

# VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS FÍSICOS: RELAÇÃO COM RELEVO, MATÉRIA ORGÂNICA E PRODUTIVIDADE EM CAFÉ CONILON

Diego Lang Burak<sup>1</sup>, Danilo Andrade Santos<sup>2</sup>, Renato Ribeiro Passos<sup>3</sup>

(Recebido: 10 de dezembro de 2015; aceito: 03 de junho de 2016)

**RESUMO** : Atributos do solo podem ser influenciados pelo relevo gerando zonas de produtividade homogêneas. Partindo-se dessa hipótese, foram identificados grupos de atributos do solo, sua variabilidade espacial, assim como sua relação com a produtividade e relevo, utilizando conjuntamente a Análise de Fatores (AF) e a geoestatística. O estudo foi realizado em um Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado com café Conilon no Estado do Espírito Santo. A AF permitiu agrupar no fator 1 (F1) atributos relacionados à agregação do solo que não apresentou relação com relevo e produtividade. Sua variabilidade espacial foi influenciada pelo manejo como demonstrado pela menor continuidade e dependência espacial na profundidade de 0 - 0,10 m e pelo efeito pepita puro na profundidade de 0,10 - 0,20 m. A partir do fator 2 (F2), obtidos das duas profundidades, consegue-se agrupar atributos do solo relacionados à retenção de água, destacando-se os teores de argila, a microporosidade e a umidade que aumentam conjuntamente em maior altitude e menor declive onde ocorrem zonas de maior produtividade. A maior continuidade e dependência espacial do F2 sugerem a influência do relevo na sua estrutura espacial.

**Termo para indexação:** Geoestatística, estatística multivariada, física do solo, substâncias húmicas.

## SPATIAL VARIABILITY OF PHYSICAL PROPERTIES: RELATIONSHIP WITH RELIEF, ORGANIC MATTER AND PRODUCTIVITY IN CONILON COFFEE

**ABSTRACT** : Soil attributes may be influenced by the relief generating homogeneous productivity zones. From this hypothesis, we identified soil attribute groups, its spatial variability and relationship with productivity and relief by Factor Analysis (FA) and geostatistics methods. The study was conducted in a Oxisol cultivated with Conilon coffee in the State of Espírito Santo. The AF group in Factor 1 (F1) attributes related to soil aggregation was not associated with relief and productivity. Its spatial variability is influenced by management as showed by the lower spatial continuity and dependence in 0 - 0.10 m depth and by pure nugget effect in 0.10 - 0.20 m depth. From the factor 2 (F2), obtained in two depths, can be grouped soil attributes related to water retention, mainly the clay, microporosity and moisture which together increase at a higher altitude and lower slope where occur higher productivity areas. The spatial variability of F2 indicates greater continuity and spatial dependence, suggesting influence of relief in the spatial variation structure.

**Index terms:** Geoestatistical, multivariate analysis, soil physics, humic substances.

## 1 INTRODUÇÃO

Componentes do solo, em especial as substâncias húmicas e as frações granulométricas, apresentam relação com propriedades físicas como a agregação, porosidade e retenção de água do solo (CARDUCCI et al., 2011; FONTANA et al., 2010; PASSOS et al., 2008). O manejo do solo e seu relevo podem influenciar na variabilidade espacial dessas propriedades e conseqüentemente na variação da produtividade em uma área. Cambardella et al. (1994) classificam as fontes de variabilidade espacial no solo como extrínsecas, quando relacionadas a atividades de manejo (aração e gradagem, rotação de culturas, uso de adubos e corretivos, manejo de restos culturais, entre outros) ou intrínsecas, quando relacionadas aos fatores de formação do solo (clima, material de origem, relevo, organismo e tempo). O relevo por sua vez condiciona processos de erosão, transporte e deposição que geram regiões com diferentes

características (SANCHEZ et al., 2009), mesmo sob pequenas variações no declive (CEDDIA et al., 2009), seja sob atributos físicos ou químicos (SANCHEZ et al., 2005).

Por outro lado, a variação da produtividade em uma área é afetada por outros fatores como clima, diversidade genética e manejo, pragas, doenças, assim como pela interação desses fatores, tornando-os de difícil avaliação. Em consequência dessa variação, a produtividade dentro de uma área de produção agrícola pode ser dividida em zonas homogêneas que demandam um manejo específico (CAMBARDELLA et al., 1994; SILVA et al., 2010). A separação dessas zonas pode ser auxiliada pelo estudo da variabilidade espacial dos atributos do solo a partir da geoestatística (BOTTEGA et al., 2013; CAMPOS et al., 2014).

Diversos estudos com atributos do solo integram o uso da estatística multivariada com a estatística espacial (ALMEIDA; GUIMARÃES, 2016; BORŮVKA et al., 2007; RIBEIRO et al.,

<sup>1,2,3</sup>Universidade Federal do Espírito Santo - Centro de Ciências Agrárias e Engenharias - Campus Alegre - Departamento de Produção Vegetal - 29.500-000 - Alegre-ES - dlburak@hotmail.com, danilo\_as@live.com, renatoribeiropassos@hotmail.com

2013; SILVA et al., 2010) como forma de melhor entender a relação entre relevo, atributos do solo e zonas homogêneas de produtividade. Trabalhos dessa natureza se direcionaram ao estudo da relação entre atributos químicos do solo e a produção do café Conilon (FERRAZ et al., 2012; SILVA et al., 2008, 2010), sendo mais escassos os que enfocam interação relevo e atributos físicos e sua consequência na produtividade (CARVALHO et al., 2013; SANCHEZ et al., 2013; SILVA; LIMA, 2013).

Contudo os atributos físicos do solo são determinantes para o adequado desenvolvimento de plantas, pois definem a distribuição dos sólidos e vazios do solo (FERREIRA, 2009) com consequências sobre fenômenos fundamentais à produtividade agrícola, tais como a dinâmica dos fluidos no solo, o crescimento de raízes, e inclusive o fornecimento de nutrientes às plantas (LETEY, 1985).

Diante do exposto e pressupondo que o relevo, representado por um segmento da paisagem localizado no terço superior e médio da encosta, influencia nos atributos do solo e na produtividade do café Conilon, o presente trabalho teve como objetivo identificar grupos de atributos do solo relacionados com a produtividade e relevo, a partir do estudo de sua variabilidade espacial utilizando conjuntamente a Análise de Fatores e a geoestatística.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado na Fazenda Experimental Bananal do Norte, área pertencente ao Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (INCAPER), no município de Cachoeiro de Itapemirim, Sul do Estado do Espírito Santo. Para a realização do estudo selecionou-se uma área de 0,89 ha, delimitada entre latitudes de 20°45'17,43"S e 20°45'17,73"S e longitudes de 41°17'11,26"W e 41°17'6,62"W, com cultivo da variedade clonal *Coffea canephora* Pierre ex A.Froehner var. Robusta Tropical - 'Emcaper 8151' desde 2001. A poda de produção com a distribuição de seus restos vegetais sobre o solo é realizada anualmente após a colheita (meados de junho) buscando manter, aproximadamente, 12.000 hastes por hectare na área experimental. O manejo da adubação é feito com aplicação de 130 gramas por planta do formulado 20-00-20 (uréia e cloreto de potássio) e uma aplicação de 80 gramas por planta de super fosfato simples. A calagem é realizada por planta

anualmente no período entre agosto e outubro (após a colheita) sendo a dose calculada com base na análise de solo e na recomendação para o Estado do Espírito Santo (PREZOTTI et al., 2007). Esta mesma forma de manejo é realizada anualmente desde 2006, com os mesmos períodos de colheita, adubação e poda. O espaçamento da cultura é de 2,90 x 0,9 m, o manejo fitossanitário é regularmente realizado e a lavoura é conduzida sem irrigação.

Obteve-se informações da altitude a partir de GPS topográfico de alta precisão modelo GTR-1 nos pontos georreferenciados de coleta, totalizando 109 pontos para geração do Modelo Digital de Elevação, juntamente com curvas de nível de 2 metros para caracterização do relevo a partir da declividade e altitude (Figura 1).

Para checagem da classe de solo dentro da área de estudo, foram classificados dois perfis pedológicos segundo Lemos e Santos (1996) em duas posições do relevo: maior declividade (48,3%) e menor altitude (109 m) e menor declividade (1,2%) e maior altitude (117 m) (Figura 1b). A área apresenta vertente voltada para face de exposição norte/nordeste. Os dois perfis foram classificados como Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico com atributos semelhantes. Nos horizontes superficiais, o solo apresenta condições de melhor fertilidade pelo efeito de adubação e calagem usado na área. A amostragem do solo foi realizada em janeiro de 2010 em malha irregular (Figura 1a) na qual foram distribuídos pontos separados com distância variando entre 2,9 a 10 metros, representados por plantas de café georreferenciadas (GPS topográfico modelo GTR-1) totalizando 109 pontos onde se coletaram amostras de solos deformadas, indeformadas e preservadas no formato de torrões na profundidade de 0 – 0,10 e 0,10 – 0,20 m. As amostras deformadas foram retiradas em quatro locais no entorno de uma planta de café georreferenciada (40 a 50 cm do caule, na projeção da copa) com auxílio de enxadão para formação de uma amostra composta. Ao mesmo tempo, coletaram-se as amostras preservadas em torrões com auxílio do enxadão em quatro pontos de amostragem. Foi coletada também em cada ponto de amostragem, uma amostra indeformada com o auxílio de anéis de aço de bordas cortantes com dimensões médias de 4,3 cm de altura e 2,37 cm de raio (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA, 2011), que foram introduzidos no solo com auxílio de um amostrador tipo Uhland.

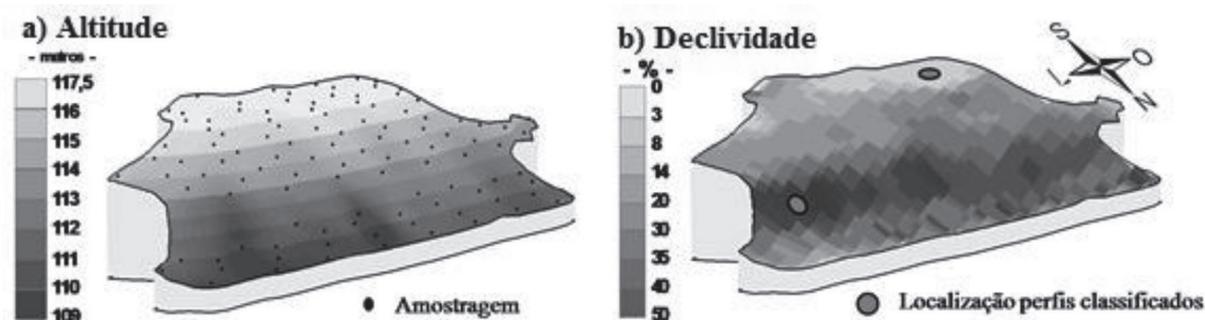


FIGURA 1 - Modelo Digital de Elevação da área de estudo com informações de altitude (a) e declividade (b), pontos de amostragem e localização dos perfis pedológicos, Fazenda Experimental Bananal do Norte, Cachoeiro de Itapemirim - ES.

A partir das amostras deformadas nas profundidades amostradas, avaliou-se os teores de carbono orgânico total do solo (COT) e carbono das frações ácidos fúlvicos (C-FAF), ácidos húmicos (C-FAH) e humina (C-HUH) separadas com base na sua solubilidade química diferencial, e determinação do teor de C orgânico das frações húmicas por dicromatometria com aquecimento externo com base nas recomendações de Mendonça e Matos (2005). Os teores de areia grossa, areia fina, silte e argila foram determinados nas amostras deformadas nas profundidades de 0 – 0,10 e 0,10 – 0,20 m, conforme procedimentos descritos em EMBRAPA (2011), com as seguintes modificações: separação após agitação lenta a 175 rpm durante 16 h em agitador orbital.

A partir das amostras indeformadas amostradas foram avaliadas a densidade do solo (Ds), microporosidade (MiP) e macroporosidade (MaP). Estas amostras foram saturadas com água destilada e submetidas a uma sucção de 6 kPa em uma mesa de tensão para retirada da água correspondente aos macroporos. A microporosidade (MiP) foi calculada pela diferença de peso entre amostras antes e após secagem a 105°C com retirada da água dos macroporos. A partir da diferença de MiP com a porosidade total (Pt) foi obtida a macroporosidade (MaP).

A avaliação da resistência à penetração (RSP) foi feita nas profundidades de 0,0 - 0,10 e 0,10 – 0,20 m, a partir da média de 10 avaliações ao redor da planta de café (40 a 50 cm do caule) utilizando-se um penetrômetro de impacto evitando-se locais não representativos (formigueiros, cupinzeiros, galhos em decomposição, etc). Simultaneamente e próximo à determinação da RSP, coletaram três amostras de solo nas mesmas profundidades com auxílio de sonda amostradora para determinação da umidade

do solo (Ug) pelo método termogravimétrico (EMBRAPA, 2011). A RSP e Ug foram coletadas em um único dia em condições de baixa umidade visto que 25 mm de precipitação ocorreram 12 dias antes da coleta (informações do pluviômetro da Fazenda Experimental Bananal do Norte - INCAPER, Cachoeiro de Itapemirim – ES).

Com as amostras preservadas em torrões nas profundidades de 0 – 0,10 e 0,10 – 0,20 m realizou-se a análise dos agregados pelo método de peneiramento úmido, de acordo com metodologia preconizada pela EMBRAPA (2011). Os resultados do diâmetro médio geométrico (DMG) e percentagem dos agregados em 2-4 mm (AG>2) e menor que 0,25 mm (AG<0,25) foram calculados de acordo com EMBRAPA (2011) a partir dos agregados separado nos diâmetro de: 0-0,25; 0,25-0,50; 0,50-1,0; 1-2; e 2-4 mm.

O café foi colhido manualmente no mês de maio de 2010 e a produção foi avaliada em cinco plantas sendo a planta do centro a georreferenciada e a partir do espaçamento entre plantas, a produtividade foi expressa em sacas por hectare. Após secagem em terreiro (aproximadamente 12% de umidade), foram coletadas 10 amostras (aproximadamente 80 gramas para cada amostra) da produção total das 5 plantas para separação visual do café chocho (ou bóia) do café cereja e verde + verdoengo (fruto esverdeado não totalmente maduro). A produtividade foi expressa em sacas ha<sup>-1</sup> de grão beneficiado (cereja e verde + verdoengo). Número de hastes por plantas variou de 2 a 5 na área amostrada. Com os resultados dos atributos avaliados foram feitas análises descritivas (média, mínimo, máximo, desvio padrão e coeficiente de variação). A distribuição normal foi avaliada pela assimetria, curtose e teste de normalidade Shapiro-Wilks. Quando a distribuição normal não foi alcançada foram

efetuadas transformações logarítmicas a fim de adequar os dados à distribuição normal. Foram realizadas também análises de correlação de Pearson e Análise de Fatores (AF). A partir do método dos Componentes Principais obtiveram-se os autovalores, autovetores, cargas fatoriais e grupos de variáveis inter-relacionadas. Foram selecionados os fatores com autovalor maior que 1 e então a rotação dos fatores pelo método ortogonal Varimax (HAIR et al., 2009).

Foram utilizados os escores da Análise de Fatores para análise dos semivariogramas e interpolação pela krigagem ordinária. Para avaliação do ajuste dos semivariogramas, utilizou-se a média do erro reduzido, a variância do erro reduzido, o coeficiente de regressão (ou coeficiente angular), intercepto em y (ou coeficiente linear) da validação cruzada e seus valores observados e estimados para análise de correlação de Pearson. Com valores do efeito pepita ( $C_0$ ), variância estrutural ( $C_1$ ), patamar ( $C_0 + C_1$ ) dos semivariogramas selecionados, utilizou-se a relação percentual entre  $C_1/(C_0 + C_1)$  para avaliação do grau de dependência espacial (GDE): dependência espacial fraca ( $< 25\%$ ); moderada ( $25\% \leq e < 75\%$ ) e forte ( $\geq 75\%$ ) (BIONDI; MYERS; AVERY, 1994).

Para a obtenção dos modelos de predição da produtividade a partir de atributos do solo como variáveis independentes foram ajustadas equações com uso da regressão linear múltipla “forward stepwise”, com a inserção de variáveis independentes significativas a 5% de probabilidade, pelo teste F.

A Análise de Fatores e a regressão múltipla Stepwise foram realizadas com software R (R Development Core Team, 2006). A avaliação dos semivariogramas e da krigagem ordinária foi realizada com o pacote de geoestatística GeoR do software R (R Development Core Team, 2006) e os mapas interpolados foram elaborados a partir do software ArcGIS (Environmental Systems Research Institute - ESRI, 2002).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise descritiva dos atributos nas profundidades de 0 – 0,10 e 0,10 – 0,20 m são apresentada nas Tabelas 1 e 2. As variáveis silte (Sil), microporosidade (MiP), umidade em base gravimétrica (Ug), resistência do solo à penetração (RSP), argila (AG) e principalmente o diâmetro médio geométrico (DMG), não apresentaram

distribuição normal conforme constatados pelos valores de assimetria, curtose e pelo teste normalidade Shapiro-Wilks a 5% de significância (Tabela 1).

Os teores médios de COT nas duas profundidades (Tabela 1 e 2) estão acima do encontrado por Effgen et al. (2008) no terço superior (10,1 g kg<sup>-1</sup>) e terço médio (9,8 g kg<sup>-1</sup>) na profundidade de 0 - 0,20 m em cafeeiro sob condições pedoclimáticas semelhantes e manejo da adubação química, roçadas e capinas. Os valores médios da relação FAH/FAF foram próximos a 1 (Tabela 1 e 2) indicando o favorecimento do processo de humificação e os teores de argila variaram entre 25 e 73 dag kg<sup>-1</sup> (Tabela 1 e 2) sendo tal amplitude condicionada pela variação no declive, semelhante ao observado por Ceddia et al. (2009) em área de 2,84 ha.

O sistema de manejo adotado na lavoura do nosso estudo melhor se relaciona com o manejo adubação química, roçada e capina do estudo de Effgen et al. (2012), o que pode estar relacionado com os valores relativamente baixos de RSP, observado em ambos, sob condições de umidade semelhantes (Tabelas 1 e 2) e inclusive sob classes de solos e condições texturais equivalentes.

Os valores de MaP observados por nosso estudo são em média superiores aos encontrados por Effgen et al. (2012), o que pode estar relacionado as melhores condições química do solo para o desenvolvimento de raízes e consequente produção de bioporos em função da calagem anual presente no sistema de manejo do nosso estudo, porém ausente para o manejo que destacamos como semelhante em Effgen (2012).

A participação dos agregados maiores que 2 mm (AG>2) foi, aproximadamente, 50% do total de agregados nas duas profundidades. Nunes et al. (2010), encontraram valores semelhantes em cultivo de cafeeiro com 22 anos nas profundidades de 0 – 0,10 e 0,1 – 0,20 m, alcançando valores de 70% na profundidade de 0 – 0,10 m em cafeeiro no qual houve a deposição recente de restos vegetais da poda.

Para a melhor avaliação de grupos de variáveis inter-relacionadas e sua relação com relevo e produtividade foi realizada a Análise de Fatores (AF) (Tabela 3 e 4). O atributo C-FAH/C-FAF não foi inserido na Análise de Fatores pela alta colinearidade com C-FAH e C-FAF, que prejudicaria o desempenho da AF. Em relação aos resultados na profundidade de 0 – 0,10 m, foram avaliados os quatro primeiros fatores que explicaram 79,1% da variabilidade total dos dados (Tabela 3) e que apresentaram autovalores maiores que 1 (HAIR et al., 2009).

**TABELA 1** - Análise descritiva<sup>(1)</sup> dos atributos do solo<sup>(2)</sup> na profundidade de 0 – 0,10 m e da produtividade do café Conilon, em um Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico típico, Cachoeiro de Itapemirim - ES.

Variável	Média ± DP	Mín	Máx	CV%	Cs	Ck	S-W <sup>(3)</sup>
COT (g kg <sup>-1</sup> )	15,0 ± 5,03	2,64	30,62	35	0,44	0,02	0,407
C-FAF (g kg <sup>-1</sup> )	2,55 ± 0,36	1,57	3,33	14	-0,25	0,08	0,412
C-FAH (g kg <sup>-1</sup> )	2,80 ± 0,61	1,43	4,23	22	-0,04	-0,16	0,284
C-HUH (g kg <sup>-1</sup> )	8,68 ± 1,51	4,94	11,8	17	-0,49	0,00	0,181
C-FAH/ C-FAF	1,09 ± 0,28	0,51	1,95	25	0,34	0,29	0,171
ArGR (dag kg <sup>-1</sup> )	34,1 ± 4,50	21,5	43,6	14	0,24	-0,01	0,284
ArF (dag kg <sup>-1</sup> )	11,8 ± 1,67	8,42	16,9	14	0,33	-0,07	0,485
Sil (dag kg <sup>-1</sup> )	5,45 ± 2,97	0,42	13,8	55	1,17	0,85	0,000
Arg (dag kg <sup>-1</sup> )	38,5 ± 4,95	25,8	52,1	10	-0,44	0,70	0,102
MiP (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	0,25± 0,02	0,19	0,36	8	0,24	4,71	0,000
MaP (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	0,26 ± 0,04	0,16	0,33	14	0,24	0,24	0,165
Ds (kg dm <sup>-3</sup> )	1,25 ± 0,05	1,13	1,39	4	-0,27	0,01	0,305
Ug (dag kg <sup>-1</sup> )	23,7 ± 2,27	17,6	35,6	9	-0,18	4,52	0,001
RSP (MPa)	2,45 ± 0,31	1,42	3,06	11	-0,35	2,10	0,000
DMG (mm)	1,48 ± 0,20	1,08	2,14	13	0,37	0,43	0,311
AG>2 (%)	53,5 ± 8,81	32,1	82,3	17	0,28	0,48	0,513
AG<0,25 (%)	8,7 ± 2,13	2,67	15,9	24	0,73	2,61	0,001
Prod (sacas ha <sup>-1</sup> )	36,7 ± 14,6	10,7	74,3	38	0,36	0,37	0,274

<sup>(1)</sup>DP – desvio padrão; Mín – valor mínimo; Máx – valor máximo; CV% – coeficiente de variação; Cs – coeficiente de assimetria; Ck – coeficiente de curtose; S-W – teste de normalidade Shapiro-Wilks <sup>(2)</sup> COT - carbono orgânico total; C-FAF - carbono orgânico da fração ácidos fúlvicos; C-FAH - carbono orgânico da fração ácidos húmicos; C-HUH - carbono orgânico da fração humina; ArG - areia grossa; ArF - areia fina; Arg - argila; Ds - densidade do solo; Pt - porosidade total; MiP - microporosidade; MaP - macroporosidade; Ug - umidade em base gravimétrica; RSP - resistência do solo à penetração; DMG - diâmetro médio geométrico dos agregados; AG>2,0 - percentagem de agregados entre 4 e 2 mm; AG<0,25 - percentagem de agregados menor que 0,250; e <sup>(3)</sup> Valor do p-value do teste de normalidade Shapiro-Wilks em que: se  $p \leq 0,05$  (5% de probabilidade) rejeita-se a  $H_0$ , ou seja, os dados não tem distribuição normal

**TABELA 2** - Análise descritiva<sup>(1)</sup> dos atributos do solo<sup>(2)</sup> na profundidade de 0,10 – 0,20 m em um Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico típico, Cachoeiro de Itapemirim - ES.

Variável	Média ± DP	Mín	Máx	CV%	Cs	Ck	S-W <sup>(3)</sup>
COT (g kg <sup>-1</sup> )	10,1 ± 4,06	1,99	20,3	40	0,26	-0,23	0,398
C-FAF (g kg <sup>-1</sup> )	2,43 ± 0,37	1,54	3,48	15	0,47	0,50	0,073
C-FAH (g kg <sup>-1</sup> )	2,68 ± 0,96	1,05	5,59	36	0,27	-0,30	0,092
C-HUH (g kg <sup>-1</sup> )	6,99 ± 1,11	4,22	9,90	16	-0,26	0,34	0,089
C-FAH/ C-FAF	1,13 ± 0,49	0,43	3,05	43	0,70	1,31	0,054
ArGR (dag kg <sup>-1</sup> )	30,1 ± 4,70	16,3	41,0	16	-0,21	0,44	0,317
ArF (dag kg <sup>-1</sup> )	11,6 ± 1,41	7,50	15,0	12	-0,02	0,08	0,549
Sil (dag kg <sup>-1</sup> )	5,81± 4,65	0,40	26,8	80	2,30	6,09	0,000

## Continuação tabela 2

Arg (dag kg <sup>-1</sup> )	55,4 ± 6,71	30,3	73,3	13	-0,38	1,57	0,019
MiP (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	0,26 ± 0,02	0,18	0,32	9	-0,48	2,65	0,000
MaP (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	0,25 ± 0,05	0,15	0,37	18	0,08	-0,23	0,987
Ds (kg dm <sup>-3</sup> )	1,28 ± 0,07	1,03	1,58	5	0,54	3,74	0,001
Ug (dag kg <sup>-1</sup> )	24,2 ± 2,63	14,6	36,0	10	-0,72	4,07	0,102
RSP (MPa)	3,06 ± 0,71	1,83	5,01	23	0,28	-0,37	0,018
DMG (mm)	0,47 ± 0,20	0,26	1,62	43	4,03	19,6	0,000
AG>2 (%)	48,34 ± 9,51	19,6	68,5	20	-0,15	0,44	0,000
AG<0,25 (%)	16,14 ± 3,49	5,91	23,4	22	-0,40	0,14	0,000

<sup>(1)</sup>DP – desvio padrão Mín – valor mínimo; Máx – valor máximo; CV% - coeficiente de variação; Cs – coeficiente de assimetria; Ck – coeficiente de curtose; S-W – teste de normalidade Shapiro-Wilks <sup>(2)</sup> COT - carbono orgânico total; C-FAF - carbono orgânico da fração ácidos fúlvicos; C-FAH - carbono orgânico da fração ácidos húmicos; C-HUH - carbono orgânico da fração húmica; ArG - areia grossa; ArF - areia fina; Arg - argila; Ds - densidade do solo; Pt - porosidade total; MiP - microporosidade; MaP - macroporosidade; Ug - umidade em base gravimétrica; RSP - resistência do solo à penetração; DMG - diâmetro médio geométrico dos agregados; AG>2,0 - percentagem de agregados entre 4 e 2 mm; AG<0,25 - percentagem de agregados menor que 0,250; e <sup>(3)</sup> Valor do p-value do teste de normalidade Shapiro-Wilks em que: se  $p \leq 0,05$  (5% de probabilidade) rejeita-se a  $H_0$ , ou seja, os dados não tem distribuição normal

Na profundidade de 0,0 - 0,10 m, o fator 1 reteve 32,5% da variabilidade total dos dados originais e as maiores cargas fatoriais negativas estiveram relacionadas aos atributos C-FAF, DMG e AG > 2,00 e a maior carga fatorial positiva foi atribuída ao AG < 0,25 (Tabela 3). A Arg e o COT tiveram cargas negativas pouco expressivas no fator 1 (Tabela 3) e a maior carga negativa relacionada ao C-FAF demonstra a importância das substâncias húmicas na estabilidade dos agregados (FONTANA et al., 2010; PASSOS et al., 2008). A partir dessas observações pode-se nomear o fator 1 como “fator agregação do solo” (Tabela 3). Os escores associados ao fator 1 (fator agregação) não apresentaram correlações significativas com atributos do relevo e com a produtividade (Tabela 3).

O grupo dos atributos Ug, Arg, MiP e RSP tiveram maiores cargas negativas no fator 2 (26,3% da variância explicada), enquanto carga fatorial positiva foi observada para as variáveis ArGR e MaP (Tabela 2). O grupo de variáveis relacionada com fator 2, Ug, Arg, MiP e a RSP, indica a influência da argila no aumento da microporosidade e da umidade no solo. O teor de argila tem sido destacado como principal responsável pela retenção de água em solos mais intemperizados (CARDUCCI et al., 2011). Carvalho et al. (2013) observou, em malha amostral, que regiões com maiores teores de argila coincidem com os maiores teores de umidade observados. A mesma carga fatorial negativa para RSP e Ug, associada com a carga fatorial também negativa para o teor de argila com o fator

2 demonstram forte relação entre estes atributos.

Pode-se nomear o fator 2 como “fator retenção de água no solo”, o qual obteve correlações significativas e de grau moderado, com produtividade e altitude. Os escores atribuídos ao fator 2 tiveram correlações negativas com a produtividade e altitude e positiva com declive, ou seja, locais onde a velocidade de escoamento superficial é maior devido ao declive mais acentuado, existe maior presença da fração areia grossa (CEDDIA et al., 2009), que por sua vez retém pouca água por força capilar, limitante para a produtividade em manejo não irrigado, além de não favorecer o processo de agregação do solo. O fator 3 (13,1% da variação explicada) e o fator 4 (7,3% da variação explicada) tiveram menor participação na variação dos dados e apresentaram correlação não significativa com produtividade e atributos do relevo (Tabela 3).

Pela Análise de Fatores na profundidade de 0,10 – 0,20 m, observou-se uma menor retenção da variação total dos dados pelos quatro primeiros fatores (68%) (Tabela 4) em comparação à profundidade de 0 – 0,10 m (79%) (Tabela 3). No primeiro fator, (explicando 30,0% da variância total) o DMG, AG>2 e AG<0,25 se sobressaem podendo ser relacionada à variação da agregação do solo. Pode-se destacar uma carga fatorial significativa com o C-FAH e carga fatorial fraca do COT no fator 1 (Tabela 4), indicando a participação da matéria orgânica na agregação do solo (FONTANA et al., 2010; PASSOS et al., 2008), que não apresenta relação com a produtividade (Tabela 4).

**TABELA 3** - Variância explicada pelos fatores após o método de rotação ortogonal Varimax e cargas fatoriais dos atributos na profundidade de 0 – 0,10 m em um Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico típico cultivado com café Conilon, Cachoeiro de Itapemirim - ES.

	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 4	
Autovalores	5,20	4,20	2,10	1,16	
Variância (%)	32,5	26,3	13,1	7,3	Comunalidade
Variância Acumulada (%)	32,5	58,8	71,9	79,1	
Variáveis <sup>(1)</sup>	Cargas Fatoriais <sup>(2)</sup>				
COT	-0,47	0,14	0,11	<b>0,54</b>	0,544
C-FAF	<b>-0,72</b>	-0,16	-0,12	0,42	0,735
C-FAH	-0,42	0,14	0,04	0,17	0,227
C-HUH	-0,18	0,15	0,04	<b>0,63</b>	0,453
ArGR	-0,17	<b>0,60</b>	<b>-0,58</b>	-0,25	0,788
ArF	0,25	0,09	-0,43	0,17	0,284
Sil	0,06	-0,09	0,19	<b>0,61</b>	0,420
Arg	-0,38	<b>-0,74</b>	0,42	-0,07	0,873
MiP	0,02	<b>-0,66</b>	0,23	0,01	0,490
MaP	0,05	<b>0,84</b>	-0,41	-0,05	0,879
DS	0,11	-0,22	<b>-0,74</b>	-0,07	0,613
Ug	-0,09	<b>-0,52</b>	0,02	0,26	0,347
RSP	0,14	<b>-0,51</b>	<b>0,52</b>	-0,05	0,553
DMG	<b>-0,98</b>	0,10	0,00	0,04	0,972
AG>2	<b>-0,89</b>	0,10	-0,04	0,07	0,809
AG<0.25	<b>0,83</b>	-0,03	-0,01	0,07	0,695
	Correlação de Pearson <sup>(3)</sup>				
Produtividade	0,12	-0,52	0,18	0,05	
Altitude	0,13	-0,64	0,19	0,15	
Declividade	-0,19	0,37	0,17	-0,21	

<sup>(1)</sup>Idem Tabela 1; <sup>(2)</sup> Cargas fatoriais maior igual a 0,5 são significantes (Hair et al., 2009) <sup>(3)</sup> Correlação dos escores dos fatores com Produtividade, Altitude e Declividade. Significativo a 5% de probabilidade em negrito

**TABELA 4** - Variância explicada pelos fatores após o método de rotação ortogonal Varimax e cargas fatoriais dos atributos na profundidade de 0,10 – 0,20 m em um Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico típico cultivado com café Conilon, Cachoeiro de Itapemirim - ES.

	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 4	
Autovalores	4,8	3,6	1,4	1,1	
Variância (%)	30,0	22,5	8,8	6,9	Comunalidade
Variância Acumulada (%)	30,0	52,5	61,3	68,1	
Variáveis <sup>(1)</sup>	Cargas Fatoriais <sup>(2)</sup>				
COT	-0,42	-0,21	0,06	-0,15	0,247
C-FAF	0,14	0,10	0,05	<b>0,57</b>	0,357

Continuação tabela 4

C-FAH	<b>-0,54</b>	0,14	-0,27	0,48	0,615
C-HUH	-0,20	-0,13	-0,27	-0,15	0,152
ArGR	-0,05	<b>0,81</b>	-0,17	-0,22	0,736
ArF	-0,22	<b>0,66</b>	0,05	0,09	0,495
Sil	-0,12	0,04	0,01	<b>-0,58</b>	0,353
Arg	0,13	<b>-0,73</b>	0,12	<b>0,50</b>	0,814
MiP	-0,11	-0,43	<b>-0,74</b>	-0,18	0,777
MaP	0,10	-0,02	<b>0,92</b>	-0,12	0,871
DS	-0,02	0,27	<b>-0,62</b>	0,37	0,595
Ug	-0,02	<b>-0,62</b>	-0,21	-0,07	0,434
RSP	0,24	-0,49	-0,08	0,19	0,340
DMG	<b>-0,90</b>	-0,28	0,14	0,05	0,911
AG>2	<b>-0,87</b>	0,26	-0,14	-0,05	0,847
AG<0.25	<b>0,88</b>	-0,17	0,06	-0,05	0,809
Correlação de Pearson <sup>(3)</sup>					
Produtividade	0,13	0,19	0,15	0,10	
Altitude	-0,09	<b>-0,23</b>	0,05	0,04	
Declividade	0,17	0,02	-0,07	-0,06	

<sup>(1)</sup>Idem Tabela 1; <sup>(2)</sup> Cargas fatoriais maior igual a 0,5 são significantes (Hair et al., 2009) <sup>(3)</sup> Correlação dos escores dos fatores com Produtividade, Altitude e Declividade. Significativo a 5% de probabilidade em negrito

O fator 2 na profundidade de 0,10 – 0,20 m, explicando 22,5% da variação total, apresenta tendência semelhante do fator 2 na profundidade de 0 – 0,10 m, onde maiores cargas positivas são relacionadas a ArGR e negativas com a Arg e Ug demonstrando a relação entre teores de argila e umidade do solo nas duas profundidades avaliadas que são maiores em locais de maior altitude. A resistência a penetração (RSP) apresentou relação mais fraca com teores de argila. Os fatores 3 e 4, explicando conjuntamente 14,5% da variação dos dados, são relacionados a atributos sem relação com produtividade e relevo.

A análise geoestatística foi conduzida utilizando-se escores fatoriais atribuídos às amostras dos quatro primeiros fatores (Tabela 5) e valores de produtividade do cafeeiro (Tabela 1). Os coeficientes de assimetria desses escores variaram entre -0,11 a 0,27, de curtose entre -0,17 e 0,20 e o teste de normalidade Shapiro-Wilks não significativo confirmam a sua distribuição normal.

O semivariograma da produtividade ajustou-se ao modelo exponencial. Somente o fator 1 e 2, na profundidade de 0 – 0,10 m, e fator 2 na profundidade 0,10 – 0,20 m, puderam ser ajustados aos modelos teóricos dos semivariogramas

(Tabela 5). Para os demais fatores não foi possível descrever a variabilidade espacial por meio de semivariogramas indicando que a variabilidade aleatória é superior à espacialmente estruturada (WEBSTER; OLIVER, 2007).

Os alcances indicam a distância na qual existe a continuidade espacial, de característica inerente ao atributo avaliado. O “fator agregação do solo” (fator 1) apresentou menor valor de alcance e menor grau de dependência espacial em comparação ao “fator retenção de água no solo” (fator 2) na profundidade de 0 – 0,10 m (Tabela 5). Em geral, a menor continuidade espacial, ou seja, menores valores de alcance podem ser atribuídos a fatores extrínsecos relacionados ao manejo do solo e a maior continuidade espacial e a maior dependência espacial podem ser atribuídas a fatores intrínsecos relacionados aos fatores de formação do solo (relevo, por exemplo) (CAMBARDELLA et al., 1994). Além disso, maiores valores de efeito pepita podem indicar um efeito mais aleatório da variabilidade espacial. De fato, o fator 2 (profundidade de 0 – 0,10 e 0,10 – 0,20 m) apresentou maior valor de alcance e maior grau de dependência espacial (GDE) em relação ao fator 1 (profundidade de 0 – 0,10 m) (Tabela 5).

**TABELA 5** - Modelos teóricos e parâmetros estimados dos semivariogramas experimentais ajustados aos valores de escores dos quatro primeiros fatores em estudo e a estatística da validação cruzada em um Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico típico cultivado com café Conilon, Cachoeiro de Itapemirim – ES

Var	Mod <sup>(1)</sup>	Parâmetros <sup>(2)</sup>				Validação Cruzada <sup>(3)</sup>				
		C <sub>o</sub>	C <sub>o</sub> + C <sub>1</sub>	GDE	A	Var	Média	a <sup>(4)</sup>	b <sup>(4)</sup>	r <sup>2</sup>
PROD	EXP	585	1784	67	27	1,010	0,010	2,84	0,92	0,42
Profundidade de 0 – 0,10 m										
Fator 1	GAU	0,254	1,041	76	8,6	1,012	0,016	0,06	0,74	0,28
Fator 2	EXP	0,098	0,936	90	46	0,982	0,008	-0,01	0,79	0,48
Fator 3	EPP	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Fator 4	EPP	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Profundidade de 0,10 – 0,20 m										
Fator 1	EPP	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Fator 2	EXP	0,118	0,981	88	23	1,015	0,009	0,01	0,89	0,53
Fator 3	EPP	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Fator 4	EPP	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

<sup>(1)</sup> Modelos - EXP = exponencial; GAU = gaussiano; EPP = efeito pepita puro. <sup>(2)</sup> Co = efeito pepita; Co+C1 = patamar; a = alcance; GDE = grau de dependência espacial  $(C1/(Co + C1)) \times 100$  (BIONDI; MYERS; AVERY, 1994). <sup>(3)</sup> Validação cruzada feita com a média do erro reduzido e a variância do erro reduzido e coeficiente de correlação entre dados observados e estimado da validação cruzada. <sup>(4)</sup> a = coeficiente linear, b = coeficiente angular da regressão.

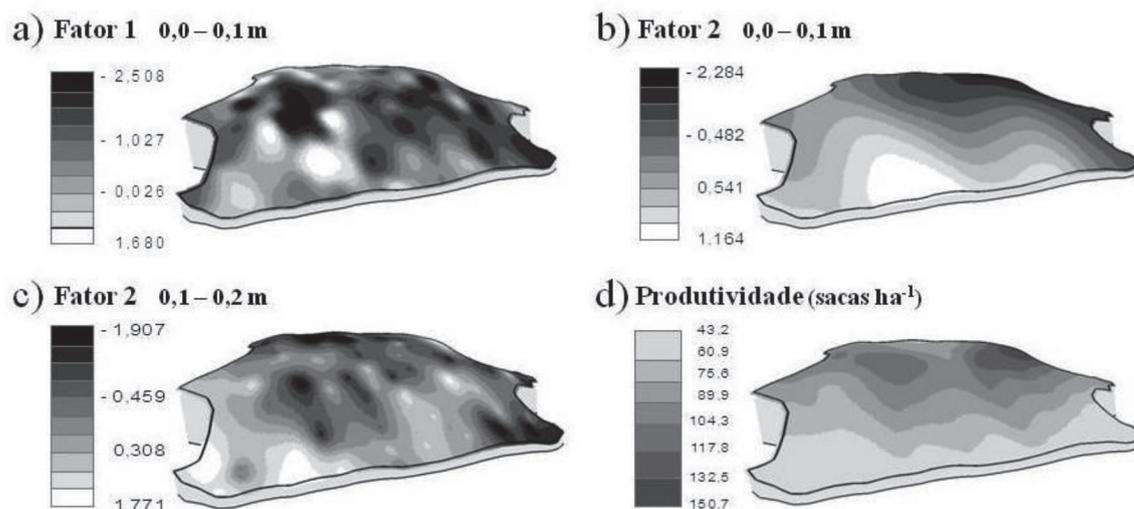
Na área de estudo, o principal aporte de material orgânico é oriundo de restos vegetais das podas de produção deixados no solo e da senescência das folhas dos cafeeiros. Contudo, apesar de deixados nas entrelinhas da lavoura o material orgânico pode ser mobilizado, devido ao escoamento superficial favorecido pelo relevo mais declivoso. Tal fato possivelmente favoreceu a distribuição mais aleatória ou de menor continuidade espacial dos atributos relacionados com a matéria orgânica (fator agregação do solo), característica inerente a fatores extrínsecos da variabilidade espacial relacionado ao manejo dos restos culturais (CAMBARDELLA et al., 1994). Os fatores 3 e 4 nas duas profundidades apresentaram efeito pepita puro (EPP), indicando que a variabilidade aleatória contribui de forma mais importante que a variabilidade espacialmente estruturada.

Na Figura 2 é apresentada a distribuição espacial dos fatores que se ajustaram a semivariogramas (Tabela 5) permitindo a interpolação por meio da krigagem ordinária. De forma geral, o padrão de distribuição espacial do fator 1 na profundidade 0 – 0,10 m (fator agregação) não assemelha-se à distribuição espacial da produtividade. A distribuição espacial

do fator 2 (fator retenção de água no solo) na profundidade de 0 – 10 m (Figura 2) indica que escores negativos predominam em menor altitude e maior declive. Uma mesma tendência ocorre para o fator 2 na profundidade de 0,10 – 0,20 m: em locais em maiores altitudes são encontrados maior valor de umidade e maior teor de argila.

A distribuição espacial da produtividade indica que os maiores valores ocorrem onde a declividade é menor e altitude maior (Figura 2). Nesses locais encontram-se os maiores valores das variáveis argila, microporosidade e umidade do solo, relacionados ao fator 2 nas duas profundidade avaliadas (Figura 2).

Dentre os atributos com maior contribuição no fator 2 (ArG, Arg, MiP, MaP, Ug e RSP) e melhor correlação com a produtividade (Tabela 2), destaca-se o teor de argila (Função 1). Observou-se que 18% da variação da produtividade pode ser explicada pelo teor de argila na profundidade de 0 – 0,10 m (Função 1). Os demais atributos não tiveram uma contribuição significativa para aumento do poder de predição da função, ou seja, com a inclusão de outros atributos a contribuição no poder preditivo da equação foi pouco significativa.



**FIGURA 2** - Distribuição espacial dos escores fatoriais referente ao fator 1 (fator agregação do solo) (a) e fator 2 (fator retenção de água no solo) na profundidade de 0 - 0,1 m (b) e 0,1 - 0,2 m (c) e produtividade do café (d) em um Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico típico cultivado com café Conilon, Cachoeiro de Itapemirim - ES.

$$\text{Prod} (\text{sc ha}^{-1}) = -20,03 + 1,11\text{Arg}^{p<0,01} \quad R^2 = 0,18$$

Alguns trabalhos têm sugerido uma relação entre o teor de argila e produtividade dos cafeeiros, corroborando as observações do presente estudo. Sanchez et al. (2013), trabalhando com estatística espacial e análise de componentes principais, observaram que áreas sob maior conteúdo de argila e ferro proporcionaram maior produtividade do cafeeiro e inclusive melhor qualidade de bebida. Silva e Lima (2013) também encontraram maior correlação do teor de argila com a produtividade em cafeeiro. Já Carvalho et al. (2013) observaram que a produtividade tendia a ser maior em locais onde os teores de argila eram menores.

A relação entre atributos físicos do solo e produtividade agrícola é complexa devido a amplitude de fatores envolvidos. Ainda que os atributos físicos do solo sejam parte importante para o desenvolvimento e produtividade agrícola (LETEY, 1985), sobretudo condicionando processos de desenvolvimento de raízes e nutrição mineral, é importante ressaltar que a produtividade de plantas cultivadas é dependente de outros fatores (diversidade genética, propriedades químicas do solo, pragas, doenças) (FERRÃO et al., 2007).

Deve-se destacar a baixa precipitação mensal ocorrida em janeiro (30 mm) e fevereiro (119 mm) de 2010, época de granação, o que pode ter resultado em menor produtividade da colheita

realizada em maio, principalmente nos locais com menor teor de argila e menor umidade visto que não é realizada irrigação na área de estudo.

Ressalta-se ainda que dentre a complexa interação entre os fatores envolvidos, a face de exposição tem papel preponderante, podendo afetar a variabilidade das observações, já que encosta voltadas para o equador recebem maior quantidade de luz solar (AGUILAR; HERRERO; POLO, 2010), seja em períodos diários os anuais, afetando assim o regime hídrico entre as posições da vertente, sobretudo em áreas não irrigadas. Este fato somado aos maiores teores de areia grossa, fração esta de menor superfície específica e, portanto menor capacidade de retenção de água, na porção maior declive da paisagem, voltada para noroeste, podem por sua vez contribuir para períodos de maior déficit hídrico nesta porção da vertente, gerando não só dificuldade para o adequado suprimento hídrico às plantas, mas também podendo elevar a resistência do solo à penetração de raízes (BENGOUGH et al., 2011). Dessa forma, o relevo juntamente com o escoamento superficial, por exemplo, geram regiões com maiores teores de argila onde a declividade é menor e a altitude maior, e maiores teores de areia grossa, onde a declividade é maior e a altitude menor gerando zonas de diferentes produtividades em uma área de aproximadamente 1 ha. Em locais menos susceptíveis ao carreamento de partículas (maior altitude e menor declive), os teores de

argila são mais elevados resultando no aumento da microporosidade e favorecimento da conservação da umidade do solo, contribuindo para o aumento da produtividade do cafeeiro, principalmente em condições de menor precipitação.

#### 4 CONCLUSÕES

O grupo de atributos relacionados à agregação do solo, com maior carga fatorial no fator 1 (diâmetro médio ponderado, percentagem de agregados maior que 2 mm, ácidos húmicos e ácidos fúlvicos) não apresentam relação com relevo e produtividade.

O fator 2 consegue agrupar atributos do solo relacionados à retenção de água nos quais destacam-se os teores de argila, microporosidade e umidade, que aumentam conjuntamente em maior altitude e menor declive onde ocorrem zonas de maior produtividade.

A variabilidade espacial do fator 1 (associado à agregação do solo) apresentam menor continuidade espacial e dependência espacial que do fator 2 (associado a retenção de água no solo) evidenciando fatores intrínsecos (relevo, por exemplo) condicionando a estrutura de variabilidade espacial do fator 2.

O teor de argila se sobressai com maior influência na produtividade do café Conilon dentre os atributos relacionados ao fator 2 (retenção de água no solo).

#### 5 AGRADECIMENTOS

À CAPES pelo auxílio financeiro junto ao Programa Nacional de Pós Doutorado/ PNPd e ao INCAPER pela concessão da área de estudo.

#### 6 REFERÊNCIAS

AGUILAR, C.; HERRERO, J.; POLO, M. J. Topographic effects on solar radiation distribution in mountainous watersheds and their influence on reference evapotranspiration estimates at watershed scale. **Hydrology Earth System Sciences**, Göttingen, v. 14, n. 12, p. 2479-2794, Dec. 2010.

ALMEIDA, D. A. S.; GUIMARÃES, E. C. Geoestatística e análise fatorial exploratória para representação espacial de atributos químicos do solo, na cafeicultura. **Coffee Science**, Lavras, v. 11, n. 2, p. 195-203, abr./jun. 2016.

BENGOUGH, A. G. et al. Root elongation, water stress and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. **Journal of Experimental**

**Botany**, Oxford, v. 62, n. 1, p. 59-68, Jan. 2011.

BIONDI, F.; MYERS, D. E.; AVERY, C. C. Geostatistically modeling stem size and increment in an old-growth forest. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 24, n. 7, p. 1354-1368, July 1994.

BORŮVKA, L. et al. Forest soil acidification assessment using principal component analysis and geostatistics. **Geoderma**, Amsterdam, v. 140, n. 4, p. 374-382, Aug. 2007.

BOTTEGA, E. L. et al. Variabilidade espacial de atributos do solo em sistema de semeadura direta com rotação de culturas no cerrado brasileiro. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 44, n. 1, p. 1-9, jan./mar. 2013.

CAMBARDELLA, C. A. et al. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa Soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 58, n. 4, p. 501-511, July/Aug. 1994.

CAMPOS, M. C. C. et al. Distribuição espacial da resistência do solo à penetração e teor de água do solo em uma área de agrofloresta na região de Humaitá, AM. **Comunicata Scientiae**, Bom Jesus, v. 5, n. 4, p. 509-517, out./dez. 2014.

CARDUCCI, C. E. et al. Modelagem da curva de retenção de água de latossolos utilizando a equação duplo van Genuchten. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 1, p. 77-86, jan./fev. 2011.

CARVALHO, L. C. C. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo e características agrônômicas da cultura do café. **Coffee Science**, Lavras, v. 8, n. 3, p. 265-275, jul./set. 2013.

CEDDIA, M. B. et al. Topography and spatial variability of soil physical properties. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 66, n. 3, p. 338-352, maio/jun. 2009.

EFFGEN, T. A. M. et al. Atributos químicos do solo e produtividade de lavouras de cafeeiro conilon submetidas a diferentes tratamentos culturais no sul do Estado do Espírito Santo. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 24, n. 2, p. 7-18, abr./jun. 2008.

\_\_\_\_\_. Propriedades físicas do solo em função de manejos em lavouras de cafeeiro conilon. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 59, n. 3, p. 414-421, maio/jun. 2012.

- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: CNPS, 2011. 230 p.
- ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. **ArcGIS professional GIS for the desktop**. Version 8.3. Redland, 2002.
- FERRÃO, R. G. et al. **Café Conilon**. Vitória: INCAPER, 2007. 702 p.
- FERRAZ, G. A. E. S. et al. Variabilidade espacial e temporal do fósforo, potássio e da produtividade de uma lavoura cafeeira. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 32, n. 1, p. 140-150, jan./fev. 2012.
- FERREIRA, M. M. Caracterização física do solo. In: LIER, Q. J. van (Ed.). **Física do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. p. 1-27.
- FONTANA, A. et al. Índices de agregação e a relação com as substâncias húmicas em solos de tabuleiros costeiros. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Viçosa, v. 5, n. 3, p. 291-297, jul./set. 2010.
- HAIR, F. J. et al. **Análise multivariada de dados**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009. 688 p.
- LEMO, R. C.; SANTOS, R. D. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 3. ed. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996. 84 p.
- LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop reduction. **Advances in Soil Science**, Bushland, v. 31, n. 1, p. 277-294, 1985.
- MENDONÇA, E. S.; MATOS, E. S. **Matéria orgânica do solo; métodos de análises**. Viçosa, MG: UFV, 2005. 107 p.
- NUNES, L. A. P. L. et al. Atributos físicos do solo em área de monocultivo de cafeeiro na zona da mata de Minas Gerais. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 26, n. 1, p. 71-78, jan./fev. 2010.
- PASSOS, R. R. et al. Substâncias húmicas, atividade microbiana e carbono orgânico lábil em agregados de um Latossolo vermelho distrófico sob duas coberturas vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 5, p. 1119-1129, set./out. 2008.
- PREZOTTI, L. C. et al. **Manual de recomendação de calagem e adubação para o Estado do Espírito Santo: 5ª aproximação**. Vitória: SEEA/INCAPER/CEDAGRO, 2007. 305 p.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical Computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2006.
- RIBEIRO, M. C. et al. Multivariate geostatistical methods for analysis of relationships between ecological indicators and environmental factors at multiple spatial scales. **Ecological Indicators**, Kiel, v. 29, p. 339-347, June 2013.
- SANCHEZ, M. G. B. et al. Delineation of specific management areas for coffee cultivation based on the soil relief relationship and numerical classification. **Precision Agriculture**, New York, v. 14, n. 2, p. 201-214, Apr. 2013.
- SANCHEZ, R. B. et al. Variabilidade espacial de atributos do solo e de fatores de erosão em diferentes pedoformas. **Bragantia**, Campinas, v. 68, n. 4, p. 873-884, out./dez. 2009.
- \_\_\_\_\_. Variabilidade espacial de propriedades de Latossolo e da produção de café em diferentes superfícies geomórficas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 4, p. 489-495, out./dez. 2005.
- SILVA, F. M. et al. Variabilidade espacial de atributos químicos e produtividade da cultura do café em duas safras agrícolas. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 1, p. 231-241, jan./fev. 2008.
- SILVA, S. A. et al. Variabilidade espacial de atributos químicos de Latossolo vermelho-amarelo húmico cultivado com café. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 1, p. 15-22, jan./fev. 2010.
- SILVA, S. A.; LIMA, J. S. S. Atributos físicos do solo e sua relação espacial com a produtividade do café arábica. **Coffee Science**, Lavras, v. 8, n. 4, p. 395-403, out./dez. 2013.
- WEBSTER, R.; OLIVER, M. A. **Geostatistics for environmental scientists**. 2<sup>nd</sup> ed. Chichester: Wiley, 2007. 325 p.