



Distribuição espacial do efluxo de CO₂ em área de terra preta arqueológica sob cultivo de cacau e café no município de Apuí, AM, Brasil

doi:10.4136/ambi-agua.1892

Received: 05 Jun. 2016; Accepted: 28 Jul. 2016

Milton Cesar Costa Campos^{1*}; Leandro Coutinho Alho²;
Diogo André Pinheiro da Silva³; Marcelo Dayron Rodrigues Soares⁴;
José Mauricio da Cunha⁵; Douglas Marcelo Pinheiro da Silva⁴

¹Universidade Federal do Amazonas (UFAM), Humaitá, AM, Brasil
Colegiado de Agronomia

²Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas (IFAM), Lábrea, AM, Brasil

³Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, MG, Brasil
Departamento de Engenharia Ambiental

⁴Universidade Federal do Amazonas (UFAM), Humaitá, AM, Brasil
Colegiado de Engenharia Ambiental

⁵Universidade Federal do Amazonas (UFAM), Humaitá, AM, Brasil
Colegiado de Ciências, Matemática e Física

*Autor correspondente: e-mail: mcesarsolos@gmail.com,
leandro_alho@yahoo.com, andredioogo@hotmail.com, marcelo.dayron@gmail.com,
maujmc@gmail.com, douglasmcarcelo@gmail.com

RESUMO

As Terras Pretas Arqueológicas (TPA) são solos que podem concentrar até seis vezes mais carbono orgânico que solos adjacentes sem horizonte A antrópico, presumindo-se, dessa forma, maior efluxo de CO₂ nesses solos. O objetivo deste estudo foi investigar a distribuição espacial do efluxo de CO₂, temperatura e umidade do solo em área de Terra Preta Arqueológica sob cultivo de cacau e café no município de Apuí, AM, Brasil. Foram construídas malhas amostrais nas dimensões 42 x 80 m, com espaço entre os pontos de 8 x 10 m e 6 x 10 m para as áreas de cacau e café, respectivamente. Após a etapa de coleta dos dados do efluxo de CO₂, temperatura e umidade do solo, procedeu-se a análise estatística descritiva e geoestatística. Os resultados mostraram que os parâmetros avaliados apresentam dependência espacial, com alcance variando de 25 a 40 m para o efluxo de CO₂ da área TPA com cacau. O efluxo de CO₂ na área de cacau foi superior, com valor médio de 5,49 μmol m⁻² s⁻¹, comparado ao 3,99 μmol m⁻² s⁻¹ de CO₂ da área com café.

Palavras-chave: carbono orgânico, efluxo de CO₂, solo antrópico.

Spatial distribution of the CO₂ stream in archaeological dark earth area under cocoa and coffee cultivation in the municipality of Apuí, AM, Brazil

ABSTRACT

The Archaeological Dark Earth (ADE) are soils that can hold up to six times more organic carbon than surrounding soils without anthropic horizons, thus assuming higher CO₂

emissions from these soils. The objective of this study was to investigate the spatial distribution of CO₂ efflux, temperature and soil moisture in an Archaeological Dark Earth area under cocoa and coffee cultivation in the municipality of Apuí, AM, Brazil. Sample grids of 42 x 80 m were set up, with space between points of 8 x 6 x 10 m and 10 m, respectively, for the cocoa and coffee areas. After data of CO₂ efflux, temperature and humidity of the soil were collected, descriptive statistics and geostatistics analyses were done. The results showed that the evaluated parameters exhibited spatial dependence reaching a range of 25 to 40 m for CO₂ stream ADE area with cocoa. The CO₂ efflux in the cocoa area was higher, with an average value of 5.49 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, compared to 3.99 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ in the area of coffee CO₂.

Keywords: antropico soil, CO₂ efflux, organic carbon.

1. INTRODUÇÃO

Na Amazônia, os solos que apresentam horizonte A antrópico estão associados à prolongada ocupação humana pré-histórica, realizada por sociedades indígenas do período pré-colombiano (EMBRAPA, 2013), as quais formaram extensos depósitos de resíduos, ou simplesmente rejeitos, que alteraram significativamente as propriedades dos solos (Aquino et al., 2016), de modo que estes apresentaram variações expressivas nas propriedades físicas, químicas, biológicas e mineralógicas quando comparados aos solos adjacentes. Os vestígios mais contundentes dessa ocupação indígena, com ampla distribuição, são as manchas de solos de cor negra, que ocorrem devido à elevada presença de matéria orgânica e à contribuição significativa do carbono pirogênico, formado por oxidação incompleta dos materiais orgânicos (Campos et al., 2012a), que exibem alta resistência à oxidação termal, química e à foto-oxidação. Esses fatores atribuíram a esses solos algumas designações, como Terra Preta Arqueológica (TPA) ou simplesmente Terra Preta (Kämpf e Kern, 2005).

As maiores reservas de carbono (C) no ecossistema terrestre encontram-se no solo, chegando a ser 4 vezes maiores que o C da vegetação e 3,3 vezes maiores que o da atmosfera (IPCC, 2007). As TPAs, por sua vez, podem apresentar, em média, até 6 vezes mais carbono orgânico estável que os solos adjacentes sem horizonte A antrópico (Glaser, 2001), figurando como grande reservatório de carbono orgânico. Entretanto, com a modificação da cobertura da vegetação nativa por meio das ações antrópicas atuais, é possível que haja perdas massivas de C do solo (La Scala Júnior et al., 2012).

As ações de perda de CO₂ do solo são representadas pelas trocas gasosas entre o solo e a atmosfera, e governadas pela difusão do CO₂ por meio dos poros do solo, que podem ser influenciadas pelas propriedades do solo ou pela cobertura vegetal presente no local (Pinto Júnior et al., 2009). As variáveis climáticas têm relações diretas com os efluxos de CO₂ para a atmosfera. Desse modo, os principais fatores que afetam as emissões são a temperatura (do ar e do solo) e o teor de umidade do solo, adicionados às relações climáticas e topográficas do local (Brito et al., 2010).

O estudo da variabilidade espacial por meio da geoestatística possibilita a interpretação dos resultados com base na estrutura da variabilidade natural dos atributos que foram considerados na avaliação, levando em conta a dependência espacial dentro do intervalo de amostragem, permitindo indicar alternativas de uso. Além disso, possibilita melhor compreensão da variabilidade desses atributos e sua influência no ambiente (Silva Neto et al., 2012). Porém, a variabilidade espacial não se restringe apenas aos atributos do solo, ocorrendo também sob a emissão de CO₂ (Pinto Júnior et al., 2009).

Vários são os estudos de variabilidade espacial do efluxo de CO₂, especialmente em áreas de florestais nativas, conforme destacam La Scala Júnior et al. (2012). Segundo La Scala Junior et al. (2009), o aumento das emissões de CO₂ ocorre nos meses mais quentes do ano (de outubro a fevereiro). De acordo com Adachi (2009). Tal fato é atribuído às condições

favoráveis à atividade dos microrganismos no solo, especialmente da precipitação pluviométrica que interfere no padrão espacial e temporal das emissões do solo. Amazônia Pinto Junior et al. (2009) e Silva et al. (2016) informam que na Amazônia, os fatores determinantes na variação espacial e temporal são temperatura e precipitação.

Nesta parte da Amazônia, as TPAs são facilmente identificadas e utilizadas por pequenos agricultores que as cultivam com frutíferas, hortaliças e pastagem em função de sua alta fertilidade (Campos et al., 2011), o que pode representar um risco ao ambiente com a perda desse importante reservatório de carbono. Assim o presente estudo teve como objetivo investigar a distribuição espacial do efluxo de CO₂ em área de Terra Preta Arqueológica sob cultivo de cacau e café no município de Apuí, AM, Brasil.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado no município de Apuí, AM, Brasil, situado em Latitude 7°12'05" S e Longitude 59°39'37" W, que é transpassado pela rodovia Transamazônica (BR-230) (Figura 1). Segundo a classificação de Köppen, o clima da região pertence ao grupo A (Clima Tropical Chuvoso) e tipo climático Am (chuvas do tipo monção), apresentando um período seco de pequena duração. A pluviosidade limita-se às isoietas de 2.250 e 2.750 mm, com período chuvoso iniciando em outubro e prolongando-se até junho. As temperaturas médias anuais variam entre 25 e 27°C, e a umidade relativa, entre 85 e 90%.

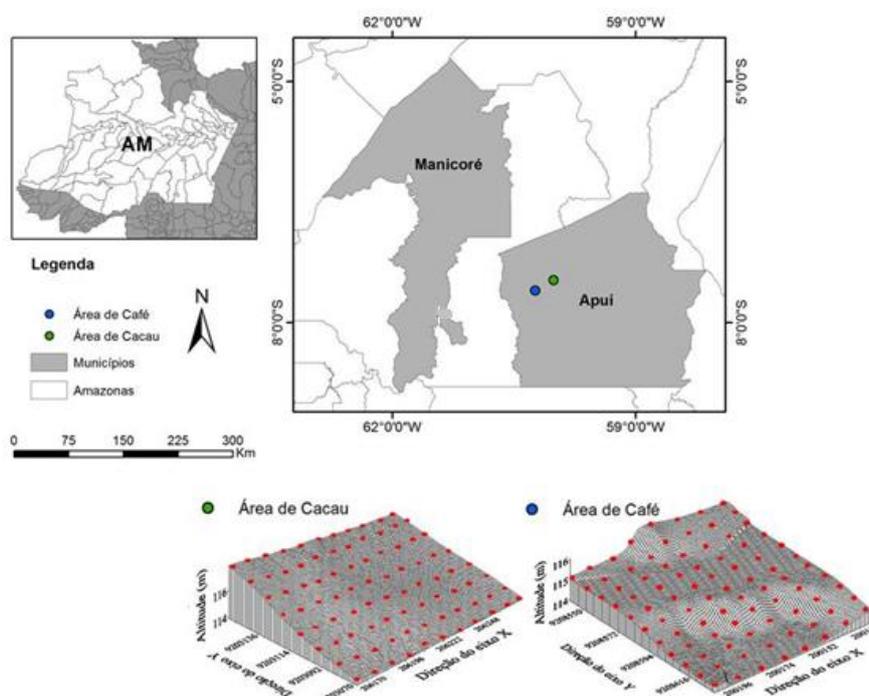


Figura 1. Mapa de localização das áreas com Terra Preta Arqueológica sob cultivo de cacau e café no município de Apuí, AM, Brasil.

A geologia da região é oriunda dos arenitos da formação Beneficente, recobertos por pacote argiloso do terciário. As classes de solo predominantes no município são os Argissolos e Latossolos, recobertos por vegetação primária, constituída predominantemente por Floresta Tropical Densa, formada por árvores adensadas (SDS, 2004).

A TPA que abriga cultura de cacau vem sendo cultivada há quatorze anos. Nos primeiros seis anos abrigou os cultivos de arroz, milho, feijão e melancia. A cultura do cacau foi inserida posteriormente e permanece até o presente estudo. A TPA que abriga cultura café

vem sendo cultivada há seis anos. Nos primeiros dois anos abrigou o cultivo de pastagem e nos últimos quatro anos, a cultura do café. O solo nas duas áreas de TPA no município de Apuí foram classificados como Argissolo Amarelo Eutrófico, segundo critérios estabelecidos pela Embrapa (2013).

Nesses locais, foi estabelecido um grid amostral na área com dimensões de 48 x 88 m, espaçamentos de 6 x 8 m, 88 pontos em cada grid, e um total de 352 pontos amostrais (Figura 1). As medições do efluxo de CO₂, temperatura e umidade foram realizadas durante quatro dias consecutivos, sempre no período da manhã (entre 8:00 e 10:00), obtendo-se, ao final, um valor médio para cada ponto amostral da malha, sendo realizadas leituras apenas no período da manhã em função da distância e do difícil acesso entre as áreas estudadas.

A FCO₂ foi registrada utilizando-se de um sistema portátil da companhia LI-COR (LI-8100), Nebraska EUA. Em seu modo de medição, o sistema monitora as mudanças na concentração de CO₂ dentro da câmara por meio de espectroscopia de absorção óptica na região do infravermelho (IRGA). A câmara para solos tem um volume interno de 854,2 cm³, com área de contato de 83,7 cm², e foi colocada sobre colares de PCV previamente inseridos no solo, a uma profundidade de 3 cm em cada um dos pontos amostrais. Uma vez a câmara fechada, o modo de medida levou 1min e 30s em cada ponto para a determinação de FCO₂ e , dentro da câmara, a concentração de CO₂ foi determinada a cada 2,5s.

A temperatura do solo (Tsolo) foi monitorada por um sensor de temperatura (termistor portátil), parte integrante do sistema do LI-8100, inserido na camada de 0-12 cm de profundidade. A umidade do solo (Usolo) também foi medida em todos os pontos, utilizando-se um sistema portátil TDR-Campbel[®] (Hydrosense TM, Campbell Scientific, Australia), que avaliou a umidade disponível do solo (% volume) na camada de 0-12 cm.

Próximo as áreas em estudo, foram constatadas temperatura do ar, umidade do ar e precipitações médias diárias conforme a Tabela 1. Foram utilizadas as variáveis climáticas referentes a região devido à ausência de unidade de estação meteorológica nas proximidades do local de estudo. Assim, leituras do FCO₂, TS e US foram feitas de 05 a 12 de dezembro de 2014 para as áreas de cacau e café, respectivamente.

Tabela 1. Média de dados climáticos de estações automáticas entre as regiões de Apuí e Manicoré, no estado do Amazonas.

Data	Temperatura do ar (°C)	Umidade do ar (%)	Precipitação Acumulada (mm dia ⁻¹)
05/12/2014	26,00	83,33	3,20
06/12/2014	24,61	87,96	32,55
07/12/2014	25,83	80,89	0,00
08/12/2014	27,36	76,53	2,12
09/12/2014	24,70	84,33	4,14
10/12/2014	25,10	77,98	0,55
11/12/2014	26,63	83,44	3,67
12/12/2014	27,06	85,13	31,23

Fonte: INMET (2014).

Inicialmente, os dados foram submetidos à análise estatística descritiva calculando-se a média, mediana, desvio padrão, variância, coeficiente de variação, máximo, mínimo, coeficiente de assimetria, curtose e a hipótese de normalidade (Kolmogorov-Smirnov) pelo

software estatístico Minitab 14 (Minitab, 2000). Em seguida, os dados também foram submetidos à análise de variância, e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, para verificar a diferença dos atributos entre áreas de TPAs sob cultivo de cacau e café. Além disso foi realizada a análise de correlação de Person.

Para a caracterização da variabilidade espacial, foi utilizada a análise geoestatística (Isaaks e Srivastava, 1989) sob a teoria da hipótese intrínseca, onde o semivariograma experimental é estimado pela Equação 1.

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

em que:

$\gamma(h)$ é o valor da semivariância para uma distância h ;

$N(h)$ é o número de pares envolvidos no cálculo da semivariância;

$Z(x_i)$ é o valor do atributo Z na posição x_i ;

$Z(x_i+h)$ é o valor do atributo Z separado por uma distância h da posição x_i .

O ajuste de um modelo matemático (exponencial, esférico, linear ou gaussiano) aos valores calculados de $\hat{\gamma}(h)$ foi definido com base nos coeficientes do modelo teórico para o semivariograma: o efeito pepita (C_0); o patamar ($C_0 + C_1$) e o alcance (a).

Na análise da razão de dependência espacial (proporção em percentagem do (C_0) em relação ao (C_0+C_1)) das variáveis em estudo, utilizou-se a classificação de Cambardella et al. (1994), onde valores de $[(C_0/(C_0+C_1))]$ menores que 25% são considerados dependência espacial forte, valores de $[(C_0/(C_0+C_1))]$ entre 25 e 75 % indicam dependência espacial moderada, e valores de $[(C_0/(C_0+C_1))]$ maiores que 75%, dependência espacial fraca.

Na determinação da existência ou não da dependência espacial, utilizou-se a modelagem dos semivariogramas através do programa GS^+ (Robertson, 1998), tendo como base para a escolha do melhor ajuste do semivariograma, respectivamente, o maior valor do coeficiente de determinação (r^2) e a validação cruzada. Após o ajuste dos modelos matemáticos permissíveis, foi realizado à interpolação dos dados por meio da krigagem e, em seguida, a confecção dos mapas de isolinhas foram geradas no software Surfer versão 8.00.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A estatística descritiva e o teste de médias para o fluxo de CO_2 , temperatura e umidade do solo são apresentados na tabela 2. As variáveis apresentaram valores de média e mediana próximos, indicando distribuição normal. Os valores máximos e mínimos com maiores distanciamentos foram observados para o FCO_2 na área de TPA com cacau e T solo de ambas as áreas estudadas. Contudo, o valor máximo e mínimo do fluxo de CO_2 na área de TPA com cacau, cuja variação foi da ordem de 15,30 a 1,35 $\mu mol m^{-2}$, avaliado em conjunto com o valor de assimetria e curtose, explicam o valor do coeficiente de variação de 46,21%, que representa alta variabilidade segundo classificação de Warrick e Nielsen (1980) para este parâmetro estatístico.

Tabela 2. Testes de médias e estatística descritiva do fluxo de CO₂, temperatura e umidade do solo em Terra Preta Arqueológica sob cultivo de cacau e café no município de Apuí, AM, Brasil.

Estatística	TPA com Cacau			TPA com Café		
	FCO ₂ ($\mu\text{mol m}^{-2}$)	Tsolo (°C)	Usolo (%)	FCO ₂ ($\mu\text{mol m}^{-2}$)	Tsolo (°C)	Usolo (%)
Média	5,49a	26,14a	39,21b	3,99	27,85a	22,02b
Mediana	5,13	26,15	39,50	3,88	27,82	22,00
Mínimo	15,30	26,62	49,00	2,43	26,64	14,75
Máximo	1,35	25,68	29,67	6,33	28,81	29,50
Assimetria	1,47	0,13	0,09	0,85	-0,08	0,24
Curtose	3,52	-0,57	-0,50	0,26	0,25	0,43
Desvio Padrão	2,53	0,22	4,38	0,90	0,42	2,86
CV (%)	46,21	0,84	11,16	22,69	1,52	13,00
Valor de p	0,10*	0,07	0,06	0,01	0,20*	0,20*

FCO₂ = Fluxo de CO₂, T solo = Temperatura do solo, U solo = Umidade do solo, CV = Coeficiente de variação; d³= Teste de Kolmogorov Smirnov a 5% de probabilidade; *significativo a 5% de probabilidade.

Resultados semelhantes foram encontrados por Schwendenmann et al. (2003) que, avaliando a variabilidade espacial e temporal do FCO₂ em solos de floresta tropical, observaram valores de CV entre 35 e 45%, e, Maier et al. (2011), que em estudo sobre a variabilidade espacial do efluxo de gases do efeito estufa, encontraram valores de coeficiente de variação de 55% para o FCO₂ em solo vegetado. Segundo Oliveira et al. (2015), o coeficiente de variação de atributos do solo de diferentes localizações dentro de um ecossistema é indicativo da sua variação espacial, mas apenas o CV não é suficiente para a comparação entre atributo do solo de diferentes estudos devido, em parte, à falta de padronização no esquema experimental, como o tamanho e a forma da área, o número de pontos amostrais e o seu arranjo espacial.

A média do FCO₂ para a área de TPA com cacau foi de 5,49 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, enquanto a área de TPA com café apresentou 3,99 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ para o FCO₂, diferindo estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade (Tabela 2). Estes resultados devem-se possivelmente a estabilidade do sistema de cultivo com cacau (08 anos), espaçamento da cultura, maior acúmulo de serapilheira e maior aporte de C orgânico na área de cacau comparando com a área de café. Apesar da diferenciação entre os dois sistemas de uso, essas médias do FCO₂ são superiores às médias descrita no trabalho de Silva et al. (2016) em áreas sob diferentes sistemas agroflorestais na Amazônia. Contudo, é provável que o maior FCO₂ nas áreas de TPA com cacau e café não esteja atribuída a cobertura vegetal dessas áreas, mas pelo maior teor de carbono orgânico encontrado nos solos com horizonte A antrópico (TPA), conforme mencionam Santos et al. (2013).

O FCO₂ é resultado da atividade microbiana e respiração das raízes, todavia, por adição dos fatores ambientais temperatura e umidade, pode haver aumento ou diminuição das emissões devido a variabilidade temporal, conforme destacam Silva et al. (2016). Verifica-se também que a Tsolo apresentou valores médios idênticos estatisticamente nas duas áreas estudadas, variando 26,14 °C para área de cacau, e 27,83°C para área de café. Contudo, as áreas apresentaram teores de Umidade do solo diferentes estatisticamente, da ordem de 39,21% para área de TPA com cacau e 22,02% para área de TPA com café, fato que possivelmente está interferindo no FCO₂, conforme Simões et al. (2010) em estudos de

carbono orgânico na Amazônia.

Por meio de análise ampla permitida pela avaliação das médias, presume-se que o fator Usolo possa estar colaborando para o elevado FCO₂ da TPA com cacau, uma vez que o aumento da umidade favorece a atividade microbiana do solo (La Scala Júnior et al., 2009). Por outro lado, Tedeschi et al. (2006) afirmam que a contribuição desses fatores não é tão grande quando se analisa a variabilidade espacial.

De certo modo, somente a análise das médias não é suficiente para exibir a caracterização do FCO₂ ao longo de uma área, assim como a coadjuvância dos fatores temperatura e umidade nos níveis do efluxo. Para tanto, a caracterização foi feita por meio da análise geoestatística, cujos resultados são apresentados na Tabela 3. O FCO₂ e os parâmetros Tsolo e Usolo, tanto da área TPA com cacau como TPA com café, apresentaram dependência espacial, com ajustes matemáticos nos modelos esférico e exponencial.

Tabela 3. Modelos e parâmetros estimados aos semivariogramas do efluxo de CO₂ ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$), temperatura (°C) e umidade do solo (%) em Terra Preta Arqueológica sob cultivo de cacau e café no município de Apuí, AM, Brasil.

Parâmetros	TPA com cacau			TPA com café		
	FCO ₂	Tsolo	Usolo	FCO ₂	Tsolo	Umidade do
Modelo	Esf	Exp	Exp	Exp	Esf	Exp
Efeito Pepita	0,19	1,70	0,01	0,42	0,03	2,62
Patamar	0,72	12,90	0,04	0,84	0,18	8,99
Alcance (m)	40,00	25,00	27,00	33,90	18,82	33,10
¹ R ²	0,85	0,99	0,97	0,84	0,85	0,95
² GDE (%)	27,0	13,0	12,0	50,0	16,6	29,1
³ VC%	0,88	0,72	0,73	0,60	0,75	0,91

FCO₂ = efluxo de CO₂, T solo = Temperatura do solo, U solo = Umidade do solo, ¹R²= coeficiente de determinação, ²GDE%=grau de dependência espacial e; ³VC=validação cruzada.

Estudando a variabilidade espacial do FCO₂ durante 18 dias consecutivos, La Scala Júnior et al. (2000) encontraram, em sua maioria, modelos esféricos e exponenciais que explicaram a variabilidade espacial deste atributo. Segundo Aquino et al. (2015) os modelos esférico e exponencial são os que melhor descrevem a variabilidade espacial da umidade do solo (Usolo), de acordo com os dados deste estudo. De igual modo, foram ajustados modelos exponenciais e esféricos à Tsolo nas áreas de estudos, resultados que evidenciam constante variabilidade temporal dos parâmetros avaliados.

O alcance é uma medida importante no planejamento e na avaliação experimental, auxiliando na definição de procedimento de amostragem (Oliveira et al., 2015). Os menores valores de alcance foram observados para a Tsolo na área de café e cacau com intervalo de 18,82 e 25 m, respectivamente, indicando assim que esta variável apresenta distribuição dos valores de dependência espacial menos prolongada ao longo da área de estudo (Tabela 3). Por outro lado, o maior valor de alcance foi verificado para o FCO₂ na área de cacau e café entre 40 e 33,9 m. Os índices de alcance de dependência espacial para as variáveis analisadas variaram de 15 m a 47 m. Estes valores podem ser atribuídos às constantes variações nas formas do relevo das áreas dos campos naturais, de acordo com Campos et al. (2012b), com mudanças repentinas de formas côncavas e convexas ao longo da paisagem.

Todas as modelagens realizadas apresentaram um valor de R² superior a 0,80 e validação cruzada com valores mínimo de 0,60 e máximo 0,91 (Tabela 3), semelhante aos encontrados

por Aquino et al. (2015) em estudos de atributos do solo na Amazônia. Por outro lado, as variáveis analisadas apresentaram comportamento de dependência espacial (GDE) entre forte e moderado (Tabela 3). Sob esta perspectiva, pode-se afirmar que a distância adotada da separação das amostras contribuiu para os baixos percentuais de GDE das áreas de cacau e café. A forte dependência espacial dos atributos relacionados aos FCO₂, é atribuída aos fatores intrínsecos, tais como o clima e tipo de solo, aos processos físicos e químicos e a atividade biológica (Cambardella et al., 1994).

Os mapas de krigagem dos parâmetros FCO₂ e T_{solo} mostram significativa correlação de distribuição espacial desses atributos para os sistemas sob cultivo de cacau e café (Figura 2 e 3; Tabela 4), haja vista que há influência da temperatura e umidade sobre a atividade microbiana do solo, a qual resulta em FCO₂ do solo, conforme citam Brito et al. (2010) e Schwendenmann et al. (2003).

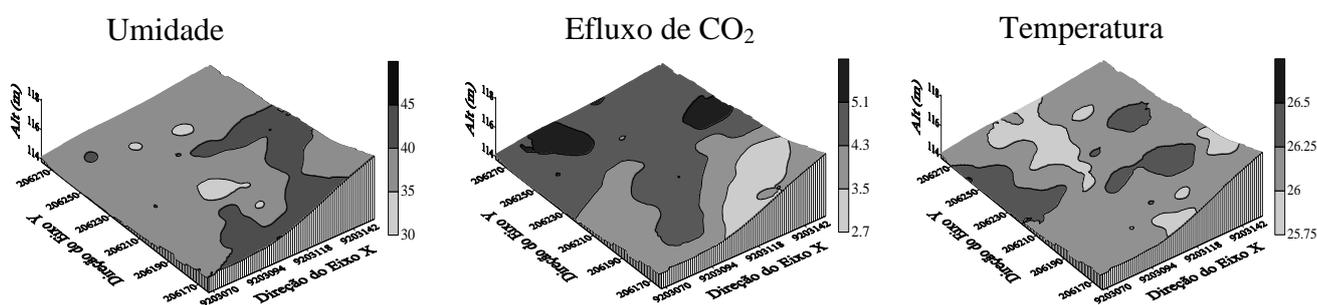


Figura 2. Mapas de krigagem da umidade (%), efluxo de CO₂, (μmol m⁻²s⁻¹) temperatura (°C) do solo em Terra Preta Arqueológica sob cultivo de cacau no município de Apuí, AM, Brasil.

Todavia no mapa da umidade do solo na área de TPA com cacau (Figura 2), a região que concentra umidade na faixa de 45 a 50% no mapa do efluxo de CO₂ mostra que há menor emissão desse gás, concordando com os resultados. O que parece contraditório ao enunciado por Brito et al. (2010) e Schwendenmann et al. (2003) pode ser dado ao fato das intensas chuvas que ocorreram anteriormente às leituras, resultando na ocupação, por umidade, dos espaços porosos do solo às expensas da eliminação dos gases do solo imediatamente às chuvas. Este fenômeno é, também, observado na área TPA com café (Figura 3), contudo, no intervalo de umidade restrito a 23 e 39%.

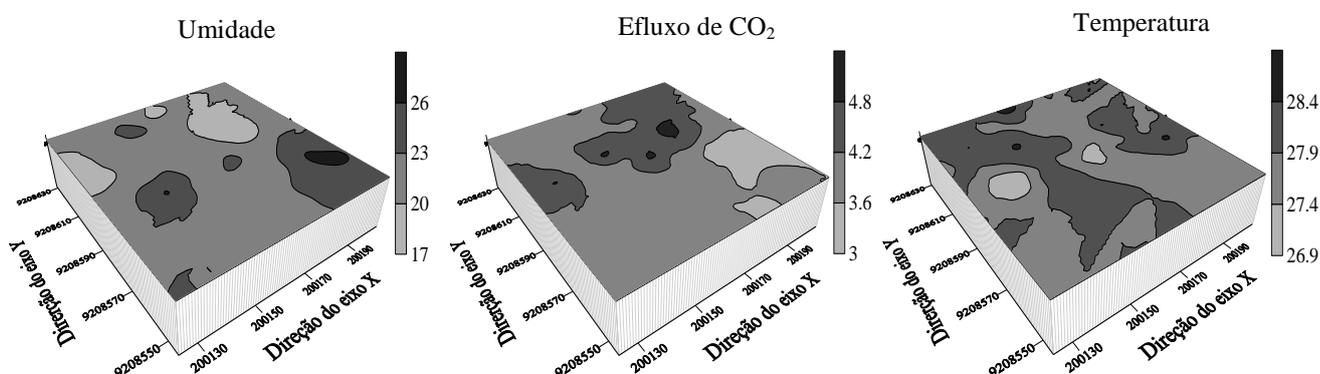


Figura 3. Mapas de krigagem da umidade (%), efluxo de CO₂, (μmol m⁻²s⁻¹) e temperatura (°C) do solo em Terra Preta Arqueológica sob cultivo de café no município de Apuí, AM, Brasil.

O efluxo de CO₂ do solo apresentou-se correlacionado com a Usolo e a Tsolo, utilizando-se o coeficiente de correlação simples ($p < 0,01$) (Tabela 4). Houve correlação positiva entre o FCO₂ com a Tsolo, por outro lado, houve correlação negativa do FCO₂ com a Usolo, evidenciando a influência destes dois fatores nos fluxos de CO₂ (Simões et al., 2010).

Tabela 4. Coeficientes de correlação entre o efluxo de CO₂, umidade do solo e temperatura do solo (n = 176) em Terra Preta Arqueológica sob cultivo de cacau e café no município de Apuí, AM, Brasil.

	TPA com cacau			TPA com café		
	FCO ₂	Usolo	Tsolo	FCO ₂	Usolo	Tsolo
FCO ₂	1,00	-0,54*	0,77*	1,00	-0,51*	0,69*
Usolo		1,00	0,66*		1,00	0,63*
Tsolo			1,00			1,00

*Correlação Pearson; significativo a 1% de probabilidade pelo teste t; FCO₂=efluxo de CO₂; Usolo = Umidade do solo; Tsolo = temperatura do solo.

Vale ressaltar que a correlação dos parâmetros de efluxo de CO₂, temperatura e umidade pode ter sido afetada pela variabilidade temporal, uma vez que a mensuração desses parâmetros foi realizada em quatro dias consecutivos, obtendo-se ao final um valor médio representando cada ponto amostral da malha, justificando os resultados expressos pelos mapas de krigagem.

4. CONCLUSÃO

1. Os parâmetros efluxo de CO₂, temperatura e umidade apresentaram estrutura de dependência espacial.
2. O efluxo de CO₂ do solo na área de TPA com cacau foi, em média, superior ao da área de TPA com café, mostrando haver diferentes taxas de efluxo de CO₂ entre classes de solos com horizonte A antrópico.
3. Na área TPA com cacau, o efluxo de CO₂ apresentou correlação inversamente proporcional à umidade do solo, o que foi atribuído à saturação por umidade que promoveu a expulsão dos gases do solo imediatamente após as chuvas.

5. REFERÊNCIAS

- ADACHI, M. Spatial and temporal variation in soil respiration in a seasonally dry tropical forest, Thailand. **Journal of Tropical Ecology**, v.1, p.531-539, 2009. <http://dx.doi.org/10.1017/S026646740999006X>
- AMAZONAS. Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável - SDS. **Relatório técnico síntese dos diagnósticos: Área estadual sul de Apuí e Manicoré**. Manaus, 2004. 20p.
- AQUINO, R. E. et al. Use of scaled semivariograms in the planning sample of soil physical properties in southern Amazonas, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n.1, p. 21-30, 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/01000683rbc20150524>

- AQUINO, R. E. et al. Characteristics of color and iron oxides of clay fraction in Archeological Dark Earth in Apuí region, southern Amazonas. **Geoderma**, v. 262, n. 1, p. 35-44, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.07.010>
- BRITO, L. F. et al. Spatial variability of soil CO₂ emission in different topographic positions. **Bragantia**, v. 69, n.4, p. 19-27, 2010. <http://dx.doi.org/10.1590/S0006-87052010000500004>
- CAMBARDELLA, C. A. et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society American Journal**, v. 58, n. 1, p.1501-1511, 1994. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x>
- CAMPOS, M. C. C. et al. Caracterização e classificação de terras pretas arqueológicas na Região do Médio Rio Madeira. **Bragantia**, v. 70, n. 3, p. 598-609, 2011.
- CAMPOS, M. C. C. et al. Caracterização física e química de terras pretas arqueológicas e de solos não antropogênicos na região de Manicoré, Amazonas. **Agro@mbiente On-line**, v. 6, n.4, p. 102-109, 2012a.
- CAMPOS, M. C. C.; OLIVEIRA, I. A.; SANTOS, L. A. C.; AQUINO, R. E.; SOARES, M. D. R. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração e umidade em áreas cultivadas com mandioca na região de Humaitá, AM. **Agro@mbiente On-line**, v. 6, p. 09-16, 2012b. <http://dx.doi.org/10.18227/1982-8470agro.v6i1.689>
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: SPI/Embrapa Produção de Informação, 2013. p. 353.
- GLASER, B. Black carbon in density fractions of anthropogenic soils of the Brazilian amazon region. **Organic Geochemistry**, v. 31, n. 4, p. 669-678, 2001. [http://dx.doi.org/10.1016/S0146-6380\(00\)00044-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0146-6380(00)00044-9)
- INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **Climate change 2007**. Fourth Assessment Report on climate change impacts, adaptation and vulnerability of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University, 2007. p. 939.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET (Brasil). **Estação meteorológica de observação de superfície automática**. Brasília, 2014. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br> . Acesso em: 2016.
- ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. 561p.
- KÄMPF, N.; KERN, D. C. **O solo como registro da ocupação humana pré-histórica na Amazônia**. In: VIDAL-TORRADO, P.; ALLEONI, L.R.F.; COOPER, M.; SILVA, A.P.; CARDOSO, E. J. (Orgs.). **Tópicos em Ciência do solo**. 1. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. p. 277-320.
- LA SCALA JÚNIOR, N. et al. A review on soil carbon accumulation due to the management change of major Brazilian agricultural activities. **Brazilian Journal Biology**, v. 72, n. 3, p. 775–875, 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S1519-69842012000400012>

- LA SCALA JÚNIOR, N. et al. Fractal dimension and anisotropy of soil CO₂ emission in an agricultural field during fallow. **International Agrophysics**, v. 23, n. 3 p. 353-358, 2009.
- LA SCALA JÚNIOR, N. et al. Short-term temporal changes in the spatial variability model of CO₂ emissions from a Brazilian bare soil. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 32, n. 4, p. 1459-1462, 2000. [http://dx.doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00051-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00051-1)
- MAIER, M. et al. Soil CO₂ efflux vs. soil respiration: Implications for flux models. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 151, n. 12, p. 1723-1730, 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.07.006>
- MINITAB. **Release 14.1**: Statistical Software. State College, 2000.
- OLIVEIRA, I. A. et al. Use of scaled semivariograms in the planning sample of soil chemical properties in southern Amazonas, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 1, p. 31-39, 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/01000683rbc20150525>
- PINTO-JÚNIOR, O. B. et al. Efluxo de CO₂ do solo em floresta de transição Amazônia Cerrado e em área de pastagem. **Acta Amazônica**, v. 39, n. 4, p. 813-821, 2009.
- ROBERTSON, G. P. **GS+ Geostatistics for the environmental sciences**: GS+ user's guide. Plainwell: Gamma Design Software, 1998.152p.
- SANTOS, L. A. C. et al. Caracterização de terras pretas arqueológicas no Sul do Estado do Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 4, p. 825-836, 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832013000400001>
- SCHWENDENMANN, L. et al. Spatial and temporal variation in soil CO₂ efflux in an old-growth neotropical rain forest, la selva, Costa Rica. **Biogeochemistry**, v. 64, n. 1 p. 111-128, 2003. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1024941614919>
- SILVA NETO, S. P. et al. Variação espacial do teor de matéria orgânica do solo e produção de gramínea em pastagens de capim-marandu. **Bioscience Journal**, v. 28, p. 41-53, 2012.
- SILVA, C. M. et al. Temporal variation of soil CO₂ efflux in oil palm-based agroforestry systems in eastern Amazon. **Acta Amazônica**, v. 46, n. 1, p. 1-12, 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4392201500193>
- SIMÕES, S. M. O.; ZILLI, J. E.; COSTA, M. C. G.; TONINI, H.; BALIEIROS, F. C. Carbono orgânico e biomassa microbiana do solo em plantios de Acacia mangium no Cerrado de Roraima. **Acta Amazonica**, v. 40, p. 23-30, 2010.
- TEDESCHI, V. et al. Soil respiration in a Mediterranean oak forest at different developmental stages after. **Science Society America Journal**, v. 62, n. 33, p. 810-817, 2006. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.01081.x>
- WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Applications of soil physics**. New York: Academic Press, p. 385, 1980.