

Estudos com GPR (ground penetrating radar) visando a detecção de vazamentos da rede hidráulica em subsuperfície na cidade de São Paulo.

Renato Luiz Prado^{1*}, Carlos Alberto Birelli², José Domingos Faraco Gallas³, Antônio Carlos Costa Vieira²

1.IAG/USP 2. IPT/SP 3.IG/USP 4.SABESP/SP, Brasil

Copyright 2003, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 14-18 September 2003.

Contents of this paper was reviewed by The Technical Committee of The 8th International Congress of The Brazilian Geophysical Society and does not necessarily represents 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

The objective of this study was to verify the capabilities of GPR survey in an urban site for detecting underground water pipes and the soil moisture variation around them in order to locate possible leaks.

It's based on the principle that the moisture content of the soils influences electromagnetic wave velocity, in the subsurface.

The tests were guided by earlier studies proposed in the technical literature.

They were performed in the city of São Paulo in areas where there was previous knowledge of leaking in the public water network.

They showed, although in a qualitative way, their feasibility.

Introdução

Os métodos e técnicas empregados na detecção de vazamentos de água fundamentam-se, principalmente, na auscultação dos sons oriundos da percolação da água.

Estes métodos costumam ser eficazes nas situações onde outros ruídos sonoros inexistem, ou são de baixa intensidade. Do contrário, o método perde sua eficácia ou mesmo deixa de ser aplicável. Além disso, alguns deles exigem o contato físico do sensor com a tubulação suspeita de vazamento.

A partir deste quadro surgiu a motivação para a realização de um estudo de avaliação do uso de técnicas geofísicas indiretas que se baseiam nos princípios físicos elétricos e eletromagnéticos como SP (potencial espontâneo) e GPR (radar de penetração no solo) na detecção de vazamentos da rede hidráulica pública subterrânea.

Particularmente em relação ao GPR (técnica tratada neste trabalho), o objetivo inicial foi identificar uma "assinatura" diferenciada do sinal de radar quando da existência de um vazamento.

Como a velocidade da onda eletromagnética é severamente afetada pela presença da água, mesmo quando presente nas formas pelicular e capilar, o reconhecimento dessas alterações nos radargramas podem dar indicações da presença de vazamentos.

Tratando-se de problema típico de áreas urbanas, a técnica GPR também enfrenta grandes restrições devido

à influência de outras fontes de energia eletromagnética (antenas retransmissoras, redes elétricas, etc.) e à presença de objetos e edificações que atuam como "fontes secundárias". Além disso, a presença comum de aterros ricos em argila é outro fator de dificuldade.

Nesta pesquisa foram executados testes e ensaios de campo ao longo de ruas e passeios públicos na cidade de São Paulo, sendo que em algumas delas havia o conhecimento prévio da existência de vazamentos.

Métodos

O princípio da técnica GPR é o mesmo da sísmica de reflexão, ou seja, gera-se um trem de ondas (neste caso, ondas de rádio), que se propaga na forma de um feixe aberto para o interior do terreno (preferencialmente) e para a superfície livre (caso das antenas não blindadas). As fases de ondas normalmente observadas nos radargramas, a partir da geração do pulso na superfície do terreno, são as apresentadas na Figura 1 e incluem ondas aéreas, ondas diretas no solo, refratadas na interface solo/ar e refletidas em subsuperfície.

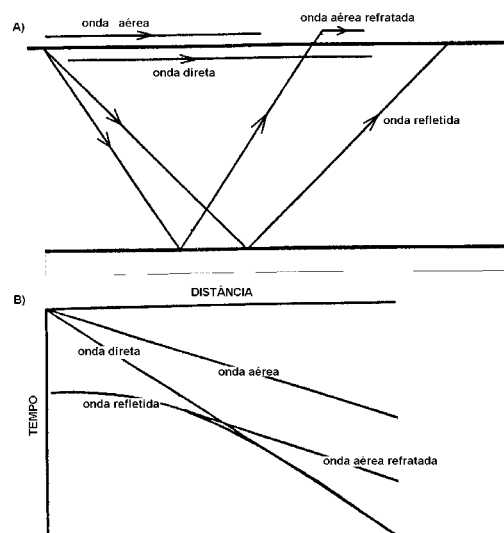


Figura 1 – Ilustração das diferentes fases de chegada da onda de rádio a partir de modelo geológico simplificado (A) e respectivo gráfico tempo-distância (B).

A aquisição, na superfície do terreno, pode ser feita através de três arranjos diferentes: CMP (*common mid point*), WARR (*wide angle reflection and refraction*) e CO (*common offset* ou *constant offset*).

Nos procedimentos CMP ou WARR, vai-se, gradativamente, aumentando as distâncias entre as antenas transmissora e receptora, sempre num intervalo fixo pré-determinado. A diferença entre um e outro

procedimento é que, no CMP ambas as antenas são movidas a cada passo, e no WARR, somente uma das antenas se move (Figura 2).

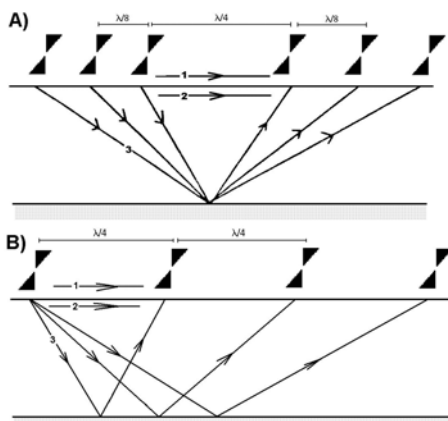


Figura 2 - Ilustração das aquisições CMP (A) e WARR (B).

O resultado final será a seção tempo-distância da Figura 3 onde, através da análise de velocidade das hipérbolas identificadas, pode-se estimar os valores de propagação das ondas eletromagnéticas nos diversos estratos presentes.

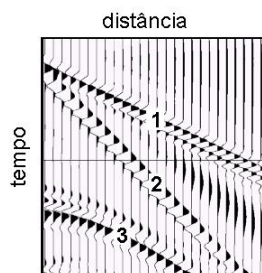


Figura 3 - Radargrama da aquisição CMP ou WARR (a numeração dos eventos refere-se aos da Figura 2).

No procedimento CO as antenas transmissora e receptora deslocam-se conjuntamente a uma distância fixa, pré-determinada, ao longo de todo o perfil de investigação, com apenas um ponto de amostragem em subsuperfície a cada passo (Figura 4).

Locais dos ensaios e parâmetros de aquisição

Foram realizadas visitas a diversas áreas sugeridas pela Sabesp – Companhia de Saneamento de São Paulo, para a definição dos locais de ensaios. Nesta escolha levou-se em consideração, sempre que possível, locais onde as interferências elétricas ou de estruturas de superfície fossem mínimas.

Assim, foram escolhidos cinco diferentes locais na área urbana da cidade de São Paulo. Em cada um deles foram executados diversos perfis, do tipo common offset (CO) e common mid point (CMP).

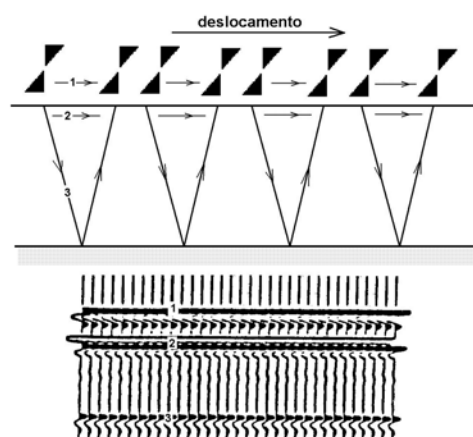


Figura 4 - Ilustração da aquisição *common-offset* (CO) e respectivo radargrama.

Nos diversos perfis realizados foram testados diferentes parâmetros de aquisição como, frequência das antenas, posicionamento paralelo (padrão) e perpendicular entre as antenas transmissora e receptora, variação do afastamento (*offset*) entre as antenas transmissora e receptora, número de empilhamento vertical e intervalo horizontal de aquisição.

Na aquisição utilizou-se o equipamento modelo Ramac, da Malâ GeoScience com antenas não blindadas de 100 e 200 MHz.

A Tabela 1 apresenta os parâmetros de campo utilizados nas diversas aquisições feitas nas áreas estudadas (aquisição CMP e CO). As alterações de parâmetros se devem, na maioria das vezes, às mudanças no arranjo e frequência da antena empregada.

Processamento dos dados

Os dados brutos foram gerados em formato RD3, utilizados pelos equipamentos da Malâ GeoScience e lidos diretamente através do aplicativo GRADIX, da Interpex Ltd..

O primeiro processamento feito foi o do ajuste de tempo, uma vez que, invariavelmente, observou-se atrasos ou adiantamentos no tempo zero de registro para as aquisições feitas com as antenas de 100 MHz, principalmente.

A seguir empregou-se o filtro *dewow* para a remoção da componente DC de baixa frequência.

Os espectros de amplitude dos radargramas brutos da aquisição CO apresentaram picos centrais médios em 70 e 120 MHz, respectivamente para os dados obtidos com as antenas de 100 e 200 MHz, indicando que, nas condições e materiais dos locais ensaiados, o meio se apresentou como um eficiente filtro corta-altas.

A partir dos resultados da análise espectral foram adotadas as janelas temporais do ganho AGC, sendo de 30 e 20 ns para os radargramas obtidos com antenas de 100 e 200 MHz, respectivamente.

Tabela 1 – Parâmetros de aquisição utilizados nos levantamentos GPR.

| Área | Nº de amostras | Frequência de amostragem (MHz) | Intervalo de aquisição (m) | Nº empilhamento | Janela temporal (ns) |
|-----------|----------------|--------------------------------|----------------------------|-----------------|----------------------|
| Lapa | 480 | 1212/2534 | 0,1 | 128 | 189/395 |
| Centro | 480 | 1212/2534 | 0,1 | 128 | 189/395 |
| Pinheiros | 480 | 1212/2534 | 0,1 | 128/256 | 189/395 |

O ganho AGC apresentou os melhores resultados quando comparados aos dos ganhos exponencial e de compensação ao espalhamento geométrico e atenuação. Baseando-se também nos resultados da análise espectral foram definidos os filtros passa-banda buscando-se uma faixa passante mais ampla possível e com baixa declividade para se evitar o efeito *ringing*.

De modo geral, adotou-se filtros tipo trapezoidal com quinas de frequências de 10-30-100-200 MHz para os sinais gerados/registrados com as antenas de 100 MHz e de 30-60-150-300 MHz para os de 200 MHz.

Os registros do arranjo CMP foram utilizados para a análise de velocidades.

Essas análises foram feitas através de painéis de velocidades, onde foram testados vários valores de velocidades NMO, escolhendo-se aquele que melhor horizontalizou a hipérbole de reflexão, ou através do espectro de velocidade, juntamente com a medida da coerência da amplitude do empilhamento através da relação *semblance*, ou seja, da normalização da energia de entrada (amplitudes originais) e saída (amplitude do empilhamento).

Nem todos os perfis CMP apresentaram hipérbolas de reflexão que permitiram uma análise de velocidades coerente. Nestes casos, devido à presença de figuras de interferências de subsuperfície nos perfis CO provocadas pela presença das tubulações enterradas, foi possível o ajuste dessas hipérbolas para determinação das velocidades.

Discussão dos resultados

Não há citações na bibliografia acerca de uma "assinatura" típica nos registros de radar que caracterizem vazamentos ou aumento no conteúdo de água no solo, apesar de saber-se que o grau de saturação de água no meio geológico afeta sensivelmente os mecanismos de condução elétrica e consequentemente as condições de propagação das ondas eletromagnéticas entregadas na técnica GPR.

Deve-se salientar, também, que nesta pesquisa trabalhou-se, em todos os levantamentos, com antenas não blindadas, e em locais com diferentes tipos de interferências de superfície, como edificações próximas às linhas de ensaios, postes, árvores, veículos, etc., que também acabam registrados nos radargramas.

Para o mapeamento das interferências rasas de subsuperfície, a técnica apresentou excelentes resultados, identificando as tubulações enterradas na grande maioria das áreas estudadas. Apresenta, portanto, grande potencial de emprego para atualização de cadastro das redes podendo, com o uso conjugado com o sistema GPS (global positioning system), gerar saídas que alimentem diretamente sistemas do tipo GIS.

No bairro de Pinheiros, o primeiro dos locais ensaiados, empregou-se a técnica proposta por Du & Rummel (1994) utilizando antenas com frequência central de 200 MHz, além de diversos perfis perpendiculares à rede de distribuição, estes últimos com antenas de 100 MHz e 200 MHz. Na técnica proposta por Du & Rummel (1994) são conjugados perfis do tipo WARR e CO numa mesma seção visando um reconhecimento qualitativo do conteúdo de umidade nos solos superficiais. Baseia-se no princípio de que com o aumento do conteúdo de umidade observa-se mudanças na velocidade de propagação das ondas diretas e assim, alterações no radargrama associadas a esses eventos.

A aquisição se inicia através da técnica WARR, até observar-se a nítida separação das fases associadas às ondas aérea e direta. A partir deste ponto, com afastamento entre antenas transmissora e receptora maior que o convencional do equipamento, inicia-se a aquisição CO. No final retorna-se à aquisição WARR para verificação de possíveis mudanças nos valores das velocidades ao longo do perfil.

Os vazamentos estavam situados na tubulação entre a rede principal e os cavaletes das residências.

A Figura 5 apresenta duas seções do tipo WARR+CO (Du & Rummel, 1994) executadas ao longo da casa de número 153; uma sobre o passeio (seção VILAL2) e a outra sobre a rua (VILAL1). Pode-se observar alterações no comportamento da onda direta na região situada próxima ao local do vazamento na seção feita sobre o passeio. Na seção obtida na rua, observa-se um padrão constante para a onda direta ao longo da casa 153.

O mesmo observa-se ao longo da casa 103 (Figura 6). Neste local o vazamento também se localizava próximo ao cavalete, no passeio. O radargrama VILAL4 foi obtido junto ao passeio, e o VILAL3 no calçamento da rua.

Nos bairros da Lapa e Centro além da técnica apresentada, experimentou-se também a aquisição de dados com as antenas transmissora e receptora, em posição perpendicular entre si, como sugerido por Guy et al. (1999) e Radzevicius et al. (2000a, 2000b). O objetivo deste arranjo é melhorar a relação sinal-ruído (S/R) em situações onde o espalhamento seja pronunciado (*scattering*) ou haja grande ocorrência de ecos espúrios (*clutters*), ou seja, retorno de sinais não desejados.

Obviamente, quando busca-se a investigação estratigráfica, este arranjo de antenas não será indicado, mas na busca de alvos específicos e levando-se em conta que os vazamentos, possam, eventualmente, intensificar o espalhamento do sinal, a análise comparativa entre os resultados obtidos com as antenas paralelas e perpendiculares, poderia dar indicações da ocorrência de vazamentos.

Os resultados, porém, não forneceram indicações dos vazamentos, ou seja, nenhuma feição típica foi observada nos radargramas.

Num dos locais ensaiados no bairro da Lapa, fez-se uma análise comparativa entre os espectros de amplitude dos

traços obtidos ao longo de um perfil de aquisição. Os valores das amplitudes foram plotados no plano número

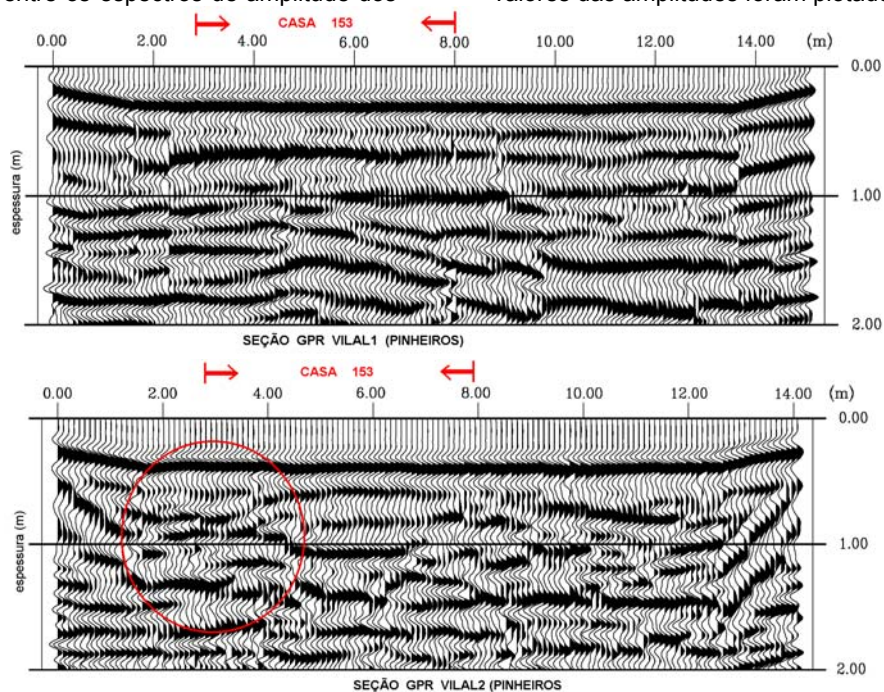


Figura 5 – Radargramas em local de vazamento no Bairro de Pinheiros. Rua Dr. Rodrigues Guião, 153.

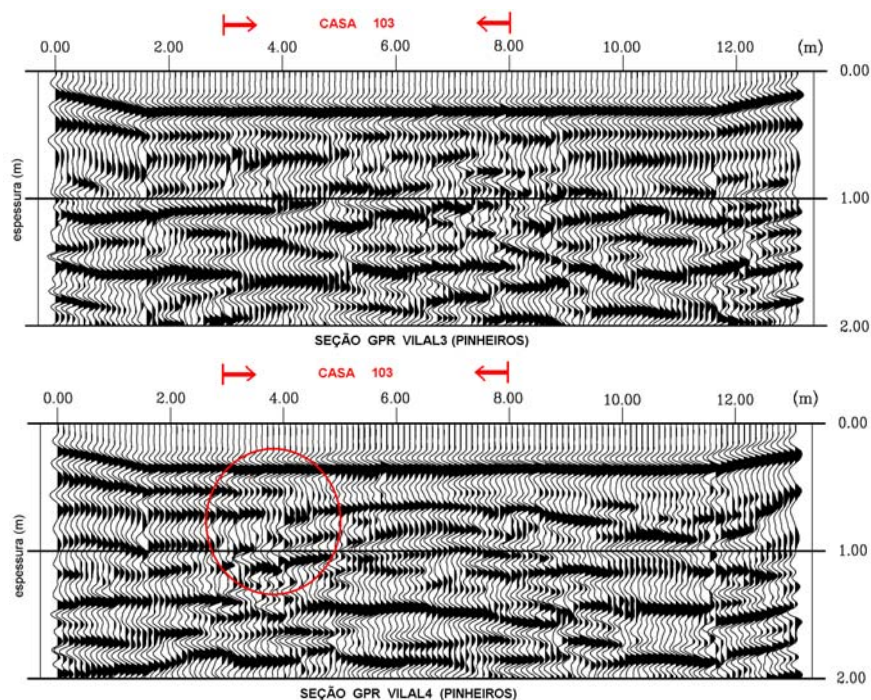


Figura 6 – Radargramas em local de vazamento no Bairro de Pinheiros. Rua Dr. Rodrigues Guião, 103.

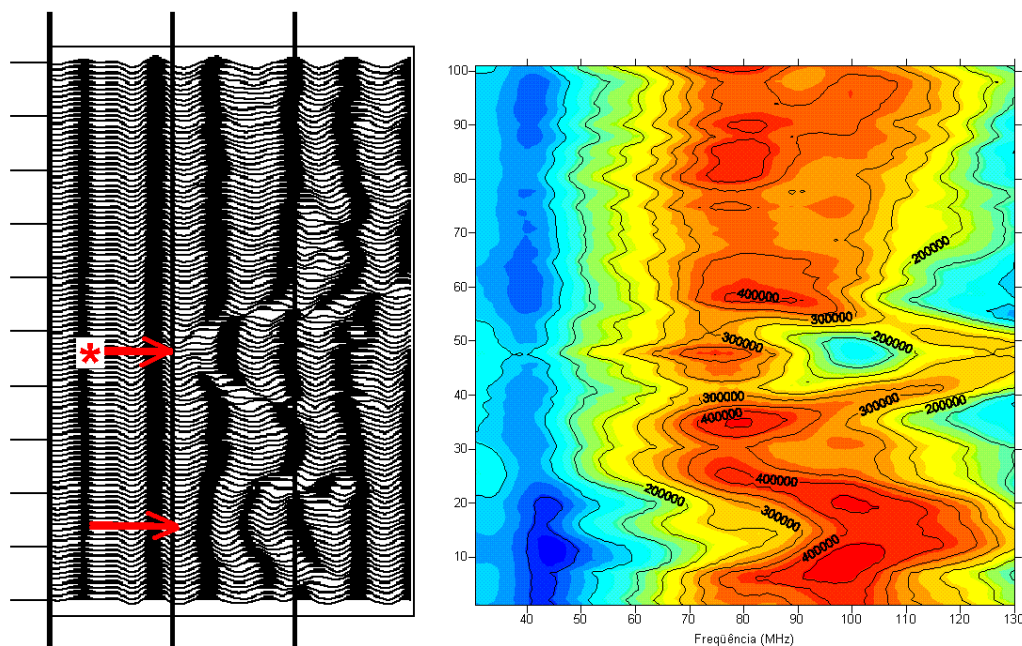


Figura 7 – Análise qualitativa dos espectros de amplitude para a antena de 100 MHz em local de vazamento no bairro da Lapa (Rua Augusto de Miranda, 1264).

do traço versus frequência e resultou no gráfico da Figura 7 (antenas de 100 MHz).

Nesta área ocorrem duas tubulações idênticas (mesmo diâmetro, material e profundidade), sendo que a representada pelo asterisco continha um vazamento. Analisando o espectro de amplitude pode-se observar que os picos de amplitude se situam próximo à frequência de 80 MHz (média obtida nos terrenos investigados com antenas de 100 MHz), sendo que junto à tubulação sem vazamento o pico fica mais próximo da frequência natural da antena (100 MHz). Na tubulação com vazamento, esse pico se situa em frequência ainda menor (75 MHz) com acentuada diminuição das amplitudes nas frequências superiores.

Essas observações ainda que pontuais e não totalmente conclusivas quanto à identificação dos vazamentos, merecem ser testadas mais detalhadamente.

Considerações finais

A técnica GPR apresentou alguma ambigüidade na interpretação das feições observadas nos radargramas no que diz respeito a possíveis vazamentos. Parte delas estão associadas às interferências de superfície, muito comuns quando da utilização de antenas não blindadas. As antenas blindadas apresentam a vantagem, especialmente em áreas urbanas, de evitar ou minimizar a ocorrência de figuras de difração originadas das reflexões em interferências de superfície. No entanto, podem apresentar, dependendo do equipamento, o inconveniente de ambas, antena transmissora e receptora, situarem no interior da caixa que serve de blindagem. Neste caso, fica impossibilitada a aquisição CMP ou WARR, fundamental para a análise de velocidades e identificação de eventos num levantamento GPR.

A técnica GPR apresentou, por outro lado, grande precisão na identificação e posicionamento das redes de subsuperfície.

O uso do GPR associado ao GPS (*global positioning system*) constitui excelente ferramenta para inventariar e/ou atualizar o banco de dados das redes de subsuperfície.

Para os objetivos propostos as frequências de 100 e 200 MHz parecem ser as mais indicadas e será sempre importante um empilhamento vertical igual ou superior a 128 traços.

Aterros muito argilosos podem atuar como uma “blindagem” para a onda eletromagnética e dificultar a investigação através do GPR. É necessário, portanto, uma prévia avaliação dos terrenos a serem investigados. Em continuidade ao estudo de vazamentos, além da análise comparativa dos espectros de amplitude dos traços, pretende-se realizar levantamentos CMP sucessivos e a pequenas distâncias para compor seções 2D do modelo de velocidade e analisar as relações das variações de velocidade e teor de umidade (obtidos a partir da relação empírica de Topp et al., 1980) com os pontos de vazamentos.

Referências

DU, S., RUMMEL, P. Reconnaissance studies of moisture in the subsurface with GPR. In: 5th International Conference on Ground Penetrating Radar. 1994, Ontario, Canada. *Proceedings...* Ontario: 1994, p.1241-1248.

GUY, E., DANIELS, J., RADZEVICIUS, S. Demonstration of using crossed dipole GPR antennae for site characterization. *Geophysical Research Letters*, v.26, n.22, p.3421-3424, 1999.

RADZEVICIUS, S.J., GUY, E., DANIELS, J. Pitfalls in GPR data interpretation: differentiating stratigraphy and buried objects from periodic antenna and target effects. *Geophysical Research Letters*, v.27, n. 20, p.3393-3396, 2000

RADZEVICIUS, S.J., DANIELS, J., GUY, E., VENDL, M.A. Significance of crossed-dipole antennas for high noise environments. In: *Symposium on the Application of Geophysics to Environmental and Engineering Problems*. 2000. *Proceedings...EEGS*, 2000, p.407-413.

TOPP, G.C.; DAVIS, J.L.; ANNAN, A.P., 1980. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines: *Water Resources Research*, vol.16, n.3, p.574-582.