



## Avaliação do método GPR para estimar o teor de umidade de sedimentos em experimento controlado.

Emilio E. M. Barbosa\*, IAG/USP  
Renato L. Prado, IAG/USP  
Fernando A. M. Marinho, EP/USP  
Orlando M. de Oliveira, UFSC  
Rodolfo M. Mendes, IG/SMA

Copyright 2008, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no III Simpósio Brasileiro de Geofísica, Belém, 26 a 28 de novembro de 2008. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do III SimBGf, mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.

### Resumo

O método GPR (*Ground Penetrating Radar*) tem sido bastante empregado na estimativa do teor de umidade de solos nas áreas de agronomia e geotecnia. Esses teores são estimados a partir de relações empíricas com as constantes dielétricas ( $K$ ) obtidas a partir das velocidades da onda eletromagnética. Neste trabalho apresenta-se resultados de experimento controlado visando à avaliação da acurácia do método GPR na estimativa de teor de umidade na zona vadosa. Essa avaliação partiu da análise comparativa com medições realizadas com sondas TDR (*Time Domain Reflectometry*) dispostas em diferentes profundidades em um tanque preenchido com areia de granulometria selecionada. As medições foram feitas em diferentes condições de teor de umidade mediante saturação e drenagem de água no tanque preenchido com areia. Os resultados indicaram que os valores médios de  $K$  obtidos pelo GPR são muito próximos dos valores médios obtidos com os TDR.

### Introdução

O método GPR (*Ground Penetrating Radar*) tem sido bastante empregado na avaliação de teores de umidade de solos, principalmente a partir da análise da velocidade da onda eletromagnética (EM) que se propaga diretamente entre as antenas transmissora e receptora, embora as trajetórias das ondas refletidas também sejam empregadas nessa análise (Huisman et al., 2003). Neste último caso, porém, a acurácia na determinação das velocidades das ondas é menor. Principalmente se considerarmos os cálculos das velocidades intervalares através da fórmula de Dix (Dix, 1955), que não prevê o caso de diminuição da velocidade de empilhamento com o aumento do tempo de percurso, fato comum com a onda EM em função do freqüente aumento do conteúdo de água com a profundidade, ou quando os intervalos de tempo de percurso entre os refletores são muito pequenos.

Se por um lado a estimativa do teor de umidade a partir da onda direta pode trazer resultados mais precisos, por outro suas medidas se restringem à parte mais superficial do terreno. No entanto, para situações geotécnicas específicas, onde se deseja conhecer o teor de umidade em camadas de solos mais profundas, a análise da onda refletida é mais apropriada.

Os métodos TDR ou FDR (*Time Domain Reflectometry – Frequency Domain Reflectometry*) são os mais empregados na avaliação de teores de umidade nas áreas de agronomia e geotecnia. Suas medidas apresentam boa precisão (Roth et al., 1990), mas a grande desvantagem é que amostram volumes muito restritos, além de serem invasivos e, portanto, alterarem as condições do material investigado.

Assim, o uso de ondas refletidas do GPR, a despeito da maior incerteza na determinação das velocidades, se destaca pelo fato de amostrar de forma indireta volumes mais significativos de material a maiores profundidades.

Apresentamos aqui resultados parciais de um experimento controlado, simulando as situações encontradas nas zonas vadosa e saturada, que visou avaliar a acurácia do método GPR na estimativa de teor de umidade pela análise das ondas refletidas. Os resultados obtidos com o método GPR são comparados aos obtidos com TDRs instalados a diferentes profundidades. As permissividades dielétricas relativas foram obtidas a partir da análise de hipérbolos de difração originadas pelas interferências de discos metálicos posicionados a diferentes profundidades num tanque preenchido com areia.

As comparações foram feitas entre os dados obtidos antes do enchimento dos poros da areia com água e após sua drenagem.

### Materiais e métodos

O experimento consistiu na simulação da zona vadosa em duas condições distintas de umidade. Para tal, foi utilizado um tanque cilíndrico de fibra de vidro com sistema de entrada e saída de água na sua base, de 2,1 m de altura e 1,4 m de diâmetro, que foi preenchido exclusivamente com areia selecionada. Para a reflexão do sinal do GPR foram instalados discos metálicos de 0,13 m de diâmetro ao longo da altura do tanque, e dispostos pares de TDRs diametralmente opostos e

transversais ao plano que continha os discos. Os níveis de posicionamento dos TDRs foram intercalados aos dos discos metálicos (Figura 1).

Com uma antena de 1000 MHz de frequência central foram tomados perfis ao longo da linha contida no plano de disposição dos discos (L1). A técnica de aquisição utilizada foi a *common offset*, sendo tomados perfis nos modos transversal elétrico (TE) e magnético (TM) de antena. Os dados do modo TE não são analisados aqui devido a sua baixa razão sinal/ruído, atribuída à interferência no campo eletromagnético de alguns aros metálicos de reforço do tanque.

Foram obtidos perfis de GPR antes do início do enchimento do tanque, após seu completo enchimento e finalmente após sua drenagem. Desta forma buscou-se simular diferentes condições da zona vadosa (meio “seco” e pós-drenagem). Concomitante à aquisição com GPR foram registrados a cada 5 minutos dados com os TDRs.

Nos radargramas foram identificadas as hipérbolas de difração geradas pela presença dos discos metálicos (Figura 2). A partir delas foram obtidas as velocidades médias (RMS) dos pacotes por diferentes técnicas de análise (ajuste da hipérbole, tempo de chegada da onda medido no ápice da hipérbole e “colapso” da hipérbole por técnicas de migração) e em seguida as velocidades intervalares pela fórmula de Dix (1955).

**Análise de dados e resultados**

O radargrama da Figura 2 foi obtido na aquisição com o meio ainda seco. Nota-se que mesmo nessa condição a energia eletromagnética não foi suficiente para gerar reflexões em todos os discos. Sendo assim, consideramos neste trabalho somente as três primeiras hipérbolas em todos os perfis, correspondentes aos discos com seus centros nas posições 1,2 m, 1,0 m e 0,8 m do perfil L1 (Figura 1).

Os valores das constantes dielétricas (K) do GPR foram obtidos a partir das velocidades das ondas EM no sedimento (V) e no ar (c), por meio da equação 1. Conhecido K, pode se estimar o teor de umidade por diferentes relações empíricas como a de Topp et al. (1980), Roth et al. (1992) ou Dobson et al. (1985). Julgou-se apropriado, para efeitos de comparação de resultados, não transformar os valores de K (medida do parâmetro físico) em teores de umidade para se evitar erros de arredondamentos numéricos.

$$K = \left(\frac{c}{V}\right)^2 \quad (1)$$

Embora ao estimar valores locais de conteúdo volumétrico de água pelo TDR ocorram erros devido a espaços “vazios” entre o solo e as sondas (Ferre et al., 1998; Sakaki et al., 1998), e também devido a incertezas na técnica de medida do tempo de percurso usada pelo instrumento, esse erro pode ser considerado inferior ao presente na medida pelo GPR, e por este motivo aqueles foram tomados como referência.

A análise da Figura 3, que apresenta a variação dos valores de K observados nos diferentes TDRs entre o período de enchimento e drenagem, permite verificar o caráter pontual da medida. Nota-se que após a total saturação do sedimento ou mesmo após sua drenagem, pares de TDRs situados no mesmo nível apresentam valores distintos de K. Essas variações não devem ser atribuídas somente às eventuais diferenças na porosidade/saturação do meio (que devem ser mínimas nesse experimento) mas também a alterações na acomodação de todo o pacote de areia com conseqüentes alterações nas condições de acoplamento das sondas, e aos erros mencionados.

Visando à comparação dos resultados obtidos com GPR e TDR considerou-se como valor do TDR em cada nível a média do respectivo par de sensores. Na Figura 3 somente são representados os valores dos TDRs que estavam contidos no volume amostrado pelo GPR. O par de TDRs 1 e 2 (diametralmente opostos) são os mais rasos (Figura 1).

Entretanto, não se pode fazer uma comparação direta entre os dois métodos, já que medem as mesmas grandezas em dimensões diferentes. As constantes dielétricas obtidas através das velocidades RMS (*root mean square*) do GPR são médias de pacotes, enquanto as obtidas através do TDR se referem a valores nos pontos onde estes estão instalados. Por este motivo foram feitas comparações entre os valores intervalares e entre os valores dos “pacotes” para cada método.

No primeiro caso (valores intervalares), com os dados de GPR obteve-se K pelo cálculo das velocidades intervalares (Dix, 1955) e K do TDR pela média aritmética dos valores obtidos nos dois sensores instalados no correspondente intervalo de profundidade.

No segundo caso (valores do “pacote”), foram feitos três tipos de médias com as constantes dielétricas dos TDRs. Essas médias foram comparadas com os valores de K obtidos por meio das velocidades RMS do GPR.

As comparações foram baseadas no método estatístico de Regressão Linear Simples.

Seguem-se as médias utilizadas:

1) Média aritmética das constantes dielétricas obtidas ao longo da altura do tanque, dada pela seguinte fórmula:

$$K_{M1} = \frac{\sum_{i=1}^n K_i}{n} \quad (2)$$

sendo  $K_i$  a média aritmética dos valores registrados pelo iésimo TDR em um determinado intervalo de tempo em que o meio estava seco ou recém drenado, e n o número de TDRs até o nível desejado para o cálculo do  $K_{M1}$ .

2) Com os valores de  $K_i$  e as respectivas profundidades dos TDRs ajustou-se um polinômio  $K(z)$  e calculou-se valores médios obtidos a partir da fórmula abaixo, sendo z a profundidade do pacote desejado para o cálculo do valor médio da constante dielétrica:

$$K_{M2} = \frac{1}{z} \int_0^z K(z) dz \quad (3)$$

3) Média das constantes dielétricas ponderadas em relação à profundidade, dada pela seguinte fórmula:

$$K_{M3} = \frac{\sum_{i=1}^n K_i h_i}{\sum_{i=1}^n h_i} \quad (4)$$

A Figura 4 apresenta os gráficos de regressão linear para os meios “seco” e recém drenado. O número das comparações se refere ao tipo de média considerada para os valores de K dos TDRs segundo os critérios expostos anteriormente.

Foram também calculados os erros quadráticos médios (EQM) entre os valores de K obtidos com o GPR e com os TDRs para cada comparação em cada meio a fim de se avaliar os critérios adotados para a obtenção das médias pelos TDRs (Tabela 1).

Na Tabela 1 pode-se observar que a melhor correlação, considerando os dois meios (“seco” e recém drenado), foi obtida com a média ponderada dos valores do TDR (comparação 3).

A análise conjunta dos parâmetros dos ajustes lineares, mais o EQM, permitiram inferir a melhor correlação obtida.

#### Discussão e conclusões

Nas condições do experimento realizado conclui-se que em se tratando da análise do teor de umidade a partir dos eventos de reflexão no registro de GPR deve-se dar preferência ao cálculo dos teores médios dos pacotes obtidos com as velocidades RMS.

O cálculo dos valores intervalares pode apresentar pouca acurácia em razão das pequenas diferenças observadas entre os valores de velocidades e dos tempos de percurso de eventos de reflexão sucessivos nos registros de radar. O erro tende a aumentar para os estratos mais profundos quando se consegue mapear diversos estratos.

A comparação entre os valores de K do GPR obtidos a partir das velocidades RMS e as médias ponderadas obtidas pelos TDRs (comparação 3) indica que o dado do GPR traduz com razoável acurácia a média dos pacotes analisados. Situações distintas de teor de umidade (pré-enchimento e pós-drenagem) puderam ser analisadas

com a mesma precisão pelo GPR, o que vale dizer que se a relação sinal-ruído for boa a precisão em situações de maior ou menor umidade será a mesma.

#### Agradecimentos

Ao CNPq pela concessão da bolsa PIBIC, ao Departamento de Geofísica do IAG/USP e Laboratório de Solos da EP/USP pelo apoio para a preparação e execução dos ensaios.

#### Referências

- Dix, C.H., 1955. Seismic velocities from surface measurements. *Geophysics*, 20:68-86.
- Dobson, M.C., Ulaby, F.T., Hallikainen, M.T., El-Rayes, M.A., 1985. Microwave dielectric behavior of wet soil. Part II. Dielectric mixing models. *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sensing GE-23*, 35-46.
- Ferre, P.A., Knight, J.H., Rudolph, D.L., Kachanoski, R.G., 1998. The Sample areas of conventional and alternative time domain reflectometry probes. *Water Resource Research* 34 (11), 2971-2979.
- Huisman J.A., Hubbard S.S., Redman J.D. & Annan A.P.. 2003. Measuring Soil Water Content with Ground Penetrating Radar: A Review. *Vadose Zone Journal*. 2: 476-491.
- Roth, K., Schulm, R., Fluher, H., Attinger, W., 1990. Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach. *Water Resource Research* 26, 2267-2273.
- Roth, C.H., Malicki, M.A., Plagge, R., 1992. Empirical evaluation of the relationship between soil dielectric constant volumetric water content as the basis for calibrating soil moisture measurements by TDR. *Soil Sci.* 43, 1-13.
- Sakaki, T., Sugihara, K., Adachi, T., Nishida, K., Lin, W., 1998. Application of time domain reflectometry to determination of volumetric water content in rock. *Water Resource Research* 24 (10), 2623-2631.
- Topp, G. C., M. Davis, and A.P. Annan. 1980. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resource Research*. Res. 16:574-582.

**Tabela 1: Valores dos parâmetros dos ajustes lineares e EMQ de cada comparação em cada meio.**

MEIO	COMPARAÇÃO	INCLINAÇÃO	INTERSEÇÃO	R <sup>2</sup>	EQM
	intervalar	1,01	0,68	0,76	1,26
SECO E DRENADO	1	0,88	0,95	0,97	0,42
	2	1,06	-0,72	0,98	0,46
	3	0,90	0,76	0,98	0,33

R<sup>2</sup>: coeficiente de determinação; EQM: erro quadrático médio.

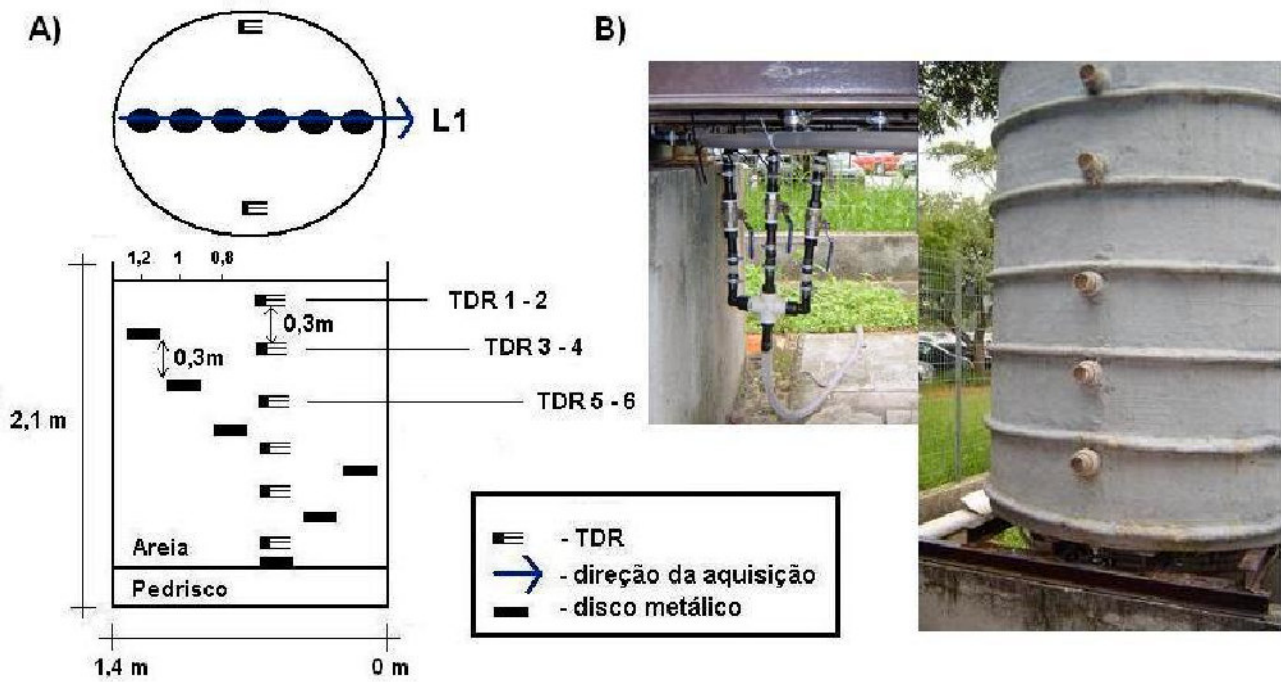


Figura 1: A) Representação esquemática da disposição dos discos metálicos e TDRs no tanque com areia e da linha de aquisição dos perfis de GPR. B) Imagem do tanque de realização dos ensaios com detalhe do sistema inferior de enchimento/drenagem.

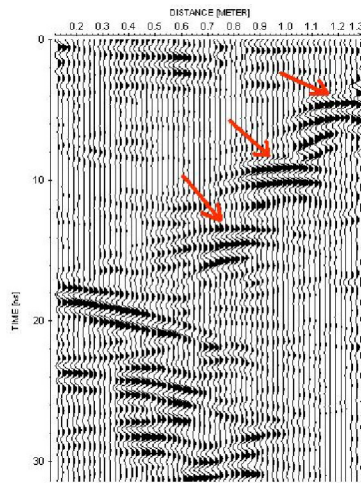


Figura 2: Exemplo de radargrama referente à aquisição no meio seco. As setas em vermelho indicam as 3 primeiras hipérbolas identificadas.

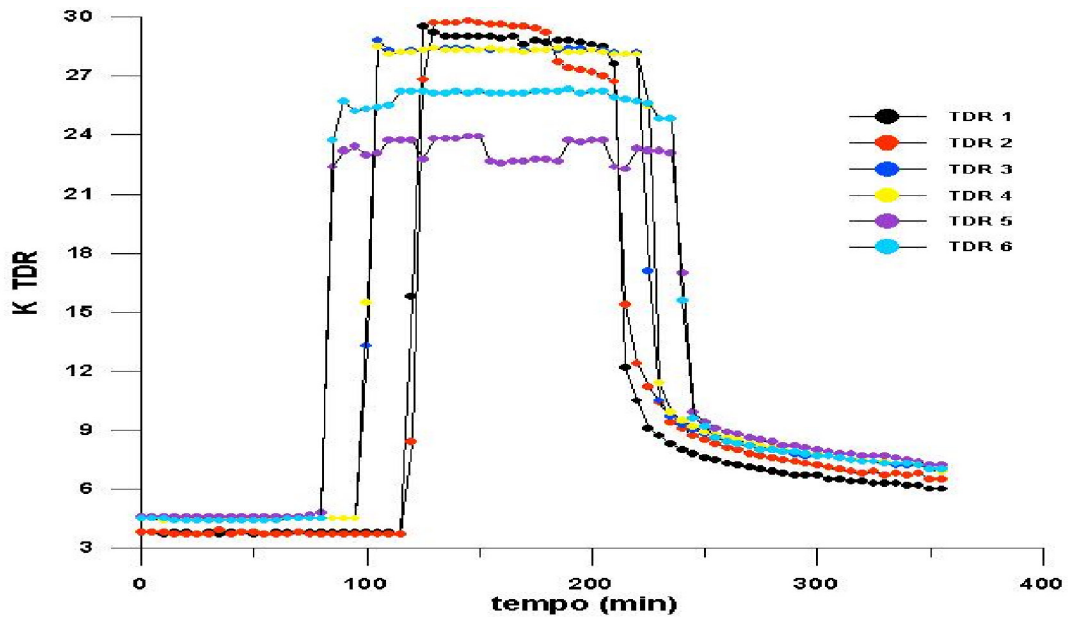


Figura 3: Valores das constantes dielétricas (K) obtidos pelos TDRs em intervalos de tempo sucessivos. O par de TDRs 1-2 (diametralmente opostos) está a menor profundidade (0,15 m), seguindo o par 3-4 (0,45 m) e 5-6 (0,75 m).

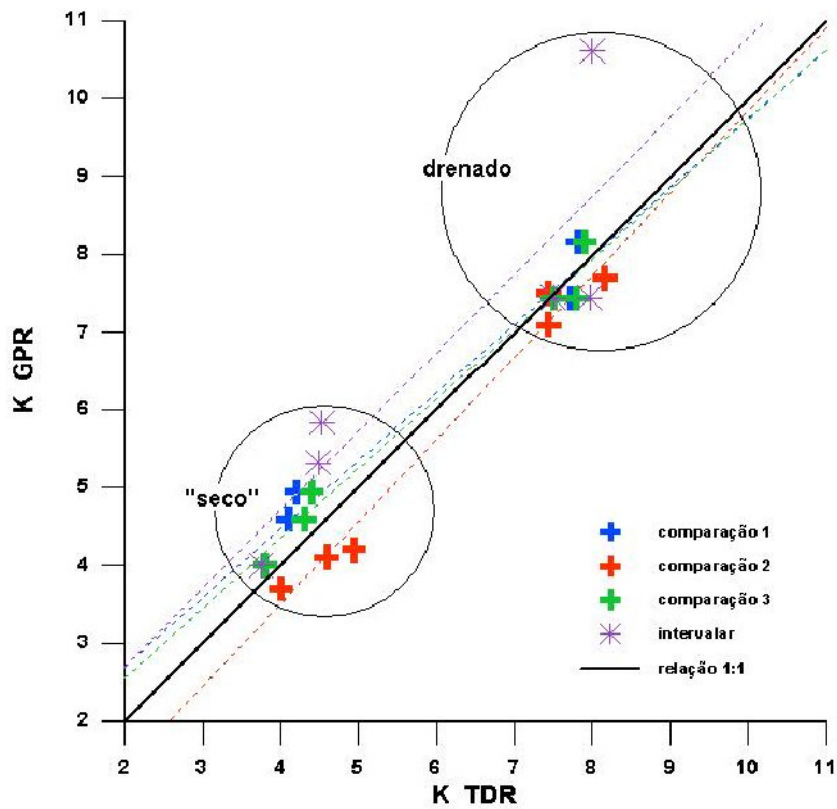


Figura 4: Análise de regressão (seco e recém drenado).