parâmetros dos modelos matemáticos ajustados aos semivariogramas experimentais obtidos para atributos do solo em povoamento de mata nativa. O semivariograma para FCO₂ foi gerado a partir de dados transformados [$Y = \ln(\text{FCO}_2 + 1)$]..... 96
- TABELA 2A.** Parâmetros dos modelos matemáticos ajustados aos semivariogramas experimentais obtidos para atributos do solo em povoamento de eucalipto. O semivariograma para FCO₂ foi gerado a partir de dados transformados [$y = \log(\text{FCO}_2 + 1)$]..... 97

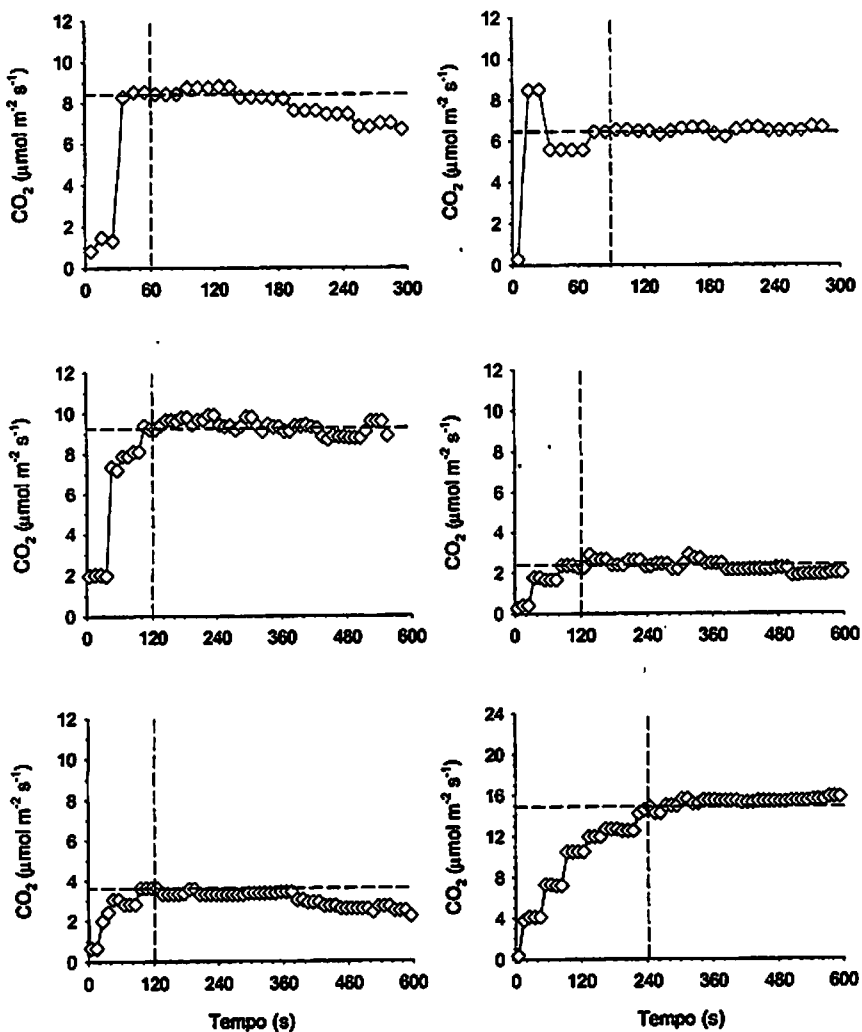


FIGURA 1A. Variação das emissões de CO₂ do solo com analisador de gás por infravermelho em função do tempo de leitura (modelo *ADC LCA-4*, *Analytical Development Company Bioscientific Ltd, Hoddesdon, England*). As retas pontilhadas indicam o momento em que as emissões de CO₂ para o interior da câmara atingiram um estado de equilíbrio dinâmico.

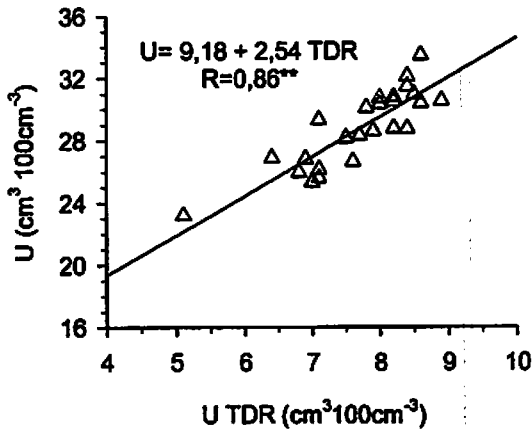


FIGURA 2A. Gráfico de dispersão com curva obtida por regressão linear simples para o ajuste dos pontos de calibração do TDR (reflectômetro de domínio no tempo, modelo *Field Scout TDR 300 Soil Moisture Meter, Spectrum Technologies, IL, USA*) utilizado nas medições de umidade do solo (U). O eixo das ordenadas indica valores calculados a partir de resultados de umidade gravimétrica e densidade do solo da área experimental (n=26).

TABELA 1A. Parâmetros dos modelos matemáticos ajustados aos semivariogramas experimentais obtidos para atributos do solo em povoamento de mata nativa. O semivariograma para FCO₂ foi gerado a partir de dados transformados [$Y = \ln(\text{FCO}_2 + 1)$].

Atributo	Modelo	Pepita (Co)	Patamar (Co+C)	Alcance	Proporção Co/(Co+C)	GDE	R ²	SQR
FCO ₂	Linear	0,17457	0,17457	-	1,000	-	-	-
E	Linear	2,65937	2,65937	-	1,000	-	-	-
T	Esférico	0,0549	0,1248	19,0	0,440	Moderado	0,576	$1,07 \times 10^{-3}$
U	Linear	4,61131	4,61131	-	1,000	-	-	-
Al	Esférico	0,01968	0,04226	20,0	0,466	Moderado	0,763	$5,00 \times 10^{-5}$
pH	Esférico	0,0033	0,0442	> D*	0,075	Forte	0,921	$2,37 \times 10^{-5}$
SB	Esférico	0,0002	0,1061	> D*	0,002	Forte	0,878	$2,30 \times 10^{-4}$
PT	Linear	2,03879	2,03879	-	1,000	-	-	-
Ds	Linear	0,00284	0,00284	-	1,000	-	-	-
CO	Esférico	5,20	12,01	> D*	0,433	Moderado	0,969	0,375
Cmic	Exponencial	38.300	77.540	> D*	0,494	Moderado	0,611	$1,92 \times 10^8$

* O alcance efetivo excedeu a distância máxima entre pontos amostrados (D). Co: efeito pepita; Co+C: patamar; A: alcance.

GDE: grau de dependência espacial, definido em função da proporção Co/(Co+C): forte para valores menores que 0,25; moderado para valores entre 0,25 e 0,75 e fraco para valores superiores a 0,75 (Cambardella et al., 1994).

SQR: soma dos quadrados dos resíduos.

TABELA 2A. Parâmetros dos modelos matemáticos ajustados aos semivariogramas experimentais obtidos para atributos do solo em povoamento de eucalipto. O semivariograma para FCO₂ foi gerado a partir de dados transformados [y=log (FCO₂+1)].

Atributo	Modelo	Pepita (Co)	Patamar (Co+C)	Alcance	Proporção Co/(Co+C)	GDE	R ²	SQR
FCO ₂	Esférico	0,0001	0,0715	19,5	0,001	Forte	0,927	1,38 × 10 ⁻⁴
E	Gaussiano	1,510	11,029	> D*	0,137	Forte	0,899	3,75
T	Exponencial	0,0264	0,1398	13,7	0,189	Forte	0,441	1,32 × 10 ⁻³
U	Esférico	0,880	5,387	11,4	0,163	Forte	0,783	0,692
Al	Esférico	0,0115	0,0521	12,9	0,221	Forte	0,863	4,06 × 10 ⁻⁵
pH	Esférico	0,00348	0,02506	8,5	0,139	Forte	0,251	5,54 × 10 ⁻⁵
SB	Esférico	0,00426	0,02252	10,4	0,189	Forte	0,761	9,35 × 10 ⁻⁶
PT	Linear	6,03726	6,03726	-	1,000	-	-	-
Ds	Linear	0,00919	0,00919	-	1,000	-	-	-
CO	Esférico	0,3100	3,9120	10,6	0,079	Forte	0,634	0,919
Cmic	Esférico	2,100	65,260	8,0	0,032	Forte	0,136	6,94 × 10 ⁸
HO _o	Esférico	1,58	10,62	11,0	0,149	Forte	0,469	9,72
HO _d	Esférico	59,6	333,4	9,0	0,179	Forte	0,979	4.200

* O alcance efetivo excedeu a distância máxima entre pontos amostrados (D). Co: efeito pepita; Co+C: patamar; A: alcance. GDE: grau de dependência espacial, definido em função da proporção Co/(Co+C): forte para valores menores que 0,25; moderado para valores entre 0,25 e 0,75 e fraco para valores superiores a 0,75 (Cambardella et al., 1994). SQR: soma dos quadrados dos resíduos.