



Estimativa da densidade em solos orgânicos do Brasil⁽¹⁾.

**Sidinei Julio Beutler⁽²⁾; Marcos Gervasio Pereira⁽³⁾; Gustavo Souza Valladares⁽⁴⁾;
Wagner de Souza Tassinari⁽⁵⁾; Michele Duarte de Menezes⁽⁶⁾.**

⁽¹⁾ Trabalho executado com recursos da CAPES, CNPq, e FAPERJ.

⁽²⁾ Doutorando; Curso de Pós-Graduação em Agronomia - Ciência do Solo (CPGA-CS), Departamento de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ); Seropédica, RJ; s.parana@yahoo.com.br; ⁽³⁾ Professor; CPGA-CS, Departamento de Solos, UFRRJ; ⁽⁴⁾ Professor; Departamento de Geografia e História; Universidade Federal do Piauí; ⁽⁵⁾ Professor; Departamento de Matemática, UFRRJ; ⁽⁶⁾ Professora; Departamento de Ciência do Solo; Universidade Federal de Lavras.

RESUMO: A predição da densidade do solo (Ds) consiste na sua inferência a partir de outras informações mais facilmente obtidas, por meio de funções de pedotransferência (FPT). O objetivo do presente trabalho foi gerar equações para a predição da Ds de solos e horizontes orgânicos do Brasil. Trabalhou-se com horizontes de solos orgânicos com teores de carbono orgânico total (COT) iguais ou maiores que 80 g kg⁻¹ de solo, totalizando 280 horizontes em diferentes regiões do Brasil. Foi empregada a técnica de regressão linear múltipla e as equações foram validadas sobre dados independentes. Os dados foram transformados pelo método de Box-Cox para atender as pressuposições dos modelos de regressão. A validação (dados independentes) da equação FPT1 apresentou R² de 0,47; erro médio (ME) de 0,04; raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) de 0,22; e erro médio absoluto (MAE) de 0,18. Havendo os dados dos teores de argila, recomenda-se a equação FPT1. No entanto, como são escassas as análises dos teores de argila nos solos orgânicos, não havendo tal análise recomenda-se as equações FPT2 e Hollis, que possuem somente o COT como variável preditora. As equações geradas apresentaram boa acurácia quando comparadas com as equações já publicadas, considerando-se as características particulares dos solos orgânicos e o contexto ambiental em que são formados.

Termos de indexação: funções de pedotransferência; transformação box-cox; banco de dados de solos.

INTRODUÇÃO

O termo função de pedotransferência foi usado na literatura primeiramente por Bouma (1989), significando a “transformação de dados que temos em dados que necessitamos”. As funções de pedotransferência (FPT) podem ser definidas como funções de previsão de determinadas propriedades do solo através de outras propriedades obtidas

facilmente, de forma rotineira, ou de baixo custo (McBratney et al., 2002).

Segundo McBratney et al. (2002), é importante que as PTFs atendam a dois princípios básicos para evitar o seu mau uso, ou então o seu abuso. O primeiro princípio é não predizer um atributo que é mais fácil de medir que o preditor. E o segundo princípio é não usar a FPT que é impossível estimar a incerteza.

A determinação da densidade do solo abaixo da camada de 0-30 cm, geralmente é de difícil obtenção, já que o trabalho necessário é muito exaustivo (Sequeira et al., 2014). Além disso, a Ds do solo não é um atributo usado para classificação de solos, sendo escassa sua análise em perfis de levantamentos de solos.

Sendo as informações sobre a Ds de solos orgânicos escassas, o objetivo do presente trabalho foi a geração de novas FPT, e também avaliar a acurácia das equações já publicadas para a predição da densidade de solos e horizontes orgânicos do Brasil.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo partiu da elaboração de uma base de dados de solos com horizontes orgânicos de todas as regiões do Brasil. Foram encontrados 210 perfis de solos, totalizando 648 horizontes com características orgânicas (teores de carbono orgânico total iguais ou superiores à 80 g kg⁻¹ de solo). Apenas 280 horizontes com dados de Ds foram encontrados. Destes foram amostrados aleatoriamente 50 horizontes que consistiram nos dados de validação independente.

Foi aplicada a regressão linear múltipla (RLM) com o método de seleção *stepwise*. Todas as análises estatísticas foram realizadas no programa R (R Core Team, 2013). Para atender às pressuposições das análises de regressão, os dados foram transformados através da técnica de Box-Cox. Os resíduos foram submetidos aos testes t-Student (média), Shapiro-Wilk (normalidade), e



Breusch-Pagan (homocedasticidade).

Para avaliar a acurácia das equações foram usados os seguintes parâmetros: erro médio (ME), raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE), erro médio absoluto (MAE), coeficiente de correlação (r) e coeficiente de regressão (R^2). Foi realizado o teste de Tukey ($p < 0,05$) para comparar o ME das equações ajustadas e testadas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os atributos da **tabela 1** foram usados como dados de entrada na regressão, e a técnica stepwise selecionou as variáveis significativas nas equações. Assim, somente carbono orgânico total (COT) e argila se mostraram significativas nas equações de predição da Ds.

Em estudo para avaliar a importância das variáveis nos modelos de Ds, Jalabert et al. (2010) concluíram que o COT foi a variável mais importante na predição da Ds. Benites et al. (2007) reportou que o COT foi mais importante que a argila na predição da Ds para as camadas até 30 cm de profundidade, porém, a argila foi mais importante nas camadas de 30 a 100 cm de profundidade.

Foram geradas duas equações, sendo FPT1 e FPT2 (**Tabela 2**). A FPT1 foi gerada com as variáveis COT e argila, e a FPT2 somente com a variável COT, uma vez que a realização da análise dos teores de argila não é comum para solos orgânicos.

O valor- p dos parâmetros das duas equações geradas foram significativos ($< 0,05$), assim como o valor- p das equações (valor- p_m). Os R^2 das equações foram 0,58 e 0,52 para as equações FPT1 e FPT2, respectivamente. Já os R^2 ajustados (R^2_{adj}) foram 0,56 e 0,52 para FPT1 e FPT2 (**Tabela 2**).

Na **tabela 3** pode-se observar que, com exceção das equações de Honeysett e Adams, todas as demais subestimaram a Ds. As equações de Tomasella e Benites foram as que apresentaram os piores desempenhos, com os maiores ME, RMSE, e MAE. Estas equações foram desenvolvidas para solos minerais. As equações de Bernoux e Manrique também se mostraram limitadas, mostrando altos valores de RMSE e MAE.

As equações com melhor desempenho foram a FPT1, FPT2, Hollis, Jeffrey, e Honeysett (**Tabela 3**). Dentre estas, O R^2 variou de 0,36 a 0,47; o ME de -0,12 a 0,05; o RMSE de 0,22 a 0,26; e o MAE de 0,18 a 0,21. O ME destas equações foram semelhantes. De maneira geral, estes foram os

melhores valores de parâmetros de validação sobre os dados independentes.

A validação da equação de Hollis pelo autor explicou 29% da variação da Ds medida, com uma porcentagem de erro de $\pm 39\%$. No presente trabalho, a equação de Hollis explicou 36% da variação com uma porcentagem de erro $\pm 13\%$. O autor observou que para todas as equações desenvolvidas, a predição da Ds é relativamente limitada quando aplicada sobre um conjunto de dados de validação independente, mesmo quando proveniente da mesma área ou tipo de solo.

Tabela 3 - Validação com os dados independentes (50 amostras).

Modelo	n	r	R^2	ME ^a	RMSE	MAE
				----- g cm ⁻³ -----		
FPT1	75	0,69	0,47	-0,04b	0,22	0,18
FPT2	230	0,61	0,37	-0,10bc	0,26	0,21
Hollis	67	0,60	0,36	-0,06 b	0,24	0,19
Jeffrey	80	0,60	0,36	-0,12bc	0,26	0,21
Honeysett	136	0,61	0,37	0,05ab	0,24	0,20
Adams	45	0,59	0,35	0,28a	0,37	0,31
Tamminen	158	0,57	0,33	-0,05b	0,28	0,24
Manrique	19.651	0,57	0,33	-0,36c	0,50	0,39
Bernoux	323	0,64	0,41	-0,22bc	0,50	0,34
Tomasella	613	0,37	0,14	-2,07 e	2,19	2,07
Benites	1.396	0,56	0,31	-1,41 d	1,76	1,41

^a: letras iguais significam que as médias são semelhantes pelo teste de Tukey à 5%; n : número de observações; r : coeficiente de correlação; R^2 : coeficiente de regressão; ME: erro médio; RMSE: raiz quadrada do erro quadrático médio; MAE: erro médio absoluto. Hollis et al. (2012); Jeffrey (1970); Honeysett & Ratkowsky (1989); Adams (1973); Tamminen & Starr (1994); Manrique & Jones (1991); Bernoux et al. (1998); Tomasella & Hodnett (1998); Benites et al. (2007).

A FPT1 apresentou a maior acurácia e possui o COT e a argila como variáveis preditoras. Portanto, recomenda-se o uso desta equação para realizar estimativas da Ds em solos orgânicos. Porém, em muitos casos não são feitas as análises de argila para solos orgânicos. Como alternativa, têm-se a equação FPT2 que possui somente o COT como variável preditora.

A distribuição dos resultados preditos por todas as equações testadas é apresentada na **figura 1**. O box-plot das equações FPT1, FPT2, Hollis, Jeffrey, e Honeysett foram os mais semelhantes com o box-plot dos dados observados. Já os box-plots das equações de Benites, Tomasella, e Bernoux mostram que estas equações apresentaram os piores desempenhos de predição da Ds. Estas três equações empregaram mais de duas variáveis para predição da Ds, incluindo atributos químicos, sugerindo que estas não são boas variáveis preditoras das Ds em solos orgânicos.

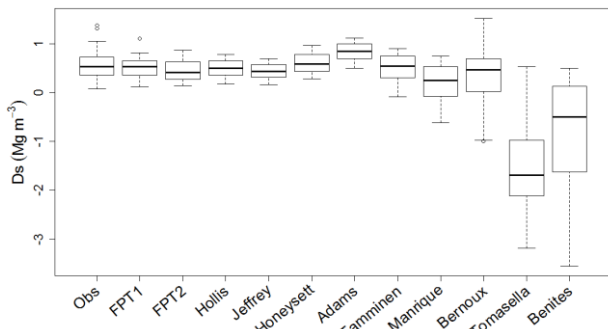


Figura 1 - Boxplot da densidade do solo observada e previstas pelas diferentes funções testadas na amostra independente. Ds: densidade do solo; Obs: valores de densidade do solo observados.

Na **figura 2** estão apresentadas as correlações entre as Ds observadas e previstas, aplicadas sobre os dados independentes.

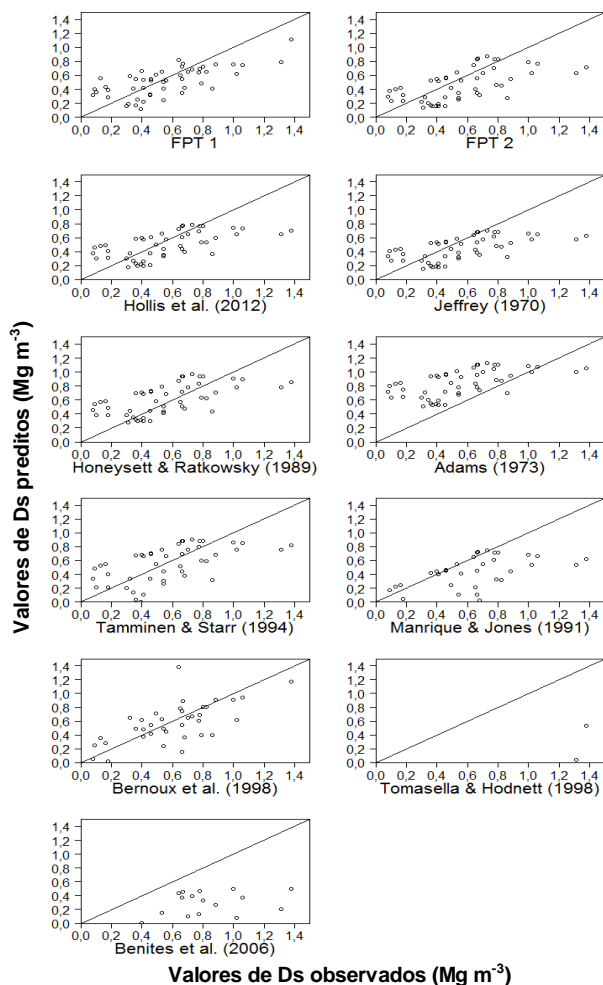


Figura 2 - Valores observados e previstos para as funções propostas e as já publicadas aplicadas no conjunto de dados de validação. Ds: densidade do solo.

Quanto maior a proximidade dos pontos com a linha diagonal melhor é a correlação. As equações melhor correlacionadas foram FPT1, FPT2, Hollis, Jeffrey e Honeysett. Já as equações de Manrique, Bernoux, Tomasella, e Benites apresentaram as piores correlações.

CONCLUSÕES

O COT e a argila são os melhores atributos para estimar a Ds em solos orgânicos.

Para estimar a Ds em solos orgânicos recomenda-se o uso da FPT1 quando houver dados de COT e argila; e a FPT2 quando houver somente dados de COT.

AGRADECIMENTOS

À CAPES, CNPq, FAPERJ, e ao Curso de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo (CPGA-CS) pelo apoio neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- ADAMS, W.A. The effect of organic matter on the bulk and true densities of some uncultivated podzolic soils. *J. Soil Sci.* 24:10–17, 1973.
- BENITES V. M.; MACHADO P. L. O. A.; FIDALGO E. C. C.; COELHO M. R.; & MADARI B. E.. Pedotransfer functions for estimating soil bulk density from existing soil survey reports in Brazil. *Geoderma*, 139:90–7, 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.
- BOUMA, J. Using soil survey data for quantitative land evaluation. *Advances in Soil Science*, New York, v. 9, p. 177-213, 1989.
- HOLLIS, J. M.; HANNAM, J. & BELLAMY, P.H. Empirically-derived pedotransfer functions for predicting bulk density in European soils. *European Journal of Soil Science*, 63:96–109, 2012.
- HONEYSETT, J.L. & RATKOWSKY D.A. The use of ignition loss to estimate bulk density of forest soils. *J. Soil Sci.* 40:299–308, 1989.
- JALABERT, S.S.M.; MARTIN, M.P.; RENAUD, J.P.; BOULONNE, L.; JOLIVET, C.; MONTANARELLA, L. & ARROUAYS, D. Estimating forest soil bulk density using boosted regression modeling. *Soil Use and Management*, 26:516–528, 2010.



JEFFREY, D.W. A note on the use of ignition loss as a means for the approximate estimation of soil bulk density. *J. Ecol.* 58:297–299, 1970.

MANRIQUE L.A. & C.A. JONES. Bulk density of soils in relation to soil physical and chemical properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55:476–481, 1991.

MCBRATNEY, A.B.; MINASNY, B.; CATTLE, S.R.; VERVOORT, R.W. From pedotransfer functions to soil inference systems. *Geoderma*, 109:41–73, 2002.

R CORE TEAM. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical

Computing, Vienna, Austria (URL: <http://www.R-project.org/>), 2013.

SEQUEIRA, C.H.; WILLS, S.A.; SEYBOLD, C. A. & WEST, L.T. Predicting soil bulk density for incomplete databases. *Geoderma*, 213:64–73, 2014.

TAMMINEN, P., & STARR, M. Bulk density of forested mineral soils. *Silva Fennica*, 28:53–60, 1994.

TOMASELLA, J. & HODNETT, M.G. Estimating soil water retention characteristics from limited data in Brazilian Amazonia. *Soil Science*, 163:190-202, 1998.

Tabela 1 - Estatística descritiva de todas as variáveis testadas.

Estatística	Areia	Argila	Silte	COT	Ds	S	T	Al ³⁺	H ⁺	V%	P	pH _{água}
	g Kg ⁻¹				Mg m ⁻³	cmol _c Kg ⁻¹				%	mg Kg ⁻¹	
<i>n</i>	119	125	119	280	280	254	248	274	247	248	201	272
Mínimo	0	0	9	82,4	0,05	0,18	6,8	0	0,7	0,3	0	2
Máximo	970	903	960	638,6	1,42	88,8	179	81,5	142,94	99	88	7,5
1º quartil	54	125	171	138,1	0,17	1,65	35,17	1,2	18,57	6	2	3,9
Mediana	158	310	270	229,9	0,41	7,25	44,8	3,45	30,2	16	5	4,4
3º quartil	570	590	385	408,9	0,68	16,6	62,12	6,46	40,83	31	14,2	4,8
Média	297,63	350,82	315,98	259,31	0,46	12,43	52,60	6,02	32,17	22,73	12,06	4,36
DP	302,67	259,77	213,93	137,69	0,30	16,25	28,52	9,31	21,09	22,65	16,68	0,77
CV (%)	102	74	68	53	65	131	54	155	66	100	138	18
Assimetria	0,79	0,17	1,14	0,54	0,67	2,32	1,66	4,07	1,92	1,40	2,18	0,16
Curtose	-0,87	-1,44	0,93	-1,00	-0,04	5,82	3,86	22,08	6,61	1,49	4,84	1,67
Teste de normalidade de Shapiro-Wilk												
W	0,84	0,91	0,90	0,91	0,93	0,71	0,87	0,57	0,86	0,84	0,70	0,98
valor- <i>p</i>	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001

n: número de amostras; **DP**: desvio padrão; **CV**: coeficiente de variação (%); **Areia**: areia total (g Kg⁻¹); **Argila**: argila total (g Kg⁻¹); **Silte**: (g Kg⁻¹); **COT**: carbono orgânico total (g Kg⁻¹); **Ds**: densidade do solo (Mg m⁻³); **S**: soma das bases Ca, Mg, K e Na (cmol_c Kg⁻¹); **T**: capacidade de troca de cátions (cmol_c Kg⁻¹); **Al³⁺**: alumínio trocável (cmol_c Kg⁻¹); **H⁺**: hidrogênio trocável (cmol_c Kg⁻¹); **V%**: saturação de bases (%); **P**: fósforo assimilável (mg Kg⁻¹); **pH_{água}**: potencial de hidrogênio em água (1:2,5); **W**: valor da estatística de Shapiro-Wilk (mais próximos de 1 tendem a ter maior distribuição de normalidade).

Tabela 2 - Funções de pedotransferência geradas para densidade do solo e seus respectivos índices estatísticos da regressão.

Regressão	FPT1			FPT2	
Equação	Ds = [1,6179 – 0,0180*(Argila+1) ^{0,46} – 0,0398*COT ^{0,55,1,33}]			Ds = [4,0899 – 2,3978*COT ^{0,06,3,85}]	
<i>n</i>	75			230	
Parâmetro	Intercepto	(Argila+1) ^{0,46}	COT ^{0,55}	Intercepto	COT ^{0,06}
B	1,6179	-0,0180	-0,0398	4,0899	-2,3978
EP	0,1016	0,0038	0,0042	0,2110	0,1521
Valor <i>t</i>	15,92	-4,72	-9,47	19,39	-15,77
Valor- <i>p</i>	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Valor- <i>p</i> _m	< 0,001			< 0,001	
R ²	0,58			0,52	
R ² _{adj}	0,56			0,52	
SE	0,19			0,11	

n: número de amostras de treinamento; B: valor *beta*; EP: erro padrão das variáveis; Valor-*p*_m: valor-*p* do modelo; R²_{adj}: coeficiente de regressão ajustado; SE: erro padrão do modelo; Ds: densidade do solo (Mg m⁻³); Argila: argila total (g Kg⁻¹); COT: carbono orgânico total (g Kg⁻¹).