



Estimativas da Umidade de Solos com GPR: Revisão e Resultados

Marcelo Jorge Luz Mesquita (CPGf/UFGA); José Gouvêa Luiz (Faculdade de Geofísica/UFGA)

Copyright 2010, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 12th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 15-18, 2010.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 12th International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

A summary on the application of GPR as a tool to estimate soil humidity is presented. Several relations that allow estimating humidity from dielectric constant obtained from the GPR wave velocity are discussed, as well as the methodology for the GPR data acquisition. Results from experiments are also presented to show the viability and limitations of this GPR application.

Introdução

A água é uma fonte vital para os seres humanos e para o ecossistema, e a avaliabilidade de seu conteúdo no solo é de fundamental importância para atividades envolvendo agricultura, arborização, hidrologia e engenharia. O conhecimento de seu volume sob extensivas áreas é necessário para otimizar produções, colheitas e ajuda no controle de enchentes (Topp et al., 1980).

A zona vadosa, que pode ser definida como a zona de transição entre a atmosfera e o reservatório de água subterrânea, tem papel fundamental na gestão das fontes de água, pois regula sua disponibilidade à vegetação, incluindo plantações e, ao mesmo tempo, representa uma espécie de zona de proteção contra solutos e poluentes (Rubin, 2003). Em regiões de escala continental a troca de umidade e energia entre solo, vegetação e atmosfera tem impacto em parâmetros (umidade e temperatura) que definem o clima do local (Huisman et al., 2003).

Os métodos eletromagnéticos são ideais para esse tipo de estudo, pois as propriedades eletromagnéticas na superfície rasa são controladas principalmente pela presença de água (Topp et al., 1980), devido ao alto valor de sua constante dielétrica ou permissividade elétrica relativa ($\epsilon_r = 81$) em contraste com a maioria dos materiais geológicos em que a permissividade relativa varia entre 3 e 10.

Uma bem sucedida técnica no domínio do tempo de medição em campo para inferir a respeito do teor de água é o TDR (*Time Domain Reflectometry*), que foi introduzido para estudos do solo em meados de 1980 (Topp et al., 1980). Embora o TDR seja altamente recomendado para medições em locais com alta

resolução temporal, a medição de volumes muito pequenos ($< \text{dm}^3$) é difícil, pois ele é muito sensível a variações do teor de água em pequena escala devido a macroporos e bolhas de ar causadas pela introdução das sondas (Huisman et al., 2003). Além do mais, é uma técnica muito trabalhosa porque os sensores precisam ser instalados em cada local de medida.

Os métodos convencionais para medida de teor de água no solo são aqueles de pequena escala que incluem métodos gravimétricos, TDR e FDR (*Frequency Domain Reflectometry*), sonda de nêutrons e técnicas de sonda de capacitância. Esses métodos são invasivos e dão somente uma cobertura espacial limitada (Lunt et al., 2005).

Historicamente o foco inicial do GPR (*Ground Penetrating Radar*) era mapear estruturas na subsuperfície, mas seu uso com o intuito de estimar a umidade do solo tem crescido recentemente. Provavelmente o fator principal para o atraso em seu uso com esse propósito é o complicado comportamento das ondas não guiadas usadas no GPR em comparação com as guiadas do TDR.

Principais Relações entre Volume de Água (θ_v) e ϵ_r

A maioria das equações deriva de experimentos com TDR, mas se adequam muito bem quando utilizadas com GPR. Muitos pesquisadores (e.g. Weiler et al., 1998; Huisman et al., 2001) têm mostrado que equações de calibração desenvolvidas usando TDR, em escalas decimétricas, têm sido aplicadas com bastante sucesso em estudos em larga escala com GPR (Lunt et al., 2005).

a) Equação de Topp:

Essa relação empírica entre permissividade relativa (ϵ_r) e teor volumétrico de água θ_v ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$), foi proposta por Topp et al. (1980) através de dados experimentais de laboratório com diferentes texturas de solo. A relação é dada por:

$$\theta_v = -5,3 \cdot 10^{-2} + 2,92 \cdot 10^{-2} \epsilon_r - 5,5 \cdot 10^{-4} \epsilon_r^2 + 4,3 \cdot 10^{-6} \epsilon_r^3 \quad (1)$$

Esta equação descreve adequadamente o teor de água para valores $\theta_v < 0,5$ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) com erro estimado de 0,013, além de independência de densidade ($1,14 - 1,44 \text{ gm/cm}^3$), temperatura ($10^\circ - 36^\circ\text{C}$) e salinidade do solo. Muitos autores tem mostrado sua aplicabilidade com sucesso, apesar de não ser adequada para solos orgânicos e vermiculita. A representação gráfica da equação de Topp é mostrada na Figura 1.

b) Equação de Modelo Trifásico:

Equação semi-empírica baseada em modelos de permissividades misturadas, que leva em conta o volume e a permissividade dielétrica de cada elemento constituinte do solo estudado (e.g., Dobson et al., 1985; Roth et al., 1990). A equação é

$$\theta_v = \frac{[\epsilon_r^\alpha - (1-n)\epsilon_s^\alpha - n\epsilon_a^\alpha]}{[\epsilon_w^\alpha - \epsilon_a^\alpha]} \quad (2)$$

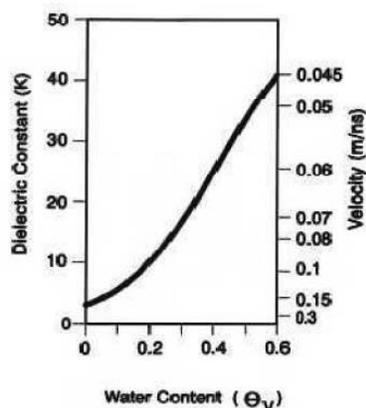


Figura 1: Equação de Topp. Fonte: Annan (2001).

Em que, n é a porosidade do meio, α é o fator relacionado a orientação do campo elétrico em relação a geometria do meio, ϵ_w representa a permissividade relativa da água, ϵ_s é a permissividade relativa média do solo e $\epsilon_a = 1$ é a permissividade relativa do ar.

Após as substituições necessárias, temos uma interpretação física simples da relação entre θ_v e ϵ_r , sugerida por Ledieu et al. (1986) e Herkelrath et al. (1991):

$$\theta_v = a\sqrt{\epsilon_r} - b, \quad (3)$$

sendo a e b parâmetros de calibração.

c) Equação de Siddiqui:

No campo da engenharia geotécnica e ambiental as medições de umidade são expressas gravimetricamente. Siddiqui et al. (2000) modificou, com grande sucesso, através de experimentos com TDR uma equação de calibração, semelhante à Eq. (3) acima, levando em conta o teor de umidade gravimétrica w :

$$\sqrt{\epsilon_r} \frac{\rho_w}{\rho_d} = a + bw \quad (4)$$

em que, ρ_w é a densidade da água, ρ_d é a densidade do solo seco, a e b são parâmetros relativos a calibração.

A partir da Eq. (4) é possível obter uma relação envolvendo o teor de umidade volumétrica. Considerando

$$\theta_v = w \frac{\rho_d}{\rho_w} \quad (5)$$

Obtém-se:

$$\sqrt{\epsilon_r} = a \frac{\rho_d}{\rho_w} + b\theta_v \quad (6)$$

c) Equação de Roth:

Em Roth et al. (1992) são apresentados aspectos práticos de calibração e uma abordagem empírica para estabelecer a existência de uma função de calibração universal dada por:

$$\theta_v = -7,8.10^{-2} + 4,48.10^{-2}\epsilon_r - 1,95.10^{-3}\epsilon_r^2 + 3,61.10^{-5}\epsilon_r^3 \quad (7)$$

Amostras de 11 solos minerais e 7 orgânicos com diferentes produtos químicos e propriedades físicas (incluindo propriedades magnéticas) foram selecionadas a fim de determinar a relação entre θ_v e ϵ_r . O estudo mostrou que uma função de calibração única para solos minerais e outra para solos orgânicos podem ser estabelecidas.

Na Figura 2 são comparadas as equações de Topp, Roth e do modelo trifásico.

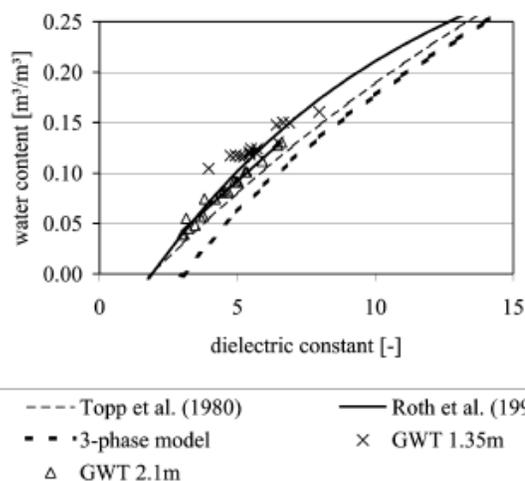


Figura 2: Comparação de diferentes modelos de calibração. GWT = lençol freático. Fonte: Stoffregen et al. (2002).

Aquisição de dados com GPR para obtenção de ϵ_r

(a) Utilizando ondas refletidas

Duas classes de métodos para determinar ϵ_r , por meio da análise do tempo de chegada das ondas refletidas podem ser empregadas. A primeira contém os métodos que usam separação única entre antenas e a segunda medidas envolvendo diferentes separações.

- *Common-offset* (afastamento comum)

A energia transmitida pelo GPR ao solo é parcialmente refletida quando contrastes produzidos por objetos são encontrados, como ele emite ondas em todas as direções, a energia refletida é medida antes que o GPR esteja diretamente sobre o objeto. Com isso, as reflexões nas seções de radar formam uma hipérbole. A maioria

dos softwares para análise de dados fornecem rotinas onde a velocidade pode ser determinada interativamente por ajustes manuais das hipérbolas e, assim, a permissividade e o teor de umidade do solo podem ser determinados.

Apesar da facilidade e simplicidade em determinar a velocidade a partir da reflexão proveniente de objetos enterrados, é uma configuração que não tem sido usada com muita frequência. O principal inconveniente desse método é que ele só pode ser usado em solos em que os objetos podem ser observados na seção de GPR, e só estima o teor de umidade médio na profundidade do refletor. Para ser útil, essa configuração requer suficiente sinal de penetração, presença de contrastes dielétricos na subsuperfície e controle da profundidade do refletor. Por estes motivos, em estudos sob condições naturais, ela não é muito consagrada (Huisman et al., 2003).

- Multi-offset

Duas geometrias de aquisição são frequentemente utilizadas: CMP e WARR. No CMP a distância entre as antenas é aumentada a cada etapa enquanto mantemos um ponto médio comum entre elas. Na aquisição WARR, a distância entre as antenas é aumentada a cada passo com o transmissor em uma única posição. Esse método também permite a determinação da velocidade através da análise da chegada de outras ondas além da refletida. Apesar do extensivo uso desta configuração, existem algumas desvantagens: não há controle sobre a resolução da profundidade nas medições, é trabalhoso e não há estudos de reconhecimento de variação na umidade.

(b) Utilizando ondas de superfície

Para medidas de onda de superfície com GPR é necessário que o receptor e o transmissor estejam ambos sobre a superfície. A velocidade desta onda pode ser determinada usando a configuração *common-offset*, desde que o tempo de chegada aproximado da onda de superfície seja conhecido por meio de uma medida usando *multi-offset*.

Du (1996) e Sperl (1999) propuseram o seguinte processo para o mapeamento do teor de umidade no solo com a onda de superfície: (i) identificar o tempo de chegada aproximado para diferentes separações entre antenas, (ii) escolher uma separação onde a onda de superfície esteja claramente separada das ondas aéreas e refletidas, (iii) usar a separação entre antenas para medidas usando *common-offset* e descrever as mudanças no tempo de chegada da onda de superfície.

Os resultados com onda de superfície são promissores, mas ainda existem incertezas associadas a este método. Outros fatores que afetam o uso de ondas de superfície estão associados à dificuldade em reconhecer a onda entre ondas refratadas e refletidas e escolha da separação entre as antenas, pois a onda de superfície é atenuada mais rapidamente e isso limita esta escolha (Huisman et al., 2003).

(c) Medidas utilizando poços

Nesta configuração as antenas são baixadas em tubos de acesso verticais. No modo *zero-offset* (ZOP), as antenas são baixadas de forma que seus pontos médios estejam sempre a mesma profundidade (Figura 3). O tempo de chegada da onda direta entre os poços e a sua separação são usadas para calcular velocidade e permissividade. Cada medida em poço requer poucos segundos e é capaz de medir processos transientes dentro da zona insaturada.

O teor de umidade também pode ser calculado de perfis *multi-offset* (MOP) através da construção de imagem 2D de sua distribuição entre os poços, sendo mais adequado a condições de umidade fixas (Figura 3). Medidas também podem ser realizadas em poços horizontais (Parkin et al., 2000; Galagedara et al., 2002).

Existem muitos pontos que merecem atenção ao se realizarem medições com poços: é importante reconhecer e corrigir os erros causados pelos processos de aquisição e transmissão; é importante considerar o impacto das ondas refratadas, especialmente aquelas propagadas no solo; a distância entre as antenas e a frequência tem um impacto na máxima resolução espacial alcançada (Huisman et al., 2003).

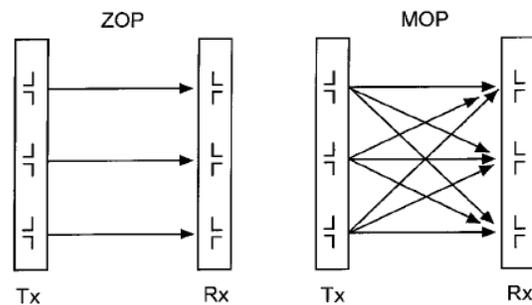


Figura 3: Medidas em poços. Fonte: Huisman et al., 2003.

(d) Medidas utilizando reflexões de superfície

Neste caso, as antenas são operadas a certa distância da superfície em um veículo ou em uma plataforma suspensa bem baixa (Figura 4). A propriedade medida é o coeficiente de reflexão da interface ar-superfície. As medidas são mais práticas com antenas de alta frequência, pois os coeficientes de reflexão são mais sensíveis a baixos teores de umidade (Huisman et al., 2003).

Um fato a considerar nesta metodologia é que superfícies acidentadas e variações no teor de umidade causam significativo espalhamento nas ondas, que causam variações no coeficiente de reflexão e falha nas estimativas. A profundidade de medida efetiva e o impacto na variação do teor de água com a profundidade são tópicos de ativas pesquisas, mas pouco é conhecido no momento.



Figura 4: Medidas usando reflexões de superfície. Fonte: Huisman et al., 2003.

Resultados com GPR

(a) Weiler et al. (1998)

Com o objetivo de determinar se o GPR pode ser usado como sensor de umidade *in situ* em solos arenosos, Weiler et al. (1998) propôs examinar se uma equação de calibração para o TDR é válida também para o GPR.

Os testes foram realizados no campo de pesquisas da Universidade de Massachusetts. O solo é classificado como arenoso fino e de um recente depósito aluvial. Foi usado um sistema pulseEKKO GPR de 450 MHz de frequência central e um Tektronix cable tester TDR que emitia ondas entre 1 MHz e 1,5 GHz.

Duas equações de calibração foram criadas através do método de regressão, uma para o TDR e outra para o GPR. Para o TDR, a equação produzida foi

$$\theta_v = 0,131\sqrt{\epsilon_r} - 0,224 \quad (8)$$

e para o GPR

$$\theta_v = 0,131\sqrt{\epsilon_r} - 0,177 \quad (9)$$

A figura 5 mostra a comparação entre a equação de Topp e a equação (8) desenvolvida por Weiler et al. (1998).

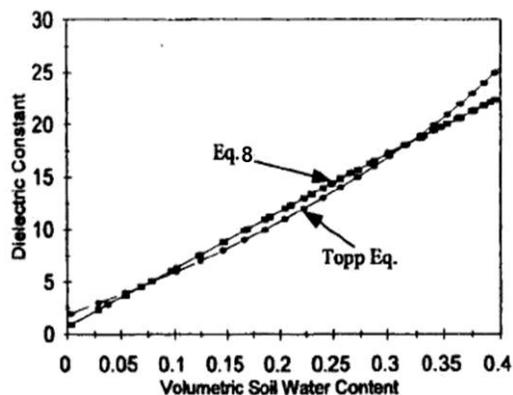


Figura 5: Comparação entre a equação de Topp e Eq. (8). Fonte: Weiler et al. (1998).

(b) Stoffregen et al. (2002)

Stoffregen et al. (2002), para estudar a acurácia do GPR, realizaram medidas sobre 4 lisímetros cilíndricos (cada um com área 1 m² e 1,5 m de profundidade) na estação de lisímetros, Dahlem, Berlin, em três diferentes tipos de solo: areia com loamy, loam arenoso e loam síltico. As medidas foram realizadas com o sistema RAMAC/GPR de 1 GHz de frequência e depois comparadas com os dados provenientes dos lisímetros, que possuíam sistemas de medição eletrônicos integrados.

Os autores concluíram que as ondas refletidas de altas frequências só puderam ser usadas para solo arenoso. Para aplicar o método em campo, o refletor não poderia estar abaixo de 1 - 1,5m. Comparada com outras curvas de calibração utilizadas na técnica do TDR, a Equação de Topp forneceu os melhores resultados.

(c) Lunt et al. (2005)

Lunt et al. (2005) mostraram que as reflexões na configuração GPR *common-offset*, com antena de 100 MHz, podem ser usadas para estimar o teor volumétrico de água do solo sob várias condições de saturação com erro (RMS) de 0,018 (m³.m⁻³), e o método pode ser comparado aos principais métodos usados: sonda de nêutrons, TDR, sonda de capacitância e GPR em outras configurações. Além da vantagem da rapidez em relação da aquisição em áreas grandes.

O estudo foi realizado em Dehlinger Winery em Sonoma Country, CA. A geologia local era composta de uma camada espessa de solo vermelho, barrento e argiloso sobre uma área de 80 por 120 m.

A equação de calibração específica para o local, baseada em Herkelrath et al. (1991), foi

$$\theta_v = 0,1168\sqrt{\epsilon_r} - 0,19 \quad (10)$$

com o coeficiente de relação $r^2 = 0,84$.

(c) Paixão et al. (2006)

Paixão et al. (2006), a partir de um estudo na cidade de São Paulo, obtiveram resultados bastante coerentes com GPR de diferentes frequências: 50 MHz, 100 MHz e 200 MHz. A equação de Topp foi usada para a conversão em umidade.

Foi empregada a técnica *multi-offset* WARR em uma área de estudos hidrológicos no campus da USP. Os dados de GPR foram comparados com os do método de pesagem e secagem em laboratório. As estimativas dos teores de umidade corresponderam à profundidades inferiores a 0,5 m. A melhor resposta foi obtida com a antena de 200 MHz.

Conclusões

Este trabalho teve como objetivo apresentar a aplicabilidade do método do GPR na estimativa de umidade do solo. Foram apresentadas algumas das principais equações que relacionam permissividade

dielétrica e umidade, sendo que uma inclui parâmetros gravimétricos.

Todas apresentam resultados bastante satisfatórios de acordo com os objetivos propostos pelos autores estudados. Podemos notar que elas dependem fortemente das características do solo estudado e, algumas vezes, calibrações são necessárias na obtenção de melhores resultados.

O GPR tem mostrado ser um método muito promissor nesse tipo de estudo, principalmente por ser não intrusivo e ser possível realizar medições em áreas extensas em muito menos tempo que os outros métodos usados na estimativa da umidade.

Agradecimentos

Marcelo Jorge Luz Mesquita agradece ao curso de Pós-graduação em Geofísica da UFPA e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de Mestrado.

Referências

- Annan, A. P., 2001. Ground Penetrating Radar: Workshop Notes. *Sensors & Software Inc.*, 192 p.
- 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. Remote Sens.* 23:35-46.
- Du, S. 1996. Determination of water content in the subsurface with the ground wave of ground penetrating radar. Ph.D. thesis. Ludwig-Maximilians-Universität, Munich, Germany.
- Galagedara, L.W., G.W. Parkin, J.D. Redman & A.L. Endres. 2002. Temporal and spatial variation of soil water content measured by borehole GPR under irrigation and drainage. Proc. of the Ninth Conf. on Ground Penetrating Radar. Proc. SPIE 4758:180–185.
- Herkelrath, W. N., Hamburg, S. P. & Murphy, F. 1991. Automatic Real-Time Monitoring of Soil Moisture in a Remote Field Area with Time Domain Reflectometry. *Water Resour. Res.* 27: 857-864.
- 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.
- Huisman, J. A., Sperl, C., Bouten, W. & Verstraten, J. M., 2001. Soil Water Content Measurements at Different Scales: Accuracy of Time Domain Reflectometry and Ground Penetrating Radar. *Journal of Hydrology*, 254 (1-2), 48-58.
- Ledieu, J., Ridder, P. D., Clerk, P. D., & Dautrebande, S. 1986. A Method of Measuring Soil Moisture by Time Domain Reflectometry. *J. Hydrol. (Amsterdam)*, 88: 319-328.
- Lunt, I. A., Hubbard, S. S. & Rubin, Y., 2005. Soil Moisture Content Estimation Using Ground-Penetrating Radar Reflection Data. *Journal of Hydrology*, 307: 254-269.
- Paixão, M. S. G., Prado, R. L. & Diogo, L. A., 2006. Análise do Emprego do GPR para Estimar o teor de Umidade do Solo a Partir de um Estudo na Cidade de São Paulo. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 24(2): 189-198.
- Parkin, G., D. Redman, P. von Bertoldi & Z. Zhang. 2000. Measurement of soil water content below a wastewater trench using ground penetrating radar. *Water Resour. Res.* 36:2147–2154.
- Roth, C.H., Malicki, M.A. & Plagge, R., 1992. Empirical evaluation of the relationship between soil dielectric constant and volumetric water content as the basis for calibrating soil moisture measurements by TDR. *Soil Sci.* 43, 1–13.
- Roth, K., Schulin, R., Fluhler, H., Attinger, W., 1990. Calibration of Time Domain Reflectometry for Water Content Measurement Using a Composite Dielectric Approach. *Water Resources Research*, v. 26, 10: 2267-2273.
- Rubin, Y., 2003. Applied Stochastic Hydrogeology. *Oxford University Press*, Oxford, UK.
- Siddiqui, S. L., Drnevich, V. P., & Deschamps, R. J., 2000. Time Domain Reflectometry Development for Use in Geotechnical Engineering, *Geotechnical Testing Journal*, 23(1): 9-20.
- Sperl, C. 1999. Determination of spatial and temporal variation of the soil water content in an agro-ecosystem with ground-penetrating radar. (In German.) Ph.D. thesis. Technische Universität München, Munich, Germany.
- Stoffregen, H., Yaramanci, U., Zenker, T. & Wessolek, G., 2002. Accuracy of Soil Water Content Measurements Using Ground Penetrating Radar: Comparison of Ground Penetrating Radar and Lysimeter Data. *Journal of Hydrology*, 267: 201-206.
- Topp, G. C., Davis, J. L. & Annan, A. P., 1980. Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurements in Coaxial Transmission Lines. *Water Resources Research*, v. 16, 3: 574-582.
- Weiler, K. W., Steenhuis, J. B., Boll, J. & Kung, K.-J. S. 1998. Comparison of Ground Penetrating Radar and Time-Domain Reflectometry as Soil Water Sensors, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 62: 1237-1239.