

# Uso de radar de penetração de solo (GPR) para locação, modelagem 3D e cubagem de volume hídrico em barragem subterrânea no semiárido brasileiro

Hugo Machado Rodrigues<sup>1</sup>

Gustavo Mattos Vasques<sup>2</sup>

Emanuel Huber<sup>3</sup>

Flávio Adriano Marques<sup>2</sup>

Sílvio Roberto de Lucena Tavares<sup>2</sup>

Maria Sônia Lopes da Silva<sup>2</sup>

1. Universidade Federal Fluminense – Rua Passo da Pátria, 156, Niterói, Rio de Janeiro, Brasil ([rodrigues.machado.hugo@gmail.com](mailto:rodrigues.machado.hugo@gmail.com));

2. Embrapa Solos – Rua Jardim Botânico, 1024, Jardim Botânico, Rio de Janeiro, Brasil ([gustavo.vasques@embrapa.br](mailto:gustavo.vasques@embrapa.br)); ([flavio.marques@embrapa.br](mailto:flavio.marques@embrapa.br)); ([silvio.tavares@embrapa.br](mailto:silvio.tavares@embrapa.br));

3. Instituto Federal Suíço de Tecnologia de Zurique, Rämistrasse 101, 8092, Zurique, Suíça ([emanuel.huber@alumni.ethz.ch](mailto:emanuel.huber@alumni.ethz.ch)).

## RESUMO

The selection of a suitable location for the installation of dams should consider the potential for water storage, which depends on the volume of the underground reservoir, limited to the bottom by the regolith. In this manuscript, the ground penetration radar (GPR) was evaluated as a technology to detect and to map in 3D the depth of the regolith and calculate the water reservoir volume of a future underground dam. Radargrams images were obtained in thirteen transects in an 0.8 ha area at the municipality of Santana do Ipanema-AL. Nine soil profiles were described (Planossolos and Neossolos) to compare the corresponding feature to the regolith in the radargrams. The radargram's dimensions were adjusted to the local relief; noise reduction filters were applied; the features corresponding to the regolith were identified in the thirteen radargrams, and the regolith depth and the soil surface were interpolated using 2 x 2 m pixel resolution applying multilevel b-spline approximation method using the RGPR package on R software. The water reservoir volume was calculated for each pixel multiplying the regolith depth (surface level minus regolith level) by the pixel area times the total porosity of the soil and summed to the entire accumulation dam area. The depth of the regolith ranged from 0.5 to 1.5 meters in the soil profiles; the average porosity of the soils in the area was 0.38, and the volume of water in the reservoir estimated is 6.27 million liters.

**Keywords:** Semi-arid; Geophysics; Proximal Soil Sensing; GPR; Underground dam.

## INTRODUÇÃO

A baixa disponibilidade e oferta de água para consumo humano e utilização para fins agrícolas é um fator limitante para o desenvolvimento socioeconômico de uma região (SHADEED; LANGE, 2010). Nas regiões áridas e semiáridas, onde a ocorrência de fontes de água em superfície é escassa ou inexistente, a utilização de lençóis-freáticos pode ser o único recurso disponível para o provimento desse importante recurso ao longo do ano (ONDER; YILMAZ, 2005).

Apesar da baixa pluviosidade nessas regiões, a água da chuva é utilizada como o principal meio de irrigação de lavouras, dessedentação animal e uso doméstico. Nesse sentido, uma série de tecnologias têm sido desenvolvidas e empregadas para a captação e armazenamento da água da chuva com a finalidade de sua reutilização posterior (LIMA et al., 2018; LOPES et al., 2013; SILVA et al., 2010). Entre essas tecnologias, as barragens subterrâneas têm apresentado grande potencial para armazenar a água da chuva e suprir a demanda de água para agricultura familiar na região semiárida do Nordeste brasileiro (SILVA et al., 1998, 2009; XIMENES; SILVA; BRITO, 2019).

As barragens subterrâneas têm sido utilizadas no Brasil e no mundo para captar e armazenar a água da chuva para uso na agricultura familiar, apresentado baixo custo de instalação e manutenção, além de não inundar o terreno, tornando-o, portanto, agricultável (SILVA; PORTO, 1982). As barragens subterrâneas são tradicionalmente instaladas no vertedouro do curso de córregos intermitentes, sendo o septo impermeável construído usando pedras, tijolos, cimento, areia, argila e, mais recentemente, lona plástica de alta resistência (BRITTO et al., 1989; SILVA et al., 2010). Silva et al. (2010) define diversos critérios para implementação adequada das barragens subterrâneas considerando o modelo Embrapa (CPATSA – Embrapa Semiárido, descrito em Britto et al., 1998). Os solos recomendados devem apresentar profundidade variando de 1 a 3.5 metros e textura média à arenosa, devendo estar localizados em área de captação de no máximo 2% de declive.

Apesar da sua importância, o volume do reservatório de água da barragem subterrânea não é normalmente quantificado, devido ao alto custo envolvido na caracterização e mapeamento das camadas impeditivas ao fluxo vertical da água na área de acúmulo. Essas camadas são constituídas por saprolito, regolito e a sua identificação e mapeamento ao longo da área de acúmulo da barragem requerem sondagens e abertura de perfis no solo na área, tornando o processo oneroso. Neste sentido, o radar de penetração no solo (GPR) apresenta-se potencialmente como tecnologia eficiente para o mapeamento das camadas impeditivas do solo em subsuperfície.

O GPR é um sensor geofísico que mede variações na constante dielétrica (permissividade relativa) do solo para gerar imagens 2D do perfil do solo em profundidade ao longo de um caminhamento, sendo essas imagens chamadas de radargramas. Quando georreferenciados, radargramas obtidos em diferentes direções na mesma área podem ser combinados para gerar imagens 3D para detecção e mapeamento de alvos enterrados e feições deposicionais (DE CASTRO et al., 2014) ou quaisquer feições de interesse, desde que propriamente caracterizadas. Para isso, aplicam-se técnicas de aquisição, processamento e interpretação dos radargramas

usando software específico, apoiadas por levantamento *in loco* das feições de interesse que se deseja mapear.

O objetivo do presente artigo é explorar o uso do GPR para: (a) mapear a superfície do solo; (b) identificar e mapear a profundidade do regolito; e (c) estimar o volume do reservatório de água na área de acúmulo de uma barragem subterrânea a ser construída no município de Santa do Ipanema, AL, na região semiárida do Nordeste brasileiro.

## METODOLOGIA

### Área de estudo

O estudo foi realizado em um campo experimental do Instituto Federal de Alagoas, no município de Santana do Ipanema, AL, com latitude e longitude centrais 9°23'46.5"S e 37°13'39.4"W (Figura 1A). A área de estudo possui 0.8 ha e está inserida no bioma Caatinga. Segundo a classificação de Köppen, apresenta clima BSh e BWh, com elevadas temperaturas anuais, baixa precipitação variando entre 400 e 900 mm (BARROS et al., 2012), além de baixa umidade relativa do ar. Geologicamente, a região está localizada no Complexo Xingó, inserido no Domínio Pernambuco - Alagoas, marcada pela presença de migmatitos e granitos do período Ediacarano (MENDES; LIMA; MORAIS, 2016). A geomorfologia da área é classificada como Pediplano do Baixo São Francisco inserida no Domínio do Cinturão Neoproterozóico (IBGE, 2018).

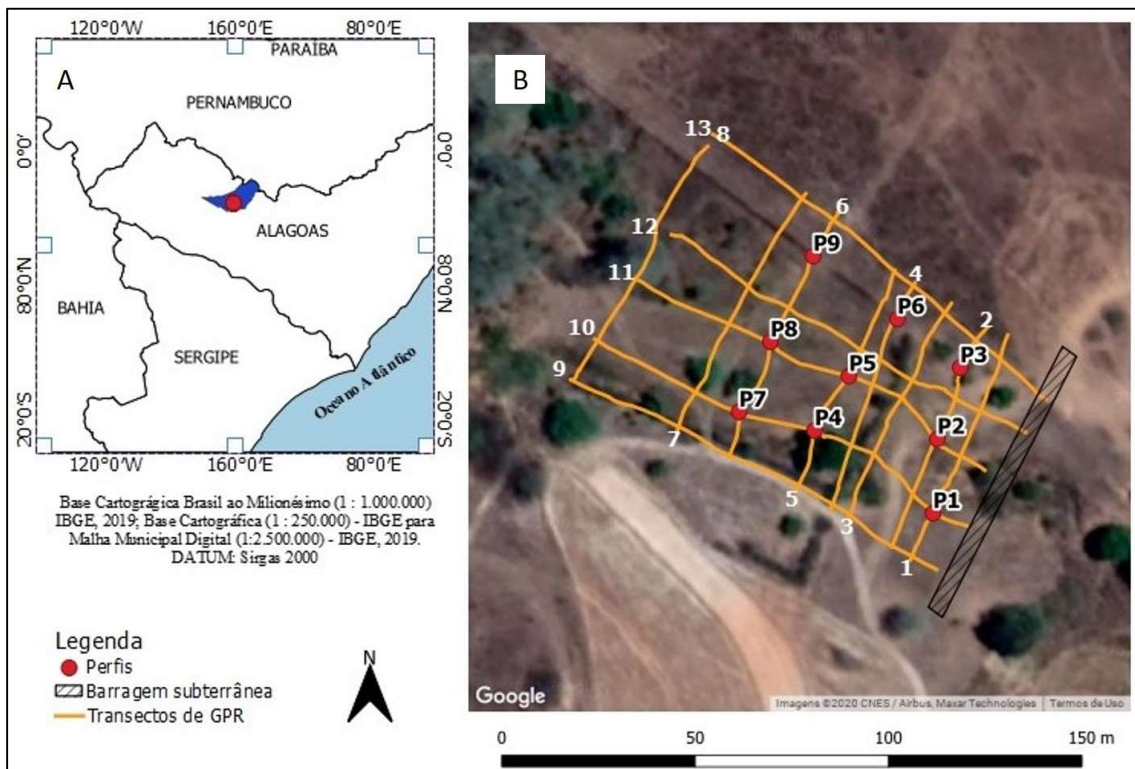


Figura 1. (A) Localização da área de estudo; (B) Localização dos transectos para aquisição dos dados de radar de penetração no solo, perfis de solo descritos e construção da futura barragem subterrânea.

Selecionou-se uma encosta suavemente inclinada (< 3% de declividade) ao redor de um córrego intermitente como local para instalação da barragem subterrânea. A litologia caracteriza-se como depósito fluvial e os solos como Planossolos Háplicos, Neossolos Flúvicos e Neossolos Regolíticos.

A barragem subterrânea será instalada na parte inferior do terreno, no extremo leste da área de estudo, na posição do talvegue do córrego intermitente (Figura 1B; área hachurada). Considerou-se que a barragem terá largura suficiente para impedir o fluxo de água em toda a extensão amostrada pelo GPR, do transecto mais a sul ao transecto mais a norte, conforme descrito na próxima seção (Figura 1B).

### **Descrição e classificação de perfis de solo**

Nove locais foram selecionados próximos aos transectos do GPR de maneira a representar a variação de solos e identificar a profundidade do regolito na área de estudo (Figura 1B). Foram abertas trincheiras de até 3 m de profundidade (Figura 2B) para descrição dos perfis de solo, segundo (Santos et al., 2013) e sua classificação, segundo SiBCS (SANTOS et al., 2018). Os perfis descritos foram utilizados para interpretação e identificação das feições de interesse nos radargramas coletados.

### **Aquisição e processamento de dados de radar de penetração no solo**

Utilizou-se o GPR MALÁ GroundExplorer, (Guideline Geo AB, Sundbyberg, Suécia), montado sobre carrinho todo-terreno equipado com odômetro, GPS e antena monoestática blindada de 450 MHz (Figura 2A), que permitiu realizar leituras até aproximadamente 4 m de profundidade. O GPR foi conduzido pela área de estudo perfazendo 13 transectos, sendo cinco transectos longitudinais à topossequência (direção topo-barragem) e oito transversais à topossequência (Figura 1B), de maneira a representar a variação da subsuperfície na área de estudo.

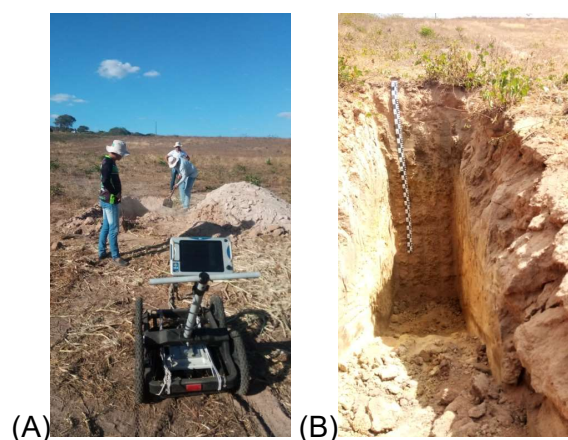


Figura 1. (A) Radar de penetração no solo em primeiro plano e abertura de trincheira para descrição e classificação do solo ao fundo; (B) Perfil de solo classificado como Neossolo Regolítico Eutrófico léptico. Fonte: Gustavo M. Vasques

Utilizou-se o software R (R CORE TEAM, 2019) e as funções descritas abaixo presentes no pacote RGPR (HUBER; HANS, 2018) para processamento dos radargramas. Estimou-se a velocidade média de propagação da onda eletromagnética em 0,17 cm ns<sup>1</sup> ajustando-se as feições de interesse identificadas nos perfis de solo descritos a sua posição correspondente nos radargramas. Em seguida, os 13 radargramas foram pré-processados aplicando-se uma sequência de filtros e funções (Tabela 1) com o objetivo de reduzir ruídos e aumentar o contraste para visualização das feições de interesse.

**TABELA 1. LISTA DE FILTROS UTILIZADOS PARA PROCESSAMENTO DOS RADARGRAMAS**

Sequência	Pré-processamento	Função no R
1	Estimativa do tempo zero	estimateTime0
2	Correção do tempo zero	time0Cor
3	Remoção de ruído de baixa frequência	dewow
4	Correção de ganho com função de potência	gain(type="power")
5	Correção automática de ganho	gain(type="agc")
6	Filtragem por autovalor	eigenFilter
7	Correção de afastamento constante	timeCorOffset
8	Ajuste de velocidade de propagação	setVel
9	Migração topográfica Kirchhoff	migrate

Após o pré-processamento dos radargramas, utilizou-se a função *delineate* para identificar a profundidade do limite superior do regolito. A identificação das camadas impeditivas foi realizada por meio do pareamento dos radargramas com as descrições dos horizontes e camadas dos respectivos perfis, sendo o pareamento realizado por meio da localização geográfica comum entre eles (Figura 1B).

As feições de regolito delineadas nos radargramas foram interpoladas para uma malha com resolução de pixel de 2 x 2 m utilizando o método de aproximação b-spline multinível do pacote MBA (FINLEY ET AL., 2017) embutidas no pacote RGPR por meio da função *spInterpToRaster* para a visualização 3D.

Os pontos de elevação do terreno coletados pelo GPS acoplado ao GPR foram interpolados pela mesma função por meio da função *spInterpToRaster* para visualização 3D da feição do terreno utilizando mesma resolução.

Para obtenção do volume do solo em 3D subtraíram-se os valores pixel a pixel das feições 3D da superfície e do regolito. Para quantificação do volume do reservatório de água, a feição 3D do volume do solo foi multiplicada pelo fator de porosidade total descrito nas próximas seções.

## Cálculo do volume do reservatório de água

Para calcular o volume total do reservatório de água em subsuperfície na área de acúmulo da futura barragem subterrânea utilizou-se a Equação 1.

$$V = \sum_{i=1}^n (z_{sup_i} - z_{inf_i}) \times res^2 \times p \quad (1)$$

Onde:  $V$  é o volume total do reservatório de água, em  $m^3$ ;  $z_{sup_i}$  e  $z_{inf_i}$  são as elevações, em m, da superfície do terreno e do regolito, respectivamente, no  $i$ -ésimo pixel dentre os  $n$  pixels que recobrem área de acúmulo da futura barragem subterrânea;  $res$  é o tamanho do pixel, em m, nos mapas de  $z_{sup}$  e  $z_{inf}$ ; e  $p$  é a porosidade total do solo, em  $m^3 m^{-3}$ .

O valor da porosidade total do solo ( $p$ ) usada foi 0,38. Esse valor foi obtido na literatura a partir de dados de perfis de solo presentes na região com características similares aos solos descritos na área de estudo. Os perfis de solo selecionados para a estimativa da porosidade foram 4 perfis de Neossolo Flúvico, 8 de Neossolo Regolítico; e 17 perfis de Planossolo Háplico, descritos por Jacomine et al (1975) em levantamento exploratório de solos do estado de Alagoas. A porosidade total do solo utilizada na Equação 1 ( $p$ ) foi calculada usando a Equação 2 a partir dos valores de porosidade dos 29 perfis de solo selecionados.

$$p = \sum_{i=1}^{n(i)} \left[ \sum_{j=1}^{n(j)} p_{ij} \times w_{ij} / \sum_{j=1}^{n(j)} w_{ij} \right] / n(i) \quad (2)$$

Onde:  $p$  é a porosidade total do solo, em  $m^3 m^{-3}$ ; e  $p_{ij}$  e  $w_{ij}$  são a porosidade total, em  $m^3 m^{-3}$ , e a espessura, em m, respectivamente, do  $j$ -ésimo horizonte dentre os  $n(j)$  horizontes do  $i$ -ésimo perfil de solo dentre os  $n(i)$  perfis selecionados.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Solos presentes na área de estudo

Descreveram-se quatro perfis como Neossolos Regolíticos, três como Neossolos Flúvicos e dois como Planossolos Háplicos (Tabela 2).

**TABELA 2. CLASSIFICAÇÃO DOS PERFIS DE SOLO E PROFUNDIDADE SUPERIOR DO REGOLITO**

Perfil	Classe de solo no nível de grande grupo	Profundidade superior do regolito (cm)
P1	NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico típico	140
P2	NEOSSOLO FLÚVICO Eutrófico típico solódico	130
P3	NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico típico (fragipânico)	150
P4	PLANOSSOLO HÁPLICO Eutrófico solódico	110
P5	NEOSSOLO FLÚVICO Eutrófico típico	160
P6	NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico típico	110
P7	NEOSSOLO FLÚVICO Eutrófico típico (solódico)	160
P8	PLANOSSOLO HÁPLICO Eutrófico	45
P9	NEOSSOLO REGOLÍTICO Eutrófico léptico	81

As cotas de ocorrência do regolito variaram entre 45 cm para o perfil P8 e 160 cm para os P5 e P7. As menores cotas de profundidade de ocorrência do regolito estão localizadas próximas ao topo da área de estudo enquanto as maiores estão próximas à área de construção da barragem (Figura 3).

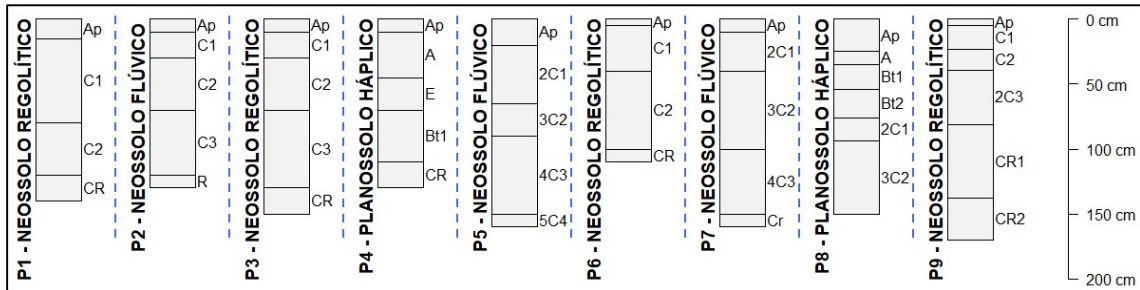


Figura 3. Horizontes presentes nos nove perfis de solo descritos.

### Análise dos radargramas e estimativa do volume do reservatório de água

As feições representativas do regolito foram nitidamente observadas e delineadas em todos os radargramas (Figura 4) e revelaram o aumento da profundidade no sentido topo-barragem.

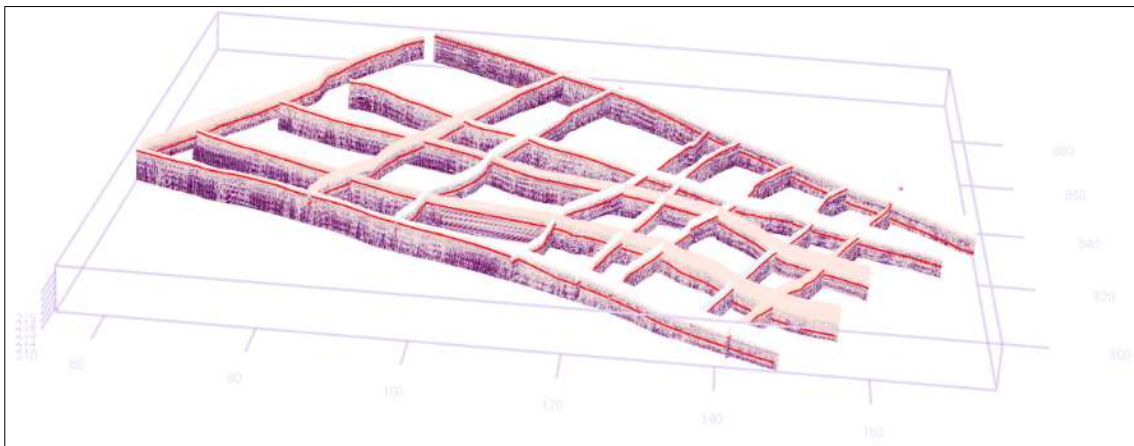


Figura 4. Radargramas mostrando as camadas impermeáveis delineadas em vermelho.

Como exemplo de procedimento de pareamento entre os perfis de solo descritos e as imagens pós-processadas dos transectos dos radargramas são apresentados na figura 5 os perfis P3 e P6 (identificados por setas amarelas) e os transectos 2 e 4. As cotas de ocorrência do regolito descritas nos perfis P3 e P6 estão alocadas em 150 e 110 cm, respectivamente. Esses valores corroboram as feições da camada impeditiva delineadas nos radargramas 2 e 4 uma vez que coincidem espacialmente.



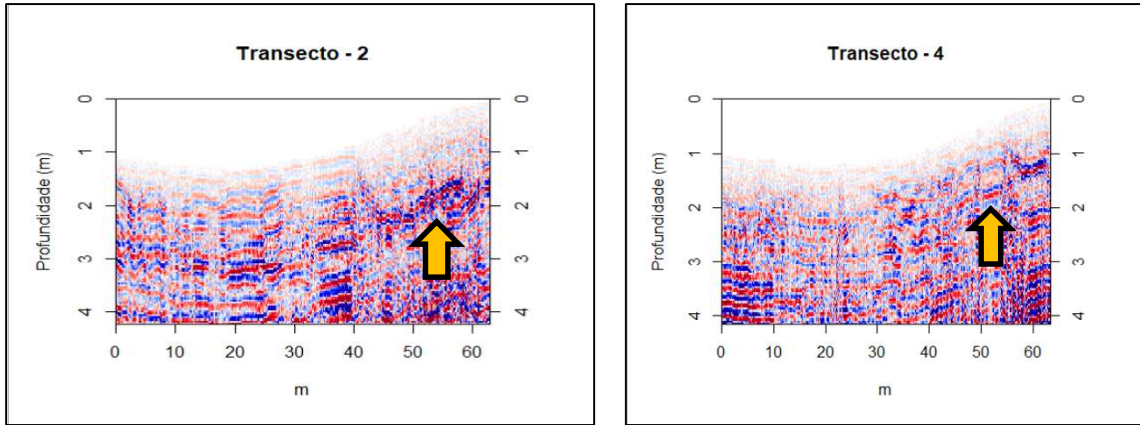


Figura 5. Transectos coletados na direção Leste-Oeste no sentido topo-barragem.

A elevação variou entre 213.5 e 215 m para superfície modelada 3D (Figura 6A) enquanto a profundidade do regolito alternou entre 210 e 213.5 m (Figura 6B). Os menores valores para profundidade do regolito estão localizados na porção próxima à área de acúmulo e seus limites superiores no topo da encosta, com exceção de uma leve depressão que pôde ser corroborada pela descrição do perfil P7.

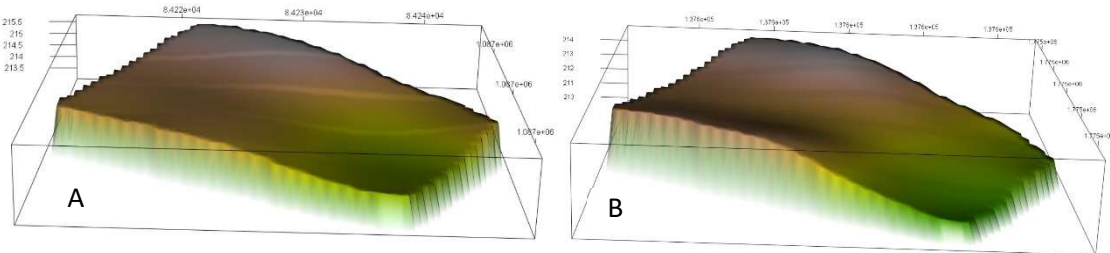


Figura 6. (A) Feição 3D da superfície do solo; (B) Feição 3D do regolito.

A espessura do reservatório de água da barragem (Figura 7), obtido pela diferença pixel a pixel entre a superfície do terreno (Figura 6A) e o limite superior do regolito (Figura 6B), variou entre 0.45 e 3.5 metros no sentido topo-barragem.

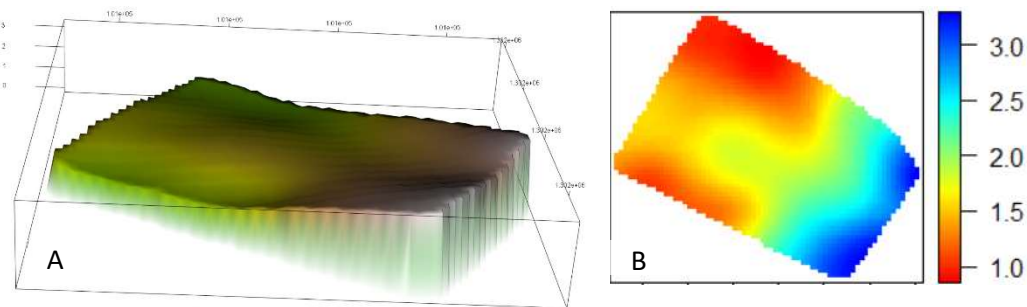


Figura 7. (A) Feição 3D do volume do solo; (B) Representação 2D do volume do solo com eixo y em metros de profundidade.



O volume total do solo (Figura 7) é 16,495.33 m<sup>3</sup>. Deste, aproximadamente 38% são poros, nos quais a água se acumula. Portanto, o volume total do reservatório de água da barragem subterrânea é 6,268.22 m<sup>3</sup>.

## CONCLUSÕES

O cálculo do volume potencial de armazenamento de água nos poros utilizando área de pixels de radargramas apresentou um avanço metodológico no processo de cubagem de barragens tendo em vista a praticidade e velocidade de análise e interpretação dos dados do GPR.

A utilização desta geotecnologias não invasiva mostra potencial de redução do número de escavações para identificação de camadas impeditivas do solo. Somado a isso, a metodologia utilizada para confecção de mapas 3D a partir do processamento dos radargramas em software livre R utilizando o pacote RGPR tornou menos onerosa a análise dos radargramas, dispensando o investimento em softwares proprietários de alto custo.

Desta forma, a metodologia utilizada para confecção de mapas 3D constitui grande inovação para o processo de alocação destas barragens uma vez que modela o aspecto da superfície e subsuperfície do solo com alta qualidade e precisão, auxiliando tanto no processo de decisão de posicionamento de barragens subterrâneas quanto no gerenciamento destas a partir da estimativa do volume de água armazenado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARROS, Alexandre Hugo Cezar; FILHO, José Coelho de Arújo; SILVA, Ademar Barros Da; SANTIAGO, Gabriela Ayane C. F. **Climatologia do estado de Alagoas**. Dados elet ed. Recife, PE: Embrapa Solos, 2012.

BRITTO, Luiza Teixeira de Lima; SILVA, Aderaldo de Souza; MACIEL, José Lins; MONTEIRO, Marco Almiro Resendde. **Barragem subterrânea I: Construção e manejo**: Boletim de Pesquisa. Petrolina-PE, 1998.

DE CASTRO, David Lopes; JÚNIOR, João Andrade dos Reis; TEIXEIRA, Washington Luiz Evangelista; SILVA, Victor de Albuquerque; FILHO, Francisco Pinheiro Lima. Ground-Penetrating radar imaging techniques applied in 3D environment: Example in inactive dunes. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 32, n. 2, p. 1–17, 2014.

HUBER, E.; HANS, G. RGPR - A Free and Open-Source Software Package to Process and Visualize GPR Data. *In*: AGU FALL MEETING ABSTRACTS 2018, **Anais [...]**. p. NS53A-0565.

IBGE. Mapeamento de Recursos Naturais do Brasil Escala 1:250.000, 2018. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias-novoportal/informacoes-ambientais/vegetacao/22453-cartas-1-250-000.html?=&t=downloads>. Acesso em 7 de setembro de 2020.

IBGE/DGC. Base Cartográfica Contínua do Brasil, escala 1:250.000 – BC250: versão 2019. Rio de Janeiro, 2019.

JACOMINE, Paulo Klinger Tito; CAVALCANTI, Antonio Cabral; PESSÔA, Sérgio Costa Pinto; SILVEIRA, Clotário Olivier Da. **Levantamento exploratório - Reconhecimento de solos do estado do Alagoas**: Boletim técnico. Recife, 1975.

LIMA, Alexandre de Oliveira; LIMA-FILHO, Francisco Pinheiro; DIAS, Nildo da Silva; JÚNIOR, João Andrade dos Reis; SOUSA, Anderson de Medeiros. GPR 3D profile of the adequateness of underground dams in a sub-watershed of the Brazilian semiarid. **Revista Caatinga**, v. 31, n. 2, p. 523–531, 2018.

LOPES, Helio L.; CABRAL, Jaime J. da S. P.; ARAÚJO FILHO, José C. De; MONTENEGRO, Suzana M. G. L. Mapeamento de áreas aluvionares no semiárido brasileiro por meio de dados colaterais e imagens orbitais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 7, p. 763–769, 2013.

MENDES, Vanildo Almeida; LIMA, Maria Angélica Batista; MORAIS, Débora Melo Ferrer De. **Geologia e Recursos Minerais do Estado de Alagoas SC.24- X-D. Escala 1:250.000. Estado de Alagoas**. Recife, 2016.

ONDER, H.; YILMAZ, M. Underground Dams. A tool of sustainable development and management of groundwater resources. **European Water**, v. 11/12, p. 35–45, 2005.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. **Quantitative Geography: The Basics**, v. 2, p. 250–286, 2019.

SANTOS, Humberto Gonçalves Dos et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SANTOS, Raphael David Dos; LEMOS, Raimundo Costa De; SANTOS, Humberto Gonçalves Dos; KER, João Carlos; ANJOS, Lucia Helena Cunha Dos. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 2. ed. Campinas-SP: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013.

SHADEED, Sameer; LANGE, Jens. Rainwater harvesting to alleviate water scarcity in dry conditions: A case study in faria catchment, palestine. **Water Science and Engineering**, v. 3, n. 2, p. 132–143, 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3882/j.issn.1674-2370.2010.02.002>. Acesso em 7 setembro de 2020.

SILVA, Aderaldo de Souza; PORTO, Everaldo Rocha. **Utilização e conservação dos recursos hídricos nas zonas rurais do Trópico Semi-Árido do Brasil: Tecnologias de baixo custo**: Documentos. Petrolina, PE: EMBRAPA/CPATSA, 1982.

SILVA, Maria Sonia Lopes Da et al. **Potencialidades de classes de solos e critérios para locação de barragens subterrâneas no Semiárido do Nordeste brasileiro**: Circular técnica. Recife, PE, 2010.

SILVA, Maria Sonia Lopes Da; LOPES, Paulo Roberto Coelho; ANJOS, José Barbosa Dos; SILVA, Aderaldo de Souza; BRITO, Luiza Teixeira de Lima; PORTO, Everaldo Rocha. Exploração agrícola em barragem subterrânea. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 33, n. 6, p. 975–980, 1998.

XIMENES, Luciano Feijão; SILVA, Maria Sonia Lopes Da; BRITO, Luiza Teixeira de Lima. **Tecnologias de convivência com o semiárido brasileiro**. Série BNB ed. Fortaleza, CE: Banco do Nordeste do Brasil, 2019.