

Determinação de atributos físicos do solo em solos arenosos por meio de Georadar

Determination of soil physical attributes on sandy soils through Georadar survey

Márcio Rocha Francelino^{1,*}, Viviane Flaviana Condé¹, André Thomazini², Manoel Ricardo Abreu Albuquerque³, João Hebert Moreira Vianna³ e Flavia Cristina dos Santos³

¹ Departamento de Solo, Universidade Federal de Viçosa, Brasil

² Departamento de Ciências Agrárias, Universidade Federal de São João del-Rei, Sete Lagoas, Brasil

³ Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, Brasil

(*E-mail: marcio.francelino@ufv.br)

<https://doi.org/10.19084/rca.20001>

Recebido/received: 2020.05.01

Aceite/accepted: 2021.03.13

RESUMO

A região central do Brasil é a sua atual fronteira agrícola, com rápida expansão das culturas de soja, café e algodão sob solos arenosos. Entre os grandes desafios de manejo desse tipo de solo, destaca-se evitar a redução da sua baixa fertilidade natural e manter ou aumentar a umidade. Esse trabalho teve o objetivo de avaliar a aplicabilidade do uso de Radar de Penetração do Solo (GPR) na determinação de atributos de solos arenosos da parte central do Brasil. O estudo foi realizado no Oeste do estado da Bahia, numa área de topografia plana e sob pastagem. Foram amostrados dois perfis completos, cujas amostras foram analisadas química e fisicamente. A leitura foi realizada em transectos com comprimento acima de 500m. Foi utilizado GPR equipado com antena de 400 MHz. Foram aplicadas as equações de Topp, Ledieu e Condé para determinação da umidade gravimétrica a partir de valores de constante dielétrica obtidas dos radargramas. Foi observado tratar-se de solos profundos, sem impedimentos físicos e que apresenta aumento da umidade em profundidade.

Palavras-chave: Radar de penetração do solo, umidade do solo, constante dielétrica.

ABSTRACT

The central region of Brazil is its current agricultural frontier, with rapid expansion of soy, coffee and cotton crops under sandy soils. One of the major management challenges for this type of soil is the reduction of its low natural fertility and maintenance of humidity. This work had the objective of evaluating the applicability of the use of Soil Penetration Radar (GPR) in the determination of attributes of sandy soils in the central part of Brazil. The study was carried out in the west of the state of Bahia, in an area of flat relief and under pasture. Two complete profiles were sampled, whose samples were analyzed chemically and physically. The reading was performed in transects with lengths over 500m. GPR equipped with a 400 MHz antenna was used. The Topp, Ledieu and Condé equations were applied to determine the gravimetric humidity from the dielectric constant values obtained from the radargrams. It was observed that these are deep soils, without physical impediments and that there is an increase in humidity in depth.

Keywords: Ground penetration radar, soil moisture, dielectric constant.

INTRODUÇÃO

O Oeste da Bahia vem passando por uma forte expansão da agricultura e pecuária intensivas, notadamente desde o final dos anos oitenta, alcançando uma área em torno de 3 milhões de hectares na safra 2016/2017 (AIBA, 2018). A região é dominada por solos de matriz arenosa, derivados, principalmente de arenitos do Grupo Urucuia (Campos & Dardanne, 1997). Tratando-se de solos pouco estruturados, suas propriedades físicas são facilmente alteradas pelo manejo, afetando a estabilidade de agregados, a porosidade, a capacidade de infiltração e retenção de água e exigindo estratégias apropriadas para o monitoramento e embasamento ao uso sustentável nos sistemas de produção predominantes na região.

Apesar de técnicas geofísicas poderem ser utilizadas para inspeção do solo, principalmente para determinação de seus atributos físicos, ainda são pouco utilizadas para esse fim (Francelino *et al.*, 2011). Entre elas se destaca o uso do Radar de Penetração do Solo (*Ground penetration radar*-GPR), método não invasivo que permite obter respostas rápidas e precisas sobre a profundidade do solo, a distribuições dos horizontes, a transições entre tipos de solos e, mas recentemente, dados sobre a umidade dos solos (Ucha *et al.*, 2002; Abreu, 2017), além da presença de fragmentos grosseiros, concreções, gradiente textural, entre outras propriedades que auxiliem na classificação pedológica do solo, inclusive identificação de horizontes diagnósticos (Doolittle & Collins, 1995; Hartemink & Minasny, 2014).

A resolução e profundidade de penetração do sinal GPR são determinados pela frequência da antena e as propriedades elétricas dos materiais que podem identificar horizontes diagnósticos subsuperficiais. Em estudos de solos, a antena de 400 MHz tem sido a mais utilizada nos estudos edáficos, pois atinge profundidades de até 4 m, dependendo da constituição granulométrica do solo (Davis & Annan, 2009).

Devido ao grande contraste entre valores de constantes dielétrica da água (78,5 a 25 °C), do ar (próximo a 1) e minerais (variável), o GPR pode ser usado para medir variações no teor de água do solo, sendo necessário, entretanto, determinar a constante dielétrica a partir das leituras nos radargramas.

Para isso são utilizadas equações que correlacionam valores de umidade do solo determinados em laboratório, com as constantes dielétricas obtidas dos radargramas (Topp *et al.*, 1980; Ledieu *et al.*, 1986).

O objetivo deste estudo foi avaliar a aplicabilidade do uso do Radar de Penetração do Solo na determinação da profundidade do solo, presença de impedimentos físicos e umidade gravimétrica em solos arenosos do oeste baiano, parte central do Brasil.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado em área experimental de 56 ha, no município de Cocos, no extremo sudoeste baiano, sob solos arenosos oriundos do arenito Urucuia (Figura 1), sob relevo plano e com histórico de uso com pastagem. Foram amostrados dois perfis completos, cujas amostras foram analisadas química e fisicamente a partir da TFSA obtidas das amostras, de acordo com Teixeira (2017). Os solos foram descritos conforme Santos *et al.* (2015) e classificados conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2018).

Uso do Radar de Penetração do Solo (GPR)

Foi utilizado GPR modelo SIR 3000, da GSSI, equipado com antena blindada de 400 MHz. Foi utilizada a constante dielétrica (k) 16, de acordo com Porsani (1999), considerando a natureza do tipo de solo. A configuração foi de 50 scans/m, com 512 amostras/scan. Essa antena é considerada de média frequência e permite um alcance de 4 m de profundidade em solos com textura média. Foram realizadas sete linhas de varredura, com média de 600 m de comprimento e distantes entre si entorno de 300 m (Figura 2).

O método de varredura adotado foi o *common offset* que consiste em passar o GPR em linha reta, com sistema de odômetro calibrado para medir a distância, mais adequado para levantamentos de solos. A antena emite a onda eletromagnética em intervalos de espaço iguais no transecto estabelecido e o sinal de retroespalhamento retorna à antena.

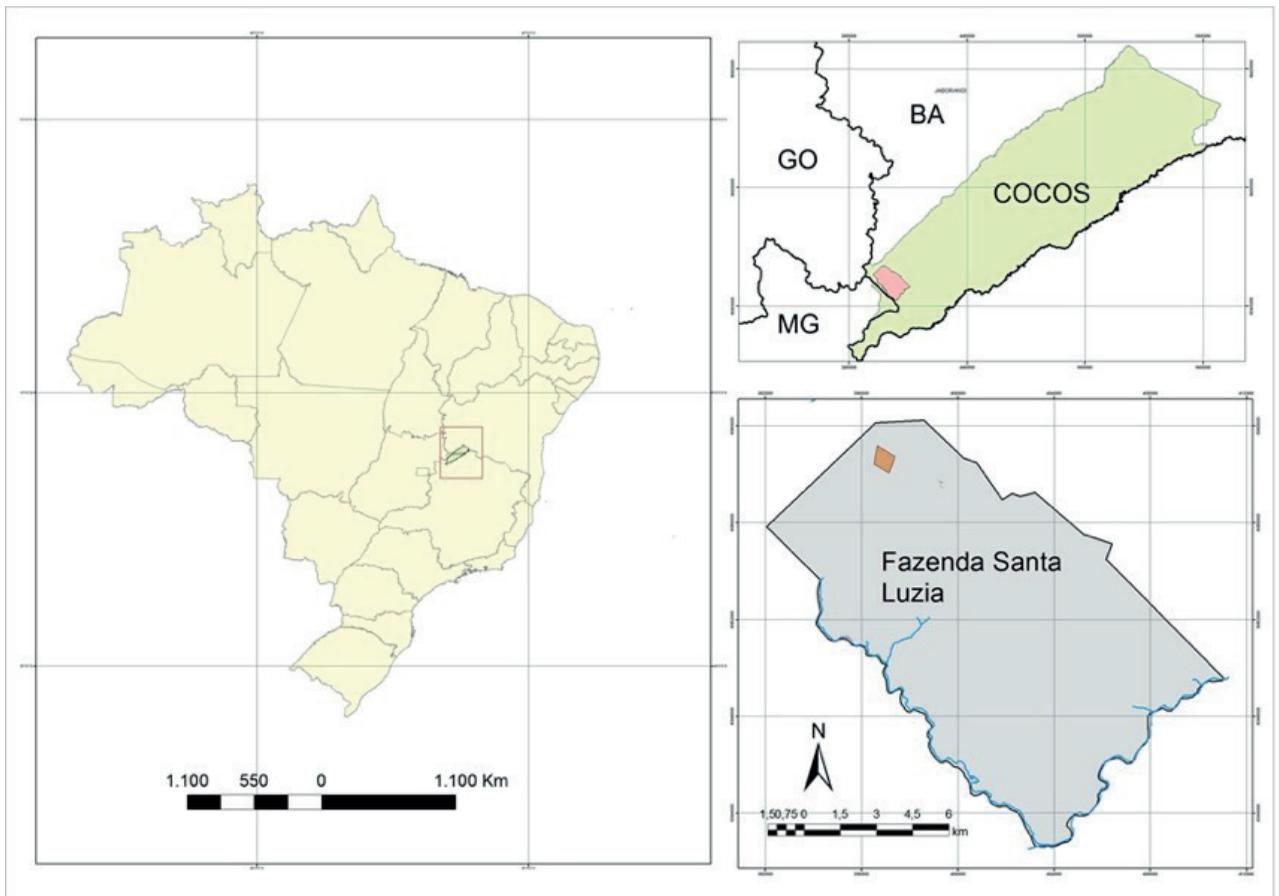


Figure 1 - Localização da área de estudo. O talhão encontra-se destacado no norte da Fazenda (Figura à direita e abaixo).

Realizadas as varreduras os radargramas foram gerados por meio do software RADAN 7. Nos radargramas gerados realizaram-se a correção da posição (*Time Zero*), distância normalizada e aplicado o Filtro de Impulso Infinito (FIR) que não desloca as reflexões, tanto no campo espacial como temporal, de acordo com as frequências selecionadas. As frequências selecionadas para o filtro foram de 0 MHz a 800 MHz. Foi também aplicada uma janela de ganho que variou de 2 a 4 pontos para amplificar os sinais de baixa e alta amplitude reduzido pelo filtro espacial. Para eliminação dos ruídos presentes nesse radargrama foi aplicado o *Background removal*.

Determinação da umidade do solo

A determinação do percentual de umidade foi realizada por meio da diferença entre a massa fresca

de solo e massa seca. A amostra foi coletada, armazenada em saco plástico vedado para reduzir as perdas de água por evaporação e, logo em seguida, os valores de massa foram aferidos. As amostras foram levadas a estufa com circulação de ar a 105 °C, por 48 horas. Após estabilização do peso, foi realizado o cálculo da umidade conforme equação 1, descrito em Donagema *et al.* (2011).

$$\theta_g = \frac{m_{um} - m_{sec}}{m_{sec}}$$

Onde:

θ_g = umidade gravimétrica do solo;

m_{um} = massa da amostra úmida;

m_{sec} = massa da amostra seca.

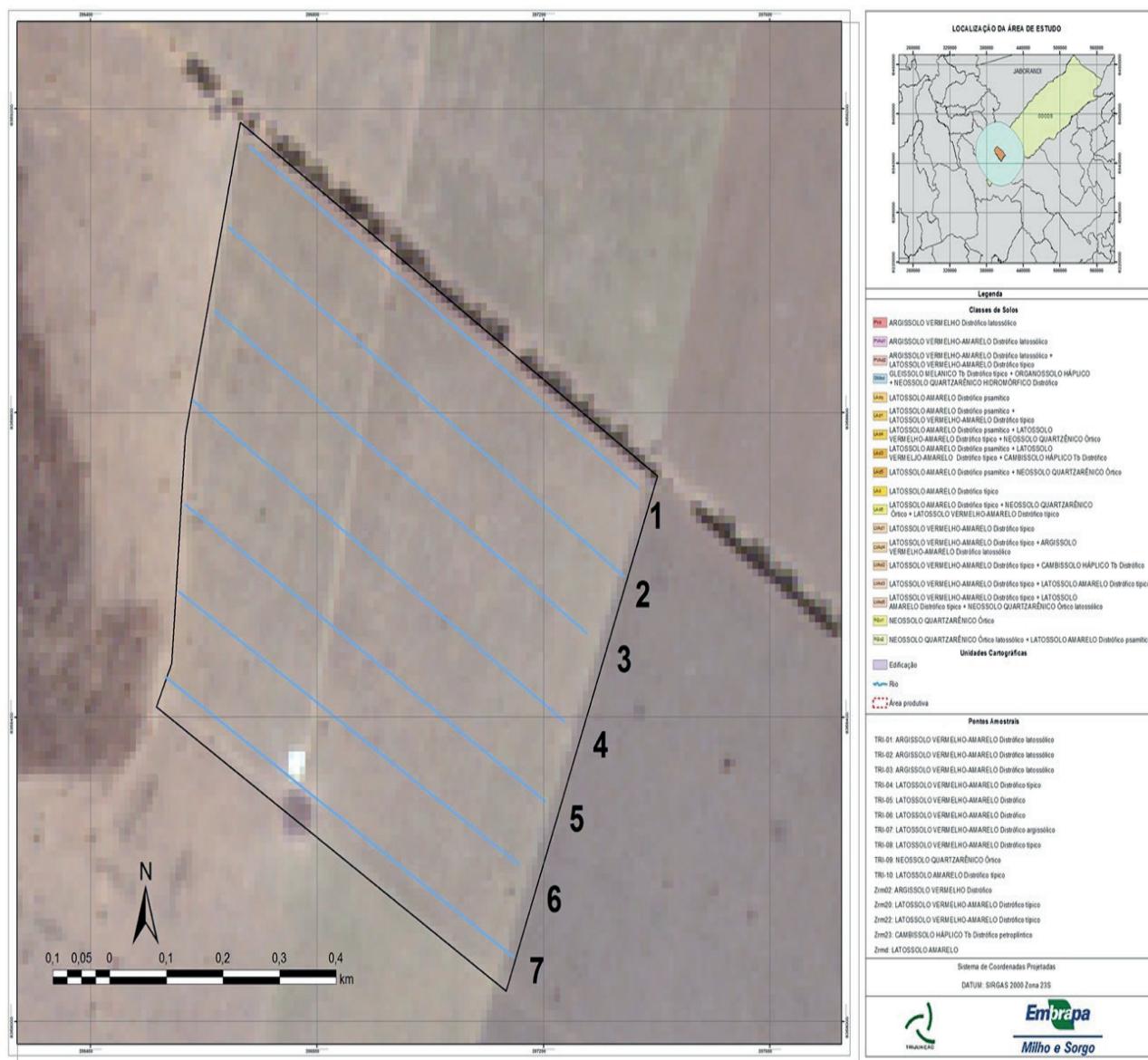


Figure 2 - Distribuição das linhas de varredura. P1 e P2 corresponde à localização dos perfis abertos.

Obtenção dos valores de umidade a partir dos radargramas

Para determinar o teor de umidade do solo foram utilizadas as equações de Topp *et al.* (2018). Todos os radargramas foram processados de forma padronizada. Foram definidos os pontos de coleta em 100, 200 e 300m de distância (horizontal) a partir do início da linha de varredura, na profundidade de 1m. Esses pontos de coleta foram determinados de forma a contemplar a região média dos radargramas.

A partir da imagem do radargrama, nos pontos e profundidades onde foram coletadas as amostras de solos para determinação da umidade em laboratório, foram selecionadas hipérboles representativas utilizando o software RADAN 7®, a fim de obter o valor da constante dielétrica do ponto amostral.

Para estimar a umidade dos solos, utilizando a constante dielétrica obtida por meio dos radargramas, foram utilizadas as seguintes equações:

Equação de Topp: estabelece uma relação entre valores de constante dielétrica e teor umidade do solo. Proposta por Topp *et al.* (1980), é uma relação empírica obtida em laboratório por meio de dados experimentais com materiais de diferentes texturas. Os autores observaram que a constante dielétrica dos solos não era afetada significativamente por alterações na temperatura, textura, densidade e conteúdo de sais. O modelo consiste em uma equação polinomial do terceiro grau descrita matematicamente por:

$$\theta_v = -5,3 \times 10^{-2}k - 5,5 \times 10^{-4}K^2 + 4,3 \times 10^{-6}K^3$$

Onde:

θ_v = umidade gravimétrica do solo;

K = constante dielétrica observada no radargrama.

Equação de Ledieu: a equação proposta por Ledieu *et al.* (1986) estabelece uma relação linear entre umidade e a raiz quadrada da constante dielétrica, descrita por:

$$\theta_g = 0,1138\sqrt{K} - 0,1758$$

Onde:

θ_g umidade gravimétrica do solo;

K = constante dielétrica observada no radargrama.

Equação de Condé: essa equação foi proposta para solos intemperizados (Latosolo Vermelho-Amarelo e Cambissolo Háptico). A equação de calibração considera a umidade função da constante dielétrica e da profundidade de coleta das amostras, e a interação entre esses fatores. O modelo obtido é descrito por:

Onde:

$$\theta_v = 5,416 \times 10^{-2} + 1,121 \times 10^{-2}K + 2,113 \times 10^{-3}P - 1,115 \times 10^{-4}KP$$

θ_v = umidade gravimétrica do solo;

K = constante dielétrica observada no radargrama; e
P = profundidade de coleta da amostra de solo (cm).

Todos os radargramas foram processados de forma padronizada, utilizando a mesma metodologia

e aplicação de filtros e ganhos. Padronizou-se a profundidade de 1m para a coleta dos valores de constante dielétrica

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização do solo

A textura de ambos perfis variou de areia franca nos horizontes superficiais a franco-argilo-arenoso nos mais profundos (Quadro 1). O perfil foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico. Já o perfil 2 apresentou gradiente textural e, mesmo com baixos teores de argila, foi classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico. Ambos são naturalmente ácidos e de baixa fertilidade (Quadro 2). Entretanto, em função do manejo desses solos para pastagem, com aplicação de calcário e superfosfato em superfície, apresentou menor acidez e fertilidade incrementada até os primeiros 30 cm, onde o teor de fósforo alcançou valor de 5,7 mg dm⁻³ no horizonte A do Perfil 2. A saturação por bases variou de valores acima de 80 % nos horizontes A dos dois perfis, para 5,4 % no horizonte BA (30-60 cm) do perfil 2.

A textura, de maneira geral, é arenosa, nos horizontes superficiais (até 30 cm), com cerca de 13 % de argila, aumentando em profundidade e atingindo valores médios de 24 % de argila em profundidades superiores a 50 cm. Ambos solos apresentaram baixos valores de carbono orgânico.

Interpretação do radargrama

O alcance do sinal da antena com frequência de 400 MHz foi aproximadamente de 4 metros de profundidade, o que era esperado para solos de textura arenosa, como é o caso dos solos da área de estudo. Segundo Doolittle e Butnor (2009), o uso dessa frequência não permite distinguir mudanças sutis nos horizontes do solo, porém é possível observar presença de gradiente textural e variações na umidade do solo, além de materiais grosseiros.

Quanto maior a frequência da antena, menor o comprimento de onda, maior a riqueza de detalhes no radargrama e menor a profundidade de alcance do sinal (Tran *et al.*, 2015). Os radargramas gerados

Quadro 1 - Caracterização física das amostras de solos (g g⁻¹). AMG = Areia muito grossa; AG = areia grossa; AM= areia média; AF= areia fina e AMF= areia muito fina

Prof.(cm)	Horiz.	AMG	AG	AM	AF	AMF	Silte	Argila	Classe
Perfil 1 – Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico argissólico									
0-10	Ap	0,000	0,035	0,373	0,364	0,076	0,007	0,145	Areia Franca
10-30	AB	0,000	0,031	0,353	0,373	0,084	0,022	0,139	Areia Franca
30-58	Ba	0,000	0,031	0,321	0,375	0,071	0,038	0,164	Franco Arenoso
58-105	Bt1	0,000	0,035	0,300	0,307	0,108	0,010	0,240	Franco Argilo Arenoso
105-155	Bt2	0,000	0,027	0,299	0,284	0,115	0,024	0,251	Franco Argilo Arenoso
Perfil 2 – Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico argissólico									
0-15	Ap	0,000	0,080	0,478	0,257	0,064	0,012	0,109	Areia Franca
15-30	AB	0,000	0,062	0,436	0,294	0,070	0,017	0,120	Areia Franca
30-60	BA	0,000	0,057	0,401	0,314	0,075	0,002	0,151	Franco Arenoso
60-85	Bt1	0,000	0,063	0,408	0,264	0,071	0,008	0,185	Franco Arenoso
85-150	Bt2	0,000	0,052	0,384	0,255	0,084	0,007	0,219	Franco Argilo Arenoso
150-200	Bt3	0,000	0,060	0,356	0,256	0,081	0,011	0,232	Franco Argilo Arenoso

Quadro 2 - Caracterização química das amostras de solos da Fazenda Santa Luzia

Horiz.	Prof.	pH	P	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	SB	t	T	V	m	MO	P-Rem	S	B	Cu	Mn	Fe	Zn
		H ₂ O	mg dm ⁻³	cmol. dm ⁻³					%	g kg ⁻¹	mg L ⁻¹	mg dm ⁻³									
Perfil 1 - Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico																					
Ap	0-10	6,47	1,3	8	1,61	0,58	0	0,5	2,21	2,21	2,71	81,5	0	0,88	47,3	9,5	0,22	0,04	1,7	28,8	1,77
AB	10-30	5,91	0,4	5	0,87	0,44	0	1	1,32	1,32	2,32	56,9	0	0,63	43,9	18,4	0,18	0	0,5	68,0	1,54
Ba	30-58	4,94	0,1	0	0,09	0,07	0,39	1,4	0,16	0,55	1,56	10,3	70,9	0,38	34,2	22,2	0,2	0,02	0,3	39,7	0,6
Bt1	58-105	5,02	0	0	0,11	0,07	0	1,3	0,18	0,18	1,48	12,2	0	0,38	30,0	16,9	0,21	0,01	0,5	16,5	0,65
Bt2	105-155	5,13	0	0	0,03	0,03	0	1,1	0,06	0,06	1,16	5,2	0	0,25	27,4	13,6	0,23	0,07	0,3	10,5	1,48
Bt3	155-200	5,25	0	0	0,03	0,03	0	1,1	0,06	0,06	1,16	5,2	0	0,25	25,1	11,8	0,16	0,02	0,2	9,4	0,51
Perfil 2 - Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico																					
0-15	Ap	6,59	5,7	12	1,67	0,80	0	0,5	2,5	2,5	3	83,3	0	1,26	48,6	5,6	0,17	0,02	2,5	19	1,23
15-30	AB	5,34	0,7	1	0,22	0,11	0,1	1,3	0,33	0,43	1,63	20,2	23,3	0,75	43,2	10,1	0,2	0,03	0,5	51,3	1,04
30-60	BA	4,72	0,3	0	0,05	0,03	0,29	1,4	0,08	0,37	1,48	5,4	78,4	0,63	36,8	17,8	0,17	0,02	0,3	59,5	0,55
60-85	Bt1	4,77	0,1	0	0,11	0,04	0,19	1,1	0,15	0,34	1,25	12	55,9	0,38	33,2	17,5	0,19	0,03	0,3	18,8	0,73
85-150	Bt2	4,90	0	0	0,10	0,04	0	0,8	0,14	0,14	0,94	14,9	0	0,13	31,3	15,1	0,23	0,03	0,4	11,3	0,66
150-200	Bt3	5,04	0,4	0	0,05	0,02	0,19	0,8	0,07	0,26	0,87	8	73,1	0,25	31,1	13	0,16	0,01	0,1	14	0,33

SB: Soma de bases, t= Capacidade de troca de cátions efetiva, T= Capacidade de troca de cátions total, V= Saturação por bases, m = saturação por alumínio; P-rem= fósforo remanescente.

apresentou muitos ruídos nas camadas inferiores, mesmo após processamentos para a sua remoção, o que dificultou a coleta de hipérbolos de reflexão nas partes mais profunda do perfil. Mesmo com essas limitações, Ucha *et al.* (2002) e Francelino *et al.* (2011) afirmam ser essa frequência (400 MHz) é a mais recomendada para estudos pedológicos.

Na Figura 3 é possível observar-se no *scope* (no canto direito da figura) na sexta linha de varredura, aproximadamente a 56 m do início da mesma, o padrão que estava presente na maioria dos radar-

gramas. Na parte superior observa um forte refletor, até os primeiros 0,3 m, oriundo da presença de um teor maior de matéria orgânica no solo, gerando. Abaixo dessa profundidade, até aproximadamente 1 m, observa-se um padrão de baixo reflexão em função da textura mais arenosa desse solo, o que gera uma cor mais clara no radargrama. A partir de 1,0 m de profundidade ocorre um aumento do refletor, demonstrando o gradiente textural presente nesse solo, pois a textura variou de areia franca para franco argilo-arenosa. Essa variação no teor de argila influencia a constante dielétrica do

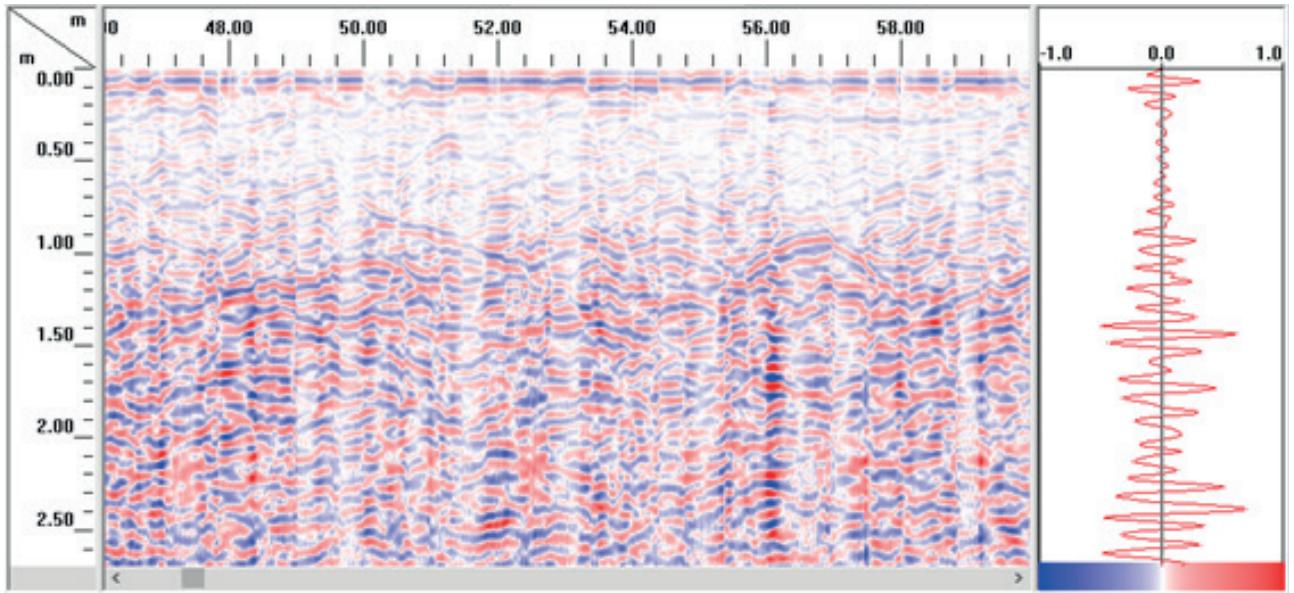


Figura 3 - Parte do radargrama da linha de varredura 6 com seu respectivo scope.

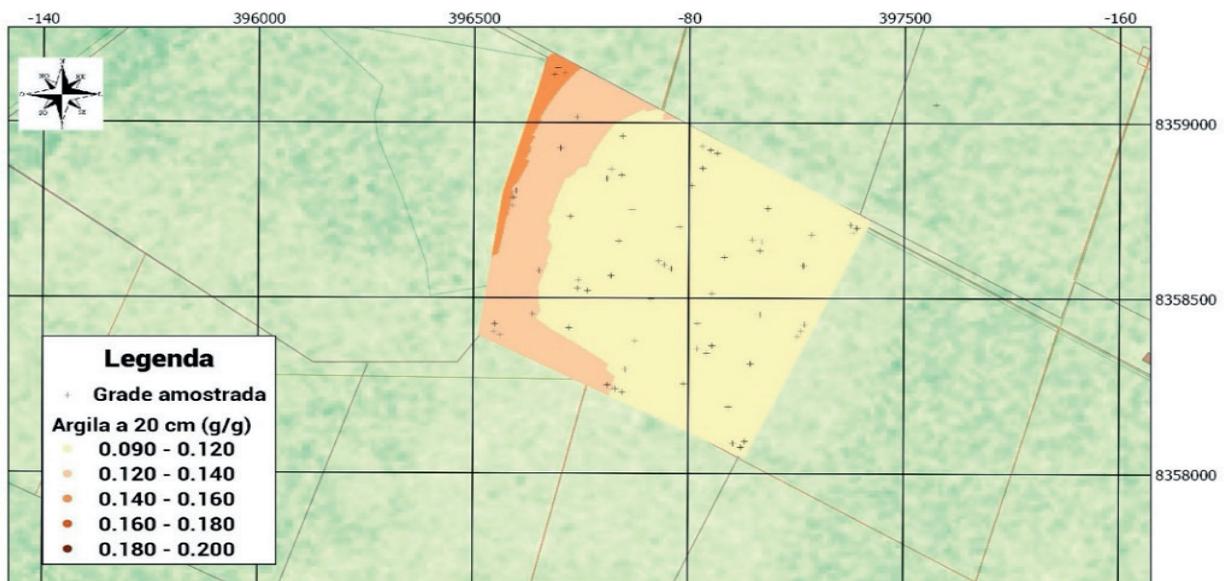


Figura 4 - Mapa de distribuição de argila. Adaptado de Santos *et al.* (2019).

solo e conseqüentemente na absorção-reflexão do sinal, conforme observado por Abreu (2018) em radargramas em Argissolos do Tabuleiros Costeiros e por Santos *et al.* (2019) (Figura 4) em estudo no mesmo local.

Em uma análise de todo o perfil de varredura da primeira linha de varredura (Figura 5), é possível

verificar, a princípio, uma homogeneidade no radargrama deste solo. Entretanto, quando examinado em detalhes, observa-se diferentes padrões de refletor. No final da linha surge um forte refletor a partir de 1 m de profundidade. Esse fato está relacionado com um maior teor de argila nesse sector, conforme registrado por Santos *et al.* (2019).

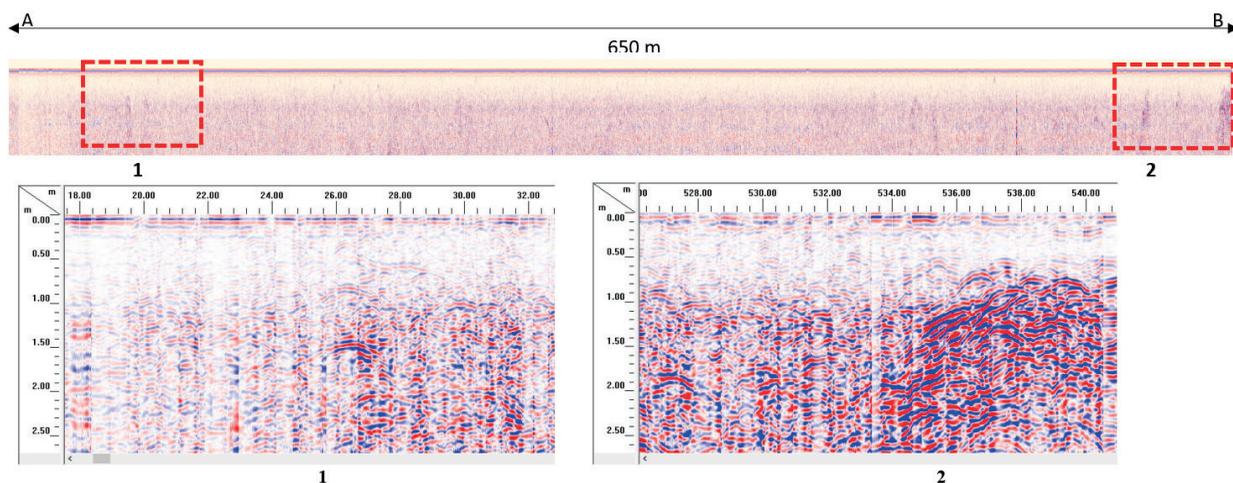


Figura 5 - Linha de varredura 1. O Radargrama completo com 650 m acima e detalhes no início da Linha (#1) e no final (#2).

Os sete radargramas apresentaram resultados semelhantes, reforçando a homogeneidade desses solos. Apresentam-se profundos, com incremento de argila em profundidade e com ausência de camadas adensadas e de materiais grosseiros. De maneira geral, não apresentam impedimentos físicos, o que, associado ao relevo plano da região, demonstra aptidão à mecanização agrícola. Os únicos impedimentos referem-se à baixa retenção da umidade e à baixa fertilidade natural desses solos.

Umidade gravimétrica

A umidade pelo método padrão apresentou comportamento distinto entre os dois perfis. No Latossolo (P1) ocorreu aumento na primeira profundidade e em seguida diminuiu (Quadro 3). Já no Argissolo (P2) ocorreu comportamento inverso, reduzindo na primeira profundidade e aumentou em seguida. Esse comportamento diferenciado provavelmente foi influenciado pela pequena diferença no teor de argila ao longo do perfil nos dois solos. Foi encontrada correlação de 0,58 entre os teores de argila e a umidade e de 0,21 com a matéria orgânica.

Com o uso do georadar, foi possível estimar a umidade do solo numa extensão maior, por meio do uso de funções que correlacionam a constante dielétrica do solo captada no radargrama, com a umidade do solo, sendo possível determinar tam-

bém a sua correlação com outros atributos do solo, como os teores de matéria orgânica e argila.

Foram analisadas 21 hipérbolas nos sete radargramas (três por linha). Os cálculos de umidade, utilizando-se os valores de K, foram efetuados com as três equações propostas. Observou-se baixa dispersão dos dados (Quadro 4) coletados com a antena de 400 MHz, onde os eventos de ondas aéreas e onda direta no solo foram facilmente distinguidos e a presença de hipérbolas de reflexão nos radargramas foi mais evidente.

Como a profundidade de leitura foi maior no radargrama (100 cm), quando comparado com a determinação padrão, que foi de 60 cm (a mais profunda), os valores dos teores de umidade se apresentaram diferenciados, sendo mais elevadas nas maiores profundidade em função do maior teor de argila, que praticamente dobra nessa profundidade, passando de areia franca nos horizontes mais superficiais para franco-argilo-arenoso após os 100 cm.

Quadro 3 - Teores de umidade medidos em amostras dos solos estudados, determinados pelo método gravimétrico (Teixeira, 2017)

Perfil 1		Perfil 2	
Prof. (cm)	Umidade (%)	Prof. (cm)	Umidade (%)
0-20	13,45	0-20	12,05
20-40	14,13	20-40	10,73
40-60	12,94	40-60	12,55

Quadro 4 - Valores de umidade estimados para os solos estudados, a partir dos valores de constante dielétrica (K) pelos modelos de Topp, Ledieu e Condé

Linha	Ext. (m)	Dist. (m)	K	Topp	Ledieu	Condé
1	600	100	10,65	22,32	19,58	25,51
1	600	200	9,44	22,63	17,40	24,90
1	600	300	10,33	25,34	19,02	25,35
2	550	100	10,31	25,31	19,00	25,33
2	550	200	11,71	29,58	21,38	26,04
2	550	300	10,65	26,32	19,58	25,51
3	500	100	9,73	23,51	17,94	25,05
3	500	200	10,99	27,36	20,17	25,68
3	500	300	14,38	37,97	25,59	27,37
4	550	100	10,98	27,36	20,17	25,68
4	550	200	9,17	21,81	16,90	24,77
4	550	300	14,91	39,66	26,38	27,64
5	500	100	9,44	22,63	17,4	24,9
5	500	200	9,73	23,51	17,94	25,05
5	500	300	8,92	21,05	16,43	24,64
6	750	100	8,67	20,3	15,95	24,52
6	750	200	9,44	22,63	17,4	24,9
6	750	300	9,17	21,81	16,9	24,77
7	750	100	13,87	36,35	24,82	27,12
7	750	200	12,1	30,79	22,03	26,23
7	750	300	12,94	33,42	23,38	26,65

Essa relação da umidade com o teor de argila também foi observada por Andrade & Stone (2011) e Silva *et al.* (2015), ambos em estudo dos teores de umidade medidas em campo em área de cerrado.

Entre as funções utilizadas, a que apresentou menor média nos valores de umidade foi a de Ledieu (19,78%). Os resultados das funções de Condé e Topp apresentaram valores próximos entre si, sendo que a primeira apresentou o menor desvio padrão e coeficiente de variação (Quadro 5).

Considerando os pontos de coleta em cada linha (100, 200 e 300 m), a mais distante foi a que apresentou a maior umidade, 25,5 %, contra 23,3 % para as demais distâncias (Quadro 5). Na camada superficial não foram estimados os valores de umidade em função da dificuldade de obtenção de hipérbolos de reflexão nos primeiros centímetros da imagem.

Este resultado está de acordo com o trabalho de Cezar *et al.* (2012) que, em um estudo utilizando o GPR para avaliar propriedades físicas do solo,

não obtiveram resposta satisfatória nas investigações rasas, seja pela baixa frequência da antena ou textura muito argilosa. Shamir *et al.* (2016) também encontraram valores de teor de umidade do solo somente na profundidade de 1,5 m. Brandão *et al.* (2006) destacam que para estimar a umidade do solo com o uso do GPR fatores como classe textural do solo, aquisição de dados no campo e de seu processamento em laboratório são de fundamental importância na qualidade do resultado final.

Quadro 5 - Coeficiente de determinação e estatística descritiva dos valores de umidade obtidos pelo método padrão (kg kg⁻¹), constante dielétrica (K) e valores de umidade (kg kg⁻¹) obtidos por meio das equações de Topp *et al.* (1980), Ledieu *et al.* (1986) e Condé (2018) para os solos estudados

	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão	Coeficiente de variação
Umidade (%)	10,73	14,13	12,64	1,18	1,39
K	8,67	14,91	10,83	1,84	0,17
Topp <i>et al.</i> (1980)	20,30	39,66	26,74	5,81	0,22
Ledieu <i>et al.</i> (1986)	15,95	26,38	19,78	3,09	0,16
Condé (2018)	24,52	27,46	25,60	0,92	0,04

CONCLUSÕES

Os radargramas registraram solos com poucas variações em termos de atributos físicos. Trata-se de solos profundos, sem presença de camadas adensadas e materiais grosseiros que impeçam a mecanização da área ou o impedimento do aprofundamento do sistema radicular.

O alcance da frequência da antena de 400 MHz foi em torno de 4 m de profundidade e a variação textural foi claramente registrada nos radargramas.

Em função desse gradiente, ocorreu um aumento do teor de umidade em profundidade em cerca de 6,5%. A técnica utilizada apresentou-se eficiente na determinação de características físicas dos solos estudados, com valores semelhantes àqueles obtidos pelo método padrão.

AGRADECIMENTOS

Estudo financiado pela Fazenda Trijunção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abreu, S.V. (2017) - *Uso de georadar e mapeamento digital de solos no estudo de mussunungas em área do Grupo Barreiras*. Dissertação de mestrado. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa. 143 p.
- AIBA (2018) - *Anuário da safra do Oeste Baiano: safra 2017-2018*. Associação de Agricultores e Irrigante da Bahia. [Cit. 2020-01-22]. <https://aiba.org.br/wp-content/uploads/2019/06/Anu%C3%A1rio-2019-Portugu%C3%AAs-Digital.pdf>
- Andrade, R.S. & Stone, L.F. (2011) - Estimativa da umidade na capacidade de campo em solos sob Cerrado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 15, n. 2, p. 111-116. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000200001>
- Brandão, V.S.; Cecílio, R.A.; Prusky, F.F. & Silva, D.D. (2006) - *Infiltração da água no solo*. 3ª edição, Imprensa Universitária, 106 p.
- Campos, J.E.G. & Dardenne, M.A. (1997) - Estratigrafia e Sedimentação da Bacia Sanfranciscana. *Revista Brasileira de Geociências*, vol. 27, n. 3, p. 269-282.
- Cezar, E.; Nanni, M.R.; Chicati, M.L. & de Oliveira, R.B. (2012) - Emprego de GPR no estudo de solos e sua correlação com métodos laboratoriais. *Semina: Ciências Agrárias*, vol. 33, n. 3, p. 979-987.
- Condé, V.F. (2018) - *Sistema GPR na predição de umidade e atributos físicos do solo*. Dissertação de Mestrado. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa. 57 p.
- Davis, J.L. & Annan, A.P. (2009) - Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting*, vol. 37, n. 5, p. 531-551. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1989.tb02221.x>
- Donagem, G.K.; Campos, D.V.B.; Teixeira, W.G. & Viana, J.H.M (2011) - *Manual de métodos de análise do solo*. 2ª ed. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 230 p.
- Doolittle, J.A. & Butnor, J.R. (2009) - Soils, peatlands, and biomonitoring. In: Jol, H.M. (Ed.) - *Ground Penetrating Radar: theory and applications*. Amsterdam, Elsevier Science, p. 179-202.
- Doolittle, J.A. & Collins, M.E. (1995) - Use of soil information to determine application of ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 33, n. 1-3, p. 101-108. [https://doi.org/10.1016/0926-9851\(95\)90033-0](https://doi.org/10.1016/0926-9851(95)90033-0)
- EMBRAPA (2018) - *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. Rio de Janeiro, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 306 p.
- Francelino, M.R.; Moura, P.A.; Schaefer, C.E.G.R. & Mendonça, B.A.F. (2011) - Estudo do permafrost e solos com padrões com radar de penetração no solo (GPR) na ilha Livingston, Antártica Marítima. In: *Anais do XXXIII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo*. Uberlândia, Brasil.
- Hartemink, A.E. & Minasny, B. (2014) - Towards digital soil morphometrics. *Geoderma*, vol. 230-231, p. 305-317. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.03.008>

- Ledieu, J.; De Ridder, P.; De Clerck, P. & Dautrebande, S. (1986) - A method for measuring soil water moisture by time-domain reflectometry. *Journal of Hydrology*, vol. 88, n. 3-4, p. 319- 328. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(86\)90097-1](https://doi.org/10.1016/0022-1694(86)90097-1)
- Porsani, J.L. (1999) - *Ground Penetrating Radar (GPR): Proposta metodológica de emprego em estudos geológico-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado - SP*. Tese de Doutorado. Rio Claro, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Campus de Rio Claro, Universidade Estadual Paulista. 145 pp.
- Santos, F.C.; Viana, J.H.M.; Albuquerque Filho, M.R.; Francelino, M.R.; Thomazini & Donagemma, G.C. (2019) - Mapas da fertilidade de solo arenoso do sudoeste baiano. In: *Anais do III Simpósio Brasileiro de Solos Arenosos*. Campo Grande, Brasil. 2019.
- Santos, R.D; Santos, H.D.; Ker, J.C.; Anjos, L.H.C. & Shimizu, S.H. (2015) - *Manual de descrição e coleta de solo no campo*. 5ª ed. Viçosa, Imprensa Universitária. 91 p.
- Shamir, O.; Goldshleger, N.; Basson, U. & Reshef, M. (2016) - Mapping spatial moisture content of unsaturated agricultural soils with Ground-Penetrating Radar. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 41, p. 1279-1381. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B8-1279-2016>
- Silva, R.B.M.; Francelino, M.R.; Moura, P.A.; Moura, T.A.; Pereira, M.G. & Oliveira, C.P. (2015) - Relação solo/vegetação em ambiente de Cerrado sobre influência do Grupo Urucuia. *Ciência Florestal*, vol. 25, n. 2, p. 363-373. <http://dx.doi.org/10.5902/1980509818455>
- Teixeira, P.C. (2017) - *Manual de métodos de análise de solo*. 3ª. ed. rev. e ampl. – Brasília, DF : Embrapa, 2017. 574 p.
- Topp, G.C.; Davis, J.L. & Annan, A.P. (1980) - Electromagnetic of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, vol. 16, n. 3, p. 574-582. <https://doi.org/10.1029/WR016i003p00574>
- Tran, A P.; Bogaert, P.; Wiaux, F.; Vanclooster, M. & Lambot, S. (2015) - High-resolution space-time quantification of soil moisture along a hillslope using joint analysis of ground penetrating radar and frequency domain reflectometry data. *Journal of Hydrology*, vol. 523, p. 252–261. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.065>
- Ucha, J.M.; Botelho, M.A.; Vilas Boas, G.S.; Ribeiro, L.P. & Santana, P.S. (2002) - Uso do Radar Penetrante no Solo (GPR) na investigação dos solos dos tabuleiros costeiros no litoral norte do estado da Bahia. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, vol. 26, n. 2, p. 373-380. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832002000200011>