

## Investigação rasa por GPR com aplicações à geofísica forense: estudo em sítio controlado na PUCRS.

Caroline Madrid Lima, Alice Marques Pereira Lau, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul PUCRS.  
Wilmer Emilio García Moreno, ENCOPE Engenharia.  
Rafael Canata, Universidade de Brasília – UnB e Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia Forense PUCRS.

Copyright 2022, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no IX Simpósio Brasileiro de Geofísica, Curitiba, 04 a 06 de outubro de 2022. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do IX 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

A investigação por meio do *Ground Penetrating Radar* – GPR é um método geofísico não destrutivo, usado em grande escala para localizar possíveis alvos de diferentes tipos de materiais e de forma em ambientes terrestre e aquático. Este estudo apresenta uma investigação de situações do ramo da geofísica forense, analisando as respostas para oito materiais distintos, enterrados em subsuperfície, em um sítio de estudos na Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul – PUCRS, com uma área de  $6\text{ m} \times 6\text{ m}$  e um solo tipicamente argiloso. Foram realizadas 52 linhas de aquisição de dados, sendo 26 antes de enterrar os objetos (Background) e o restante, após a implantação dos alvos. Os resultados obtidos durante o experimento possibilitaram respostas 2D e 3D dos objetos forenses, a respectiva profundidade e a geometria dos mesmos, assim como a velocidade da onda eletromagnética no meio de  $0,15\text{ m/ns}$ . Foi evidenciada a capacidade de localização dos objetos forenses em um solo tipicamente argiloso.

### Introdução

O *Ground Penetrating Radar* (GPR) tem sido um grande aliado em investigações criminais por ser um método de rápida aquisição, não destrutivo e por fornecer imagens rasas de alta resolução bidimensional e/ou tridimensional. A distinção dos objetos localizados em subsuperfície torna-se um grande entrave, pois as respostas obtidas quase sempre são hipérbolares.

O desenvolvimento de áreas controladas para testes geofísicos é de suma importância para amenizar as ambiguidades na interpretação dos dados, pois tem-se um conhecimento prévio da área, dos materiais de estudo e da profundidade de escavação. Tais estudos auxiliam na compreensão de casos reais no âmbito forense. Trabalhos como os de Pringle et al., (2012), Blum (2013), Molina et al., (2015), Almeida (2016), Cavalcanti (2017), Canata (2021), apresentam diferentes casos da aplicação da geofísica e, em especial o GPR, em contexto forense. Deste modo, foi implantado um Sítio Controlado de Geofísica Rasa (SCGR) na Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul – PUCRS correspondente

a uma área de  $6\text{ m} \times 6\text{ m}$  ( $36\text{ m}^2$ ) (Fig. 1). O contexto geológico predominante é de um solo típico argiloso relacionado a unidades geotécnicas de hidrossolo, tendo como caracterização solos hidromórficos com substratos e sedimentos do Quaternário (Bastos & Dias, 1995).

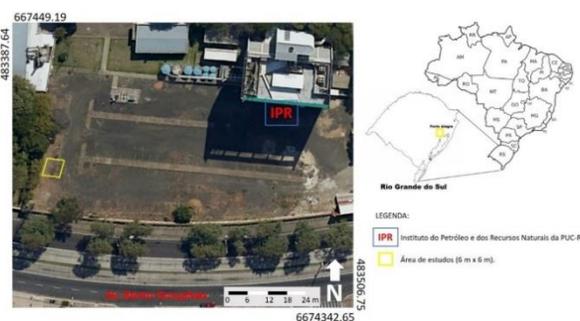


Figura 1 – Localização de estudo da área (Adaptado de Google Earth, 2021).

A fim de avaliar a resposta do método empregado sob os alvos forense foram enterrados 9 alvos e 8 objetos distintos (aparelhos celulares, peças de vestuário, metais simulando armas de fogo, armas brancas, caixote para simulação de um caixão fúnebre, ossos de fêmur bovino, frascos com líquido para representar entorpecentes e uma chapa de material compensado com um espaço vazio entre sua base e o interior da cava), sendo os repetidos em diferentes profundidades (Fig. 2).

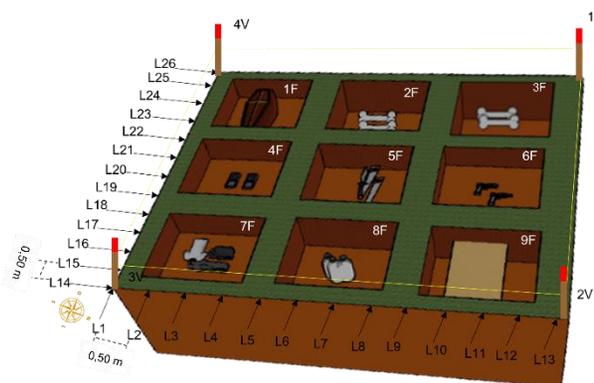


Figura 2 - Ordem dos alvos enterrados no SCGR (1F a 9F); representação das 13 linhas S-N e 13 L-O, realizadas com leituras a cada 0,50 m e sinalização dos vértices da área (1V a 4V); (sem escala).

A pesquisa visou determinar as respostas 2D e 3D dos objetos forenses implantados em um meio argiloso por meio da aplicação do GPR com antenas blindadas de 400 MHz.

### Metodologia/ Problema Investigado

O GPR utilizado é o modelo SIR 4000 *UtilityScan Pro*, com antena de 400 MHz e o registro dos dados no modo *common offset*, com perfis espaçados de 0,50 m para elaboração de imagens 3D, totalizando 52 perfis (foto 1A). Os parâmetros utilizados para a aquisição dos dados correspondem a: 512 amostras por traço, janela temporal de 55 ns, Janela temporal de 0,10 ns entre os traços, intervalo de amostragem entre os traços de 0,15 ns e constante dielétrica de 4,5. Foi empregado conjuntamente com o GPR, o *Real Time Kinematic* (RTK), para coleta de coordenadas precisas de onde os materiais foram enterrados, na área do SCGR modelo South s86t (foto 1B). Após a aquisição dos dados iniciou-se o processamento das seções 2D e 3D seguindo as seguintes etapas: o tempo zero (primeiro registro do sinal no solo) o qual consiste na correção da posição inicial da chegada da onda, Background Remove, capaz de remover ruídos horizontais e sinais de baixa frequência, filtros temporais *Finite Impulse Response* (FIR) responsável por eliminar frequências extremas (altas ou baixas) que não correspondem a faixa do GPR de 400 MHz, removendo ruídos indesejados e por fim se faz o uso do filtro de ganhos que possibilita a aplicação de ganhos nos dados, para uma melhor visualização de refletores fracos (Almeida, 2016).

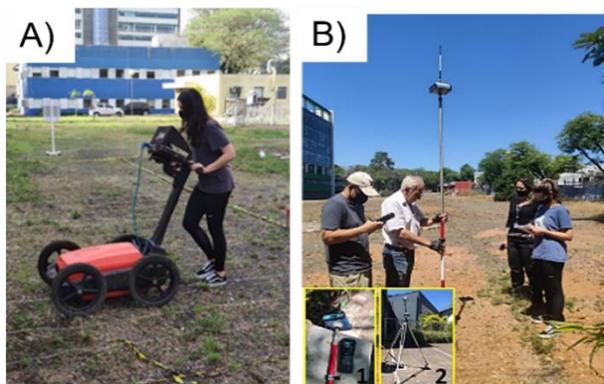


Foto 1 - (A) Equipamento GPR *UtilityScan Pro Sir 4000* na aquisição do background. (B) Equipamento RTK na coleta de coordenadas com precisão submétrica: 1. Antena e receptor itinerantes; 2. Estação base de captação de sinal dos satélites.

### Resultados

Após o processamento dos dados e obtenção das imagens (radargramas) ocorreu a análise das sessões do *background* e a identificação dos alvos nas sessões após o enterro dos objetos, associados aos picos dos refletores de formato hiperbólico. Foram obtidas profundidades entre 0,21 m a 0,51 m, com delimitação das cavas em decorrência da descontinuidade em relação aos refletores,

e a estimativa da velocidade da onda eletromagnética foi obtida através do método hiperbólico e obtida em 0,14 m/ns.

A Fig. 3 apresenta os radargramas 2D que obtiveram melhor resposta em relação aos objetos, que foram realizadas em sentido L-O. A Fig. 3 (A) representa a linha 3 (L3) que passou, segundo o sentido da linha sobre as cavas dos objetos F7, F4 e F1, marcados pelas três hipérbolas circundadas na figura. O mesmo ocorre para a linha 7 (L7) que detectou os objetos F8, F5 e F2 (Fig. 3B) e para linha 10 (L10): alvos F9, F6 e F3 (Fig. 3C). Os alvos foram analisados individualmente, levando em consideração o ápice das hipérbolas de difração, as quais correspondem a profundidade entre o topo do objeto em relação a superfície da cava.

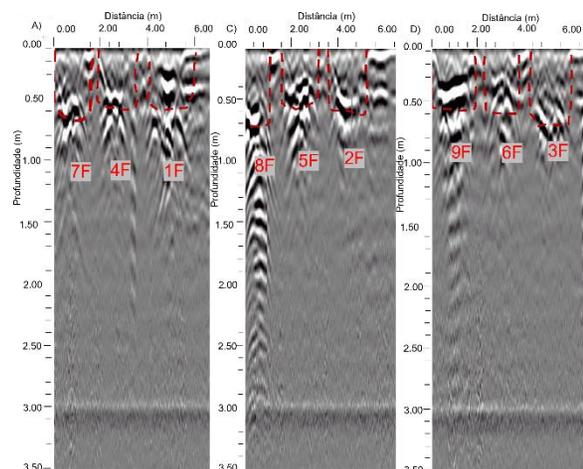


Figura 3 - Seções de GPR (radargramas): A) L3; B) L7; C) L10, com a identificação dos alvos em sentido L-O.

Na Fig. 4 estão representados os radargramas oriundos das linhas que em superfície transpassaram no centro dos alvos enterrados e que foram realizadas em sentido S-N

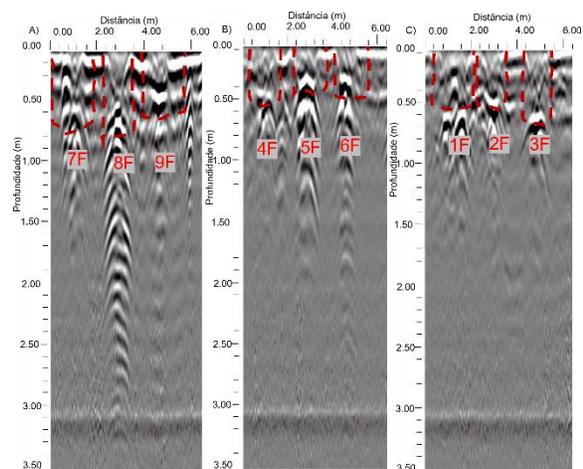


Figura 4 - Seções de GPR (radargramas): A) L15; B) L19; C) L23, com a identificação dos alvos em sentido S-N.

A Fig. 4 (A) apresenta o resultado para a linha 15 (L15), que detectou os objetos 7F, 8F e 9F. A Fig. 4 (B) associada a L19 acusou as hipérbolas para os objetos F4, F5 e F6. A Fig. 4 (C): L23 com identificação dos alvos 1F, 2F e 3F. Assim, é possível cruzarmos os dados e analisarmos com mais detalhe cada hipérbole correspondente ao seu objeto, resultando em um imageamento 3D. Devido ao espaçamento de 0,50 m utilizado, não foi possível ter uma boa resolução no bloco 3D, dificultando a visualização detalhada dos objetos enterrados (Fig. 5).

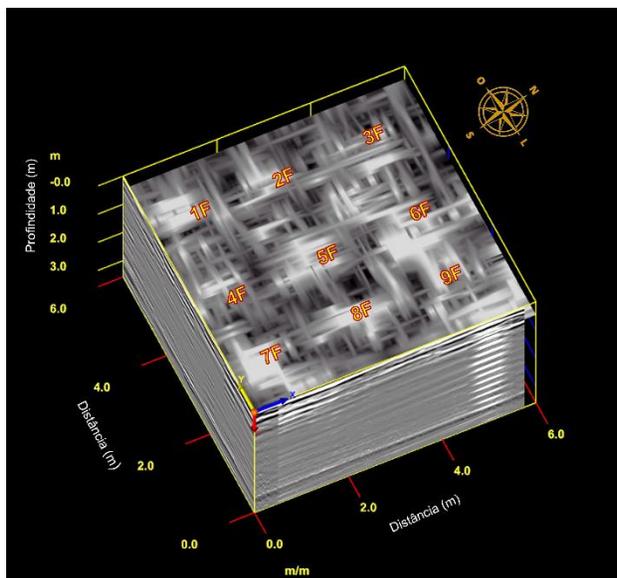


Figura 5 - Bloco 3D das seções de GPR, com perfis de espaçamento 0,50 m: as áreas em tons pastéis, mais claras, representam os alvos (1F a 9F) detectados no SCGR-PUCRS.

Avaliando as Figs. 3 e 4 os materiais obtiveram respostas com altas, médias e baixas amplitudes, sendo possível ter uma boa identificação de cada alvo enterrado e suas respectivas profundidades, relacionadas ao topo e base dos objetos. Observou-se diversas reflexões heterogêneas acima dos alvos, correspondendo ao solo remexido devido o acréscimo de solo realizado pela terraplanagem. Ocorreu também reverberações em alguns alvos, causadas pelo aprisionamento da onda eletromagnética no interior do alvo (Annan, 2003); possibilitando uma maior detecção destes objetos.

Considerando os objetos identificados e descritos para as Figuras 3, 4 e 5: o cenário 7F (roupas e calçados) em relação a superfície, o alvo foi encontrado a uma profundidade de 0,40 m, sendo identificável sua base e condizendo com sua profundidade real. O mesmo, apresentou um refletor inteiro de amplitude média no primeiro caso na linha L3. No caso da L15, para a mesma cava e objetos (Fig. 4A).

No alvo 4F (aparelhos celulares) detectados nas linhas L3 e L23 (Figs. 3A e 4B), observa-se reflexões de alta amplitude devido ao material que os compõem, apresentando um alto contraste em relação as

propriedades elétricas do solo. Foram encontrados a uma profundidade de 0,44 m.

As hipérbolas do cenário 1F apresentaram reverberações devido ao espaço vazio entre as paredes do caixote, tanto para a L3, como para L23 que permitiram detectar o objeto. Nota-se nas duas seções que a base do objeto está inclinada devido ao fundo da cava não estar nivelado. Nos dois casos o GPR detecta as extremidades do alvo, representados por dois refletores de alta amplitude. O alvo foi encontrado a uma profundidade aproximada de 0,23 m.

Nas Figs. 3B e 4B, é observado o radargrama correspondente as linhas L7 e L19, respectivamente. Estas linhas captaram o sinal dos objetos 5F (armas brancas), nota-se reflexões de altas amplitudes e contrastes em virtude dos metais que os compõem e a diferença em relação as propriedades elétricas do solo. Sua profundidade de aproximadamente 0,24 m.

As reflexões para o 2F (ossos bovinos) permitiram identificar o topo e a base dos ossos, com menor clareza, podendo estar relacionado a espessura deste ou também a condutividade ser próxima da do solo. São caracterizados por reflexões de média amplitude, com profundidade em relação ao topo do objeto e topo da superfície da ordem de aproximadamente 0,38 m (Figs. 3B e 4C).

Nas seções para as linhas L10, L15, L19 e L23, foram percebidos os alvos 9F, 6F e 3F. Nas seções correspondentes ao alvo 9F (chapa de compensado), é possível observar a base da chapa e a parte correspondente ao espaço vazio, em virtude de a condutividade elétrica do ar ser baixa, com profundidade correspondendo até o fundo da cava (0,50 m). As reverberações observadas para as seções, ocorrem devido ao espaço vazio entre a base do material e a base da cava, facilitando a identificação. No caso do 6F (simuladores de armas de fogo), presentes nos radargramas das figuras 3C e 4B. Neste caso, também ocorre a reverberação do sinal devido os metais. Sua profundidade é cerca de 0,27 m.

Por fim, no caso 3F (ossos bovinos com profundidade maior), semelhante ao caso 2F, possui uma média amplitude de uma constatação mais complexa. Nota-se com mais precisão a base da cava, nos dois sentidos das linhas e marcadas nas seções. Suas profundidades correspondem a 0,51 m.

## Discussão e Conclusões

Os resultados obtidos foram satisfatórios, pois permitiram a identificação dos alvos e padrões de respostas por meio método geofísico do Georadar (GPR), com uma antena de 400 MHz, num solo predominantemente argiloso. Assim, enaltecendo sua eficácia no âmbito de investigações forenses de subsuperfície.

Os diferentes cenários de ocultações de provas, que o SCGR-PUCRS, e os resultado geofísicos advindos deste, possibilitaram enfatizar que os refletores de altas a baixas amplitudes estão, naturalmente, relacionados ao material

que os compõem e suas dimensões. As reverberações ocorreram por conta do aprisionamento da onda eletromagnética. Em alguns casos, a identificação dos alvos foi de difícil identificação, exigindo uma maior atenção por parte do intérprete.

A realização do sítio controlado foi um instrumento que se mostrou eficaz e útil para estudos em contextos geofísicos, pois se teve controle sobre as variáveis dos alvos, dimensões dos objetos e cavas, capazes de influenciar em suas identificações, possibilitando um estudo capaz de evitar equívocos de interpretação por meio de um método indireto, deste modo, contribuindo para estudos e investigações em contextos semelhantes.

A análise 3D dos alvos permitiu a diferenciação das anomalias (objetos implantados) em subsuperfície. Deste modo, promovendo a concepção de delimitação da distância em que ocorre o primeiro sinal captado pelo GPR e o último sinal.

### Agradecimentos

Os autores agradecem a PUCRS por toda a infraestrutura e apoio.

### Referências

ALMEIDA, E. R., 2016. Análise da tomografia de micro-ondas em dados GPR sob condições controladas: Aplicações em arqueologia e estudos forenses. 189 f. Tese de Doutorado. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG/USP). São Paulo.

ANNAN, A. P. GPR Principles, Procedures & Applications. Sensors & Software, Inc., 286p, 2003.

BASTOS, Cezar; DIAS, Regina. Unidades geotécnicas de solos de Porto Alegre. Rev. IG, São Paulo [S. l.], p. 85-89. 1995

CANATA, R.E, 2020., Diagnóstico de parâmetros geofísicos usados em geociências forenses. Orientador: Prof. Dr. Francisco José Fonseca Ferreira. 2020. Tese (Doutorado em Geologia) - Universidade Federal do Paraná, [S. l.].

CAVALCANTI, M.M., 2017 Estudo da Resposta Geofísica em Diferentes Cenários de Sepultamento Clandestino. 197p. Tese (doutorado) – Instituto de Geociências Aplicadas, Universidade de Brasília – UnB. Brasília.

DAVIS, J.L. & ANNAN, A.P. 1989. Ground penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy. Geophysical Prospecting, 37, 531–551.

JOL, M.H. (ed.). 2009. Ground Penetrating Radar: Theory and Applications. Elsevier, Oxford.

KEAREY P., BROOKS M., HILL I. Geofísica de Exploração. Editora Oficina de Textos. São Paulo, Brasil. 2009.

OLINA CM, PRINGLE JK, SAUMENTT M. & HERNÁNDEZ O. 2015. Preliminary results of sequential monitoring of simulated clandestine graves in Colombia, South America, using ground penetrating radar and botany. Forensic Science International, 248: 61-70.

PRINGLE JK, JERVIS JR, HANSEN JD, JONES GM, CASSIDY NJ & CASSELLA J.P. 2012. Geophysical monitoring of simulated clandestine graves using electrical and ground penetrating radar methods: 0-3 years after burial. Journal of Forensic Science, 57: 1467-1486.