



**Estimativa de Características Geométricas de Solos e Rochas com Radar de Penetração no Solo, na Área de Disposição de Resíduos Sólidos Urbanos de Pirenópolis, Goiás, Brasil**  
Estimation of Geometric Features Soil and Rock With Ground Penetrating Radar in the Urban Solid Waste Disposal Area of Pirenópolis, Goiás, Brazil

Kamylla de Lima Alves & Welitom Rodrigues Borges

*Universidade de Brasília, Campus Darcy Ribeiro, Instituto de Geociências,  
Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica, 70910-900 Brasília, Distrito Federal, Brasil*

*E-mails: limaalves.k@gmail.com; welitom@unb.br*

Recebido em: 16/05/2019    Aprovado em: 12/07/2019

DOI: [http://dx.doi.org/10.11137/2019\\_3\\_281\\_288](http://dx.doi.org/10.11137/2019_3_281_288)

### Resumo

A determinação de áreas para a disposição de resíduos sólidos urbanos prevê a existência de um subsolo com baixa permeabilidade hidráulica para a contenção de fluídos provenientes do lixo, principalmente o chorume. Os ensaios diretos para a determinação da condutividade hidráulica do solo amostram pontualmente e podem não representar efetivamente o comportamento do meio. O uso de métodos geofísicos na determinação de características físicas do meio auxilia na elaboração de melhores modelos espaciais das camadas do subsolo. Este trabalho descreve os procedimentos de campo e apresenta os resultados de radar de penetração no solo (ground penetrating radar – GPR) realizados na área de descarte de resíduos sólidos do município de Pirenópolis, Goiás. As investigações geofísicas objetivam a determinação de áreas impróprias para a disposição de resíduos sólidos, estimativa da espessura e composição do solo, localização de áreas com possível percolação de chorume, e determinação da profundidade do topo rochoso. O registro dos dados de GPR ocorreu com o sistema SIR3000, acoplado a uma antena blindada de 200 MHz, no interior e nos arredores do lixão. Com as seções de GPR identificaram-se padrões de reflexão típicos de solos, rochas, resíduos sólidos urbanos e materiais percolados por chorume. As investigações com o GPR mostram solos arenosos na região com espessuras entre 0,2 a 9 metros, o topo das rochas, foliações, e estruturas deformacionais (dobras e falhas). Os resultados confirmam que, apesar do local ser impróprio para a disposição de resíduos, o chorume não ultrapassa os limites do Lixão de Pirenópolis dentro da profundidade de investigação do GPR.

**Palavras-chave:** GPR; Lixão de Pirenópolis

### Abstract

The selection of areas for the disposal of solid urban waste suggests the existence of subsoil with low hydraulic permeability for the containment of fluids from waste, mainly leachate. The direct tests to calculate soil hydraulic conductivity show punctual information that may not represent the exact behavior of the medium. The use of geophysical methods to obtain soil physical characteristics of the medium can assist in achieving better spatial models for the subsurface. This study describes the field work and results of ground penetrating radar (GPR) acquisition, carried out in the solid waste disposal site of the city of Pirenópolis, Goiás. Geophysical investigations help to find areas that are not suitable for solid waste disposal, as well as estimation of the thickness and composition of the soil, location of areas with possible leachate percolation, and the depth of the bedrock. The GPR data was acquired with the SIR3000 system, coupled to a 200 MHz shielded antenna. The GPR sections identified patterns of reflection typical of soils, rocks, solid urban waste and leachate percolated materials. The investigations with the GPR show sandy soils in the region with thicknesses between 0.2 and 9 meters, the top of the rocks, foliations, and deformation structures (folds and faults). The results confirm that, although the site is not suitable for waste disposal, the leachate does not exceed the limits of the Pirenópolis waste area within the research depth of the GPR.

**Keywords:** GPR; Pirenópolis Landfill

## 1 Introdução

A seleção de uma área designada ao aterro sanitário para disposição final de resíduos sólidos domiciliares deve atender, no mínimo, aos critérios técnicos impostos pelas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e pelas legislações federal, estadual e municipal, quando houver.

A NBR-13.896 ABNT (1997) aponta parâmetros técnicos adequados para a implantação de aterros. Na norma recomenda-se a instalação de áreas de disposição de resíduos urbanos em locais com declividade superior a 1 % e inferior a 30 %; locais com uma distância mínima de 200 m de corpos d'água, tais como rios, lagos e lagoas. Além disso, é desejável que o solo do terreno selecionado tenha uma certa impermeabilidade natural, a fim de reduzir as possibilidades de contaminação de aquíferos. As áreas selecionadas devem ter uma zona não saturada com espessura superior a 3 metros e características argilosas, com o coeficiente de permeabilidade (k) inferior a  $10^{-6}$  cm/s.

A determinação do coeficiente de permeabilidade (k) ocorre através de ensaios de laboratório (amostras indeformadas) e de ensaios “in situ”. Os solos arenosos possuem coeficiente de permeabilidade acima de  $10^{-5}$  cm/s, já os solos argilosos mostram valores inferiores (Tabela 1).

Permeabilidade		Tipo de Solo	Coefficiente de Permeabilidade (cm/s)
Solos permeáveis	Alta	Pedregulhos	$> 10^{-3}$
	Alta	Areias	$10^{-3}$ a $10^{-5}$
	Baixa	Siltos e Argilas	$10^{-6}$ a $10^{-7}$
Solos impermeáveis	Muito Baixa	Argila	$10^{-7}$ a $10^{-9}$
	Baixíssima	Argila	$< 10^{-9}$

Tabela 1 Valores típicos de coeficiente de permeabilidade para solos - NBR 16416; ABNT (2015)

A utilização de metodologias não invasivas para a estimativa de parâmetros físicos e hidráulicos do subsolo possibilitam a investigação de amplas áreas em menor tempo, o que favorece a elaboração de modelos detalhados do meio. O radar de penetração no solo (Ground Penetrating Radar – GPR) é um

método geofísico que possui um elevado potencial para determinar as características geométricas e físicas de solos Charlton & White (2006), Huisman *et al.* (2002), Wijewardana & Galagedara (2010).

O método GPR utiliza a propagação e o registro de ondas eletromagnéticas de alta frequência (10 a 3000 MHz) para identificar mudanças de propriedades elétricas no meio Annan (1996). A sua enorme versatilidade operacional possibilita a aquisição de grande quantidade de dados em pequeno intervalo de tempo, o que viabiliza uma amostragem espacial detalhada e de alta resolução.

No GPR, tanto a condutividade elétrica, quanto a permissividade dielétrica são fatores relevantes, porque afetam diretamente a atenuação e a propagação das ondas de radar. A condição mais favorável do funcionamento do método GPR ocorre em locais com materiais geológicos de baixa perda (*lossy dielectric medium*) - regiões de baixa atenuação do sinal eletromagnético Annan (1996), Beres & Haeni (1991), Davis & Annan (1988), Borges & Porsani (2003), Dourado *et al.* (2003), Busby *et al.* (2004). Os inúmeros trabalhos de GPR realizados em locais de ocorrência de solos e rochas arenosas mostram excelentes resultados, principalmente em função da baixa atenuação sofrida pelo sinal eletromagnético nestes meios Kruse *et al.* (2000), Dourado *et al.* (2001), Ortega (2006), Laureano & Shiraiwa (2008).

A profundidade de penetração em solos e rochas sem água é da ordem de algumas dezenas de metros, e ela é consideravelmente menor quando o meio estiver úmido ou com presença de argila, uma vez que tanto a água quanto o conteúdo de argila aumentam a condutividade elétrica do meio, e consequentemente atenuam o sinal do GPR Wensink (1993). A atenuação do sinal do GPR é perceptível no espectro de amplitude, uma vez que o pico máximo da frequência fica bem abaixo da frequência central da antena; e na amplitude instantânea (Transformada de Hilbert) os valores de envoltória que tendem a zero representam as áreas de maior perda de sinal Charlton & White (2006). Os maiores conteúdos de água e argila no meio provocam um aumento na constante dielétrica e consequentemente menores velocidades de propagação da onda eletromagnética. Nas seções de GPR esta redução de velocidade é claramente observada nas menores aberturas das hipérbolos de difração presentes na parte superficial

das seções de afastamento constante, que são relacionadas a presença de raízes, buracos e fragmentos de rochas dentro dos sedimentos.

Os trabalhos de GPR para a determinação de conteúdos de argila e de água no subsolo sempre estabelecem calibrações com métodos convencionais de amostragem (reflectometria no domínio do tempo – TDR, umidade volumétrica e sonda de nêutrons). A aplicação de GPR em áreas de disposição de resíduos sólidos urbanos para a localização de plumas de contaminação confirmam uma elevada atenuação do sinal eletromagnético nas áreas de percolação de chorume e pouca atenuação de sinal sobre os resíduos sem chorume Cavalcanti *et al.* (2014), Laureano & Shiraiwa (2008).

No contexto de determinar a espessura do solo, a topografia do topo rochoso, estimar a permeabilidade natural e textura do subsolo, localizar eventuais locais de percolação de chorume no subsolo e caracterizar estruturas geológicas, mostram-se neste trabalho os resultados obtidos com o uso do método geofísico Radar de Penetração no Solo (*Ground Penetrating Radar* – GPR) na área do Lixão Municipal de Pirenópolis, estado de Goiás.

A área do Lixão Municipal de Pirenópolis localiza-se a 6 km a sudoeste da área urbana de Pirenópolis, no lado direito da rodovia GO-431, sentido Pirenópolis a Interlândia (Figura 1) e encontra-se sobre a Unidade B do Grupo Araxá. O Grupo Araxá, representado na área por sua Unidade B, é composto principalmente de quartzitos e granada-muscovita-biotita xistos MCT (2006), MME/CPRM (2006) e Moreira *et al.* (2008). A área de estudo possui Latossolo Vermelho de textura média a arenosa. O alto teor de areia e/ou estrutura granular e grumosa contribui para uma maior porosidade efetiva e consequente maior condutividade hidráulica Almeida *et al.* (2006).

## 2 Metodologia

As aquisições de dados eletromagnéticos com o GPR aconteceram no interior e nas vizinhanças do Lixão de Pirenópolis (Figura 1) e ocorreram no modo *common offset*, com os seguintes parâmetros: espaçamento entre os traços de 0,05 m, frequência de amostragem de 2300MHz com janela temporal de 220ns e 1024 amostras por traço, correspondendo a um intervalo de amostragem temporal de 0,21 ns. O

equipamento utilizado foi SIR3000, fabricado pela empresa GSSI, com antenas blindadas com frequências centrais de 200 MHz.

Para obter a velocidade da onda eletromagnética do GPR na área optou-se pelo método de análise de velocidade de difrações hiperbólicas. Após a aplicação de filtros e ganhos, realizaram-se as buscas por hipérboles ao longo dos radargramas (Figura 2). O ajuste de velocidades nas hipérboles possibilitou a identificação de uma velocidade para a onda eletromagnética de  $0,087 \pm 0,0015$  m/ns. Com a velocidade do meio realizaram-se a migração dos pontos de difração, a conversão das seções de tempo para profundidade e o ajuste topográfico. Para comparação de amplitude das seções de GPR, a mesma rotina de processamento foi aplicada ao conjunto de dados.

## 3 Resultados

A seções de GPR realizadas no interior e nos arredores do Lixão de Pirenópolis/GO identificaram 2 padrões distintos de reflexão (PRS e PRR; Figura 3).

O padrão de reflexão PRS caracteriza-se pela presença de refletores descontínuos e caóticos com média amplitude. Neste padrão ocorrem, distribuídas de maneira aleatória, algumas hipérboles de difração de alta amplitude, que após a aplicação da etapa de migração, colapsam para refletores pontuais. O PRS relaciona-se com os solos existentes na área (latossolos vermelho arenosos e argilosos), e as hipérboles de difração representam pequenos fragmentos de rochas, vazios no solo (buracos de tatus) e eventualmente raízes de árvores.

O PRR mostra refletores de alta a média amplitude, contínuos e lineares. Este padrão ocorre sempre abaixo de PRS, em profundidades de 0,1 a 5 metros. O contato de PRS com PRR ocorre como um refletor de alta amplitude e com a morfologia discordante com os refletores de PRR. Deste modo, o PRR relaciona-se ao padrão de reflexão das rochas presentes na região (quartzitos ou granada muscovita-biotita xistos), uma vez que alguns refletores mostram estruturas correlacionáveis à dobras (Figura 4).

Além dos padrões PRS e PRR notam-se na seção de GPR L5, realizada dentro da área do Lixão de Pirenópolis, dois padrões de reflexão característicos

Estimativa de Características Geométricas de Solos e Rochas com Radar de Penetração no Solo, na Área de Disposição de Resíduos Sólidos Urbanos de Pirenópolis, Goiás, Brasil  
 Kamylla de Lima Alves & Weliton Rodrigues Borges

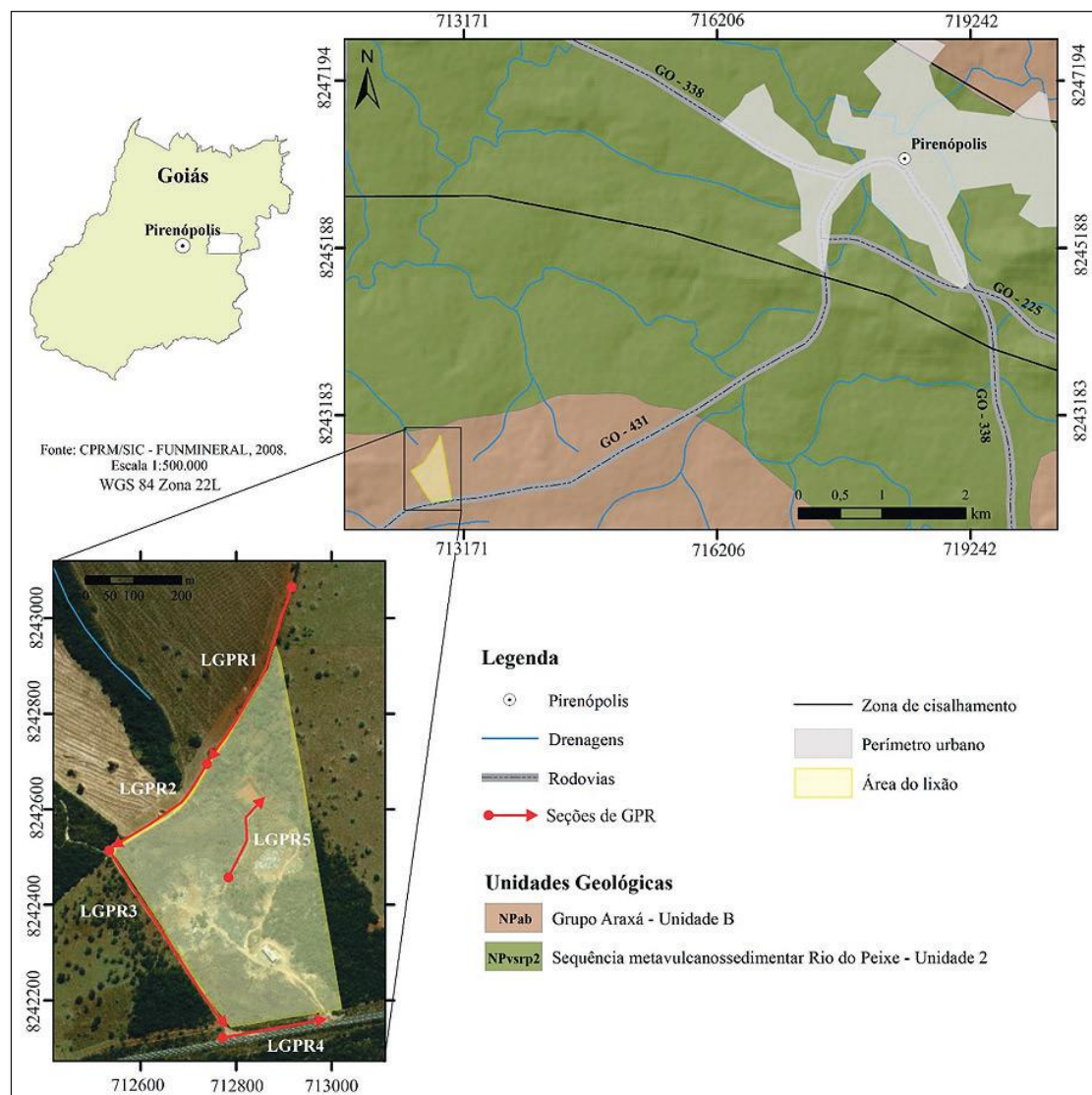


Figura 1 Mapa geológico da área com a localização das seções de GPR no Lixão Municipal de Pirenópolis-GO

de áreas de disposição de resíduos sólidos urbanos, o PRL e o PRC. O PRL ocorre em uma área restrita, entre as profundidades de 0,2 a 2,3 metros, caracterizando-se por refletores caóticos de alta amplitude (Figura 5). O PRC acontece abaixo de PRL, diferenciando-se dos demais pela ausência de refletores. Deste modo relaciona-se PRL aos resíduos sólidos urbanos secos, e o PRC ao material proveniente da decomposição de parte dos resíduos orgânicos presentes no lixo urbano (material condutivo proveniente da percolação de chorume). A presença do PRL em parte da seção LGPR5 limita a propagação da onda eletromagnética para maiores profundidades, o que impossibilita a identificação do topo rochoso.

Nas seções registram-se refletores até a profundidade máxima investigada de 9 metros, o que possibilitou a identificação de limites entre os solos e o topo rochoso.

Na seção LGPR2, que é contínua à seção LGPR1, nota-se que o solo possui grande espessura na parte inicial e diminui para 0,5 metro no final da seção. Nesta seção observam-se refletores horizontalizados contínuos, as vezes inclinados, com início em 64 m, e profundidade entre 0,5 e 1,8m. Estes refletores evidenciam o contraste solo/topo rochoso. Entre 69m e 95 m observa-se um forte refletor inclinado característico de uma dobra (Figura 6).

Na seção LGPR3 (Figura 7) nota-se a presença de refletores inclinados no interior da rocha (estrutura sinforme) entre as posições de 160 a 220

metros. O solo na seção possui uma espessura inferior a 0,5 metros, com exceção da ocorrência de um solo de 2 metros no interior da sinforme.

#### 4 Conclusões

Na área do Lixão de Pirenópolis – GO, os resultados obtidos com o método GPR evidenciam padrões de reflexão relacionados aos solos, às rochas, aos resíduos sólidos urbanos e ao material percolado pelo chorume.

O padrão de reflexão de média amplitude identificado para os solos, bem como a velocidade da onda eletromagnética calculada com as hipérbolas de difração (0,09 m/ns) indicam um solo areno argiloso para a região. Conforme evidenciado em superfície, o solo presente na área é um latossolo vermelho arenoso, que possivelmente possui condutividade hidráulica superior ao definido na legislação ambiental para a instalação de áreas de disposição de resíduos sólidos urbanos.

Os refletores eletromagnéticos identificados no interior das rochas possibilitaram a determinação de foliações, e conseqüentemente a localização de estruturas geológicas deformacionais (dobras).

Em decorrência da baixa atenuação sofrida pelo sinal eletromagnético em ambientes arenosos, os perfis de GPR apresentaram excelentes resultados. A seleção de área designada para lixões/aterros deve observar a baixa permeabilidade do solo, a fim de reduzir as possibilidades de contaminação do aquífero. Além disto, as áreas selecionadas devem ter características argilosas, segundo a NBR 13.896 - ABNT (1997). Em vista deste fato, sugere-se que a

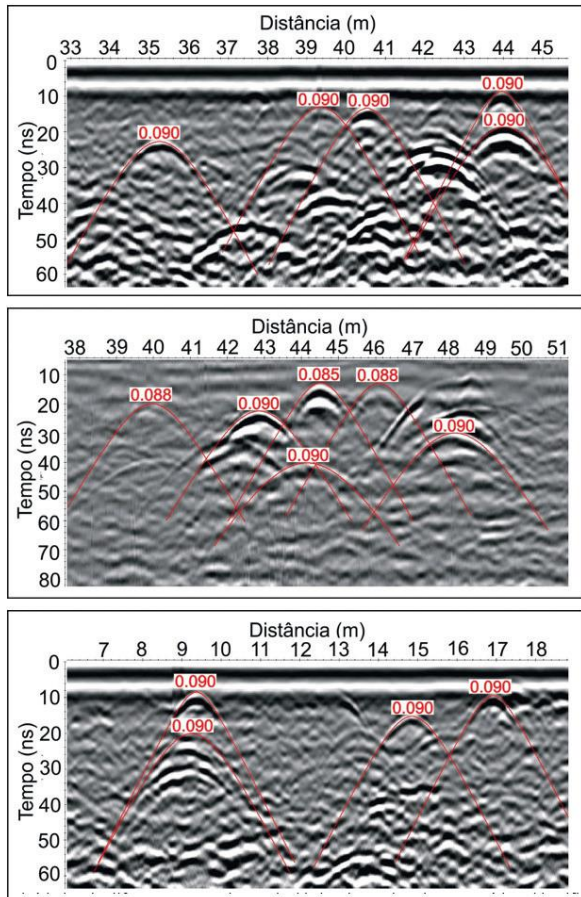


Figura 2 Hipérbolas de difração e respectivas velocidades das ondas eletromagnéticas identificadas em partes de radargramas obtidos na área do Lixão de Pirenópolis/GO

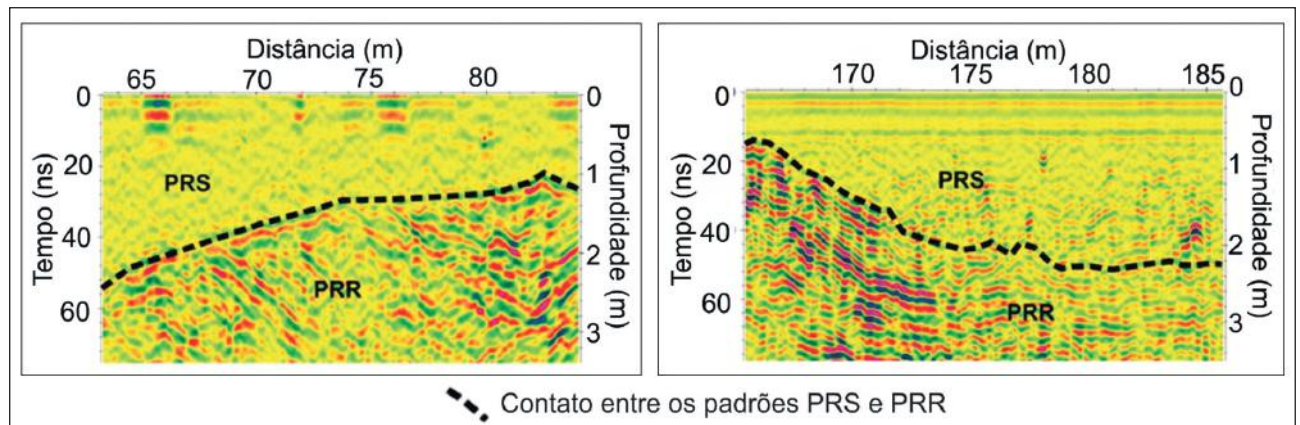


Figura 3 Partes de seções de GPR com os padrões de reflexão (PRS e PRR) característicos da área do Lixão de Pirenópolis/GO

Estimativa de Características Geométricas de Solos e Rochas com Radar de Penetração no Solo, na Área de Disposição de Resíduos Sólidos Urbanos de Pirenópolis, Goiás, Brasil

Kamylla de Lima Alves & Weliton Rodrigues Borges

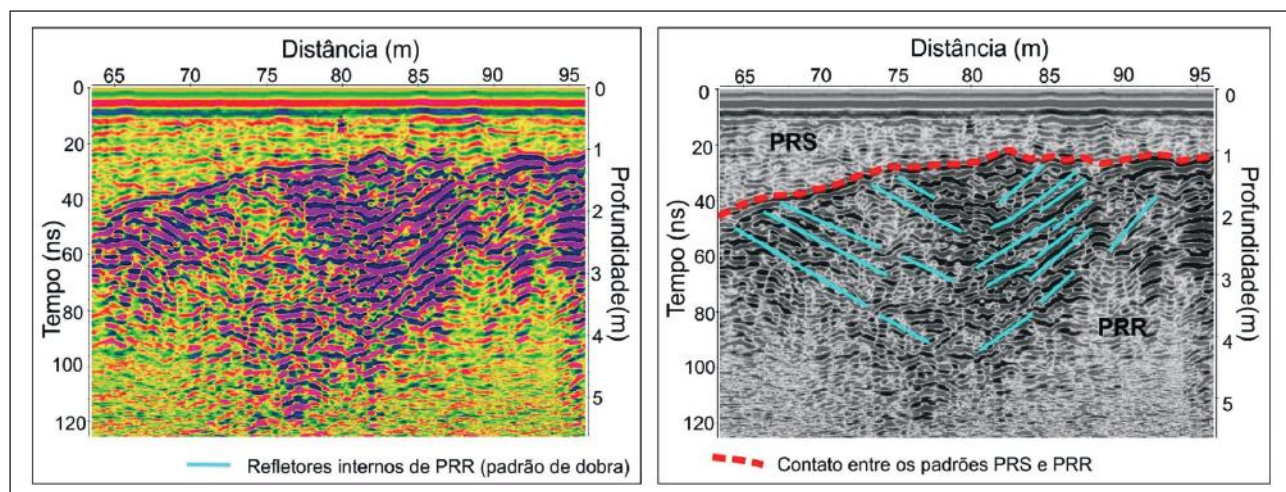


Figura 4 Parte da seção LGPR2 com os padrões de reflexão (PRS e PRR) e destaque para refletores internos de PRR que indicam um dobramento nas rochas da área do Lixão de Pirenópolis/GO

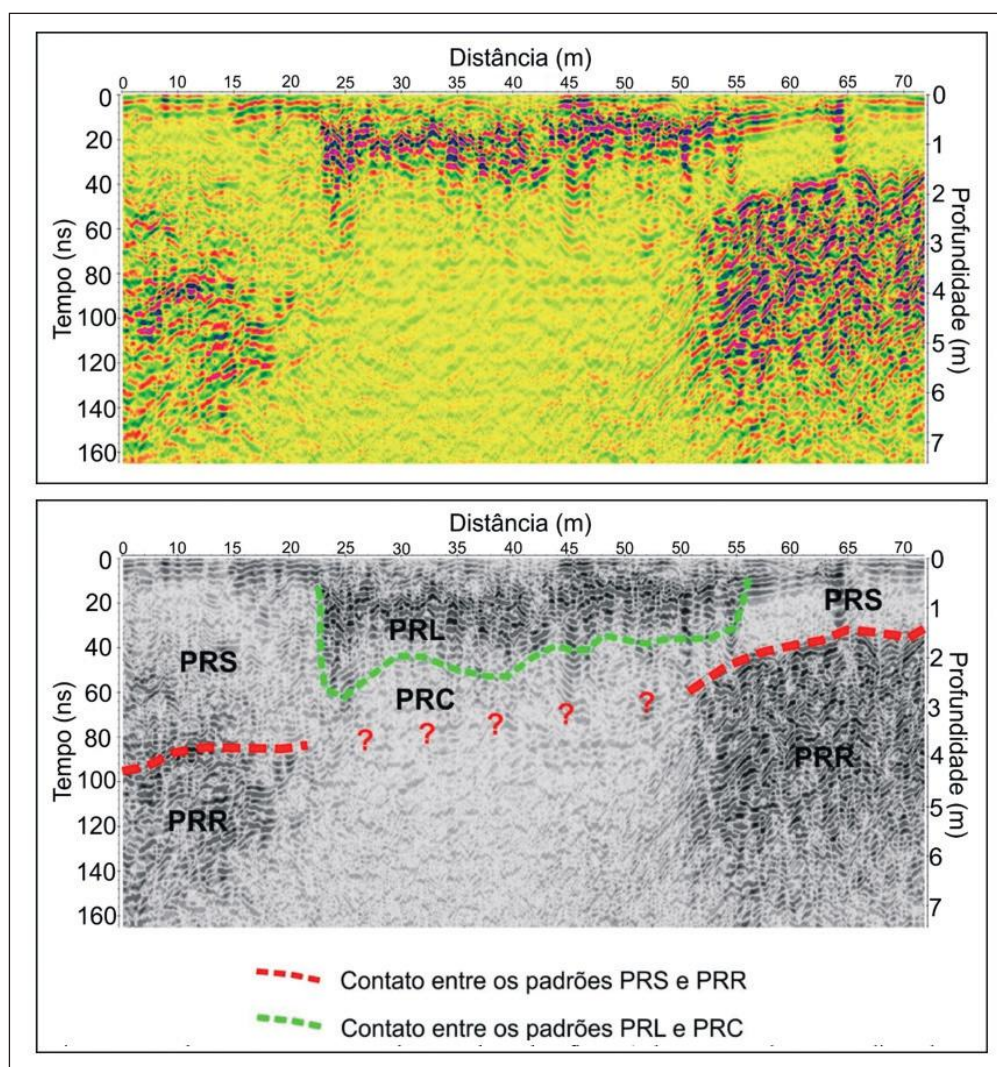


Figura 5 Parte da seção LGPR5 com todos os padrões de reflexão (solo – PRS, rochas – PRR, lixo urbano – PRL, e percolado condutivo – PRC) identificados na área do Lixão de Pirenópolis/GO

Estimativa de Características Geométricas de Solos e Rochas com Radar de Penetração no Solo, na Área de Disposição de Resíduos Sólidos Urbanos de Pirenópolis, Goiás, Brasil  
 Kamylla de Lima Alves & Weliton Rodrigues Borges

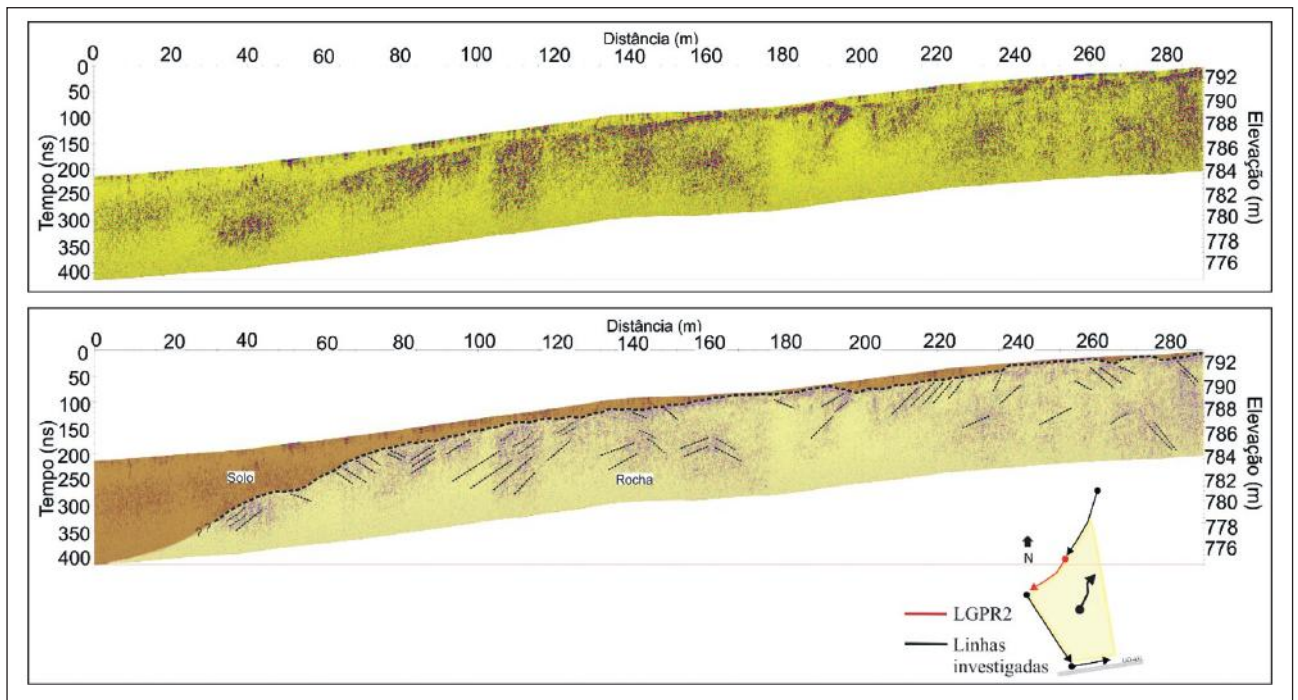


Figura 6 Seção de LGPR2 com a interpretação da camada de solo e as estruturas geológicas evidentes nas rochas. Destaque para uma dobra entre a posição de 70 a 95 metros

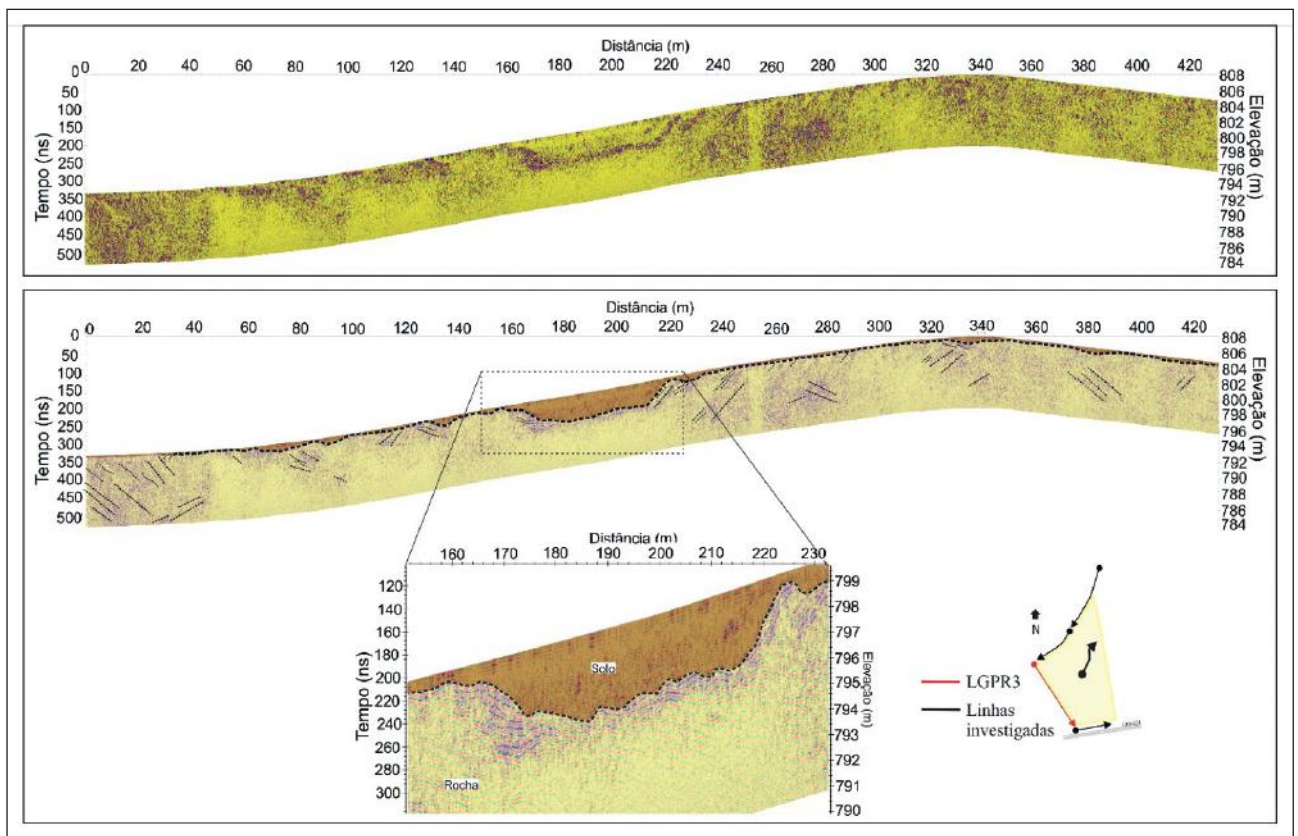


Figura 7 Seção de LGPR3 com a interpretação da camada de solo e as estruturas geológicas evidentes nas rochas. Destaque para uma estrutura sinforme com uma maior espessura de solo

**Estimativa de Características Geométricas de Solos e Rochas com Radar de Penetração no Solo, na Área de Disposição de Resíduos Sólidos Urbanos de Pirenópolis, Goiás, Brasil**

*Kamylla de Lima Alves & Weliton Rodrigues Borges*

área do lixão seja conduzida para uma região de xistos, (que possui baixa permeabilidade) comumente encontrado nas redondezas.

Com ciência que o sinal eletromagnético atenua com maior intensidade em direção à área atual de deposição de resíduos, é possível afirmar que a contaminação não ultrapassa os limites do Lixão, visto que nos dados de GPR realizados nos arredores, não há regiões de atenuação do sinal.

## 5 Referências

- Almeida, L.; Resende, L. & Rodrigues, A.P. & Campos, J.E.G. 2006. Hidrogeologia do Estado de Goiás e Distrito Federal. Goiânia. Secretaria de Indústria e Comércio de Goiás. Superintendência de Geologia e Mineração. 231 p.
- Annan, A.P. 1996. Transmission Dispersion and GPR. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 4:125–136.
- Beres, M. & Haeni, F.P. 1991. Application of Ground-Penetrating-Radar Methods in Hydrogeologic Studies. *Groundwater*, 29(3):375–386.
- Borges, W.R. & Porsani, J.L. 2003. Investigações geofísicas na borda da bacia sedimentar de São Paulo. *Revista Brasileira de Geofísica*. 20(3):187–192.
- Busby, J.P.; Cuss, R.J.; Raines, M.G. & Beamish, D. 2004. Application of Ground Penetrating Radar to geological investigations. *British Geological Survey*, 4:1–4.
- Cavalcanti, M.M. ; Borges, W.R. ; Stollberg, R.; Rocha, M.R.; Cunha, L.S.; Seimetz, E.X.; Nogueira, P.V & Oliveira e Sousa, F.R.F.R. 2014. Levantamento Geofísico (Eletroresistividade) Nos Limites Do Aterro Controlado Do Jokey Clube, Vila Estrutural, Brasília-DF. *Geociências*, 33: 298–313.
- Charlton, M. & White, K.J. 2006. Subsurface scattering of synthetic aperture radar signals assessed using ground-penetrating radar. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing for review on 31 st July*, p 1-20.
- Davis, J.L. & Annan, A.P. 1989. Ground-Penetrating Radar for High-Resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy. *Geophysical Prospecting*, 37(3):531–551.
- Dominic, D.F.; Egan, K.; Carney, C.; Wolfer, P.J.; Duever, L.C.; Gunderson, L.H.; Riopelle, L.A.; Alexander, T.R.; Myers, R.S. & Spangler, D.P. 1995. Delineation of shallow stratigraphy using ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics*, 33(1):167–175.
- Dourado, J.C.; Malagutti Filho, W.; Braga, A.C.O. & Noedir, N. 2001. Detecção de cavidades em arenitos utilizando gravimetria, eletroresistividade e GPR. *Journal of Geophysics*, 19:(1)19–32.
- Huisman, J.A.; Smeets, J.J.J.C.; Bouten, W & Heuvelink, G..2002. Mapping spatial variation in surface soil water content : comparison of ground-penetrating radar and time domain reflectometry. *Journal of Hydrology*, 269:194–207.
- Kruse, S.E.; Schneider, J.C.; Campagna, D.J.; Inman, J.A. & Hickey, T.D. 2000. Ground penetrating radar imaging of cap rock, caliche and carbonate strata. *Journal of Applied Geophysics*, 43(2):239–249.
- Laureano, A.T. & Shiraiwa, S. 2008. Ensaios geofísicos no aterro sanitário de Cuiabá-MT. *Revista Brasileira de Geofísica*, 26(2):173–180.
- MCT, Ministério da Ciência e Tecnologia. 2006. Zoneamento Ecológico-econômico de Arranjos produtivos de pequenos mineradores. Pirenópolis – Cocalzinho de Goiás – Corumbá de Goiás, 169p.
- Moreira, M.L.O.; Moreton, L.C.; Araújo, V.A.; Lacerda Filho, J.V. & Costa, H.F. 2008. Geologia do Estado de Goiás e do Distrito Federal. Escala 1:500.000, CPRM-SIC – FUNMINERAL, Goiânia, 143p.
- Ortega, R.A. 2006. Localização e Delineamento de Pluma de Contaminação por Hidrocarbonetos através dos Métodos GPR e Tomografia Elétrica. Programa de Pós-Graduação em Geofísica, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, Dissertação de Mestrado, 115p.
- Sandmeier, K.J. 2015. REFLEXW Version 7.5, Windows 9x/2000/NT/7/8. Program for the processing of seismic, acoustic or electromagnetic reflection, refraction and transmission data. Manual do Software, Karlsruhe, Germany, 209p
- Wensink, W.A. 1993. Dielectric properties of wet soils in the frequency range 1 - 3000 MHz. *Geophysical Prospecting*, 41(6): 671–696.
- Wijewardana, Y.G.N.S. & Galagedara, L.W. 2010. Estimation of spatio-temporal variability of soil water content in agricultural fields with ground penetrating radar. *Journal of Hydrology*, 391(1):24–33.