

Comissão 1.3 - Pedometria

PERFIS DE CARBONO ORGÂNICO DO SOLO NAS REGIÕES SUL E SERRA DO ESPINHAÇO MERIDIONAL, MINAS GERAIS: MODELAGEM EM PROFUNDIDADE⁽¹⁾

Yuri Lopes Zinn⁽²⁾, Adriano Ribeiro Guerra⁽³⁾, Alexandre Christofaro Silva⁽⁴⁾, João José Marques⁽⁵⁾, Geraldo César de Oliveira⁽⁵⁾ & Nilton Curi⁽⁶⁾

RESUMO

Apesar de o interesse no comportamento espacial de atributos-chave do solo, só recentemente a variação em profundidade passou a receber mais atenção na literatura. O carbono orgânico do solo (COS) é talvez o atributo que mais varie em profundidade, o que dificulta seu estudo. A partir de dados de levantamentos de solos de duas regiões de Minas Gerais (Sul e Serra do Espinhaço Meridional), foram modelados os teores de COS em profundidade, buscando identificar quais fatores mais os influenciam. Os perfis de COS foram mais bem descritos por funções logarítmicas neperianas em ambas as regiões. Houve efeito da classe de solo, uma vez que Latossolos apresentaram menores teores superficiais, mas menor decréscimo no perfil, do que Argissolos, Neossolos, Cambissolos e Nitossolos. Essas tendências podem ser devidas à maior profundidade, permeabilidade e teor de argila+silte dos Latossolos. A variação regular dos parâmetros *intercepto* (teor médio na superfície) e *fator logarítmico* (taxa de decréscimo) das equações obtidas para diferentes faixas de teor de argila+silte permitiu ainda obter funções de pedotransferência em perfil para descrever teores de COS em profundidade em qualquer classe de solo, confirmando a hipótese de que a textura é um controle importante dos teores de COS nessas duas regiões. Na região Sul de MG, os perfis de COS puderam também ser descritos em função de teores de Fe_2O_3 (ataque sulfúrico), evidenciando controle mineralógico do COS. Ainda na região Sul, solos entre 1.000 e 1.200 m de altitude apresentaram maiores teores de COS do que os de

⁽¹⁾ Recebido para publicação em 24 de março de 2011 e aprovado em 22 de agosto de 2012.

⁽²⁾ Professor Adjunto, Departamento de Ciência do Solo (DCS), Universidade Federal de Lavras (UFLA), Campus Universitário, CEP 37200-000 Lavras (MG). E-mails: ylzinn@dcsl.ufla.br

⁽³⁾ Eng.-Agrônomo, M.Sc., Bolsista de Apoio Técnico da FAPEMIG (projeto CAG-APQ 01352-09), DCS, UFLA. E-mail: guerra.ar@hotmail.com

⁽⁴⁾ Professor Associado, Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Bolsista do CNPq. Caixa Postal 38. CEP 39100-000 Diamantina (MG). E-mail: alexandre.christo@ufvjm.edu.br

⁽⁵⁾ Professores Associados, DCS, UFLA. Bolsistas do CNPq. E-mail: jmarques@dcsl.ufla.br, geraldooliveira@dcsl.ufla.br

⁽⁶⁾ Professor Titular, DCS, UFLA. Bolsistas do CNPq. E-mail: niltcuri@dcsl.ufla.br

altitudes menores. Latossolos e Nitossolos das duas regiões mostraram perfis muito semelhantes de COS - similaridade atribuída ao efeito positivo de maiores teores de argila na região Sul e maior altitude na Serra do Espinhaço Meridional.

Termos de indexação: matéria orgânica do solo, função de pedotransferência, levantamento de solos.

SUMMARY: SOIL ORGANIC CARBON PROFILES IN THE SOUTH AND SOUTHERN ESPINHAÇO MOUNTAIN REGIONS, MINAS GERAIS: MODELLING OF DEEPER LAYERS

Despite the interest in the spatial variability of key soil properties, depth-related variations have only recently received more attention in the literature. Of all soil properties, soil organic carbon (SOC) is perhaps the most depth-related and difficult to understand. Soil data from two regions in the State of Minas Gerais, Brazil, were used to model SOC profiles and identify factors of influence. In both the South and Southern Espinhaço regions, SOC profiles were best described by log functions. Oxisols had higher SOC levels in the surface, which decreased less with depth than in Ultisols, Inceptisols and Entisols. This could be ascribed to the greater depth, permeability and clay+silt content of Oxisols. Based on the regular increase of intercepts and log factors of the equations obtained for increasing clay+silt contents, profile pedotransfer functions were estimated to describe SOC concentrations based on texture and depth of any given soil, confirming the hypothesis that soil texture strongly controls SOC retention in both regions. In addition, SOC profiles could also be described according to Fe_2O_3 contents (by sulfuric digestion) in soils of the Southern region, suggesting a mineralogical control of SOC retention. Also in the Southern region, the SOC contents of soils located between 1,000-1,200 m a.s.l. were higher than those of soils at lower altitudes. However, the SOC profiles of the Oxisols and nitic Ultisols of both regions were very similar, which may be an effect of higher clay contents in the South region, and of higher altitudes in the Southern Espinhaço mountain region.

Index terms: soil organic matter, pedotransfer function, soil survey.

INTRODUÇÃO

O carbono orgânico do solo (COS) é o principal componente da matéria orgânica do solo (MOS), recebendo grande atenção por sua importância na fertilidade e demais atributos do solo, bem como por seu potencial como mitigador parcial de emissões antropogênicas de CO_2 (Lal, 2008). Entretanto, o estudo do COS é complexo devido à sua ampla variação no ambiente, pois sua quantidade e qualidade são funções de fatores externos (relevo, clima, vegetação e uso da terra) e internos ao solo, como textura, mineralogia e estrutura (Resck et al., 2008). Essa variabilidade também é acrescida pelo fato de que teores e composição funcional do COS variam muito em profundidade (Rumpel & Kögel-Knabner, 2011), refletindo o balanço entre quantidades de C aportado e estabilizado. Apesar de sua importância, há escassez generalizada de dados sobre o comportamento dos teores de COS ao longo do perfil do solo, doravante chamados simplesmente *perfis de COS*. Isso dificulta a estimativa de estoques regionais de COS e a compreensão da sorção de íons na zona de vadosa, entre outros processos.

Uma tentativa pioneira de modelar matematicamente perfis de COS foi realizada por Bennema (1974). Esse autor descreveu o decréscimo nos teores de COS em Latossolos brasileiros sob vegetação nativa, usando equações do tipo $COS = a \cdot p^b$ (COS em %; p = profundidade em cm; e a e b , parâmetros estimáveis) obtidas com o uso de papel logarítmico. O autor deparou-se ainda com outras limitações, como o ajuste de cada equação para um único pedon, correções para profundidades próximas a 0 cm e os grandes desvios abaixo de 1 m. Posteriormente, Bernoux et al. (1998) modelaram perfis de COS em Latossolos da Amazônia utilizando equações exponenciais. Jobbágy & Jackson (2000) aplicaram equações logarítmicas a uma base mundial de dados com 694 solos não cultivados e concluíram que o principal controle de estoques de COS ($kg\ m^{-2}$) na profundidade de 0-20 cm seria o tipo de vegetação. No entanto, entre 20 e 200 cm, esse controle seria exercido pelo teor de argila, por sua capacidade de estabilização do COS. Para três solos de textura variável do Cerrado, Zinn et al. (2005) encontraram correlações lineares entre teores de COS e argila+silte em sete profundidades predeterminadas e, com base no decréscimo previsível do intercepto e coeficiente

angular dessas equações, desenvolveram uma função de pedotransferência de perfil (*profile pedotransfer function*) composta de funções de soma de exponenciais e logaritmos para predição dos teores de COS em qualquer profundidade entre 0 e 1 m. Rein & Duxbury (2008) verificaram a aplicabilidade dos três modelos citados para duas bases independentes de dados de Latossolos na região dos Cerrados e obtiveram melhor desempenho para a função de pedotransferência de perfil. Além disso, outros estudos descreveram ainda o controle exercido pela agregação do solo e teores de óxidos de Fe e Al nos níveis de COS em Latossolos sob Cerrado e outros solos tropicais, inclusive com potencial para predição da partição por tamanho de partícula de COS (Zinn et al., 2007a,b; Barthès et al., 2008).

Contudo, todas as funções matemáticas mencionadas foram obtidas para Latossolos que apresentam “perfis simples” (Bennema, 1974), por sofrerem apenas pequenas mudanças graduais de textura e outros atributos em profundidade. Há poucas informações sobre o comportamento dos perfis de COS em outras regiões brasileiras além do Cerrado, principalmente em locais onde ocorra grande variação em textura, teor de óxidos de Fe ou densidade do solo entre horizontes, como é o caso dos Argissolos. No entanto, essa lacuna do conhecimento pode começar a ser preenchida pela modelagem de dados provenientes de levantamentos de solos, que, por sua abrangência geográfica e substancial quantidade de atributos, podem ser úteis para compreender e modelar perfis de COS (Rein & Duxbury, 2008) e investigar preliminarmente quais fatores internos melhor se correlacionam com a retenção de COS, subsidiando estudos sobre sua dinâmica.

Assim, este estudo teve por objetivos: avaliar os perfis de COS em duas regiões distintas do Domínio de Mares de Morros Florestados (Ab’Sáber, 1998) de Minas Gerais; e identificar os principais fatores que os alteram. As hipóteses testadas foram: a) perfis de COS em solos bem drenados podem ser modelados matematicamente de acordo com textura e outros fatores; e b) essa modelagem pode ser efetuada em solos com e sem gradiente textural em profundidade.

MATERIAL E MÉTODOS

Para a modelagem, foram utilizadas as bases de dados descritas a seguir, que representam segmentos distintos do Domínio dos Mares de Morros Florestados em Minas Gerais:

1) Levantamento de solos do Sul de Minas Gerais, realizado durante a elaboração do Mapa de Solos do Estado de Minas Gerais na escala 1:650.000 (UFV-CETEC-UFLA-FEAM, 2010). Nessa região fisiográfica, foram descritos e amostrados 100 perfis de solos, totalizando 346 horizontes, principalmente

de Latossolos, Argissolos, Cambissolos e Nitossolos. Na faixa leste dessa área, predominam solos desenvolvidos de granito-gnaiss e, em menor escala, quartzitos, xistos e basalto, que predominam na faixa oeste (COMIG, 2003). Pode-se descrever o clima regional com base em médias de três estações climatológicas (Lavras, Machado e São Lourenço) como de altitudes médias de 900 m, temperatura média anual de 19,4 °C e precipitação pluvial e evaporação médias anuais de 1.570 mm e 889 mm, respectivamente (Brasil, 1992). A vegetação nativa varia entre as florestas subperenifolia, perenifolia e o Cerrado.

2) Levantamento de solos da Serra do Espinhaço Meridional, feito para a elaboração dos planos de manejo dos Parques Estaduais do Biribiri, Rio Preto e Pico do Itambé, e Área de Preservação Ambiental Águas Vertentes. Foram descritos e amostrados 35 perfis de solos, totalizando 79 horizontes, principalmente de Neossolos Quartzarênicos, Latossolos, Cambissolos e Nitossolos, derivados principalmente de quartzitos e, em menor escala, de filitos, xistos e rochas básicas (Abreu et al., 2005). Em Diamantina, com altitude de 1.296 m, a temperatura média anual é de 18,1 °C, enquanto a precipitação pluvial e evaporação médias anuais são de 1.404 mm e 1.308 mm, respectivamente (Brasil, 1992). A vegetação nativa varia entre o cerrado, cerradão, floresta subperenifolia e campo rupestre.

Todos os solos foram georreferenciados (Figura 1) e descritos morfologicamente no campo; amostras compostas foram coletadas em cada horizonte. Na terra fina seca ao ar (TFSA), foram realizadas análises químicas, segundo Embrapa (1997), enquanto a análise textural foi realizada por dispersão em NaOH 1 mol L⁻¹. O COS foi determinado por combustão úmida em K₂CrO₄ + H₂SO₄, seguido por leitura colorimétrica do excesso de Cr(III) em solução (Cantarella et al., 2001). As amostras da região Sul foram ainda submetidas ao ataque sulfúrico da TFSA e determinação de Si, Al, Fe e P por absorção atômica, segundo Vettori (1969), modificado por Embrapa (1997).

De posse dos dados, foram calculadas medidas de posição e dispersão das principais propriedades do solo para caracterizar as bases de dados como um todo, ou após estratificação pelas principais classes (ordens do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos) encontradas em cada região, desde que houvesse um mínimo de três perfis por classe. Os perfis de COS foram plotados como o teor de COS em g kg⁻¹ vs. profundidade (ponto médio de cada horizonte em cm), conforme Bennema (1974) e ajustados por regressão bivariada não linear, com o uso de planilha eletrônica e do programa JMP 5.1 (SAS Institute, Cary, NC, EUA). Regressões lineares foram também empregadas para detectar possíveis relações entre teores de COS e argila ou argila+silte, além de Fe₂O₃ para os horizontes A e B, segundo procedimento adaptado de Zinn et al. (2005). Quando necessário, equações de regressão foram comparadas duas a duas por testes sequenciais de igualdade de variâncias, declives e interceptos,

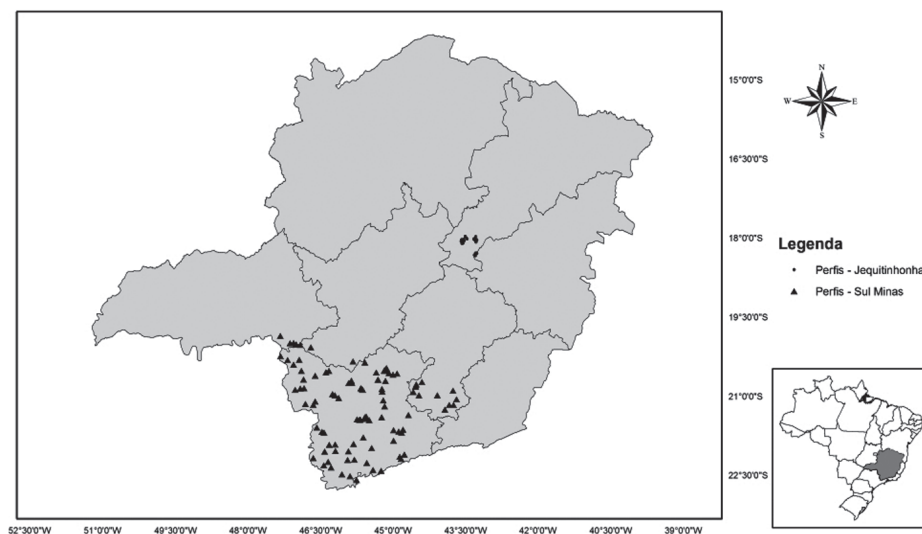


Figura 1. Distribuição geográfica dos perfis dos solos descritos e amostrados nas Regiões Sul e da Serra do Espinhaço Meridional, MG.

segundo Clewer & Scarisbrick (2001). Em resumo, após verificar a igualdade das variâncias por um teste F (no mínimo para $p < 0,05$), os declives (b) foram comparados por meio de um teste de t , em que um valor tabelado desta distribuição (graus de liberdade = $n_1 + n_2 - 4$) é comparado a outro calculado como a diferença entre declives dividida pelo erro-padrão da diferença (EPD) de declives, isto é, $t = (b_1 - b_2)/EPD$, em que:

$$EPD = \sqrt{s_p^2 \cdot \left(\frac{1}{S_{xx1}} + \frac{1}{S_{xx2}} \right)} \quad e \quad s_p^2 = \frac{SQR_1 + SQR_2}{(n_1 - 2) + (n_2 - 2)}$$

sendo s_p^2 a variância agrupada e S_{xxn} a soma corrigida de quadrados para x (profundidade) da série de dados utilizada em cada regressão. Quando verificada a igualdade de declives, é calculado um declive comum com a fórmula

$$\hat{b} = \frac{S_{xy1} + S_{xy2}}{S_{xx1} + S_{xx2}}$$

O declive comum assim obtido é utilizado para calcular interceptos ajustados, segundo

$$\hat{a} = \bar{Y}_1 - \hat{b}\bar{X}_1$$

A igualdade de interceptos ajustados é determinada analogamente por um teste de t , conforme

$$EPD = \sqrt{s_{y \cdot x}^2 \cdot \left\{ \frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} + \left[\frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2)^2}{S_{xx1} + S_{xx2}} \right] \right\}}, \text{ em que}$$

$$s_{y \cdot x}^2 = \frac{S_{yy1} + S_{yy2} - \left[\frac{(S_{xy1} + S_{xy2})^2}{S_{xx1} + S_{xx2}} \right]}{n_1 + n_2 - 3}$$

sendo S_{xx} a soma corrigida de quadrados para y (teor

de COS) da série de dados utilizada em cada regressão e S_{xy} a soma corrigida de produtos.

RESULTADOS

Caracterização das bases de dados

No quadro 1 são sintetizados os principais indicadores estatísticos dos atributos do solo utilizados neste estudo, com e sem estratificação pelas principais classes de solo encontradas. No Sul de MG, há maior variação em altitude, textura e COS do que na Serra do Espinhaço Meridional, em parte pela maior área amostrada (Figura 1). Em geral, os solos do Espinhaço Meridional possuem teores de argila e argila+silte menores do que os região Sul, em consonância com o material de origem mais quartzoso (Abreu et al., 2005) e clima mais seco.

Quando os dados do Sul de MG são estratificados segundo as principais classes de solo, nota-se pouca diferença entre médias e medianas referentes a altitudes e teores de Fe_2O_3 entre as diferentes classes. Contudo, é nítido que os Latossolos apresentaram o maior teor médio e mediano de argila, argila+silte e COS entre todos os solos. Os Cambissolos possuem o menor teor mediano de argila e argila+silte, mas possuem maior teor médio e mediano de COS do que os Argissolos. Na Serra do Espinhaço Meridional, observou-se que os Latossolos também possuem maior teor médio e mediano de COS que as outras ordens, embora os Nitossolos sejam mais ricos em argila+silte. Os Neossolos, todos Quartzarênicos, possuem os menores teores de argila+silte, enquanto os Cambissolos apresentam os menores teores de COS na Serra do Espinhaço.

Quadro 1. Principais descritores de solos das bases de dados 1 e 2

Classe	Atributo	Mínimo	Máximo	Média	Mediana
Base 1 - Região Fisiográfica Sul					
Geral	Altitude (m)	682	1.437	1.003	972
100 solos	Argila (g kg ⁻¹)	80	800	447	460
346 horizontes	Argila + Silte (g kg ⁻¹)	200	980	633	640
	Fe ₂ O ₃ (g kg ⁻¹)	16	272	90	83
	COS (g kg ⁻¹)	0	44	9,5	8
Argissolos	Argila (g kg ⁻¹)	180	680	464	480
30 solos	Argila + Silte (g kg ⁻¹)	250	920	635	630
124 horizontes	Fe ₂ O ₃ (g kg ⁻¹)	22	237	85	84
	COS (g kg ⁻¹)	1	31	8,5	6
Cambissolos	Argila (g kg ⁻¹)	80	630	371	360
27 solos	Argila + Silte (g kg ⁻¹)	210	940	590	610
94 horizontes	Fe ₂ O ₃ (g kg ⁻¹)	21	205	73	61
	COS (g kg ⁻¹)	0	44	10	7
Latossolos	Argila (g kg ⁻¹)	110	800	509	530
31 solos	Argila + Silte (g kg ⁻¹)	200	980	672	675
95 horizontes	Fe ₂ O ₃ (g kg ⁻¹)	16	272	109	104
	COS (g kg ⁻¹)	1	26	10,5	9,5
Nitossolos	Argila (g kg ⁻¹)	290	590	445	440
8 solos	Argila + Silte (g kg ⁻¹)	480	910	660	670
26 horizontes	Fe ₂ O ₃ (g kg ⁻¹)	48	231	108	93
	COS (g kg ⁻¹)	1	28	8,8	7
Base 2 - Serra do Espinhaço Meridional					
Geral	Altitude (m)	720	1.440	1.004	1.050
35 solos	Argila (g kg ⁻¹)	10	610	263	260
79 horizontes	Argila + Silte (g kg ⁻¹)	40	740	409	430
	COS (g kg ⁻¹)	0,6	24,9	7,0	8,0
Cambissolos	Argila	10	360	183	190
6 solos	Argila + Silte (g kg ⁻¹)	200	610	365	360
15 horizontes	COS (g kg ⁻¹)	0,6	9,3	4,5	4,6
Latossolos	Argila	210	560	358	360
7 solos	Argila + Silte (g kg ⁻¹)	330	720	515	530
17 horizontes	COS (g kg ⁻¹)	2,3	24,9	10,1	9,9
Neossolos	Argila	20	400	142	100
13 solos	Argila + Silte (g kg ⁻¹)	40	610	240	150
25 horizontes	COS (g kg ⁻¹)	0,6	17,4	6,9	7,5
Nitossolos	Argila	180	560	375	410
5 solos	Argila + Silte (g kg ⁻¹)	310	740	584	645
12 horizontes	COS (g kg ⁻¹)	0,6	22,0	7,2	5,5

Perfis de COS

A figura 2 mostra os gráficos com teores de COS segundo a profundidade média de cada horizonte amostrado, considerando cada base de dados em separado. As análises de regressão bivariada apontaram que os mais altos níveis de significância e coeficientes de determinação foram obtidos para descrição dos perfis de COS estudados são as funções logarítmicas do tipo $\text{COS (g kg}^{-1}\text{)} = a - b(\ln p)$, em que

a é o teor médio de COS próximo à superfície do solo; b , a taxa de decréscimo em profundidade do teor de COS; $\ln$, o logaritmo de base neperiana; e p , a profundidade média em cm. Assim, na região Sul, os teores médios superficiais de COS (25,9 g kg⁻¹) são muito superiores aos observados no Espinhaço (14,1 g kg⁻¹), porém nesta última base o decréscimo em profundidade é bem menor (1,8 $\ln p$) do que na primeira (4,7 $\ln p$). As duas equações diferem significativamente segundo o teste de igualdade de

declives (taxa de decréscimo em profundidade, $p < 0,0001$), e seus elevados níveis de significância individual para os parâmetros a e b para a região Sul e, em menor escala, para o Espinhaço Meridional comprovam sua validade estatística. Apesar da alta significância, os coeficientes de determinação (R^2) são relativamente baixos, devido à alta variabilidade entre os solos, especialmente em textura e tipo de vegetação nativa.

Quando se estratificam as bases de dados pelas quatro classes de solo predominantes de cada região, percebe-se nítida distinção entre os perfis de COS (Figura 3), confirmada pelos testes de igualdade de parâmetros. Na região Sul de MG, os Cambissolos apresentaram os maiores teores médios de COS à superfície (coeficiente $a = 28,8 \text{ g kg}^{-1}$), porém há acentuado decréscimo em profundidade (coeficiente $b = 5,7$), atingindo o valor zero a 150 cm. Os Latossolos, por outro lado, apresentaram o menor teor médio de COS em superfície ($23,7 \text{ g kg}^{-1}$), mas também o menor decréscimo em profundidade ($b = 3,74$), de modo que mesmo abaixo de 170 cm ainda se encontram teores de COS em torno de 5 g kg^{-1} . Os Argissolos e Nitossolos mostraram comportamento intermediário.

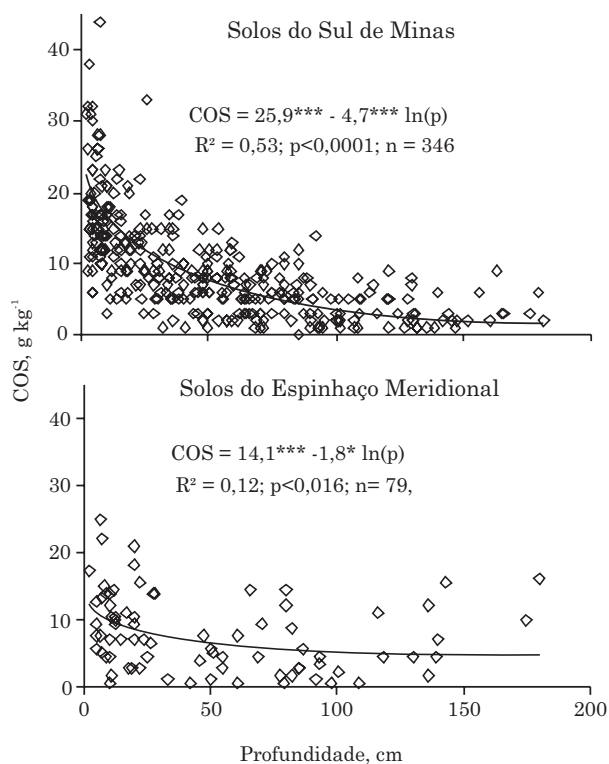


Figura 2. Perfis de carbono orgânico do solo (COS) para as regiões Sul e Serra do Espinhaço Meridional, MG. O nível de significância para os parâmetros intercepto e fator logarítmico é representado por *, ** e *, respectivamente, para $p < 0,05$, $p < 0,01$ e $p < 0,001$.**

Na Serra do Espinhaço Meridional, só foi possível ajustar funções logarítmicas aos perfis após a remoção dos dados de dois Latossolos com horizonte A húmico, que não apresentam decréscimo expressivo do teor de COS até a máxima profundidade amostrada. Verificou-se que os Latossolos do Espinhaço Meridional e os da região Sul apresentaram o mesmo perfil de COS ($p < 0,001$). Por outro lado, os Cambissolos mostraram teores superficiais e decréscimo em profundidade três vezes menores no Espinhaço Meridional. Os Nitossolos apresentaram teor superficial de COS muito similar ao dos Latossolos, mas decréscimo muito maior em profundidade ($p < 0,05$), atingindo teor zero de COS em torno de 130 cm de profundidade.

Modelagem de perfis de COS com base em textura

Neste estudo, não houve correlação significativa entre teores de COS e argila ou argila+silte após estratificação por horizontes A e B, o que a princípio inviabilizaria uma modelagem pelo procedimento de Zinn et al. (2005). Contudo, quando os solos das duas bases de dados foram agrupados em função de classes de argila e argila+silte, obtiveram-se as equações logarítmicas da figura 4. Nas duas regiões, os teores médios superficiais de COS e os decréscimos em profundidade aumentaram consistentemente com o teor de argila+silte, ou seja, os parâmetros a e b das equações da figura 4 possuem variação constante à medida que os solos adquirem textura mais fina. Assim, ao plotar os valores a e b das equações para cada região contra o teor de argila+silte, observou-se que esses parâmetros podem ser preditos por funções lineares ou logarítmicas (Figura 5).

Desse modo, podem-se modelar os parâmetros a e b de equações do tipo $\text{COS} = a - b \ln(p)$ segundo a textura em cada profundidade de solo:

Equação 1 (região Sul): $\text{COS}(p) = [0,035(\text{arg}+\text{sil})+6,78] - [0,0071(\text{arg}+\text{sil})+1,03] \ln p$

Equação 2 (Espinhaço): $\text{COS}(p) = [-19,3+6,21 \ln(\text{arg}+\text{sil})] - [-3,96+1,186 \ln(\text{arg}+\text{sil})] \ln p$

em que $\text{COS}(p)$ é o teor de COS (g kg^{-1}) para a profundidade p (cm) e $(\text{arg}+\text{sil})$ é o teor de argila+silte do solo (g kg^{-1}); os parâmetros listados foram obtidos com as funções lineares ou logarítmicas da figura 5.

Quando se plotaram os valores de COS observados contra os estimados pelas equações 1 e 2, foram obtidos os ajustes da figura 6, que, para as bases de dados 1 e 2, mostram coeficientes de determinação superiores (respectivamente, 0,57 e 0,48, $p < 0,0001$) ao modelo geral de perfil mostrado na figura 2 (respectivamente, 0,53 a $p < 0,0001$ e 0,12 a $p < 0,016$). Assim, são confirmadas as duas hipóteses formuladas neste estudo.

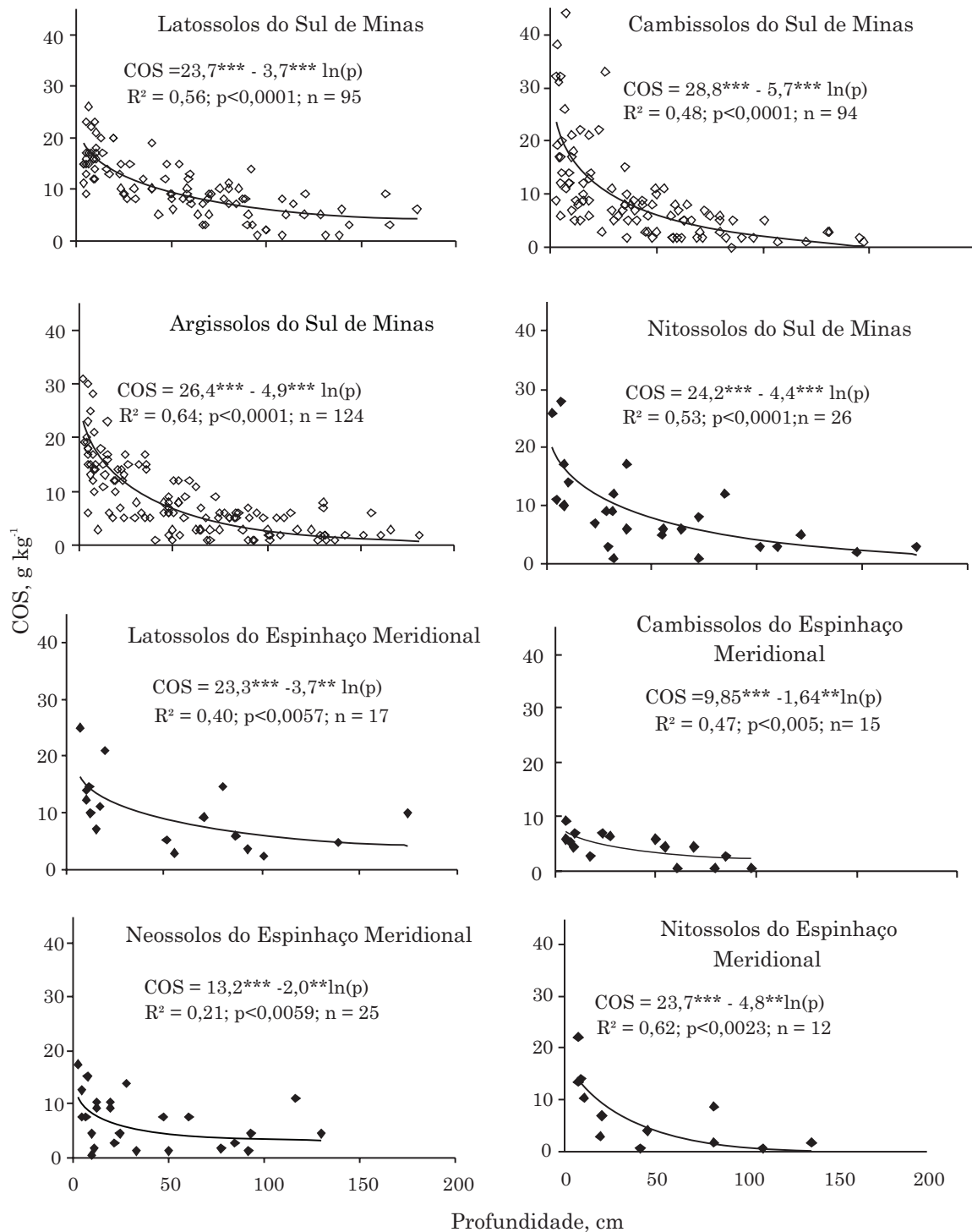


Figura 3. Perfis de carbono orgânico do solo (COS) para as principais classes de solos das regiões Sul e Serra do Espinhaço Meridional, MG. O nível de significância para os parâmetros intercepto e fator logarítmico é representado por *, ** e ***, respectivamente, para $p < 0,05$, $p < 0,01$ e $p < 0,001$.

Perfis de COS: efeito da altitude e do teor de Fe_2O_3

Fatores como a altitude e os teores de óxidos de Fe podem contribuir para a variabilidade do COS e a

grande dispersão dos dados mostrada no quadro 1. Por isso, procedeu-se à estratificação da base de dados da região Sul, mais numerosa, de acordo com faixas de altitude. Há efeito visível da altitude, na forma de

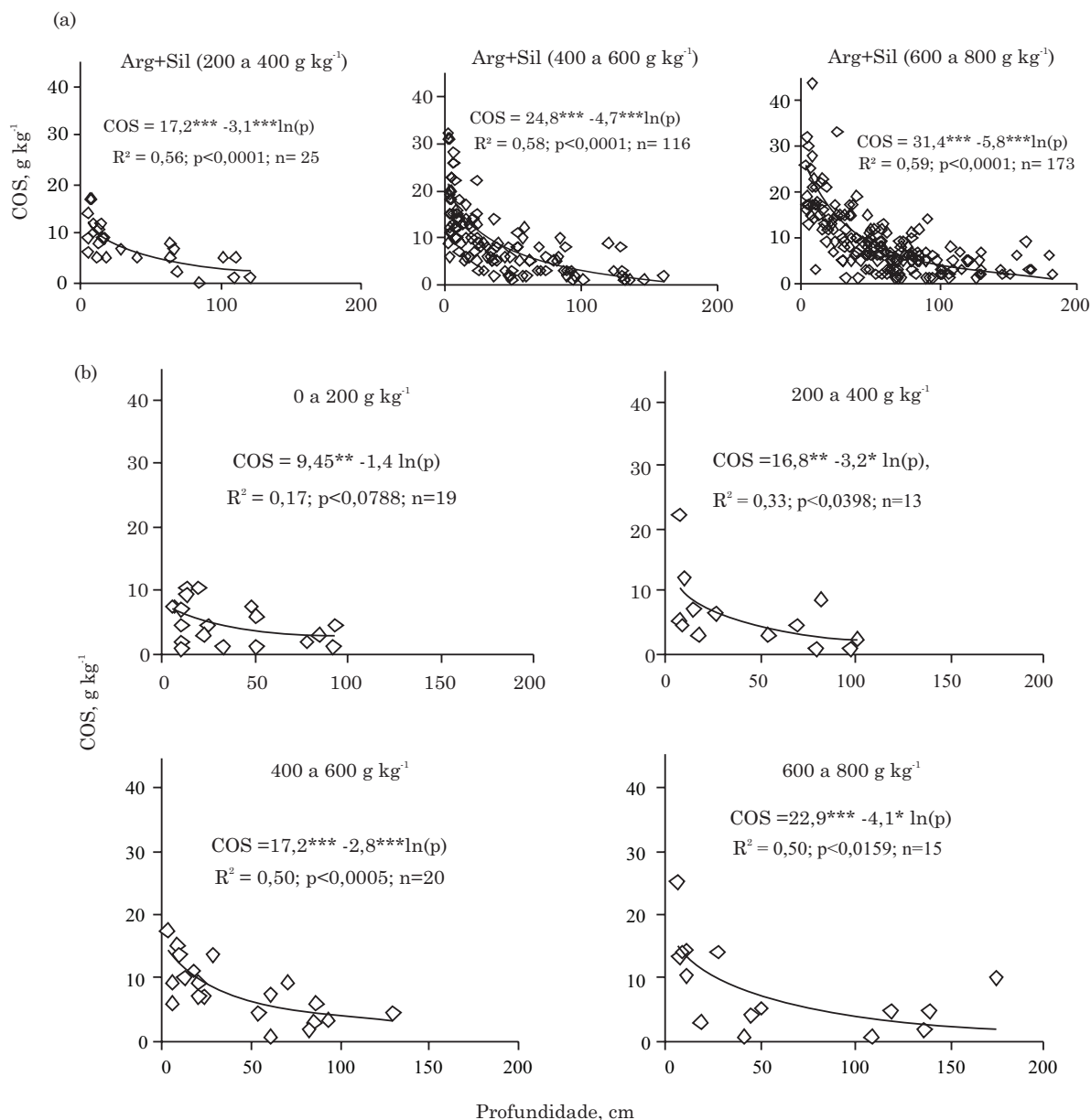


Figura 4. Perfis de COS para as principais classes de teor de argila+silte: a) região Sul; e b) Serra do Espinhaço Meridional, MG. O nível de significância para os parâmetros intercepto e fator logarítmico é representado por *, ** e *, respectivamente, para $p < 0,05$, $p < 0,01$ e $p < 0,001$.**

maiores teores superficiais e subsuperficiais de COS na faixa de 1.000 a 1.200 m (Figura 7).

À semelhança dos perfis de COS obtidos para diferentes faixas texturais, foi possível obter perfis de COS de acordo com diferentes faixas de teores de Fe_2O_3 do ataque sulfúrico (Figura 8). Como os parâmetros a e b das equações obtidas também aumentam regularmente com os maiores teores de Fe_2O_3 , pode-se obter a equação 3 da mesma forma utilizada para os teores de argila+silte:

Equação 3: $\text{COS}(p) = [-11,9 + 9,2 \ln(\text{Fe}_2\text{O}_3)] - [-2,3 + 1,7 \ln(\text{Fe}_2\text{O}_3)] \ln(p)$

em que $\text{COS}(p)$ é o teor de COS (g kg^{-1}) para a profundidade p (cm) e (Fe_2O_3) estima o teor de óxidos de Fe (g kg^{-1}). A equação 3 é similar à equação 1 em poder preditivo ($R^2 = 0,572$).

DISCUSSÃO

Sobre o método

O uso de funções logarítmicas para descrever os perfis médios de COS apresenta a vantagem da

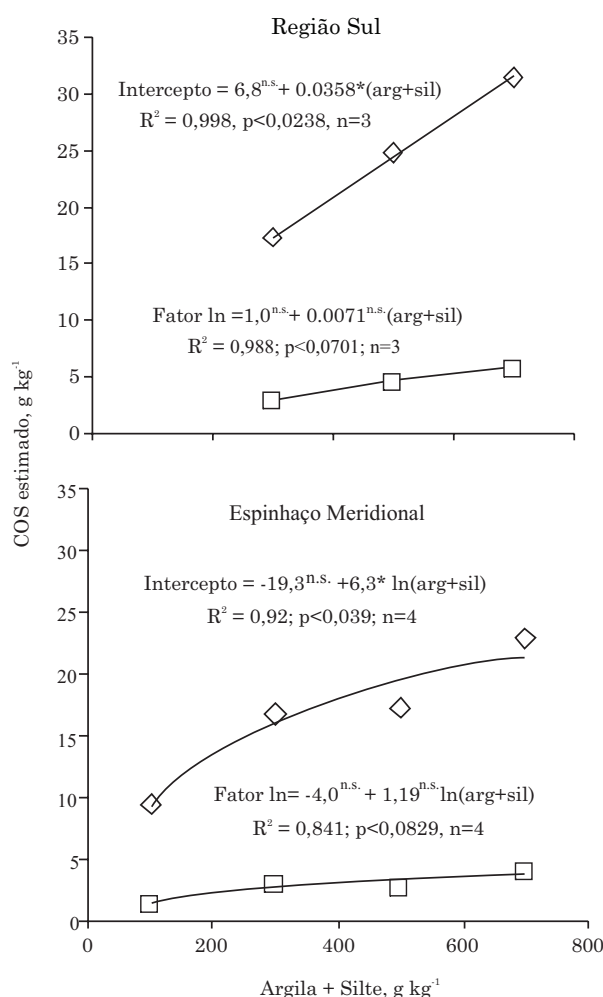


Figura 5. Modelagem dos parâmetros a e b das equações da figura 5 em função do teor de argila + silte, para solos das regiões Sul e Serra do Espinhaço Meridional, em MG. O nível de significância para os parâmetros intercepto e declive/fator logarítmico é representado por *, **, e ***, respectivamente, para $p < 0,05$, $p < 0,01$ e $p < 0,001$.

simplicidade de sua obtenção a partir de dados de profundidades variáveis, como é o caso de levantamentos de solos. Outra vantagem é que a modelagem de perfis individuais de COS em cada pedon, conforme empreendida por Bennema (1974), é impraticável, pois: (a) o número de dados (camadas) é sempre baixo; (b) sua variação irregular em profundidade quase que impossibilita o uso de funções simples, como a logarítmica, requerendo funções complexas ou polinomiais de pouco ou nenhum significado pedológico; e (c) necessariamente implica representatividade limitada das equações porventura obtidas. Este último ponto é praticamente a negação das finalidades da regressão matemática, entendidas por Webster (1997) como sendo: predição estatística de uma variável a partir de outras; e obtenção de equações de calibração. Em contrapartida, a abordagem

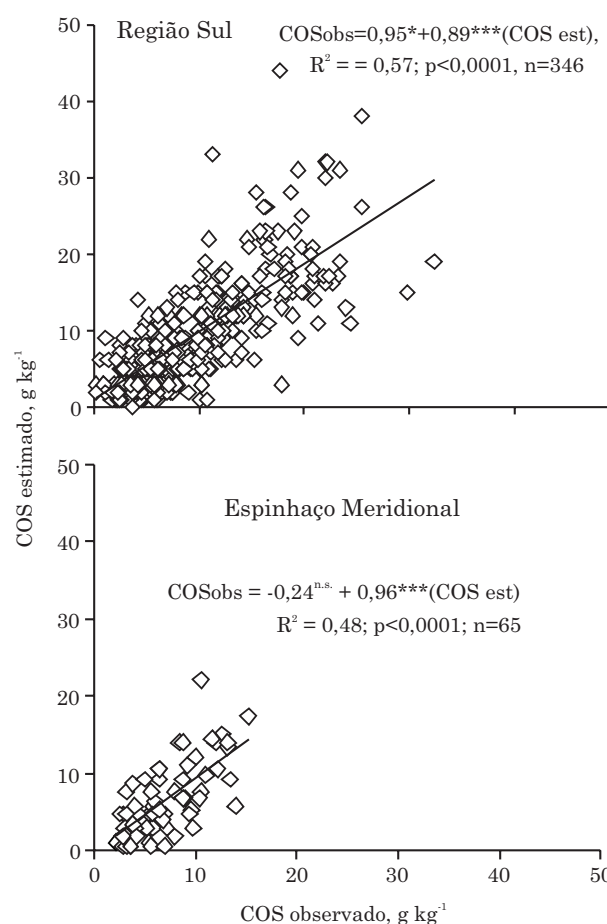


Figura 6. Desempenho dos modelos preditivos de perfis COS, para solos das regiões Sul e Serra do Espinhaço Meridional, MG. O nível de significância para os parâmetros intercepto e fator logarítmico é representado por *, **, e ***, respectivamente, para $p < 0,05$, $p < 0,01$ e $p < 0,001$.

aqui proposta a partir de dados obtidos de várias unidades de mapeamento de solos permite estimar médias de teor superficial de COS e sua taxa de decréscimo em profundidade, as quais podem ser estratificadas segundo fatores qualitativos, como a classe de solo, sendo, assim, mais representativas da variabilidade natural existente no ambiente.

Com efeito, após a estratificação das bases de dados por classes de solo (Figura 3), foram obtidos valores de R^2 geralmente mais altos e com nível de significância igual ou superior do que para as bases como um todo (Figura 2), especialmente para os perfis da Serra do Espinhaço Meridional de MG. A estratificação por fatores quantitativos, como faixas de altitude, textura ou teor de Fe_2O_3 , apresenta ainda a possibilidade de desenvolver funções preditivas, como as equações 1 a 3, desde que ocorram variações regulares dos parâmetros das equações à medida que as faixas dos fatores variam. Assim, neste estudo foram observadas correlações significativas e

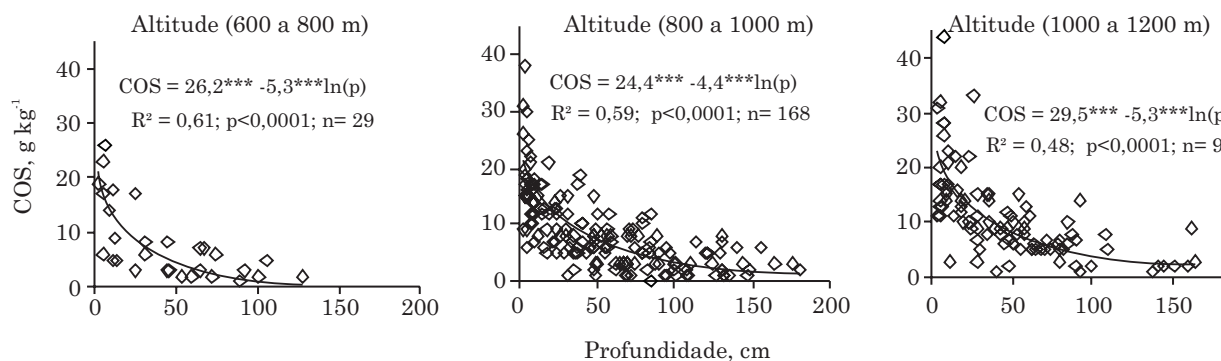


Figura 7. Perfis de carbono orgânico do solo (COS) para três faixas de altitude na região Sul de MG. O nível de significância para os parâmetros intercepto e fator logarítmico é representado por *,** e ***, respectivamente, para $p < 0,05$, $p < 0,01$ e $p < 0,001$.

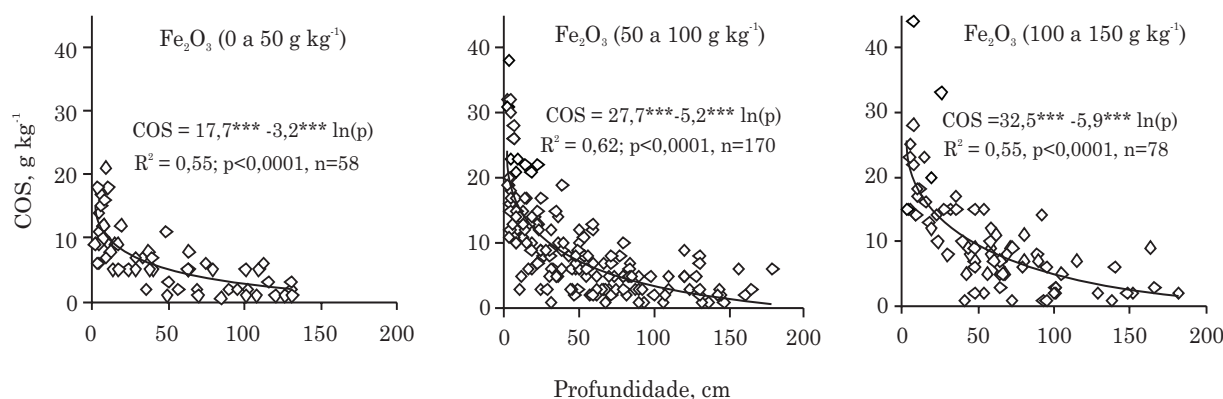


Figura 8. Perfis de carbono orgânico do solo (COS) para três faixas de teor de Fe_2O_3 do ataque sulfúrico na região Sul de MG. O nível de significância para os parâmetros intercepto e fator logarítmico é representado por *,** e ***, respectivamente, para $p < 0,05$, $p < 0,01$ e $p < 0,001$.

consistentes entre teor de COS e faixas de teor de argila+silt e Fe_2O_3 (Figuras 4 e 8), o que concorda com outros estudos desenvolvidos no Brasil (Zinn et al., 2005, 2007a) e em outros países (Feller & Beare, 1997; Jobágy & Jackson, 2000; Barthés et al., 2008) e reforça a ideia de um controle textural e mineralógico da retenção de COS. De maneira simples, podem-se definir esses controles textural e mineralógico como o aumento dos teores de COS à medida que aumentam respectivamente os teores de argila+silt ou de óxidos de Fe em uma mesma profundidade (Zinn et al., 2007a). Ainda, esses controles são explicados pela maior capacidade de sorção de COS húmico pela argila, em especial pelos óxidos de Fe, em solos de textura mais fina, manifesta em todas as profundidades (exceções são Organossolos e Espodossolos, cuja acumulação de COS advém de processos específicos de formação de solo). Dessa forma, os dados aqui apresentados apoiam a hipótese de que controles texturais e mineralógicos da retenção de COS são efetivos na região amostrada e para outros solos que apresentem considerável variação textural e mineralógica em profundidade, como Argissolos.

Contudo, outras modelagens se fazem necessárias para comprovação posterior dessa conclusão.

Prováveis aplicações práticas dos resultados aqui encontrados incluem eventuais iniciativas de confecção de mapas de estoques regionais de COS, ao menos no que se refere à modelagem com base no teor de argila+silt. Como a análise de Fe_2O_3 após extração por ditionito ou ataque sulfúrico não é realizada na grande maioria dos laboratórios de análise de solos no Brasil, uma função de pedotransferência em perfil, como a equação 3, seria de pouca utilidade preditiva. No entanto, essas funções podem contribuir como evidências adicionais da relação entre óxidos de Fe e COS, demonstrada por estudos *in vitro*, como os de Kahle et al. (2004), por exemplo. Em relação à textura, entretanto, o potencial é bem mais amplo, pois esses são atributos determinados rotineiramente e abundantes na literatura geral e em levantamentos de solos. Dessa forma, podem-se também realizar comparações entre modelos já publicados para o controle textural da retenção de COS: os valores de $R^2 = 0,57$ e $0,48$, encontrados respectivamente para as bases de dados 1 e 2 (Figura 6), são muito superiores

aos obtidos nas regressões COS vs. argila+silte para diversas profundidades de 694 solos por Jobbágy & Jackson (2000). Por outro lado, são inferiores ao $R^2 = 0,81$, reportado por Rein & Duxbury (2008) para centenas de Latossolos da região dos Cerrados, o que provavelmente se deve ao fato de as bases de dados aqui testadas incluírem outras classes de solos, como Argissolos, Cambissolos, Neossolos e Nitossolos.

Comparações entre solos e ambientes

Comparações de teores ou estoques de COS entre diferentes solos ou manejos são convencionalmente feitas para uma camada de mesma profundidade, como, por exemplo, 0-20 cm. A utilização de perfis logarítmicos de COS, conforme o presente trabalho, pode ser um critério alternativo para essas comparações, ao menos para a região estudada. Por exemplo, no Sul de MG, os Cambissolos apresentaram maiores teores médios de COS à superfície, o que pode estar relacionado à menor profundidade efetiva (concentrando a biomassa radicular à superfície) e maior deficiência em nutrientes (reduzindo taxas de decomposição), típicas de Cambissolos daquela área. Por outro lado, nos Latossolos, uma elevada bioturbação e porosidade pode favorecer a incorporação de frações diversas de COS em camadas mais profundas, conforme evidenciado pelos teores consideráveis de COS abaixo de 1 m (Figura 3), resultando em menores teores médios à superfície. Os Argissolos apresentam comportamento intermediário entre Cambissolos e Latossolos, sem contudo sugerir efeitos evidentes do gradiente textural nos perfis de COS. Os Nitossolos possuem textura e teor superficial de COS similares aos dos Latossolos, mas o acentuado decréscimo de COS em subsuperfície pode refletir, como ocorre para os Cambissolos, menor profundidade efetiva e, ou, permeabilidade, dificultando o transporte vertical de COS solúvel ou húmico.

O efeito da atividade da fração argila na retenção de COS em solos tropicais é relativamente pouco conhecido. Solos com argila de atividade alta, definida pela ocorrência de $T > 27 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ de argila em horizonte B ou C, compreendem apenas cinco solos da base de dados do Sul de MG e 14 no Espinhaço Meridional. Para o Sul de MG, os perfis de COS para solos com alta atividade ($\text{COS} = 28,7 - 5,5 \ln(p)$, $R^2 = 0,585$, não mostrado) pouco diferem do obtido para a base em geral (Figura 2a), sendo muito semelhantes aos dos Cambissolos (Figura 3). Já para o Espinhaço Meridional, os perfis de COS ($\text{COS} = 7,1 - 2,75 \ln(p)$, $R^2 = 0,20$, não mostrado) mostram teores de COS ligeiramente maiores do que para a base como um todo (Figura 2), embora o R^2 muito baixo dificulte qualquer conclusão sobre o assunto. Assim, não parece haver tendência clara sobre o efeito da atividade da argila na retenção de COS, porém esse assunto merece investigação mais aprofundada.

Na região Sul de MG, os maiores teores superficiais e subsuperficiais de COS na faixa de altitude

compreendida entre 1.000 e 1.200 m (Figura 4) podem ser explicados por uma menor taxa de decomposição da matéria orgânica, devido a temperaturas geralmente mais baixas em altitudes mais elevadas. Entretanto, isso ocorre em contraposição aos baixos teores de COS observados na Serra do Espinhaço Meridional, em altitudes similares ou superiores, o que parece refletir menor aporte de biomassa devido ao clima mais seco (alta evapotranspiração) ou menor estabilização do COS, visto que esses solos possuem baixo teor médio de argila em razão do material de origem (Quadro 1).

Podem-se também comparar os perfis de COS em uma mesma classe de solo nas duas regiões: a grande semelhança entre as equações obtidas para os Latossolos da região Sul e Espinhaço Meridional ocorre também para os Nitossolos, mas contrasta com a grande diferença entre os Cambissolos (Figura 3). Pode-se supor que, no Sul de MG, os Latossolos e Nitossolos são em média mais ricos em argila (Quadro 1), o que, segundo a teoria do controle textural, pode resultar em maiores teores de COS; já na região do Espinhaço Meridional, com solos mais arenosos, o efeito da maior altitude igualmente incrementa os teores de COS (ver parágrafo anterior). Assim, dois controles (textura e altitude) resultariam em perfis de COS semelhantes em Latossolos e Nitossolos nas duas regiões. O fato de os Cambissolos do Espinhaço Meridional possuírem teor superficial de COS muito inferior ao de seus pares na região Sul pode ser explicado em parte por seu menor teor de argila e, talvez, pela menor biomassa da vegetação lá dominante, cerrados e campo rupestre, resultado da menor umidade disponível.

CONCLUSÕES

1. O método empregado permitiu desenvolver equações preditivas para perfis de COS, com base nos teores de argila+silte e profundidade, substanciando a validade do controle textural da retenção de COS nas regiões estudadas.
2. Pôde-se igualmente modelar perfis COS com base em teores de Fe_2O_3 do ataque sulfúrico, evidenciando também o controle mineralógico da retenção de COS nos solos do Sul de MG.
3. A semelhança entre perfis de COS em Latossolos e Nitossolos das regiões Sul e Serra do Espinhaço Meridional sugere que o efeito de maiores teores de argila no Sul é contrabalançado pela maior altitude do Espinhaço, resultando em retenção similar de COS.

AGRADECIMENTOS

O levantamento de solos da região Sul de MG foi financiado pelo Centro Tecnológico de Minas Gerais

(CETEC) e pela Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM). O levantamento de solos da Serra do Espinhaço Meridional foi apoiado pelo Instituto Estadual de Florestas de Minas Gerais (IEF). A FAPEMIG forneceu a bolsa de apoio técnico ao segundo autor e os demais recursos envolvidos na modelagem matemática, no âmbito do Projeto CAG-APQ 01352-09. Os autores agradecem ainda aos revisores anônimos, que muito colaboraram para a melhoria deste trabalho. Finalmente, agradecemos a Walbert J.R. Santos (UFLA), pela elaboração do mapa da figura 1.

LITERATURA CITADA

- AB'SÁBER, A. Os domínios de natureza no Brasil - Potencialidades paisagísticas. Cotia, Ateliê, 2003. 159p.
- ABREU, P.A.A.; FRAGA, L.M.S. & NEVES, S.C. Geologia. In: SILVA, A.C.; PEDREIRA, L.C.V.S.F. & ABREU, P.A.A., eds. Serra do Espinhaço Meridional - paisagens e ambientes. Belo Horizonte, O Lutador, 2005. p.19-43.
- BARTHÈS, B.G.; KOUAKOUA, E.; LARRÉ-LARROUY, M.-C.; RAZAFIMBELO, T.M.; LUCA, E.F.; AZONTONDE, A.; NEVES, C.S.V.J.; FREITAS, P.L. & FELLER, C.L. Texture and sesquioxide effects on water-stable aggregates and organic matter in some tropical soils. *Geoderma*, 143:14-25, 2008.
- BENNEMA, J. Organic carbon profiles in Oxisols. *Pedologie*, 24:119-146, 1974.
- BERNOUX, M.; ARROUAYS, D.; CERRI, C.C. & BOURENNANE, H. Modelling vertical distribution of carbon in Oxisols of the Western Brazilian Amazon (Rondonia). *Soil Sci.*, 163:941-951, 1998.
- BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária/Secretaria Nacional de Irrigação/Departamento Nacional de Meteorologia). Normais climatológicas (1961-1990). Brasília, 1992. 84p.
- CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. & RAIJ, B.van. Determinação da matéria orgânica. In: RAIJ, B.van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H. & QUAGGIO, J.A., eds. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas, Instituto Agrônomo de Campinas, 2001. p.173-180.
- CLEWER, A.G. & SCARISBRICK, D.H. Practical statistics and experimental design for plant and crop science. Chichester, John Wiley & Sons, 2001. 332p.
- COMPANHIA MINERADORA DE MINAS GERAIS - COMIG. Mapa geológico do Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2003.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solo. Manual de métodos de análise de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- FELLER, C. & BEARE, M.H. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma*, 79:69-116, 1997.
- JOBBÁGY, E.G. & JACKSON, R.B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecol. Applic.*, 10:423-436, 2000.
- KAHLE, M.; KLEBER, M. & JAHN, R. Retention of dissolved organic matter by phyllosilicate and clay fractions in relation to mineral properties. *Org. Geochem.*, 35:269-276, 2004.
- LAL, R. Sequestration of atmospheric CO₂ in global carbon pools. *Energy Environ. Sci.*, 1:86-100, 2008.
- REIN, T.A. & DUXBURY, J.D. Modeling the soil organic carbon, texture and mineralogy relations in the profile of Oxisols from the Brazilian Cerrado. In: SIMPÓSIO NACIONAL SOBRE O CERRADO, 9., Brasília, 2008. Anais... Brasília, Embrapa, 2008. CD-ROM.
- RESCK, D.V.S.; FERREIRA, E.A.B.; FIGUEIREDO, C.C. & ZINN, Y.L. Dinâmica da matéria orgânica no Cerrado. In: SANTOS, G.A.; SILVA, L.S.; CANELLAS, L.P. & CAMARGO, F.A.O., eds. Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais. 2.ed. Porto Alegre, Metrópole, 2008. p.359-417.
- RUMPEL, C. & KÖGEL-KNABNER, I. Deep soil organic matter - A key but poorly understood component of terrestrial C cycle. *Plant Soil*, 338:143-158, 2011.
- UFV – CETEC – UFLA - FEAM. Mapa de solos do Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte, Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2010. 49p. Disponível em: <<http://www.feam.br/noticias/1/949-mapas-de-solo-do-estado-de-minas-gerais>> Acesso em: 27 de out. de 2011.
- VETTORI, L. Métodos de análises de solos. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura, 1969. 24p. (Boletim Técnico, 7).
- WEBSTER, R. Regression and functional analysis. *Eur. J. Soil Sci.*, 48:557-566, 1997.
- ZINN, Y.L.; LAL, R. & RESCK, D.V.S. Texture and organic carbon relations described by a profile pedotransfer function for Brazilian Cerrado soils. *Geoderma*, 127:168-173, 2005.
- ZINN, Y.L.; LAL, R.; BIGHAM, J.M. & RESCK, D.V.S. Edaphic controls on soil organic carbon retention in the Brazilian Cerrado: texture and mineralogy. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 71:1204-1214, 2007a.
- ZINN, Y.L.; LAL, R.; BIGHAM, J.M. & RESCK, D.V.S. Edaphic controls on soil organic carbon retention in the Brazilian Cerrado: Soil structure. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 71:1215-1224, 2007b.