



Monitoramento da umidade de campo empregando a técnica de radar GPR

Amparo, N.S.^{(1)*}, Machado, S. L.⁽²⁾, Dourado, T.C.⁽³⁾, Botelho, M.A.B.⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Mestrando, Depto. Ciência e Tec. dos Materiais, UFBA, Salvador/BA, nelson@geoamb.eng.ufba.br

⁽²⁾ Professor Doutor, Depto. Ciência e Tec. dos Materiais, UFBA, Salvador/BA, smachado@ufba.br

⁽³⁾ Mestre, CPGG, UFBA, Salvador/BA, tcd@cpgg.eng.ufba.br

⁽⁴⁾ Professor Pós-Doutor, CPGG, UFBA, Salvador/BA, botelho@cpgg.ufba.br

Copyright 2005, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, 11-14 September 2005.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Ideas and concepts of the text are authors' responsibility 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

This paper intends to evaluate the GPR potential of use aimed to obtention of water content profiles in the vadose zone. In order to do that, a laboratory mechanical apparatus was developed in way that constant mid point tests can be performed, allowing the obtention of precise CMP radagrams. The apparatus, a sand box with nominal dimensions of 1 x 0,7 x 0,7 m, had a mechanical device that assures equal displacements from central point. Laboratory tests were performed in order to calibrate equipment and obtain experimental data correlating soil water content and pulse travel velocities theoretical equation, develop inside the scope of the research program, was used in order to predict the relative amounts of water and air in the soil voids.

Fields test were performed along year weekly and of the occurrence of heavy rain falls. Daily measurements of precipitation were made and the water content profiles obtained were compared with the accumulated precipitation during as choiced time interval. It is showed that GPR is able to monitor the soil water content in the vadose zone, allowing the obtention of hydric balance, run-off coefficients and other indexes of interest.

Introdução

O uso da ferramenta geofísica Radar de Penetração no Solo vem se ampliando, nos últimos anos, às mais variadas áreas do conhecimento humano. Na engenharia, diversas aplicações podem ser citadas,

como na engenharia de estruturas, na geotecnia, ou mesmo na engenharia ambiental. Por outro lado, a grande dependência que o teor de água preserva com a velocidade da onda eletromagnética utilizada pelo radar, vem sendo explorada com sucesso por uma série de trabalhos contidos na literatura. Da mesma forma, este trabalho apresenta uma alternativa de monitoramento dos teores de água, através do cálculo da umidade de campo, obtida a partir da velocidade da onda eletromagnética do radar. A monitoração da umidade de campo pode ser importante para auxiliar em diversas situações reais encontradas na engenharia, como por exemplo para o controle da umidade em encostas e análises de estabilidade.

Dentre os que estudaram a umidade de solos a partir da avaliação da velocidade eletromagnética dos pulsos de radar, destacam-se os trabalhos de Greaves et. al. (1996), Hagrey and Muller (2000) e Huisman et. al. (2001).

Metodologia

a) Ensaios de Laboratório

Um equipamento auxiliar que consiste de uma caixa feita em acrílico com volume interno de aproximadamente 0,5m³ e um sistema mecânico capaz de garantir o espaçamento equidistante das antenas transmissora e receptora, foi criado, conforme mostra a figura 1.

Este mecanismo é composto de uma manivela que faz girar dois eixos com roscas invertidas (no interior do tubo de pvc) que sustentam as plataformas de madeira e movimentam as antenas em sentidos opostos. Permitindo desta forma a realização de ensaios seguindo o modelo de arranjo CMP (figura 2) com antenas de 100MHz de frequência.

A equação 1 define o comportamento do tempo de trânsito da energia refletida $T(x)$ em função da

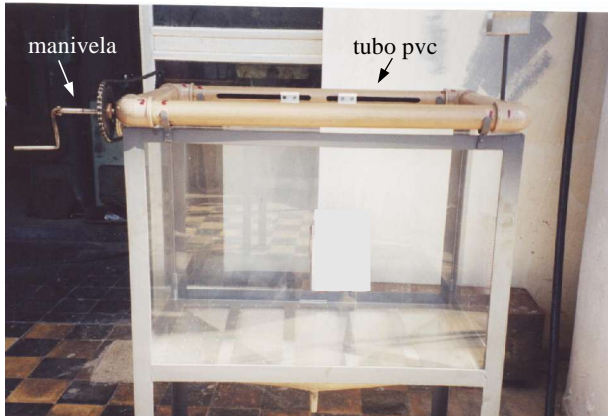


Figura 1. Dispositivo mecânico desenvolvido para realização dos ensaios tipo CMP em campo.

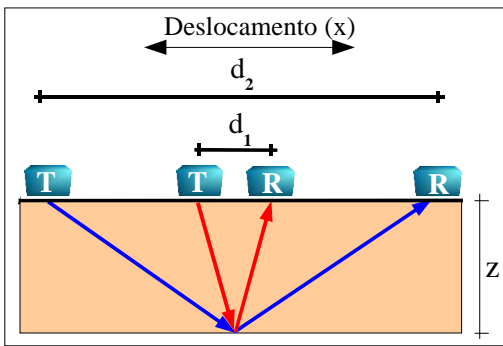


Figura 2. Representação do modelo de arranjo CMP, mostrando o trajeto do raio representativo da frente de onda do radar.

Velocidade (V), da distância de afastamento das antenas (x') e do tempo inicial (T_0), que depende da profundidade do alvo.

$$T(x)^2 = T_0^2 + \frac{x'^2}{V^2} \quad (1)$$

Utilizando o método t^2-x^2 proveniente da sismica obtém-se uma equação linear, na qual, o coeficiente angular a é numericamente igual ao inverso do quadrado da velocidade e o coeficiente linear b corresponde ao quadrado do tempo de percurso da onda para $x = 0$, conforme apresentado na figura 3. A velocidade obtida neste método é a *root minimum square* (V_{rms}) que corresponde à velocidade média de propagação da onda no meio situado acima do refletor que originou a hipérbole.

A figura 4 mostra uma representação da caixa construída com a disposição de uma chapa metálica a certa profundidade com intuito de criar uma superfície refletora, o mais nítida possível, para melhorar a qualidade dos sinais refletidos.

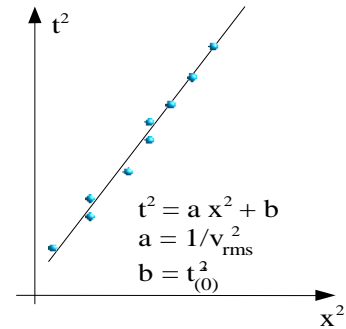


Figura 3. Reta obtida a partir do método $t^2 - x^2$.

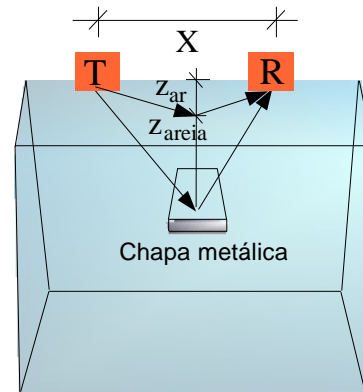


Figura 4. Esquema de funcionamento dos ensaios de radar seguindo o arranjo CMP, mostrando a disposição da chapa metálica.

A formulação de Dix (1955) foi utilizada devido a existência dos dois contrastes (ar/areia e areia/chapa) mostrado na figura 4. Os ensaios foram realizados em areia selecionada, a partir da umidade higroscópica até a saturação. Maiores detalhes destes experimentos podem ser encontrados nos trabalhos de Botelho et. al. (2003) e Machado et. al. (2004).

b) Ensaios de Campo

Os ensaios de campo tiveram como finalidade correlacionar a umidade do solo em subsuperfície, obtida a partir de aquisições do tipo CMP, com as precipitações diárias ocorridas no local. Uma parte destes experimentos foram realizados em um período de fortes chuvas e outra no período de estiagem, visando verificar a potencialidade do GPR no monitoramento da umidade de campo.

Nas aquisições de dados seguindo o arranjo CMP é comum utilizar o teclado do computador para emissão do pulso eletromagnético no solo. Neste caso, as antenas são deslocadas manualmente a uma mesma distância em relação ao eixo central, e então, é emitido o pulso a cada nova posição das antenas. Os levantamentos de campo realizados desta forma não tiveram boa

resolução nas imagens geradas nos radagramas, dificultando a visualização das hipérbolas e mostrou-se muito custosa, em termos de tempo, quando se pretende adotar espaçamentos da ordem de centímetros.

Para garantir o espaçamento equidistante das antenas transmissora e receptora de forma dinâmica e emissão contínua dos pulsos, criou-se o mecanismo apresentado na figura 5. Neste dispositivo as antenas são apoiadas em plataformas de madeira, as quais, são conduzidas por um sistema de roldanas suspensas sobre cordas guias presas às hastes cravadas no solo nas extremidades. As cordas de tração são usadas para movimentar as antenas de forma equidistante, no sentido indicado na figura 5. Ao puxar a corda de tração,

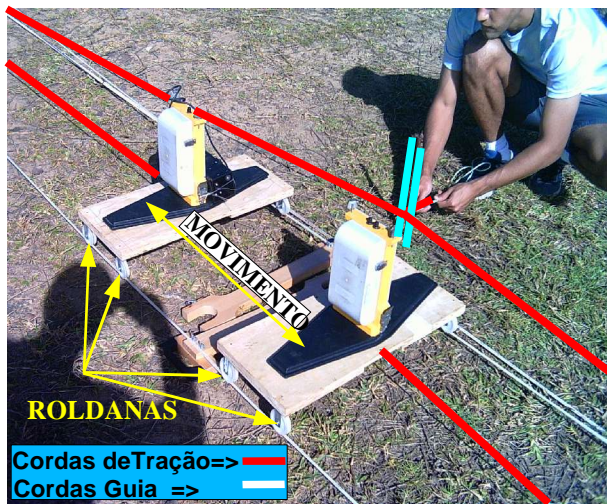


Figura 5. Dispositivo mecânico desenvolvido para realização dos ensaios tipo CMP em campo.

as as antenas se deslocam iniciando o processo de aquisição.

Este dispositivo permitiu realizar levantamentos com espaçamentos de 4 cm, lidos por odômetro de cordão, e emissão automática do pulso eletromagnético no solo, melhorando a qualidade dos radagramas.

Para realização dos ensaios de campo foi necessário escolher uma área piloto na qual o sinal de radar tivesse uma penetração satisfatória no solo para as investigações. Desta forma, após diversos testes com o equipamento em diferentes áreas de Salvador, foi escolhido um local próximo ao Aeroclube Plaza Show no bairro da Boca do Rio. A figura 6 mostra o local da área piloto escolhida para realização dos ensaios de campo.

Nesta área executou-se ensaios de radar tipo CMP no período de agosto de 2004 a fevereiro de 2005 totalizando 10 ensaios, os quais foram acompanhados pela instalação de pluviômetro próximo ao local para efetuar leituras das precipitações diárias ocorridas durante o período de ensaio. A figura 7 exhibe as

precipitações mensais referente ao período estudado. Em todos os ensaios de campo foi utilizada uma janela de tempo de 150 s, o que possibilitou investigar, com resolução razoável, uma profundidade média de 6 metros.



Figura 6. Local de realização dos ensaios de campo com o radar.

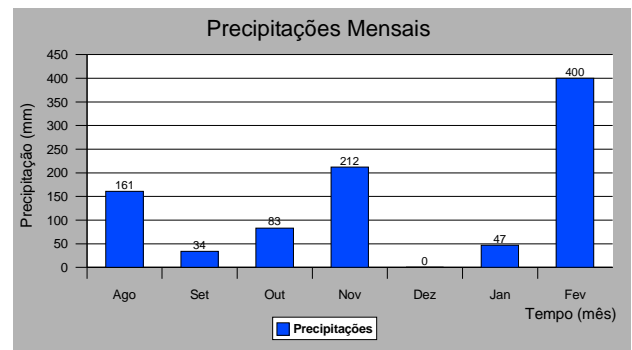


Figura 7. Representação das precipitações mensais referente aos meses de ago/2004 a fev/2005.

Realizou-se, também, ensaios de caracterização do solo e permeabilidade em campo utilizando o permeâmetro de Guelph, que consiste de um dispositivo, desenvolvido por Reynolds et al. (1983), para a execução de ensaios de infiltração de campo, a carga constante, o qual utiliza o princípio do tubo de Mariotte para a aplicação das cargas hidráulicas (Machado, et. al., 2004).

A permeabilidade do solo determinada em campo foi utilizada para estabelecer o intervalo de tempo de influência a ser considerado no caso da ocorrência de chuvas, em uma certa profundidade. Por exemplo, um ensaio realizado em campo com o GPR, tipo CMP, tem como resultado a velocidade de propagação da onda eletromagnética no solo para uma determinada profundidade (Z). A água disposta no solo pela precipitação levará um tempo (t) para ter atingido esta profundidade (Z). Este tempo é obtido da divisão de (Z) pela permeabilidade do solo (k) e corresponde ao tempo

de influência de chuvas ocorridas no local, conforme equação 2:

$$t = \frac{Z}{k} \quad (2)$$

Desta forma, a umidade do solo, obtida com o GPR, será correlacionada com as precipitações diárias ocorridas no intervalo de tempo (t).

Resultados e Análises

a) Ensaios de Laboratório

A figura 8 apresenta dois radagramas resultantes dos ensaios em areia na umidade higroscópica e saturada. A velocidade de propagação do pulso eletromagnético para a areia na umidade higroscópica (umidade 5%) foi de 16 cm/ηs, caindo para 5cm/ηs para a areia saturada (umidade 24%). Observa-se nesta figura que a janela de tempo para o ensaio com a areia saturada foi de 20ηs, sendo para areia seca ao ar de 10ηs. Isto se deve ao fato da velocidade diminuir a medida que o solo se torna mais úmido.

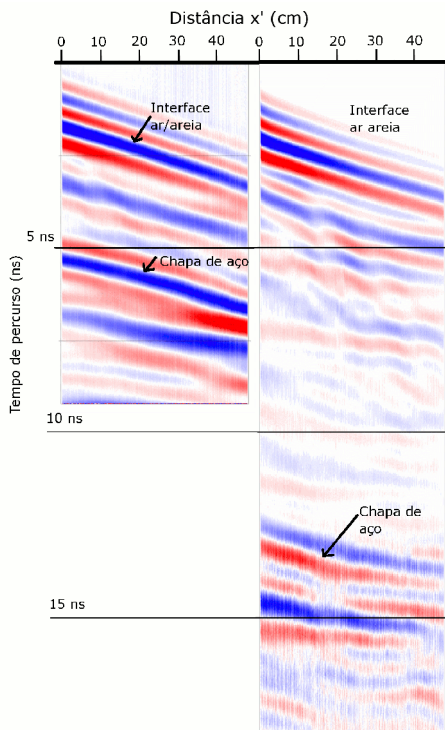


Figura 8. Radagramas obtidos para a areia na umidade higroscópica (à esquerda) e de saturação.

A equação 3, desenvolvida por Machado et. al. (2004) foi utilizada para prever a velocidade de propagação da

onda eletromagnética no solo a partir dos seus índices físicos e das propriedades elétricas das diferentes fases.

$$v = \frac{(1+e) \cdot c}{G \cdot w \cdot \sqrt{\epsilon_{rw}} + (e - G \cdot w) + \sqrt{\epsilon_{rs}}} \quad (3)$$

Onde e corresponde ao índice de vazios do solo, G é a relação entre os pesos específicos dos sólidos e da água, c a velocidade da luz no vácuo igual a 30cm/ηs, w a umidade e ϵ_{rw} e ϵ_{rs} as constantes dielétricas relativas da água e dos sólidos, respectivamente.

Esta equação é uma combinação da equação estabelecida por Wyllie (1958), que relaciona a velocidade da onda acústica em um meio bifásico e sua porosidade, com a equação de Maxwell da velocidade de propagação de ondas eletromagnéticas em um meio. O gráfico apresentado na figura 9 exibe os pontos experimentais e teóricos da velocidade de propagação do pulso eletromagnético em função da umidade gravimétrica da areia.

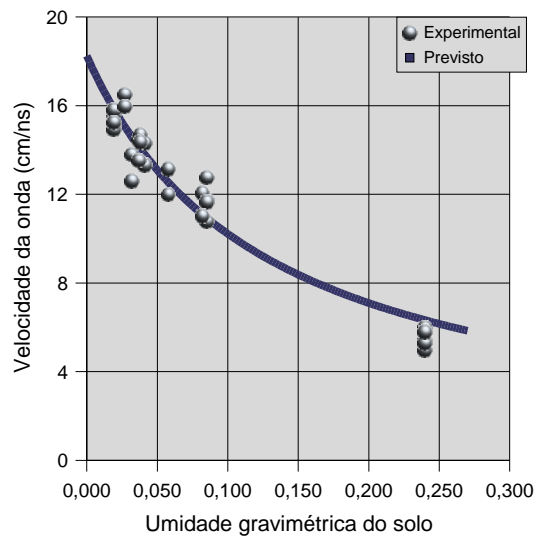


Figura 9. Variação da velocidade de propagação da onda em função da umidade gravimétrica do solo.

Observa-se no gráfico uma coerência dos resultados experimentais da velocidade eletromagnética obtida com o radar e os valores teóricos previstos pela equação 3. Desta forma, verificou-se a relação entre o teor de água contido no solo e a velocidade de propagação dos pulsos eletromagnéticos do radar.

b) Ensaios de Campo

A tabela 1 apresenta as características médias básicas obtidas para o solo estudado. Trata-se de uma areia

siltosa, segundo a NBR 6502 que se baseia na curva granulométrica.

Tabela 1. Resultados obtidos dos ensaios de caracterização do solo.

γ_s (kN/m ³)		27
Granulometria	Pedregulho (%)	0
	Areia (%)	55,56
	Silte (%)	44,44
	Argila (%)	0
Permeabilidade (cm/s)		3,74E-004

Para medida da umidade do solo com o GPR utilizou-se a equação 3 reescrita da seguinte forma:

$$w = \frac{(1+e) \cdot c}{(G \cdot \sqrt{\epsilon_{rw}} - G) \cdot (e + \sqrt{\epsilon_{rs}}) \cdot V} \quad (4)$$

Esta equação, já apresentada anteriormente, permite medir a umidade do solo a partir da velocidade de propagação da onda eletromagnética obtida dos ensaios tipo CMP realizados em campo com o GPR.

Visando confrontar os dados de umidade do solo obtidos dos experimentos com o radar, desenvolveu-se uma formulação, a partir dos diagramas de índices físicos, na qual, a umidade do solo é função da precipitação, medida no local por meio de pluviômetro, e da profundidade alcançada pelo pulso de radar.

Em sua condição natural o solo não saturado possui nos seus vazios determinada parcela de água. Considerando uma profundidade (Z) o solo possuirá um volume d'água indicado no diagrama de fases apresentado na figura 8 como sendo igual a Sr.e adotando um volume de sólidos unitário. Desta forma, uma dada precipitação acrescentará um volume de água de ($\Delta Sr.e$) neste pacote de solo.

Na figura 10 e é o índice de vazios do solo, Sr é o seu grau de saturação.

A umidade do solo pode ser calculada através da equação 5.

$$w = \frac{P_w}{P_s} = \frac{\gamma_w \cdot Sr \cdot e}{\gamma_s} \quad (5)$$

Onde, γ_w é o peso específico da água, adotado como sendo igual a 10 kN/m³ e γ_s é o peso específico médio das partículas sólidas.

Sendo a relação entre a profundidade (Z) com o volume total de solo (1+e) igual a relação entre as precipitações acumuladas (Σi) em um determinado período com o

acréscimo de água ($\Delta Sr.e$) para uma área de solo unitária, teremos que:

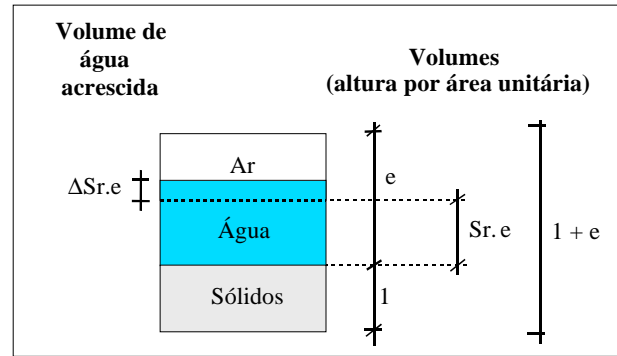


Figura 10. Representação esquemática das fases constituintes do solo indicando o acréscimo de água devido a precipitações.

$$\frac{Z}{(1+e)} = \frac{\Sigma i}{\Delta Sr \cdot e} \quad (6)$$

A equação 6 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\Delta Sr \cdot e = \frac{(1+e) \cdot \Sigma i}{Z} \quad (7)$$

A umidade do solo é definida pela equação 5 a partir das análises da figura 10. Considerando uma variação da umidade no solo a equação 5 seria expressa como:

$$\Delta w = \frac{\gamma_w \cdot \Delta Sr \cdot e}{\gamma_s} \quad (8)$$

Substituindo a equação 7 na equação 8, teremos:

$$\Delta w = \frac{\gamma_w \cdot (1+e) \cdot \Sigma i}{\gamma_s \cdot Z} \quad (9)$$

Onde, Σi é a quantidade de chuva acumulada ocorrida no período de influência calculado. Desta forma, têm-se a quantidade de chuva acumulada (Σi) para a profundidade do refletor (Z) que gerou a hipérbole. Na análise dos dados de campo, a umidade do solo é dada segundo a equação:

$$w = a + b \cdot \Sigma i \quad (10)$$

Onde a é o coeficiente linear e b o coeficiente angular dependente dos índices físicos do solo e da profundidade (Z), calculado pela equação:

$$b = \frac{\gamma_w \cdot (1+e)}{\gamma_s \cdot Z} \quad (11)$$

A figura 11 apresenta o radagrama obtido no ensaio de campo realizado no dia 18 de agosto de 2004 na área piloto. Observa-se no eixo horizontal da figura o comprimento total do perfil, ou seja, o espaçamento entre as antenas transmissora e receptora, de aproximadamente 8m e no eixo vertical os tempos de trânsito de ida e volta da onda em nanosegundos. Pode-se notar, também, que a partir de 100ns o sinal perde resolução, impossibilitando realizar leituras dos pontos da hipérbole acima deste tempo. Coletou-se os pontos das hipérbolas a 2,5ns, a 26ns e a 62ns indicadas na figura 11, resultantes das aquisições tipo CMP empregando o mecanismo apresentado na figura 5.

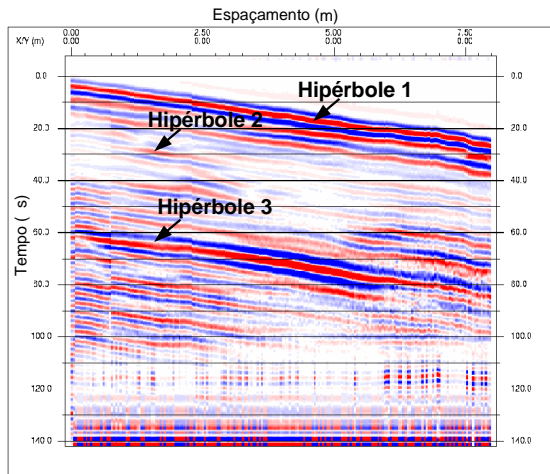


Figura 11. Radagrama obtido no ensaio de campo realizado no dia 18 de agosto de 2004.

A figura 12 apresenta o gráfico da umidade versus precipitação dos dados previstos e experimentais, utilizando a equação 10. Observa-se pelo gráfico da figura 9 que para a profundidade de 2m a curva teórica apresentou uma maior inclinação em relação a curva de ajuste dos dados experimentais. Isto é explicado pelo fato de se considerar, nos dados teóricos obtidos, pela equação 12, que toda a precipitação infiltrou no solo, o que não ocorre em campo, pois parte da água precipitada é perdida pela evaporação e pelo escoamento superficial (*runoff*). Vale ressaltar, que quando a intensidade de chuva excede a capacidade de infiltração do solo a água esco superficialmente.

Os valores adotados para as propriedades físicas do solo da área piloto, necessários para a determinação da umidade a partir da equação 4 foram: $e = 1,27$, $G = 2,7$, $\epsilon_{rs} = 4,2$ (constante dielétrica relativa do quartzo), $\epsilon_w = 80$ (constante dielétrica da água).

Visando quantificar a água que não infiltrou no solo, seja devido ao escoamento, seja pela evaporação, determinou-se o coeficiente de escoamento/evaporação que corresponde à diferença entre o coeficiente angular da curva teórica e o coeficiente angular da curva dos

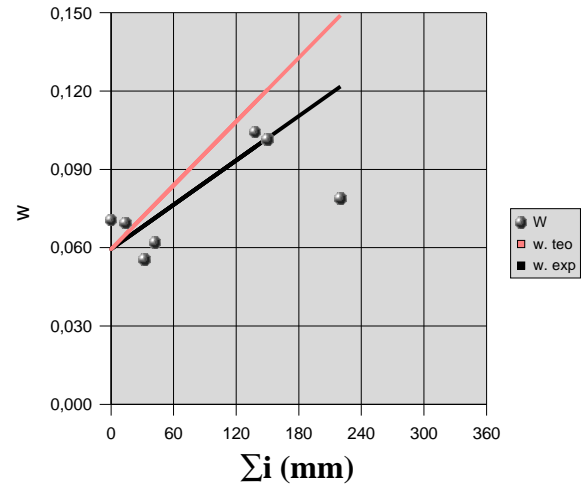


Figura 12. Variação da umidade em função das precipitações acumuladas para 2m de profundidade de solo.

dados experimentais, de acordo com a equação:

$$CE = \frac{\frac{w_{teo}}{\sum i} - \frac{w_{exp}}{\sum i}}{\frac{w_{teo}}{\sum i}} \quad (12)$$

O resultado deste coeficiente para os valores obtidos do gráfico da figura 12 para as duas curvas foi de 30%. Isto significa que apenas este percentual de toda precipitação não infiltrou no solo.

A figura 13 apresenta os resultados dos valores experimentais e previstos pela equação 10 para uma profundidade média em torno de 4,4 m. Nota-se pelo gráfico que os valores de umidades experimentais se aproximam mais dos valores teóricos de umidade para chuvas diárias inferiores a 120mm, os quais correspondem no gráfico aos pontos da região em azul. No entanto, para precipitações diárias superiores a 120mm a variação de umidade é menos sensível ao aumento das precipitações. Este comportamento torna conveniente expor os dados em dois gráficos para esta profundidade. Analisou-se, desta forma, os dados para precipitações inferiores e superiores a 120mm, considerando em ambos os casos os valores de umidade residual (para precipitações acumuladas nulas).

A figura 14 apresenta os dados de umidade e precipitação para a profundidade média de 4,4m para chuvas diárias de 0 a 360mm. Para este gráfico foi calculado um coeficiente de escoamento/evaporação, pela equação 12, de 88%, isto corresponde a um total de 12% da água precipitada que infiltrou no solo. É evidente

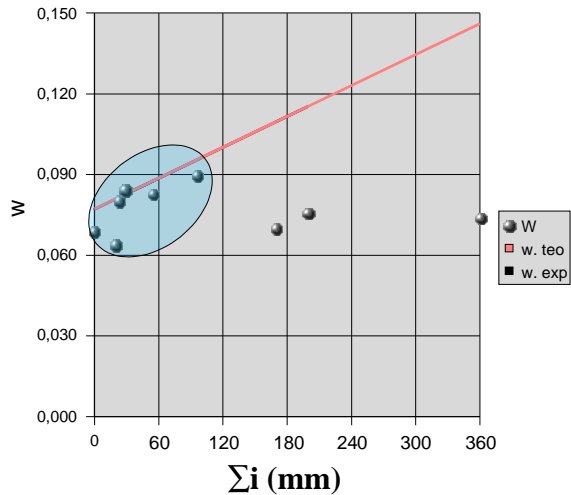


Figura 13. Variação da umidade em função das precipitações acumuladas para 4,4m de profundidade de solo.

que quanto maior a intensidade de chuva, maior o escoamento superficial, ou seja, uma parcela pequena da água precipitada infiltra no solo, consequentemente temos no gráfico da figura 14 uma variação de umidade pouco sensível com o aumento das precipitações. Parece sensato que uma maior intensidade de chuva ocorra mais facilmente em precipitações diárias superiores a 120mm.

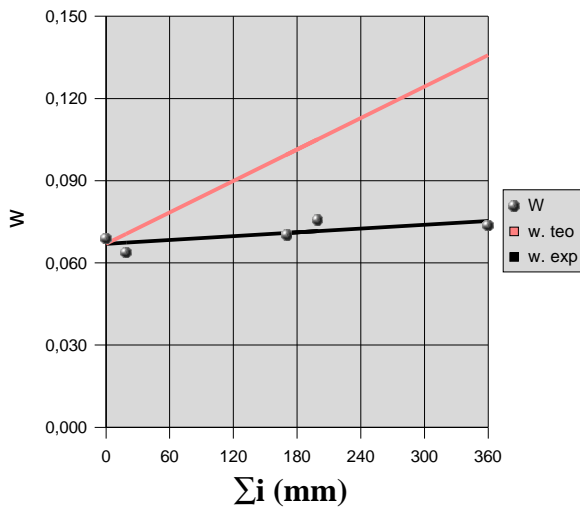


Figura 14. Variação da umidade em função das precipitações acumuladas para 4,4m de profundidade de solo, para precipitações superiores a 120 mm.

Observa-se no gráfico da figura 15 para chuvas diárias inferiores a 120mm que há uma melhor concordância do aumento da umidade com o aumento das precipitações diárias acumuladas. As chuvas diárias inferiores a 120mm possibilitaram uma maior infiltração da água no solo. Isto é demonstrado pelo coeficiente de

escoamento, que para este gráfico que é de 6%, ou seja, nessas precipitações houve uma maior oportunidade para infiltração de água no solo em relação às precipitações diárias superiores a 120mm.

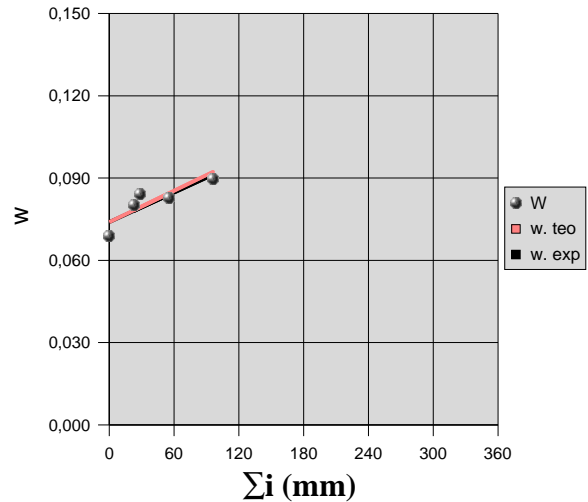


Figura 15. Variação da umidade em função das precipitações acumuladas para 4,4m de profundidade de solo. Valores experimentais e previstos pela equação 7, para chuvas diárias de 0 a 120mm.

Conclusões

Os dados experimentais de umidade do solo obtidos por meio do radar GPR tiveram resultados bastante condizentes com a condição do solo, tanto para períodos chuvosos quanto para estiagem. Isto mostra a grande potencialidade do equipamento para estudos de monitoramento de umidade do solo.

Estes experimentos servem, também, para incentivar estudos futuros com medidas de escoamento e da evaporação das precipitações visando avaliar a precisão dos dados de medida de umidade em campo obtidos com a técnica de radar GPR.

Agradecimentos

À Capes pelo apoio financeiro por meio da bolsa de estudos de mestrado concedida ao primeiro autor. Ao Laboratório de Geotecnia Ambiental da Escola Politécnica (Geoamb - Ufba) pelo apoio logístico.

References

Botelho, M. A. B., Machado, S. L., Dourado, T. C., Amparo, N. S. (2003). Experimentos laboratoriais com GPR (1GHz) em corpos arenosos para analisar a

influência da água e de hidrocarbonetos na sua velocidade de propagação. (Eighth International Congress of The Brazilian Geophysical Society)

Dix, C. H. (1995) Seismic velocities from surface measurements. *Geophysics*, 20-1, 68-86.

Greaves, R. J.; Lesmes, D. P.; Lee, J. M. AND Toksöz, M. N. (1996), Velocity variations and water content estimated from multi-offset, ground-penetrating radar. *Geophysics*, 61, 683-695.

Hagrey, S. A.; & Müller, C., (2000) GPR study of pore water content and salinity in sand. *Geophysical Prospecting*, 48, 63-86.

Huisman, J.A; Sperl, C.; Bouten, W. AND Verstraten, J.M. (2001) Soil water content measurements at different scales: accuracy of time domain reflectometry and ground penetrating radar. *Journal of Hydrology*, 245, 48-58.

MACHADO, S. L. ; CARVALHO, M. F. ; MATTA, Breno Matos da . Utilização do permeâmetro Guelph para estudo da condutividade hidráulica de solos residuais de granulito da cidade de Salvador-BA. In: V Simpósio Brasileiro de solos não saturados, 2004, São Carlos-SP. V Simpósio Brasileiro de solos não saturados, 2004. v. 1

Machado, S. L., Botelho, M. A. B, Amparo, N. S., Dourado, T. C. (2004). Utilização do radar de penetração do solo, GPR, para medidas de teores de água no solo. In: V Simpósio Brasileiro de solos não saturados, 2004, São Carlos-SP. V Simpósio Brasileiro de solos não saturados, 2004. v. 1.

Reynolds, W. D. ; Elrick, D E., and Topp, G. C. (1983) A reexamination of the constant head well permeameter method for measuring saturated hydraulic conductivity above the water table. *Soil Sci.* 136-4, 250-268.

Wyllie, M. R. J.; Gregory, A. R.; AND Gardner, G. H. F. (1958) An experimental investigation of factors affecting elastic wave velocities in porous media. *Geophysics*, 23-3, 459-493.