

## AVALIAÇÃO DE RADARGRAMAS BATIMÉTRICOS PARA CÁLCULO DE VOLUME DE REPRESA EMPREGANDO O CLASSIFICADOR “FCLASS2”.

*Evaluation of bathymetric radargrams for determination of the dam volume employing the “fclass2” classifier.*

Sandro Henrique de Faria<sup>1,2</sup>

Dalto Domingos Rodrigues<sup>2</sup>

Nilcilene das Graças Medeiros<sup>2</sup>

Paulo Roberto Antunes Aranha<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sudeste de Minas, Juiz de Fora – MG, Brasil  
Email: [sandro.faria@ifsudestemg.edu.br](mailto:sandro.faria@ifsudestemg.edu.br).

<sup>2</sup>Universidade Federal de Viçosa – Viçosa - MG, Brasil  
Emails: [dalto@ufv.br](mailto:dalto@ufv.br), [nilcilene.medeiros@ufv.br](mailto:nilcilene.medeiros@ufv.br).

<sup>3</sup>Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, Brasil  
Email: [aranha@igc.ufmg.br](mailto:aranha@igc.ufmg.br).

### Resumo

Este trabalho tem como objetivos avaliar o desempenho do GPR (*Ground Penetrating RADAR*) para aplicações batimétricas e o desenvolvimento de um classificador para análises de radargramas. O estudo foi realizado em uma represa situada no campus da Universidade Federal de Viçosa (UFV), na qual foi, previamente, realizado levantamento batimétrico empregando o ecobatímetro monofeixe. Foram gerados Modelos Digitais de Elevação (*MDE*), empregando três interpoladores diferentes e observações do ecobatímetro e GPR. Estes *MDEs* foram comparados aos pares, para cada interpolador, aplicando o teste *t* pareado. Também foram realizadas comparações com base nos volumes gerados a partir destes *MDEs*. Os resultados do teste *t* para os três *MDEs* mostraram que não há diferenças estatísticas, a um nível de significância de 5%, entre os modelos gerados com dados do ecobatímetro e do GPR. A maior diferença volumétrica encontrada foi de 98m<sup>3</sup> em 75.000m<sup>3</sup>, para a função *Griddata* com o interpolador v4. Considerando todos os *MDEs* gerados, a maior diferença entre os volumes foi de 2%, cerca de 1900m<sup>3</sup>. Verificou-se que o GPR, utilizando uma antena de 100MHz, pode ser empregado em levantamentos batimétricos de represas de até 4,5m e o classificador *fclass2* propiciou uma boa separação entre as camadas de água e sedimentos.

**Palavras chave:** GPR, Represa, Volume, Classificação, Software gratuito.

### Abstract:

This study aims to evaluate the performance of the GPR (*Ground Penetrating RADAR*) for bathymetric applications and the development of a classifier for radargrams analysis. The study was conducted in a dam, located on the Federal University of Viçosa (UFV), where we conducted, previously, a bathymetric survey using single beam echo sounder. Digital Elevation Models (DEM)

were generated employing three different interpolations using echo sounder and GPR observations. These *DEMs* were compared in pairs, for each interpolator, applying the paired t test. Comparisons were performed based in the volumes generated from these *DEMs*. The results for the t test for the three *DEMs* revealed no statistical differences, at 5% significance level, between models generated from the echo sounder and GPR. The biggest volumetric difference found was 98 m<sup>3</sup> in 75000 m<sup>3</sup>, for *Griddata* function with interpolator v4. Considering all *DEMs*, the biggest difference between volumes was 2%, about 1900m<sup>3</sup>. We verified that the GPR, using 100MHz antenna, can be employed in bathymetric surveys dams of up to 4.5m and the classifier *fclass2* provided a good separation between water and sediments layers.

**Keywords:** GPR, Dam, Volume, classification, free software.

## 1. Introdução

Segundo Mastela *and* Nishijima (2011), a temática envolvendo os recursos hídricos extrapola a esfera econômica, social e ambiental se tornando um tema multidisciplinar. Com relação aos recursos hídricos superficiais (rios, lagos, represas, etc.), os efeitos da erosão podem se manifestar através do assoreamento, cujas consequências, muitas vezes, são a intensificação das enchentes e desequilíbrios ambientais que podem afetar a fauna e a flora local, bem como, afetar a capacidade de armazenamento dos reservatórios, acarretando agravos tanto ao abastecimento de água, como à geração de energia elétrica (Aquino *and* Lopez, 2000). O conhecimento detalhado do relevo superficial e subsuperficial é de suma importância para a realização de um adequado planejamento técnico para a implantação de obras civis como barragens, pontes, dentre várias outras ligadas a esses ambientes.

A técnica que trata da determinação e representação gráfica do relevo de áreas submersas é chamada de Batimetria. Atualmente, os ecobatímetros monofeixe e multifeixe são os mais empregados para determinação da espessura da lâmina d'água.

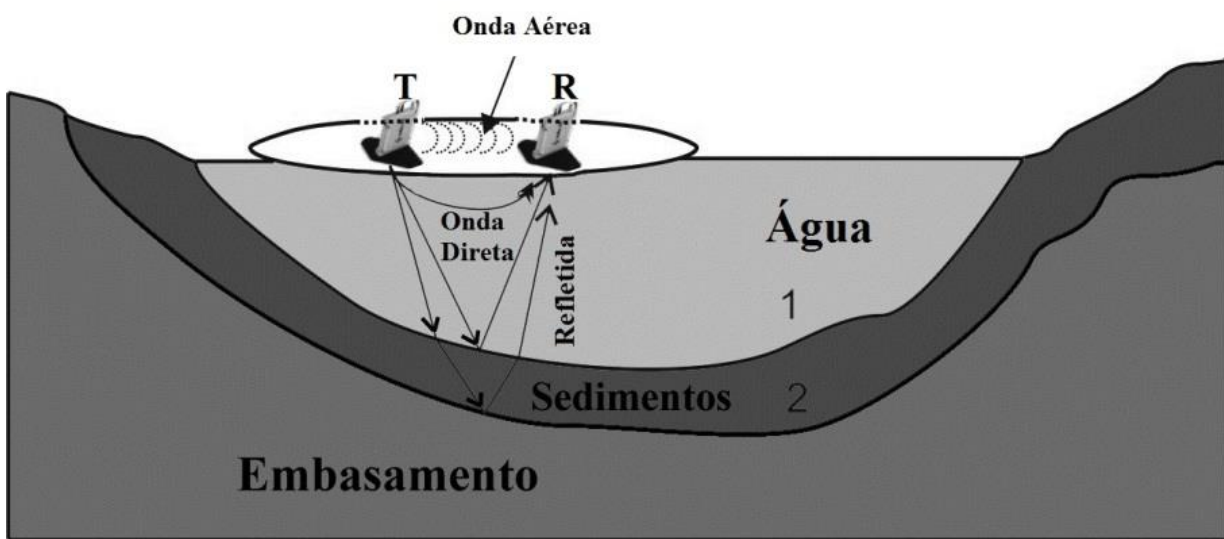
Além dos ecobatímetros, uma possibilidade para a definição e representação de relevos submersos é com uso do GPR. O GPR é um método geofísico, não invasivo, contínuo e de alta velocidade na coleta de dados, o qual tem sido usado para mapear as condições da subsuperfície em uma vasta variedade de aplicações (Davis *and* Annan, 1989; Saarenketo, 1998; Aranha, *et al*, 2002; Annan, 2003; Castelo Branco *and* Castro, 2003; Seyfried *and* Schoebel, 2016; Wang *et. al.*, 2016).

Contudo, deve-se resaltar que a técnica possui limitações referentes à condutividade elétrica do meio investigado Singh (2006). Quanto maior a condutividade elétrica do meio menor será a profundidade investigada. Meios argilosos e a água do mar são tidos como bons condutores de energia eletromagnética, com uma condutividade elétrica de até 1.000 e 3.000 mS/m, respectivamente, enquanto a água destilada possui uma condutividade elétrica de 0,01 mS/m (Annan, 2003). No entanto deve-se salientar que nem sempre os materiais argilosos são muito condutores, especialmente nos solos argilosos muito intemperizados, nos quais a profundidade de investigação com o GPR pode alcançar 10 a 15m (Aranha *et al*, 2002).

Mesmo com tais limitações, nas últimas décadas com o aprimoramento e desenvolvimento do equipamento, o GPR vem sendo aplicado em diversas áreas, inclusive em rios, lagos e represas, para se estudar o relevo e o material depositado (Moutinho, *et. al.*, 2005; Singh, 2006; Zhu, *et. al.*, 2009; Parizzi, *et. al.*, 2011; Khare, *et. al.*, 2012; Adepelumi, *et. al.*, 2013).

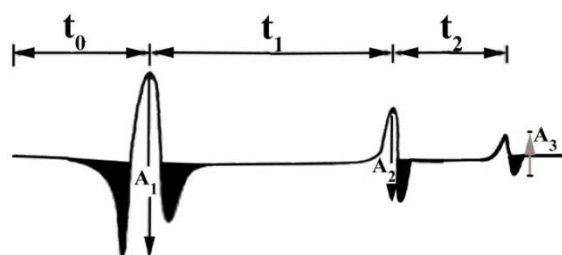
Os sistemas GPR transmitem pulsos eletromagnéticos em um meio e quando estes encontram um contraste significativo entre as propriedades elétricas dos materiais acima e abaixo desta interface, parte da energia é refletida de volta enquanto o restante seguirá adiante sendo refletida novamente por

outra interface ou absorvida totalmente pelo meio inferior. A imagem obtida é denominada radargrama e constitui a base para se interpretar e construir o perfil da subsuperfície. A qualidade do radargrama pode variar em virtude das características dos pulsos refletidos, refratados e difratados, que são condicionados às propriedades dielétricas do material investigado e da interação deste com o meio onde está inserido, como também, em função dos parâmetros utilizados na aquisição, dentre eles destaca-se a frequência central da antena utilizada. Esses sistemas possuem tipicamente os seguintes componentes: um gerador de pulsos, sendo este pulso com frequência central e potência específica; uma ou mais antenas, que transmitem o pulso para a subsuperfície e um classificador e registrador de dados, que capturam e registram os sinais refletidos pelo meio. A Figura 1 apresenta o modo de obtenção de dados com antenas de contato com o solo, também conhecidas como *ground coupled antennas*, num sistema fluvial ou lacustre.



**Figura 1:** Princípio básico da técnica GPR onde T é a antena transmissora, R a antena receptora e 1, 2 as interfaces de reflexão.

Para o modelo da Figura 1, a interface 1 representa a interface da lâmina d'água, com sedimento e a 2 representa a interface do sedimento com o embasamento. As reflexões nas interfaces 1, 2 podem ser visualizados na Figura 2, bem como a onda direta.



**Figura 2:** Exemplo do traço do GPR, no qual se observam a onda direta  $A_1$ , e as reflexões nas interfaces 1 e 2, respectivamente  $A_2$  e  $A_3$ .

Na Figura 02,  $A_1$  é a amplitude da onda direta, que se propaga diretamente da antena emissora para a antena receptora pela lâmina d'água,  $A_2$  a amplitude total de reflexão na interface entre a lâmina d'água e o sedimento e  $A_3$  a amplitude de reflexão entre o sedimento e o embasamento.  $t_0$  é o intervalo de tempo gasto pela onda direta em sua trajetória de uma antena para a outra,  $t_1$  é o intervalo de tempo de propagação do da onda que se propaga apenas na água e reflete na interface 1, e  $t_2$  é o intervalo de tempo gasto para percorrer a camada ocupada pelo sedimento.

Os dados registrados pela reflexão da onda nas interfaces mostradas no modelo da Figura 1 podem ser interpretados para se deduzir as características do substrato. O traço do georadar é o pulso captado pela

antena receptora após o pulso emitido ser refletido e refratado nas interfaces da subsuperfície e percorrer o caminho ascendente indo direto para a antena receptora (Figura 2). O radargrama é uma imagem onde cada coluna corresponde a um traço obtido na posição investigada e as linhas correspondem ao tempo de ida e volta do sinal emitido.

O radargrama oriundo de levantamentos com GPR que pode alcançar uma resolução espacial milimétrica e níveis de cinza representados em até 32 bits, dependendo da configuração utilizada. Nesta ótica, torna-se possível o uso de técnicas de classificação de imagens à radargramas. No entanto, este é um campo recente onde se tem poucos estudos publicados. Faria *et. al.* (2012) utilizaram a transformada *wavelet* e o classificador *maxver* afim de classificar radargramas oriundos de sondagens realizadas em rodovias. Os resultados obtidos, apesar de promissores, não foram satisfatórios quanto a uma abordagem automática de classificação e demandaram um elevadíssimo esforço computacional, ultrapassando 3 horas de processamento para cada radargrama com dimensões aproximadas de 512 x 1270 pixels, utilizando um processador *intel core 2 duo*.

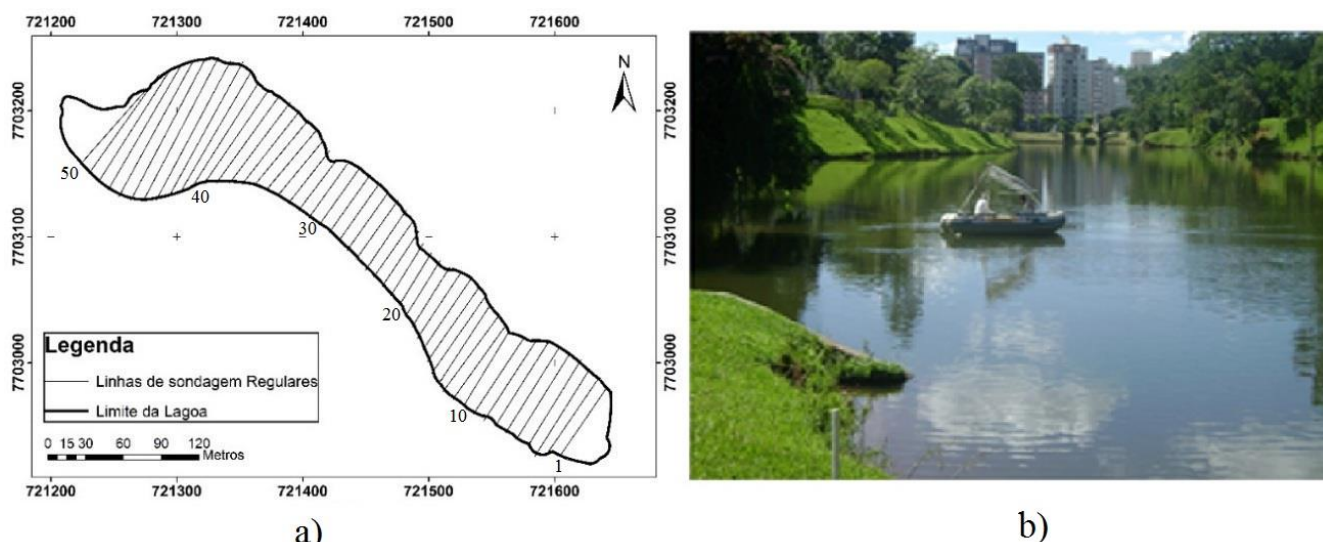
Pelo fato do radargrama ser um tipo de imagem com um padrão textural característico, o uso de classificadores tradicionais, que são aplicados principalmente à imagens orbitais, não produzem bons resultados quanto a dados categorizados. Dessa forma foi desenvolvida, neste trabalho, uma metodologia para o processo de classificação visando principalmente uma abordagem automática com baixo custo computacional a fim de viabilizar aplicações em radargramas batimétricos.

## 2. Metodologia

Com o intuito de se aplicar um classificador automatizado aos dados de GPR, diretamente na imagem obtida, o radargrama, desenvolveu-se um classificador automatizado com o nome de *fclass2* que está implementado no aplicativo, gratuito, chamado “*GPR Bathymetry*”. O objetivo do desenvolvimento desse aplicativo é disponibilizar ao usuário que trabalha com o GPR uma ferramenta gratuita para aplicações batimétricas. Ele possui ferramentas de visualização, interpoladores de superfície, filtros de detecção de bordas, filtros de suavização, filtros no domínio da frequência, filtros morfológicos, *set time zero*, *remove background*, edição de dados, ganhos, cálculos de áreas e volumes, espacialização de radargramas em X, Y e Z, classificação manual e classificação automática por meio do *fclass2*.

### 2.1 Caracterização da área de estudo

O local de estudo escolhido para a coleta de dados foi uma das represas do Ribeirão São Bartolomeu, localizada no campus da UFV (Universidade Federal de Viçosa), de onde se tem levantamento batimétrico recente, realizado com ecobatímetro monofeixe, a ser empregado na validação dos resultados (Figura 3).



**Figura 3:** (a) Limite da lagoa e as linhas de sondagem. Sistema de coordenadas WGS84, projeção UTM. (b) Foto da aquisição dos dados na represa.

## 2.2 Planejamento e coleta dos dados

Para se definir a malha de aquisição dos perfis ao longo da represa, primeiramente, procurou-se classifica-la segundo critérios já existentes em estudos anteriores. Seguindo esta linha, utilizou-se a classificação proposta por Carvalho *et al.* (2000). Nesse trabalho os reservatórios são classificados em pequenos, médios e grandes em função do volume como mostra a Tabela 1. O reservatório em estudo possui aproximadamente 75.000 m<sup>3</sup> e 35.000 m<sup>2</sup>, se enquadrando, portanto, na categoria de reservatório de pequeno porte.

**Tabela 1:** Classificação dos reservatórios

Porte do reservatório	Classificação em volume (m <sup>3</sup> )	Frequência de levantamento
<b>Pequeno</b>	Menor que 10 x 10 <sup>6</sup>	2 anos
<b>Médio</b>	Entre 10 a 100 x 10 <sup>6</sup>	5 anos
<b>Grande</b>	Maior que 100 x 10 <sup>6</sup>	10 anos

Segundo orientação da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), as seções devem estar distanciadas de 1,0 cm na escala do mapa. Caso o leito não apresente grandes variações, pode-se adotar espaçamentos maiores de até 3,0 cm no mapa. A Tabela 2 relaciona escala do mapa, distância entre seções e porte do reservatório (Carvalho, *et al.*, 2000).

**Tabela 2:** Distâncias entre seções transversais e porte dos reservatórios (Carvalho, *et al.*, 2000).

Escala do mapa	Distância entre seções (m)	Porte do reservatório
1 : 2000	20	Pequeno
1 : 5000	50	Médio
1 : 10000	100	Médio a grande
1 : 20000	200	Grande
1 : 25000	250	Grande

Como a maior extensão da represa em estudo é da ordem de 500 metros, porte pequeno, foi utilizado um espaçamento de 10 metros entre as seções transversais totalizando 50 seções (Figura 3a). Durante os trabalhos de campo não foi possível realizar o levantamento das extremidades da represa com causa de vegetações e estruturas que impediram a passagem da embarcação de uma margem para a outra.

Na aquisição dos dados de GPR, utilizou-se o equipamento RAMAC desenvolvido pela *MALA Geoscience*, com antena não blindada de 100 MHz. Os 50 perfis foram coletados seguindo um alinhamento demarcado em campo (Figura 4), e mantendo o mesmo sentido de aquisição dos dados.



**Figura 4:** Foto da aquisição de uma das seções, salienta-se o alinhamento da embarcação, mantido com auxílio de cordas em ambos os lados do barco.

O Posicionamento dos perfis (seções), na superfície, foi feito empregando dados do Sistema de Navegação Global por Satélite (GNSS) com as constelações GPS/GLONASS, nos dias 24/01/2014 e 25/01/2015, por meio do posicionamento relativo cinemático, com taxa de coleta de 1 segundo, bem como pela topografia convencional com estação total e trena.

### 2.3 Análise dos dados

Os perfis obtidos com o GPR foram analisados no aplicativo “*GPR Bathymetry*”, verificando-se que a seção 50 apresentou problemas no arquivo de dados, sendo descartada. Os perfis 26 e 37 apresentaram problemas na coleta de dados GNSS por perda de sinal e foram utilizadas as informações obtidas pela topografia convencional.

As diferenças entre as distâncias medidas pelo GPR e GNSS, chamadas de discrepâncias ( $\Delta d_i$ ), foram usadas como parâmetro para quantificar a qualidade das seções levantadas (Equação 1).

$$\Delta d_i = d_{\text{GPR}}(S_i) - d_{\text{GNSS}}(S_i) \quad (1)$$

Sendo:

$d_{\text{GPR}}(S_i)$ : distância estimada para a seção  $S_i$ , extraída do GPR;

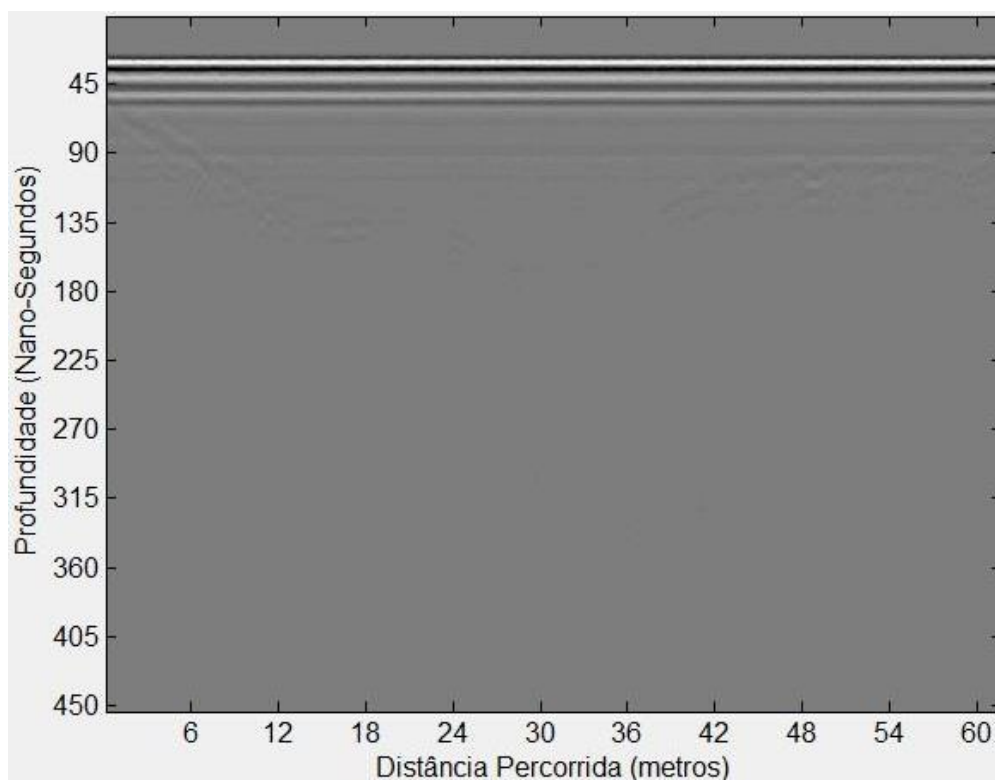
$d_{\text{GNSS}}(S_i)$ : distância estimada para a seção  $S_i$ , calculada através das coordenadas dos pontos observados com receptor GNSS.

Eventualmente em uma coleta de dados existem observações discrepantes, também chamadas de *outliers*, que são observações que se destoam das demais e podem afetar substancialmente o resultado

das análises estatísticas. Um dos métodos para a identificação de *outliers* muito utilizado é o *boxplot* (Montgomery and Runger, 2011). Pela análise do *boxplot* foram identificados 6 *outliers*: seções 11, 25, 36, 38, 41 e 45, as quais foram retiradas deste estudo para não comprometer os resultados.

## 2.4 Processamento dos radargramas

O objetivo de se usar processamento digital no tratamento de imagens de radar é melhorar o aspecto visual (pictorial) de certas feições estruturais para o analista humano e fornecer mais subsídios para a sua interpretação, inclusive gerando produtos (imagens) que possam ser posteriormente submetidos a outros tipos de processamentos. A Figura 5 apresenta o aspecto do radargrama referente a seção 1 em seu estado bruto. Percebe-se uma atenuação do sinal mais acentuada nas regiões mais profundas, bem como ruídos, fazendo com que as reflexões nessas regiões não sejam visualizadas.



**Figura 5:** Radargrama da seção 1 sem processamento.

Para tornar os refletores presentes nos radargramas mais visíveis para a interpretação, os radargramas foram processados utilizando o próprio aplicativo *GPR Bathymetry*. As etapas de processamento realizadas foram: *Set time zero*, *Remove background*, amplitude instantânea inversa e ganho variável por região. Essas etapas são descritas a seguir:

### a) *Set time zero*

Trata-se de eliminar do radargrama a parte referente à onda aérea, isto é, na prática é retirar a distância em tempo entre a antena transmissora e a antena receptora, que durante a aquisição teve uma separação constante de 1 metro.

### b) *Remove background*

O objetivo desse filtro é remover todo ruído de fundo do radargrama. Este filtro envolve um processo aritmético simples que é a soma de todas as amplitudes presentes no radargrama dividido pelo número

de traços. Essa média é o ruído de fundo, que quando subtraído de cada traço original resulta no radargrama processado (Jol, 2009). Existem algumas variações para este filtro onde, por exemplo, ao invés de utilizar todos os traços utiliza-se um determinado intervalo de traços.

#### c) Amplitude instantânea inversa

Esta função de ganho é baseada na amplitude instantânea média,  $a(t)$ , que é composta pela parte real  $x(t)$  e imaginária  $y(t)$  do traço do GPR (Equação 2). A parte imaginária é a transformada de Hilbert de  $x(t)$  (Hardage, 2010). Um polinômio de grau ( $n$ ) ou uma *spline* é ajustada à amplitude instantânea média e a função ganho resultante é a inversa normalizada do modelo obtido anteriormente (Equação 3).

$$a(t) = \sqrt{x^2(t) + y^2(t)} \quad (2)$$

$$Ganho(t) = \left( \frac{a(t)}{\max(a(t))} \right)^{-1} \quad (3)$$

#### d) Ganho variável por região

Esta ferramenta foi desenvolvida com a finalidade de realçar apenas as regiões de interesse e diminuir o ganho fora dessa região. A possibilidade de reduzir os ruídos fora da região de interesse faz com que o classificador *fclass2* aumente sua eficiência. Nos filtros de ganho disponíveis, atualmente, os radargramas sofrem um ganho constante para cada pixel ou sofrem um ganho que varia em função do tempo, no entanto, ele é constante para um determinado instante de tempo ( $t$ ), o que não acontece com a ferramenta “ganho variável por região”.

## 2.5 Determinação da velocidade

Na Figura 7 é destacada uma posição cuja profundidade de 1,73m foi medida em campo e o intervalo de tempo de propagação do sinal (ida e volta) foi de 106,867ns. Com estas informações calculou-se o valor da velocidade média de propagação supondo-a constante:

$$v = 2 \times \frac{d}{t} = 2 \times \frac{1,76}{106,867} = 0,0329 \frac{m}{ns} \quad (4)$$

O mesmo procedimento foi adotado para outros 2 perfis, obtendo as velocidades de 0,0324 e 0,0328 m/ns. O valor médio obtido foi de 0,0327 m/ns foi muito próximo do valor de 0,033 m/ns encontrado nas bibliografias para a água destilada (Annan, 2003). Uma vez inserido o valor da velocidade de propagação no aplicativo torna-se possível a conversão do radargrama de tempo (nanosegundos) para profundidade (metros).

## 2.6 Classificação

A classificação com o “*fclass2*” busca separar a classe água do restante das feições, resultando dessa maneira em uma imagem com 2 classes. Baseada na análise das amplitudes presentes em cada traço, esta função requisitou baixo esforço computacional nos testes realizados, gastando em média 0,13 segundos para o processamento e exibição da imagem em um processador *intel core i7*. A Figura 6



apresenta um fluxograma que explica a construção da função *fclass2*, onde “i” representa as linhas e “j” as colunas do radargrama.

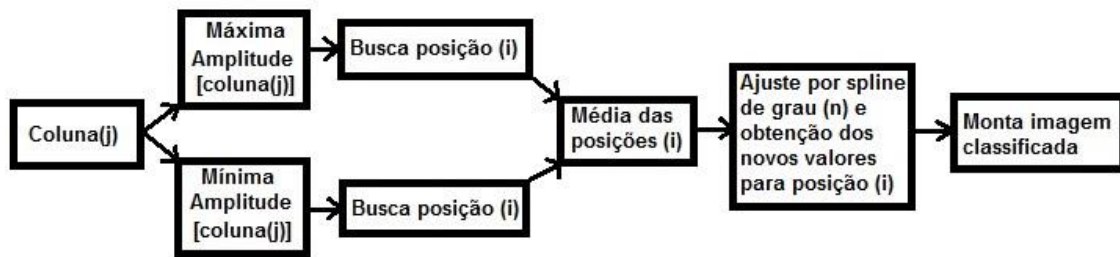


Figura 6: Fluxograma da função *fclass2*.

O arquivo contendo as profundidades de cada traço, proveniente do radargrama classificado, pode ser salvo em um arquivo de formato \*.zzz, necessário para a etapa de espacialização dos radargramas.

## 2.7 Espacialização dos radargramas

Durante a aquisição dos dados foram medidas as coordenadas X, Y e Z, de pontos na superfície, por meio do posicionamento relativo cinemático. De posse dessas informações torna-se possível a atribuição das coordenadas planas X, Y e da cota Z para cada traço do radargrama correspondente à superfície. Para isso foi desenvolvida uma ferramenta que calcula o comprimento total de cada radargrama e o seu número de traços, realizando uma interpolação cúbica de modo que os traços estejam igualmente espaçados entre si. Os pontos de controle, oriundos do levantamento GNSS, podem ser inseridos manualmente em uma tabela ou por meio de um arquivo no formato de texto com extensão \*.xyz. As coordenadas interpoladas da superfície podem ser salvas no formato \*.xyz.

De posse das coordenadas (X,Y,Z) de superfície de cada traço, gravadas no arquivo \*.xyz, e dos valores de profundidade para cada ponto onde ocorreu a reflexão, arquivos \*.zzz da imagem classificado, é possível determinar as coordenadas (X,Y,Z) de cada ponto da reflexão no fundo da represa. Para realizar essa tarefa foi desenvolvida uma ferramenta onde os dados citados acima são inseridos como dados de entrada. Os dados de saída, que são as coordenadas tridimensionais de todos os traços refletidos no fundo da lagoa, são apresentados em uma tabela de saída de dados.

## 2.8 Modelo Digital de Elevação

A ferramenta desenvolvida para a geração de *MDE*'s teve como base as funções disponíveis no software Matlab®. Foram disponibilizados no “*GPR Bathymetry*” três tipos de funções: *Scattered Interpolant*, *Gridada* e *Gridfit*. Serão utilizados termos do texto original, sem traduções, para preservar os nomes das funções e dos métodos utilizados, tornando assim mais fácil a busca por informações adicionais.

- Scattered Interpolant*: retorna uma superfície que passa pelos pontos observados. Esta função usa como método de interpolação: linear, *nearest* e natural (Mathworks, 2015).
- Griddata*: A superfície gerada sempre passa pelos pontos observados. Esta função dispõe dos seguintes métodos de interpolação: linear, *nearest*, natural, *cubic* e *v4* que é um interpolador do tipo *spline* bi harmônico (Sandwell, 1987; Mathworks, 2015).

- c) *Gridfit*: Não passa pelos pontos amostrados, mas permite o controle da suavização. Os esquemas de interpolação usados são o triangular, bilinear, *nearest*. Até a presente data não está inclusa no software Matlab®, sendo obtida a parte (D'Errico, 2006).

Para a interpolação e geração dos *MDEs* foram utilizadas as funções acima citadas, com os respectivos interpoladores, natural, v4 e bilinear. Foram utilizadas as coordenadas da borda da lagoa, obtidas com a estação total para compor os dados a serem interpolados. Assim, a partir dos *MDEs* gerados, foi calculado o volume da represa com o auxílio do módulo de Volume disponível no *GPR Bathymetry*.

## 2.9 Análise estatística dos *MDEs*

Para analisar estatisticamente a qualidade dos *MDEs* optou-se pela análise das discrepâncias entre o *MDE* (ecobatímetro) e o *MDE* (GPR), após a retirada dos *outliers* através do *boxplot*. De acordo com Li (1988), uma das maneiras de comparação entre dois modelos de elevação seria considerar como variável randômica a diferença de altura ( $\Delta h$ ) entre os modelos digitais de elevação. Para isso foram computadas as discrepâncias  $\Delta h_i$  entre as altitudes, pixel a pixel de toda população (Equação 5).

$$\Delta h_i = h_{(i)ECO} - h_{(i)GPR} \quad (5)$$

Uma combinação da média das discrepâncias,  $\overline{\Delta h}$ , com o desvio padrão da amostra pode ser usada como uma medida da acurácia, *Ac*, do *MDE*, conforme Equação 6 (Li, 1988).

$$Ac = \overline{\Delta h} \pm Sd \quad (6)$$

De acordo Li (1988), esta medida possui as seguintes características: a média representa uma translação da superfície gerada em relação à referência. Ela pode ser devido à inexatidão nas coincidências das posições  $l_i$  para  $Z_{Ecobatímetro}$  e  $Z_{GPR}$ , Equação 5, bem como à efeitos sistemáticos. Se for nula, *Ac* é igual ao RMS das discrepâncias. O desvio padrão *Sd*, mostra o quão bem o *MDE* se ajustou às observações de referência.

De acordo com Montgomery and Runger (2011) o teste t de *Student* para amostras pareadas ou dependentes, pode ser aplicado em casos onde medidas são feitas em uma mesma unidade amostral a partir de dois métodos diferentes, com o objetivo de verificar se os resultados obtidos pelos dois métodos são estatisticamente iguais. O procedimento consistiria então em analisar as diferenças entre as leituras com cada método, recaindo no teste relativo sobre uma única média. A estatística do teste para o caso em questão é bilateral e é dada por:

$$H_0: \overline{\Delta h} = 0 \quad \rightarrow \quad \text{Hipótese nula} \quad (7)$$

$$H_1: \overline{\Delta h} \neq 0 \quad \rightarrow \quad \text{Hipótese alternativa} \quad (8)$$

$$t_{calculado} = \frac{\overline{\Delta h}}{\frac{Sd}{\sqrt{n}}} \quad \rightarrow \quad \text{Estatística do teste} \quad (9)$$

$$t_{tabelado}, t_{-\frac{\alpha}{2}, n-1} < t_{calculado} < t_{tabelado}, t_{\frac{\alpha}{2}, n-1} \quad \rightarrow \quad \text{Região de aceitação} \quad (10)$$

Onde  $\overline{\Delta h}$  é o valor para a média das discrepâncias que se quer testar; *Sd* desvio padrão; *n* tamanho da amostra;  $t_{calculado}$  é o valor da estatística do teste t que deverá ser comparado com os valores tabelados ( $t_{tabelado}$ ) da tabela de t *Student*, para um determinado nível de significância ( $\alpha$ ) e de grau de liberdade (*n*-1).

Para atingir os objetivos deste estudo serão comparadas diretamente as duas profundidades obtidas para a mesma lagoa, através da diferença entre as respectivas medidas e aplicado o teste *t* de *Student* para amostras pareadas ou dependentes a fim de verificar se os modelos são estatisticamente iguais.

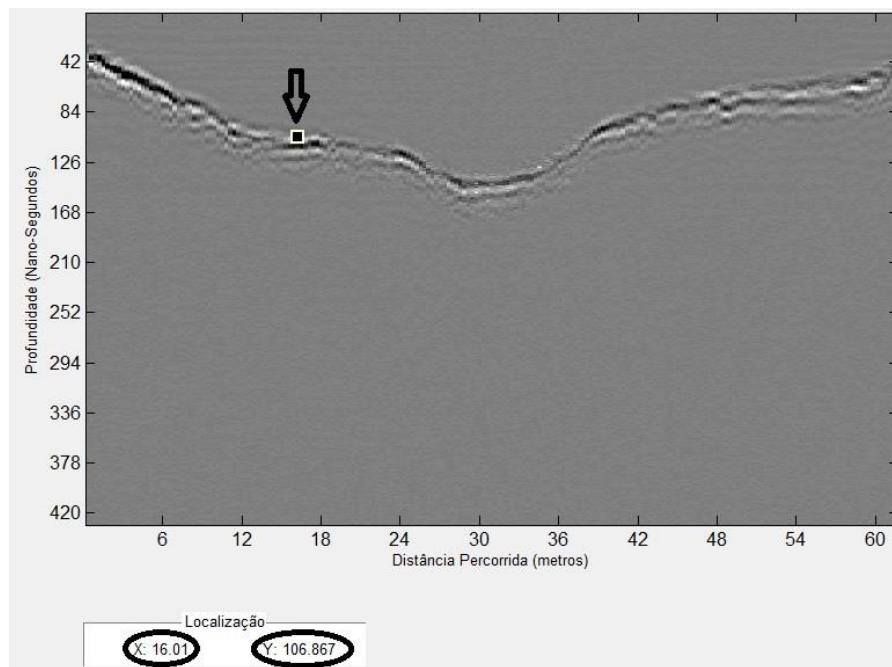
Utilizou-se o software “minitab 17<sup>®</sup>” para o cálculo do tamanho da amostra com os seguintes parâmetros: nível de significância ( $\alpha$ ) = 5%, Poder do teste ( $1 - \beta$ ) = 80%, diferença mínima detectável para o teste de 5 cm e desvio padrão para as funções *griddata*, *gridfit*, *Scattered Interpolant* igual a 0,15 m, 0,15 m e 0,14 m, respectivamente (Tabela 5).

As amostras foram escolhidas aleatoriamente sobre os MDE's utilizando o *GPR Bathymetry*. As informações de altitude, para os pontos aleatórios, foram gravadas no formato \*.xlsx para uso no software “minitab 17<sup>®</sup>”.

Como todo teste paramétrico, o teste *t* pareado exige a normalidade dos dados. Para verificação desta normalidade foi aplicado o teste de *Anderson-Darling* e a normalização foi realizada utilizando a transformação de *Johnson*. Em seguida foi aplicado o teste de hipótese *t* pareado, adotou-se para o nível de significância ( $\alpha$ ) e erro do tipo II ( $\beta$ ) 5% e 20%, respectivamente.

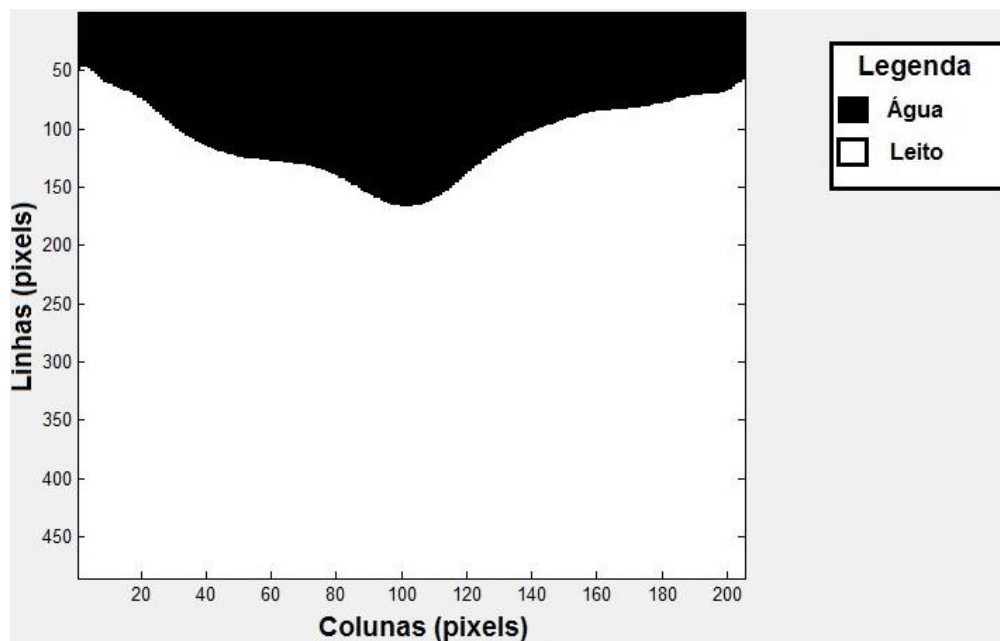
### 3. Resultados e Discussões

A Figura 7 apresenta o mesmo radargrama da Figura 5, isto é, seção 1, após as etapas de processamento descritos na seção 2.4, itens (a), (b), (c) e (d), combinado com a remoção da onda direta. É possível perceber a melhora significativa no aspecto visual do radargrama, permitindo melhor visualização dos sinais presentes.



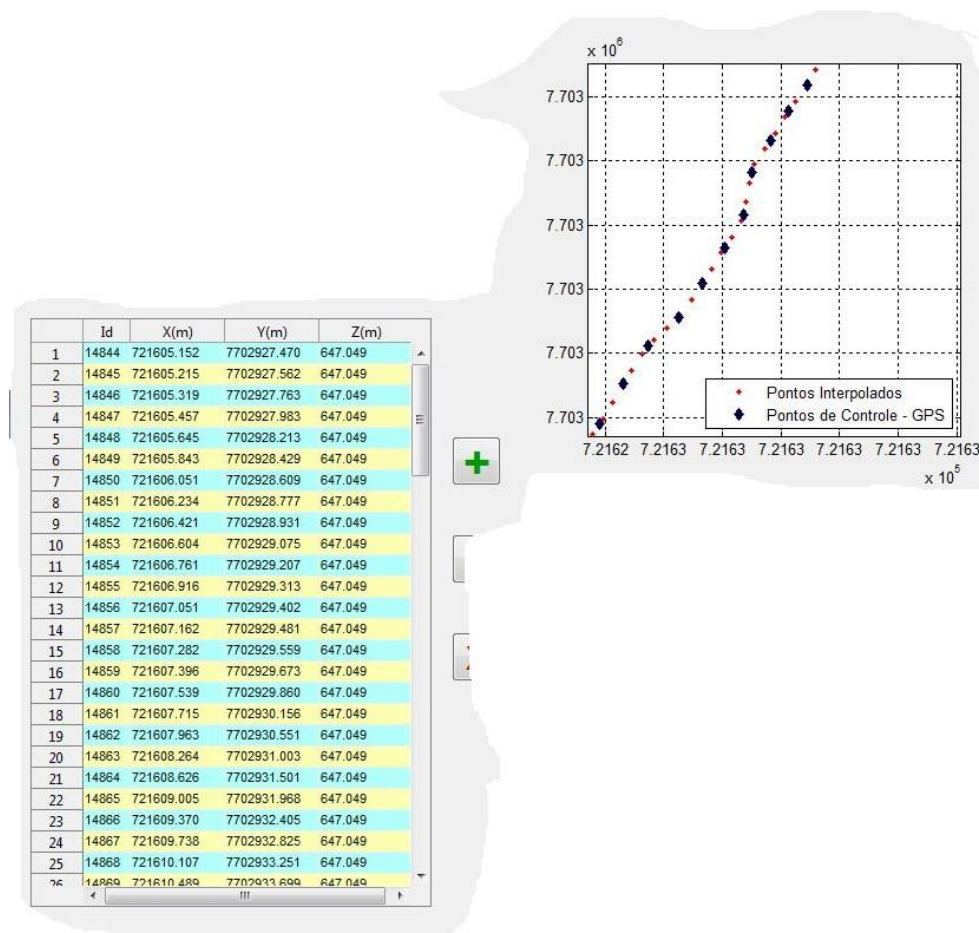
**Figura 7:** Seção 1 pós-processada. Também mostra um dos pontos de controle e suas coordenadas.

A Figura 8 apresenta a imagem classificada referente ao radargrama processado da seção 1 (Figura 7), onde é possível verificar a classe (água) e a classe (leito). Ao analisar as Figuras 7 e 8 é possível verificar que o classificador *fclass2* teve um comportamento promissor.



**Figura 8:** Aspecto da seção após classificação pelo fclass2.

O aspecto dos pontos de controle e dos pontos interpolados pode ser visualizado no gráfico da Figura 9.



**Figura 9:** Espacialização de todos os traços do radargrama para o perfil 1 (Superfície).

As coordenadas da subsuperfície de todos os traços de todas as seções levantadas podem ser visualizadas na tabela da direita na Figura 10.

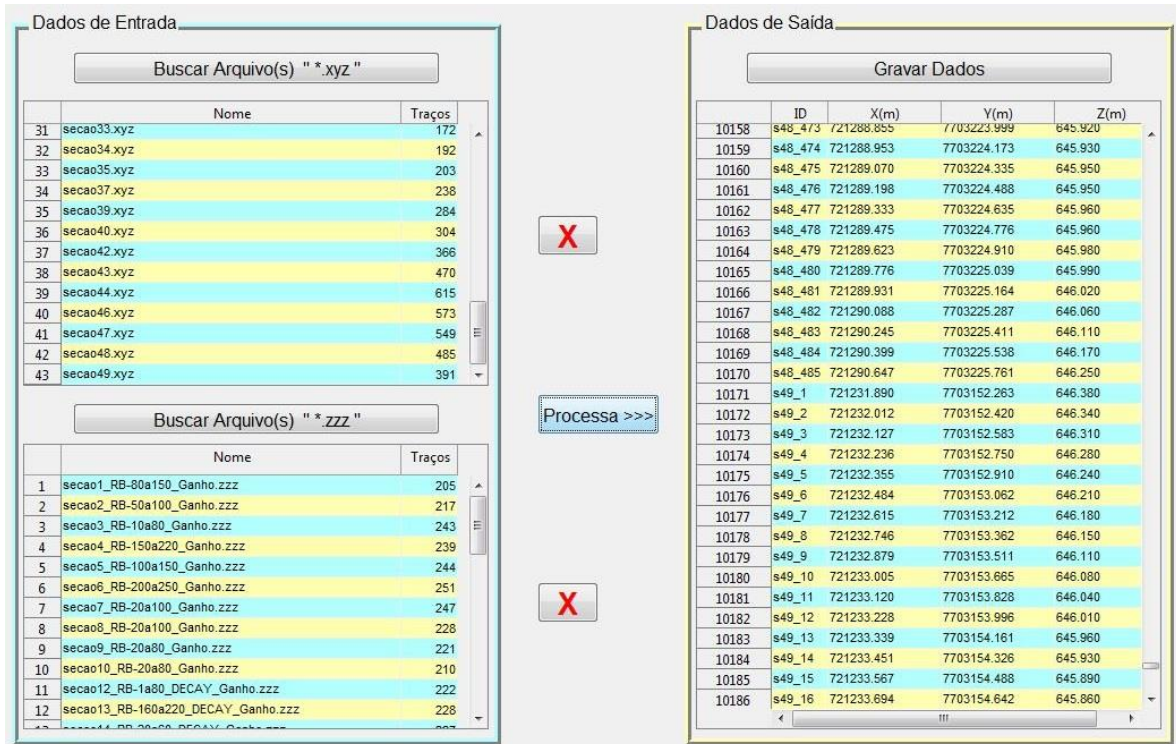


Figura 10: Arquivos de entrada e coordenadas do relevo submerso.

A interface desenvolvida pelo programa, com também os MDE's e os valores dos volumes obtidos respectivamente pelos métodos ecobatímetro e GPR, são mostrados nas Figuras 11 e 12. Nesses, a escala em níveis de cinza se refere às altitudes que estão em metros.

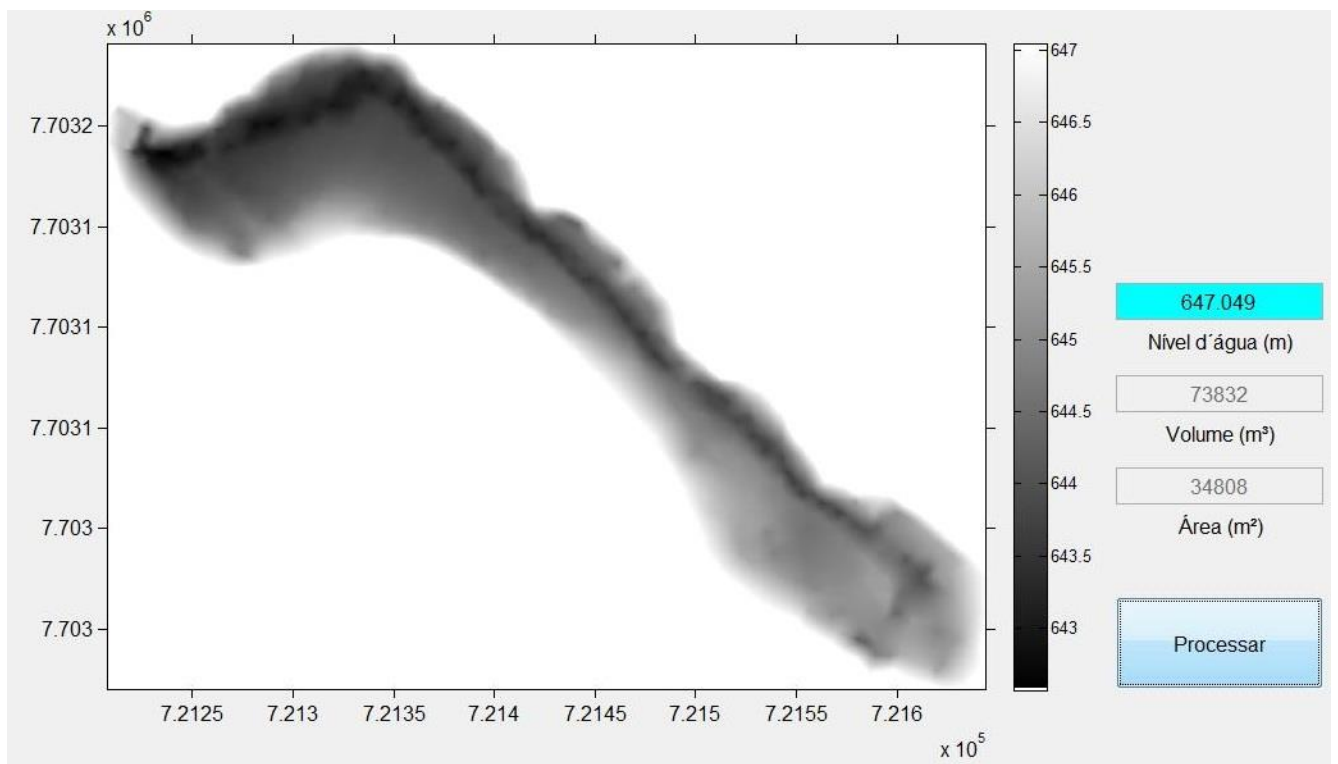
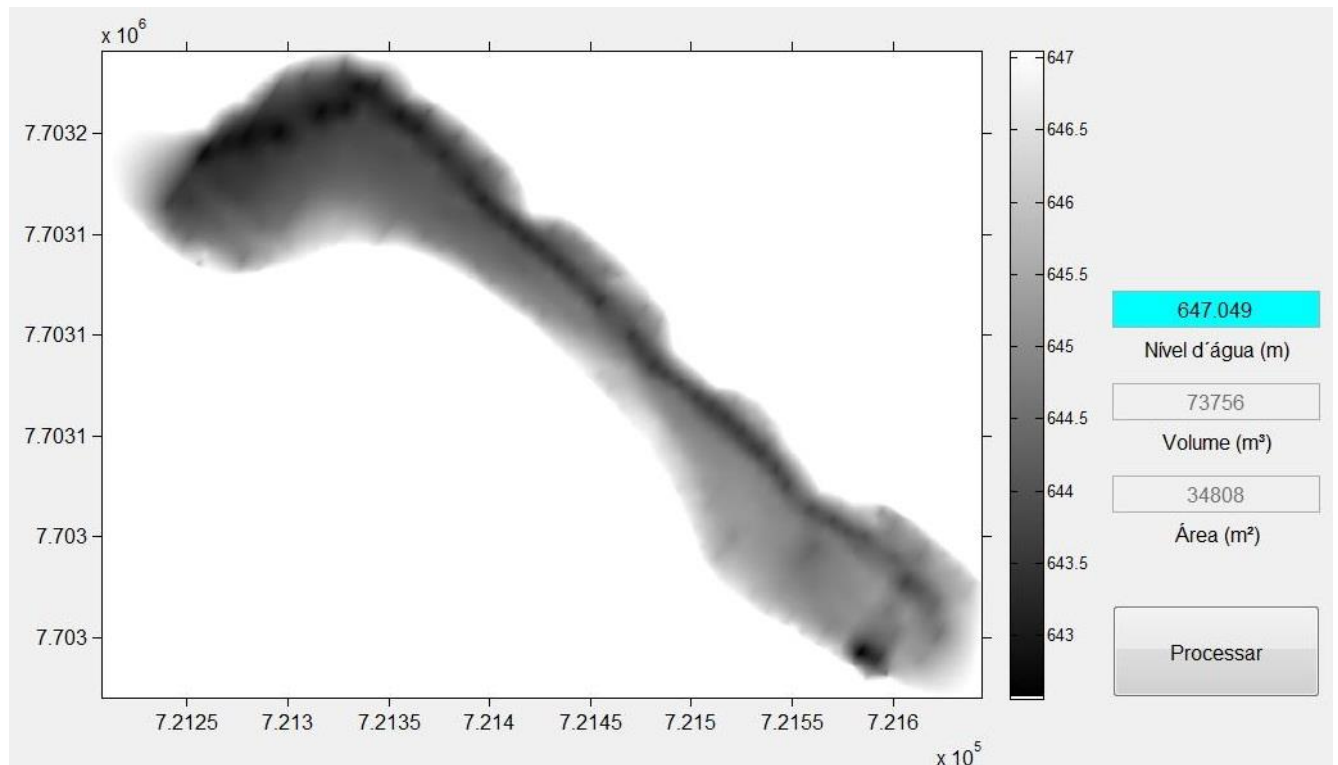


Figura 11: Volume calculado a partir do MDE gerado pela função *Scattered Interpoland*, interpolador natural, com dados do ecobatímetro.



**Figura 12:** Volume calculado a partir do *MDE* gerado pela função *Scattered Interpolant*, interpolador natural com dados do GPR.

Analisando as Figuras 11 e 12 em relação aos *MDEs* gerados e os volumes da represa obtidos com as tecnologias empregadas, observa-se visualmente, que os resultados não apresentam diferenças significativas. No entanto, é necessário realizar comparações quantitativas, a fim de quantificar tais diferenças e analisar estatisticamente os resultados.

A Tabela 3 apresenta os dados de caracterização da lagoa, considerando o nível d'água igual a 647,05m. As comparações serão realizadas entre as técnicas do ecobatímetro (referência) e GPR, com o mesmo interpolador. Observa-se que a área de superfície possui uma variação máxima de 0,4% para a função *Griddata* e a menor para *Scattered Interpolant* com 0% de diferença. Para o volume a maior variação ficou para a função *Griddata* com 98 m<sup>3</sup> e a menor para a função *Gridfit* com 15 m<sup>3</sup>, correspondendo a 0,0002% de diferença. Para as amplitudes a maior diferença ficou com a função *Griddata* com 36 cm contra 1 cm da função *Scattered Interpolant*.

**Tabela 3:** Caracterização da lagoa.

Função (Interpolador)	GPR			ECOBATÍMETRO		
	Scattered Interpolant (Natural)	Griddata (V4)	Gridfit (Bilinear)	Scattered Interpolant (Natural)	Griddata (V4)	Gridfit (Bilinear)
<b>Perímetro (m)</b>	1484	1484	1484	1484	1484	1484
<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	34808	34549	34689	34808	34698	34693
<b>Volume (m<sup>3</sup>)</b>	73756	75314	75624	73832	75412	75639
<b>Maior Z (m)</b>	647,05	647,05	647,05	647,05	647,05	647,05
<b>Menor Z (m)</b>	642,56	642,51	642,51	642,57	642,31	642,25
<b>Amplitude (m)</b>	4,49	4,54	4,54	4,48	4,90	4,80

Observa-se que, para os dados de caracterização da lagoa, que as diferenças entre os modelos obtidos pelas técnicas GPR e ecobatímetro são muito pequenas, e que a função *Scattered Interpolant* apresentou as menores diferenças, seguida das funções *Gridfit* e *Griddata*, respectivamente.

A Tabela 4 mostra o volume armazenado pela lagoa e a área superficial correspondente em função da cota / altitude.

**Tabela 4:** Altitude x Área x Volume

Interpolador	Altitude (m)	ECOBATÍMETRO		GPR	
		Área (m <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )	Área (m <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )
<b>Scattered (Natural)</b>	643	174	21	294	25
	644	7097	2630	7085	2857
	645	19360	15877	19558	15984
	646	28551	40625	28426	40704
	647	34449	72138	34188	72073
<b>Griddata (V4)</b>	643	352	64	555	76
	644	7570	3060	7615	3234
	645	19747	16710	20014	16860
	646	29016	41913	28831	41988
	647	34479	73717	34294	73627
<b>Gridfit (Bilinear)</b>	643	359	67	561	74
	644	7598	3079	7623	3251
	645	19779	16739	20032	16858
	646	29144	42024	28984	42070
	647	34506	73944	34493	73929

Pode-se observar na Tabela 4 que as funções *Griddata* e *Gridfit* apresentaram valores semelhantes para todas as altitudes. No entanto, a função *Scattered Interpolant* apresentou valores mais discrepantes das duas funções anteriores quanto menor a altitude.

Para aplicar a teoria apresentada por Li (1988) foi construída a Tabela 5, onde se pode verificar que as acurácias estimada pelo GPR para os *MDEs* gerados pelas funções *Scattered Interpolant*, *Griddata* e *Gridfit* foram de  $5 \pm 14$  cm,  $4 \pm 15$  cm e  $4 \pm 15$  cm, respectivamente.

**Tabela 5:** Análise estatística das discrepâncias.

Índices estatísticos	MDE (Ecobatímetro) x MDE (GPR)		
	Scattered Interpolant (Natural)	Griddata (V4)	Gridfit (Bilinear)
$\Delta h_{\text{máx}}$ (m)	0,42	0,43	0,43
$\Delta h_{\text{min}}$ (m)	-0,33	-0,38	-0,38
Amplitude (m)	0,75	0,81	0,81
Média (m)	0,05	0,04	0,04
Desvio Padrão (m)	0,14	0,15	0,15
RMS (m)	0,15	0,16	0,15
Acurácia (m)	$0,05 \pm 0,14$	$0,04 \pm 0,15$	$0,04 \pm 0,15$

O tamanho amostral obtido foi de 73, 73 e 64 amostras para as funções *Griddata*, *Gridfit* e *Scattered Interpolant*, respectivamente.

Os testes de normalidade dos dados resultaram em um P-valor = 0,026 para a função *Griddata*, P-valor < 0,005 para a função *Scattered Interpolant* e P-valor < 0,005 para a função *Gridfit*. Como os valores obtidos para o P-valor foram menores que 0,05 a hipótese de normalidade, para os três modelos, foi rejeitada com  $\alpha = 5\%$ .

Os testes de normalidade aplicados, após a transformação de *Johnson*, resultaram nos seguintes P-valor: 0,998 para a função *Griddata*, 0,863 para a função *Scattered Interpolant* e 0,892 para a função *Gridfit*, resultando na aceitação da hipótese de normalidade a um nível de significância de 5% para os

três modelos. Em seguida foi aplicado o teste t pareado e o resultado está apresentado na Tabela 6. Todos os testes estatísticos foram realizados com o software “minitab 17®”.

**Tabela 6:** Resultado do teste t pareado.

	<i>Griddata</i> Ecobatímetro x GPR	<i>Scattered Interpolant</i> Ecobatímetro x GPR	<i>Gridfit</i> Ecobatímetro x GPR
Graus de liberdade	72	63	72
Estatística t ( <i>T-valor</i> )	-1,98 < <b>0,19</b> < +1,98	-1,98 < - <b>0,27</b> < +1,98	-1,98 < <b>0,01</b> < +1,98
P-valor	0,849	0,786	0,990

Pela análise dos resultados do teste t pareado, para os *MDEs* obtidos pelas funções *Griddata*, *Scattered Interpolant* e *Gridfit*, com os métodos ecobatímetro e GPR, não se rejeita a hipótese nula. Isto é, para o nível de significância de 5% o teste mostra não existir, estatisticamente, diferença entre os modelos gerados pelo ecobatímetro e GPR, para as três funções aplicadas.

## 4. Conclusão

As acurácias estimadas pelo GPR para os *MDEs* gerados pelas funções *Scattered Interpolant*, *Griddata* e *Gridfit* foram de  $5 \pm 14$  cm,  $4 \pm 15$  cm e  $4 \pm 15$  cm respectivamente, mostrando que os *MDEs* se ajustaram bem à referência.

Os resultados para o teste t pareado mostraram, para os *MDEs* obtidos pelas funções *Griddata*, *Scattered Interpolant* e *Gridfit*, não existir estatisticamente, diferenças entre os modelos gerados pelo ecobatímetro e GPR, para as três funções aplicadas.

Os resultados obtidos no cálculo do volume se mostraram promissores, uma vez que a maior variação ocorreu com uso da função *Griddata* com  $98 \text{ m}^3$  e a menor com o uso da função *Gridfit* com  $15 \text{ m}^3$ , correspondendo a 0,0002% de diferença. Considerando todos interpoladores, com ecobatímetro e GPR, a maior diferença entre os volumes foi de 2%, cerca de  $1900 \text{ m}^3$ .

O classificador *fclass2*, considerando as classes água e leito, apresentou bom desempenho, sendo capaz de gerar *MDEs* que estatisticamente não foram diferentes dos *MDEs* gerados pelo ecobatímetro. A classificação dos radargramas, usando um processador core i7, utilizou um tempo de 0,36 segundos em média com radargramas de resolução aproximada de  $630 \times 135$  pixels.

Vale ressaltar que o método GPR mostrou-se eficaz para a identificação do fundo da represa. As espessuras das camadas de água investigadas variaram de aproximadamente 0,30 m a 5 m. Não se encontrou uma limitação quanto à espessura mínima de água investigável pelo GPR. A única limitação nesse sentido foi o espaço ocupado pela embarcação que impediu o sensor de chegar próximo às bordas.

Esperava-se identificar a camada de sedimentos na represa, o que não se tornou possível devido à alta atenuação do sinal GPR, que pode ter sido ocasionado por uma alta condutividade da água e/ou dos minerais que constituem o sedimento ou pouco contraste dielétrico entre as camadas.

Conclui-se que, pela análise dos dados apresentados nas Tabelas 3 e 4, não houveram diferenças significativas entre os Modelos Digitais de Elevações obtidos pelas técnicas GPR e o ecobatímetro. Os *MDEs* se mostraram similares entre si, mesmo considerando uma comparação entre interpoladores diferentes. Para uma comparação levando em consideração o mesmo interpolador, a função *Scattered Interpolant* apresentou as menores diferenças entre *MDEs*, seguida das funções *Gridfit* e *Griddata*, respectivamente. Pode-se observar que as funções *Griddata* e *Gridfit* apresentaram valores



semelhantes para todas as altitudes. No entanto, a função *Scattered Interpolant* apresentou valores mais discrepantes em relação às outras funções, principalmente para menores altitudes.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adepelumi, A. A., Fayemi, O. E., Akindulureni, J. “Geophysical Mapping of Subsurface Stratigraphy Beneath a River Bed Using Ground Penetrating Radar: Lagos Nigeria Case Study”. *Universal Journal of Geoscience*. v.1, p. 10-19. 2013.
- Annan, A. P. “Ground penetrating radar: Principles, procedures & applications”. *Sensors & Software Inc. Technical Paper*. 2003. Acesso em 10 de julho, 2015. <http://www-rohan.sdsu.edu/~geology/jiracek/sage/documents/Sensors%20and%20Software%20GPR%20Manual.pdf>.
- Aquino, W. F. and Lopez, A. G. “Estudo do assoreamento de corpos d’água pelo método geofísico de geo-radar.” *XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental*. 2000.
- Aranha, P. R. A., Augustin, C. H. R. R. e Sobreira, F. G. “The use of GPR for characterizing underground weathered profiles in the sub-humid tropics.” *Journal of Applied Geophysics*. v. 49, p. 195 - 210, 2002.
- Carvalho, N. O., Filizola Júnior, N. P. F., Santos, P. M. C., Lima, J. E. F. W. *Guia de avaliação de assoreamento de reservatório*. Brasília, DF. ANEEL, Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas. 2000.
- Castelo B., R. M. G., E Castro, D. L. “4-D Ground penetrating radar monitoring of a hydrocarbon leakage site in Fortaleza (Brazil) during its remediation process”. *Journal of Applied Geophysics*. v. 54, p. 127-144. 2003.
- Davis, J. E Annan, A. P. “Ground Penetrating Radar for High-Resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy”. *European Association of Geoscientists & Engineers*. v. 37. p. 531 - 551. 1989.
- D’Errico, J. “Surface Fitting using *Gridfit*.” Matlab Central. Acesso em 12 de outubro de 2015. <<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/8998-surface-fitting-using-Gridfit>>. 2006.
- Faria, S. F., Vieira, C. A. O., Aranha, P. R. A. A., Carvalho, C. A. B., Ferreira, E. R. “Identificação Automática das Camadas que Compõem o Pavimento e Zona Zero com o Uso de Imagens de GPR”. *Revista Brasileira de Pavimentação*. Ano VII, nº 24. 2012.
- Hardage, B. “Instantaneous Seismic Attributes Calculated by the Hilbert Transform.” *Search and Discovery Journal*. 2010. Acesso em 10 de outubro de 2015. <<http://www.searchanddiscovery.com/pdfz/documents/2010/40563hardage/images/hardagejune.pdf>>.
- Jol, H. M. *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*. Elsevier. 2009.
- Khare, N.; Chaturvedi, S. K.; Asthana, R. E Beg, M. J. “Continuous Bathymetric Profiling Survey in Priyadarshini Water Body of Schirmacher Oasis, Central Dronning Maud Land, Antarctica using Echo Sounder and Ground Penetrating Radar: A Comparison”. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*. v.5, p. 30-34. 2012.
- Li, Z. “On the measure of digital terrain model accuracy”. *Photogrammetric Record*. University of Glasgow. v.12, p. 873-877. 1988.
- Mastella, A. D. F. and Nishijima, T. “Educação Ambiental e Recursos Hídricos: Um Olhar Sobre Santa Maria – RS”. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*. Cascavel, v.2, p. 142 – 151. 2011.

- Mathworks. “Documentation”. Acesso em 12 de outubro de 2015. <<http://www.mathworks.com/help/>>. 2015.
- Montgomery, D. C., and Runger, G. C. *Applied Statistics and Probability for Engineers*. 5th Edition. John Wiley & Sons, Inc. 2011.
- Saarenketo, T. “Electral properties of water in clay and silty soil”. *Journal of Applied Geophysics*. v. 40, p. 73 - 78. 1998.
- Sandwell, D. T. “Biharmonic spline interpolation of GEOS-3 and SEASAT altimeter data”. *Geophysical Research Letters*, v. 14, n° 2, p. 139-142, 1987.
- Seyfried, D. and Schoebel, J. “Ground penetrating radar for asparagus detection”. *Journal os Applied Geophysics*. v. 126, p. 191 – 197, 2016.
- Singh, K. K. “Application of Ground Penetrating Radar for hydro-geological study”. *Journal of Scientific & Industrial Research*. v. 65, p. 160-164. 2006.
- Moutinho, L., Porsani, J. L., and Porsani, M. J. “Deconvolução preditiva de dados GPR adquiridos sobre lâmina d’água: exemplo do Rio Taquari, Pantanal Matogrossense”. *Revista Brasileira de Geofísica*, v.23, p. 61-74. 2005.
- Parizzi, M. G., Aranha, P. R., Costa, R. D., da Silva Filho, J. A., Tupinambás, M. M., & Cajazeiro, J. M. “Geofísica e sedimentologia aplicadas à avaliação do grau de assoreamento de trecho do Rio das Velhas em Rio Acima, Minas Gerais”. *Revista Geonomos*. v.19, p. 152-162. 2011.
- Wang, P., Hu, Z., Zhao, Y., Li, X. “Experimental study of soil compaction effects on GPR signals”. *Journal of Applied Geophysics*. v. 126, p. 128 – 137, 2016.
- Zhu, Z., He, X., Le, G., Liu, Q. and Li, J. “Ground Penetrating Radar Exploration for Ground Water and Contamination”. *PIERS Proceedings*, Moscow, Russia. V.26, p. 1316 - 1320. 2009.

Recebido em 26 de dezembro de 2015.

Aceito em 18 de agosto de 2016.