

# **ESTIMATIVA DA DENSIDADE DO SOLO POR EQUAÇÕES DE PEDO- TRANSFERÊNCIA NA AMAZÔNIA CENTRAL**

Henrique Seixas Barros & Philip Martin Fearnside

Tradução de:

Barros, Henrique Seixas & Philip M. Fearnside. 2015. Pedo-transfer functions for estimating soil bulk density in central Amazonia. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* (no prelo) ISSN 0100-0683

## ESTIMATIVA DA DENSIDADE DO SOLO POR EQUAÇÕES DE PEDO-TRANSFERÊNCIA NA AMAZÔNIA CENTRAL

RESUMO: A densidade do solo é um parâmetro de difícil aferição em condições de campo na floresta amazônica e exige rigor metodológico para a realização de inventários dos estoques de carbono e nutrientes nos solos, fazendo com que esse processo se torne oneroso e, certas vezes, inviável, dependendo das condições de trabalho. Objetivou-se com esse estudo gerar modelos para estimar a densidade do solo a partir de parâmetros facilmente medidos em campo com confiabilidade, presentes em muitos inventários pedológicos. A construção dos modelos de regressão para estimar a densidade do solo usou dados sobre o teor de carbono, conteúdo de argila e pH em H<sub>2</sub>O medidos em 140 parcelas permanentes em florestas de terra-firme da região de Manaus, Estado do Amazonas, Brasil. Os resultados foram interpretados de acordo com o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e o critério Akaike de informação (AIC) dos modelos. Os modelos foram validados por meio de uma série de dados composta por 125 parcelas diferentes das usadas na geração dos modelos. O modelo que melhor estimou a densidade nas condições desse estudo foi o que incluiu o conteúdo de argila e o pH em H<sub>2</sub>O como variáveis independentes e apresentou  $R^2 = 0,73$  e AIC = -250,29. Nosso modelo foi comparado a equações existentes na literatura quanto ao desempenho da predição dos valores de densidade do solo. Os resultados apontaram que o uso da equação calibrada localmente apresentou melhor desempenho para estimar a densidade do solo para as florestas de terra-firme da região de Manaus.

Termos de indexação: densidade do solo, floresta amazônica, terra-firme, Manaus, Brasil, floresta tropical, solos tropicais.

## PEDO-TRANSFER FUNCTIONS FOR ESTIMATING SOIL BULK DENSITY IN CENTRAL AMAZONIA.

SUMMARY: Soil bulk density is difficult to measure under field conditions in the Amazon forest. Rigorous methodological criteria must be applied to make reliable inventories of carbon stocks and soil nutrients, thus making this process expensive and sometimes unfeasible. This study aimed to generate models to estimate soil bulk density based on parameters that can be easily and reliably measured in the field and are available in many soil-related inventories. Stepwise regression models to predict bulk density were constructed using data on soil carbon content, clay content and pH in H<sub>2</sub>O from 140 permanent plots in *terra firme* (upland) forests in the Manaus region in Amazonas state, Brazil. The results were interpreted according to the coefficient of determination ( $R^2$ ) and the Akaike information criterion (AIC) models and validated for a dataset consisting of 125 plots that were different from those used to generate the models. The model with best performance in estimating soil bulk density under the conditions of this study included clay content and pH in H<sub>2</sub>O as independent variables and had  $R^2 = 0.73$  and AIC = -250.29. This model's performance for predicting soil density was compared with that of models from the literature. The results showed that the locally calibrated equation was the most accurate for estimating soil bulk density for upland forests in the Manaus region.

Index terms: soil density, bulk density, Amazon forest, *terra firme*, Manaus, Brazil, tropical forest, rainforest, tropical soils.

## INTRODUÇÃO

A densidade do solo é um dos parâmetros utilizados na quantificação dos estoques de carbono do solo (Veldkamp, 1994) e, portanto de grande importância para os cálculos dos inventários nacionais de emissões de gases do efeito estufa da Convenção Quadro sobre Mudança do Clima (UNFCCC). No entanto, o parâmetro é uma das maiores fontes de incerteza para as estimativas dos estoques de carbono do solo (Fearnside & Barbosa, 1998; Taalab et al., 2012). Isso porque a coleta de amostras indeformadas é trabalhosa, exigindo-se alto rigor metodológico para obter precisão no campo de forma a não comprometer a informação gerada, tornando comum estimativas de estoque de carbono do solo que utilizam valores médios para densidade e valores específicos de concentração de carbono (Bernoux et al., 1998).

Apesar a determinação desse parâmetro advir de uma razão entre massa e volume, variáveis de fácil detecção, é um fato que existe dificuldade em se obter informações seguras sobre a densidade do solo. Isso vem estimulando a criação de muitas predições da densidade do solo que exploram as relações entre esse parâmetro e outras variáveis mais comumente disponíveis em inventários pedológicos, a fim de garantir a confiabilidade sobre os estoques de carbono e reduzir os custos de avaliação (Federer et al., 1993; Bernoux et al., 1998; 2002; Tomasella & Hodnett, 1998; Calhoun et al., 2001; Heuscher et al., 2005; Benites et al., 2007; Tranter et al., 2007; Steller et al., 2008; Gharahi-Ghehi et al., 2012; Chaudhari et al., 2013).

Equações de pedo-transferência (PTFs) vêm sendo amplamente usadas nos estudos dos solos para estimar valores difíceis de serem obtidos em campo (Minasny & Hartemink, 2011). As PTFs construídas com base em parâmetros comuns em inventários pedológicos, como teor de carbono orgânico e quantidade de argila, mostram grande potencial para representar as medidas diretas de densidade do solo quando essas são de difícil acesso ou estão indisponíveis (Benites et al., 2007).

Assim, a tendência é que maior número de estimativas sejam geradas localmente, contribuindo para diminuir as incertezas das equações e cálculos derivados desse parâmetro. Deve ser destacado que a medição dos valores reais da densidade do solo em campo é sempre mais confiável do que valores estimados a partir de variáveis tão ou mais complexas e que apresentam alta variabilidade espacial.

Bernoux et al. (1998) geraram equações para estimativa da densidade baseados na série de dados dos inventários do RADAMBRASIL, publicados entre 1973 e 1982 pelo Ministério de Minas e Energia. Apesar da vasta série de dados da geologia e geomorfologia, vegetação, solos e uso da terra, esses inventários carecem de informações sobre a densidade dos solos, motivando a criação de equações para estimar esse parâmetro.

Entendendo a necessidade de criar equações mais bem ajustadas localmente, esse trabalho buscou gerar modelos de regressão para estimar a densidade a partir de parâmetros do solo disponíveis nos inventários pedológicos das reservas do Projeto Dinâmica Biológica de Fragmentos

86 Florestais (PDBFF), bem como, comparar o desempenho na predição da densidade do solo de  
 87 florestas de terra-firme da região de Manaus entre as equações geradas localmente e equações já  
 88 existentes, disponíveis na literatura.

89

## 90 MATERIAL E MÉTODOS

91

### 92 Locais de estudo

93 O estudo foi realizado nas reservas do PDBFF (Figura 1) aproximadamente 70 km ao norte  
 94 de Manaus (2°30'S, 60°W). A altitude local varia entre 50 e 100 m acima do nível médio do mar, a  
 95 temperatura média anual, medida em Manaus é 26,7 °C, a pluviosidade média anual é de 2.200 mm,  
 96 com uma estação seca pronunciada de julho a setembro (Fearnside & Leal Filho, 2001).

97

98 [Figura 1 aqui]

99

100 Os solos da região foram classificados como Latossolos Amarelos álicos segundo os mapas  
 101 do RADAMBRASIL (Fearnside & Leal Filho, 2001), sendo altamente lixiviados, ácidos e pobres  
 102 em nutrientes (Chauvel, 1982; Chauvel et al., 1987). De acordo com o atual sistema brasileiro de  
 103 classificação de solos (SiBCS) esses solos estão na categoria dos Latossolos Amarelos Alumínicos  
 104 (EMBRAPA, 2013).

105 A vegetação típica desta região da Amazônia central é caracterizada como floresta densa de  
 106 terra-firme. A diversidade de árvores pode ser considerada alta, apresentando em média mais de 280  
 107 espécies (diâmetro à altura do peito - DAP > 10 cm) por hectare na floresta intacta (Oliveira &  
 108 Mori, 1999).

109 Em cada uma das reservas do PDBFF foram instalados uma ou mais malhas (*grids*) de  
 110 parcelas permanentes medindo 1 ha, subdivididos em 25 parcelas de 20 × 20 m. A cada vértice  
 111 desses grids foi atribuído uma letra e um número, criando um sistema de falsas coordenadas que  
 112 permite a localização exata dos *grids* de coleta em campo de acordo com a Figura 2.

113

114 [Figura 2 aqui]

115

### 116 Amostragem de solo

117 Amostras para determinação da concentração de carbono foram obtidas com a utilização de  
 118 um trado de solo do tipo rosca. Cada amostra individual foi composta por cinco subamostras  
 119 retiradas nas quatro extremidades e no centro de cada parcela. Para determinação da densidade do  
 120 solo uma amostra foi coletada no centro de cada uma das parcelas utilizando um trado cilíndrico de  
 121 inox específico para coleta de amostras indeformadas, semelhante aos anéis volumétricos de  
 122 kopeck, com 20 cm de comprimento por 5 cm de diâmetro (volume = 0,3925 dm<sup>3</sup>). Todas as  
 123 amostras foram coletadas na faixa entre 0-20 cm de profundidade e foram armazenadas em sacos

124 plásticos até serem transportadas e devidamente processadas em laboratório. Ao total foram  
125 coletadas amostras de solo em 265 parcelas distribuídas em 22 *grids* de 1 ha em parcelas  
126 permanentes de inventários florestais na Amazônia Central.

127

## 128 **Preparação e tratamento das amostras**

129 No laboratório, as amostras para determinação do teor de carbono foram secas em uma  
130 estufa solar à temperatura ambiente. Após secagem, foram passadas por peneiras de malha de 20  
131 mm e posteriormente de 2 mm. Em seguida, as raízes e outras frações vegetais visíveis foram  
132 retiradas e uma fração de cada amostra foi reduzida a partículas com diâmetro máximo de 50 µm  
133 em um moinho automático antes das análises químicas.

134 As amostras para determinação da densidade do solo foram colocadas para secar em  
135 recipientes de alumínio em uma estufa elétrica a 105 °C durante aproximadamente 72 h.

136

## 137 **Análise do teor de carbono total**

138 Os teores totais de carbono (g/kg) das amostras foram determinados utilizando o analisador  
139 elementar modelo Vario Max CN (Elementar Instruments, Hanau, Alemanha). Este aparelho  
140 emprega a técnica de combustão a seco, onde ocorre conversão dos elementos das amostras em  
141 gases simples como CO<sub>2</sub> e N<sub>2</sub>. Os gases resultantes são homogeneizados e mantidos nas condições  
142 normais de pressão, temperatura e volume, e, em seguida, são despressurizados em uma coluna  
143 onde são detectados, separados e identificados a partir de sua condutividade termal (Pérez et al.,  
144 2001).

145

## 146 **Determinação da densidade do solo**

147 A densidade para cada parcela foi calculada dividindo-se a massa seca da amostra pelo  
148 volume do cilindro de coleta (0,3925).

## 149 **Determinação do teor de argila**

150 O teor de argila (%) foi determinado mediante análise granulométrica pelo método da pipeta  
151 (EMBRAPA, 1979).

152

## 153 **Determinação do pH em H<sub>2</sub>O**

154 A reação do solo (pH) em H<sub>2</sub>O destilada foi estimada com a utilização de um equipamento  
155 apropriado (pH-metro). A proporção entre a quantidade de solo seco na estufa e a quantidade de  
156 água utilizada foi de 1:1 em uma base volumétrica, 20 mL de solo para 20 mL de água (Fearnside &  
157 Leal Filho, 2001).

158

## 159 **Construção dos modelos**

Para realizar a estimativa da densidade do solo, foram geradas as equações de regressão múltipla pelo método *stepwise* no programa SYSTAT (Wilkinson, 1990). As variáveis independentes utilizadas nos modelos foram escolhidas de acordo com as informações disponíveis no banco de dados do PDBFF, bem como a sua consonância com as variáveis mais comumente empregadas na construção de PTFs para estimativa da densidade do solo, sendo estas: o teor de carbono, a quantidade de argila e o pH medido em água. Foram incluídas na construção dos modelos dados referentes a 140 parcelas.

A fim de avaliar o grau de correlação entre as variáveis independentes, foi aplicado o teste de Pearson a partir dessa série de dados. A presença de colinearidade foi verificada de acordo com os valores assumidos pelos parâmetros.

A performance das PTFs para predição da densidade do solo foi avaliada com base nos valores do critério Akaike de informação (AIC) e do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), e, após, pela validação dos modelos.

O valor de AIC permite comparar e classificar múltiplos modelos concorrentes e estimar qual deles mais se aproxima do "verdadeiro" processo subjacente ao fenômeno biológico em estudo (Akaike, 1973; Bozdongan, 1987; Burnham & Anderson, 2002; Burnham et al., 2011; Symonds & Moussalli, 2011). O coeficiente de determinação representa a proporção da variação da densidade do solo pode ser explicada pelo conjunto de variáveis preditoras.

A validação dos modelos foi realizada a partir de um conjunto de dados composto por 125 amostras diferentes das usadas na geração das equações. Em seguida foram plotados em gráficos os valores preditos versus os valores observados, para avaliar o desempenho das estimativas. Também foram plotados os resíduos das regressões versus os valores estimados para verificar a premissa da homocedasticidade. A normalidade dos resíduos também foi testada pelo método de Kolmogorov-Smirnov a 95 % de significância.

184

## 185 **Comparação das equações de pedo-transferência (PTFs)**

A aplicabilidade do modelo para predição da densidade do solo de melhor desempenho desse estudo foi comparada com a de outros três modelos da literatura, gerados a partir de amostras coletadas ao longo da bacia amazônica (Bernoux et al., 1998; Tomasella & Hodnett, 1998; Benites et al., 2007). Essas equações foram usadas para prever a densidade a partir da série de dados destinada à validação dos modelos. Para o modelo de Tomasella & Hodnett (1998) a série de dados conteve um número reduzido de parcelas devido ao fato de haver falta de informações sobre a textura para algumas parcelas. O resultado dessas predições foi plotado em gráficos dos valores preditos versus os valores observados em campo. A comparação também envolveu a etapa de análise dos gráficos dos resíduos para verificação da homocedasticidade.

195

## 196 **RESULTADOS**

197

### 198 **Construção e seleção dos modelos**

As estatísticas descritivas da série de dados usada na construção dos modelos de predição da densidade estão apresentados no Quadro 1. A matriz de correlação de Pearson indica haver

200

colinearidade entre o teor de carbono e de argila do solo (Quadro 2), criando um viés indesejado nos modelos compostos por tais variáveis.

[Quadros 1 & 2 aqui]

A análise dos resultados dos modelos de regressão mostra a equação do Modelo 1 com  $R^2 = 0,74$  e  $AIC = -251,88$  (Quadro 3). Na Figura 3 é possível visualizar a densidade observada versus os valores estimados por cada uma das equações de pedo-transferência (PTF) geradas. O Modelo 1 cumpriu a premissa de homocedasticidade que foi verificada a partir da análise da distribuição dos pontos no gráfico dos resíduos da regressão versus os valores estimados (Figura 4). Além disso, o resultado do teste de normalidade pelo método de Kolmogorov-Smirnov a 95% de significância mostra a distribuição normal dos resíduos da regressão (Quadro 4).

[Figuras 3 & 4 & Quadros 3 & 4 aqui]

O Modelo 2, que teve o teor de carbono e de argila como variáveis explicativas, apresentou  $R^2 = 0,72$  e  $AIC = -243,24$ . Os resíduos dessa regressão se mostraram homocedásticos (Figura 4) e seguiram a distribuição normal (Quadro 4).

O terceiro modelo gerado incluiu apenas o teor de carbono como variável preditora (Figura 3; Quadro 3). O modelo apresentou coeficiente de determinação reduzido em relação aos anteriores com  $R^2 = 0,55$  e valor de  $AIC = 180,52$ . Apesar disso, os resíduos da regressão apresentaram homocedasticidade e distribuição normal, segundo o teste de Kolmogorov-Smirnov (Figura 4; Quadro 4).

O Modelo 4 incluiu como variáveis independentes o conteúdo de argila e o pH em  $H_2O$ . O coeficiente de determinação desse modelo foi semelhante ao da primeira equação com  $R^2 = 0,73$  e o valor de  $AIC = -250,29$ , sendo o segundo menor dentre os modelos construídos (Quadro 3). A validação desse modelo indicou relação da ordem de 60% entre os valores observados e os preditos pela equação. O gráfico dos resíduos versus valores estimados pelo modelo visto na Figura 4 apresenta homocedasticidade dos pontos e o teste de Kolmogorov-Smirnov a 95% de significância confirma sua distribuição normal (Quadro 4).

O conteúdo de argila foi a variável que sozinha apresentou maior poder de predição como indica o resultado do Modelo 5. Esse parâmetro foi responsável por explicar aproximadamente 70% da variação dos dados de densidade do solo. O modelo gerado apresentou distribuição aleatória como mostrado na Figura 4 e normalidade dos resíduos da regressão (Quadro 4).

O pH em  $H_2O$  foi incluído como única variável independente no Modelo 6 (Quadro 3). O coeficiente de determinação extremamente baixo,  $R^2 = 0,01$  e o mais alto valor de  $AIC = -73,07$  indicam que esta variável não apresenta relação significativa com variação do conjunto de dados de densidade do solo. O gráfico dos resíduos versus valores ajustados mostra padrão de aglomeração dos pontos e o teste de Kolmogorov-Smirnov a 95% de significância aponta distribuição não normal, resultando na invalidação deste modelo.

O sétimo e último modelo gerado teve o conteúdo de carbono e o pH em  $H_2O$  como variáveis preditoras. Este modelo apresentou  $R^2 = 0,55$  e  $AIC = -178,72$ . A validação desse modelo

foi contemplada pela homocedasticidade vista na Figura 4 e pela distribuição normal dos resíduos (Quadro 4).

Apesar da semelhança entre os resultados do Modelo 4 e do Modelo 1, a existência de colinearidade entre as variáveis preditoras do último comprometem sua confiabilidade. Portanto o Modelo 4 apresentou melhor rendimento na predição da densidade do solo nas condições deste estudo e foi selecionado para comparação com alguns modelos existentes na literatura.

#### **Comparação do modelo deste estudo com os existentes na literatura**

O uso da equação de Bernoux et al. (1998) para estimar a densidade do solo a partir da série de validação desse estudo resultou em um coeficiente de determinação de 0,56 que mostra o grau de relação entre os valores de densidade estimados por esse modelo versus os valores observados em campo. No entanto, o gráfico dos resíduos versus valores estimados mostrando a aglomeração dos pontos sugere que os resíduos não estão normalmente distribuídos e que, portanto, a validade dessa predição é questionável (Figura 5). O uso dessa equação resultou em uma superestimativa dos valores, com aumento da média predita em torno de 72% em relação à média dos valores obtidos em campo (Quadro 5).

Os resultados do uso da equação de Benites et al. (2007) também indicaram tendência de superestimativa dos valores preditos, com aumento de aproximadamente 130% na média quando comparada aos valores observados (Quadro 5). O rendimento da regressão entre os valores preditos e observados sofreu redução quando a estimativa foi feita a partir da série de validação deste estudo, passando de  $R^2 = 0,63$  no estudo original para  $R^2 = 0,56$  (Figura 5).

Quando usada para estimar a densidade do solo a partir dos dados de campo deste estudo, a equação de Tomasella & Hodnett (1998) apresentou a mesma tendência observada anteriormente, resultando em superestimativa dos valores preditos em torno de 96% acima da média dos valores de densidade observados (Quadro 5). O coeficiente de determinação da regressão foi de apenas 0,31, além dos resíduos não terem sido aleatoriamente distribuídos (Figura 5).

267

#### **DISCUSSÃO**

Partindo do pressuposto de que os modelos de regressão não devem apresentar colinearidade entre as variáveis independentes que os compõem, as equações dos Modelos 1 e 2, apesar de apresentarem alto valor de  $R^2$ , são consideradas enviesadas e de baixa confiabilidade para prever a densidade do solo. Os modelos que não incluíram simultaneamente o teor de carbono e o conteúdo de argila eliminam o viés gerado pela colinearidade entre essas variáveis, como é o caso dos Modelos 3 ao 7.

As equações dos Modelos 4 e 5 apresentaram valores de  $R^2$  semelhantes, 0,73 e 0,70 respectivamente. No entanto, os resultados da validação dos modelos indicam melhor rendimento do Modelo 4, com grande parte da variação dos dados estimados sendo explicado pelas variáveis independentes (Figura 3). O poder de predição desse modelo foi semelhante ao de Modelo 1, com a vantagem de que o viés da colinearidade esteve ausente (Quadro 2).

É válido ressaltar que quanto maior a complexidade dos modelos de regressão, maior deve ser a atenção do modelador em relação ao princípio da parcimônia, sendo que diante de uma série de modelos que apresentam ajustes adequados, aquele com menor número de variáveis preditoras é preferível. Isso porque modelos que incluem muitas variáveis explicativas podem parecer se

adequar bem ao conjunto de dados, quando, na verdade, apresentam ajuste tendencioso (Minasny & Hartemink, 2011). Entretanto, a diferença entre os valores dos coeficientes de determinação dos Modelos 4 e 5, não deve ser enquadrada neste caso, visto que a diferença no número de variáveis explicativas desses modelos é mínima.

Dentre os modelos gerados, o que apresentou melhor rendimento global em relação a todos os critérios de avaliação foi o Modelo 4. Este modelo apresentou os melhores valores de coeficientes de determinação e AIC, além de cumprir as premissas de homocedasticidade dos resíduos e ausência de colinearidade entre as variáveis preditoras.

Sozinho, o pH em H<sub>2</sub>O não apresentou relação significativa com a variável que se pretendia estimar. Isto indica que a variação da densidade deve estar mais relacionada ao teor de carbono e, sobretudo, ao conteúdo de argila presente nos solos amostrados, muito embora a equação de melhor rendimento tenha sido a que incluiu argila e pH juntos.

O estudo de Bernoux et al. (1998) forneceu uma série de equações para a estimativa da densidade do solo, sendo que o modelo apresentado como tendo melhor desempenho na predição dos dados ( $R^2 = 0,56$ ) foi construído com base nas quantidades de argila, areia, carbono orgânico e pH em H<sub>2</sub>O a partir de 323 observações. O referido estudo mostrou que o desempenho da estimativa melhorou quando os dados de entrada no modelo foram separados por tipo de solo e pelo horizonte pedológico. Neste caso, a equação gerada foi construída com base apenas nos conteúdos de argila e de carbono restritos às amostras coletadas no horizonte A superficial de Latossolos (Oxisols) e teve seu desempenho aumentado ( $R^2 = 0,78$ ), embora o número de observações de entrada do modelo tenha sido baixo, com apenas 26 amostras. Esse modelo é apresentado pela seguinte equação:

$$D = 1,419 - 0,0037 \times \text{argila (\%)} - 0,061 \times \text{carbono (\%)}$$

onde:

$$D = \text{densidade (Mg/m}^3\text{)}$$

Na etapa de validação das PTFs, essa equação aplicada a nossos dados apresentou coeficientes de determinação semelhantes aos do Modelo 4 deste estudo (Figura 5). No entanto, o gráfico dos resíduos versus os valores estimados comprova que esse modelo não possui ajustamento adequado, pois não cumpre a premissa de homocedasticidade.

As estimativas de Benites et al. (2007) apresentaram melhor desempenho quando foram incluídos nos modelos os teores de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> no lugar da soma de bases (SB), uma vez que esse parâmetro não se mostrou correlacionado à densidade do solo. Além disso, esses autores não detectaram aumento do poder de predição dos modelos quando esses foram gerados a partir de dados coletados em diferentes profundidades. O mesmo padrão foi verificado por Heuscher et al. (2005) e Sequeira et al. (2014), que observaram que a profundidade não foi uma boa variável na predição da densidade do solo. No entanto, a densidade parece aumentar de acordo com a profundidade do horizonte pedológico, sugerindo que existe uma influência da pressão gerada pela sobrecarga de solo (Tranter et al., 2007).

No entanto, o modelo apresentado como de maior acurácia por Benites et al. (2007) incluiu os valores da soma de bases (SB), conforme:

$$D = 1,5600 - 0,0005 \times \text{argila (g/kg)} - 0,0100 \times \text{carbono (g/kg)} + 0,0075 \times \text{SB (cmol/kg)}$$

326 **onde:**

327 **D = densidade (kg/dm<sup>3</sup>)**

328

329 Nesse caso em particular, não foi possível utilizar essa PTF para estimar a densidade do  
330 solo, uma vez que a série de dados do presente estudo não continha informações sobre o parâmetro  
331 SB.

332 Como Benites et al. (2007) geraram sete modelos formados por diferentes parâmetros  
333 pedológicos, para efeito de comparação, o Modelo 6, que incluiu os parâmetros argila e carbono, foi  
334 selecionado para ter seu rendimento avaliado em relação à estimativa da densidade. A equação do  
335 Modelo 6, de Benites et al. (2007), está apresentada abaixo:

$$336 \quad D = 1,5688 - 0,0005 \times \text{argila (g/kg)} - 0,009 \times \text{carbono (g/kg)}$$

337 **onde:**

338 **D = densidade (kg/dm<sup>3</sup>)**

339

340 A pequena diferença entre os coeficientes de determinação das estimativas feitas por essa  
341 equação usando a série de dados original e esta série de validação pode dar a impressão de que a  
342 PTF é adequada para prever a densidade do solo nas condições deste estudo, embora o modelo  
343 não tenha sido considerado válido pelo fato de que seus resíduos não apresentaram  
344 homocedasticidade.

345 O modelo de melhor rendimento apresentado por Tomasella & Hodnett (1998) incluiu o  
346 conteúdo da fração textural silte conforme a equação abaixo:

$$347 \quad D = 1,578 - 0,054 \times \text{carbono (\%)} - 0,006 \times \text{silte (\%)} - 0,004 \times \text{argila (\%)}$$

348 **onde:**

349 **D = densidade (kg/dm<sup>3</sup>)**

350

351 Para empregar essa PTF na predição da densidade do solo nas condições desse estudo a série  
352 de validação foi reduzida, uma vez que apenas 118 das parcelas possuíam informações disponíveis  
353 sobre a fração silte. O baixo rendimento da PTF para estimar a densidade a partir da série de dados  
354 desse estudo pode ser reflexo da alta correlação entre as variáveis argila e silte, uma vez que esses  
355 parâmetros são expressos em termos do percentual da textura e somados à fração areia, as três  
356 frações totalizando 100%.

357 Apesar dos estudos anteriores terem fornecido informações importantes sobre a relação entre  
358 a densidade e outras propriedades do solo na Amazônia, as escalas espaciais avaliadas são  
359 demasiadamente amplas para poderem ser confiavelmente aplicadas às estimativas locais (Bernoux  
360 et al., 1998; 2002; Tomasella & Hodnett, 1998; Benites et al., 2007).

Na China, o poder de predição de 19 equações de pedo-transferência foi testado para uma série de dados de solos, e os resultados mostraram que equações geradas a partir das observações locais apresentaram maior acurácia na predição da densidade do solo (Han et al., 2012).

Sendo assim, entende-se que as equações geradas localmente terão melhor desempenho na estimativa da densidade do solo. Isso porque a própria lógica dos dados espaciais confirma a ideia de que, no espaço geográfico, tudo está relacionado e observações feitas próximas umas das outras estarão mais relacionadas entre si do que as observações geograficamente mais distantes (Fotheringham et al., 2002; Charlton & Fotheringham, 2009).

Pelo fato de ter sido calibrada a partir das informações coletadas em campo, a equação do Modelo 4 deste estudo resultou em melhor estimativa da densidade do solo quando comparada àquelas geradas a partir das PTFs disponíveis na literatura. É possível dizer que a equação gerada neste estudo foi capaz de estimar com relativa confiança a densidade do solo superficial (0-20 cm) em florestas de terra-firme da região de Manaus. No entanto, o grau de incerteza atribuído a essa estimativa ainda é relevante, tornando-se necessário a geração de um número maior de equações calibradas localmente para aumentar a acurácia de predição dos valores de densidade, e também dos estoques de carbono do solo, em toda a paisagem amazônica.

## CONCLUSÕES

1) A equação de pedo-transferência (PTF) que obteve o melhor desempenho na predição da densidade do solo para as condições deste trabalho foi a do Modelo 4, que incluiu o conteúdo de argila e o pH em H<sub>2</sub>O como variáveis independentes [Densidade = 1,495 - 0,011 × argila (%) - 0,079 × pH em H<sub>2</sub>O]

2) Apesar das estimativas de densidade do solo pelas PTFs disponíveis na literatura apresentarem coeficientes de determinação semelhantes ao do Modelo 4 deste estudo houve tendência de superestimativa, em diferentes percentuais, por todas as equações testadas da literatura, assim evidenciando que as equações geradas localmente possuem menores incertezas.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-graduação em Ciências de Florestas Tropicais (PPG-CFT/INPA), a toda equipe do Projeto Dinâmica Biológica de Fragmentos Florestais (PDBFF) pelo apoio logístico nas coletas de solo em campo e, ao corpo técnico do Laboratório Temático de Solo e Planta do INPA (LTPS-INPA). Esse trabalho foi desenvolvido com financiamento da CAPES, CNPq (proc. 304020/2010-9, 573810/2008-7) e FAPEAM (proc. 708565, 363/2013).

## LITERATURA CITADA

AKAIKE, H. Information theory as an extension of the maximum likelihood principle. In: PETROV, B.N.; CSAKI, F. (Eds) Second International Symposium on Information Theory. Budapest, Hungria, Akademiai Kiado, 1973. p. 267–281.

- BENITES, V.M.; MACHADO, P.; FIDALGO, E.C.C.; COELHO, R.M.; MADARI, E.B. Pedotransfer functions for estimating soil bulk density from existing soil survey reports in Brazil. *Geoderma*, 139: 90-97, 2007.
- BERNOUX, M.; ARROUAYS, D.; CERRI, C.; VOLKOFF, B.; JOLIVET, C. Bulk densities of Brazilian Amazon soils related to other soil properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 62: 743-749, 1998.
- BERNOUX, M.; CARVALHO, M.C.S.; VOLKOFF, B.; CERRI, C.C. Brazil's soil carbon stocks. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 66: 888-896, 2002.
- BOZDONGAN, H. Model selection and Akaike's Information Criterion (AIC): The general theory and its analytical extensions. *Psychometrika*, 52: 345-370, 1987.
- BURNHAM, K.P & ANDERSON, D.R. *Model Selection and Multimodel Inference: A Practical Information-Theoretic Approach*. 2nd ed., New York, Springer, 2002.
- BURNHAM, K.P, ANDERSON, D.R. & HUYVAERT, P.K. AIC model selection and multimodel inference in behavioral ecology: some background, observations, and comparisons. *Behav. Ecol. Sociobiol.*, 65: 23-35, 2011.
- CALHOUN, F.G.; SMECK, N.E.; SLATER, B.L.; BIGHAM, J.M. & HALL, G.F. Predicting bulk density of Ohio soils from morphology, genetic principles, and laboratory characterization data. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 65: 811-819, 2001.
- CHAUDHARI, P.R.; AHIRE, D.V.; AHIRE, V.D.; CHKRAVARTY, M. & MAITY, S. Soil bulk density as related to soil texture, organic matter content and available total nutrients of Coimbatore Soil. *Int. J. Sci. Res. Pub.*, 3: 1-8, 2013.
- CHAUVEL, A. Os Latossolos Amarelos, álicos, argilosos dentro dos ecossistemas das bacias experimentais do INPA e da região Vizinha. *Acta Amaz.*, 12: 38-47, 1982.
- CHAUVEL, A.; LUCAS, Y. & BOULE, R. On the genesis of the soil mantle of the region of Manaus, Central Amazonia, Brazil. *Experientia*, 43: 234-241, 1987.
- CHARLTON, M. & FOTHERINGHAM, A.S. 2009. Geographically Weighted Regression White Paper. Disponível em: <[http://gwr.nuim.ie/downloads/GWR\\_WhitePaper.pdf](http://gwr.nuim.ie/downloads/GWR_WhitePaper.pdf)>. Acesso em: 10/08/2013.
- EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). *Manual de Métodos de Análise de Solo*. EMBRAPA, Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos, Rio de Janeiro, RJ. 1979. Paginação irregular.
- FEARNSIDE, P.M. & BARBOSA, R.I. Soil carbon changes from conversion of forest to pasture in Brazilian Amazonia. *Forest Ecol. Manage.*, 108: 147-166, 1998.
- FEARNSIDE, P.M. & LEAL FILHO, N. Soil and development in Amazonia: Lessons from the Biological Dynamics of Forest Fragments Project. In: BIERREGAARD, R.O.; GASCON, C.; LOVEJOY, T.E. & MESQUITA, R., eds. *Lessons from Amazonia: The Ecology and*

Conservation of a Fragmented Forest. Yale University Press, New Haven, Connecticut, E.U.A, 2001. p. 291-312.

- FEDERER, C.A.; TURCOTTE, D.E. & SMITH, C.T. The organic fraction-bulk density relationship and the expression of nutrient content in forest soils. *Can. J. For. Res.*, 23: 1026-1032, 1993.
- FOTHERINGHAM, A.S.; BRUNSDON, C. & CHARLTON, M.E. *Geographically Weighted Regression: The Analysis of Spatially Varying Relationships*. Wiley, Chichester, Reino Unido. 2002.
- GHARAH-GHENI, N.; NEMES, A.; VERDOODT, A.; VAN RANST, E.; CORNELIS, W.M. & BOECKX, P. Nonparametric techniques for predicting soil bulk density of tropical rainforest topsoils in Rwanda. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 76: 1172-1183, 2012.
- HAN, G.Z.; ZANG, G.L.; GONG, Z.T. & WANG, G.F. Pedotransfer functions for estimating soil bulk density in China. *Soil Sci.*, 177: 158-164, 2012.
- HEUSCHER, S.A.; CRAIG, C; BRANDT, C.C. & JARDINE, P.M. Using soil physical and chemical properties to estimate bulk density. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 69: 1-7, 2005.
- MINASNY, B. & HARTEMINK, A.E. Predicting soil properties in the tropics. *Earth-Sci. Rev.*, 106: 52-62, 2011.
- OLIVEIRA L. de, A.A. & MORI, S.A. A central Amazonian terra-firme forest. I. High tree species richness on poor soils. *Biodivers. Conserv.*, 8: 1219–1244, 1999.
- PÉREZ, D.V.; de ALCÂNTARA, S.; ARRUDA, R.J. & MENEGHELLI, N.A.C. Comparing two methods for soil carbon and nitrogen determination using selected Brazilian soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 32: 295-309, 2001.
- SEQUEIRA, C.H.; WILLIS, S.A.; SEYBOLD, C.A. & WEST, L.T. Predicting soil bulk density for incomplete databases. *Geoderma*, 213: 64-73, 2014.
- STELLER, R.M.; JELINSK, N.A. & KUCHARIK, C.J. Developing models to predict soil bulk density in southern Wisconsin using soil chemical properties. *J. Int. Biosci.*, 6: 53-63, 2008.
- SYMONDS, M. & MOUSSALLI, A. A brief guide to model selection, multimodel inference and model averaging in behavioural ecology using Akaike's information criterion. *Behav. Ecol. Sociobiol.*, 65: 13-21, 2011.
- TAALAB, K.P.; CORSTANJE, R.; CREAMER, R. & WHELAN, M.J. Modeling soil bulk density at the landscape scale and its contributions to C stock uncertainty. *Biogeosci. Disc.*, 9: 18831-18864, 2012.
- TOMASELLA, J. & HODNETT, M.G. Estimating soil water retention characteristics from limited data in Brazilian Amazonia. *Soil Sci.*, 163: 190-202, 1998.

497 TRANTER, G.; MINASNY, B., McBRATNEY A.B.; MURPHY, B.; McKENZIE, N.J.;  
498 GRUNDY, M. & BROUGH, D. Building and testing conceptual and empirical models for  
499 predicting soil bulk density. *Soil Use Manage.*, 23: 437-443, 2007.  
500  
501 VELDKAMP, E. Organic carbon turnover in three tropical soils under pasture after deforestation.  
502 *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58: 175-180, 1994.  
503  
504 WILKINSON, L. SYSTAT: The system for statistics. SYSTAT, Inc., Evanston, Illinois, E.U.A.  
505 1990. 822 p.  
506

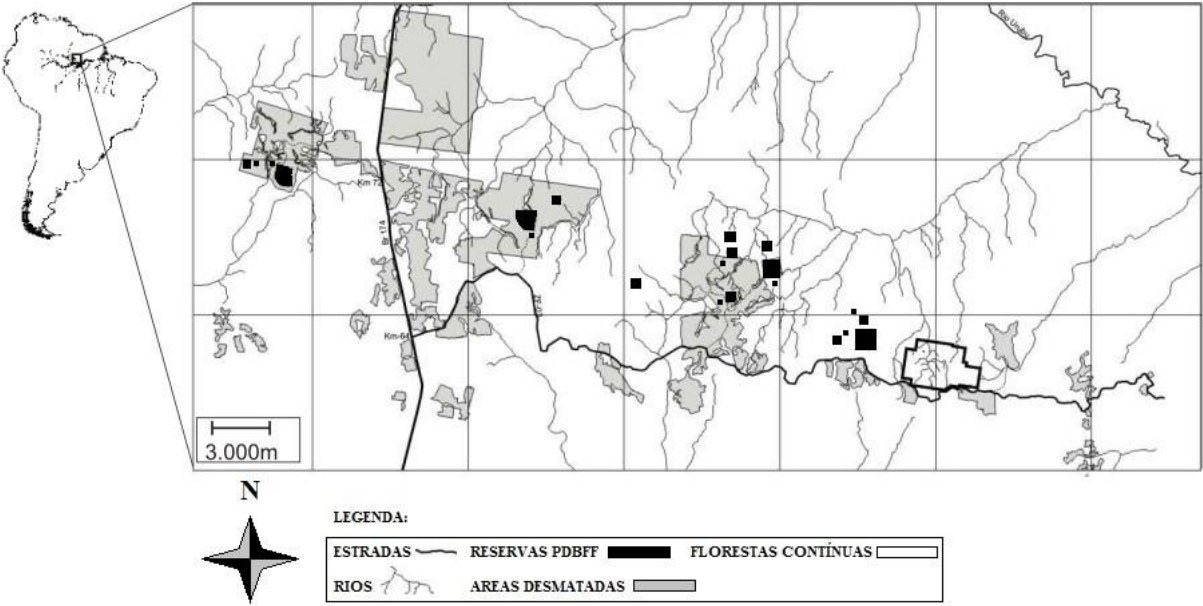


Figura 1. Área de estudo (Acervo Projeto Dinâmica Biológica de Fragmentos Florestais - PDBFF).

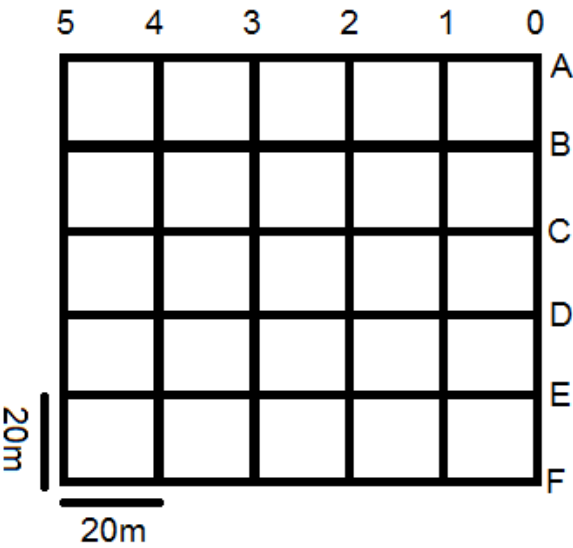


Figura 2. Sistema de coordenadas usado nas parcelas permanentes do Projeto Dinâmica Biológica de Fragmentos Florestais - PDBFF.

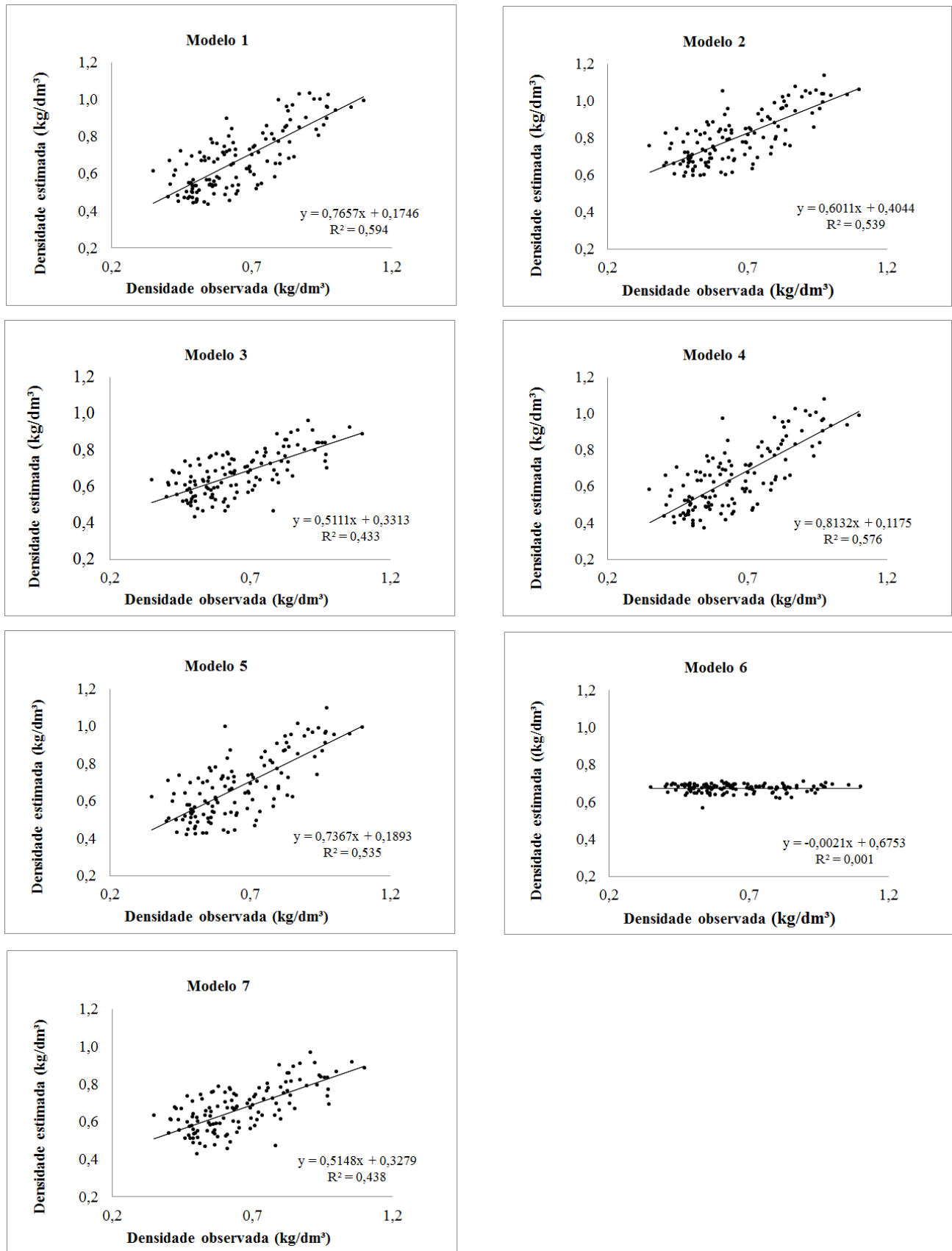


Figura 3. Validação dos modelos de regressão gerados pelo método *stepwise* para predição da densidade do solo.

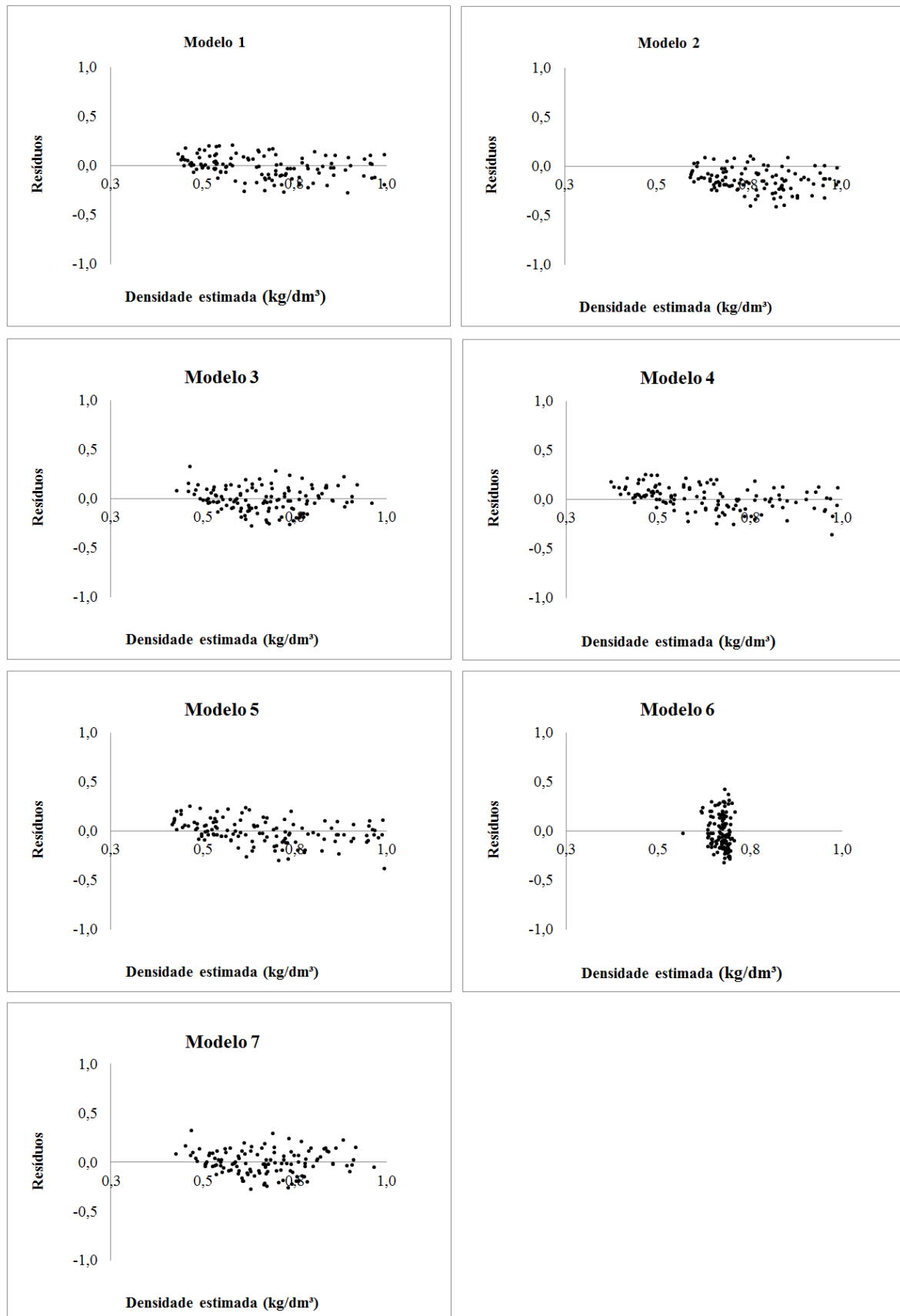


Figura 4. Resíduos das regressões *versus* valores estimados de densidade do solo.

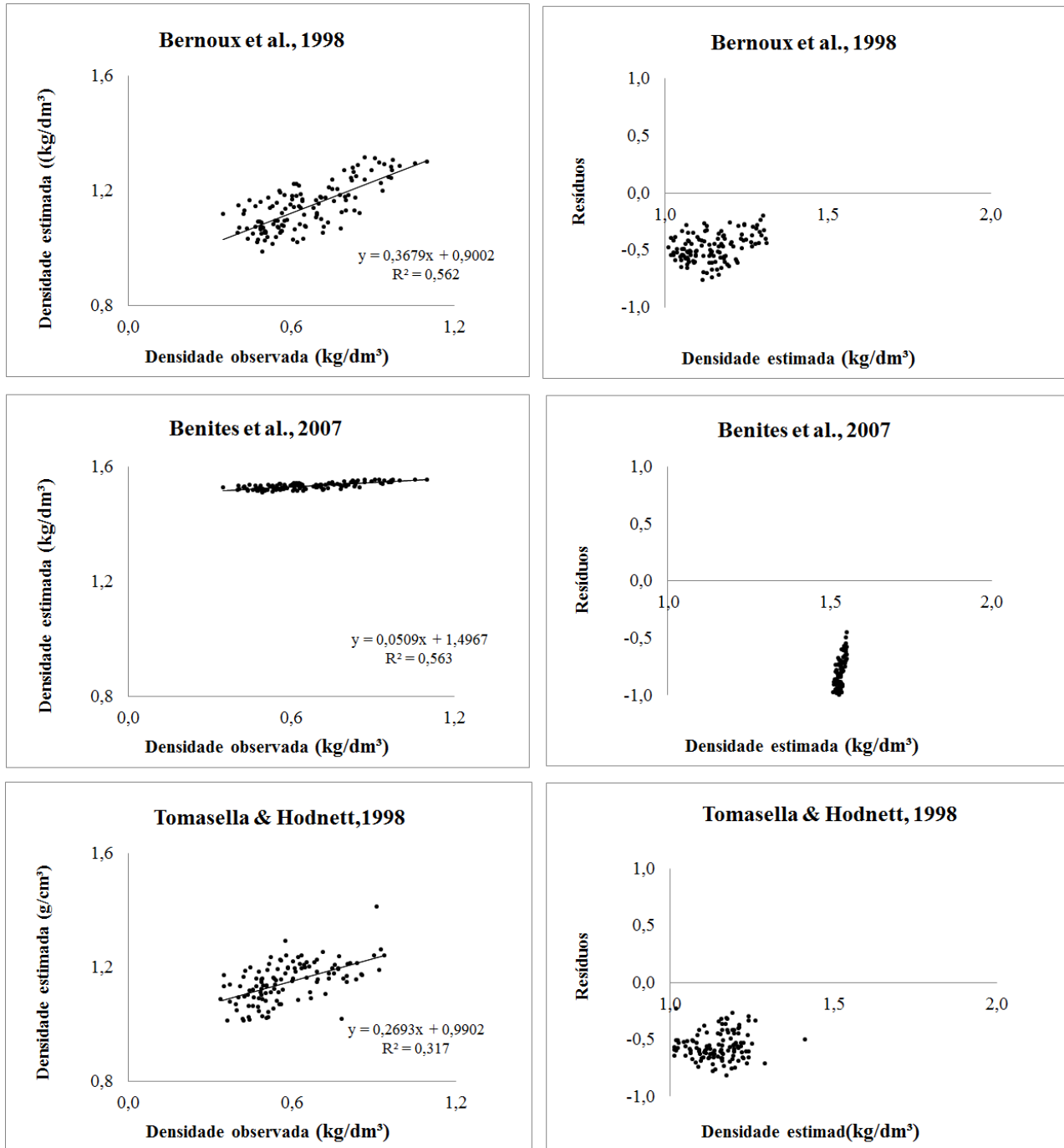


Figura 5. Comparação do modelo de melhor ajuste com os modelos disponíveis na literatura.

Quadro 1. Estatísticas descritivas dos parâmetros de construção dos modelos

| Série para construção dos modelos |                |            |                     | Série para validação dos modelos |            |                     |
|-----------------------------------|----------------|------------|---------------------|----------------------------------|------------|---------------------|
| Parâmetro                         | Carbono (g/kg) | Argila (%) | pH_H <sub>2</sub> O | Carbono (g/kg)                   | Argila (%) | pH_H <sub>2</sub> O |
| <b>Média</b>                      | 1,62           | 48,12      | 3,92                | 1,63                             | 48,15      | 3,98                |
| <b>Mediana</b>                    | 1,59           | 49,68      | 4,02                | 1,62                             | 50,71      | 4,06                |
| <b>Máximo</b>                     | 0,81           | 15,23      | 3,20                | 0,73                             | 5,81       | 2,20                |
| <b>Mínimo</b>                     | 2,78           | 75,06      | 4,81                | 3,33                             | 73,50      | 4,61                |
| <b>Desvio-padrão</b>              | 0,42           | 15,36      | 0,37                | 0,39                             | 16,67      | 0,37                |

Quadro 2. Matriz de correlação de Pearson

| Matriz de Correlação de Pearson |         |        |                     |
|---------------------------------|---------|--------|---------------------|
|                                 | Carbono | Argila | pH_H <sub>2</sub> O |
| Carbono                         | 1,0     |        |                     |
| Argila                          | 0,8     | 1,0    |                     |
| pH_H <sub>2</sub> O             | -0,21   | -0,40  | 1,0                 |

Quadro 3. Resultados da seleção dos modelos de regressão (quadrados mínimos ordinários - OLS)

| Modelo   | Variáveis | Intercepto | #1_Carbono | #2_Argila | #3_pH | Desvio Padrão | AICc    | R <sup>2</sup> |
|----------|-----------|------------|------------|-----------|-------|---------------|---------|----------------|
| <b>1</b> | 1, 2, 3   | 1,51       | -0,06      | -0,01     | -0,07 | 0,09          | -251,88 | 0,74           |
| <b>2</b> | 1, 2      | 1,19       | -0,07      | -0,01     | ...   | 0,10          | -243,24 | 0,72           |
| <b>3</b> | 1         | 1,20       | -0,32      | ...       | ...   | 0,12          | -180,52 | 0,55           |
| <b>4</b> | 2, 3      | 1,49       | ...        | -0,01     | -0,08 | 0,09          | -250,30 | 0,73           |
| <b>5</b> | 2         | 1,15       | ...        | -0,01     | ...   | 0,10          | -240,67 | 0,70           |
| <b>6</b> | 3         | 0,44       | ...        | ...       | 0,06  | 0,18          | -73,070 | 0,01           |
| <b>7</b> | 1, 3      | 1,26       | -0,33      | ...       | -0,01 | 0,12          | -178,73 | 0,55           |

529 Quadro 4. Teste de normalidade dos resíduos, Kolmogorov-Smirnov a 95% de significância.

| Teste de Kolmogorov-Smirnov |                             |         |                           |
|-----------------------------|-----------------------------|---------|---------------------------|
| Modelo                      | Valor crítico a 95 % = 0,12 | valor p | Distribuição dos resíduos |
| 1                           | 0,06                        | 0,43    | normal                    |
| 2                           | 0,05                        | 0,43    | normal                    |
| 3                           | 0,05                        | 0,38    | normal                    |
| 4                           | 0,04                        | 0,75    | normal                    |
| 5                           | 0,06                        | 0,45    | normal                    |
| 6                           | 0,12                        | 0,00    | não normal                |
| 7                           | 0,06                        | 0,65    | normal                    |

530

531 Quadro 5. Dados descritivos das densidades observadas e estimadas pelos modelos de regressão.

| Densidade (kg/dm <sup>3</sup> ) |                    |                     |                       |                       |                            |
|---------------------------------|--------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|
|                                 | Observada em campo | Estimativa Modelo 4 | Bernoux et al. (1998) | Benites et al. (2007) | Tomasella & Hodnett (1998) |
| Média                           | 0,66               | 0,65                | 1,14                  | 1,53                  | 1,15                       |
| Mediana                         | 0,62               | 0,63                | 1,14                  | 1,53                  | 1,16                       |
| Mínimo                          | 0,35               | 0,37                | 0,99                  | 1,51                  | 1,01                       |
| Máximo                          | 1,10               | 1,08                | 1,31                  | 1,55                  | 1,41                       |

532