

Comissão 2.2 - Física do solo

MODELAGEM DA DENSIDADE DO SOLO EM PROFUNDIDADE SOB VEGETAÇÃO NATIVA EM MINAS GERAIS

Eduane José de Pádua^{(1)*}, Adriano Ribeiro Guerra⁽²⁾ e Yuri Lopes Zinn⁽³⁾

⁽¹⁾ Universidade Federal de Lavras, Departamento de Ciência do Solo, Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, Lavras, Minas Gerais, Brasil.

⁽²⁾ Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Programa de Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Piracicaba, São Paulo, Brasil.

⁽³⁾ Universidade Federal de Lavras, Departamento de Ciência do Solo, Lavras, Minas Gerais, Brasil.

* Autor correspondente.

E-mail: eduanepadua@hotmail.com

RESUMO

A densidade do solo (D_s) é um importante indicador da qualidade física do solo, mas há pouca disponibilidade de informações sobre seus valores a maiores profundidades em razão da dificuldade amostral envolvida. Portanto, funções de pedotransferência têm sido utilizadas para estimar a D_s com relativo êxito, mas ainda sem especificidade aos diferentes biomas brasileiros. O objetivo deste trabalho foi desenvolver funções matemáticas capazes de descrever a D_s até 1 m de profundidade em áreas de vegetação nativa das regiões central e sul de Minas Gerais. A D_s foi amostrada pelo método do anel volumétrico em 53 perfis de solo de diferentes ordens, em seis profundidades (0-5, 5-10, 10-20, 30-40, 50-60 e 90-100 cm). A D_s variou entre 0,66 e 1,74 kg dm^{-3} , com média de 1,25 kg dm^{-3} , e foi geralmente menor nas camadas de 0-5 e 5-10 cm. Por meio de regressão linear múltipla (*stepwise*), foram gerados modelos com base nas propriedades químicas de rotina e granulometria, que permitiram estimar a D_s até 1 m de profundidade. Os teores de C orgânico do solo, areia, silte e argila e a capacidade de troca catiônica potencial (T) foram as variáveis de maior relevância nos modelos, que alcançaram maior acurácia para a ordem Latossolos ($R^2_{\text{ajust}} = 0,85$), seguida por Cambissolos ($R^2_{\text{ajust}} = 0,69$), Nitossolos ($R^2_{\text{ajust}} = 0,67$) e Argissolos ($R^2_{\text{ajust}} = 0,51$). Uma vez que a modelagem para a base de dados completa atingiu R^2_{ajust} de 0,50, pode-se concluir que a estratificação por ordem taxonômica foi útil para melhorar os ajustes obtidos, com exceção da ordem Argissolo.

Palavras-chave: função de pedotransferência, regressão múltipla, perfil de solo, textura do solo.

ABSTRACT: MODELING BULK DENSITY OF SUBSOIL UNDER NATIVE VEGETATION IN MINAS GERAIS, BRAZIL

Bulk density (ρ_b) is an important indicator of soil physical quality, but it is seldom assessed at greater depths due to sampling difficulties. Pedotransfer functions have been relatively successful in estimating ρ_b , but specific functions for most Brazilian biomes are not available. The aim of this study was to develop mathematical functions to describe ρ_b to a depth of 1 m in areas of native vegetation in central and southern Minas Gerais, Brazil. For determination of ρ_b , soil core samples were taken of 53 profiles of different soil orders at six depth intervals (0-5, 5-10, 10-20, 30-40, 50-60 and 90-100 cm). The soil ρ_b ranged from 0.66 to 1.74 kg dm⁻³, with a mean of 1.25 kg dm⁻³, and was generally lower in the 0-5 and 5-10 cm layers. Models based on particle size analysis and standard chemical properties were created by multiple stepwise linear regression and were able to describe ρ_b to a depth of 1 m. Soil organic carbon and clay, silt, and sand contents, as well as cation exchange capacity at pH 7.0, were the most relevant variables in the models, which achieved higher accuracy for Oxisols ($R^2_{ajust} = 0.85$), followed by Inceptisols ($R^2_{ajust} = 0.69$), nitic Alfisols ($R^2_{ajust} = 0.67$), and Ultisols ($R^2_{ajust} = 0.51$). Since modeling for the whole database resulted in $R^2_{ajust} = 0.50$, we conclude that stratification by soil order was useful for improving the equations, with the exception of the Ultisol order.

Keywords: pedotransfer function, multiple regression, soil profile, texture.

INTRODUÇÃO

A densidade do solo (Ds), também chamada de densidade aparente ou densidade global, é uma propriedade-chave em Ciência do Solo, considerada indicadora da qualidade estrutural do solo (Lima et al., 2006; Ferreira, 2010) por influenciar várias outras propriedades, como infiltração e retenção de água, e processos importantes como o crescimento radicular (Grossman e Reinsch, 2002; Stolf et al., 2011). A Ds é definida numericamente pela relação entre a massa do solo seco por unidade de volume, determinada a partir de amostras coletadas com estrutura preservada, e conhecer seu valor é fundamental para a correta recomendação da calagem e adubações, para definir práticas adequadas de manejo do solo, e mesmo para o cálculo de estoques de C do solo (Veldkamp, 1994; Fernandes e Fernandes, 2009; Throop et al., 2012).

Em solos não cultivados, a Ds geralmente apresenta variações naturais decorrentes basicamente das diferenças na estrutura do solo, mais especificamente da macro e microporosidade, que por sua vez são função da textura, do teor de carbono orgânico do solo (COS) e de sua mineralogia (Ferreira, 2010). O COS e a mineralogia têm também efeito indireto sobre a Ds, ao influenciar a densidade de partículas. Há também efeito da profundidade sobre a Ds, pois as camadas mais profundas, normalmente, apresentam menor teor de COS (Zinn et al., 2012), com agregados de menor tamanho, que permitem melhor empacotamento dos agregados. Há ainda o adensamento provocado pelo peso das camadas suprajacentes (Manrique e Jones, 1991) e a eluviação das partículas na fração argila, que também podem elevar a Ds em profundidade. Finalmente, o preparo anual

e cultivo intensivo do solo causam alterações na macroporosidade do solo e, assim, promovem graus variáveis de compactação, às vezes notados até a profundidade de 1,0 m (Pimentel, 2012).

Os levantamentos de solo e estudos pedológicos no Brasil que contêm dados de Ds são relativamente poucos, principalmente quando se trata de profundidades superiores a 30 cm (Benites et al., 2007). Isso ocorre porque, embora a determinação da Ds seja um procedimento simples, a coleta das amostras indeformadas em campo raramente é feita em razão do esforço e tempo necessários (Manrique e Jones, 1991; Kaur et al., 2002; Heuscher et al., 2005; Sequeira et al., 2014). A indisponibilidade generalizada desses dados levou a buscar formas alternativas para suas estimativas, como as funções de pedotransferência (*pedotransfer functions*, e. g. Bernoux et al., 1998; Minasny e Hartemink, 2011). Essas funções têm sido cada vez mais utilizadas para prever propriedades ou processos difíceis de serem medidos, a partir de dados obtidos mais facilmente (McBratney et al., 2011). Modelos de regressão múltipla têm sido desenvolvidos para estimar a Ds em diferentes ecossistemas com base em propriedades físicas e químicas do solo, sobretudo o teor de matéria orgânica do solo ou COS, e de frações granulométricas, com relativa acurácia (Quadro 1). Apesar dos ajustes razoáveis obtidos nesses modelos, seu potencial preditivo é limitado às condições experimentais empregadas e, portanto, devem ser utilizados com cautela para ecossistemas diferentes daqueles para os quais foram desenvolvidos (Bernoux et al., 1998; Kaur et al., 2002; De Vos et al., 2005; Benites et al., 2007; Martin et al., 2009).

No Brasil, algumas iniciativas já desenvolvidas apontam para um desempenho promissor dessa

modelagem. Bernoux et al. (1998) desenvolveram funções para estimar a Ds dos principais solos da bacia Amazônica, com base principalmente no teor de argila, com melhorias significativas nos ajustes ao incluir o pH e os teores de areia e COS como variáveis de entrada no modelo (R^2 aumentou de 0,37 para 0,56). Os autores observaram ainda que a modelagem para os dados estratificados por ordem taxonômica (Latosolos e Argissolos), para solos arenosos ou para apenas o horizonte A, permitiram melhorias na predição da Ds (Quadro 1), assim como observado por Manrique e Jones (1991). Contudo, Benites et al. (2007), utilizando uma base de dados

com cerca de 1.400 amostras de vários biomas brasileiros, observaram que a estratificação dos dados por profundidade ou por diferentes taxa não resultou em melhoria dos modelos gerados, talvez porque tal efeito seja melhor identificado em escala regional do que nacional, posto que há muitas diferenças entre Latossolos e Argissolos das Regiões Sul, Centro-Oeste e Amazônica, por exemplo. Assim, parece necessário o desenvolvimento de modelos regionais para estimativa da Ds e melhor entendimento dos processos e fatores controlando sua variação pedogenética. Tal calibração seria especialmente crítica para distinguir solos com

Quadro 1. Referências de modelos preditivos da densidade do solo (Ds), com local, condições, profundidade de abrangência, variáveis empregadas no ajuste e coeficientes de determinação das regressões

| Referência | Local | Variável para predição | Profundidade | R ² | Nº de dados | Observação |
|-------------------------|---|--|---------------------|---------------------------|--------------------|--|
| Grigal et al. (1989) | Centro-Norte dos EUA (florestas de Minnesota, Wisconsin e Michigan) | Matéria orgânica do solo (<i>loss on ignition</i>) | 0-25 cm e 25-175 cm | 0,75 0,89 | 800 232 (turfa) | Solos sob floresta Solos orgânicos (turfa) |
| Manrique e Jones (1991) | EUA, Hawaii, Porto Rico e outros | COS, argila e umidade a 1.500 kPa | Até hor. C | 0,60 0,76 0,53-0,74 | 12000 | p/ Inceptisols p/ Spodosols Ultisols, Alfisols, Vertisols, Oxisols e Inceptisols Método do torrão |
| Bernoux et al. (1998) | Bacia Amazônica (base RADAMBRASIL) | COS, argila, pH e areia COS e argila (p/ Latossolos) Argila, COS, pH, cascalho (p/ Argissolos) | 0-160 cm | 0,56 0,71-0,79 0,57 | 323 62 212 | A estratificação da base de dados por ordem taxonômica (Latosolos e Argissolos) melhorou a acurácia dos modelos |
| Calhoun et al. (2001) | Ohio-EUA | COS, silte, argila, profundidade Dados da descrição morfológica ⁽¹⁾ COS, silte, argila, profundidade e dados morfológicos | | 0,56 0,69 0,72 | 937 | Dados morfológicos combinados aos dados de laboratório (COS+textura) predisseram melhor a Ds que dados de laboratório. A estratificação pelo material de origem se evidenciou promissora |
| Kaur et al. (2002) | Almora, Índia | COS, argila, silte | 0-110 cm | 0,62 | 224 | Ajuste para quatro diferentes usos do solo (agricultura, floresta de pínus, floresta de carvalho e solo degradado (estéril) |
| Heuscher et al. (2005) | Porto Rico, Ilhas Virgens e outros (USDA-NRCS National Soil Survey Characterization Data) | COS, conteúdo de água, argila, silte e profundidade | 0-300 cm | 0,45 | 47000 aprox. | Método do torrão |
| De Vos et al. (2005) | Bélgica | Matéria orgânica do solo (<i>loss on ignition</i>) | 0-120 cm | 0,57 | 1614 | Subestimação sistemática da Ds |
| Benites et al. (2007) | Base de dados da Embrapa (vários biomas brasileiros) | COS, argila, SB | 0-100 cm | 0,66 | 1396 | A estratificação dos dados por profundidade ou por ordem (Latosolos e Argissolos) não melhorou a acurácia dos modelos |

⁽¹⁾ Posição na paisagem, material de origem, vegetação, textura, estrutura, consistência, cor e drenagem.

de correlação de Pearson para identificar a colinearidade entre as variáveis. Foram executadas análises de regressão múltipla linear com auxílio do programa JMP versão 5.1 (SAS, 2007) para a base de dados completa, isto é, de todas as classes taxonômicas e profundidades conjuntamente, ou após a estratificação por profundidades e, ou, por ordem taxonômica. Foi usado o método *stepwise (forward)*, em que cada variável independente é isolada e mantida constante enquanto as demais variam sistematicamente, sendo observados seus efeitos sobre a variável estimada. A profundidade foi incluída como variável independente quando pertinente, empregando-se o ponto médio da camada (e. g., 2,5 para a camada de 0-5 cm). Apenas as variáveis que atingiram o nível de significância <0,05 foram finalmente incluídas nos modelos de predição da Ds. Os dados foram submetidos aos testes dos pressupostos necessários à validação da regressão. A verificação da normalidade dos resíduos foi realizada por meio do teste W (Shapiro e Wilk, 1965) ($p > 0,05$), a igualdade de variâncias foi verificada pelo teste de Levene ($p > 0,05$) e a independência dos resíduos pela análise gráfica dos resíduos com auxílio do *software* SigmaPlot versão 11.0 (Systat Software Inc.). O desempenho dos modelos foi avaliado estatisticamente por meio dos valores da raiz quadrada do erro quadrático médio (REQM), que compara a *performance* de cada modelo em fazer previsões (acurácia) e do coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{ajust.}$).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Distribuição de frequência, estatística descritiva e efeito da profundidade

Em cada profundidade amostral, a Ds mostrou distribuição normal, confirmada pelo teste W quando $p > 0,05$, pela distribuição acumulada linear (Figura 2) e pela proximidade entre os valores de média e mediana (Quadro 2). Contudo, a normalidade não ocorreu quando a distribuição de frequência foi calculada para todas as profundidades conjuntamente ($n = 318$), em razão da maior concentração de valores acima da média, correspondente às maiores profundidades (>10 cm).

A Ds variou entre 0,66 e 1,74 kg dm⁻³, com média de 1,25 kg dm⁻³ (Quadro 2). Os menores valores observados nas camadas superficiais do solo se devem ao maior teor de matéria orgânica e à maior bioturbação e macroporosidade nessas camadas (Tomasella e Hodnett, 1998). Os coeficientes de variação calculados por profundidade variaram entre 6,3 e 22,7 %, com maior variabilidade nas camadas mais superficiais, onde ocorrem também maiores variações nos teores de COS, atividade biológica e maior frequência dos ciclos

de umedecimento e secagem, principais fatores a interferir na agregação do solo. Nota-se grande diferença entre a Ds média dos Latossolos, em todas as profundidades, e a Ds média de Argissolos, Cambissolos e Nitossolos, que foram muito semelhantes entre si. Entre as ordens amostradas neste estudo, somente os Latossolos apresentam estrutura granular, que proporciona simultaneamente maiores macro e microporosidade, que resultam em menor Ds. Entretanto, solos com estrutura predominantemente em blocos ou prismas tendem a apresentar maior Ds, por causa da menor macroporosidade, em condições de textura e mineralogia similar. Diferentemente do observado por Manrique e Jones (1991), a Ds parece se tornar constante para profundidades entre 20 e 100 cm para todas as ordens de solo (Quadro 2, Figura 3). Porém, tal tendência, modelada anteriormente (Araujo et al., 2011), está de acordo com a Ds constante (aproximadamente 0,85 kg dm⁻³) entre as profundidades de 0,5 a 5 m em um Latossolo gibbsítico de estrutura granular descrito por Silva et al. (2013), mas deveria ser melhor investigada em profundidades maiores para outras ordens de solo.

Análise de correlação de Pearson

De forma geral, os coeficientes da correlação de Pearson entre a Ds e os atributos físicos e químicos foram baixos ($r < |0,5|$), ao longo de todo o perfil (0-100 cm), conforme observado no quadro 3. Tal comportamento está em acordo com a complexidade e interatividade dos fatores e processos que controlam a Ds e é a causa da dificuldade e inacurácia comumente reportadas para sua modelagem. Dentre as 13 correlações significativas encontradas, destacaram-se aquelas com a profundidade, o P remanescente (P-rem), o teor de areia, a argila e o COS, esta a única a exceder $r = |0,5|$. A correlação positiva entre Ds e profundidade parece mais em razão da bioturbação na superfície do que do adensamento subsuperficial provocado pelas camadas sobrejacentes, mecanismo proposto por Manrique e Jones (1991), a julgar pela Ds constante abaixo de 40 cm (Figura 3). O teor de COS apresentou sempre correlação negativa com a Ds, explicada pela baixa densidade de partículas e ação cimentante do COS em macroagregados, aumentando a macroporosidade do solo. Com efeito, altos teores de COS estão estreitamente relacionados a solos bem-estruturados, com boa infiltração de água e qualidade física (Vezzani e Mielniczuk, 2009), e, conseqüentemente, menores valores de Ds. Os teores de H+Al e a CTC a pH 7,0 (T), por sua vez, estão indiretamente relacionados à Ds, pois dependem do teor de COS (Ebeling et al., 2008), uma vez que os grupos carboxílicos e fenólicos da matéria orgânica liberam o H⁺ protonado na determinação do H+Al (Portugal et al., 2010). Por isso, as correlações entre

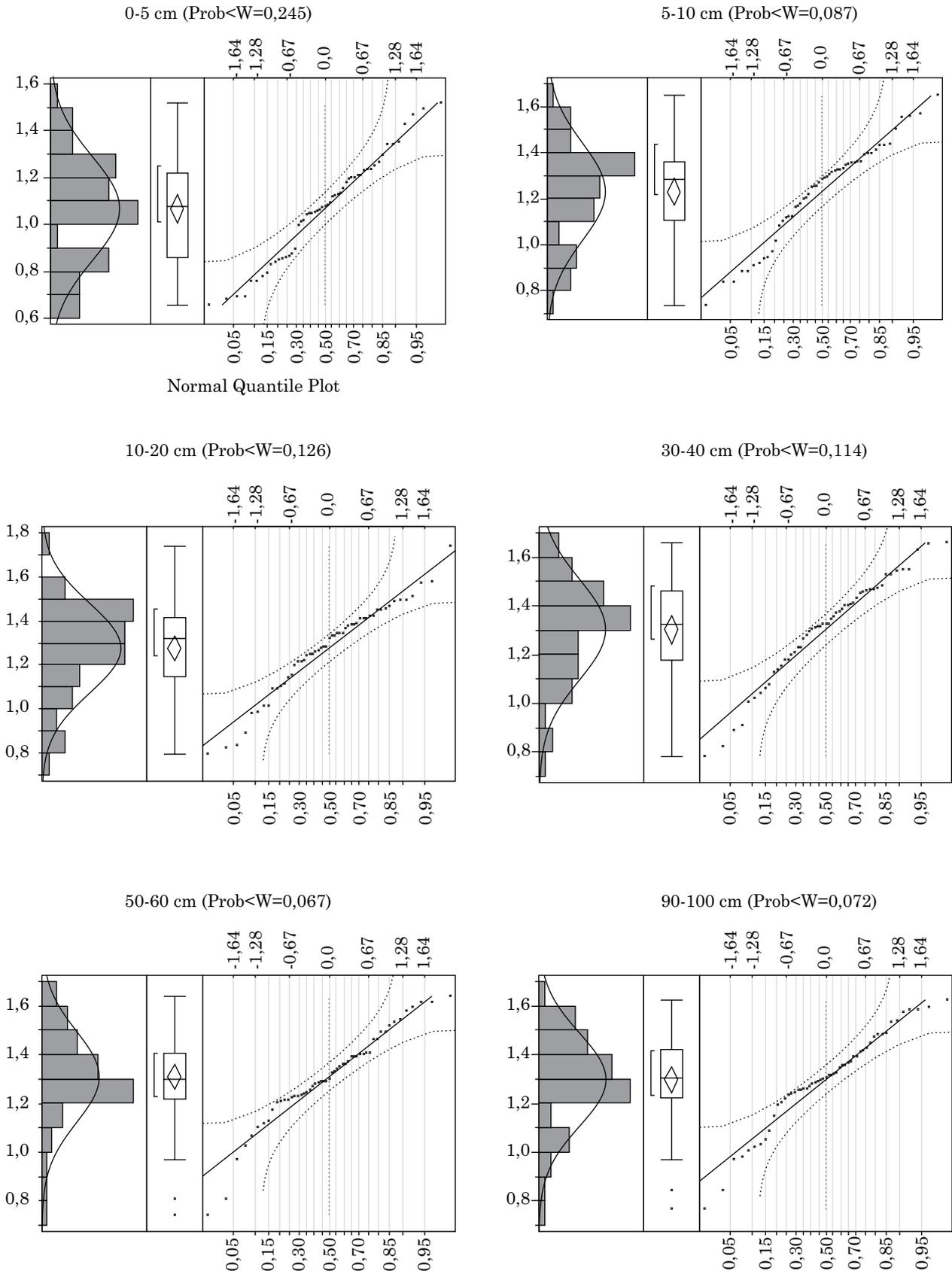


Figura 2. Distribuições de frequência e teste de normalidade de Shapiro-Wilk da densidade do solo por profundidade.

Quadro 2. Medidas de posição e dispersão para a densidade do solo para toda a base (n = 318) e segundo as principais ordens (n = 53) e profundidade do solo de vegetação natural da região centro e sul de Minas Gerais

| n | Prof. cm | Média ± desvio padrão | Mediana | Mínimo | Máximo | CV % |
|-----------------|-------------|-----------------------|---------|--------|--------|---------|
| | | kg dm ⁻³ | | | | |
| Todas as ordens | | | | | | |
| 53 | 0-5 | 1,07 ± 0,22 | 1,08 | 0,66 | 1,52 | 20,7 |
| | 5-10 | 1,23 ± 0,21 | 1,28 | 0,74 | 1,65 | 17,1 |
| | 10-20 | 1,28 ± 0,20 | 1,32 | 0,80 | 1,74 | 15,9 |
| | 30-40 | 1,30 ± 0,21 | 1,32 | 0,78 | 1,66 | 15,9 |
| | 50-60 | 1,31 ± 0,19 | 1,30 | 0,74 | 1,64 | 14,3 |
| | 90-100 | 1,30 ± 0,19 | 1,31 | 0,77 | 1,62 | 14,7 |
| Argissolo | | | | | | |
| 25 | 0-5 | 1,08 ± 0,22 | 1,06 | 0,69 | 1,52 | 20,7 |
| | 5-10 | 1,23 ± 0,21 | 1,28 | 0,89 | 1,56 | 16,8 |
| | 10-20 | 1,29 ± 0,19 | 1,33 | 0,82 | 1,57 | 14,5 |
| | 30-40 | 1,34 ± 0,18 | 1,38 | 0,91 | 1,63 | 13,5 |
| | 50-60 | 1,32 ± 0,13 | 1,29 | 1,10 | 1,61 | 9,6 |
| | 90-100 | 1,32 ± 0,15 | 1,32 | 0,97 | 1,58 | 11,4 |
| Cambissolo | | | | | | |
| 11 | 0-5 | 1,06 ± 0,16 | 1,08 | 0,84 | 1,27 | 15,0 |
| | 5-10 | 1,29 ± 0,08 | 1,30 | 1,11 | 1,43 | 6,3 |
| | 10-20 | 1,37 ± 0,11 | 1,38 | 1,21 | 1,58 | 7,9 |
| | 30-40 | 1,35 ± 0,19 | 1,32 | 1,08 | 1,66 | 13,8 |
| | 50-60 | 1,38 ± 0,16 | 1,36 | 1,12 | 1,64 | 11,3 |
| | 90-100 | 1,34 ± 0,17 | 1,32 | 0,98 | 1,59 | 13,0 |
| Nitossolo | | | | | | |
| 8 | 0-5 | 1,14 ± 0,26 | 1,22 | 0,66 | 1,43 | 22,7 |
| | 5-10 | 1,30 ± 0,28 | 1,32 | 0,74 | 1,65 | 21,4 |
| | 10-20 | 1,29 ± 0,26 | 1,30 | 0,84 | 1,74 | 20,1 |
| | 30-40 | 1,35 ± 0,16 | 1,38 | 1,06 | 1,55 | 11,7 |
| | 50-60 | 1,36 ± 0,19 | 1,33 | 1,07 | 1,61 | 13,8 |
| | 90-100 | 1,34 ± 0,17 | 1,33 | 1,09 | 1,62 | 12,7 |
| Latossolo | | | | | | |
| 6 | 0-5 | 0,85 ± 0,19 | 0,78 | 0,68 | 1,13 | 22,6 |
| | 5-10 | 0,96 ± 0,14 | 0,91 | 0,84 | 1,17 | 14,7 |
| | 10-20 | 0,99 ± 0,14 | 0,99 | 0,80 | 1,15 | 13,8 |
| | 30-40 | 0,98 ± 0,18 | 0,95 | 0,78 | 1,18 | 18,0 |
| | 50-60 | 1,00 ± 0,20 | 1,00 | 0,74 | 1,23 | 20,2 |
| | 90-100 | 0,99 ± 0,18 | 1,01 | 0,77 | 1,27 | 17,7 |
| Média geral | | | | | | |
| 318 | 0-100 | 1,25 ± 0,22 | 1,28 | 0,66 | 1,74 | 18,0 |

As ordens Luvisolo, Neossolo e Plintossolo apresentam n = 1, portanto, constam apenas nas estatísticas de Todas as ordens e na Média geral.

H+Al, T e Ds evidenciaram a mesma tendência negativa que a do COS, embora significativas apenas para a camada de 0-20 cm.

Também foram notadas correlações significativas, mas com sinais opostos, entre a Ds e os teores de

argila e P-rem em cada uma das profundidades amostradas. O efeito negativo do teor de argila é explicado pelo fato de que solos mais argilosos possuem maior microporosidade, em contraste àqueles mais ricos em areia, e pela maior retenção

de COS em solos com maior teor de argila (Zinn et al., 2012). De fato, o teor de areia se correlacionou positivamente com a Ds abaixo de 20 cm, e tais tendências corroboram a proposição de que a textura exerce papel mais significativo que o COS no controle da Ds em profundidade, conforme Manrique e Jones (1991). A correlação positiva com P-rem se deve provavelmente ao fato de que essa propriedade é inversamente correlacionada ao teor de argila.

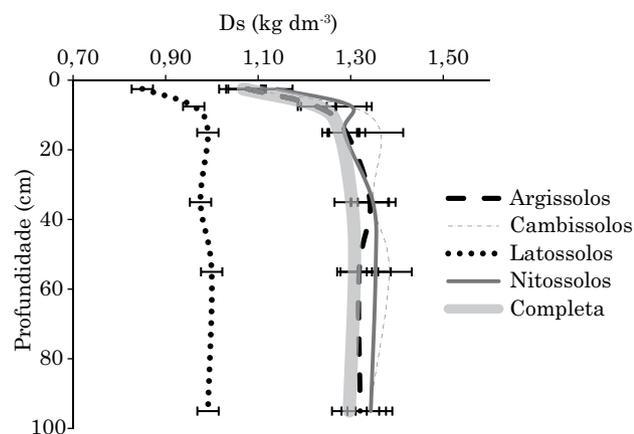


Figura 3. Densidade média ao longo de 1 m de profundidade, por ordem de solo.

Equações de predição da Ds

No quadro 4, sumarizam-se os parâmetros das melhores funções testadas para o conjunto de dados ou diferentes subconjuntos, p-valores dos testes de normalidade (P_W) e homocedasticidade (P_L) realizados. Para a base de dados completa, a melhor estimativa da Ds foi obtida em razão dos teores de COS, da areia e da saturação por bases, em ordem decrescente de importância, que explicaram 50 % da variação da Ds. Nesse modelo, o teor de COS foi a variável independente que mais explicou a variação da Ds ($R^2_{ajust} = 0,33$ e $REQM = 0,176$). A inclusão do teor de areia, segunda variável a melhor explicar o comportamento da Ds, elevou o R^2 ajustado para 0,47 ($REQM = 0,156$), seguida pela saturação por bases ($R^2_{ajust} = 0,50$ e $REQM = 0,152$). É interessante notar que a profundidade média da camada não foi incluída, provavelmente por seu efeito já estar essencialmente descrito na variação no COS (Zinn et al., 2012).

De forma geral, a estratificação dos dados por camadas ou ordem taxonômica proporcionou melhorias significativas na acurácia dos modelos, pois os subconjuntos apresentados foram descritos por funções com menor $REQM$ e maior R^2 ajustado, exceto para os subconjuntos 0-20 e 20-100 cm da base completa. Na função para a base completa menos Argissolos (0-100 cm), houve melhoria na acurácia ($R^2_{ajust} = 0,61$ e $REQM = 0,1441$) por causa da simples remoção de muitos dados, já que

Quadro 3. Análise de correlação de Pearson entre densidade do solo (Ds) e as propriedades dos solos de 53 perfis de sete ordens coletados em vegetação natural na região centro e sul de Minas Gerais, de acordo com a profundidade

| | 0-100 cm | 0-5 cm | 5-10 cm | 10-20 cm | 30-40 cm | 50-60 cm | 90-100 cm |
|----------------------|----------|---------|---------|----------|----------|----------|-----------|
| Profundidade | 0,24** | - | - | - | - | - | - |
| Areia | 0,46** | ns | ns | ns | 0,37** | 0,51** | 0,35** |
| Silte | -0,12** | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| Argila | -0,37** | -0,43** | -0,37** | -0,42** | -0,42** | -0,55** | -0,41** |
| pH(H ₂ O) | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| P | -0,22** | ns | ns | ns | ns | ns | 0,32** |
| K | -0,14** | ns | ns | ns | ns | 0,33** | ns |
| Ca ²⁺ | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| Mg ²⁺ | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| Al ³⁺ | -0,14** | -0,36** | -0,30** | ns | ns | ns | ns |
| H+Al | -0,34** | -0,40** | -0,44** | -0,35** | ns | ns | ns |
| SB | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| t | -0,13** | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| T | -0,39** | -0,56** | -0,45** | -0,40** | ns | ns | ns |
| V | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns |
| m | -0,12** | -0,29** | -0,30** | ns | ns | ns | ns |
| P-rem | 0,22** | 0,30** | 0,40** | 0,41** | 0,47** | 0,46** | 0,29** |
| COS | -0,55** | -0,54** | -0,53** | -0,54** | -0,37** | -0,55** | -0,52** |

** significativo para $p < 0,01$, ns: não significativo.

Quadro 4. Regressões múltiplas lineares ajustadas aos dados agrupados de diferentes formas

| Base de dados | Modelo | n | R ² _{ajust.} | REQM ⁽¹⁾ | P _W ⁽²⁾ | P _L ⁽³⁾ |
|----------------------------------|---|-----|----------------------------------|---------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Completa (0-100 cm) | $\hat{y} = 1,183 + (0,0052 \times \text{areia}) + (0,0013 \times V) - (0,0773 \times \text{COS})$ | 318 | 0,50 | 0,1520 | 0,574 | 0,085 |
| Completa (0-20 cm) | $\hat{y} = 1,241 + (0,0040 \times \text{areia}) + (0,0065 \times \text{profundidade}) - (0,0094 \times \text{H+Al}) - (0,0591 \times \text{COS})$ | 159 | 0,49 | 0,1637 | 0,314 | 0,108 |
| Completa (20-100 cm) | $\hat{y} = 1,366 + (0,0060 \times \text{areia}) - (0,0015 \times \text{profundidade}) - (0,0011 \times m) - (0,1110 \times \text{COS})$ | 159 | 0,48 | 0,1337 | 0,743 | 0,208 |
| Completa - Argissolos (0-100 cm) | $\hat{y} = 1,7169 + (0,0385 \times \text{Al}^{3+}) + (0,0032 \times V) - (0,0012 \times \text{profundidade}) - (0,0029 \times \text{silte}) - (0,0055 \times \text{argila}) - (0,0274 \times P) - (0,1035 \times \text{COS})$ | 168 | 0,61 | 0,1441 | 0,835 | 0,176 |
| Argissolos (0-100 cm) | $\hat{y} = 1,4463 + (0,0054 \times \text{P-rem}) - (0,0058 \times \text{silte}) - (0,3380 \times K) - (0,0560 \times \text{COS})$ | 150 | 0,51 | 0,1374 | 0,267 | 0,679 |
| Nitossolos (0-100 cm) | $\hat{y} = 1,6768 - (0,0035 \times \text{profundidade}) - (0,0044 \times \text{areia}) - (0,0165 \times \text{H+Al}) - (0,1734 \times \text{COS})$ | 48 | 0,67 | 0,1295 | 0,890 | 0,471 |
| Latossolos (0-100 cm) | $\hat{y} = 1,9881 + (0,0141 \times T) - (0,0056 \times \text{argila}) - (0,1253 \times \text{pH}) - (0,0914 \times \text{COS})$ | 36 | 0,85 | 0,0632 | 0,964 | 0,989 |
| Latossolos (0-20 cm) | $\hat{y} = 1,5381 - (0,0069 \times \text{argila}) - (0,0484 \times \text{COS})$ | 18 | 0,90 | 0,0516 | 0,970 | 0,717 |
| Latossolos (20-100 cm) | $\hat{y} = 1,2906 + (0,0026 \times \text{profundidade}) - (0,0095 \times \text{silte}) - (0,0094 \times \text{argila}) + (0,0416 \times T)$ | 18 | 0,94 | 0,0398 | 0,496 | 0,524 |

⁽¹⁾ Raiz quadrada do erro quadrático médio. ⁽²⁾ P-valor para o teste W para normalidade dos resíduos (Shapiro-Wilk). ⁽³⁾ P-valor para o teste de igualdade de variância dos resíduos (Levene). Teores de areia, silte, argila, saturação por bases (V), saturação por Al (m) e teor de COS, em %. Teores de K, Al, H+Al, T, em cmol_c dm⁻³. Teores de P e P-rem, em mg dm⁻³. Profundidade refere-se à profundidade média, em cm, de cada camada amostrada.

a ordem dos Argissolos foi a mais frequente de toda a base. Entretanto, houve a inclusão de muitas variáveis preditoras (Al³⁺, V, profundidade média, teor de silte, teor de argila, P e COS), o que reduz a aplicabilidade do modelo, conforme Minasny e Hartemink (2011). As modelagens para os Latossolos foram consideradas as mais adequadas para estimar a Ds, pois, para a camada de 0-100 cm, a função explicou 85 % da variação da Ds em razão de teor de argila, COS, T, e pH, com melhoria expressiva na acurácia do modelo (REQM = 0,0632). Nesse modelo, apenas a variável teor de argila explicou 64 % da variação da Ds; e, em conjunto com COS, 79 % dessa variação. Ao se estratificar a base de Latossolos para 0-20 e 20-100 cm, obteve-se R² ajustado de 0,90 e 0,94 e REQM de 0,0516 e 0,0398, respectivamente, o que, embora se refira a um pequeno número de observações (n = 18), sugere bom potencial para essa ordem.

Apesar de a regressão múltipla ajustada aos Argissolos (n = 150) ter incluído poucas variáveis preditoras (COS, silte, P-rem e K), a função apresentou desempenho similar ao da função completa (0-100 cm), com R² ajustado de 0,51 e REQM de 0,1374, que sugere a alta variabilidade

de Ds e demais propriedades na ordem Argissolos e não justifica esta estratificação.

O modelo gerado para os Nitossolos (0-100 cm) apresentou R² ajustado de 0,67, com boa acurácia na predição (REQM = 0,1295). Foram testadas e descartadas outras diferentes formas de estratificação, agrupando os dados por ordens taxonômicas; por exemplo, base completa menos Latossolos, Argissolos + Cambissolos, Argissolos + Cambissolos + Nitossolos, que resultaram em número elevado de variáveis preditoras, baixo R² ajustado e, ou, baixa acurácia do modelo, sendo portanto desconsiderados.

O teor de COS foi geralmente a variável de maior peso na modelagem da Ds (Quadro 4), coerentemente com a análise de correlação de Pearson (Quadro 3). Em alguns casos, como para Latossolos (20-100 cm), isso foi observado de maneira indireta pela importância da variável T, diretamente relacionada ao teor de COS (Ciotta et al., 2003). De forma geral, a fração areia foi mais influente na modelagem da Ds que as frações silte e argila. Seu papel positivo nos modelos, i. e., seu aumento causa elevação na Ds, foi identificado em quatro dos nove modelos apresentados, com destaque para aqueles gerados

com a base completa. A exceção foi a equação para Nitossolos, em que o teor de areia aparece como fator negativo. Isso, por exclusão, resulta em fator positivo para o silte, mesmo que esse não apareça na equação, já que a argila também se correlacionou negativamente com a Ds, sugerindo um papel silte como fator de adensamento nessa ordem taxonômica.

Na figura 4, evidencia-se graficamente a relação entre valores observados e estimados pelas funções ajustadas às bases de dados completa, completa menos Argissolos, para Argissolos e para Latossolos (todas para 0-100 cm). Observou-se que, apesar do espalhamento dos dados, as distribuições dos pontos se deram basicamente em torno da linha 1:1. Nota-se nas figuras 4a, 4b e 4c ligeira tendência de superestimar os valores de Ds abaixo da média e de subestimar os valores acima dela. Porém, esses resultados apresentaram-se mais adequados à modelagem de valores distantes da média do que alguns modelos apresentados por Benites et al. (2007), os quais usaram uma base de dados nacionais e bem maior e, conseqüentemente, de maior

variabilidade dos diferentes fatores e processos que influenciam a Ds. A distribuição de pontos para os Latossolos (Figura 4d) parece indicar a melhor adequação dos modelos, o que sugere, ao lado do seu padrão diferenciado de Ds, grande vantagem na modelagem em separado dessa ordem, o que merece mais estudos.

Finalmente, deve-se notar que as funções geradas devem ser calibradas para uso em regiões do Brasil que sejam muito distantes da amostrada neste estudo, como para solos de biomas diferentes; isto é, Latossolos de estrutura em blocos na Amazônia, sul do Brasil e tabuleiros costeiros, Argissolos sobre o grupo Barreiras etc. Ainda, essas funções não se aplicam a solos com horizontes orgânicos ou caráter coeso. Embora as funções para predição da Ds sejam usadas principalmente em estimativas de estoque de C e N, seu valor reside também como modelos teóricos para entender importantes processos no solo (McBratney et al., 2002), como para identificar e monitorar os principais fatores de interferência na Ds e qualidade física do solo.

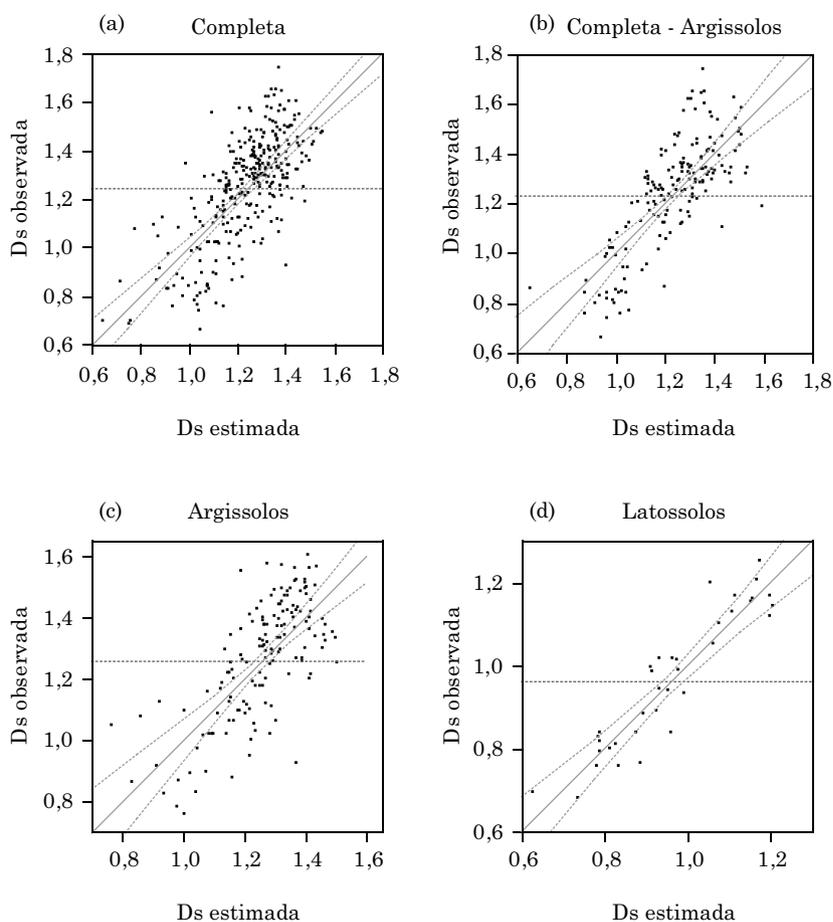


Figura 4. Modelos obtidos para as bases de dados (0-100 cm) completa (a), completa menos Argissolos (b), somente Argissolos (c) e Latossolos (d). As linhas pontilhadas ao longo da linha 1:1 (contínua) mostram o intervalo de confiança para $p > 0,95$, e a linha pontilhada horizontal, a Ds média da população.

CONCLUSÕES

A densidade do solo sob vegetação nativa variou entre 0,66 e 1,74 kg dm⁻³, apresentando valores geralmente menores em Latossolos e camadas superficiais.

Para os Latossolos e Cambissolos a densidade do solo média aumentou até 20 cm e se manteve constante até 1 m de profundidade, enquanto que para os Argissolos e Nitossolos ela se manteve constante abaixo de 40 cm.

Os fatores que melhor correlacionaram negativamente com a densidade do solo foram teor de COS, argila, CTC a pH 7, H+Al e positivamente foi o teor de areia.

As regressões lineares múltiplas apresentaram maior capacidade preditiva da Ds até 1 m de profundidade para Latossolos em áreas de vegetação nativa das regiões central e sul de Minas Gerais.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo apoio concedido para realização da maioria das amostragens (Projetos CAG- APQ/01352-09 e 00720-12) e pela bolsa concedida ao primeiro autor. A Alessandro Vitor Pedroso e Marla Alessandra Araujo, pela ajuda prestada em trabalhos de campo e preparo dos dados. Ao prof. Carlos Alberto Silva (DCS-UFLA), pelo apoio nas análises de carbono orgânico do solo.

REFERÊNCIAS

- Araujo MA, Guerra AR, Pedroso AV, Zinn YL. Densidade do solo sob vegetação nativa em Minas Gerais: efeito de profundidade e ordem de solo. In: Anais do 33º Congresso Brasileiro de Ciência do Solo; [CD-ROM] 2011, Uberlândia. Uberlândia: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; 2011.
- Benites VM, Machado PLOA, Fidalgo ECC, Coelho MR, Madari BE. Pedotransfer functions for estimating soil bulk density from existing soil survey reports in Brazil. *Geoderma*. 2007;139:90-7.
- Bernoux M, Cerri C, Arrouays D, Jolivet C, Volkoff B. Bulk densities of Brazilian Amazon soils related to other soil properties. *Soil Sci Soc Am J*. 1998;62:743-9.
- Bouyoucos GJ. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agron J*. 1962;54:464-5.
- Calhoun FG, Smeck NE, Slater BL, Bigham JM, Hall GF. Predicting bulk density of Ohio soils from morphology, genetic principles, and laboratory characterization data. *Soil Sci Soc Am J*. 2001;65:811-9.
- Ciotta MN, Bayer C, Fontoura SMV, Ernani PR, Albuquerque JA. Matéria orgânica e aumento da capacidade de troca de cátions em solo com argila de atividade baixa sob plantio direto. *Ci Rural*. 2003;33:1161-4.
- De Vos B, van Meirvenne M, Quataert P, Deckers J, Muys B. Predictive quality of pedotransfer functions for estimating bulk density of forest soils. *Soil Sci Soc Am J*. 2005;69:500-10.
- Ebeling AG, Anjos LHC, Perez DV, Pereira MG, Valladares GS. Relação entre acidez e outros atributos químicos em solos com teores elevados de matéria orgânica. *Bragantia*. 2008;67:429-39.
- Fernandes FA, Fernandes AHBM. Cálculo dos estoques de carbono do solo sob diferentes condições de manejo. Corumbá: Embrapa Pantanal; 2009. (Comunicado técnico, 69).
- Ferreira MM. Caracterização física do solo. In: Jong van Lier Q, editor. Física do solo. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; 2010. p.1-27.
- Fontes LEF. Nova proveta para sedimentação da suspensão do solo na determinação da fração argila por densimetria. *R Bras Ci Solo*. 1982;6:152-4.
- Giarola NFB, Silva AP, Tormena C, Souza LS, Ribeiro LP. Similaridades entre o caráter coeso dos solos e o comportamento hardsetting: Estudo de caso. *R Bras Ci Solo*. 2001;25:239-47.
- Grigal D, Brovold S, Nord WS, Ohmann FL. Bulk density of surface soils and peat in the north central United States. *Can J Soil Sci*. 1989;69:895-900.
- Grossman RB, Reinsch TG. Bulk density and linear extensibility. In.: Dane JH, Clarke Topp G, editors. *Methods of soil analysis: Physical methods*. Madison: Soil Science Society of America; 2002. Pt.4. p.201-28. (Book series, 5).
- Heuscher S, Brandt C, Jardine P. Using soil physical and chemical properties to estimate bulk density. *Soil Sci Soc Am J*. 2005;69:1-7.
- Kaur R, Kumar S, Gurung H. A pedo-transfer function (PTF) for estimating soil bulk density from basic soil data and its comparison with existing PTFs. *Aust J Soil Res*. 2002;40:847-57.
- Lima CLR, Silva AP, Imhoff SC, Leão TP. Estimativa da capacidade de suporte de carga do solo a partir da avaliação da resistência à penetração. *R Bras Ci Solo*. 2006;30:217-23.
- Lima Neto JA, Ribeiro MR, Corrêa MM, Souza Júnior VS, Lima JFWF, Ferreira RFAL. Caracterização e gênese do caráter coeso em Latossolos Amarelos e Argissolos dos tabuleiros costeiros do estado de Alagoas. *R Bras Ci Solo*. 2009;33:1001-11.
- Manrique LA, Jones CA. Bulk density of soils in relation to soil physical and chemical properties. *Soil Sci Soc Am J*. 1991;55:476-81.
- Martin MP, Lo Seen D, Boulonne L, Jolivet C, Nair KM, Bourgeon G, Arrouays D. Optimizing pedotransfer functions for estimating soil bulk density using boosted regression trees. *Soil Sci Soc Am J*. 2009;73:485-93.
- McBratney AB, Minasny B, Tranter G. Necessary meta-data for pedotransfer functions. *Geoderma*. 2011;160:627-9.
- McBratney AB, Minasny B, Cattle SR, Vervoort RW. From pedotransfer functions to soil inference systems. *Geoderma*. 2002;109:41-73.
- Minasny B, Hartemink AE. Predicting soil properties in the tropics. *Earth-Sci Rev*. 2011;106:52-62.
- Pimentel RM. Propriedades físicas, carbono e nitrogênio do solo em sistemas agropecuários [dissertação]. Lavras: Universidade Federal de Lavras; 2012.

- Portugal A, Costa O, Costa L. Propriedades físicas e químicas do solo em áreas com sistemas produtivos e mata na região da Zona da Mata Mineira. *R Bras Ci Solo*. 2010;34:575-85.
- SAS Institute. JMP 7 Statistics and graphics guide. Cary, NC: 2007.
- Sequeira CH, Wills SA, Seybold CA, West LT. Predicting soil bulk density for incomplete databases. *Geoderma*. 2014;213:64-73.
- Shapiro SS, Wilk MB. An analysis of variance test for normality. *Biometrika*. 1965;52:591-611.
- Silva FC, Abreu MF, Pérez DV, Eira PA, Abreu CA, Raij B van, Gianello C, Coelho AM, Quaggio JA, Tedesco MJ, Silva CA, Cantarella H, Barreto WO. Métodos de análises químicas para avaliação da fertilidade do solo. In: Silva FC, editor. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2ª.ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica; 2009. p.107-89.
- Silva TAC, Pádua EJ, Faria JA, Araújo MA, Zinn YL. Densidade do solo e carbono orgânico do solo ao longo do perfil de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob vegetação nativa. In: Anais do 26º Congresso de Iniciação Científica da UFLA-CIUFLA; 2013; Lavras. Lavras: Universidade Federal de Lavras; 2013.
- Skorupa ALA, Fay M, Zinn YL, Scheuber M. Assessing hydric soils in a gallery forest in the Brazilian Cerrado. *Soil Use Manage*. 2013;29:119-29.
- Stolf R, Thurler AM, Bacchi OOS, Reichardt K. Method to estimate soil macroporosity and microporosity based on sand content and bulk density. *R Bras Ci Solo*. 2011;35:447-59.
- Throop HL, Archer SR, Monger HC, Waltman S. When bulk density methods matter: Implications for estimating soil organic carbon pools in rocky soils. *J Arid Environ*. 2012;77:66-71.
- Tomasella J, Hodnett MG. Estimating soil water retention characteristics from limited data in Brazilian Amazonia. *Soil Sci*. 1998;163:190-202.
- Veldkamp E. Organic carbon turnover in three tropical soils under pasture after deforestation. *Soil Sci Soc Am J*. 1994;58:175-80.
- Vezzani F, Mielniczuk J. Uma visão sobre qualidade do solo. *R Bras Ci Solo*. 2009;33:743-55.
- Zinn YL, Guerra AR, Silva AC, Marques JJ, Oliveira GC, Curi N. Perfis de carbono orgânico do solo nas regiões sul e serra do espinhaço meridional, Minas Gerais: Modelagem em profundidade. *R Bras Ci Solo*. 2012;36:1395-406.