

Uso de Sensor Dielétrico para Estimativa da Densidade do Solo no Cerrado



ISSN 1676-918X
ISSN online 2176-509X
Abril, 2009

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Cerrados
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 249

Uso de Sensor Dielétrico para Estimativa da Densidade do Solo no Cerrado

*Marcos Aurélio Carolino de Sá
João de Deus Gomes dos Santos Junior
Robelio Leandro Marchão
Lourival Vilela*

Embrapa Cerrados
Planaltina, DF
2009

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Cerrados

BR 020, Km 18, Rod. Brasília/Fortaleza

Caixa Postal 08223

CEP 73310-970 Planaltina, DF

Fone: (61) 3388-9898

Fax: (61) 3388-9879

<http://www.cpac.embrapa.br>

sac@cpac.embrapa.br

Comitê de Publicações da Unidade

Presidente: *Fernando Antônio Macena da Silva*

Secretária-Executiva: *Marina de Fátima Vilela*

Secretária: *Maria Edilva Nogueira*

Supervisão editorial: *Jussara Flores de Oliveira Arbués*

Equipe de revisão: *Francisca Eljani do Nascimento*

Jussara Flores de Oliveira Arbués

Assistente de revisão: *Elizelva de Carvalho Menezes*

Normalização bibliográfica: *Paloma Guimarães Correa de Oliveira*

Editoração eletrônica: *Leila Sandra Gomes Alencar*

Capa: *Leila Sandra Gomes Alencar*

Foto(s) da capa: *Marcos Aurélio Carolino de Sá*

Impressão e acabamento: *Divino Batista de Souza*

Alexandre Moreira Veloso

1ª edição

1ª impressão (2009): tiragem 100 exemplares

Edição online (2009)

Todos os direitos reservados

A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei no 9.610).

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Embrapa Cerrados**

U86 Uso de sensor dielétrico para estimativa da densidade do solo no Cerrado. / Marcos Aurélio Carolino de Sá... [et al.]. – Planaltina, DF : Embrapa Cerrados, 2009.

30 p. — (Boletim de pesquisa e desenvolvimento / Embrapa Cerrados, ISSN 1676-918X, ISSN online 2176-509X ; 249).

1. Cerrado. 2. Solo. 3. Agricultura de precisão. I. Sá, Marcos Aurélio Carolino de. II. Série.

Sumário

Resumo	4
Abstract.....	6
Introdução.....	7
Material e Métodos.....	9
Equipamento utilizado.....	9
Fundamentos teóricos para estimativa da densidade do solo com base no sensor dielétrico.....	10
Solos estudados e procedimento para geração dos modelos	12
Resultados e Discussão.....	16
Conclusões.....	27
Agradecimentos	27
Referências	28

Uso de Sensor Dielétrico para Estimativa da Densidade do Solo no Cerrado

Marcos Aurélio Carolino de Sá¹; João de Deus Gomes dos Santos Junior²; Robélio Leandro Marchão³; Lourival Vilela⁴

Resumo

A densidade do solo é um atributo dependente de características do solo e do manejo. Sua determinação em laboratório é relativamente simples, entretanto o processo de coleta de amostras no campo é trabalhoso. Sua estimativa com base em outros atributos do solo pode facilitar o trabalho de diagnóstico da compactação em áreas agrícolas. O objetivo deste estudo foi avaliar a capacidade de predição da densidade do solo em condições de campo a partir de modelos que utilizam, como variáveis, teores de areia, argila e umidade gravimétrica determinados em amostras deformadas, associados à voltagem medida por meio de um sensor com princípio de funcionamento dielétrico. Os modelos foram ajustados com base em dados coletados em três solos da Embrapa Cerrados (Neossolo Quartzarênico – RQ, Latossolo Vermelho-Amarelo – LVA e Latossolo Vermelho – LV) e a validação foi feita em área de produção de grãos no Distrito Federal, sob latossolos com textura variando de média a muito argilosa. Concluiu-se que a densidade do solo pode ser estimada ($R^2 = 0,7617$; $P < 0,0001$) a partir da voltagem fornecida pelo sensor dielétrico em condições de campo, associada ao teor gravimétrico de água no solo durante a medição, e que, quando adicionado ao modelo, o teor de areia melhora sensivelmente a precisão da estimativa ($R^2 = 0,7933$; $P < 0,0001$).

Termos para indexação: funções de pedotransferência, textura, agricultura de precisão, umidade, predição, compactação.

¹ Engenheiro Agrônomo, D.Sc., Pesquisador da Embrapa Cerrados, carolino@cpac.embrapa.br

² Engenheiro Agrônomo, D.Sc., Pesquisador da Embrapa Cerrados, jdsantos@cpac.embrapa.br

³ Engenheiro Agrônomo, D.Sc., Pesquisador da Embrapa Cerrados, robelio.leandro@cpac.embrapa.br

⁴ Engenheiro Agrônomo, M.Sc., Pesquisador da Embrapa Cerrados, lvilela@cpac.embrapa.br

Use of a Dielectric-based Sensor for Estimating Bulk Density in Cerrado Soils

Abstract

Soil bulk density is influenced by soil type and management. Its determination in laboratory is relatively easy but the sampling process of soil cores is time-consuming. The prediction of bulk density using pedotransfer functions can facilitate the soil mapping in precision agriculture. The objective of this study was to evaluate the prediction of soil bulk density of Cerrado soils using a dielectric-based sensor. The prediction models were build from soil measurements collected at Embrapa Cerrados experimental fields, and the validation process were done using a diverse set of soil texture from sand to very clayey Oxisols sampled in a private farm area. It was concluded that bulk density can be easily and accurately estimated using the dielectric sensor and the gravimetric soil water content at field conditions ($R^2 = 0,7617$; $P < 0,0001$), especially when the sand content was added to the model ($R^2 = 0,7933$; $P < 0,0001$).

Index terms: pedotransfer functions, soil texture, precision agriculture, soil moisture, prediction, compaction.

Introdução

A densidade do solo, também chamada densidade aparente (D_s), expressa em g cm^{-3} , é um atributo que pode variar de solo para solo em função de características pedogenéticas, tais como textura e mineralogia. É facilmente alterada pelo uso e manejo, podendo ser utilizada como indicativo do grau de compactação do solo. Sua determinação laboratorial, embora simples, nem sempre é realizada rotineiramente nos laboratórios comerciais. Além disso, a coleta de amostras indeformadas é morosa e trabalhosa, requer mão de obra treinada e cuidados especiais para se evitar alterações na estrutura original do solo durante o processo de amostragem. Dessa forma, o uso desse atributo para se avaliar a compactação do solo em áreas extensas de produção pode ser inviável, principalmente se for necessário grande número de amostras, como no caso de amostragem em malha regular em sistemas de manejo que utilizam ferramentas de agricultura de precisão.

Macedo et al. (2002) relatam que a tomografia computadorizada apresenta boa precisão para determinação da densidade do solo. Embora sofisticado, o acesso a esse método é restrito a poucos grupos de pesquisa no Brasil. Uma saída seria o uso de funções de pedotransferência, que, conforme Bouma et al. (1999), podem ser utilizadas para se estimar atributos de difícil mensuração a partir de atributos facilmente mensuráveis. Entretanto, conforme relatado por Minasny et al. (2003), a densidade do solo é considerada um atributo primário, ou seja, utilizado em funções de pedotransferência como variável para se estimar outros atributos do solo, tais como condutividade, permeabilidade e retenção de água, não sendo comum a sua estimativa a partir de outros atributos. Contudo, existem modelos, como os propostos por Bernoux et al. (1998) e Benites et al. (2007), para estimativa de densidade do solo a partir da textura, soma de bases e matéria orgânica.

Nagaoka et al. (2005) utilizaram redes neurais para estimativa, em caráter experimental, da densidade do solo com base em dados de

resistência à penetração, teor de água e teor de argila. Entretanto, os autores alertam que a formulação de um modelo matemático para predição da densidade do solo a partir dessas variáveis é muito difícil e limitada, dada à complexidade e comportamento não linear dos parâmetros relacionados a esse atributo.

A densidade é utilizada no cálculo do teor de água do solo em base volumétrica (θ , $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) a partir do teor de água gravimétrico (U , g g^{-1}), obtido em laboratório pelo método da estufa, onde este último é multiplicado pela relação entre a densidade do solo e densidade da água. Com base nesse princípio e na possibilidade de se estimar θ também por métodos indiretos, idealizou-se o presente trabalho. Diversos equipamentos têm sido propostos para a estimativa de θ , tais como o já obsoleto método de Speady (ANDRADE et al., 2008); os métodos baseados em sensores ou sondas, como reflectometria com domínio do tempo ou TDR (TOPP et al., 1980); os sensores do tipo capacitivo ou reflectometria no domínio da frequência ou FDR (ROBINSON; DEAN 1993; NADLER; LAPID 1996); os sensores dielétricos (SEYFRIED; MURDOCK 2004) ou outros métodos, como sonda de nêutrons, sonda de raios gama, ressonância nuclear magnética, fibra ótica e métodos geofísicos como radar, microondas e ultrassom (ANDRADE et al., 2008).

A possibilidade de se estimar a densidade do solo a partir de leituras de um equipamento TDR foi relatada por Ochsner et al. (2001) em condições de laboratório. Essa possibilidade, associada ao advento de penetrômetros combinados a um medidor tipo TDR, que permitem leituras simultâneas de resistência à penetração e θ , como o desenvolvido por Vaz et al. (2001), podem auxiliar na caracterização da compactação do solo.

Recentemente, com o advento do GPS e de técnicas de manejo localizado utilizadas na agricultura de precisão, amostragens de solo têm sido feitas em grades amostrais, principalmente para obtenção de mapas de textura e fertilidade do solo e sua relação com mapas de produtividade. Entretanto, mapear a densidade do

solo para avaliação da compactação tem sido uma tarefa um tanto árdua, dado as dificuldades supracitadas. Paralelamente, têm sido desenvolvidos sensores que, acoplados a tratores, efetuam medições georreferenciadas em tempo real da condutividade elétrica do solo para mapeamento detalhado dessa característica (JOHNSON et al., 2003; ROBINSON et al., 2004). Em outros países onde esses equipamentos já estão disponíveis comercialmente, medições de condutividade elétrica podem funcionar como um indicador indireto de um grande número de propriedades físicas e químicas como salinidade, textura e capacidade de troca de cátions, além do teor de água volumétrico do solo (SUDDUTH et al., 2003). Entretanto, a interpretação desses resultados de condutividade elétrica deve ser feita de maneira cuidadosa (CORWIN; LESCH, 2003). Com relação especificamente à estimativa de θ , em estudos prévios, demonstrou-se alta correlação entre esse atributo e a voltagem medida por sensores dielétricos (SEYFRIED; MURDOCK 2004; SEYFRIED et al., 2005; SÁ et al., 2008). Assim, o objetivo desse trabalho foi avaliar a capacidade de predição da densidade do solo em condições de campo a partir de modelos que utilizam como variáveis teores de areia, argila e umidade gravimétrica determinados em amostras deformadas, associados à voltagem medida por meio de um sensor com princípio de funcionamento dielétrico.

Material e Métodos

Equipamento utilizado

Foi utilizado um equipamento de princípio dielétrico marca *Stevens*, modelo *Hydra Probe*[®] (Fig. 1A). O sensor é alimentado por uma bateria alcalina de 9 V, e a parte que é inserida no solo possui quatro hastes de metal de 5,8 cm de comprimento, sendo uma central e três ao redor, em formato de triângulo equilátero com 2,2 cm de lado (Fig. 1B). Uma vez inserida no solo e com o equipamento ligado, a haste central emite um sinal eletromagnético de 50 MHz de frequência, que é recepdado pelas hastes laterais, sendo as tensões medidas em volts (V) por um multímetro convencional. Essas tensões correspondem ao comportamento propagado da onda eletromagnética, a qual varia em função da variação do teor de água volumétrico no solo. Maiores detalhes sobre esse equipamento e seu princípio de funcionamento são

descritos em Seyfried e Murdock (2004), Seyfried et al. (2005) e Sá et al. (2008).

Fundamentos teóricos para estimativa da densidade do solo com base no sensor dielétrico

O equipamento utilizado foi desenvolvido para estimativa no campo do teor de água volumétrico do solo (θ), que é dado em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$. Na medida em que θ varia, a tensão em volts medida pelo aparelho também varia linearmente. O processo de calibração e utilização para essa finalidade nas condições de solos do Cerrado foi descrito por Sá et al. (2008).

O teor de água volumétrico também pode ser obtido em laboratório, a partir do produto do teor de água gravimétrico pela relação entre a densidade do solo e a densidade da água (essa última varia sensivelmente em função da temperatura, mas, para efeitos práticos, no presente trabalho, foi considerada como $1,0 \text{ g cm}^{-3}$). Essa relação será válida apenas se forem utilizadas as unidades expressas pela equação 1:

$$\theta = U \times \frac{D_s}{D_a} \quad (1)$$

Em que:

θ é o teor de água volumétrico no solo, em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$.

U é o teor de água gravimétrico no solo, em g g^{-1} (equação 2).

D_s é a densidade aparente do solo, em g cm^{-3} (equação 3).

D_a é a densidade da água, considerada como $1,0 \text{ g cm}^{-3}$.

$$U = \frac{M_u}{M_s} - 1 \quad (2)$$

Em que:

U é o teor de água gravimétrico no solo, em g g^{-1} .

M_u é a massa da amostra de solo úmido, nas condições em que foi coletada no campo, em gramas.

M_s é a massa da mesma amostra de solo após seca em estufa a $105 \text{ }^\circ\text{C}$ por 24 h, em gramas.

$$D_s = \frac{M_s}{V} \quad (3)$$

Em que:

D_s é a densidade aparente do solo, em g cm^{-3} .

M_s é a massa de solo no interior do anel volumétrico seco em estufa a $105\text{ }^\circ\text{C}$ por 24 h, em gramas.

V é o volume do anel volumétrico (neste trabalho, $98,17\text{ cm}^3$).

Dessa forma, conhecendo-se os teores de água volumétrico e gravimétrico no solo, é possível obter matematicamente a densidade do solo pela equação 4, obtida a partir da relação expressa pela equação 1:

$$D_s = \frac{D_a \times \theta}{U} \quad (4)$$

Com base nesse princípio, seria possível estimar a densidade do solo sem a necessidade de se obter amostras indeformadas. Para tanto, poderia ser utilizada uma amostra de solo deformada para determinação do teor de água gravimétrico associada a uma leitura em volts feita no campo com o solo em sua estrutura original, utilizando-se o equipamento supracitado no momento exato da coleta dessa amostra. Naturalmente, a densidade estimada estaria sujeita ao erro de leitura proporcionado pelo aparelho, que, na determinação de θ com o equipamento utilizado no presente estudo, pode variar entre $\pm 0,06\text{ cm}^3\text{ cm}^{-3}$, conforme demonstrado por Sá et al. (2008).

A densidade de um solo varia em função de características inerentes ao seu material de origem e gênese, tais como textura e mineralogia. Teores de areia mais elevados tendem a proporcionar valores de densidade também mais elevados, pois, comparado aos solos argilosos, os solos arenosos têm porosidade total mais baixa, a qual é composta predominantemente por macroporos, uma vez que a formação de estrutura (agregados) é dificultada em decorrência dos baixos teores de argila e matéria orgânica, concordando com Sá e Santos Junior (2005) e Sá et al. (2007). Quanto à mineralogia, solos mais intemperizados – como os Latossolos do Cerrado – tendem a ser mais ricos em óxidos de ferro e alumínio – o que favorece a estrutura granular,

conferindo alta porosidade (macroporosidade elevada mesmo com teores elevados de argila) e menor densidade. Entretanto, a iluviação de argila em alguns solos pode proporcionar aumento de densidade em horizontes subsuperficiais (RESENDE et al., 2002). Com relação ao manejo, seu efeito pode ser o de cargas aplicadas – pisoteio ou tráfego de máquinas e veículos em geral – ou o efeito do preparo de solo, oriundo da desagregação proporcionada por implementos agrícolas (DIAS JÚNIOR, 1994). O teor de matéria orgânica também apresenta relação com a densidade do solo (BERNOUX et al., 1998), o qual pode variar em função do manejo do solo (SILVA et al., 1994). Entretanto, independente da causa, a variação da densidade proporcionará alterações na distribuição de poros no solo e, conseqüentemente, na relação entre os teores de água gravimétrico e volumétrico, estando esse último diretamente relacionado com a voltagem medida pelo aparelho.

Solos estudados e procedimento para geração dos modelos

A coleta de dados foi feita em área experimental da Embrapa Cerrados, localizada em Planaltina, DF (latitude: 15° 35' 30" S; longitude: 47° 42' 30" W; e altitude: 1.100 m). O clima é do tipo tropical estacional (Aw), com precipitação média anual de 1.500 mm, concentrada no período que vai de outubro a março. As médias das temperaturas mínimas e máximas são de 15,9 °C e 26,4 °C, respectivamente.

Foram escolhidos dois locais, sendo o primeiro uma topossequência situada num transecto de aproximadamente 1.000 m (Fig. 1C), onde foram avaliados três pontos em áreas sob pastagem, os quais apresentam entre si variação textural desde arenosa até muito argilosa, representados pelas classes Neossolo Quartzarênico (RQ), Latossolo Vermelho-Amarelo com textura média (LVAm) e Latossolo Vermelho-Amarelo com textura muito argilosa (LVAa). O segundo local é um experimento de longa duração que versa sobre integração lavoura-pecuária, implantado em Latossolo Vermelho textura muito argilosa (Fig. 1D). Foram escolhidos os seguintes tratamentos: pastagem consorciada contínua (LVa1); pastagem de gramíneas contínua (LVa2); e rotação lavoura-pastagem sob preparo dinâmico (LVa3).

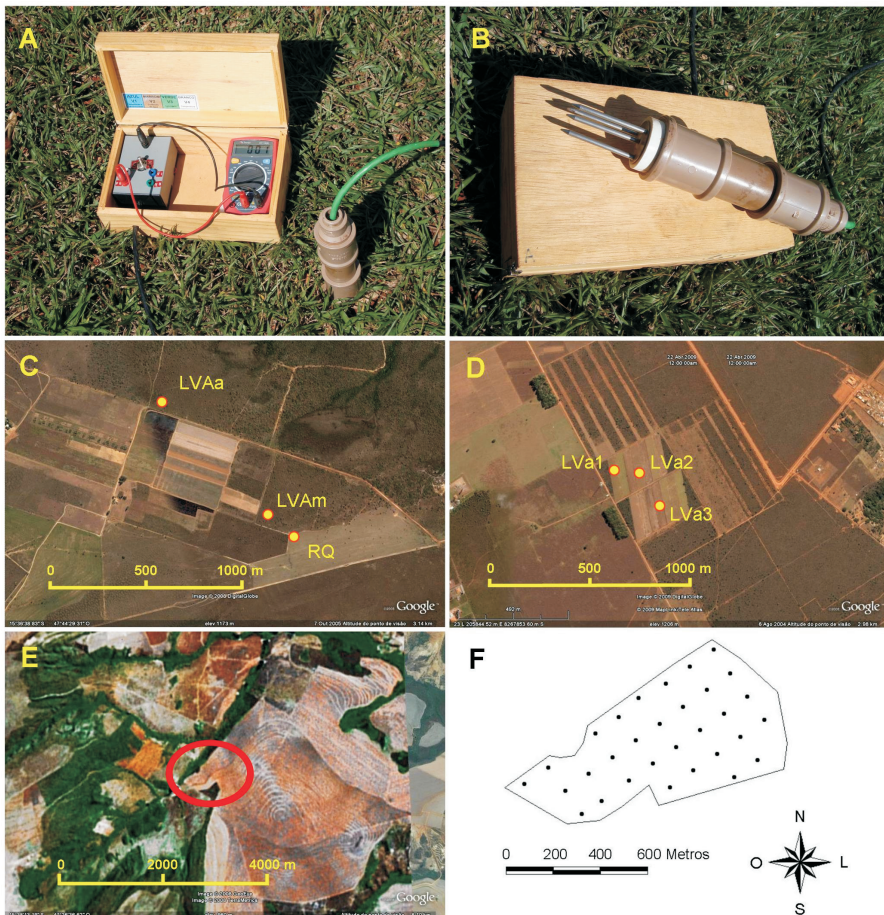


Fig. 1. (A) Detalhe do equipamento utilizado durante as medições; e (B) das hastes que são inseridas no solo; (C) pontos localizados na área da Embrapa Cerrados utilizados para coleta de dados e geração dos modelos, sendo áreas utilizadas com pastagens nativas, compostas por Neossolo Quartzarênico (RQ), Latossolo Vermelho Amarelo textura média (LVAm) e textura muito argilosa (LVAa); e (D) em experimento de integração lavoura-pecuária, composto por Latossolo Vermelho textura muito argilosa, composto pelos tratamentos pastagem consorciada contínua (LVa1), Pastagem de gramíneas contínua (LVa2) e Rotação Lavoura pastagem sob preparo dinâmico (LVa3); (E) parte do talhão da Fazenda Sementes Primavera (circundada em vermelho) utilizada para validação dos modelos ajustados; e (F) esquema da grade amostral de 125 m x 125 m utilizada para amostragem de validação dos modelos.

Os ensaios foram realizados durante a estação seca, com a finalidade de se evitar a interferência de chuvas no teor de água do solo. Assim, em agosto de 2007, quando os solos apresentavam teor de água abaixo do ponto de murcha na camada 0 m a 0,05 m, em cada ponto foi saturada uma área de 4 m² (2 m x 2 m), adicionando-se aproximadamente 2 mil litros de água com auxílio de uma pipa tracionada por trator. Cessada a aplicação da água, as medições foram iniciadas 15 minutos após o desaparecimento da lâmina d'água da superfície do solo. Foram utilizados dois equipamentos idênticos, considerados como repetições, sendo as duas medições feitas simultaneamente em cada ponto. Para tanto, as hastes de 5,8 cm foram inseridas no solo, anotando-se o valor de tensão (*V*) (Fig. 1A e 1B). Dessa forma, foi avaliada a camada de 0 m a 0,058 m de profundidade. Logo depois de desligados os aparelhos, coletaram-se, imediatamente, ao lado de cada sensor, na camada de 0 m a 0,05 m de profundidade, amostras de solo indeformadas, por meio de anel volumétrico de 5 cm de altura por 5 cm de diâmetro. As amostras foram levadas ao laboratório para determinação do teor de água gravimétrico (*U*) e densidade aparente (*D_s*) do solo, conforme as Equações 2 e 3, seguindo procedimentos descritos em Embrapa (1997). Amostras deformadas também foram utilizadas para determinação da textura, conforme Embrapa (1997).

Em cada ponto, a primeira leitura foi realizada pela manhã, logo após a saturação do solo. A segunda leitura foi feita no período da tarde do mesmo dia. A terceira, quarta e quinta leituras foram feitas sempre no período da manhã, nos três dias seguintes à saturação do solo. A sexta leitura ocorreu no quinto dia após saturação, e a sétima leitura, no oitavo dia após a saturação, ambas pela manhã, visando obter uma variação no teor de água do solo. Foram feitas também medições em solo seco (fora da área saturada) apenas nos solos RQ e LVAm, uma vez que não foi possível inserir a haste no LVAA, e no LVa, dada a consistência extremamente dura e elevada coesão entre as partículas desses solos quando secos, proporcionadas pelo elevado teor de argila.

Foram ajustadas regressões lineares de *D_s* (g cm⁻³) em função das respectivas tensões (*V*) obtidos em todos os solos. Também foram

ajustados modelos de regressão linear (*stepwise - backward*) de D_s em função da tensão (V); teor de água gravimétrico ($U \text{ g g}^{-1}$) do solo no momento da medição; teores de areia (g kg^{-1}) e argila (g kg^{-1}), conforme a equação 5. Para tanto, foi utilizado o aplicativo estatístico SAEG5. EXE®. A decisão sobre a permanência ou retirada de uma variável do modelo, bem como a escolha do modelo, foi tomada com base na análise da significância dos coeficientes associados a cada variável.

$$D_{s_{\text{est}}} = c_1 + (c_2 \times \text{Var1}) + (c_3 \times \text{Var2})\dots + \dots(c_N \times \text{VarN}) \quad (5)$$

Em que:

$D_{s_{\text{est}}}$ é a densidade do solo estimada pelo modelo, em g cm^{-3} .

c_1, c_2, c_3 e c_N são os coeficientes ajustados.

$\text{Var1}, \text{Var2}$ e VarN são as variáveis (atributos do solo).

Uma vez ajustados e escolhidos os modelos, sua validação foi feita em área pertencente à parte de um talhão de produção comercial de grãos com 52 ha e declividade média de 5 %, localizada na Fazenda Sementes Primavera, situada próximo a Planaltina, DF (latitude: $15^\circ 38' 16'' \text{ S}$; longitude: $47^\circ 26' 52'' \text{ O}$; e altitude: 949 m), a aproximadamente 40 km de distância da Embrapa Cerrados (Fig. 1E). Essa área foi escolhida pelo fato de estar sob Latossolos com textura variando de média a muito argilosa. O local, originalmente sob vegetação de Cerrado, foi desmatado em meados da década de 1970 para implantação de pastagem, a qual, na década de 1980, passou a ser constituída por *Andropogon gayanus*. Em 1988, a área passou a ser cultivada com culturas anuais em sistema convencional (grade pesada). Na safra 1995/1996, foi iniciado o sistema de plantio direto envolvendo soja e milho (três anos com soja e um ano com milho). As medições foram feitas em grade amostral de 125 m x 125 m, totalizando 31 pontos (Fig. 1F), no mês de outubro de 2007, sendo utilizados os dois aparelhos e feita a coleta de solo em cada ponto com anéis volumétricos, conforme descrito no processo de geração dos modelos.

Os valores de D_s estimados pelos modelos ajustados foram confrontados com os valores de D_s determinados em laboratório, tanto

para os solos das áreas utilizadas para ajuste dos modelos quanto na área utilizada para validação. A distribuição dos resíduos, expressa em ΔDs (Ds determinada em laboratório – Ds estimada pelo aparelho com base nos modelos), foi avaliada graficamente. Visando a caracterização espacial das variáveis analisadas, os mapas de Ds determinada e estimada pelos modelos foram interpolados pelo inverso da distância, utilizando-se o aplicativo ArcView GIS 3.2, conforme procedimentos descritos em Shiratsuchi et al. (2005).

Resultados e Discussão

De acordo com Adámoli et al. (1986), os Latossolos correspondem a 46 % da área do Bioma Cerrado, enquanto os Neossolos Quartzarênicos correspondem a 15,2 %. Nos Latossolos, a textura pode variar em função do teor de argila, desde média (entre 160 e 350 g kg⁻¹) até muito argilosa (mais de 600 g kg⁻¹). Nos Neossolos Quartzarênicos, a textura é, por definição, arenosa (< 150 g kg⁻¹ de argila) (EMBRAPA, 2006). No caso específico dos solos utilizados para calibração, em estudo feito no mesmo local, Macedo e Bryant (1987) demonstraram que a mineralogia da fração argila desses solos é composta basicamente por caulinita; gibbsita e óxidos de ferro (goethita e hematita); mineralogia, essa típica da grande maioria dos solos tropicais; e entre eles, os do Cerrado (RESENDE et al., 2002). Dessa forma, espera-se que as diferenças existentes entre os solos utilizados para ajuste dos modelos sejam mais devidas à textura do que à mineralogia.

Embora tenham sido observados valores de densidade relativamente elevados (Tabela 1), sobretudo nos solos RQ e LVAm, esses valores são influenciados principalmente pelos teores mais elevados de areia, que tendem a proporcionar densidades mais elevadas (BERNOUX et al., 1998; SÁ e SANTOS JUNIOR 2005; SÁ et al., 2007; SÁ et al., 2008). Assim, considerando-se a abrangência dessas classes de solo e a variação nos teores de argila existentes nos solos utilizados no presente estudo, pode-se afirmar que o ajuste dos modelos foi feito em condições representativas dos solos do Bioma Cerrado.

Tabela 1. Momento estatístico das variáveis obtidas na Embrapa Cerrados e na Fazenda Sementes Primavera, utilizadas no ajuste e validação dos modelos, respectivamente.

Variável	Momento estatístico				
	N	Média	Desvios	Mínimo	Máximo
..... Embrapa Cerrados					
Ds (g cm ⁻³)	70	1,259	0,145	0,957	1,650
Argila (g kg ⁻¹)	70	439,429	266,038	80,000	728,000
Areia (g kg ⁻¹)	70	511,686	279,688	244,000	890,000
Voltagem (V)	70	1,551	0,383	1,008	2,480
Ug (g g ⁻¹)	70	0,226	0,099	0,012	0,380
..... Sementes Primavera					
Ds (g cm ⁻³)	31	1,051	0,140	0,805	1,260
Argila (g kg ⁻¹)	31	400,645	201,675	170,000	670,000
Areia (g kg ⁻¹)	31	429,677	226,311	100,000	670,000
Voltagem (V)	31	1,603	0,132	1,249	1,797
Ug (g g ⁻¹)	31	0,250	0,072	0,155	0,360

Foram ajustados modelos linear, quadrático e cúbico para a estimativa da densidade a partir da voltagem, cujos coeficientes e respectiva significância podem ser observados na Tabela 2. Embora baixos, os valores de R² foram significativos. Os baixos valores de R², refletindo acentuada dispersão dos dados (Fig. 2), corroboram com Corwin e Lesch (2003), que relataram baixas correlações entre Ds e condutividade elétrica. Essa elevada dispersão pode ser explicada pelo fato de que, em cada solo, a voltagem varia em função do teor de água volumétrico, o qual variou substancialmente durante o período em que foram feitas as medições, conforme também demonstrado por Sá et al. (2008), ao passo que a densidade do solo não acompanha tais variações.

Dessa forma, foram ajustados pelo método de stepwise-backward, modelos para estimativa da densidade a partir da voltagem e demais atributos do solo. Numa primeira etapa, foram incluídas no ajuste para estimativa da Ds as variáveis voltagem, teor de argila, areia e teor de água gravimétrico no momento da medição. O modelo completo (modelo 1) apresentou um valor de R² relativamente elevado e significativo (0,7943, P<0,0001), porém as variáveis areia e argila

apresentaram baixos níveis de significância (Tabela 3). Dessas, a variável argila, que apresentava menor significância ($P = 0,2919$), foi retirada no primeiro passo, sendo então ajustado o modelo 2. Essas variáveis (areia e argila) são auto-correlacionadas, o que é indesejável em um modelo de regressão múltipla. Dessa forma, é interessante que apenas uma permaneça no modelo.

Tabela 2. Coeficientes e respectivas significâncias para os modelos linear, quadrático e cúbico de estimativa da densidade do solo (g cm^{-3}) a partir da voltagem.

Variável	Linear		Quadrático		Cúbico	
	Coefic.	P	Coefic.	P	Coefic.	P
V	0,2210	<0,0001	0,6156	0,0336	-5,7017	0,0025
V ²	-	-	-0,1180	0,1190	3,7017	0,0012
V ³	-	-	-	-	-0,7434	0,0008
Constante	0,9166	-	0,6055	-	3,9628	-
R ²	0,3414	<0,0001	0,3548	<0,0001	0,4387	<0,0001

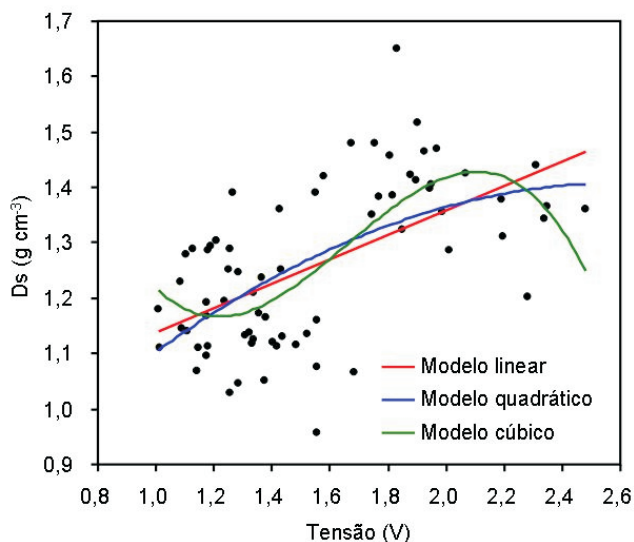


Fig. 2. Relação entre tensão (V) e densidade do solo (Ds , g cm^{-3}) explicadas pelos modelos linear, quadrático e cúbico.

Tabela 3. Coeficientes e respectivas significâncias para os modelos 1, 2, 3 e 4 para estimativa da densidade do solo (g cm^{-3}) a partir da voltagem, areia, argila e teor de água gravimétrico.

Variável	Completo (Modelo 1)		Passo 1 (Modelo 2)		Passo 2 (Modelo 3)		Passo 3 (Modelo 4)	
	Coefic.	P	Coefic.	P	Coefic.	P	Coefic.	P
Voltagem (V)	-0,5781	0,0001	-0,5721	0,0001	-0,6630	0,0001	-	-
Areia (g kg^{-1})	0,0004	0,1337	0,0002	0,0007	-	-	-	-
Argila (g kg^{-1})	0,0002	0,2919	-	-	-	-	-	-
U (g g^{-1})	-2,6504	0,0001	-2,6364	0,0001	-3,5571	0,0001	-1,0801	0,0001
Constante	2,4298	-	2,6256	-	3,0907	-	1,5032	-
R ²	0,7943	< 0,0001	0,7933	< 0,0001	0,7617	< 0,0001	0,5422	< 0,0001

O modelo 2 permite estimar a densidade do solo com base na voltagem, teor de areia e teor de água gravimétrico, com um R^2 tão alto quanto o modelo 1 (0,7933; $P < 0,0001$) (Tabela 3). A dispersão dos dados foi próxima da reta 1:1, e a distribuição dos resíduos foi bastante uniforme, sem tendência visível de pontos aglomerados (Fig. 3), sendo que aproximadamente 89 % das estimativas apresentaram um erro (ΔDs) entre $\pm 0,1 \text{ g cm}^{-3}$. Neste caso, embora todos os coeficientes tenham sido significativos ($P < 0,01$), o coeficiente associado à variável areia apresentou menor significância do que os demais ($P = 0,0007$), sendo eliminado no passo seguinte.

No segundo passo, foi ajustado o modelo 3, que permite estimar a Ds a partir da voltagem e do teor de água gravimétrico do solo com valor de R^2 sensivelmente menor do que os modelos 1 e 2 (0,7617, $P < 0,0001$). Esse modelo apresentou dispersão de dados e distribuição de resíduos muito parecida com o modelo 2, com aproximadamente 87 % das estimativas apresentando um erro (ΔDs) entre $\pm 0,1 \text{ g cm}^{-3}$ (Fig. 3). Os coeficientes também foram altamente significativos (Tabela 3), o que de certa forma está de acordo com os fundamentos teóricos de estimativa da densidade do solo a partir dos teores de água gravimétricos e volumétricos, este último representado pela voltagem. No terceiro passo, executado automaticamente pelo programa estatístico, foi retirada a variável voltagem, sendo ajustado o modelo 4 para estimativa da Ds a partir do teor de água gravimétrico ($R^2 = 0,54$, $P < 0,0001$). Entretanto, esse modelo não tem significado prático, uma vez que, no solo, o teor de água gravimétrico não varia na mesma proporção que a densidade do solo de maneira análoga à voltagem (Fig. 2), razão pela qual essas variáveis não devem ser consideradas isoladamente para estimativa da Ds , uma vez que esse atributo está associado à relação entre θ e U , conforme postulado pela equação 4. Esse fato corrobora os resultados de Ochsner et al. (2001), que observaram aumento na imprecisão da estimativa da densidade com base em TDR à medida em que o teor de água gravimétrico do solo aumenta, quando não se leva em conta a relação entre θ e U .

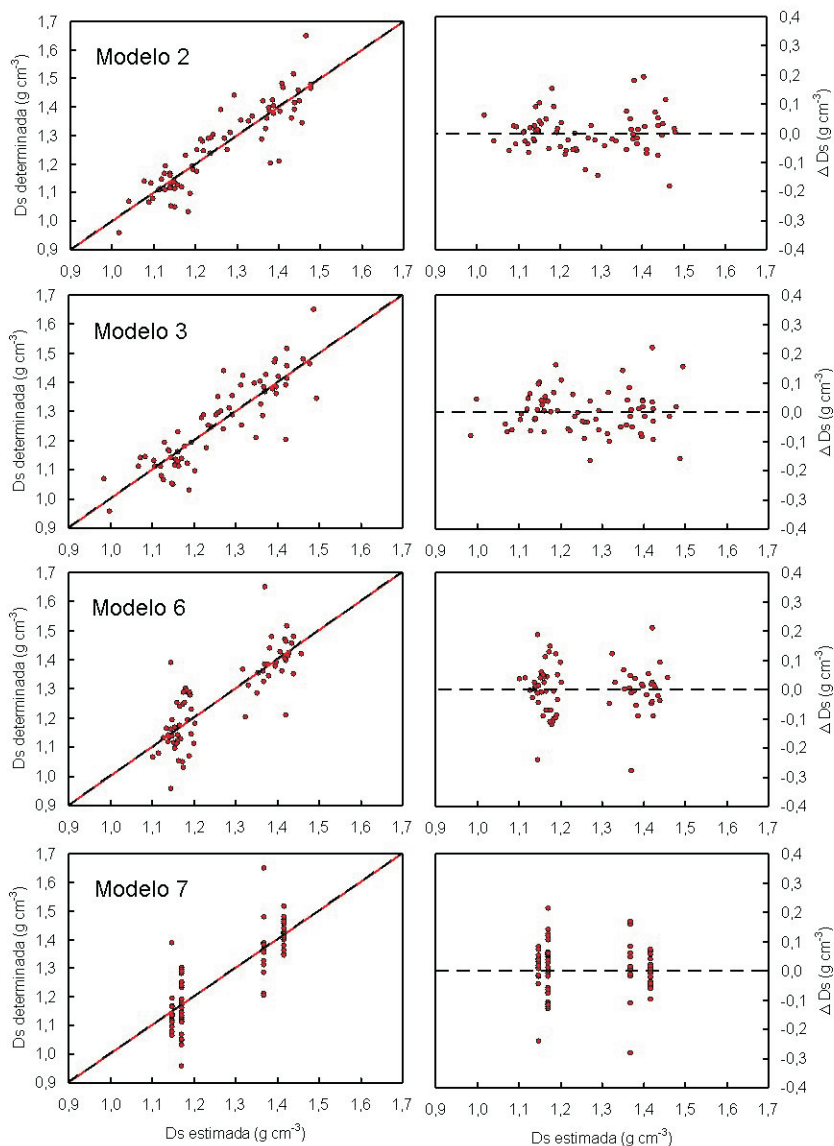


Fig. 3. Relação entre D_s determinada em laboratório e D_s estimada a partir da tensão (V) pelos modelos 2, 3, 6 e 7 para os solos da Embrapa Cerrados, utilizados no ajuste dos modelos – linha cheia vermelha – comparada com a reta 1:1 – linha tracejada preta – e respectivas distribuição de resíduos ou ΔD_s , definido como a diferença entre D_s determinado e D_s estimado.

Embora o teor de água gravimétrico seja importante sob um ponto de vista teórico para estimativa da D_s , em uma segunda etapa essa variável foi propositadamente retirada dos ajustes, para se verificar a possibilidade de se estimar a D_s do solo apenas com base na voltagem e na textura (areia ou argila), o que tornaria a predição da D_s mais prática em condições de campo, pois uma vez conhecida a textura e sua variabilidade espacial, essa metodologia dispensaria a coleta de amostras de solo. O modelo completo (modelo 5) permite estimar a D_s a partir da voltagem com teores de areia e argila com um R^2 de 0,6713 ($P < 0,0001$), conforme pode ser verificado na Tabela 4. Entretanto, os coeficientes não apresentaram os mesmos níveis de significância observados quando o teor de água gravimétrico se encontrava entre as variáveis utilizadas para ajuste.

Tabela 4. Coeficientes e respectivas significâncias para os modelos 5, 6 e 7 de estimativa da densidade do solo (g cm^{-3}) a partir da voltagem, areia e argila.

Variável	Completo (Modelo 5)		Passo 1 (Modelo 6)		Passo 2 (Modelo 7)	
	Coefic.	P	Coefic.	P	Coefic.	P
Voltagem (V)	-0,1040	0,0161	-0,1029	0,015	-	-
Areia (g kg^{-1})	0,0006	0,1136	0,0005	0,000	0,0004	0,0001
Argila (g kg^{-1})	0,0001	0,4448	-	-	-	-
Constante	0,1081	-	1,1460	-	1,0462	-
R^2	0,6713	<0,0001	0,6712	<0,0001	0,6482	<0,0001

Assim, com a eliminação da variável argila num primeiro passo, foi ajustado o modelo 6 ($R^2 = 0,6712$, $P < 0,0001$), em que todas as variáveis foram significativas ($P < 0,05$). Entretanto, contrariamente aos modelos 2 e 3, a dispersão dos dados ao longo da linha 1:1 não se apresenta tão uniforme (Fig. 3) com dois aglomerados de pontos, sendo um entre as densidades 1,1 e 1,2 e outro entre as densidades 1,3 e 1,5, provavelmente pela menor contribuição da voltagem e maior contribuição da variável teor de areia no modelo, refletindo os teores de areia dos solos estudados. Esses dois aglomerados de pontos são também visualizados na distribuição de resíduos, em que se constata que aproximadamente 80 % das estimativas apresentaram erro entre $\pm 0,1 \text{ g cm}^{-3}$. Considerando-se as amostras utilizadas para geração dos

modelos, os erros na estimativa da densidade observados no presente estudo estão próximos dos observados por Bernoux et al., (1998) entre 0,06 e 0,11 g cm⁻³, e por Benites et al. (2007) de 0,11 g cm⁻³. Porém, abaixo do observado por Ochsner et al. (2001), entre 0,18 e 0,20 g cm⁻³.

Num segundo passo, a voltagem foi eliminada, sendo ajustado o modelo 7 ($R^2 = 0,6482$, $P < 0,0001$), que permite estimar a Ds a partir do teor de areia do solo. Contrariamente ao modelo 4, o modelo 7 tem um significado prático, pois a Ds varia em função da textura, conforme relatado por Bernoux et al. (1998) e Sá et al. (2007). Entretanto, a textura é uma característica intrínseca do solo, decorrente de sua gênese e material de origem (RESENDE et al., 2002). Dessa forma, espera-se que o modelo 7 não tenha sensibilidade para detectar as variações de Ds impostas pelo manejo do solo. Isso pode ser comprovado pela dispersão dos dados em relação à linha 1:1 (Fig. 3), em que se observa apenas quatro valores de Ds estimada (quatro fileiras de pontos estimados, uma para cada solo de acordo com seu teor de areia), enquanto os valores de Ds determinada apresentaram certa amplitude dentro de cada solo, a qual pode ser atribuída a efeitos como manejo e pisoteio.

Para validação dos modelos 2, 3, 6 e 7, os valores de Ds estimados foram confrontados com os valores determinados em cada um dos 31 pontos da área apresentada na Fig. 1C e 1D. Todos os modelos apresentaram uma tendência de superestimar os valores de Ds estimada (Fig. 4). Para os modelos 2 e 3, essa tendência de superestimação ocorreu apenas nos valores de Ds mais elevados, ficando os valores de Ds mais baixos próximos da reta 1:1. No caso do modelo 2, cerca de 58 % dos valores estimados apresentaram erro (ΔDs) de $\pm 0,1$ g cm⁻³; 36 % das estimativas apresentaram valores superestimados entre 0,1 e 0,2 g cm⁻³; e apenas 6 % com mais de 0,2 g cm⁻³. O modelo 3 apresentou comportamento semelhante, em que 48 % das estimativas com erro de $\pm 0,1$ g cm⁻³; 45 % das estimativas apresentaram valores superestimados entre 0,1 e 0,2 g cm⁻³; e 7 % com mais de 0,2 g cm⁻³.

Quanto aos modelos 6 e 7, a distribuição dos resíduos não foi uniforme ao longo da linha 1:1, com forte tendência de superestimação dos valores de D_s (Fig. 4). Em todos os casos, os erros foram para mais, sendo que 87 % dos valores de D_s estimados pelo modelo 6 e 84 % dos valores estimados pelo modelo 7 apresentaram erro superior a $0,1 \text{ g cm}^{-3}$.

A espacialização dos valores de D_s , tanto determinadas quanto estimadas pelos modelos, pode ser observada na Fig. 5. Todos os mapas estão na mesma escala, o que permite observar cores vermelhas mais intensas, o que condiz com valores de D_s mais elevados em todos os mapas de D_s estimada. Entretanto, mesmo com valores superestimados, os mapas de D_s estimada pelos modelos 2 e 3 apresentam maior semelhança com o mapa de D_s determinada. É interessante ressaltar que, embora a presença das variáveis teor de água gravimétrico e voltagem nos modelos 2 e 3 tenha uma relação de causa-efeito baseada no fundamento físico demonstrado na relação expressa pela equação 4, os modelos obtidos por regressão são baseados num relacionamento estatístico que busca o melhor ajuste entre as variáveis utilizadas para sua elaboração. Dessa forma, de acordo com Stocking (1982), um modelo matemático é apenas uma simplificação da realidade e, no caso específico de modelos estatísticos ou modelos obtidos por regressão, para uma boa aproximação nas previsões, é necessário que os valores das variáveis de entrada estejam dentro dos limites das variáveis utilizadas para ajuste do modelo.

Dessa forma, uma provável explicação para a superestimação dos valores de densidade calculados na área de validação pode ser atribuída ao momento estatístico das variáveis (Tabela 1), em que se observa que os valores de densidade medidos utilizados para geração dos modelos variaram de $0,957$ a $1,650 \text{ g cm}^{-3}$, enquanto, na área de validação, a variação foi de $0,805$ a $1,260 \text{ g cm}^{-3}$. Dessa forma, alguns pontos apresentavam valores de densidade determinada mais baixos do que os que poderiam ser corretamente estimados pelos modelos. Embora os solos utilizados para ajuste dos modelos sejam representativos, essa informação ressalta que o ajuste de modelos dessa natureza para estimativa da densidade requer uma gama ainda maior de solos do que a utilizada no presente estudo, com o objetivo de melhorar a exatidão das estimativas.

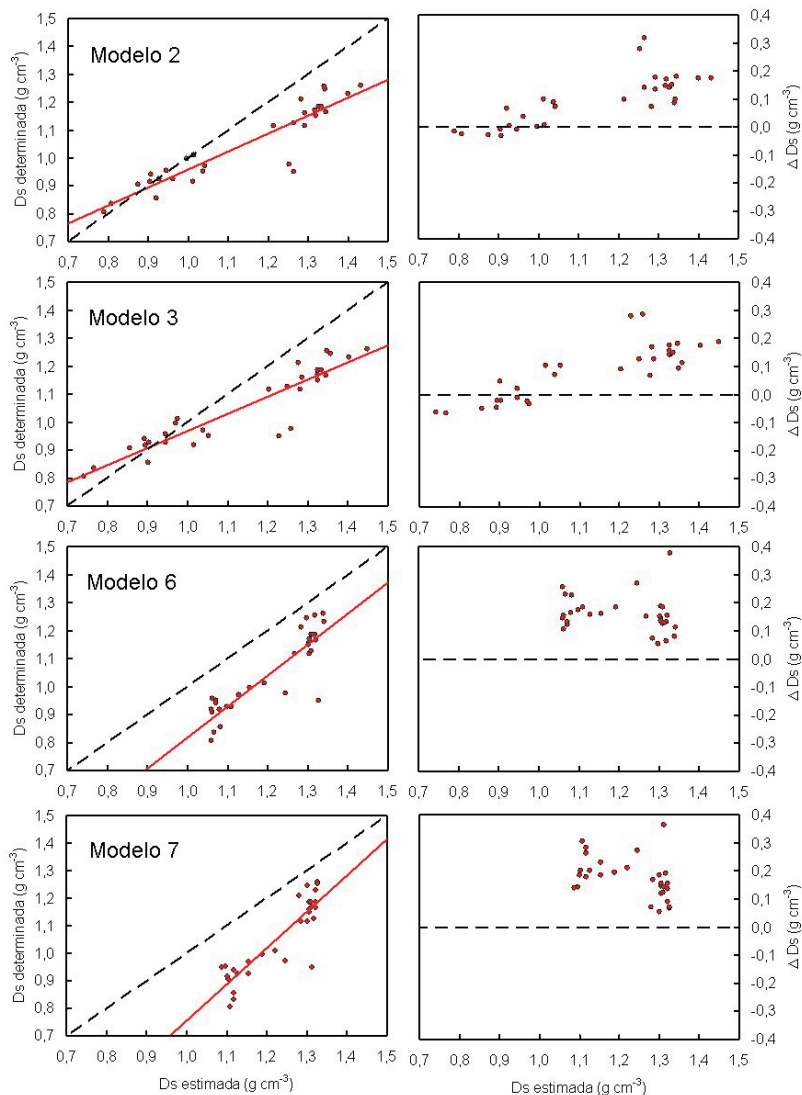


Fig. 4. Relação entre D_s determinada em laboratório e D_s estimada a partir da tensão (V) pelos modelos 2, 3, 6 e 7 para os solos da Fazenda Sementes Primavera, utilizados na validação dos modelos – linha cheia vermelha - comparada com a reta 1:1 – linha tracejada preta - e respectivas distribuição de resíduos ou ΔD_s , definido como a diferença entre D_s determinado e D_s estimado.

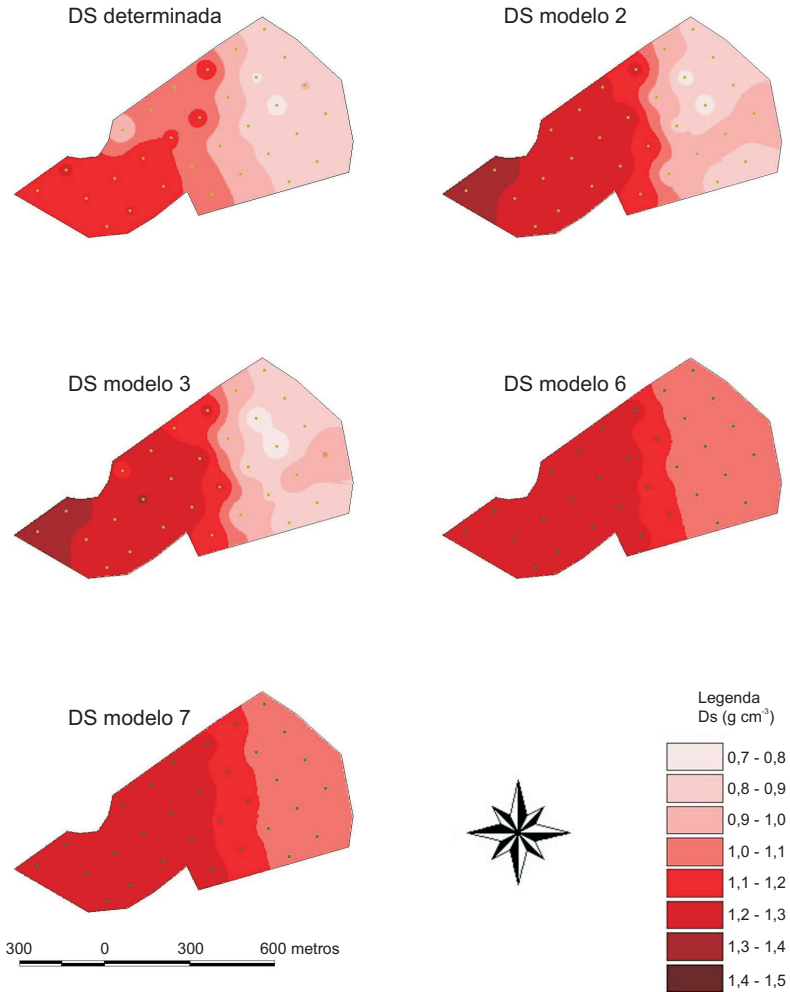


Fig. 5. Mapas da área utilizada para validação dos modelos, representando as variações da densidade do solo, determinada e estimada pelos modelos 1, 2 e 3 na camada de 0 m a 0,05 m.

Entretanto, para que essa estimativa seja válida e utilizada em áreas de produção comercial, mais estudos devem ser conduzidos no intuito de se avaliar outros aparelhos de princípio semelhante em associação com a temperatura no momento da medição e outros atributos do solo que influenciam na condutividade elétrica, os quais podem também apresentar relação com a estimativa da densidade conforme relatado por Bernoux et al. (1998), Minasny et al. (2003) e por Benites et al. (2007), como teores matéria orgânica, soma de bases e CTC, uma vez que, para a maioria das áreas cultivadas que já utilizam ferramentas de agricultura de precisão, essas informações (bem como sua variabilidade espacial) estão disponíveis, juntamente com a textura – inclusive com fracionamento de areias – os quais são atributos rotineiramente determinados em análise do solo. De acordo com Ochsner et al. (2001), a estimativa da densidade do solo dessa forma tem um grande potencial, particularmente se a acurácia das medições obtidas pelos equipamentos puder ser melhorada no futuro.

Conclusões

A densidade do solo pode ser estimada de maneira razoável a partir da voltagem fornecida pelo sensor dielétrico em condições de campo, associada ao teor gravimétrico de água no solo durante a medição.

Quando adicionado ao modelo, o teor de areia melhora sensivelmente a acurácia da estimativa.

Agradecimentos

Ao pesquisador Edson Eyji Sano, que gentilmente emprestou o sensor dielétrico para a realização deste estudo. Aos técnicos agrícolas Carlos Alberto Cardoso e Vilson Gonçalves Ribeiro; aos auxiliares de operações Jesuino de Sousa Caldas e Edson Douglas de Oliveira; ao operador de máquinas Antonio Fernandes do Nascimento; e ao estagiário Gustavo Borges Cornélio (Agronomia – UPIS), pelo auxílio nos trabalhos de campo realizados na Embrapa Cerrados. Aos Assistentes de pesquisa Nelson Camargos Moreira e Lucas Cardoso da Silva, pelo auxílio

nas análises laboratoriais. À Fazenda Sementes Primavera (DF), especialmente ao Engenheiro Agrônomo Francisco Luçardo, pelo apoio logístico dado à equipe durante a realização dos trabalhos de validação.

Referências

ADÂMOLI, J.; MACEDO, J.; AZEVEDO, G.; NETO, J. M. Caracterização da região dos cerrados. In: GOEDERT, W. (Ed.). **Solos dos cerrados: tecnologia e estratégia de manejo**. p. 33-74. 1986.

ANDRADE, C. L. T.; BORGES JÚNIOR, J. C. F.; COUTO, L. Características físico-hídricas e dinâmica da água no solo. In: ALBUQUERQUE, P. E. P.; DURÃES, F. O. M. **Uso e manejo de irrigação**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. 528 p.

BENITES, V. M.; MACHADO, P. L. O. A.; FIDALGO, E. C. C.; COELHO, M. R.; MADARI, B. Pedotransfer functions for estimating soil bulk density from existing soil survey reports in Brazil. **Geoderma**, v. 139, p. 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 Science Society of America Journal**, v. 62, p. 743-749, 1998.

BOUMA, J.; STOOBVOGEL, J.; VAN ALPHEN, B. J.; BOOLTINK, H. W. G. Pedology, precision agriculture and the changing paradigm of agricultural research. **Soil Science Society of America Journal**, v. 63, p. 1763–1768, 1999.

CORWIN, D. L.; LESCH, S. M. Application of soil electrical conductivity to precision agriculture: theory, principles, and guidelines. **Agronomy Journal**. v. 95, p. 455–471, 2003.

DIAS JUNIOR, M. **Compression of three soil unders long-term tillage and wheel traffic**. 1994. 114 f. Dissertation (Ph. D). Michigan State University. East Lansing.

EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: CNPS, 1997. 212 p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Brasília: Embrapa-SPI, 2006. 306 p.

JOHNSON, C. K.; MORTENSEN, D. A.; WIENHOLD, B. J.; SHANAHAN, J. F.; DORAN, J. W. Site-specific management zones based on soil electrical conductivity in a semi-arid cropping system. **Agronomy Journal**, v. 95, p. 303-315, 2003.

MACEDO, A.; VAZ, C. M. P.; NAIME, J. M.; CRUVINEL, P. E.; CRESTANA, S. A tomografia computadorizada na avaliação da qualidade física do solo. In: MORAES, M. H.; MÜLLER, M. M. L.; FOLONI, J. S. S. **Qualidade física do solo: métodos de estudo: sistemas de preparo e manejo do solo**. Jaboticabal, SP: Funep, 2002 p. 47-73.

MACEDO, J.; BRYANT, J. Morphology, mineralogy, and genesis of a hydrosequence of oxisols in Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 51, n. 3, p. 690-698, 1987.

MINASNY, B.; MC BRATNEY, A. B.; SANTOS, M. L. M.; SANTOS, H. G. **Revisão sobre funções de pedotransferência (PTFs) e novos métodos de predição de classes e atributos do solo**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2003. 50 p. (Embrapa Solos. Documentos, 45).

NADLER, A.; LAPID, Y. An improved capacitance sensor for in situ monitoring of soil moisture. **Australian Journal of Soil Research**, v. 34, p. 361-368, 1996.

NAGAOKA, M. E.; SILVA, I. N.; LANÇAS, K. P. Um método para estimar a densidade do solo utilizando redes neurais artificiais. **Energia na Agricultura**, v. 20, n. 4, p. 53-58, 2005.

RESENDE, M.; CURTI, N.; REZENDE, S. B.; CORRÊA, G. F. **Pedologia: base para distinção de ambientes**. Viçosa: NEPUT, 2002. 338 p.

OCHSNER, T. E.; HORTON, R.; REN, T. Simultaneous water content, air-filled porosity, and bulk density measurements with thermo-time domain reflectometry. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, p. 1622-1633, 2001.

ROBINSON, D. A.; LEBRON, I.; LESCH, S. M.; SHOUSE, P. Minimizing drift in electrical conductivity measurements in high temperature environments using the EM-38. **Soil Science Society of America Journal**, v. 68, p. 339-345, 2004.

ROBINSON, M.; DEAN, T. J. Measurement of near surface soil water content using a capacitance probe. **Hydrology process**. v. 7, p. 77-86, 1993.

SÁ, M. A. C.; SANTOS JUNIOR, J. D. G. **Compactação do solo: conseqüências para o crescimento vegetal**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2005, (Embrapa Cerrados. Documentos).

SÁ, M. A. C.; SANTOS JUNIOR, J. D. G.; SANO, E. E. **Calibração e validação de sensor dielétrico para estimativa de teor de água em solos do cerrado**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2008. 20 p. (Embrapa Cerrados. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento)

SÁ, M. A. C.; SHIRATSUCHI, L. S.; FRANZ, C. A. B.; SANTOS JUNIOR, J. D. G. **Compactação do solo e produtividade da cultura da soja em área irrigada no cerrado**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2007. 31 p. (Embrapa Cerrados. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 177).

SEYFRIED, M.S.; GRANT, L.E.; DU, E.; HUMES, K. Dielectric loss and calibration of the Hydra Probe soil water sensor. **Vadose Zone Journal**, v. 4, 2005. Disponível em: < <http://www.vadosezonejournal.org> > Acesso em: 03 mar. 2008.

SEYFRIED, M. S.; MURDOCK, M. D. Measurement of soil water content with a 50-MHz soil dielectric sensor. **Soil Science Society of America Journal**, v. 68, p. 394-403, 2004.

SHIRATSUCHI, L. S.; SANO, E. E.; BEZERRA, H. S. **Manual de utilização das principais funções do programa computacional arcView 3.2 no apoio à agricultura de precisão**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2005. 47 p. (Embrapa Cerrados. Documentos, 138).

SILVA, J. E.; LEMAINSKI, J.; RESCK, D. V. S. **Perdas de matéria orgânica e suas relações com a capacidade de troca catiônica em solos da região de cerrados do Oeste Baiano.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 18, p. 541-547, 1994.

STOCKING, M. **Modelagem de perdas de solo:** sugestões para uma aproximação brasileira. Brasília, DF: Secretaria Nacional de Produção Agropecuária, Secretaria de Recursos Naturais, 1985. 92 p.

SUDDUTH, K. A. ; KITCHEN, N. R.; BOLLERO, G. A.; BULLOCK, D. G.; WIEBOLD; W. J. Comparison of electromagnetic induction and direct sensing of soil electrical conductivity. **Agronomy Journal**, v. 95, p. 472-482, 2003.

TOPP, G. C.; YANUKA, M.; ZEBCHUK, W. D.; ZEGELIM, S. Determination of electrical conductivity using a time domain reflectometry: soil and water experiments in coaxial lines. **Water Resources Research**, v. 24, p. 945-952, 1980.

VAZ, C. M. P.; HOPMANS, J. W. Simultaneous measurement of soil penetration resistance and water content with a combined penetrometer-TDR moisture probe. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, p. 4-12, 2001.