

SANDRO HENRIQUE DE FARIA

**AVALIAÇÃO DO USO DO GPR EM APLICAÇÕES
BATIMÉTRICAS E DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE
LIVRE PARA INTERPRETAÇÃO DE RADARGRAMAS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2016

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

F224a Faria, Sandro Henrique de, 1979-
2016 Avaliação do uso do GPR em aplicações batimétricas e desenvolvimento de software livre para interpretação de radargramas / Sandro Henrique de Faria. – Viçosa, MG, 2016. xx, 154f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndice.

Orientador: Dalto Domingos Rodrigues.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia civil. 2. Mecânica do solo. 3. Radar de penetração no solos. 4. Geotecnia. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. II. Título.

CDD 22. ed. 624.1

SANDRO HENRIQUE DE FARIA

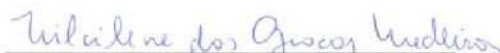
**AVALIAÇÃO DO USO DO GPR EM APLICAÇÕES
BATIMÉTRICAS E DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE
LIVRE PARA INTERPRETAÇÃO DE RADARGRAMAS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 10 de maio de 2016.



Paulo Roberto Antunes Aranha
(Coorientador)



Nilcilene das Graças Medeiros
(Coorientador)



Márcio Rocha Francelino



Edgar Ricardo Ferreira



Dalto Domingos Rodrigues
(Orientador)

“Fazer a vontade de Deus é fazer o que Deus quer e querer o que Deus faz”
(Santo Afonso)

Dedicatória

À minha esposa Daniela, que esteve durante todo esse período ao meu lado, colaborando em todos os aspectos, para que esse sonho fosse alcançado, te amo. Aos meus pais Ailton e Valma pelas doces palavras, nunca esquecerei de vocês.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus pelo dom da vida e por ter sido minha fortaleza.

À minha querida esposa, que esteve ao meu lado em todos momentos, me dando força e ajudando, inclusive, nas coletas de dados para este trabalho.

Aos meus pais, pelo carinho, paciência e dedicação em todas as etapas de minha vida.

À família, pelo incentivo, apoio e dedicação. Em especial aos tios Romilton Faria e Denise que não mediram esforços para que eu concluísse minha graduação. Sem este primeiro degrau hoje não estaria aqui.

À minha prima Cristina, que me ajudou muito nas correções ortográficas, muito obrigado.

Aos meus afilhados, Marina, Leandro, Laís, Davi e Malu que me alegraram em diversos momentos.

À Universidade Federal de Viçosa, através do Departamento de Engenharia Civil, pela oportunidade de realização do doutorado.

Ao Professor Orientador Dalto Domingos Rodrigues e à professora Nilcilene das Graças Medeiros pela dedicação, incentivo, profissionalismo ético e amizade.

Ao Professor Paulo Roberto Antunes Aranha, pelo tempo dedicado aos trabalhos de campo, paciência, contribuições acadêmicas, amizade, incentivo e por emprestar o GPR utilizado nas pesquisas.

Ao professor Edgar Ricardo Ferreira, por ter se empenhado na minha redistribuição para Juiz de Fora, sem isso não seria possível a conclusão deste trabalho.

Ao amigo Alessandro Salles Carvalho, pela companhia nas disciplinas cursadas juntos, pelas inúmeras viagens à UFV e amizade. Foram muitos momentos bons e de aprendizagem.

Em especial, ao amigo Edilson José do Carmo, que sempre esteve presente e colaborou para este trabalho de forma direta, ajudando nos trabalhos de campo e fornecendo dados do seu trabalho de mestrado.

A Tiago Tavares, que muito me ajudou nos levantamentos realizados na represa da UFV.

Aos professores do Setor de Engenharia de Agrimensura, pelos ensinamentos.

Aos colegas do núcleo de Construção Cívica do Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais.

Muitos ajudaram nesta caminhada. Perdão às omissões.

BIOGRAFIA

SANDRO HENRIQUE DE FARIA, filho de Ailton Antônio de Faria e Valma Henrique Faria, nasceu em 02 de fevereiro de 1979, na cidade de Alto Jequitibá, Minas Gerais.

Em 1997, ingressou no Curso de Engenharia Civil na Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora - MG, concluindo a graduação no final de 2002.

De 2003 a 2006 prestou serviços de topografia e controles tecnológicos de solos, asfaltos e concretos, pela Exacta Gerenciamento Tecnologia e Topografia LTDA.

De 2006 a 2008 prestou serviços diversos de pavimentação pela JRO Pavimentação LTDA a diversos órgãos públicos e privados dos estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo.

Em julho de 2008, ingressou na pós-graduação através do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – Área de Concentração: Informações Espaciais. Em nível de mestrado, na Universidade Federal de Viçosa.

Em 2009 prestou serviços de terraplenagem e pavimentação pela construtora ENGETRAN.

De outubro de 2009 a fevereiro 2010 exerceu a função de coordenador e professor do curso de Engenharia Civil da Faculdade do Noroeste de Minas – FINOM.

De 2010 a 2011 como professor substituto no departamento de Transportes e Geotecnia na Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora.

Em agosto de 2011, ingressou na pós-graduação através do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – Área de Concentração: Informações Espaciais. Em nível de doutorado, na Universidade Federal de Viçosa.

De 2012 a 2013 como professor do Instituto Federal do Sul de Minas Gerais.

Desde 2013 como professor do Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais.

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS	IX
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	XII
LISTA DE FIGURAS	XIV
LISTA DE TABELAS	XVI
RESUMO	XVII
ABSTRACT	XIX
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Caracterização do problema.....	5
1.2 Justificativa.....	6
1.3 Hipótese.....	7
1.4 Objetivos.....	7
1.5 Organização da Tese.....	8
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	10
2.1 Funcionamento do GPR.....	10
2.1.1 Princípios básicos do GPR.....	13
2.1.1.1 Equações de Maxwell.....	13
2.1.1.2 Equações constitutivas.....	14
2.1.2 Onda eletromagnética.....	15
2.1.3 Propriedades das ondas eletromagnéticas (EM).....	15
2.1.4 Condutividade e permissividade elétrica.....	19
2.1.5 Reflexão, Refração e Transmissão dos sinais.....	20
2.1.6 Velocidade e atenuação do sinal.....	23
2.1.7 Fator de performance.....	26
2.2 Propriedades elétricas da água.....	27
2.3 Influência da água nos solos.....	29
2.3.1 Água higroscópica e água de adsorção ou adesiva.....	30
2.3.2 Água Capilar.....	31
2.3.3 Água livre ou gravitacional.....	31
2.4 Características elétricas dos meios.....	31
2.5 Modos de aquisição dos dados.....	33
2.6 Aquisição dos dados.....	35
2.6.1 Frequência da antena.....	36
2.6.2 Tempo de janela.....	37
2.6.3 Intervalo temporal de amostragem.....	38
2.6.4 Intervalo espacial de amostragem.....	39
2.6.5 Separação entre as antenas.....	39

2.6.6	Linhas de levantamento	40
2.6.7	Orientação das antenas.....	40
2.7	Tratamentos dos dados do GPR.....	41
2.7.1	Pré-Processamento.....	41
2.7.1.1	“ <i>Declipping</i> ”	41
2.7.1.2	Filtragem DC	42
2.7.1.3	Marcação do “tempo zero”	42
2.7.1.4	Ganhos temporais	42
2.7.2	Processamento avançado	43
2.7.2.1	Migração	43
2.7.2.2	Análise de velocidade	43
2.7.2.3	Correção estática.....	44
2.7.2.4	Conversão em profundidade	44
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	45
3.1	Caracterização das áreas de estudo	45
3.2	Instrumentação utilizada	46
3.3	Planejamento e Levantamento	47
3.4	Desenvolvimento do Software.....	51
a)	Classificador <i>fclass2</i>	52
b)	Classificador <i>fclass3</i>	52
c)	Remoção das elevações e depressões espúrias	57
d)	<i>Remove Background</i>	57
e)	Amplitude instantânea inversa.....	58
f)	Ganho variável por região.....	58
	ARTIGO 1: EVALUATING SEMI-AUTOMATIC BATHYMETRIC RADARGRAMS	60
	ARTIGO 2: AVALIAÇÃO DO GPR NA ESTIMATIVA DA BATIMETRIA DE UMA CAIXA DE DECANTAÇÃO EMPREGANDO O APLICATIVO GRATUITO “GPR BATHYMETRY” NA ANÁLISE DOS RADARGRAMAS	81
	ARTIGO 3: AVALIAÇÃO DE RADARGRAMAS BATIMÉTRICOS PARA CÁLCULO DE VOLUME DE REPRESA EMPREGANDO O CLASSIFICADOR “FCLASS2”	98
4.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES GERAIS	120
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	122
	APÊNDICE.....	128
a)	Configurações	128
b)	Visualização de Radargramas	128
c)	Ferramenta de Edição	130
d)	Uso do Classificador <i>fclass2</i>	134
e)	Uso do classificador <i>fclass3</i>	134
f)	Uso do classificador <i>fclass3</i> suavizado.....	135
g)	Espacialização de Radargrama – SUPERFÍCIE	136
h)	Espacialização de Radargrama – SUBSUPERFÍCIE	141
i)	Modelo Digital de Elevação - MDE	142

j)	Módulo de Volume	145
k)	Comparação entre MDEs.....	147
l)	<i>Set Time Zero</i>	149
m)	<i>Remove Background</i>	151
n)	Amplitude instantânea inversa.....	152
o)	Ganho variável por região.....	152

LISTA DE SÍMBOLOS

K^*	Permissividade dielétrica relativa, valor dielétrico ou constante dielétrica
K^*_1	Valor da permissividade dielétrica relativa da primeira camada
K^*_2	Valor da permissividade dielétrica relativa da segunda camada
ω	Frequência angular
ϵ_0	Permissividade dielétrica no vácuo
ϵ	Permissividade dielétrica
ϵ_1	Permissividade do meio 1
ϵ_2	Permissividade do meio 2
K'	Parte real do valor dielétrico
K''	Fator de perda
K'''	Parte imaginária do valor dielétrico
t	Tempo
θ	Ângulo
v	Velocidade de propagação
σ	Condutividade elétrica
c	Velocidade da luz no vácuo
\vec{D}	Vetor indução elétrica
ρ	Densidade de carga
\vec{B}	Vetor Densidade de fluxo magnético
\vec{H}	Vetor Campo magnético
\vec{J}	Vetor Densidade de corrente elétrica
\vec{E}	Vetor Campo elétrico
A_1	Amplitude de reflexão medidas de pico a pico
A_m	Amplitude de reflexão da placa de metal medidas de pico a pico
λ	Comprimento de onda
α	Constante de atenuação
β	Parâmetro de fase
μ_0	Permeabilidade magnética no vácuo

μ	Permeabilidade magnética
μ_r	Permeabilidade magnética relativa
μ_1	Permeabilidade do meio 1
μ_2	Permeabilidade do meio 2
ΔC_{cap}	Variação da capacitância
C_a	Capacitância ativa da sonda
f	Frequência
Z	Impedância eletromagnética
I_{CET}	Intensidade do campo elétrico incidente para a onda elétrica transversal;
I_{CMT}	Intensidade do campo magnético incidente, onda eletromagnética transversal;
R_{CET}	Intensidade do campo elétrico refletido, onda elétrica transversal;
R_{CMT}	Intensidade do campo magnético refletido, onda eletromagnética transversal;
T_{CET}	Intensidade do campo elétrico transmitido, onda elétrica transversal;
T_{CMT}	Intensidade do campo magnético transmitido, onda eletromagnética transversal;
t_w	Tempo de janela
Q	Desempenho do sistema;
ξ_T	Eficiência da antena transmissora;
ξ_R	Eficiência da antena receptora;
G_T	Ganho da antena transmissora;
G_R	Ganho da antena receptora;
g	Ganho devido ao espalhamento originado pelo alvo;
σ_c	Área da seção transversal do espalhamento do alvo;
L	Distância do alvo;
\bar{d}	Média das discrepâncias;
S_d	Desvio padrão;
n	Tamanho da amostra;
H_0	Hipótese nula;
H_1	Hipótese alternativa;
$t_{calculado}$	Valor da estatística t calculado;
$t_{tabelado}$	Valor da estatística t tabelado;
T	Menor soma dos postos de mesmo sinal (Teste de <i>Wilcoxon</i> pareado);
S_dT	Desvio padrão dos postos (Teste de <i>Wilcoxon</i> pareado);

- μ_T Média dos postos (Teste de *Wilcoxon* pareado);
- R Amplitude das discrepâncias;
- I Sinal incidente;
- R Sinal refletido;
- T Sinal transmitido;
- Δh Diferença de altura entre MDEs;
- Z_{GPR} Valor estimado para a profundidade na posição l_i , extraído do MDE (GPR);
- Z_{Ref} Valor observado para a profundidade na posição l_i , extraído do MDE (Referência).
- $\vec{\nabla}$ Operador nabla;
- $\vec{\nabla} \times \vec{E}$ Rotacional do campo vetorial \vec{E} ;
- $\vec{\nabla} \cdot \vec{E}$ Divergência do campo vetorial \vec{E} ;
- δ Profundidade de penetração;

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	<i>Ampère</i>
C	<i>Coulombs</i>
CDP	<i>Common Depth Point</i>
CMP	<i>Common Mid Point</i>
CNT	Confederação Nacional do Transporte
DHN	Diretoria de Hidrografia e Navegação
EM	Eletromagnético
ETA	Estação de Tratamento de Água
F	<i>Farad</i>
GHz	<i>Giga-Hertz</i>
GPR	<i>Ground Penetrating Radar</i>
GPR-RSAD	<i>Ground Penetrating Radar - Radar Surface Arrival Detection</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite Systems</i>
H	<i>Henrys</i>
m	Metro
MDE	Modelo Digital de Elevação
MHz	<i>Mega-Hertz</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
ns	Nano segundos
PDI	Processamento Digital de Imagens
RADAR	<i>Radio Detection and Ranging</i>
S	<i>Siemens</i>
SNA	<i>Surface Network Analyzer</i>
SW-TDR	<i>Surface Wave – Time Domain Reflectometry</i>
T	<i>Tesla</i>
TDR	<i>Time Domain Reflectometry</i>
UFV	Universidade Federal de Viçosa
V	<i>Volts</i>

WARR *Wide Angle Reflection and Refraction*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Princípio básico da técnica GPR onde T é a antena transmissora e R a antena receptora e 1, 2 e 3 as interfaces.	11
Figura 2. Exemplo do traço de GPR para o modelo ao lado.	11
Figura 3. Características básicas de funcionamento de uma antena quanto à frequência, velocidade, comprimento de onda, resolução e capacidade de penetração no solo.	12
Figura 4. - Aspecto de um campo eletromagnético polarizado verticalmente. A propagação se dá ao longo do eixo $t = z$. Adaptada (DANIELS, 2004; MATHER, 2004).	15
Figura 5. (a) Variação na velocidade <i>versus</i> frequência em um meio não dispersivo. (b) Variação da atenuação <i>versus</i> frequência em um meio não dispersivo. Onde c é a velocidade, Z a impedância no vácuo e K^* a constante dielétrica. Fonte (JOL, 2009).	17
Figura 6. Lei de Snell. Fonte (ANNAN, 2003).	21
Figura 7. Para qualquer direção de propagação existem dois campos independentes. Para interfaces planas a onda incidente é decomposta em duas componentes. Estas componentes são chamadas de CET e CMT. Fonte (ANNAN, 2003).	22
Figura 8. Relação entre a frequência, atenuação e condutividade, adaptada (DAVIS e ANNAN, 1989).	24
Figura 9. Relação entre a frequência, velocidade e condutividade, adaptada (DAVIS e ANNAN, 1989).	25
Figura 10. Esquema da molécula polar da água. $K^* = 80$; $\sigma = 0,15 \times \text{TSD}$ (mS/m), onde TDS é o Total de Sólidos Dissolvidos em mg/l e relaxação rotacional a 10 GHz. Adaptada (ANNAN, 2003).	27
Figura 11. Variação da permissividade da água pura em função da frequência. Fonte (ANNAN, 2003).	28
Figura 12. Variação da condutividade da água pura em função da frequência. Fonte (ANNAN, 2003).	29
Figura 13. Estrutura de ligação entre a molécula de água e uma partícula sólida. Adaptada (SAARENKETO, 1998).	30
Figura 14. Modelo de aquisição usual, afastamento comum ou <i>off-set commom</i> . Fonte (MELO, 2007).	34
Figura 15. Modelo de aquisição WARR (<i>Wide Angle Reflection and Refraction</i>). Fonte (MELO, 2007).	34
Figura 16. Modelo de aquisição CMP (Ponto Médio Comum). Fonte (MELO, 2007).	34
Figura 17. Transiluminação aplicada a uma peça de concreto armado fissurada. Fonte (LOPES, 2009).	35
Figura 18. Maneiras de montagem antena. Adaptado (ANNAN, 2003).	40
Figura 19. Caixa de decantação da ETA.	45

Figura 20. Imagem da represa das 4 pilastras da UFV. Sistema de coordenadas WGS84, projeção UTM, fuso 23. (Fonte: Google Earth. Acesso em 10/10/2015).....	46
Figura 21. Pontos amostrados pela estação total e as direções dos 13 perfis levantados com o GPR.	48
Figura 22. Limite da Lagoa e linhas de sondagens planejadas. Sistema de coordenadas WGS84, projeção UTM.....	49
Figura 23. Aspecto da Antena do Receptor GNSS posicionada no centro das antenas GPR.	50
Figura 24. Levantamento com Estação Total.....	51
Figura 25. Medição a trena da estaca levantada pela estação total até o centro das antenas GPR.	51
Figura 26. Fluxograma da função fclass2.	52
Figura 27. Pode-se observar no radargrama as reflexões na superfície da água, algumas reflexões na parede e a reflexão no fundo de concreto da ETA.	53
Figura 28. Aspecto dos traços (colunas) 10, 50 e 118 do perfil 1. A unidade das abscissas é em volts. Pode-se observar que os traços apresentam reflexões do piso e da parede da caixa d'água.	54
Figura 29. Construção do radargrama.	54
Figura 30. Aspecto do traço 10 do perfil 1.....	55
Figura 31. Aspecto do traço 118 do perfil 1.....	56
Figura 32. Região de atenuação.	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Propriedades eletromagnéticas típicas de alguns materiais. Fonte (ANNAN, 2003).....	33
Tabela 2. Frequência central da antena em função da profundidade de investigação. Fonte (ANNAN, 2003).....	37
Tabela 3. Intervalo máximo de amostragem em função da frequência central da antena. Fonte (ANNAN, 2003).	38
Tabela 4. Classificação dos reservatórios.....	48
Tabela 5. Distâncias entre seções transversais.	49
Tabela 6. Fechamento da poligonal de apoio.	50

RESUMO

FARIA, Sandro Henrique de, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, maio de 2016. **Avaliação do uso do GPR em aplicações batimétricas e desenvolvimento de software livre para interpretação de radargramas.** Orientador: Dalto Domingos Rodrigues. Coorientadores: Paulo Roberto Antunes Aranha e Nilcilene das Graças Medeiros.

O monitoramento das represas de abastecimento de água, não só no quesito de qualidade da água, mas também no sentido quantitativo, isto é, volumétrico, é uma preocupação para as autoridades públicas, pois o assoreamento, ocasionado por um processo erosivo, afeta não somente a capacidade de armazenamento dos reservatórios, bem como a flora e a fauna local. Dentro desta ótica surge a necessidade do aparecimento de novas técnicas e o aperfeiçoamento de outras para o monitoramento da espessura da camada d'água. Este trabalho possui dois propósitos principais: analisar o desempenho do RADAR de penetração no solo, também chamado de *Ground Penetrating RADAR* (GPR), em levantamentos batimétricos; e, o desenvolvimento de um aplicativo, gratuito, para a manipulação e classificação de radargramas de maneira manual, semiautomatizada e automatizada. Para avaliar o desempenho das atividades propostas foram escolhidos dois ambientes, localizados no campus da Universidade Federal de Viçosa (UFV), para a realização dos experimentos, sendo: um controlado, realizado em uma caixa de decantação da estação de tratamento de água (ETA), da qual se tem o *as-built*, obtido com estação total, empregado nos testes de validação; o outro, realizado em uma represa, onde se tem um levantamento batimétrico, empregando o ecobatímetro monofeixe, para fins de validação. Foram realizados três estudos: 1) Avaliação do classificador *fclass3*, criado para distinguir as classes *offset*, água e leito de modo semiautomatizado, aplicado a radargramas batimétricos. Com base nos testes aplicados concluiu-se que para o reservatório em estudo, que o levantamento do relevo submerso empregando um GPR e classificado pela ferramenta *fclass3*, resultou em um MDE sem diferença estatísticas, quando comparado com os dados de referência, a um nível de significância de 5%, para o teste de *Wilcoxon* pareado; 2) Avaliação do GPR em levantamentos batimétricos empregando o aplicativo *GPR Bathymetry* na análise dos

radargramas de maneira manual. Este estudo foi realizado na ETA. Com base nos testes aplicados concluiu-se que o levantamento do relevo submerso empregando um GPR resultou em um MDE com acurácia de 4cm e discrepâncias podendo chegar a 9 cm; 3) Avaliação do GPR e do classificador *fclass2* desenvolvido com o objetivo de separar, de modo automatizado, as camadas de água e leito em radargramas adquiridos em represas. Foram gerados MDEs a partir de três interpoladores, distintos, disponíveis no *GPR Bathymetry*, com os dados do ecobatímetro e GPR. Os resultados do teste de hipótese, para os MDEs gerados, mostraram que não existem diferenças estatísticas, a um nível de significância de 5%, entre os modelos gerados a partir dos dados do ecobatímetro e GPR. Como conclusão geral o GPR mostrou que pode ser empregado em levantamentos batimétricos de lagos e represas com profundidades de até 4 metros com uma antena de 100 MHz, e, observou-se uma grande atenuação do sinal do GPR para profundidades acima deste valor. Os radargramas obtidos na ETA, como uma antena de 200 MHz, tiveram fortes reflexões para profundidades de até 3,5 metros.

ABSTRACT

FARIA, Sandro Henrique de, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, May 2016. **Evaluation of the GPR use in bathymetric applications and free software development for interpretation of radargrams.** Advisor: Dalto Domingos Rodrigues. Co-advisors: Paulo Roberto Antunes Aranha and Nilcilene das Graças Medeiros.

The monitoring of the water supply reservoirs, not only in the issue of water quality, but also in the quantitative sense, that is, volumetric, is a concern for public authorities, because the silting, caused by an erosion process, affects not only the storage capacity of the reservoirs, but also the local flora and fauna. In this perspective arise the need of the appearance of new techniques and the improvement of others techniques for monitoring the thickness of the water layer. This paper has two main purposes: to analyze the Ground Penetrating Radar (GPR) performance in bathymetric surveys; and the development of a free application for radargrams handling and also the manual, semi-automated and automated classification. To evaluate the performance of the proposed activities we were chose two places located on the campus of the Federal University of Viçosa (FUV), for realization of the experiments. One of them was realized in controlled place, more specifically in a decanting water treatment plant (WTP), which has the as-built obtained with total station, and was employed in validation tests. And the another test was realized in a dam, where it has a bathymetric survey, using the single beam echo sounder for validation purposes. We conducted three studies: 1) Evaluation of the fclass3 classifier, created to distinguish the offset, water and bed classes, of semi-automated way, applied to bathymetric radargrams. Based on the tests it was concluded that, to the reservoir studied, the survey of the sunken relief employing a GPR (Ground penetrating Radar) and the fclass3 classifier tool, resulted in DEMs no statistical differences between them at a significance level of 5%, according to the paired *Wilcoxon* test. 2) GPR evaluation in bathymetric surveys using the GPR *Bathymetry* application in the manual analysis radargrams. This study was conducted on ETA. Based on the tests it was concluded that the survey of the sunken relief employing a GPR resulted in a DEM with an accuracy of 4 cm and discrepancies that may reach 9

cm. 3) GPR and fclass2 classifier evaluation, developed with the aim of separating, in an automated way, the layers of water and bed in radargrams acquired in dams. DEMs were generated from three different interpolations, available in GPR *Bathymetry*, with data from the echo sounder and GPR. The results of hypothesis test for the DEMs generated, showed that there are no statistical differences at a 5% significance level between models generated from the data of the echo sounder and GPR. As general conclusion the GPR showed that can be employed in bathymetric surveys of lakes and reservoirs with depths up to 4 meters with a 100MHz antenna, and occurred a large attenuation of GPR signals to depths above 4 meters. Radargrams obtained from ETA, with 200MHz antenna, had strong reflections to depths up to 3.5 meters.

1. INTRODUÇÃO

Segundo o Ministério dos Transportes, o subsistema aquaviário federal do Brasil possui 56.594 km de extensão (TRANSPORTES, 1995). A manutenção desta malha hidroviária, para que seja sempre navegável, é de suma importância para o crescimento da economia do Brasil. O monitoramento das represas de abastecimento de água, não só no quesito de qualidade da água, mas também no sentido quantitativo, isto é, volumétrico, é uma preocupação para as autoridades públicas pois o assoreamento afeta, entre várias possibilidades, a capacidade de armazenamento do reservatório. Dentro desta ótica surge a necessidade do aparecimento de novas técnicas e o aperfeiçoamento de outras para o monitoramento da espessura da camada d'água.

A ciência que estuda a representação do relevo de áreas submersas é chamada de Batimetria. Com o avanço das novas tecnologias os levantamentos batimétricos estão sendo, atualmente, realizados com o auxílio de embarcações, utilizando para o posicionamento planimétrico os sistemas de posicionamento por satélites e para a obtenção das profundidades os ecobatímetros. Contudo, o surgimento de novas tecnologias, novas metodologias e o aperfeiçoamento de outras técnicas, colocam o GPR (*Ground Penetrating RADAR*) como uma possível ferramenta a ser empregada para esta finalidade.

O georadar ou GPR, produz ondas eletromagnéticas de alta frequência que são transmitidas em um meio por uma antena transmissora, onde a propagação do sinal é dependente das propriedades elétricas dos materiais que constituem o mesmo. As mudanças nas propriedades elétricas do meio fazem com que parte do sinal transmitido seja refletido de volta até a antena receptora onde é detectado, amplificado, digitalizado, armazenado, processado e convertido em uma imagem chamada de radargrama.

O GPR requer um meio onde as ondas de rádio podem se propagar por uma distância suficiente para o estudo em questão. Os sistemas podem operar em frequências de 1 MHz a 10 GHz (ANNAN e DAVIS, 1997). Entretanto, aquelas

compreendidas entre as faixas de 25 MHz e 300 MHz são as mais usuais em aplicações batimétricas, pois, quanto maior a frequência, maior a atenuação do sinal eletromagnético na água.

Os aspectos mais importantes nos estudos de reflexão em discontinuidades eletromagnéticas do subsolo são basicamente quatro: os que afetam a resolução; os que limitam a penetração da energia no meio (atenuação, dispersão); os que determinam o percentual de energia refletida e transmitida em cada um dos contatos; e os que determinam a velocidade de propagação da onda em cada material (AGUIAR, 2005). Isto é, os parâmetros que influenciam na velocidade de penetração das ondas de radar no meio são: a permissividade elétrica relativa, a condutividade elétrica, a permeabilidade magnética e a frequência da onda emitida. Os três primeiros são característicos dos componentes do meio, enquanto que o quarto depende do equipamento utilizado.

Alguns estudos utilizando o GPR como uma ferramenta empregada em levantamentos batimétricos são apresentados nos próximos parágrafos desta seção.

Spicer *et. al.* (1997) conduziram experimentos de campo para testar a capacidade do GPR com antenas de 60, 100 e 300 MHz, para medir seções transversais de canais de alto fluxo sem a necessidade de colocação de instrumentos na água por meio de cabos suspensos. Medições posteriores da profundidade da água foram feitas utilizando técnica convencional (peso e fita) e foram usadas para calcular a velocidade de sinal do GPR. A conclusão foi de que a antena de 100 MHz apresentou o melhor resultado levando em consideração RESOLUÇÃO *versus* PENETRAÇÃO de acordo com as características do local de estudo.

O GPR foi utilizado em levantamentos na Represa Billings, São Paulo -SP, para diagnosticar assoreamentos. Os dados obtidos indicaram a existência de quantidade de sedimentos nos locais investigados, diminuindo sensivelmente a camada d'água e comprometendo a capacidade deste reservatório (AQUINO e LOPEZ, 2000).

No rio Skagit, localizado no estado de Washington, foram feitos levantamentos batimétricos com um sistema GPR utilizando uma antena de 100 MHz. Para o

levantamento, os autores utilizaram um cabo suspenso sobre a seção do rio deixando a antena a uma altura de 0,5 a 3 metros sobre o rio (HAENI, *et al.*, 2000).

Souza *et. al.* (2003) realizaram um levantamento experimental utilizando o GPR com antenas de 50, 100 e 200 MHz, no rio Taquari, no Pantanal Mato-grossense, visando entender os processos de assoreamento na base do rio e mapear os canais ao longo do rio, que são essenciais para a navegação local. Os resultados apresentaram a ocorrência de grandes depósitos de areia mostrando a viabilidade das aplicações do GPR em estudos de processos de sedimentação em rios.

Annan (2003) realizou um estudo em um lago no norte de Saskatchewan, Canadá, em conjunto com outras pesquisas no local, para o projeto de uma mina de urânio. As medições foram feitas usando um sistema de GPR pulseEKKO com antenas de 50 MHz. O sistema GPR foi montado em um trenó e puxado por uma moto de neve que facilitou o trabalho de reconhecimento. As informações de batimetria, sedimentos e o limite do material rochoso foram utilizadas para localizar as áreas ideais para se depositar os rejeitos das minas.

Moutinho *et. al.* (2005) utilizou o método de filtragem denominado “Deconvolução Preditiva”, de *Wiener-Levinson*, para a remoção das reflexões múltiplas, presentes nas seções GPR, obtidas no rio Taquari. Os resultados demonstraram que a atenuação dessas reflexões nos radargramas foram mais eficazes nos locais onde não acontecem diferenças abruptas de profundidade no leito do rio e profundidade maior que 2 metros.

Singh (2006) destacou a importância do uso do GPR antes da escavação em áreas de exploração de minério. Para isso, foram realizadas investigações das águas subterrâneas em minas a céu aberto de modo indireto, ou seja, sem emprego de sondagem mecânica, e distinguindo os corpos de argilas impermeáveis da água subterrânea.

Levantamentos com GPR foram realizados na represa de Guarapiranga, em São Paulo – SP. Utilizou-se antenas de 50 MHz e 100 MHz acopladas em uma embarcação do tipo catamarã, de fibra de vidro, e rebocado por um barco de alumínio. Os resultados foram comparados com os resultados de levantamento batimétrico e com os resultados de 13 furos de sondagens realizadas em pontos

coincidentes com o levantamento GPR. Concluiu que o método se mostrou eficaz com a antena de 50 MHz, permitindo a identificação do fundo da represa desde a profundidade de 0,56 m até 12,47 m e o mapeamento de sedimentos com espessuras de até 6,5 metros (FRAZÃO, 2006).

Foram realizados estudos em uma área da cidade de Changde, na província de Hunan, China, para avaliar a efetividade do radar de penetração no solo (GPR) na detecção e monitoramento dos movimentos subterrâneos dinâmicos de água no subsolo e para estimar as propriedades hidráulicas do aquífero usando antenas de 400 MHz (ZHU *et. al.*, 2009).

Aranha *et. al.* (2009) aplicaram o método de deconvolução preditiva multicanal na atenuação de reflexões múltiplas, em perfis de GPR, adquiridos no lago da represa Serra Azul - Copasa, Minas Gerais. O método se mostrou eficiente na atenuação de reflexões múltiplas em perfis de georadar adquiridos sobre lâmina d'água.

Levantamentos com o GPR foram realizados para a determinação das espessuras das camadas de um pavimento, de maneira automatizada, utilizando a Transformada Wavelet para a extração das informações de texturas do radargrama e o classificador MaxVer (FARIA, 2010).

Almeida (2011) tentou validar o modelo batimétrico obtido com um sonar na lagoa de Jacarepaguá, Rio de Janeiro – RJ, empregando o GPR, mas não obteve êxito, pois a água da Lagoa apresentou grande atenuação do sinal eletromagnético em função da sua alta condutividade, consequência da elevada salinidade.

Prospecções geotécnicas foram realizadas com o GPR, para a obtenção de dados batimétricos e de sedimentos, em um trecho do Rio das Velhas localizado em Minas Gerais. Onde concluiu que o método geofísico empregado mostrou-se eficiente para a execução de batimetria (PARIZZI, *et. al.*, 2011).

Dados do ecobatímetro “*Hidrobox*” foram comparados com dados do *Ground Penetrating Radar* obtido em *Schirmacher Oasis*, na Antártica, e concluiu-se que, de uma maneira geral, os resultados foram consistentes (KHARE, *et. al.*, 2012).

Adepelumi *et. al.* (2013) realizou a batimetria de um trecho de um rio na Nigéria utilizando o GPR e concluiu que esta ferramenta é eficaz na determinação

das profundidades do rio. No entanto, não obteve êxito para obtenção de radargramas com boa qualidade do subleito do rio onde existia argila.

Apesar da disponibilidade dos radargramas de superfícies subaquáticas a sua interpretação automática (sem intervenção do analista), no que diz respeito à espessura da camada d'água, determinadas pelo GPR, é deficiente.

Deste modo, espera-se poder empregar o GPR em levantamentos batimétricos rasos, menor que dez metros, a fim de obter dados que tornem possível a confecção de MDEs (Modelos Digitais de Elevação), cálculos de volumes, assim como, desenvolver um aplicativo capaz de processar radargramas e de realizar uma classificação automática ou semiautomática (com intervenção parcial do analista), para separar a camada d'água do leito.

1.1 Caracterização do problema

A discussão envolvendo os recursos hídricos ultrapassa as questões relacionadas ao domínio econômico, social e ambiental, pois, abrangendo todas elas, nos obriga a trabalhá-la de modo multidisciplinar. Dessa maneira as interações entre a população e o meio natural, no chamado ecossistema urbano, torna-se um campo ainda pouco conhecido, mas que necessita ser investigado (MASTELLA e NISHIJIMA, 2011).

Dentre os vários problemas encontrados, relacionados às questões hídricas, pode-se destacar os processos erosivos, que fazem com que as partículas do solo se desagreguem e sejam transportados. No entanto, quando estes sedimentos se depositam no leito dos cursos de água, lagos ou lagoas, causam, dentre outros prejuízos, a diminuição da camada d'água, comprometendo a capacidade hidráulica dos reservatórios e cursos de água, acarretando prejuízo ao abastecimento de água e à geração de energia elétrica, como também comprometendo a fauna e a flora local, além de aumentar a possibilidade de ocorrência de enchentes. Por isso, uma análise do impacto ambiental e o acompanhamento da evolução dos processos erosivos e de assoreamento são essenciais para o bom emprego de ações preventivas e corretivas pertinentes ao uso e ocupação do solo (AQUINO e LOPEZ, 2000).

Desse modo, o GPR torna-se uma ferramenta importante na avaliação dos impactos causados aos corpos d'água, uma vez que, em estudos de assoreamento, a utilização deste método proporciona a aquisição de imagens de alta resolução das estruturas abaixo da camada d'água (AQUINO e LOPEZ, 2000). Esta imagem é denominada radargrama e constitui base para se gerar o modelo batimétrico necessário neste estudo.

1.2 Justificativa

O principal método para determinação da espessura da camada d'água é o que utiliza o ecobatímetro. Estes equipamentos consistem em uma fonte emissora de sinais acústicos e um dispositivo interno que mede o intervalo entre o momento da emissão do sinal e o instante em que o eco retorna ao sensor. O som é captado pelo transdutor que converte as ondas de retorno do eco em sinais elétricos. Fornecendo desta maneira informações pontuais de profundidade no local (PEREIRA e BARACUHY, 2008).

No entanto, o ecobatímetro possui algumas limitações em na determinação da profundidade em locais onde a mesma é menor que 1 metro, devido à perda de sinal (FERREIRA, 2013), o que não ocorre com o GPR, tornando possível sua utilização em locais com estas profundidades.

O GPR tem um grande potencial para ser utilizado na batimetria e em outras aplicações, tais como (ARANHA, *et. al.*, 2002; ANNAN A. P., 2003; DANIELS, 2004; SAARENKETO T. , 2006; FARIA, 2010; ADEPELUMI, *et. al.*, 2013):

- Detectar a espessura da camada d'água em pequenas profundidades;
- Detectar a espessura da camada de sedimentos;
- Detectar a existência de drenos ao longo de uma rodovia;
- Detectar redes pluviais ao longo da rodovia;
- Detectar a posição da armadura dentro de peças de concreto armado;
- Uso em sítios arqueológicos na localização de objetos na sub-superfície;
- Estudo da densidade da camada de asfalto;
- Medir a espessura do revestimento asfáltico, base e sub-base;
- Estratificação do solo;

- Detecção de estruturas enterradas;
- Estudos de contaminação do solo;
- Espessuras de camadas de gelo;
- Detecção de minas terrestres enterradas;
- Investigações forenses;
- Detecção de tubos e cabos;
- Inspeção em ferrovias;
- Sensoriamento remoto a partir de aviões.

Deve ser ressaltado que o método GPR, como todo e qualquer método geofísico, depende da existência de contrastes entre as diferentes regiões adjacentes da subsuperfície. Além disso, como método indireto, ele depende basicamente da experiência do profissional e da utilização de métodos diretos e/ou outros métodos para confirmação de resultados (AGUIAR, 2005).

As pesquisas realizadas até a presente data apontaram serem poucos os estudos que visam a interpretação destes radargramas de maneira automatizada. O único estudo encontrado com relação a este assunto foi o trabalho desenvolvido por Faria (2010) onde o autor ressaltava que os resultados alcançados ainda necessitam de melhorias. Além disso, os *softwares* disponíveis para tratamentos desses radargramas ainda não dispõem dessas ferramentas sendo útil um aplicativo gratuito para esta finalidade.

1.3 Hipótese

É possível uma metodologia alternativa para a determinação da espessura das camadas d'água, de maneira automatizada ou semiautomatizada, pela análise de radargramas obtidos pelo método GPR.

1.4 Objetivos

O objetivo geral deste estudo é a utilização do GPR na determinação automatizada (sem intervenção do usuário) ou semiautomatizada (com intervenção parcial do usuário) das espessuras da camada d'água de represas e de uma caixa de

decantação da ETA. Bem como avaliar o desempenho do método na obtenção da espessura da camada d'água e organizá-las em um *software*, de fácil utilização, que contenha interface gráfica com o usuário. Pretende-se comparar o método GPR com os métodos mais consagrados como ecobatímetro, estação total e/ou dados de medições diretas.

Para atingir o objetivo geral pretende-se desenvolver os seguintes objetivos específicos:

- Caracterizar a propagação de ondas de GPR em diferentes meios materiais, tais como água e solos;
- Descrever e caracterizar os equipamentos de GPR vinculados aos fundamentos de prospecção geofísica;
- Descrever os métodos de aquisição e tratamento de dados de GPR;
- Analisar o comportamento do GPR em ambiente controlado como a ETA (Estação de Tratamento de Água) da UFV, onde já se tem levantamentos topográficos e com ecobatímetro;
- Analisar o comportamento do GPR em ambiente não controlado, como uma das represas da UFV, onde já se tem levantamentos com ecobatímetro;
- Desenvolver um aplicativo em linguagem de programação Matlab®, com interface gráfica, gratuito, capaz de identificar a camada d'água e sedimento de modo automatizado ou semiautomatizado.

1.5 Organização da Tese

Esta tese é dividida em 4 capítulos, cuja organização é descrita a seguir:

O capítulo 1 apresenta a introdução dos assuntos a serem abordados, envolvendo os objetivos apresentados e as justificativas para o estudo.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão teórica sobre aspectos relacionados ao GPR.

No capítulo 3 são apresentados os métodos, materiais e caracterização das áreas de estudo.

No capítulo 4 é apresentada uma conclusão geral do estudo.

No apêndice deste trabalho é apresentado um tutorial de uso do software GPR *Bathymetry*.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo apresentam-se os princípios básicos de um GPR associados com a propagação dos pulsos emitidos, que são ondas de rádio compreendidas no espectro eletromagnético que influenciam, de maneira considerável, na prospecção.

2.1 Funcionamento do GPR

Os sistemas de 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 por outra interface ou absorvida totalmente. A imagem obtida é denominada radargrama e constitui a base para se interpretar e construir o perfil batimétrico existente. 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 da frequência da antena utilizada. Estes sistemas de GPR possuem tipicamente os seguintes componentes: um gerador de pulsos, sendo este pulso com frequência 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 modo de obtenção de dados com antenas de contato também conhecidas como *ground coupled antennas*.

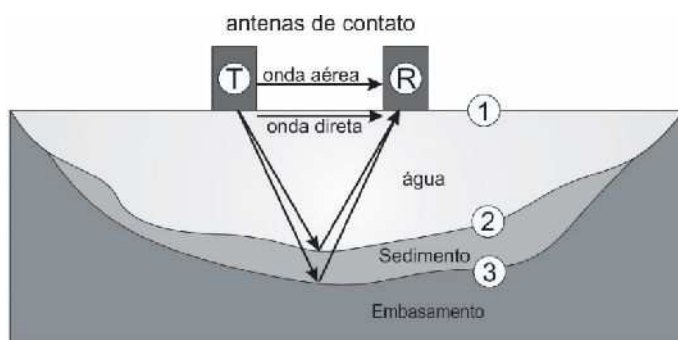


Figura 1. Princípio básico da técnica GPR onde T é a antena transmissora e R a antena receptora e 1, 2 e 3 as interfaces.

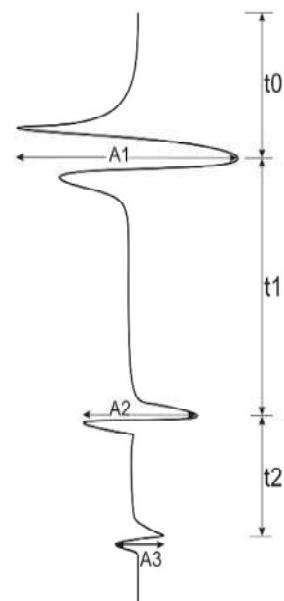


Figura 2. Exemplo do traço de GPR para o modelo ao lado.

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 GPR 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 para a antena receptora (Figura 2). O radargrama é uma matriz de dados onde cada coluna corresponde a um traço obtido na posição investigada e as linhas correspondem ao tempo de ida e volta do sinal emitido.

Para o modelo da Figura (1), a interface 1 representa a interface do ar com a camada d'água por onde a onda direta se propaga sem reflexão, 2 representa a interface da camada d'água com sedimento e 3 representa a interface do sedimento com o embasamento. As reflexões nas interfaces 2 e 3 do modelo da Figura (1) podem ser visualizados na Figura (2).

Pela Figura (2), A1 é a amplitude total da onda direta, A2 é a amplitude total de reflexão na interface entre a camada d'água e o sedimento e A3 é a amplitude de reflexão entre o sedimento e o embasamento. t_0 é o intervalo de tempo gasto pela onda aérea e onda direta ao sair da antena emissora indo direto para a antena receptora, t_1 é o intervalo de tempo de propagação do sinal na camada de água e t_2 é o intervalo de tempo gasto para percorrer a camada ocupada pelo sedimento, lembrando que estes intervalos de tempos são referentes à ida e volta do sinal.

O princípio básico de funcionamento do GPR é, conhecido o intervalo de tempo t e a velocidade v de propagação do pulso, determinar a distância d (Equação 1) em que um determinado objeto está da fonte emissora do pulso (SAARENKETO, 2006). A velocidade de propagação da onda eletromagnética emitida pelo GPR no ar pode ser tomada como sendo igual à velocidade de propagação da luz no vácuo (0,3 m/ns). A velocidade da onda eletromagnética na água destilada é de 0,033 m/ns, enquanto na água do mar a velocidade cai para 0,01 m/ns (ANNAN, 2003).

$$d = \frac{v \times t}{2}; \quad (1)$$

Quando a interface está entre duas camadas que apresentam uma similaridade entre as constantes dielétricas dos seus materiais sua detecção se torna complexa (GONÇALVES e CERATTI, 1998). No entanto, quando se trabalha com materiais onde há uma diferença significativa entre suas constantes dielétricas, a identificação desta interface se torna mais fácil. No caso do estudo em questão, que é a identificação da camada d'água, tem-se a água com uma constante dielétrica variando entre 80 e 81 enquanto os siltes e argilas, que são os materiais mais comumente encontrados no leito, com valores entre 5 e 40. Esta diferença proporciona uma boa identificação da interface entre os dois materiais.

Em linhas gerais, quanto maior a frequência da antena utilizada maior será a resolução da imagem e menor será a profundidade de penetração no solo, isso porque a profundidade de penetração no meio também depende das características elétricas do mesmo. A Figura (3) a seguir ilustra este esquema.

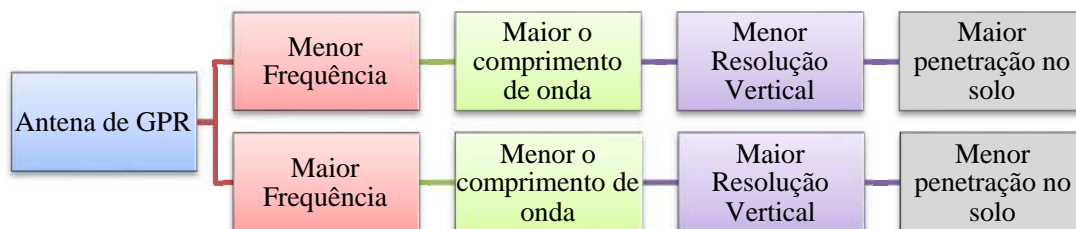


Figura 3. Características básicas de funcionamento de uma antena quanto à frequência, velocidade, comprimento de onda, resolução e capacidade de penetração no solo.

Um aspecto importante a ser observado é que o GPR por si só não avalia ou quantifica os alvos detectados, ficando estas etapas na responsabilidade do

interpretador, o qual, atualmente, de maneira interativa, pode contar com o apoio de programas de computador desenvolvidos com propósitos específicos de auxílio à interpretação dos dados levantados (GONÇALVES e CERATTI, 1998).

2.1.1 Princípios básicos do GPR

A técnica do GPR está fundamentada no fenômeno de propagação de ondas eletromagnéticas geridas segundo as Equações (2), (3), (4) e (5) de Maxwell que descrevem a física dos campos EM, enquanto a relação constitutiva quantifica as propriedades do material. Combinando estas duas técnicas é possível descrever, quantitativamente, os sinais de GPR. Elas envolvem uma série de parâmetros constantes dos materiais que ocorrem no subsolo, tais como: a suscetibilidade magnética, ou seja, a permeabilidade magnética; a permissividade dielétrica e a condutividade elétrica (JOL, 2009).

2.1.1.1 Equações de Maxwell

É possível que haja um campo elétrico estático sem que haja um campo magnético e vice e versa, no entanto, se esses campos variam com o tempo eles não podem existir isoladamente. As equações de Maxwell toma como condição que esses campos variam com o tempo, logo eles coexistem. A seguir são apresentadas as equações de Maxwell na sua forma diferencial (EDMINISTER, 2006).

$$\text{Lei de Faraday} \quad \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \quad (2)$$

$$\text{Lei de Ampère} \quad \vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}; \quad (3)$$

$$\text{Lei de Gauss} \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho; \quad (4)$$

$$\text{inexistência de monopólo magnético} \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0. \quad (5)$$

Onde:

\vec{D} = Vetor densidade de fluxo elétrico (C/m²);

ρ = Densidade volumétrica de carga (C/m³);

\vec{B} = Vetor indução magnética (T);

\vec{H} = Vetor campo magnético (A/m);

\vec{J} = Vetor de densidade de corrente de deslocamento (A/m²);

\vec{E} = Vetor campo elétrico (V/m);

2.1.1.2 Equações constitutivas

As equações constitutivas (6), (7) e (8) são a maneira de descrever a resposta do material ao campo eletromagnético ao qual ele está submetido. Estas equações fornecem uma ideia de como se comportam os átomos, elétrons e as moléculas sobre a aplicação de um campo EM em meios isotrópicos (JOL, 2009; POTIER, *et. al*, 2010; FREITAS, 2004).

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}; \quad (6)$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E}; \quad (7)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H}. \quad (8)$$

Onde:

σ = Condutividade elétrica (S/m);

ε = Permissividade dielétrica (F/m);

μ = Permeabilidade magnética (H/m).

Nos casos em que os meios a serem pesquisados forem anisotrópicos, a relação que existe entre estas grandezas é expressa através das equações (9), (10) e (11) (CARCIONE e CAVALLINE, 1996).

$$\vec{D} = \varepsilon + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}; \quad (9)$$

$$\vec{B} = \mu + \vec{H}; \quad (10)$$

$$\vec{J} = \sigma \times \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \vec{J}_m. \quad (11)$$

Onde: \vec{J}_m é a densidade de corrente devido tanto a polarização como a magnetização do material em consequência dos campos elétrico e magnético aplicados (CARCIONE e CAVALLINE, 1996).

2.1.2 Onda eletromagnética

Como o próprio nome diz, um campo eletromagnético (EM) é a interação de um campo magnético com um campo elétrico, ambos perpendiculares entre si e perpendiculares ao eixo t que determina sua direção de propagação. A Figura (4) representa a interação destes dois campos. Se o campo elétrico é vertical, movendo-se no plano $E - t$ e o campo magnético é horizontal, movendo-se no plano $H - t$, então a energia é polarizada verticalmente; caso ocorra o inverso, o campo elétrico horizontal e o campo magnético vertical, a energia está polarizada horizontalmente (MATHER, 2004).

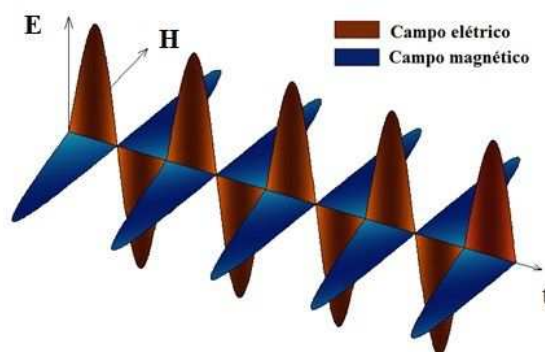


Figura 4. - Aspecto de um campo eletromagnético polarizado verticalmente. A propagação se dá ao longo do eixo $t = z$. Adaptada (DANIELS, 2004; MATHER, 2004).

O GPR explora as características das ondas geradas pelos campos EM. As equações de Maxwell (2), (3), (4) e (5) relacionam o campo elétrico e o campo magnético quando eles variam com o tempo. Dependendo da magnitude relativa da perda de energia, que está associada com a condutividade, e do armazenamento de energia, que está relacionado com a permissividade, os campos elétricos e magnéticos podem fundir-se ou propagarem-se como ondas. O GPR se torna viável quando é possível produzir como resposta uma onda (JOL, 2009).

2.1.3 Propriedades das ondas eletromagnéticas (EM)

A correspondência entre as imagens de RADAR e as propriedades das ondas EM (permissividade ε , permeabilidade μ e condutividade σ) é melhor visualizada pelas Equações (12), (13), (14), (15) e (16) que descrevem o comportamento da propagação das ondas EM na subsuperfície. Considerando uma única frequência linearmente polarizada e as ondas EM viajando na direção t (Figura 4), a partir das equações de Maxwell, pode-se chegar às Equações (12), (13), (14), (15) e (16). Onde \vec{E} representa o vetor do campo elétrico e \vec{H} representa o vetor do campo magnético (KNIGHT, 2001).

$$\vec{E}(z, t) = E_0 e^{-\alpha z} e^{i(\omega t - \beta z)} ; \quad (12)$$

$$\vec{H}(z, t) = H_0 e^{-\alpha z} e^{i(\omega t - \beta z)} . \quad (13)$$

Onde E_0 e H_0 são as amplitudes complexas, ω a frequência angular, α a constante de atenuação e β o parâmetro de fase que podem ser obtidos respectivamente pelas Equações 14 e 15 a seguir:

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu \varepsilon}{2}} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \varepsilon}\right)^2} - 1 \right]^{1/2} ; \quad (14)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu \varepsilon}{2}} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \varepsilon}\right)^2} + 1 \right]^{1/2} . \quad (15)$$

onde:

μ_0 = Permeabilidade magnética do espaço livre ($4\pi \times 10^{-7}$ H/m);

ε_0 = Permissividade elétrica do espaço livre ($8,85 \times 10^{-12}$ F/m);

$\mu = \mu_0 \mu_r$, é a permeabilidade magnética do meio;

$\varepsilon = \varepsilon_0 K^*$, é a permissividade dielétrica do meio;

K^* = Permissividade dielétrica relativa (variando de 1 a 80 para a maioria dos materiais);

$\mu_r \approx$ Permeabilidade magnética relativa (começando em 1 para materiais não magnéticos);

ω = Frequência angular.

A velocidade v da onda EM também pode ser obtida utilizando a frequência f dada por (KIRSCH, 2006):

$$v = \frac{\omega}{\beta} = \frac{2\pi f}{\beta} . \quad (16)$$

As principais propriedades das ondas EM são a velocidade (v), atenuação (α), e a impedância eletromagnética (ANNAN, 2003). As propriedades de uma onda para um meio simples com a permissividade, permeabilidade e a condutividade fixas, podem ser mais facilmente entendidas assumindo uma onda senoidal variando com o tempo. A Figura (5) apresenta a relação entre a (velocidade *versus* frequência) e a (atenuação *versus* frequência) (JOL, 2009). A transição do comportamento de difusão para propagação acontece quando a corrente elétrica muda o comportamento de condução dominante para o deslocamento de corrente dominante. Para um material simples, a frequência de transição pode ser obtida pela Equação (17) (ANNAN, 2003).

$$f_t = \frac{\sigma}{2\pi\epsilon} . \quad (17)$$

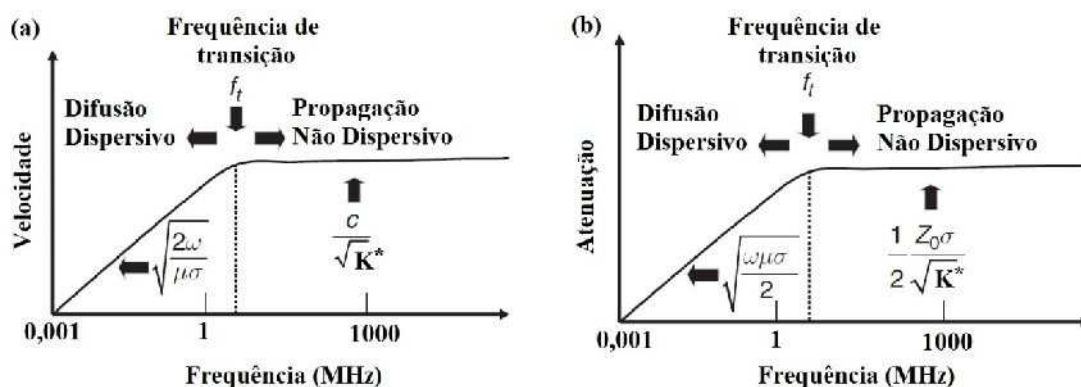


Figura 5. (a) Variação na velocidade *versus* frequência em um meio não dispersivo. (b) Variação da atenuação *versus* frequência em um meio não dispersivo. Onde c é a velocidade, Z a impedância no vácuo e K^* a constante dielétrica. Fonte (JOL, 2009).

Nas baixas frequências todas as propriedades dependem de (ω). Nas altas frequências as propriedades independentes da permissividade (ϵ), permeabilidade (μ) e condutividade (σ) são constantes. Como o GPR trabalha em altas frequências, acima da frequência de transição, o estudo do comportamento nestas faixas de frequências se torna mais importante (ANNAN, 2003).

Para baixas frequências, o campo eletromagnético é difuso ao se propagar pelo meio em estudo e a velocidade de fase, a atenuação e a impedância eletromagnética Z podem ser obtidas pelas Equações (18), (19) e (20), respectivamente.

$$v = \sqrt{\frac{2\omega}{\mu\sigma}} ; \quad (18)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} ; \quad (19)$$

$$Z = (1 + i)\sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}} . \quad (20)$$

Para altas frequências, o campo eletromagnético se propaga como ondas através do meio em estudo (ANNAN, 2003). Então as fórmulas utilizadas em pesquisas com GPR se tornam mais simples, o que é mais usual. As Equações (21), (23) e (24) mostram a velocidade de fase, a atenuação e a impedância eletromagnética.

$$v = \frac{c}{\sqrt{K^*}} = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} . \quad (21)$$

Onde v é a velocidade de propagação da onda em (m/ns), c é a velocidade da luz no vácuo (0,3 m/ns) e K^* a permissividade dielétrica relativa.

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} ; \quad (22)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \frac{\sigma}{2} = \frac{Z_0 \sigma}{2\sqrt{K^*}} . \quad (23)$$

A impedância inerente ao meio pode ser calculada pela Equação (24) abaixo, onde Z_0 é a impedância do vácuo ou do espaço livre e vale 377 ohms (DANIELS, 2004; ANNAN, 2003).

$$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} = \frac{Z_0}{\sqrt{K^*}} . \quad (24)$$

O comprimento de onda λ é definido como a distância de propagação da onda em um período de oscilação e é dada por (DANIELS, 2004):

$$\lambda = \frac{2\pi}{\omega\sqrt{\mu\varepsilon}} = \frac{v}{f} . \quad (25)$$

2.1.4 Condutividade e permissividade elétrica

A propagação e reflexão dos pulsos emitidos pelo radar são controladas pelas propriedades eletromagnéticas do material que constitui o meio e inclui: a permeabilidade, a permissividade dielétrica e a condutividade elétrica (AGUIAR, 2005).

Segundo Saarenketo (2006) a propriedade elétrica mais importante que afeta os resultados de estudos realizados com o GPR é a permissividade dielétrica que influencia na velocidade do sinal do GPR nos materiais, como tal, ela é muito importante para conhecer precisamente como calcular a profundidade correta do objeto em estudo. A permissividade dielétrica relativa é uma função da frequência. A permissividade dielétrica relativa K^* possui um valor adimensional e é uma relação da permissividade dielétrica (ε), que geralmente é um número complexo, e da permissividade dielétrica no vácuo (ε_0), cujo valor é igual a $8,85 \times 10^{-12}$ F/m.

$$K^* = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} . \quad (26)$$

O valor dielétrico também pode ser expresso da seguinte forma (HOEKSTRA e DELANEY, 1974; DAVIS e ANNAN, 1989):

$$K^*(\omega) = K'(\omega) - K''(\omega) . \quad (27)$$

Onde:

K^* = Permissividade dielétrica relativa;

K' = Parte real do valor dielétrico;

K'' = Parte imaginária do valor dielétrico, a parte relacionada à perda;

ω = Frequência angular ($2\pi f$).

A relação entre a condutividade elétrica σ (S/m) e a parte imaginária do valor dielétrico é:

$$K'''(\omega) = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \omega} . \quad (28)$$

A parte imaginária K'' pode ser dividida dentro dos componentes de perda de alta frequência. O valor de K'' contido na Equação (29) é definido como sendo um fator de perda dependente da frequência e da condutividade dos materiais, que está relacionada ao afrouxamento das moléculas de água, ou seja, em frequências muito elevadas, a molécula de água sofre variações intensas na polaridade, ocasionando o fenômeno de relaxação, o qual gera grandes perdas de energia por atenuação (DAVIS e ANNAN, 1989). Em decorrência, em uma onda eletromagnética com frequência muito elevada o pulso se propaga muito pouco ou até mesmo não se propaga. Conforme é apresentada por (DAVIS e ANNAN, 1989):

$$K^* = K' - i \left(K'' + \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \omega} \right) . \quad (29)$$

K'' = Fator de perda;

σ = Condutividade elétrica (S/m);

ε_0 = Permissividade dielétrica no espaço livre, vácuo ($8,85 \times 10^{-12}$ F/m).

2.1.5 Reflexão, Refração e Transmissão dos sinais

O método GPR baseia-se na detecção das ondas refletidas nas discontinuidades elétricas presentes na subsuperfície. A Lei de Snell Figura (6), dada pela Equação (30), descreve o comportamento da energia da onda incidente numa interface onde existem mudanças nas propriedades eletromagnéticas dos meios (TELFORD, *et. al.*, 1990; EDMINISTER, 2006).

$$\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\sqrt{\mu_2 \varepsilon_2}}{\sqrt{\mu_1 \varepsilon_1}} . \quad (30)$$

Onde:

θ_1 = Ângulo de reflexão, que é igual ao ângulo de incidência do pulso;

θ_2 = Ângulo de refração;

v_1 = Velocidade de propagação no meio 1;

v_2 = Velocidade de propagação no meio 2.

ε_1 = Permissividade do meio 1

ε_2 = Permissividade do meio 2

μ_1 = Permeabilidade do meio 1

μ_2 = Permeabilidade do meio 2

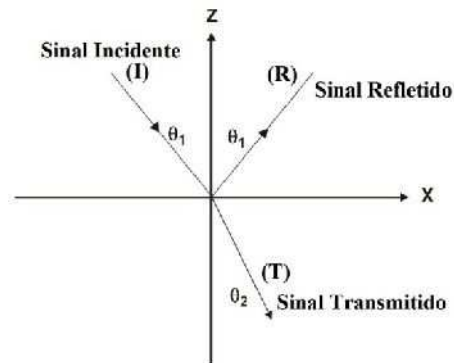


Figura 6. Lei de Snell. Fonte (ANNAN, 2003).

Existe um ângulo incidente para o qual θ_2 será igual a 90° . Quando isso ocorre esse ângulo incidente é chamado de ângulo crítico e a energia se propaga pela superfície ao invés de ser transmitida para dentro do segundo meio (EDMINISTER, 2006). O ângulo de refração pode ser calculado por (ANNAN, 2003; JOL, 2009):

$$\text{sen } \theta_2 = \frac{v_2}{v_1} \quad (31)$$

Os coeficientes de reflexão e transmissão de Fresnel quantificam como as amplitudes dos campos eletromagnéticos variam ao longo de uma interface entre dois materiais. Quando uma onda eletromagnética plana incide em uma superfície, parte de sua energia é refletida e parte é transmitida para o outro meio, como mostra a Figura (6) (ANNAN, 2003; JOL, 2009).

A relação existente entre o sinal incidente (I), o sinal refletido (R) e o sinal transmitido (T) é dado pela Equação (32) (ANNAN, 2003).

$$I + R.I = T.I \quad (32)$$

O vetor do campo eletromagnético é separado em duas componentes independentes, definidas pela orientação do campo. Estas componentes são definidas como CET (Campo Elétrico Transversal) e CMT (Campo Magnético Transversal), conforme Figura (7) (ANNAN, 2003).

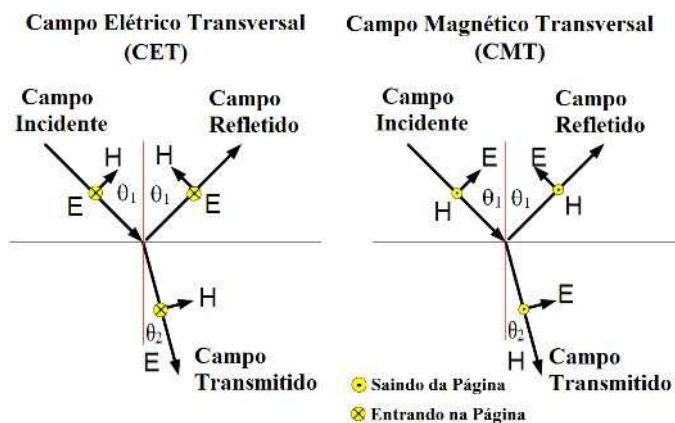


Figura 7. Para qualquer direção de propagação existem dois campos independentes. Para interfaces planas a onda incidente é decomposta em duas componentes. Estas componentes são chamadas de CET e CMT. Fonte (ANNAN, 2003).

De posse deste conceito pode-se fazer uma analogia com a energia EM incidente em um meio de acordo com as Equações 33 e 34.

$$I_{CET} + R_{CET} \cdot I_{CET} = T_{CET} \cdot I_{CET} ; \quad (33)$$

$$I_{CMT} + R_{CMT} \cdot I_{CMT} = T_{CMT} \cdot I_{CMT} . \quad (34)$$

I_{CET} = representa a intensidade do campo elétrico incidente para a onda elétrica transversal;

I_{CMT} = representa a intensidade do campo magnético incidente para a onda eletromagnética transversal;

R_{CET} = representa a intensidade do campo elétrico refletido para a onda elétrica transversal;

R_{CMT} = representa a intensidade do campo magnético refletido para a onda eletromagnética transversal;

T_{CET} = representa a intensidade do campo elétrico transmitido para a onda elétrica transversal;

T_{CMT} = representa a intensidade do campo magnético transmitido para a onda eletromagnética transversal;

Segundo Annan (2003) a expressão acima resulta em:

$$R_{CET} = \frac{\frac{1}{Z_1} \cdot \cos \theta_1 - \frac{1}{Z_2} \cdot \cos \theta_2}{\frac{1}{Z_1} \cdot \cos \theta_1 + \frac{1}{Z_2} \cdot \cos \theta_2} ; \quad (35)$$

$$R_{CMT} = \frac{Z_1 \cdot \cos \theta_1 - Z_2 \cdot \cos \theta_2}{Z_1 \cdot \cos \theta_1 + Z_2 \cdot \cos \theta_2} ; \quad (36)$$

$$T_{CET} = 1 + R_{CET} ; \quad (37)$$

$$T_{CMT} = 1 + R_{CMT} . \quad (38)$$

Onde Z_i são as impedâncias dos materiais.

2.1.6 Velocidade e atenuação do sinal

A velocidade e a atenuação são os parâmetros que descrevem a propagação das ondas de alta frequência no subsolo e, como o objetivo central é analisar a parte cinemática do fenômeno, deve-se considerar a variabilidade da velocidade, relacionando o tempo de propagação e as propriedades dielétricas e condutivas do material onde elas se propagam (LOPES, 2009).

Nas pesquisas com o GPR, uma medida da velocidade da subsuperfície pode ser determinada coletando os dados usando uma geometria CMP (*common mid point*), onde a distância entre a antena transmissora e receptora é aumentada gradualmente a cada registro (KNIGHT, 2001). A metodologia CMP de coleta de dados será abordada mais adiante nesta tese. Contudo, este tipo de pesquisa e análises de dados requeridos para a determinação da velocidade é descrita em detalhes em Davis e Annan (1989).

A determinação da velocidade, através das hipérbolas presentes nos radargramas, é importante para poder converter os dados gravados em função da amplitude e do tempo para função da amplitude e da profundidade.

Um fenômeno importante na propagação das ondas eletromagnéticas é a condutividade elétrica do meio. A influência mútua do campo eletromagnético com

meios que apresentam condutividade elevada leva à perda de energia por atenuação, que aumenta intensamente para valores de frequência muito elevada. Nas Figuras (8) e (9) é descrita a variação da atenuação e da velocidade em função da frequência, respectivamente (DAVIS e ANNAN, 1989). A atenuação aumenta rapidamente para as frequências maiores que 100 MHz devido ao efeito de relaxação da molécula de água, que ocorre nas proximidades da frequência de 10 GHz. Pode-se verificar pela Equação (23) que a condutividade elétrica é diretamente proporcional a atenuação do pulso de radar. Portanto, quanto maior for a condutividade elétrica do meio, maior será a atenuação do pulso. Isso determina as limitações de aplicabilidade da técnica do GPR em meios muito condutivos, por exemplo, na água marinha ($\sigma = 3 \times 10^6$ S/m), que, devido a sua salinidade, apresenta alta condutividade e, conseqüentemente, nesse meio, uma onda eletromagnética sofreria intensa atenuação e praticamente não se propagaria (LOPES, 2009).

O comprimento de onda (λ) pode ser obtido por (SAARENKETO, 2006):

$$\lambda = \frac{1000 c}{f \sqrt{K^*}} \quad (39)$$

Onde (c) é a velocidade de propagação da luz no vácuo (3×10^8 m/s), (f) a frequência em (MHz) (SAARENKETO, 2006).

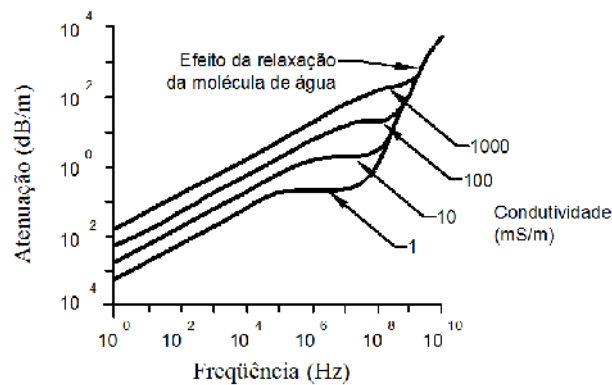


Figura 8. Relação entre a frequência, atenuação e condutividade, adaptada (DAVIS e ANNAN, 1989).

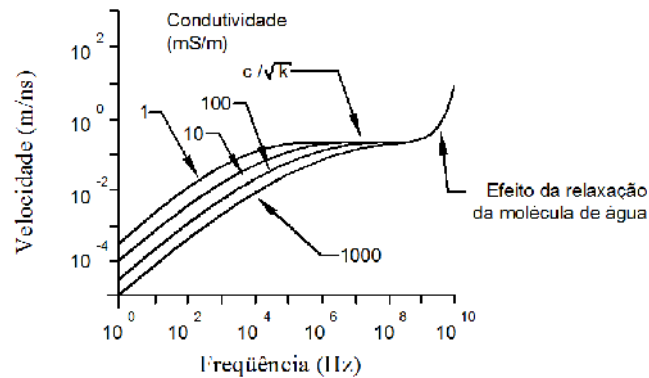


Figura 9. Relação entre a frequência, velocidade e condutividade, adaptada (DAVIS e ANNAN, 1989).

Na faixa onde a velocidade é constante encontram-se as frequências de trabalho mais adequadas para o método GPR. Isto porque é minimizada a possibilidade de dispersão do sinal devido a variação de velocidade com a frequência. Pode-se também verificar na Figura (8) o efeito de relaxação da molécula de água para frequências maiores que 1 GHz, o que pode originar um entrave no alcance do sinal de radar, devido a alta dissipação de energia no meio propagado.

Existe uma simplificação comumente pressuposta na interpretação dos dados de GPR em condições de baixas perdas, que é mostrada matematicamente pela Inequação (40) (KNIGHT, 2001):

$$\frac{\sigma}{\omega \epsilon} < 1 \quad . \quad (40)$$

Em geral, esta é uma hipótese válida por causa das elevadas frequências que envolvem o uso do GPR e ao fato de haver restrições no uso do método em regiões onde a condutividade (σ) é demasiadamente elevada. Altos valores da condutividade elétrica resultam em um meio altamente atenuante (KNIGHT, 2001). Outra hipótese, geralmente empregada, é fazer que a permeabilidade magnética (μ), em todos os locais da subsuperfície, seja igual a permeabilidade magnética no vácuo ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{H}{m}$) (KNIGHT, 2001). Esta hipótese simplifica as expressões da velocidade v e da constante de atenuação α , conforme mostram as Equações (41) e (42), enquanto Edminister (2006) fornece a Equação (43) que permite o cálculo da profundidade de penetração:

$$v \approx \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon}} ; \quad (41)$$

$$\alpha = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon}} ; \quad (42)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu \sigma \omega}} = \frac{1}{\sqrt{\pi \mu \sigma f}} . \quad (43)$$

Estas duas expressões (41) e (42) mostram que a constante de atenuação sofre uma grande influência da condutividade, enquanto a velocidade sofre influência apenas da permeabilidade magnética e da permissividade magnética. Por esta razão, o GPR trabalha bem em regiões com areia e pedregulhos, que tendem a ser relativamente resistivas, enquanto que em regiões onde se têm materiais eletricamente condutivos, como é o caso de algumas argilas, este método alcança pouca profundidade e, conseqüentemente, passa a ter seu uso restrito para alguns tipos de trabalhos. O teor de argila na ordem de 5% a 10% pode reduzir a profundidade de penetração do radar a menos de um metro (WALTHER, *et. al.*, 1986).

As Equações (41) e (42) acima expostas, para a velocidade e coeficiente de atenuação, mostram de que maneira a estrutura dielétrica do subsolo afeta o que é visto nas imagens de GPR. Existem muitos outros fatores como o acoplamento das antenas sobre o solo, a distribuição da energia irradiada, os mecanismos de perdas de energia que podem afetar a imagem do radar complicando a interpretação dos dados de radar (KNIGHT, 2001).

2.1.7 Fator de performance

Outro fator importante, ao se escolher as antenas em função da profundidade que se deseja alcançar, é estudar a profundidade do sinal de radar, que nada mais é do que o desempenho do sistema ou razão entre a amplitude do sinal transmitido e a

sensibilidade mínima do receptor, medida em (dB), que pode ser determinado pela seguinte expressão dada por (DAVIS e ANNAN, 1989):

$$Q = \frac{\xi_T \xi_R G_T G_R g \sigma_c e^{-4\alpha L}}{64 \pi^3 f^2 L^4} . \quad (44)$$

Onde:

Q = Desempenho do sistema;

ξ_T = Eficiência da antena transmissora;

ξ_R = Eficiência da antena receptora;

G_T = Ganho da antena transmissora;

G_R = Ganho da antena receptora;

g = Ganho devido ao espalhamento originado pelo alvo;

σ_c = Área da seção transversal do espalhamento do alvo;

α = Coeficiente de atenuação no meio.

f = Frequência;

L = Distância do alvo;

2.2 Propriedades elétricas da água

Segundo Annan (2003), por ser uma molécula polar (possui uma distribuição de densidade desigual de elétrons), a água é o principal fator que influencia nas propriedades elétricas da maioria dos materiais e está presente nos mesmos, seja em maior ou menor quantidade. Ela desempenha um papel importante na determinação da velocidade e da atenuação da energia no meio.

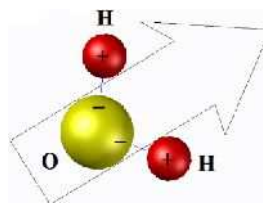


Figura 10. Esquema da molécula polar da água. $K^* = 80$; $\sigma = 0,15 \times \text{TSD (mS/m)}$, onde TDS é o Total de Sólidos Dissolvidos em mg/l e relaxação rotacional a 10 GHz. Adaptada (ANNAN, 2003).

O átomo de oxigênio além do par de elétrons, mostrados na Figura (10), utilizados na ligação covalente com os dois átomos de hidrogênio, possui também

outro par de elétrons que não é utilizado nesta ligação, totalizando 2 pares de elétrons (ANNAN, 2003).

A água é altamente polarizável porque o momento dipolar da molécula da água se alinha quando submetido a um campo elétrico. Isso ocorre porque a distribuição dipolar da água, no estado líquido, será redistribuída de maneira a alinhar-se com o campo elétrico aplicado (ANNAN, 2003).

De acordo com Annan (2003), quando substâncias iônicas são colocadas na água elas são dissociadas formando íons carregados negativamente e positivamente que conduzem eletricidade pela água. A água pura é má condutora de eletricidade, porém a condutividade é proporcional ao número de íons presentes dissolvidos. A Salinidade e o TSD (Total de Sólidos Dissolvidos) são medidas de concentrações de íons na água.

A água se comporta como um material polarizável até frequências na ordem de 10000 MHz, quando o momento dipolar da molécula de água deixa de se alinhar ao campo elétrico imposto. Quando este alinhamento com um campo elétrico externo não está sincronizado ocorre a dissipação de energia no material. Este fenômeno é conhecido como processo de relaxação natural (ANNAN, 2003).

A relação entre a permissividade e a condutividade na água pura, em função da frequência, é mostrada nas Figuras (11) e (12), respectivamente.

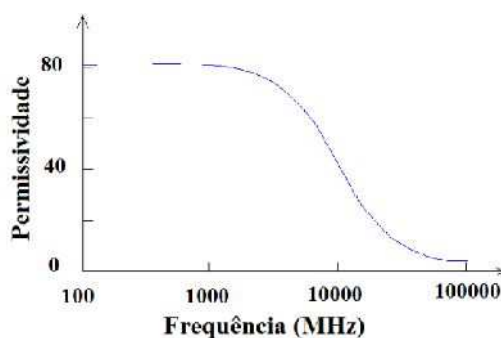


Figura 11. Variação da permissividade da água pura em função da frequência. Fonte (ANNAN, 2003).



Figura 12. Variação da condutividade da água pura em função da frequência. Fonte (ANNAN, 2003).

Pode-se observar na Figura (11), que para frequências menores que 1000 MHz, a permissividade é constante e sofre um decréscimo brusco quando passa pela região da frequência onde ocorre o efeito da relaxação da água. Já a Figura (12), apresenta um acréscimo brusco na condutividade para frequências maiores que 1000 MHz, mostrando que o uso do GPR, na água pura, com frequências maiores que 1000 MHz, começa a ser inviável pelo aumento da condutividade (ANNAN, 2003).

2.3 Influência da água nos solos

A presença de água no solo afeta as propriedades dielétricas do mesmo, tornando um fator importante a ser considerado, uma vez que isto aumenta a condutividade e a constante dielétrica (SAARENKETO, 1998). A presença de água nos materiais está também ligada à sua porosidade e granulometria. A porosidade do solo é definida como a fração volumétrica de vazios, ou seja, o volume de vazios dividido pelo volume total do solo e que varia de acordo com o grau de compactação do mesmo. Quando um solo tem seus poros inteiramente ocupados por água, diz-se que está saturado. Ao contrário, quando está completamente seco, seus poros estão totalmente ocupados por ar. O teor de umidade é a porcentagem de água contida em certa massa de solo, tomando-se como referência o peso da massa do solo seco (BAPTISTA, 1976).

Os sedimentos finos e argilosos apresentam superfície eletricamente carregada devido à presença de íons, o que ocasiona a adsorção de moléculas de água, gerando um mecanismo de condutividade superficial (MITCHELL, 1993). Isso faz com que os materiais argilosos sejam muito condutores e com isso a energia eletromagnética seja dissipada, fazendo com que o pulso refletido seja muito minimizado. Não há

propagação desse tipo de energia em camadas de argila muito espessas e os sinais presentes nos registros de radar, abaixo dessa camada, podem ser considerados como ruídos do sistema, no entanto, se a espessura for muito fina, parte da energia pode atravessá-la (JOL e SMITH, 1995).

Segundo Saarenketo (1998), a água presente nos solos e agregados é classificada da seguinte forma: água higroscópica, capilar e livre; também ressalta que os meniscos formados pela ação da água em contato com o solo podem ter grande influência sobre o comportamento destes materiais. A distribuição da água nos solos é descrita na Figura (13).

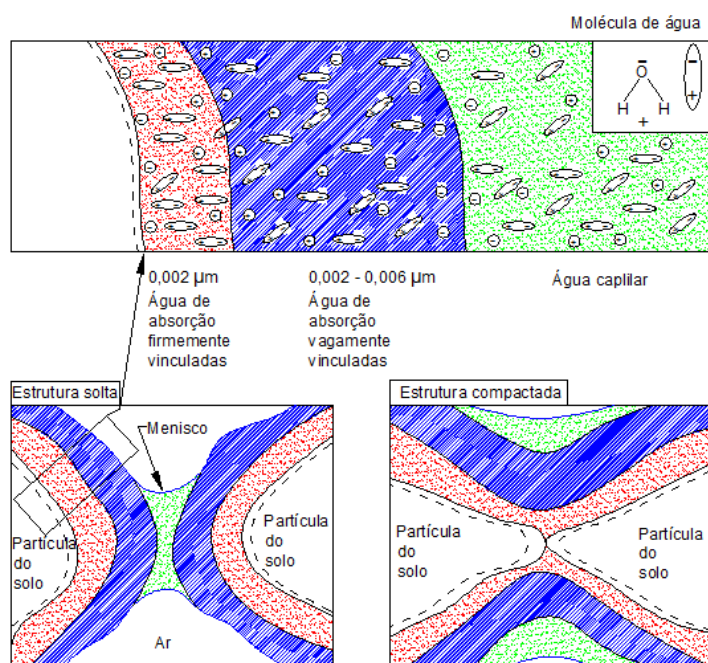


Figura 13. Estrutura de ligação entre a molécula de água e uma partícula sólida. Adaptada (SAARENKETO, 1998).

2.3.1 Água higroscópica e água de adsorção ou adesiva

Essas moléculas de água estão firmemente fixadas (*retidas*) por adsorção às partículas minerais do solo e ainda se encontra no solo seco ao ar livre. Em torno das partículas minerais são formadas camadas delgadas como *capas* ou *filmes*, principalmente pelos coloides do solo. Não se movem, nem por capilaridade e nem por gravidade; só se movimentam sob a forma de vapor d'água. Esta camada de água é afetada pela temperatura, pela umidade do ar e pela pressão atmosférica. Uma

camada de água higroscópica consiste em uma camada monomolecular extremamente bem arranjada, onde as superfícies dos minerais são constituídas de cargas negativas. Íons e outras impurezas superficiais ativas perturbam a estrutura da água estando eles hidratados ou não. Esses íons não hidratados ocuparão os espaços, e assim, impedirão a estrutura da água e íons hidratados de atrair moléculas de água com cargas elétricas opostas (MITCHELL, 1993).

2.3.2 Água Capilar

A água capilar é retida no solo pela tensão superficial em forma de películas em torno das partículas minerais que constituem o solo. Ela circula através de solos de grãos muito finos, como solos argilosos e siltosos, que deixam entre si canais de diâmetro capilar e contraria muitas vezes a ação da gravidade (BAPTISTA, 1976). O seu limite superior é dado pela capacidade de campo (*água gravitacional*) e o limite inferior é dado pelo coeficiente higroscópico (*água higroscópica*).

2.3.3 Água livre ou gravitacional

A água gravitacional circula livremente através dos poros dos solos, ocupando os poros maiores e sendo retida levemente pelas partículas do solo. Pode ser removida (drenada) pela força da gravidade. Seu limite superior é representado pelo solo saturado, ou seja, quando os poros estão totalmente cheios de água, e o limite inferior é dado pela capacidade de campo.

2.4 Características elétricas dos meios

As propriedades elétricas dos materiais incluem:

- Permeabilidade magnética;
- Constante dielétrica;
- Condutividade elétrica.

Segundo Saarenketo (2006), a permeabilidade magnética de um solo é considerada igual para o valor do vácuo e, desta maneira, na maioria dos casos, não afeta a propagação dos pulsos do GPR.

O termo valor dielétrico ou permissividade dielétrica relativa se refere à capacidade de um material para armazenar e depois permitir a passagem de energia eletromagnética, quando um campo elétrico lhe é imposto. Este termo também pode ser descrito como uma medida da capacidade de um material dentro de um campo eletromagnético em se polarizar e, portanto, responder às ondas eletromagnéticas propagadas. O valor dielétrico de um material é uma função das proporções do volume de seus componentes materiais e as propriedades dielétricas destes componentes. Permissividade dielétrica é, geralmente, uma série complexa que possui parte real e imaginária, sendo também uma função da frequência. A parte imaginária é muitas vezes chamada de perda e que é uma medida da proporção da carga transferida na condução e armazenada na polarização (SAARENKETO T, 2003).

A condutividade elétrica do solo é atribuível a livre ou restrita transferência de elétrons e íons, o que pode ser atribuído a vários fenômenos (SAARENKETO, 1997; SAARENKETO, 2003). Mas quando as superfícies destes minerais entram em contato com a água líquida, eletrólitos são formados e a transmissão iônica, gerada pelo campo elétrico, provoca condução elétrica. O movimento iônico é proporcional à magnitude do campo elétrico e é afetado pela temperatura, concentração iônica e tamanho iônico. A condutividade elétrica do meio contribui para a atenuação das ondas do GPR e, em certa medida, a sua reflexão (SAARENKETO, 2006). O efeito das variações na condutividade elétrica e na suscetibilidade magnética nos radargramas tem sido demonstrado por Mancilla e Treviño (1996).

Conforme mostra a Tabela (1), pode-se observar que a velocidade de propagação da onda decresce à medida que aumenta o valor da constante dielétrica relativa do material e que os materiais mais condutivos são também os que apresentam maior atenuação. Pode-se assim, antever alguns comportamentos da onda eletromagnética no meio em estudo, como também verificar se o método GPR é o mais adequado para a coleta dos dados que se propõem.

Tabela 1. Propriedades eletromagnéticas típicas de alguns materiais. Fonte (ANNAN, 2003).

<i>Material</i>	<i>Constante dielétrica relativa: K'</i>	<i>Condutividade elétrica (mS/m): σ</i>	<i>Velocidade (m/ns): v</i>	<i>Atenuação (dB/m): α</i>
Ar	1	0	0,3	0
Água destilada	80	0,01	0,033	0,002
Água do mar	80	3000	0,01	1000
Areia seca	3 – 5	0,01	0,15	0,01
Areia saturada	20 – 30	0,1 – 1	0,06	0,03 – 0,3
Siltes	5 – 30	1 – 100	0,07	1 – 100
Argilas	5 – 40	2 – 1000	0,06	1 – 300
Granito	4 – 6	0,01 – 1	0,13	0,01 – 1

2.5 Modos de aquisição dos dados

A técnica de aquisição dos dados ou modos de operação do GPR não difere muito do levantamento sísmico de reflexão convencional, podendo ser discriminada em 4 tipos: (a) perfis de reflexão com afastamento constante (Figura 14), em que se utiliza uma antena monoestática ou então um par de antenas biestáticas separadas por uma distância fixa (*offset comum*); (b) sondagens de velocidade, utilizadas para estimar a velocidade das ondas de radar no solo, que incluem a técnica WARR (*wide angle reflection and refraction*) com a qual uma antena é mantida fixa enquanto a outra é deslocada (Figura 15); (c) a técnica CMP (*Common Mid Point*), segundo a qual ambas as antenas são deslocadas simetricamente em relação a um ponto central (Figura 16); (d) e os modos de transiluminação ou tomografia, que consistem em colocar as antenas transmissora e receptora em dois poços adjacentes, cada uma em um poço (MELO, 2007). A Figura (17) mostra uma inspeção realizada por esse último método em uma viga de concreto armado.

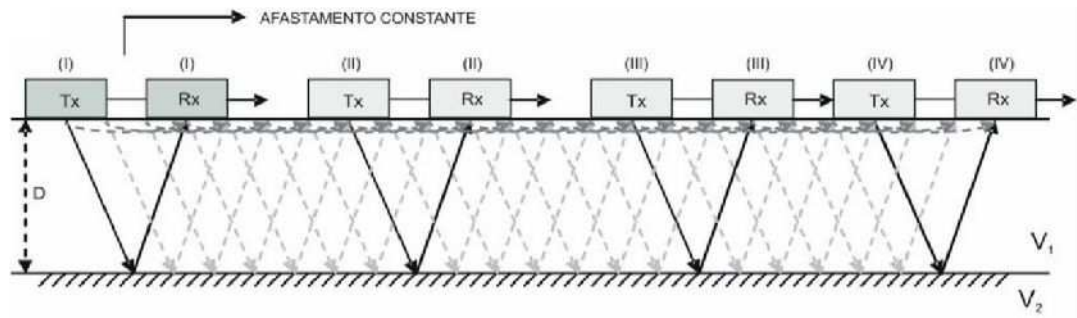


Figura 14. Modelo de aquisição usual, afastamento comum ou *off-set common*. Fonte (MELO, 2007).

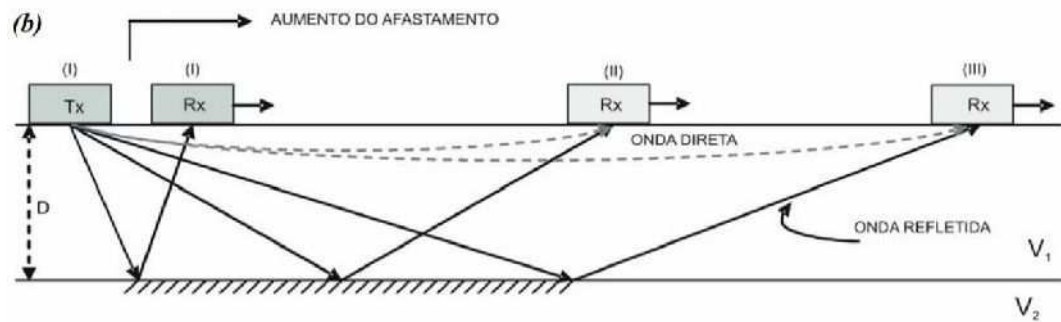


Figura 15. Modelo de aquisição WARR (*Wide Angle Reflection and Refraction*). Fonte (MELO, 2007).

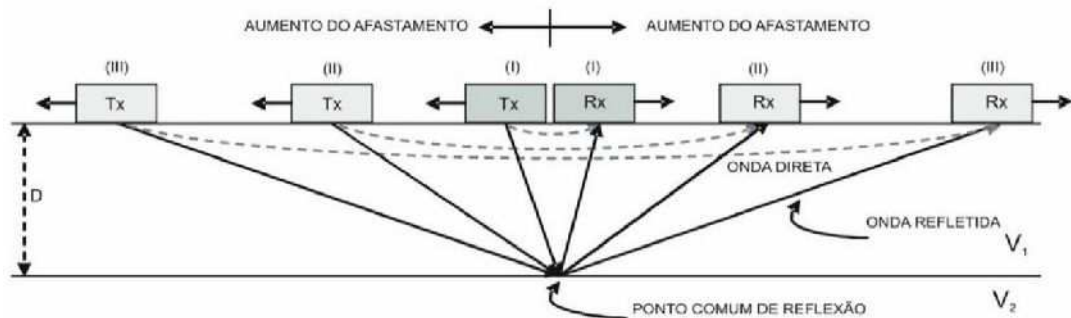


Figura 16. Modelo de aquisição CMP (Ponto Médio Comum). Fonte (MELO, 2007).

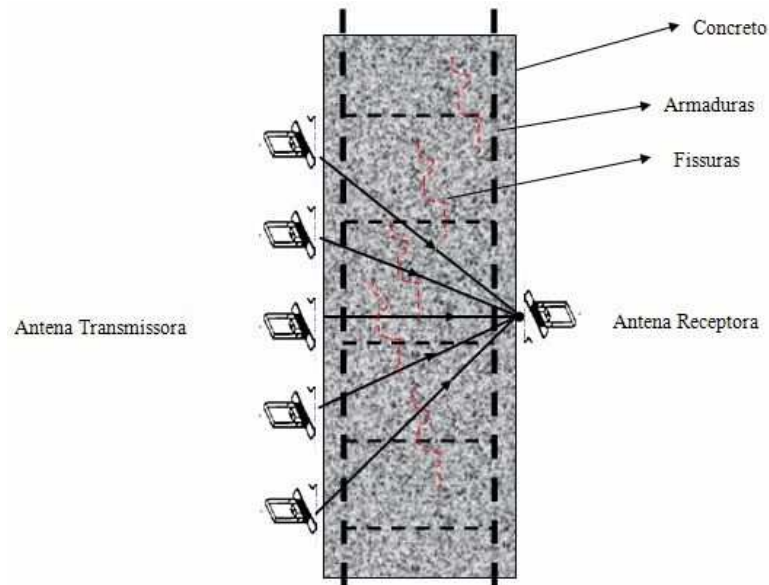


Figura 17. Transiluminação aplicada a uma peça de concreto armado fissurada. Fonte (LOPES, 2009).

2.6 Aquisição dos dados

Ao se realizar levantamentos com o GPR deve-se levar em conta não somente as suas potencialidades, mas também suas limitações, dificultando a aquisição em ambientes em locais íngremes, de difícil locomoção das antenas, ruidosos, dentre outros.

Levando em consideração que a maioria dos sistemas GPR que existem são do tipo *offset comum*, existem 7 parâmetros básicos, que segundo Annan (2003), devem ser definidos:

- ✓ Frequência da antena;
- ✓ Tempo de janela;
- ✓ Intervalo temporal de amostragem;
- ✓ Intervalo espacial de amostragem;
- ✓ Separação entre as antenas;
- ✓ Linha de levantamento;
- ✓ Orientação das antenas.

2.6.1 Frequência da antena

Esta tarefa não é tão simples quanto parece. Existe uma relação de perda e ganho entre a resolução espacial, profundidade de penetração e portabilidade do sistema GPR (ANNAN, 2003). Isso porque ao se escolher uma alta resolução do radargrama a profundidade alcançada seria comprometida, pois quanto maior a resolução, menor a profundidade alcançada pelo sinal e menor o tamanho da antena. Por outro lado, ao escolher investigar grandes profundidades, seria necessário abrir mão de uma alta resolução e levar para campo grandes antenas, o que dificultaria o transporte do equipamento.

Existem basicamente 3 questões que interessam na seleção da frequência a ser utilizada:

- ✓ Resolução espacial (vertical e horizontal);
- ✓ *Clutter*;
- ✓ Profundidade.

Segundo Annan (2003), a resolução espacial coloca um limite sobre a frequência central f_c . A Equação (45) a seguir demonstra essa relação, onde Z é a separação espacial que deseja entre os alvos e K a constante dielétrica do meio em estudo:

$$f_c^R > \frac{75}{\Lambda Z \sqrt{K^*}} \text{ MHz} . \quad (45)$$

O “*Clutter*” em sistemas de radar referem-se aos sinais retornados de materiais heterogêneos, ou seja, contém sinais que vêm de alvos que não são de interesse ou de alvos de pequena escala como trincas, etc. O “*Clutter*” é crescente com o aumento da frequência e aumenta a dispersão do sinal. No entanto para minimizar estes efeitos é necessário aumentar o comprimento de onda, na ordem de 10 vezes, tornando-o maior que a heterogeneidade típica do meio ou a dimensão do “*clutter*” L (m). Observe que a dimensão do alvo deve ser maior que a dimensão “*clutter*” (ANNAN, 2003). A Equação (46) a seguir apresenta a frequência central de “*clutter*”:

$$f_c^C > \frac{30}{L \sqrt{K^*}} \text{ MHz} . \quad (46)$$

Para se determinar a frequência para exploração da profundidade é necessário que a seção transversal do alvo seja maior que o feixe emitido pelo GPR, de maneira que a energia retornada seja suficiente para a detecção. Annan (2003) sugere usar a Equação (47) para determinar a frequência central em função da profundidade requerida, onde D é a profundidade em metros.

$$f_c^D < \frac{1200 \sqrt{K^* - 1}}{D} \text{ MHz} . \quad (47)$$

Sendo que a Frequência central deve respeitar:

$$f_c^R < f_c < \min(f_c^D, f_c^C) . \quad (48)$$

Annan (2003) também sugere adotar os dados apresentados na Tabela (2), que foram baseados em experimentos práticos, levando em consideração que a resolução espacial desejada é cerca de ¼ da profundidade do alvo.

Tabela 2. Frequência central da antena em função da profundidade de investigação. Fonte (ANNAN, 2003).

<i>Profundidade (m)</i>	<i>Frequência central (MHz)</i>
0,5	1000
1,0	500
2,0	200
7,0	100
10,0	50
30,0	20
50,0	10

2.6.2 Tempo de janela

Este é um outro dado de muita importância, pois determina o tempo de abertura de coleta da antena receptora, quer dizer, determina o tempo que a antena receptora estará recebendo e armazenando os dados emitidos pela antena transmissora.

Annan (2003) sugere determinar o tempo de janela W majorando-o em 30% sobre a profundidade desejada, de acordo com a equação a seguir:

$$tw = 1,3 \frac{2 \cdot Profundidade}{v} \quad (49)$$

2.6.3 Intervalo temporal de amostragem

Este parâmetro é baseado no teorema de *Nyquist*, isto é, deve ser no mínimo metade do período da frequência mais alta que o sinal recebido possui e determina o intervalo entre os pulsos gravados em forma de onda. Devido à razão entre a largura da banda e a frequência ser igual à unidade, e para se contar com uma margem de segurança, a relação para o intervalo temporal a se utilizar como referência é dada pela Equação (50) e Tabela (3) ambas sugeridas por Annan (2003) na determinação deste parâmetro:

$$Intervalo = \frac{1000}{6 f_c} ; \quad (50)$$

Onde:

$Intervalo$ = Intervalo máximo em nano-segundos (ns);

f_c = Frequência central da antena em MHz.

Tabela 3. Intervalo máximo de amostragem em função da frequência central da antena. Fonte (ANNAN, 2003).

<i>Frequência central (MHz)</i>	<i>Intervalo máximo de amostragem (ns)</i>
10	16,70
20	8,30
50	3,30
100	1,67
200	0,83
500	0,33
1000	0,17

2.6.4 Intervalo espacial de amostragem

O intervalo espacial de amostragem está intimamente ligado à frequência central da antena e às características dielétricas da subsuperfície. Deve-se respeitar o intervalo de amostragem de *Nyquist* de $\frac{1}{4}$ do comprimento de onda no material onde está o alvo. A Equação (51) dada por Annan (2003) pode ser utilizada para este cálculo.

$$x = \frac{c}{4f_c\sqrt{K^*}} = \frac{75}{f_c\sqrt{K^*}} \quad (51)$$

Onde x é o intervalo espacial de amostragem em metros, f_c a frequência central da antena e K^* a constante dielétrica do meio.

2.6.5 Separação entre as antenas

A maioria das empresas que desenvolvem seus sistemas GPR, constroem suas antenas transmissoras e receptoras separadas por uma distância fixa denominada modo biestático. Contudo, um sistema que permite alterar essa configuração torna-se uma ótima ferramenta na detecção de alguns tipos de alvos.

Segundo Annan (2003) uma boa estimativa para a separação das antenas pode ser obtida por:

$$\text{Separação (m)} = \frac{2 \cdot \text{Profundidade (m)}}{\sqrt{K^* - 1}} \quad (52)$$

Uma análise que deve ser levada em conta é que ao aumentar a distância entre as antenas, se aumenta o caminho percorrido pelo sinal. Isso faz com que haja mais perdas. O comprimento do caminho percorrido pode ser obtido por:

$$L = \sqrt{\text{Separação}^2 + 4 \cdot \text{Profundidade}^2} \quad (53)$$

Não se deve fazer com que a separação entre as antenas seja tão grande a ponto que o caminho percorrido pelo sinal seja maior que 2 vezes a profundidade desejada (ANNAN, 2003).

2.6.6 Linhas de levantamento

Um aspecto importante é o estabelecimento de um grid, ou malha de pesquisa, e de um sistema de coordenadas. Geralmente, as linhas de levantamento são estabelecidas perpendicularmente à direção das características investigadas a fim de reduzir o número das linhas de levantamento. O espaçamento entre linhas é ditado pelo grau de variação do alvo na direção investigada. Quanto menor o alvo a ser pesquisado, menor deverá ser o espaçamento entre as linhas de levantamento.

2.6.7 Orientação das antenas.

Não há nenhuma orientação ideal para um alvo que possui todas suas dimensões iguais. Em alguns casos, pode ser aconselhável recolher dois conjuntos de dados com orientações de antenas ortogonais, a fim de extrair a informação de destino com base no ângulo de acoplamento. Se o sistema de antena utiliza um sinal polarizado circularmente, a orientação da antena torna-se irrelevante. A orientação pode ser importante, já que a maioria dos sistemas comerciais empregam antenas polarizadas. As diversas modalidades de implantação da antena estão ilustradas na Figura (18). O sistema mais utilizado é o “PR-BD” (ANNAN, 2003).

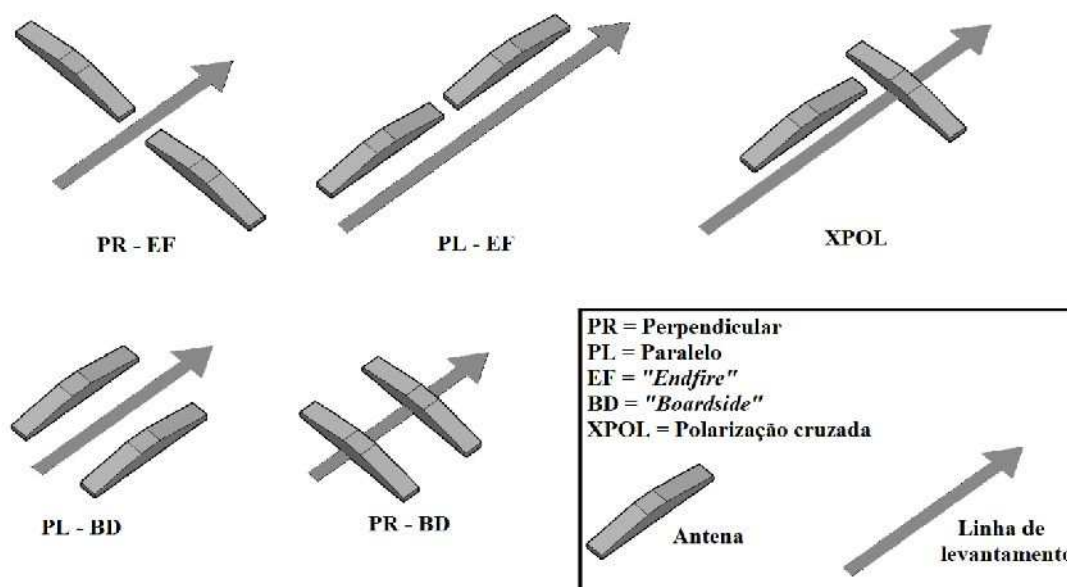


Figura 18. Maneiras de montagem antena. Adaptado (ANNAN, 2003).

2.7 Tratamentos dos dados do GPR

Uma imagem pode ser definida como uma função bidimensional, $f(x,y)$, em que x e y são coordenadas espaciais e a amplitude de f em qualquer par de coordenadas (x,y) é chamada de intensidade ou nível de cinza da imagem nesse ponto. O Processamento Digital de Imagem (PDI) é o processamento desta imagem por um computador (GONZALEZ e WOODS, 2009). O principal objetivo é melhorar o aspecto visual (pictorial) de certas feições estruturais para o analista humano e fornecer outros subsídios para a sua interpretação, inclusive gerando produtos (imagens) que possam ser posteriormente submetidos a outros tipos de processamentos.

Os dados obtidos em campo raramente desvendam toda a informação pretendida e quando isso não ocorre é comum recorrer a procedimentos físico-matemáticos, denominados de processamento, que se ajustam caso a caso (MELO, 2007). O processamento dos dados de radar pode incluir passos simples ou mais sofisticados, de modo a tornar as imagens mais nítidas, sendo possível selecionar e separar a informação disponível, com o objetivo de melhorar o registro ou de obter mais informações a partir dele (DOURADO, 2004). Este assunto é mais amplamente discutido por alguns autores como (POPINI, 2001; AGUIAR, 2005) e em uma linha de pesquisadores em imagens de satélites, que é o mesmo princípio, estão nomes como (MATHER, 2004; FONSECA, 2000). Alguns passos de processamento são descritos a seguir.

2.7.1 Pré-Processamento

Segundo Aranha (2011), o processamento básico envolve uma série de manipulações fundamentais que quando aplicadas aos dados os tornam produtos mais aceitáveis para a interpretação inicial e para a avaliação dos dados.

2.7.1.1 “*Declipping*”

Devido ao fato das amplitudes das ondas aéreas e diretas terem muito mais energia que as ondas refletidas no subsolo, a forma da onda nas primeiras amostras

podem estar clipadas, isto é, acima de uma determinada amplitude elas são cortadas. A função *Declipping* recupera a forma da onda realizando a interpolação dos dados. Esta função deve ser aplicada antes da filtragem (ARANHA, 2011).

2.7.1.2 Filtragem DC

Também conhecido como filtragem *dewow*. Esse filtro remove componentes de baixíssima frequência presentes nos dados. Esses componentes estão associados aos fenômenos de indução ou aos limites eletrônicos da instrumentação na manipulação dos dados durante a aquisição. Esses ruídos, tipicamente, ocorrem como resultado da saturação dos instrumentos eletrônicos no momento do registro das ondas aéreas e diretas, normalmente é o segundo estágio no processamento (ARANHA, 2011).

2.7.1.3 Marcação do “tempo zero”

Consiste na identificação nos dados do tempo de referência com relação à superfície do terreno. Isso é realizado identificando-se o tempo inicial de chegada da onda direta. Também é conhecida como *Set Time Zero* (ARANHA, 2011).

2.7.1.4 Ganhos temporais

Quando o sinal do GPR se propaga pelo subsolo ele sofre uma atenuação devido as suas propriedades dielétricas. Existem vários tipos de filtros temporais que aplicam ganhos aos dados: lineares, exponencial, exponencial esférico, constante e AGC (*Automatic Gain Control*). O AGC é muito utilizado apesar de desfazer as relações de amplitude na seção, não permitindo aplicação de técnicas de interpretação baseadas na variação da amplitude, como AVO (*Amplitude Versus Offset*). Pelo fato do sinal sofrer atenuação à medida que penetra no subsolo, as reflexões provenientes de grandes profundidades têm pouquíssima amplitude, isto é, são mais fracas. Enquanto as reflexões provenientes dos refletores mais superficiais têm amplitudes mais fortes. Para a visualização desses refletores mais profundos deve-se aplicar ganho variável com profundidade para que aquelas reflexões com amplitudes mais fracas sejam realçadas e possam ser visualizadas conjuntamente com as reflexões

mais fortes. Uma forma de equalizar essas amplitudes é escolher uma janela de tempo na qual as amplitudes do sinal sejam normalizadas em relação à máxima amplitude - AGC. Esse procedimento é executado ao longo de todo o traço (ARANHA, 2011).

2.7.2 Processamento avançado

O processamento realizado nessa fase, normalmente é feito após o processamento básico, onde a imagem obtida serve de parâmetro na definição da estratégia para se melhorar a qualidade do radargrama pré-processado. Essa estratégia consiste em escolher os próximos passos no processamento, de acordo com os objetivos ou com as feições de interesses na imagem que se deseja realçar para facilitar a interpretação (ARANHA, 2011).

2.7.2.1 Migração

Trata-se de uma técnica de processamento que consiste em aplicar um operador matemático ao longo da seção, a fim de reposicionar os eventos que aparecem na seção de radar no lugar correto em tempo ou em profundidade. Apesar de ser uma ferramenta muito útil, na melhoria da qualidade das seções de radar, para ser eficiente necessita que se tenha um perfil de velocidade da área com boa precisão, o que nem sempre é possível em razão de diversos fatores. Além disso, é uma técnica que requer grande performance computacional, o que nem sempre está disponível. Existem várias técnicas de migração, entre elas, destacam-se: migração no domínio do tempo, no domínio da frequência, pré-empilhamento, pós-empilhamento, em profundidade (ARANHA, 2011; CLAERBOUT, 2010; FISCHER, *et. al*, 1992; BOTELHO e MUFIT, 1995).

2.7.2.2 Análise de velocidade

Baseia-se na determinação da velocidade a partir dos perfis CMP's (*Common-Midpoint*) ou WARR's (*Wide Angle Reflection and Refraction*). Normalmente são necessários programas adequados para a elaboração do perfil de velocidade em

profundidade (tempo), ou da velocidade média. Existem várias técnicas desenvolvidas para o processamento de dados sísmicos que podem ser utilizadas para os dados de radar (ARANHA, 2011; CLAERBOUT, 2010; FISCHER, *et. al*, 1992)

2.7.2.3 Correção estática

Consiste na utilização do perfil de velocidade, ou da velocidade média, para corrigir o perfil de radar em relação à topografia do terreno (ARANHA, 2011). Os traços são deslocados em tempo desde a elevação até o *Datum* escolhido para a correção topográfica. O método é simplesmente um deslocamento em tempo do traço. Entretanto, este método só funciona bem para os eventos que se propagam verticalmente. (PESTANA e BOTELHO, 1997).

2.7.2.4 Conversão em profundidade

Consiste em converter o perfil de radar, que é obtido em tempo *versus* posição, em perfil de profundidade *versus* posição, utilizando o perfil de velocidade ou a velocidade média obtida para a área (ARANHA, 2011).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão abordados os aspectos relacionados à caracterização das áreas de estudo, os materiais utilizados e os métodos para os 3 experimentos realizados e descritos nos artigos 1, 2 e 3.

3.1 Caracterização das áreas de estudo

a) ETA

Para a realização do primeiro experimento, os dados foram coletados em uma caixa de decantação da Estação de Tratamento de Água (ETA), situada na Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa – MG, Brasil (Figura 19).



Figura 19. Caixa de decantação da ETA.

A caixa de decantação é construída em concreto armado e possui aproximadamente 18 metros de diâmetro. A parte mais rasa possui em média 2,989 metros e a mais profunda 3,548 metros. O local foi escolhido por apresentar características favoráveis a uma área experimental controlada e por já se ter dados de levantamento topográfico realizados com estação total, levantamentos estes extraídos de Carmo (2014).

b) Represa

O local de estudo escolhido foi uma das represas do Ribeirão São Bartolomeu, localizada no campus da UFV (Universidade Federal de Viçosa), no município de

Viçosa, em Minas Gerais, por se ter um levantamento batimétrico recente para fins de validação (Figura 20).

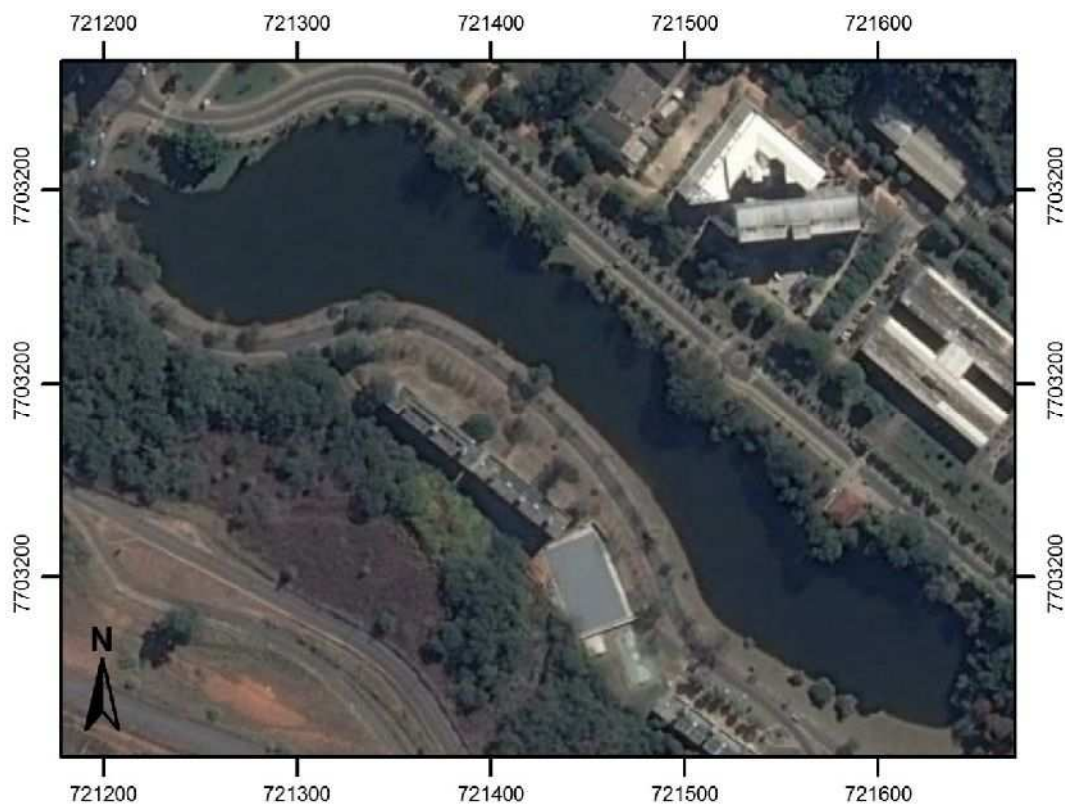


Figura 20. Imagem da represa das 4 pilastras da UFV. Sistema de coordenadas WGS84, projeção UTM, fuso 23. (Fonte: Google Earth. Acesso em 10/10/2015).

3.2 Instrumentação utilizada

a) Caixa de decantação da ETA

- Sistema RAMAC desenvolvido pela MALA *Geoscience*, com uma antena *unshielded* de frequência central igual a 200 MHz e um dispositivo *hip chain* utilizado para a medição das distâncias do GPR;
- Estação Total GTS 212 com precisão nominal angular, horizontal e vertical de 5 segundos e linear de $3 \text{ mm} \pm 5 \text{ ppm}$.

b) Represa

- Sistema RAMAC desenvolvido pela MALA *Geoscience*, com uma antena *unshielded* de frequência central igual a 100 MHz e um dispositivo *hip chain* utilizado para a medição das distâncias do GPR;

- Estação Total FOIF RTS 650 com precisão nominal angular, horizontal e vertical, de 5 segundos e linear de $2 \text{ mm} \pm 2 \text{ ppm}$;
- Receptor GNSS Leica 900 CS.

c) Softwares utilizados

- Matlab[®] Versão 2012b;
- ArcGIS 10.1[®];
- Action[®];
- Minitab 17[®];
- Topograph[®];
- GPower 3.1.9.2[®].

3.3 Planejamento e Levantamento

a) ETA

Foram determinadas previamente 13 seções. Procurou-se distribuí-las radialmente de maneira uniforme. No entanto a 13^o seção não seguiu o mesmo padrão por causa da existência de uma passarela, a qual impediu sua coleta na radial. A Figura (21) mostra a distribuição dos pontos amostrados na ETA com estação total, que serão adotados como referência, bem como as direções dos 13 perfis levantados com o GPR. Pode-se observar na Figura (21) que os pontos oriundos do levantamento com o GPR apresentam-se como uma linha, isso porque o espaçamento entre os traços foi de 5 cm apenas. No entanto, é possível ver no zoom da mesma figura os pontos indicando a posição de cada traço em um sistema de coordenadas local.

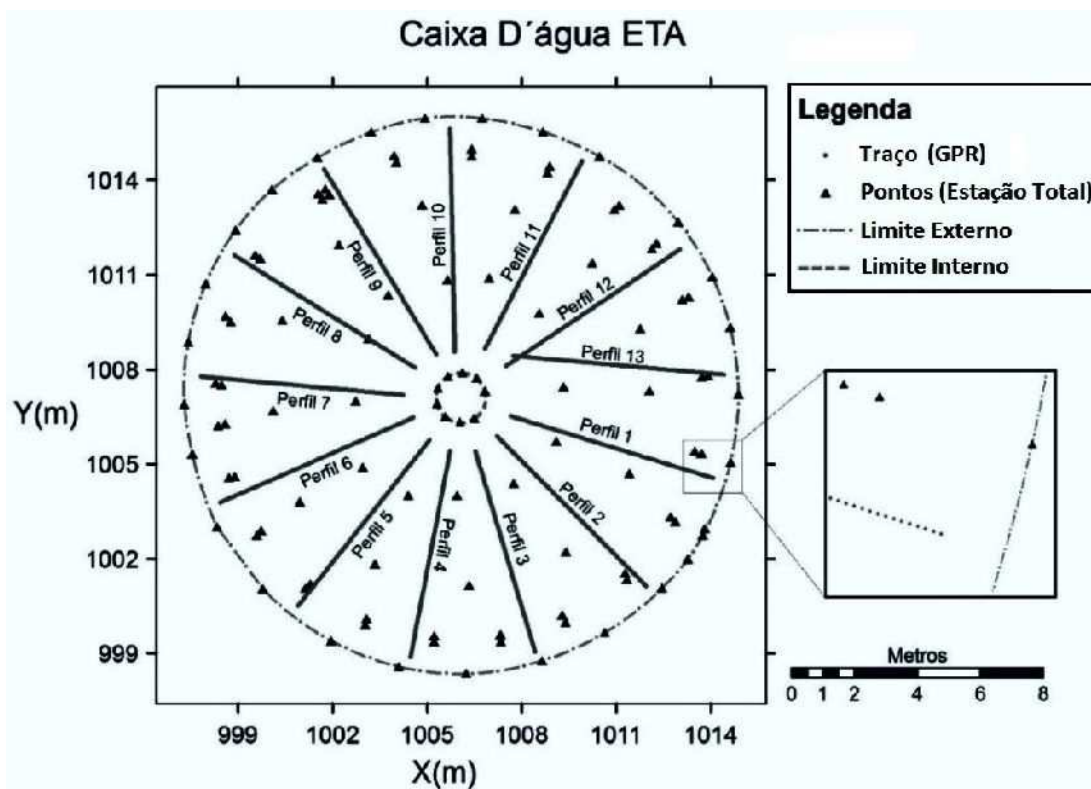


Figura 21. Pontos amostrados pela estação total e as direções dos 13 perfis levantados com o GPR.

Em seguida, foram levantados os 13 radargramas no sentido centro-borda. A barca, com o sistema GPR, foi presa por nylon nas suas extremidades a fim de conservá-la o mais alinhada possível.

b) Represa

Os reservatórios são classificados em pequenos, médios e grandes em função do volume de acordo com a Tabela (4) (CARVALHO, *et. al.*, 2000).

Tabela 4. Classificação dos reservatórios.

Porte do reservatório	Classificação em volume (m ³)	Frequência de levantamento
Pequeno	Menor que 10×10^6	2 anos
Médio	Entre 10 a 100×10^6	5 anos
Grande	Maior que 100×10^6	10 anos

Segundo a orientação da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), a escala do mapa tem que ser adequada à qualidade e precisão desejada, podendo ser usada como referência. Assim, as seções nos desenhos devem estar distanciadas de 1,0 cm, em formatos de no máximo 1m x 1m. Caso o leito não apresente grandes variações,

podem-se adotar espaçamentos maiores, de até 3,0 cm no mapa. A Tabela (5) apresenta uma orientação (CARVALHO, *et. al.*, 2000).

Tabela 5. Distâncias entre seções transversais.

Escala do mapa	Distância entre seções (m)	Tipo de reservatório
1 : 2.000	20	Pequeno
1 : 5.000	50	Médio
1 : 10.000	100	Médio a grande
1 : 20.000	200	Grande
1 : 25.000	250	Grande

Para um pequeno lago, as seções transversais podem ser espaçadas em valores próximos de 15 m. Quanto maior for o reservatório, maior poderá ser o espaçamento das seções sem perder a acurácia. Para uma área de superfície de 600.000 m² as seções podem chegar a 150m caso a topografia seja uniforme (RAUSCH e HEINEMANN, 1968).

O reservatório em estudo possui aproximadamente 75.000 m³, se enquadrando na categoria de reservatórios de pequeno porte. Como a maior extensão em estudo é da ordem de 500 metros, foi utilizado um espaçamento de 10 metros entre as seções transversais totalizando 50 seções (Figura 22). Estas seções foram materializadas com estacas e levantadas com estação total utilizando uma poligonal fechada.

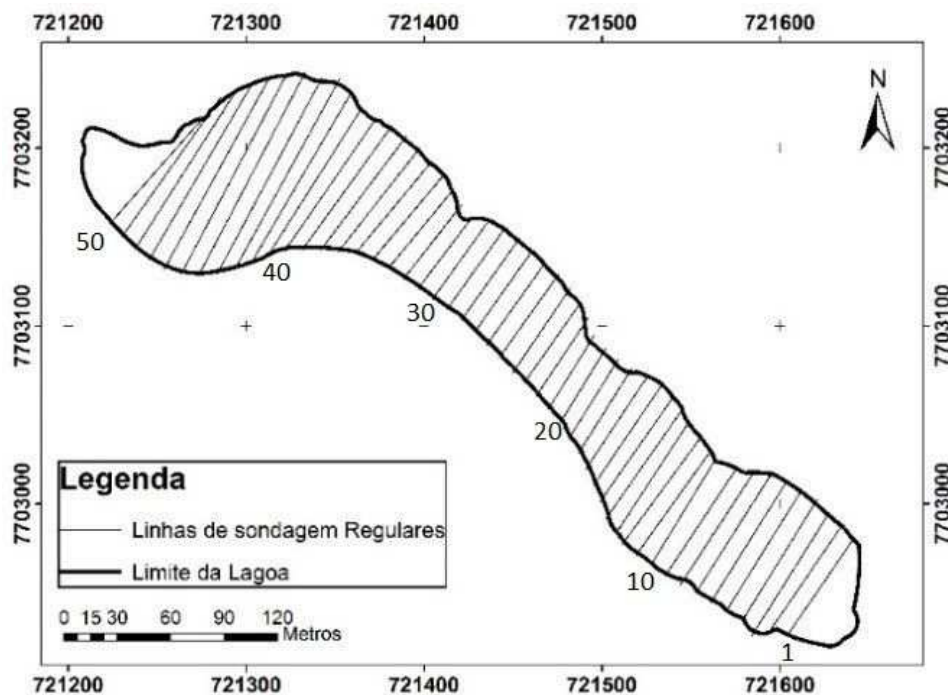


Figura 22. Limite da Lagoa e linhas de sondagens planejadas. Sistema de coordenadas WGS84, projeção UTM.

É possível observar na Figura (22) que não foi possível o lançamento de linha de sondagens no início e no final da represa por causa da existência de estruturas de concreto armado, árvores e baixa profundidade impedindo a locomoção do barco.

A Tabela (6) apresenta as precisões da poligonal de apoio obtidas com o *software* Topograph®.

Tabela 6. Fechamento da poligonal de apoio.

	Erros
Relativo	1:23724
Linear	0,043 m
Eixo Norte	-0,041 m
Eixo Este	-0,014 m
Altimétrico	0,013 m

Os perfis foram rastreados utilizando o Sistema de Navegação Global por Satélite (GNSS) com as constelações GPS/GLONASS, nos dias 24/01/2014 e 25/01/2015, dias do ano 24 e 25 respectivamente, por meio do posicionamento relativo cinemático (Figura 23), com taxa de coleta de 1 segundo, bem como pela topografia convencional com estação total (Figura 24) e trena (Figura 25).



Figura 23. Aspecto da Antena do Receptor GNSS posicionada no centro das antenas GPR.



Figura 24. Levantamento com Estação Total.



Figura 25. Medição a trena da estaca levantada pela estação total até o centro das antenas GPR.

Os 50 perfis foram coletados seguindo um alinhamento demarcado em campo (Figura 22). Utilizou-se de cordas para o deslocamento da embarcação e auxílio na manutenção do alinhamento da aquisição.

3.4 Desenvolvimento do Software

Para alcançar os objetivos propostos foram desenvolvidas inúmeras rotinas de código em Matlab[®]. Estas rotinas, quando organizadas, resultaram em um aplicativo chamado *GPR Bathymetry* com várias funcionalidades implementadas que, atualmente, conta com aproximadamente 16200 linhas de código. O objetivo do desenvolvimento desse aplicativo é disponibilizar ao usuário que trabalha com o GPR uma ferramenta gratuita, que, inicialmente, foi desenvolvida para aplicações batimétricas. Ele encontra-se na versão v1.1, conta com 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* e semiautomática através do *fclass3*. Um tutorial de uso das ferramentas utilizadas nos experimentos é apresentado no Apêndice deste trabalho.

Apenas as ferramentas desenvolvidas nos experimentos realizados serão descritas a seguir:

a) Classificador *fclass2*

Este classificador foi desenvolvido para ser aplicado a radargramas já processados e sem a região de onda direta e onda aérea. Para este processo de classificação foi desenvolvida uma ferramenta chamada *fclass2* que 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 apresentou baixo custo 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 (26) apresenta um fluxograma que explica a construção da função *fclass2*, onde *i* representa as linhas e *j* as colunas do radargrama.

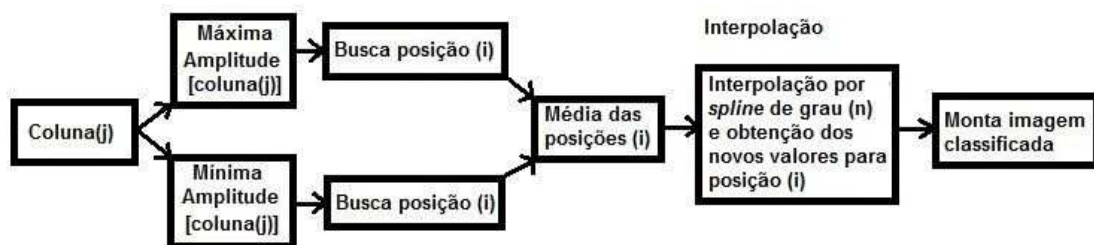


Figura 26. Fluxograma da função *fclass2*.

b) Classificador *fclass3*

O radargrama, oriundo do levantamento realizado na seção 1, está apresentado na Figura (27), onde se pode observar alguns tipos de reflexões que ocorreram na superfície, nas paredes e no fundo.

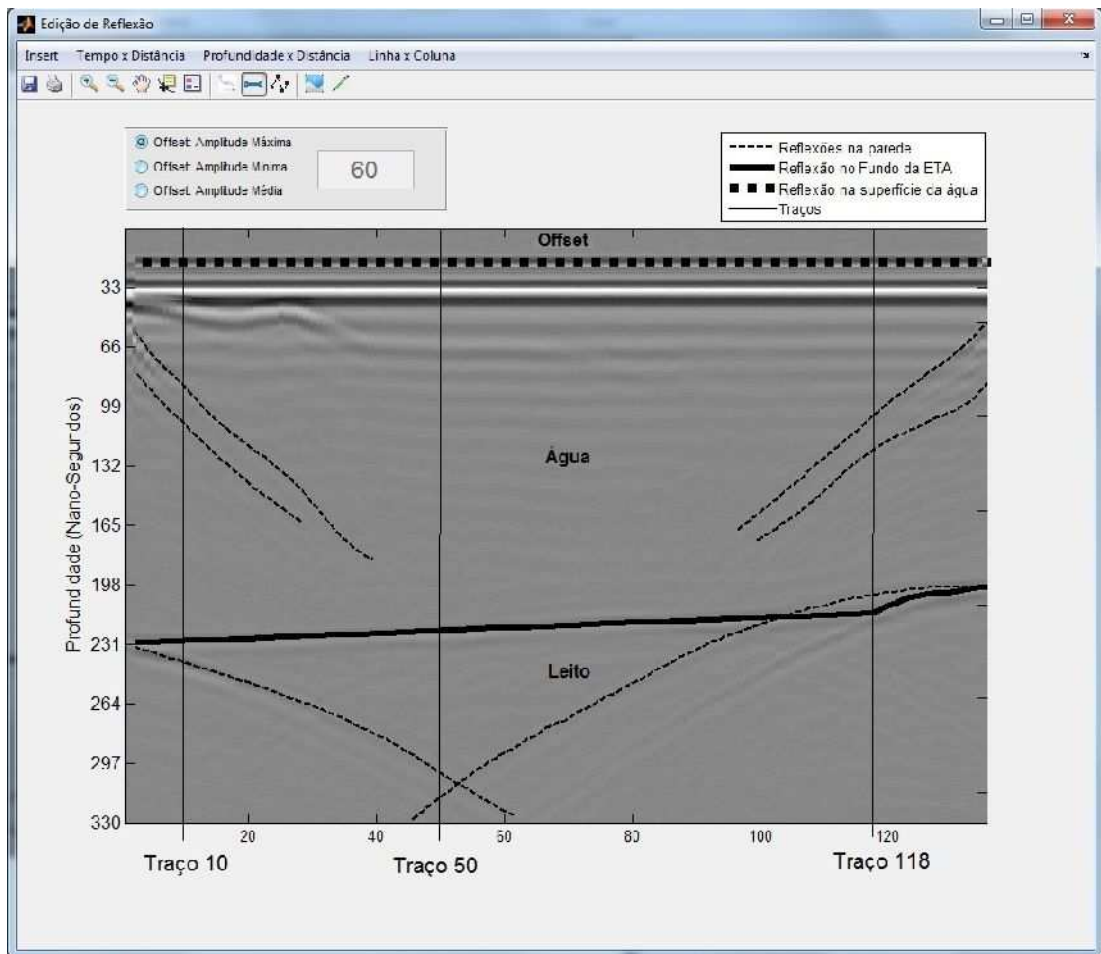


Figura 27. Pode-se observar no radargrama as reflexões na superfície da água, algumas reflexões na parede e a reflexão no fundo de concreto da ETA.

A Figura (28) apresenta os aspectos dos traços 10, 50 e 118 contidos no radargrama da Figura 27, onde são mostradas as interfaces de reflexão ar-água, água-leito. 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. Para facilitar a interpretação será usada nas ordenadas, em alguns casos, a representação em números de linhas (*pixels*) ao invés da unidade de tempo (ns).

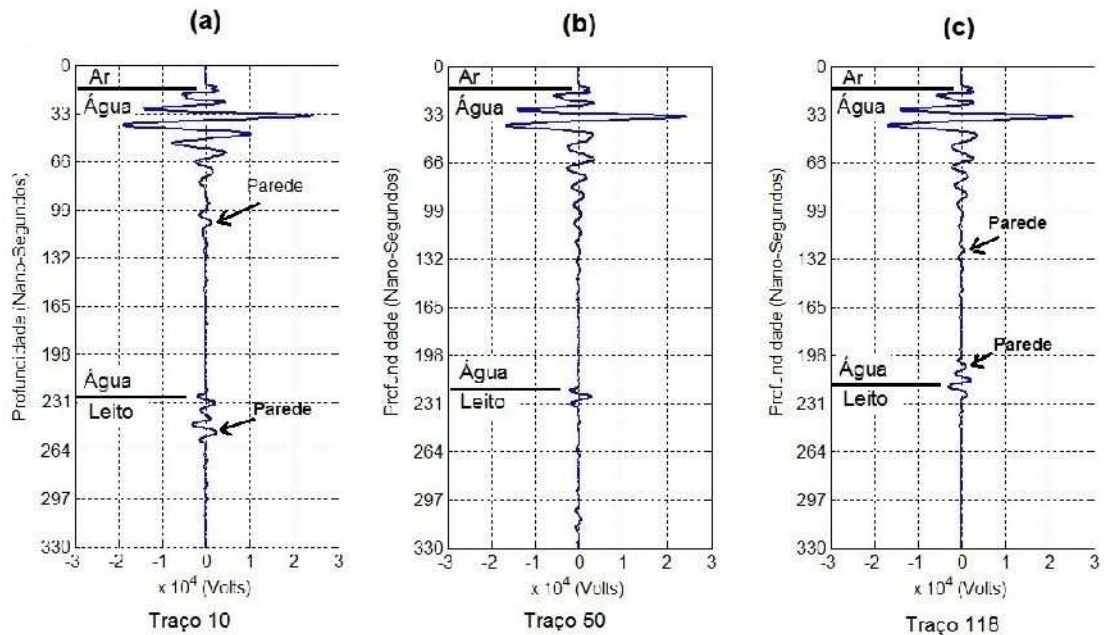


Figura 28. Aspecto dos traços (colunas) 10, 50 e 118 do perfil 1. A unidade das abscissas é em volts. Pode-se observar que os traços apresentam reflexões do piso e da parede da caixa d'água.

O radargrama é o conjunto destes traços, formando, dessa forma, uma imagem digital como mostra a Figura (29).

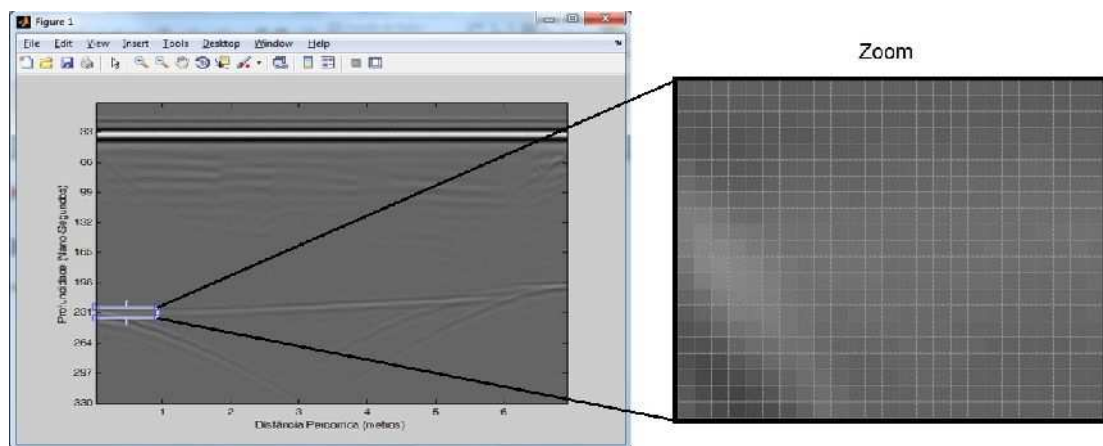


Figura 29. Construção do radargrama.

Após análises sobre os traços e considerando os traços 10, 50 e 118 (Figura 28), pertencentes a seção 1, amostrados para este trabalho, foram observados os seguintes comportamentos dos sinais:

- a) Existe um primeiro pico que representa a interface entre o ar e a água;
- b) O sinal sofre uma atenuação de forma gradativa na água até, de certa forma, se estabilizar;

- c) Há uma diferença brusca da amplitude quando o sinal do fundo e/ou da parede é refletido. É importante salientar que nem sempre a amplitude maior será a do fundo (Figuras 27 e 28).
- d) Após esta última reflexão o sinal continua sendo atenuado, até ter sua recepção interrompida no tempo de janela pré-determinado pelo usuário, ou seja, o equipamento coleta as informações de resposta durante um determinado intervalo de tempo denominado *Time Window*.

A primeira etapa no desenvolvimento do *fclass3* foi a identificação da interface ar-água, que será chamada de *offset*. Para isso foi implementada uma rotina onde um vetor percorre cada coluna e identifica o primeiro pico de cada coluna e sua respectiva linha de ocorrência (Figuras 27 e 28). Como a superfície da água está em nível, é de se esperar que todos os valores sejam iguais, por isso o valor adotado pela rotina será a média aritmética arredondada para o valor inteiro mais próximo.

A segunda etapa foi a identificação da interface água-leito, isto é, o fundo da caixa d'água. Esta não foi uma tarefa fácil por causa dos seguintes pontos:

- a) Não se pode afirmar que a reflexão do fundo é a 1°, 2°, 3°, ou a enésima maior reflexão que ocorre. Pode-se observar que existem várias reflexões assinaladas com círculos na Figura (30), que são maiores que a reflexão do fundo e que a sua amplitude é variável;

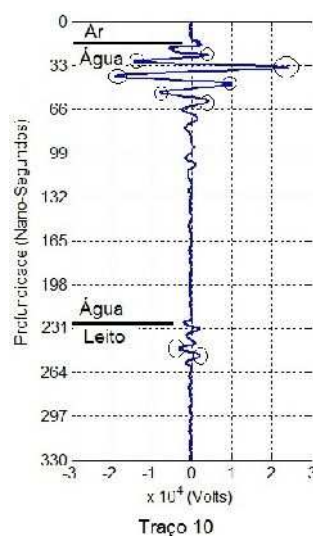


Figura 30. Aspecto do traço 10 do perfil 1.

- b) O mais comum é encontrar para a posição correspondente ao fundo da ETA a maior reflexão após a região de atenuação da onda (Figura 31).

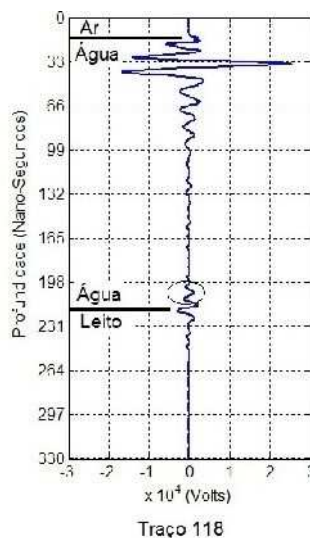


Figura 31. Aspecto do traço 118 do perfil 1.

- c) Por outro lado, também não se pode concluir que a maior reflexão após a atenuação do sinal é sempre a interface água-fundo, como se pode ver pela Figura (30).

Para solucionar a maior parte dos problemas destacados anteriormente, foi proposta uma rotina que identificasse, primeiramente, nesta segunda etapa, a região onde ocorre a atenuação do sinal. Para tanto, a solução encontrada foi a criação de um vetor que percorresse a coluna a partir do *offset* (interface ar – água) e o estabelecimento, pelo analista, de um patamar de comparação, que leva em consideração a amplitude da onda, abaixo do qual a rotina entende que se trata da região de atenuação (estável) (Figura 32).

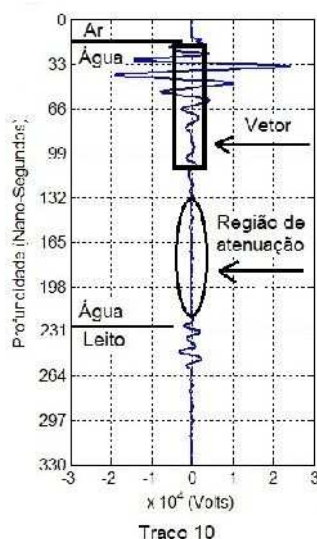


Figura 32. Região de atenuação.

A partir deste ponto (linha), a rotina busca a maior amplitude e a considera como sendo a interface água-leito da caixa d'água.

Não se conseguiu atender, simultaneamente, as condições descritas nos itens b e c desta seção. No entanto, se optou por atender a condição que ocorre com mais frequência, isto é, a condição descrita no item b. Este classificador utilizou em média 0,55 segundos para o processamento e exibição da imagem em um processador intel core i7.

c) **Remoção das elevações e depressões espúrias**

A existência de elevações e depressões espúrias, muitas vezes oriundas de ruídos na imagem, faz com que seja necessária a eliminação das mesmas. Para isso, foi desenvolvido um algoritmo que, baseado na informação da posição do *pixel* anterior e subsequente, verifica se existe uma mudança brusca de posição entre estes *pixels*. O novo valor é calculado mediante às informações anteriores e será, no máximo, igual ao valor informado pelo usuário em *ferramentas>configurações>Limite de Suavização*.

d) **Remove Background**

O objetivo deste 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 obtida 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.

e) **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 54). 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 55).

$$a(t) = \sqrt{x^2(t) + y^2(t)} \quad (54)$$

$$Ganho(t) = \left(\frac{A(t)}{\max(A(t))} \right)^{-1} \quad (55)$$

f) **Ganho variável por região**

Esta ferramenta interativa 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*, desenvolvido neste trabalho, aumente sua eficiência.

Atualmente, nos filtros de ganho disponíveis, 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 tempo (t), o que não acontece com a ferramenta “ganho variável por região”.

Esta ferramenta permite ao usuário aplicar um ganho ao radargrama de uma maneira local, isto é, é possível escolher um caminhamento para que seja aplicado a função de ganho. A função de ganho também pode ser ajustada por meio de pontos

de controle. Em seguida são interpolados por meio de uma *Spline* tendo assim sua seção de ganho final.

ARTIGO 1: EVALUATING SEMI-AUTOMATIC BATHYMETRIC RADARGRAMS

Artigo intitulado “**Evaluating semi-automatic bathymetric radargrams**” a ser submetido ao *Journal of Hydrologic Engineering*, na versão original em inglês.

Sandro H. Faria ^{1,2}, Dalto D. Rodrigues ², Nilcilene G. Medeiros ², Paulo R. A. Aranha ³

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sudeste de Minas, Juiz de Fora – MG, Brazil, Email: sandro.faria@ifsudestemg.edu.br.

² Universidade Federal de Viçosa – Viçosa - MG, Brazil, Emails: dalto@ufv.br, nilcilene.medeiros@ufv.br.

³ Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, Brazil, Email: aranha@igc.ufmg.br.

Abstract

The aim of this study was to evaluate the performance of the fclass3 classifier, available in the *GPR Bathymetry* application, developed for analyzing bathymetric radargrams. The study was conducted in a decantation tank of the water treatment plant, the as-built of which, obtained for the total station, will be used in the validation tests. Three comparison tests were carried out: comparison of scores showed the greatest discrepancy between measurements to be of 2 cm; for the sample of discrepancies between DEMs, the average was 1 cm, accuracy was 4 cm and the RMS was 2 cm; the paired Wilcoxon test showed no differences between DEMs; comparison by volume yielded a figure of 801 m³ with reference data and 804 m³ with classified data, resulting in a difference of 0.4% between models. In conclusion, in the reservoir in question, the survey of submerged topography using GPR (Ground Penetrating Radar) and classified with the fclass3 tool resulted in DEMs with no statistical difference between them at a 5% level of significance, according to the Wilcoxon paired test.

Key words: GPR, DEM, Bathymetry, Classification, Wilcoxon paired

Introduction

The aim of this work was to evaluate GPR (Ground Penetrating RADAR) performance in controlled environments, as well as that of the fclass3 classifier developed for bathymetric radargrams. Water Treatment Plants (WTPs) are reinforced concrete structures the design and construction of which is controlled and has an as built. They are used to purify water destined for human consumption and the one in question is responsible for supplying the Universidade Federal de Viçosa. The controls in the decantation tank regarding available volume and sediment layer, among others, is of great importance to its maintenance in order for the water purification process to suffer as few interruptions as possible. The process for monitoring these parameters can be obtained by bathymetry.

Bathymetry is the science of determination and graphical representation of the topography of submerged areas (sea, lakes, rivers etc.). This is shown cartographically with bathymetric curves that join points of the same depth, similar to topographical level curves (Pereira and Baracuhy 2008). Single- and multi-beam echo sounders are currently the most commonly used when determining water depth. However, echo sounders not determine the thickness of the sediment and the GPR technique (Ground Penetrating Radar) is able to investigate both the thicknesses of the layers of water as sediments (Moutinho et al. 2005; Singh 2006; Aranha et al. 2009; Zhu et. al. 2009; Parizzi et al. 2011; Khare et al. 2012; Adepelumi et al. 2013).

GPR systems emit electromagnetic pulses at a certain frequency which are transmitted through an antenna, propagation of the signal being dependent on the electrical properties of the materials of which it is comprised. Changes in the electrical properties of the medium mean that part of the signal transmitted is reflected back to the receiving antenna and detected. Most manufacturers supply antennas with central frequencies ranging between 15 and 2,600 MHz. The basic principles along which GPR functions are shown in Figure 1.

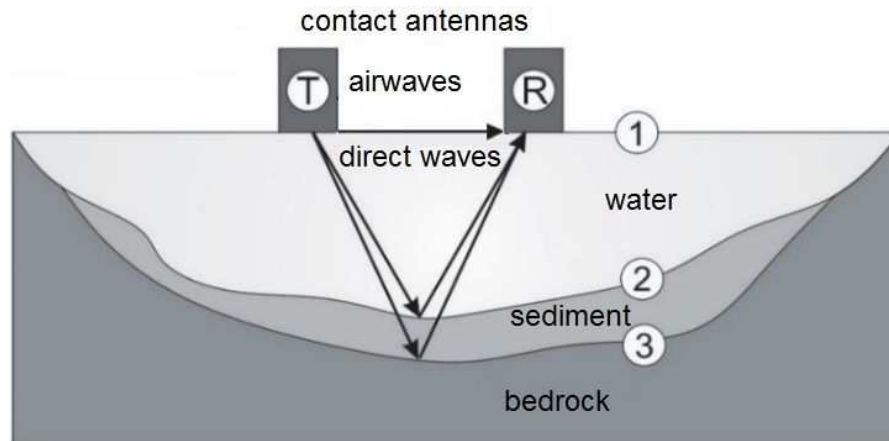


Fig. 1. Basic principle of GPR technique in which T is the transmitting antenna and R the receiving antenna and 1, 2 and 3 are the interfaces: air-water, water-sediment, sediment-bedrock, respectively.

Each pulse captured by the receiving antenna following reflection, refraction and transmission (Snell's Law) in the interfaces of the subsurface, as shown in Figure 1, is called a trace and appears to be a wave (Fig. 5). In the process of conversion from analog to digital, it is necessary to perform sampling on the original trace. The digital trace is then reconstructed from these samples and recorded in digital form.

The radargram is a data matrix in which each column corresponds to a trace obtained in the position investigated, with rows corresponding to the round trip of the emitted signal, called the Time Window. So, it can be understood that one radargram pixel holds three pieces of information, namely: 1) **height**, which contains time interval information; 2) **width**, which informs the distance interval and 3) **intensity** which contains the value of the signal reflection. When the pulse changes from one medium to another with different electrical properties, there is a sudden increase in the intensity values of the pixels, showing that there was a reflection.

Decreasing of the time and resources used in identification procedures and characterization of interfaces between materials with different electrical properties in radargrams, it is a necessity. This puts the methods of automatic or semi-automatic classification as an alternative to the problem.

The process of classifying the images consists of associating each pixel in the image with a class that describes a real-life object (earth, water, vegetation etc.), resulting in a thematic image showing the geographical distribution of each class, and these different classes are represented by different symbols and colors (Crósta 1993).

When the human brain interprets an image, it is able to distinguish between certain classes with ease. However, when the aim is to use an algorithm to identify

classes automatically, this becomes an arduous task, especially when dealing with images with characteristic textural patterns, as is the case with images from GPR sensors, known as radargrams. The process of classifying radargrams is a new field, with as yet few studies published on the topic; a field in need of further exploration (Faria 2012). Thus, the authors examine an alternative for classification, especially in terms of computational costs, making it viable for use in bathymetric radargrams.

The aim of this study was to evaluate the performance of GPR in bathymetric surveys in a controlled environment, as well as the performance of the fclass3 semi-automatic classifier, developed for classifying bathymetric radargrams.

Methodology

The fclass3 semi-automatically classifier determines the thickness corresponding to offset, the water and the grounds support layers, based on the information contained in the radargrams. This classifier is available as a free application, developed in Matlab[®] language, version 2012b, known as *GPR Bathymetry*. The aim of developing this application was to provide GPR users with a free tool for processing radargrams, initially developed for bathymetric applications.

Characterization of the area studied

To conduct the experiment, data were collected from a decantation tank of the Water Treatment Plant (WTP) located at the Universidade Federal de Viçosa (UFV). The decantation tank is constructed of reinforced concrete with a diameter of approximately 18 meters, measuring around 254 m² of surface. The shallowest part has a mean depth of 2.989 meters and the deepest 3.548 meters. It was chosen as having characteristics favorable to a controlled experiment, and because topographic data were already available from a survey with total station, which data were taken from Carmo (2014) to serve as a reference.

Figure 2 shows the decantation tank and the survey conducted using GPR (*RAMAC* System developed by *MALA Geoscience*), with an unshielded 200 MHz antenna, using a Time Window of 330 ns, 632 samples per trace and 5 cm spacing between traces.

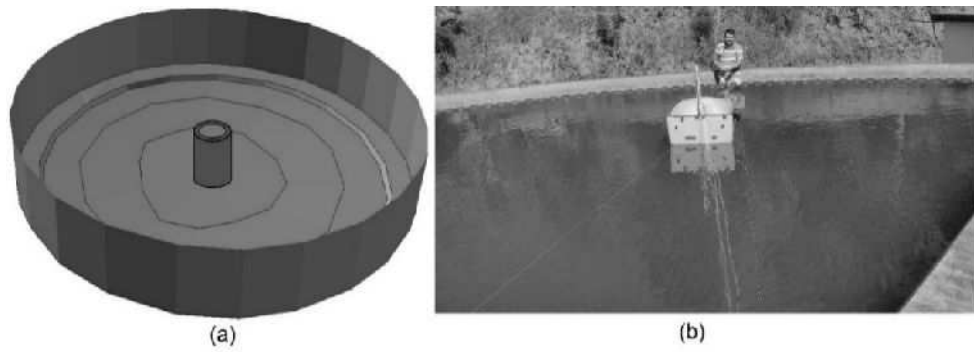


Fig. 2. (a) 3D Model of the decantation tank in Carmo (2014). (b) Photo shows a section being surveyed with GPR.

Collecting the data

Before starting the experiment, 13 uniform distributed sections were selected. Figure 3 shows the distribution of sampling points in the decantation tank with the total station, which were used for reference, as well as the 13 profiles surveyed with the GPR from the center out towards the border. The coordinates in local Cartesian system, of the beginning and end of each profile, were surveyed with the total station.

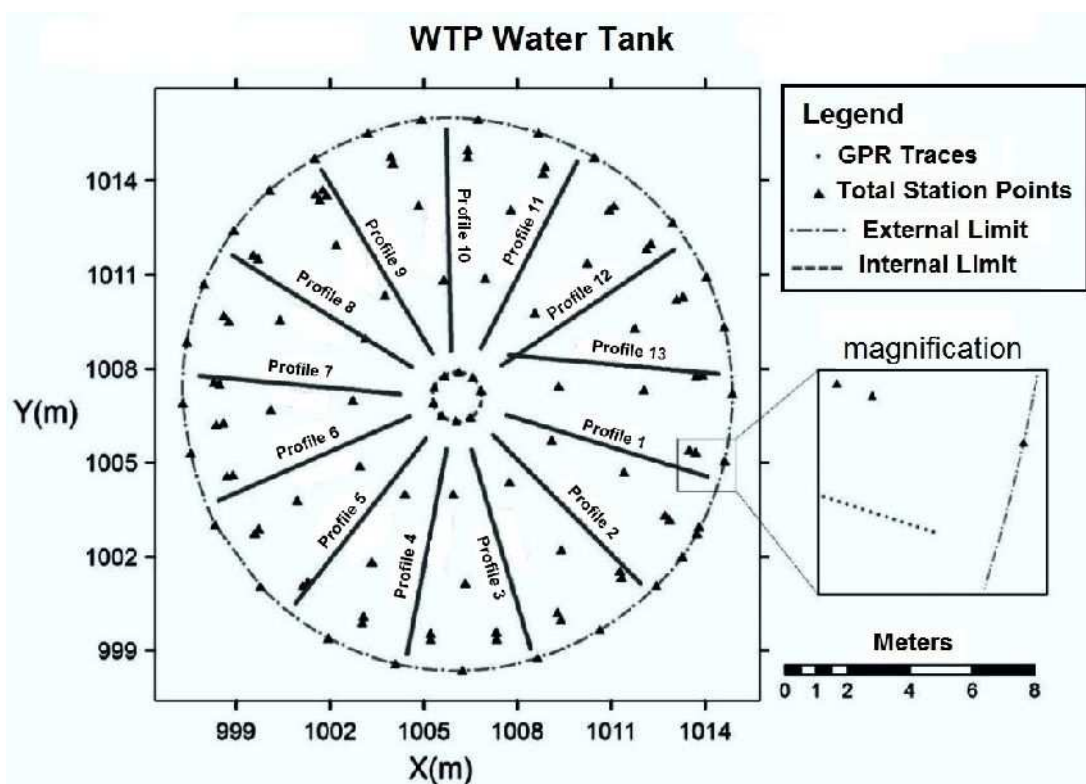


Fig. 3. Points sampled with total station and the directions of the 13 profiles surveyed using GPR.

Analyzing the radargrams

The profiles in the “*.rd3” extension used by MALA *Geoscience*, were analyzed using the *GPR Bathymetry* application, as shown in Figure 4.

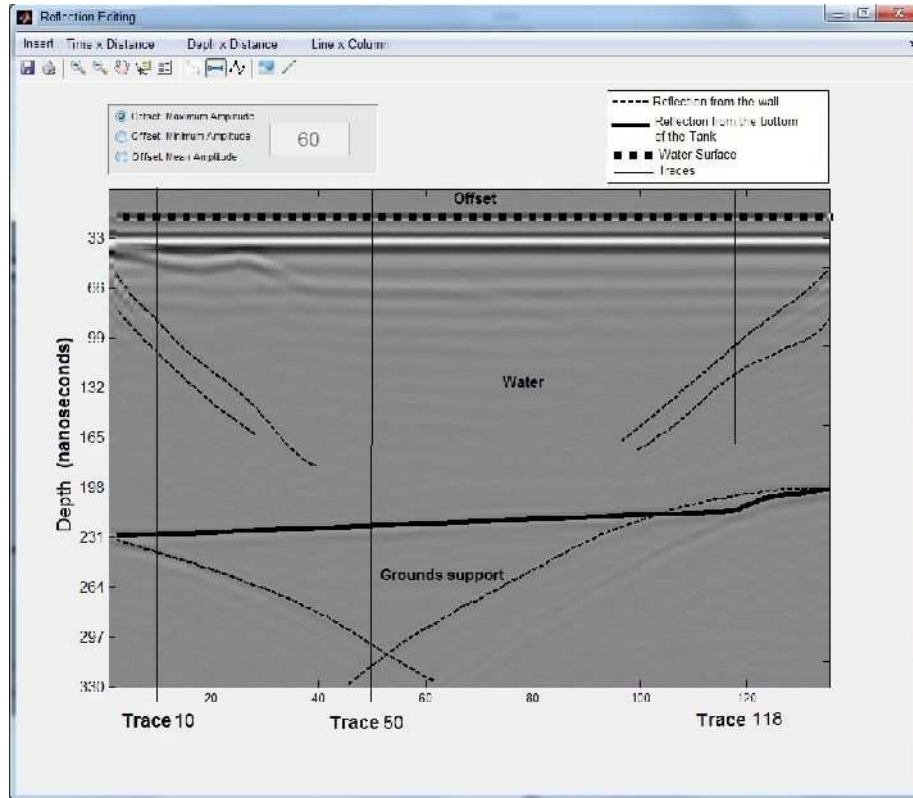


Fig. 4. Radargram of profile 1 shown in the edition window of the “GPR Bathymetry”.

Figure 5 shows aspects of the traces 10, 50 and 118 of the radargram shown in Figure 4, showing the interfaces air-water and water- grounds support.

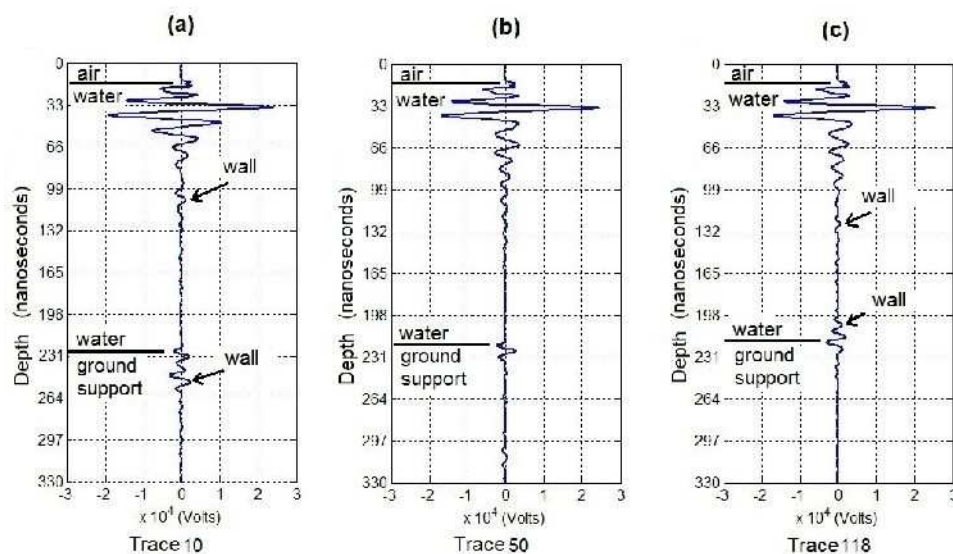


Fig. 5. Shows the aspect of traces (columns) 10, 50 and 118 of profile 1.

The analysis of traces 10, 50 and 118 showed the following signal behavior:

- Exist a first peak shows the interface between the air and the water;
- In the water, the signal fades gradually until it stabilizes to a certain extent;
- There is a sharp difference in amplitude when the signal from the bottom and/or the wall is reflected. It should be noted that the greatest amplitude is not always at the bottom (Fig. 5a);
- Following this final reflection, the signal continues to fade, until its reception is interrupted in the time window, pre-determined by the user.

Developing the *fclass3* classifier

The first stage was to identify the air-water interface, called the offset. In order to do this, a routine was implemented in which the vector reads the column and identifies the first amplitude of reflection of each column and the respective line of occurrence (Fig. 5). As the surface of the water is level, it is expected that all the values will be equal, and thus the value adopted in the routine will be the rounded arithmetic average of the nearest integer value.

The second stage was to identify the water-bottom (i.e. the bas of the tank) interface. This was no easy task, for the following reasons:

- a) It cannot be affirmed that the reflection from the bottom is the 1st, 2nd, 3rd etc. reflection that occurs. There are various reflections greater than the reflections from the bottom of the decantation tank, as can be seen in Figure 5, and their amplitude varies;
- b) For the position corresponding to the bottom of the decantation tank, the greatest reflection was most commonly found after the region in which the wave faded.
- c) On the other hand, nor can it be concluded that the greatest reflection after the signal fades is always the water-bottom interface, as can be seen in Figure 5a where there exist reflections from wall that are greater than bottom

To solve the majority of the problems highlighted above, a routine was proposed that would classify, at this second stage, the region in which the signal fades. In order to do this, the solution was to create a vector that covered the column from the offset, as well as establishing a baseline for comparisons, taking into

consideration amplitude, below which the routine understands that it is dealing with the region where the signal fades (stable) (Fig. 6).

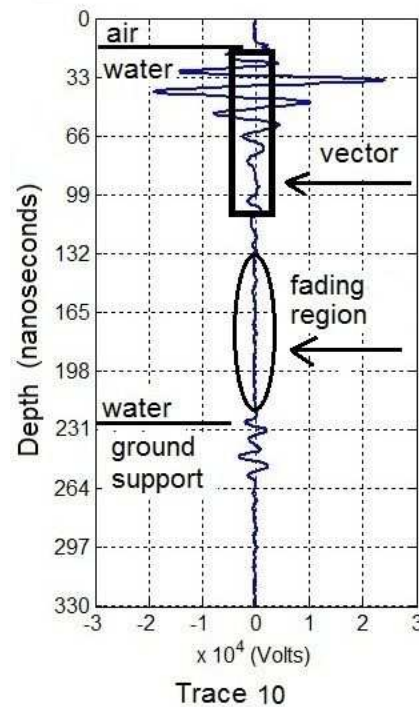


Fig. 6. *fclass3* operating principles.

From this point (line) onwards, the routine seeks the greatest amplitude and deems it to be the water-bottom interface for the water tank. It was not possible to deal with all the conditions described in b and c of this section simultaneously. However, the authors chose to deal with the most frequently occurring condition i.e. that described in item b.

Removing false elevations and depressions

False elevations and depressions appearing in the classification process, often the result of noise on the radargram, need to be eliminated if best results are to be obtained. Thus, an algorithm was developed based on information from the position of the previous and the subsequent pixels, verifying whether there is an abrupt change of position between these pixels. The new value is calculated by the previous information and will be, at most, the value entered by the user.

Determining the average speed of propagation

With the *GPR Bathymetry* possible to extract, for a specific position, the time interval it takes to propagate the signal (round trip). When the depth of this position is known, through whatever method used, it is possible to determine the speed of signal propagation, assuming it is a constant, using Equation 1 (Annan 2003).

$$v = \frac{2 \times d}{t} \quad (1)$$

Once the mean value for signal propagation is inputted into the application, it is possible to convert the time radargram (ns) to depth (meters).

Spatial distribution of radargrams

During the survey data are measured in a local reference system, the coordinates X, Y and Z of the start and end points corresponding to the surface of each radargrama, since the profiles follow a particular alignment (Fig. 3). Having this information then makes it possible to allocate X and Y plane coordinates and the Z coordinate to each trace of the radargram and the number of points and to conduct linear or cubic interpolation so that the points are equally spaced. The control points can be inserted manually in a data entry table or using a text archive with the *.xyz extension. The interpolated surface coordinates can also be saved in the same format or added in an *.RAD archive.

Once have the topographic coordinates (X, Y, Z) of each trace, on the surface, (archives *.xyz from Figure 10) and of the depth values for each point where reflection occurs (archives *.zzz from Figure 9), the topographic coordinates for each point (X, Y, Z) of reflection inside the water tank can be determined. In order to do this, a tool was developed in which the output data are three-dimensional coordinates of all the traces reflected on the bottom of the decantation tank for the 13 profiles. The output data can be saved as *.xyz text in the “*GPR Bathymetry*”, *.txt in the ArcGis or *.xlsx in excel.

Interpolating the data

In order to interpolate and generate a digital elevation model (DEM), the *TopotoRaster* interpolator, available with ArcGIS software, was used so as to better present RMS for the decantation tank according to the study conducted by Carmo (2014). As it was not possible to sample the inner and outer borders of the water tank with the GPR, given the size of the boat used to transport the antennas, coordinates were used data obtained from the total station to be interpolated.

Comparison using topography data

As there were no observed coordinates for the total station as a whole coinciding with the radargram traces and, knowing that the water tank in question was very regularly shaped, as can be seen from the data for the total station as a whole and in Figure 7, the following criterion was adopted for comparing the depth based on the mean of the points observed for the total station as a whole adjusted in circumference, based on the central border of the tank.

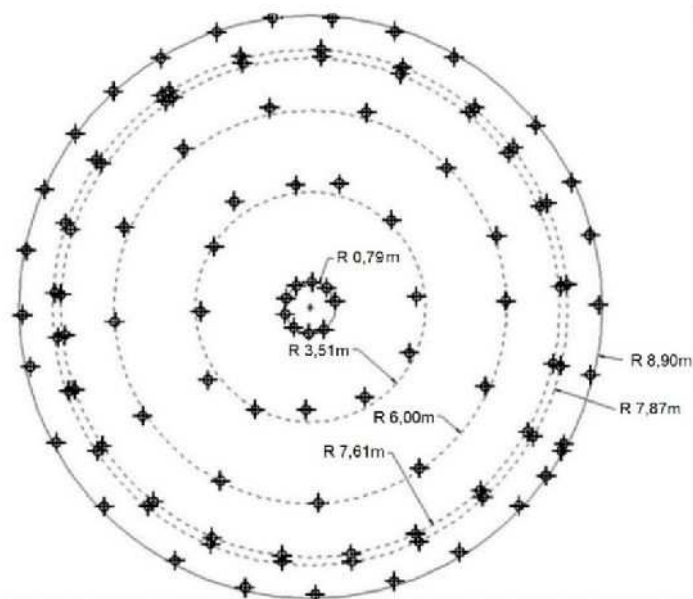


Fig. 7. Arrangement of the points observed in the water tank for the total station as a whole, with different radii adjusted to the points.

Comparing the DEMs

Statistics is an important and widely used tool. Testing hypotheses allows us to assess the validity of a statement about a specific characteristic of the population using data taken from that population (Pinheiro et al. 2009). The statements are known as hypotheses and the decision making procedure is known as testing hypotheses. These hypotheses must be mutually exclusive and are known as the Null Hypothesis H_0 and the Alternative Hypothesis H_1 (Montgomery and Runger 2014).

Basically, there are two ways of testing hypotheses: parametric and non-parametric tests. Parametric tests are those which presuppose normality of data, while in non-parametric tests, data does not need to follow normal distribution. In this study, the authors wanted to test whether the DEM obtained with the GPR was statistically equal to the reference DEM. After applying the Anderson-Darling normality test, it was found that the discrepancies data between DEMs did not follow normal distribution, and so it was decided to use the test for non-parametric for dependent samples, known as the Wilcoxon signed rank test (paired samples) test. According to Guimarães (2008), in order to apply the Wilcoxon paired test, the discrepancies h_i must first be calculated (Eq. 2):

$$h_i = Z_{Ref}(l_i) - Z_{GPR}(l_i); \quad (2)$$

when:

$Z_{Ref}(l_i)$: observed value for depth at position l_i , taken from the DEM (total station);

$Z_{GPR}(l_i)$: estimated value for depth at position l_i , taken from the DEM (GPR).

The differences must be ranked from smallest to greatest, without taking into account the difference signal, i.e. module.

✓ For sample size $n < 20$:

According to Guimarães (2008), T should be deemed the lowest sum for the same signal, in other words: $T = \min(T^+; T^-)$. The value of T should be compared, calculated with the values from the table for the specific level of significance and sample size. The objective is to verify whether the median of the discrepancies $\tilde{\mu}_D$ is null. When the case is bilateral (Eq. 3 and 4):

$$H_0: \tilde{\mu}_D = 0 \quad \text{No difference between DEMs}; \quad (3)$$

$$H_1: \tilde{\mu}_D \neq 0 \quad \text{EDifferences between DEMs.} \quad (4)$$

The null hypothesis can be rejected when the value for T is lower than that of the critical value defined by the level of significance.

✓ For sample size $n = 20$:

In this case, it can be shown that T^+ (or T^-) presents an approximately normal distribution with mean μ_T and standard deviation Sd_T (Eq. 5 and 6) (Montgomery and Runger 2014):

$$\mu_T = \frac{n \cdot (n + 1)}{4}; \quad (5)$$

$$Sd_T = \sqrt{\frac{n \cdot (n + 1) \cdot (2 \cdot n + 1)}{24}}. \quad (6)$$

Thus, z can be calculated as (Eq. 7):

$$z = \frac{T - \mu_T}{Sd_T}. \quad (7)$$

z is calculated and compared with the values from the table for Z distribution (Standard Normal).

In the case of a draw, the procedure is as follows (Guimarães 2008):

a) When $Z_{Ref} = Z_{GPR}$, this pair should be discarded from the analysis and n redefined as the number of pairs in which $Z_{Ref} \neq Z_{GPR}$, for $i = 1, 2, \dots, n$.

b) When two or more discrepancies (h_i) have the same value, attribute it as the rank the mean point of the points that would be attributed to it if there were no draws).

The free GPower 3.1.9.2 software, available to download from <http://gpower.software.informer.com/3.1/>, was used to calculate the sample size for the Wilcoxon paired method, with the following parameters: bilateral, $\alpha = 5\%$, $\beta = 20\%$, and the smallest detectable difference being 1 cm.

Combining the means of the differences (\bar{h}_i) with the standard deviations of the discrepancies samples (Sd) can be used as a measure of accuracy, Ac, of the DEM (Eq. 8) (Li 1988):

$$Ac = \bar{d} \pm Sd . \quad (8)$$

According to Li (1988), this measurement has the following characteristics: the mean represents a translation of the surface produced in relation to the reference. This may be due to inexactitude in the coincidence of positions l_i for Z_{Ref} and Z_{GPR} , (Eq. 2), or to systematic effects. If it is null, Ac is equal to the RMS. The standard deviation Sd shows how well the DEM is adjusted to the reference observations.

If null, Ac is equal to the RMS discrepancies given by (Eq. 9):

$$RMS_{\Delta h} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta h_i)^2} . \quad (9)$$

Results and Discussions

In Figure 8, a position is highlighted 2 meters from the center of the tank in which the time interval was 207ns (222ns – 15ns = 207ns, when: 15ns is the position of the *offset* indicated by the fclass3 classifier and 222ns the observed position by user) and observed depth is 3.39 m. With this information, it is possible to determine the mean propagation speed (Eq. 10).

$$v = \frac{2 \times d}{t} = \frac{2 \times 3.39}{207} = 0.0328 \text{ m/ns} . \quad (10)$$

The same procedure was followed for profiles 5 and 10, obtaining velocities of 0.0333 and 0.0334 m/ns. The mean value obtained was 0.0332 m/ns, very close to the value of 0.033 m/ns found in the literature for distilled water (Annan 2003).

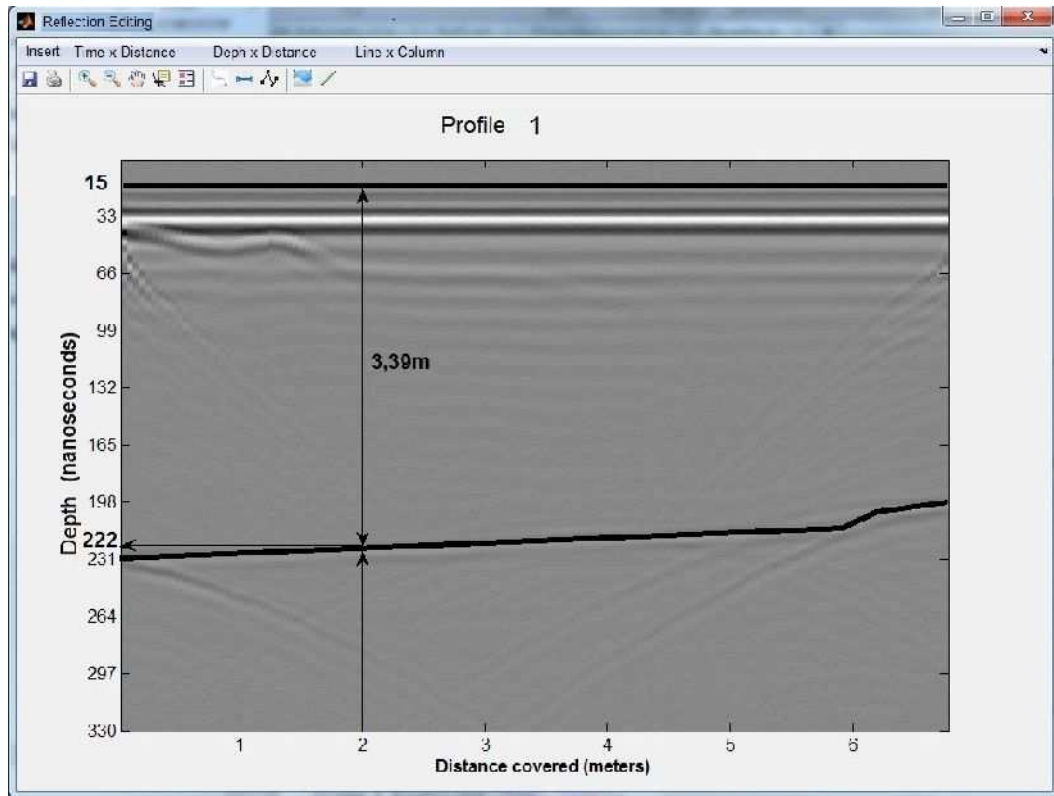


Fig. 8. Depth and propagation time for one position.

When we using any type of filter, the original information contained in the image are changed, i.e., its statistics are changed. To avoid analysis upon disfigured data, the image was analyzed in its raw state. This is the most disadvantageous situation for the classifier, given the amount of noise and the strong reflections from the decantation tank wall. Figure 9 shows the results of the fclass3 classifier for profiles 1 and 2, the classified radargram were filtered to eliminate false elevations and depressions.

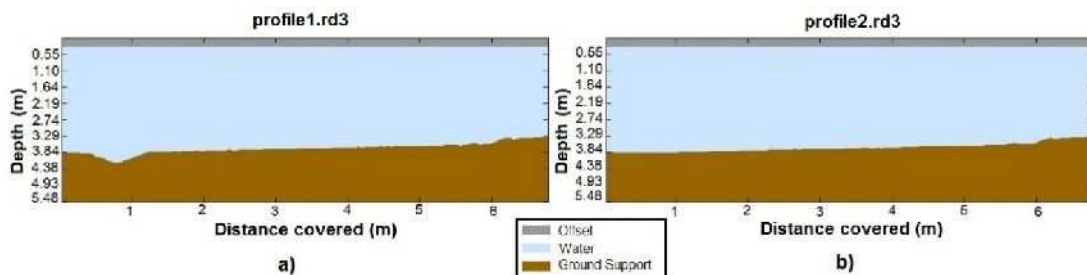


Fig. 9. Results of the classification using the fclass3.

After classify process a text archive under the extension *.zzz contains the quotas for each trace and is saved in an automatically-created directory.

Figure 10 shows the result of the interpolation in the *GPR Bathymetry*.

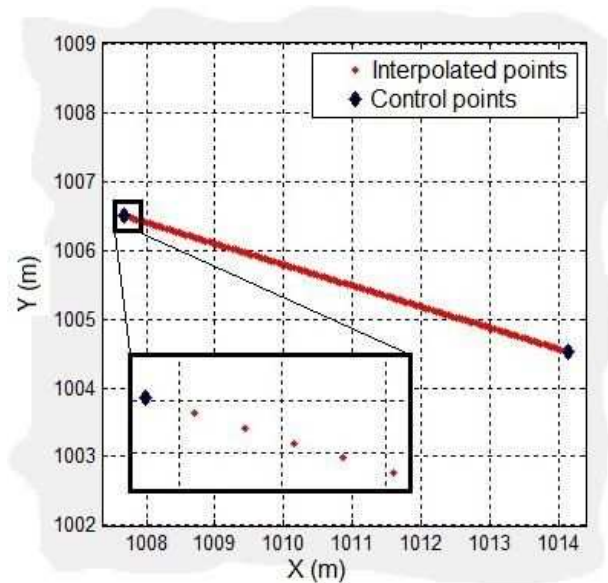


Fig. 10. Spatial distribution of all the radargram traces for profile 1.

The DEM interpolated from reference data (total station) can be seen in Figure 11a, and the DEM from the raw GPR data from the fclass3 classifier can be seen in figure 11b.

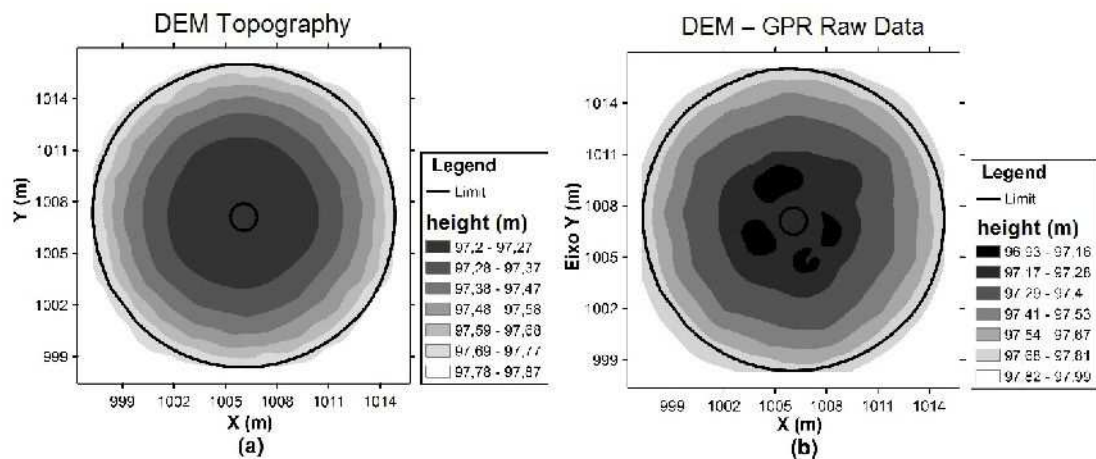


Fig. 11. a) DEM generated from the Reference data. b) DEM generated from GPR data from the fclass3 classifier, with unprocessed radargrams.

The DEM produced using ArcGIS tools was imported by the *GPR Bathymetry* for calculating volume. The inner and outer limits of the water tank were inserted in order to correctly calculate the volume. Figures 12 and 13 show the interface developed, the DEMs and the volume figures obtained, respectively, using the total station and the GPR (fclass3) data.

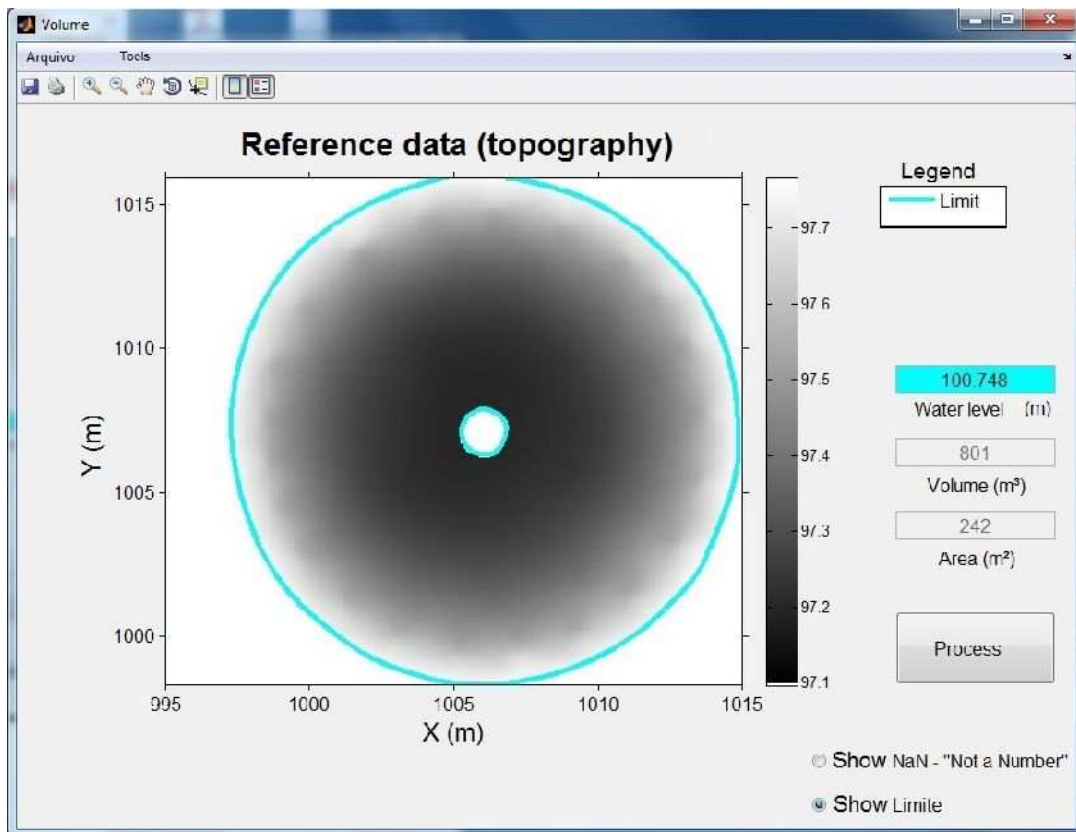


Fig. 12. Reference volume calculated based on reference data.

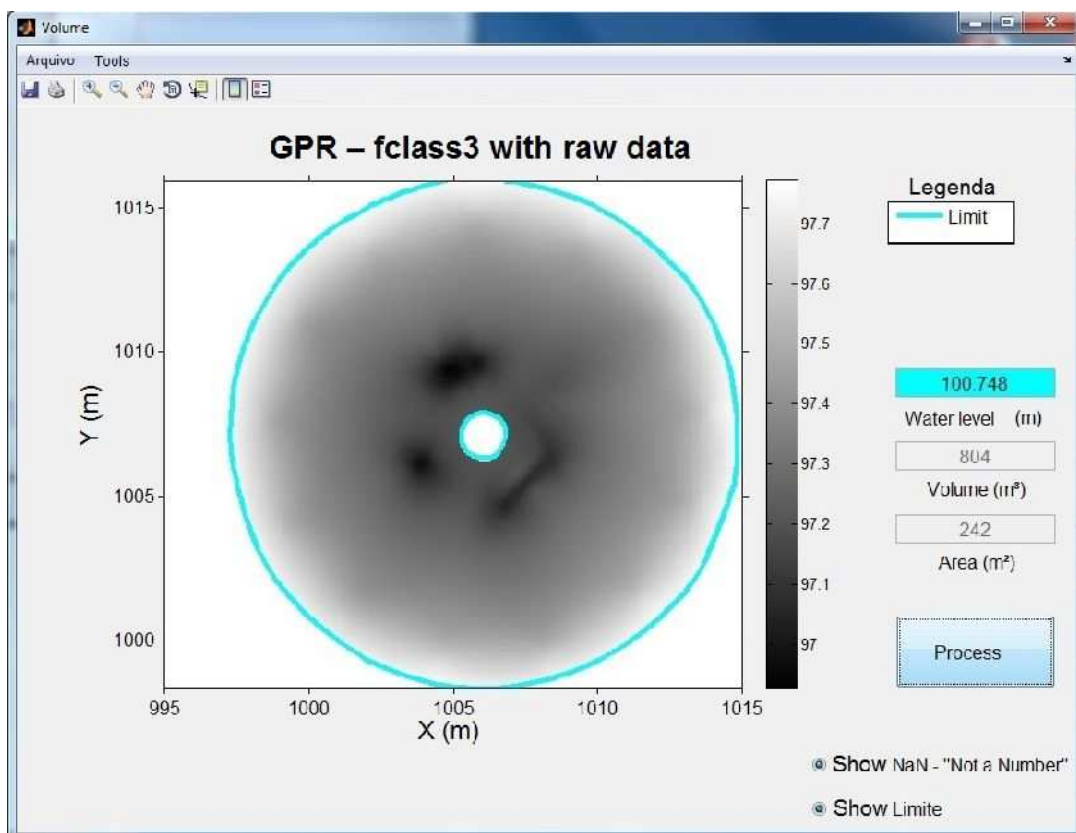


Fig. 13. Volume calculated based on data classified using the fclass3 classifier, using unprocessed radargrams.

Table 1 shows an exploratory analysis of the depths for the total station as a whole close to the circumferences, so as to verify the geometric regularity observed in the field.

Table 1. Exploratory analysis of the depths found for the total station.

Radii from the center of the Tank	Depth at the circumference based on the inner border			
	R 3.51	R 6.00 m	R 7.61 m	R7.87 m
Shallowest depth observed (m)	3.50	3.36	3.22	3.07
Greatest depth observed (m)	3.52	3.37	3.24	3.08
Amplitude (m)	0.02	0.01	0.02	0.01
Mean (m)	3.51	3.36	3.23	3.08
Standard deviation (m)	0.005	0.003	0.005	0.004

Can be seen that the highest standard deviation was of 5 mm and the greatest amplitude of 2 cm, showing that the mean is representative of the values observed for the circumferences. However, the analysis will be conducted based on discrepancies between the mean depths found in Table 1 and the depths from the radargrams for these same circumferences.

For the first analysis, initially the points observed by the GPR in the position closest to the circumferences in the study were used, producing Table 2. In the topographic survey the amplitudes were below 2 cm and the standard deviations were below 5 mm, and in the GPR survey the amplitudes reached 8 cm and the deviations 3 cm.

Table 2. Exploratory analysis of the profiles surveyed with GPR.

Radii from the center of the tank	Depth from the inner Border (meters)			
	R 3.51 m	R 6.00 m	R 7.61 m	R 7.87m
Shallowest depth observed (m)	3.49	3.34	3.24	3.05
Greatest depth observed (m)	3.55	3.39	3.28	3.13
Amplitude (m)	0.06	0.05	0.04	0.08
Mean (m)	3.51	3.36	3.25	3.09
Standard deviation (m)	0.02	0.02	0.01	0.03

To compare the measurements for the circumferences in question for the total station and those obtained using the georadar, Table 3 was drawn up showing the values for discrepancies between the means. The greatest discrepancy was 2cm (module) and the lowest 0 cm. The amplitude for the discrepancies did not exceed 2cm.

Table 3. Comparing the depths obtained with the GPR and for the total station.

Radii from the center of the tank	Depths from the inner border (meters)			
	R 3.51 m	R 6.00 m	R 7.61m	R 7.87 m
Mean (total station) (m)	3.51	3.36	3.23	3.08
Mean (GPR Profiles) (m)	3.51	3.36	3.25	3.09
Means discrepancies (m)	0.00	0.00	-0.02	-0.01

In the DEM for Figure 12, can be seen that, as expected, there are depressions close to the center of the WTP, corresponding to profiles 1, 3, 6, 9 and 10 (Fig. 8a). This is due to the classifier confusing the reflection from the wall with a reflection from the bottom. For the other eight profiles, the classifier showed satisfactory results.

Table 4 shows an exploratory analysis of discrepancies for the whole population after applying the boxplot to remove outliers. It was found that the amplitude of the discrepancies between the DEMs was 12 cm, the mean was 1 cm, standard deviation 2 cm and the RMS of the discrepancies was 2 cm, giving accuracy of $1 \text{ cm} \pm 2 \text{ cm}$ using Equation 8. The value of 12cm for the amplitude is due to the above mentioned confusion by the classifier.

Table 4. Statistic indices of all discrepancies between MDEs.

Statistical indices	DEM (total station) x DEM (GPR)
$\Delta h_{\text{m}\acute{a}\text{x}}$ (m)	0.07
$\Delta h_{\text{m}\text{i}\text{n}}$ (m)	- 0.05
Amplitude (m)	0.12
Mean (m)	0.01
Standard deviation (m)	0.02
RMS (m)	0.02

The result for the sample size to Wilcoxon paired method, was 35 samples. The 35 samples were randomly selected from the *GPR Bathymetry*. The result of the

Wilcoxon paired test was $z = -1.55$. P was equal to 0.16, obtained using *Action* software available to download from <http://www.portalaction.com.br/>. Using the normal distribution table, the Z value when the level of significance is 5% for a bilateral test is equal to -1.96. Thus $-1.96 < -1.55 < +1.96$ satisfies the null hypothesis. The P-value confirms that, for the applied hypothesis, there was no evidence to reject the null hypothesis, in other words, the DEMs are statistically equal for the conditions imposed in the test.

When comparing specific volumes of the DEMs, it could be seen that the values obtained using the two methods were 801 m³ from the total station measurements and 804 m³ with the GPR, corresponding to a difference of 0.4 %.

Conclusions

The results for the Wilcoxon paired test show that, for the DEMs obtained, there is strong evidence that there is no statistical differences between the models produced for the total station and by the GPR.

The means of the discrepancies were close to the expected value (zero). This shows that there was no considerable translation of the surface generated in relation to the reference surface, i.e. there was some coincidence of the l_i positions for the Z echo sounder and the Z_{GPR} . The accuracy of the GPR was $1 \text{ cm} \pm 2 \text{ cm}$, showing that the DEMs adjusted well to the reference observations.

Comparing the volumes calculated based on the DEMs, values of 801 m³ for the total station and 804 m³ for the GPR were found, corresponding to a difference of 0.4%.

The aim of constructing the fclass3 classifier to separate the “offset”, “water” and “bottom” layers showed satisfactory results fulfilling the purpose of classifying the radargrama so that, statistically, there was no differences between the models derived from the classifier and echo sounder, despite the confusion in central tank.

One of the initial concerns was to develop a methodology for the classifier that has a low computational cost. The classification of radargrams using a core i7 processor, took a time of 0.6 seconds on average, for the classification and application of filter for removal of false elevations and depressions, including also the display of images (approximately 630 x 135 resolution pixels).

The authors recommended that a more detailed study on the method of classification in order to find a way classifier better distinguish between the

reflections coming from the wall and floor, thereby eliminating the confusion that occurred in this study, as well as the total automation of the process.

References

- Annan, A. P. (2003). "Ground penetrating radar: Principles, procedures & applications". *Sensors & Software Inc. Technical Paper*. <<http://www-rohan.sdsu.edu/~geology/jiracek/sage/documents/Sensors%20and%20Software%20GPR%20Manual.pdf>> (Jul. 12, 2015).
- Adepelumi, A. A., Fayemi, O. E., Akindulureni, J. (2013). "Geophysical Mapping of Subsurface Stratigraphy Beneath a River Bed Using Ground Penetrating Radar: Lagos Nigeria Case Study". *Universal Journal of Geoscience*. v.1. Pag 10-19.
- Aranha, P. R.; Porsani, M. J. E Carvalho, R. F. (2009). "Deconvolução Preditiva de Perfis de Georadar Obtidos no Lago da Represa Serra Azul - Copasa, Minas Gerais". *SBGf - Simpósio Brasileiro de Geofísica*. 11º simpósio, Salvador - BA, Brasil.
- Carmo, E. J. (2014). "Avaliação dos interpoladores krigagem e topo to raster na geração de modelos digitais de elevação a partir de dados batimétricos". *Master's Dissertation*. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, Minas Gerais, Brasil.
- Crósta, A. P (1993). *Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto*. Campinas, SP, Brasil.
- Faria, S. F., Vieira, C. A. O., Aranha, P. R. A. A., Carvalho, C. A. B., Ferreira, E. R. (2012). "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.
- Guimarães, P. R. B (2008). *Métodos Quantitativos Estatísticos*. Curitiba-PR, Brasil.
- Khare, N.; Chaturvedi, S. K.; Asthana, R. E Beg, M. J. (2012). "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*. ISSN 0974-5904. v.5, p. 30-34.
- Li, Z. (1988). "On the measure of digital terrain model accuracy." *Photogrammetric Record*. University of Glasgow. v.12. p. 873-877.
- Montgomery, D. C., and Runger, G. C (2014). *Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros*. Rio de Janeiro, Brasil.
- Moutinho, L., Porsani, J. L., & Porsani, M. J. (2005). "Deconvolução preditiva de dados GPR adquiridos sobre lâmina d'água: exemplo do Rio Taquari, Pantanal Matogrossense". *Revista Brasileira de Geofísica*. 23. p. 61-74.
- Parizzi, M. G., Aranha, P. R., Costa, R. D., Filho, J. A., Tupinambás, M. M., & Cajazeiro, J. M. (2001). "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(2), pp. 152-162.

Pereira, J. P. G., and Baracuh, J. V. G (2008). *Ecobatimetria*. Campina Grande, PB, Brasil.

Pinheiro, J. I. D., Cunha, S. B., Carvajal, S. R., Gomes, E. G. C (2009). *Estatística Básica: a arte de trabalhar com dados*. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Singh, K. K. (2006). “Application of Ground Penetrating Radar for hydro-geological study”. *Journal of Scientific & Industrial Research*. v. 65, p. 160-164.

Zhu, Z., He, X., Lu, G., Liu, Q., and Li, J. (2009). “Ground Penetrating Radar Exploration for Ground Water and Contamination”. *PIERS Proceedings*, Moscow, Russia. v. 26. p. 1316 - 1320.

ARTIGO 2: AVALIAÇÃO DO GPR NA ESTIMATIVA DA BATIMETRIA DE UMA CAIXA DE DECANTAÇÃO EMPREGANDO O APLICATIVO GRATUITO “GPR BATHYMETRY” NA ANÁLISE DOS RADARGRAMAS

Artigo intitulado “Avaliação do GPR na estimativa da batimetria de uma caixa de decantação empregando o aplicativo gratuito “GPR *Bathymetry*” na análise dos radargramas” aceito em 15/02/2016 pelo Boletim de Ciências Geodésicas, na versão original em português.

Sandro Henrique de Faria ^{1,2}

Dalto Domingos Rodrigues ²

Nilcilene das Graças Medeiros ²

Paulo Roberto Antunes Aranha ³

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sudeste de Minas, Juiz de Fora – MG, Brasil, Email: sandro.faria@ifsudestemg.edu.br.

²Universidade Federal de Viçosa – Viçosa - MG, Brasil, Emails: dalto@ufv.br, nilcilene.medeiros@ufv.br.

³Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, Brasil, Email: aranha@igc.ufmg.br.

Resumo

Este trabalho tem como objetivos avaliar o desempenho do GPR (*Ground Penetrating RADAR*) para aplicações batimétricas em ambiente controlado e do aplicativo “GPR *Bathymetry*”, desenvolvido para análise de radargramas batimétricos. O estudo foi realizado em uma caixa de decantação da estação de tratamento de água da qual se tem o “*as-built*”, obtido com estação total, que será empregado nos testes de validação. Realizaram-se três testes de comparação: comparações pontuais; entre Modelos Digitais de Elevação (MDE) gerados a partir do interpolador *Topo to Raster*; e entre os volumes calculados a partir dos MDE’s. Na comparação pontual a maior amplitude de discrepância entre as médias foi de 8cm. Para a amostra de discrepâncias entre os MDE’s, a amplitude foi de 9cm, média de 2cm, acurácia estimada de 4cm e o RMS de 3cm. Na comparação volumétrica obteve-se o valor de 800,6m³ com dados de referência e 806,4m³ com dados do GPR, resultando numa diferença de 1% entre os modelos. Conclui-se que para um reservatório construído em concreto armado, profundidades variando de 3 a 3,5 metros, o levantamento do relevo submerso empregando um GPR apresentou resultados promissores e um MDE com acurácia estimada de 4cm e discrepâncias de até 9cm.

Palavras chave: GPR, MDE, Batimetria, Experimento, Software gratuito.

Abstract:

This paper aims to evaluate the performance of the GPR (Ground Penetrating Radar) for bathymetric applications in a controlled environment, as well as evaluate the “*GPR Bathymetry*” software designed to bathymetric radargrams analysis. The study was realized in a decanting water treatment plant (WTP), where has the as-built obtained with total station, it will be used in validation tests. Was realized three comparison tests: from points comparisons; from Digital Elevation Models (DEM) generated from interpolating *Top to Raster*; and between volumes calculated from DEMs. In the point comparison, the greatest difference between averages was 8 cm. For the discrepancies sample between DEMs, the amplitude was 9 cm, average of 2 cm, estimate accuracy of 4 cm and RMS equal to 3 cm. In the volumetric comparison, we obtained the amount of 800.6 m³ with reference data and 806.4 m³ with the GPR data, resulting in a 1% difference between models. We conclude that for a reservoir built in reinforced concrete, depths ranging from 3 to 3.5 meters, the survey of the bottom relief employing a GPR showed promising results and a DEM with an estimate accuracy of 4 cm and discrepancies that may reach 9 cm.

Keywords: GPR, DEM, bathymetry, experiment, free software.

1. Introdução

O monitoramento das represas de abastecimento de água, não só no quesito de qualidade da água, mas também no sentido quantitativo, isto é, volumétrico, é uma preocupação para as autoridades públicas pois o assoreamento afeta a capacidade de armazenamento do reservatório. Dentro desta ótica surge a necessidade da utilização de novas técnicas e o aperfeiçoamento de outras para o monitoramento da profundidade da lâmina d’água.

A técnica que trata da determinação e representação gráfica do relevo de áreas submersas é chamada de Batimetria. Com o avanço das tecnologias os levantamentos batimétricos estão sendo, atualmente, realizados com o auxílio de receptores GNSS (*Global Navigation Satellite System*) para a determinação do posicionamento planimétrico e ecobatímetros para medição da profundidade.

Atualmente, os ecobatímetros monofeixe e multifeixe são os mais empregados para determinação da profundidade da lâmina d’água. Estes equipamentos consistem basicamente de uma fonte emissora de sinais acústicos e um dispositivo interno que mede o intervalo de tempo entre o instante da emissão do sinal e o instante de recepção do eco pelo sensor. Parte do som emitido é captado pelo dispositivo receptor após viajar pelo meio líquido sofrendo reflexão, transmissão e espalhamento. Esse sinal é então convertido em sinais elétricos e o intervalo de tempo medido (Blondel e Murton, 1997). A sondagem é calculada multiplicando este intervalo de tempo pela velocidade do som na água e dividindo-se por dois, já que se trata de tempo duplo de reflexão, fornecendo desta maneira informações de profundidade no local.

O GPR é uma ferramenta não invasiva, contínua e de alta velocidade na coleta de dados que tem sido usada para mapear as condições da subsuperfície em uma vasta variedade de aplicações (Botelho, 1986; Aranha, et al, 2002; Annan, 2003; Castelo

Branco e Castro, 2003; Shiraiwa, et al, 2004; Saarenketo, 2006; Gandolfo, 2007; Faria, 2010).

Os sistemas de 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. 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 da frequência da antena utilizada. Estes sistemas de GPR possuem tipicamente os seguintes componentes: um gerador de pulsos, sendo este pulso com frequência 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 01 apresenta modo de obtenção de dados com antenas de contato também conhecidas como *ground coupled antennas*.

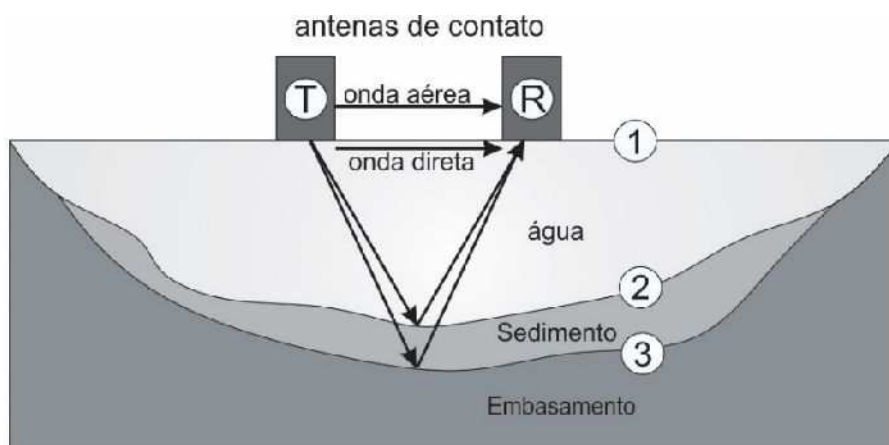


Figura 1. Princípio básico da técnica GPR onde T é a antena transmissora e R a antena receptora e 1, 2 e 3 as interfaces de reflexão.

Para o modelo da Figura 1, a interface 1 representa a interface do ar com a lâmina d'água, 2 representa a interface da lâmina d'água com sedimento e 3 representa a interface do sedimento com o embasamento. As reflexões nas interfaces 1, 2 e 3 do modelo da Figura 1 podem ser visualizados na Figura 2.

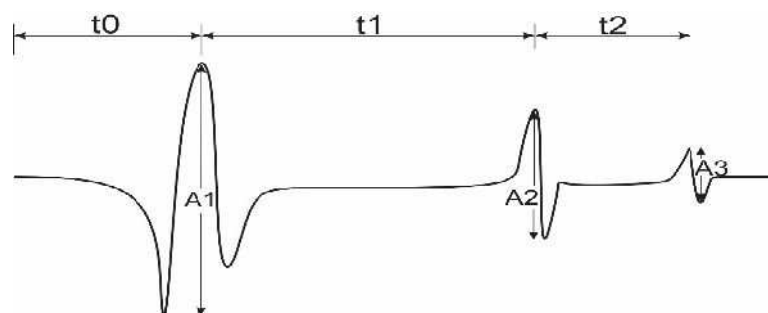


Figura 2. Exemplo do traço de georadar.

Pela Figura 02, A1 é a amplitude total de reflexão na lâmina d'água (onda direta), A2 a amplitude total de reflexão na interface entre a lâmina d'água e o sedimento e A3 a amplitude de reflexão entre o sedimento e o embasamento. t_0 é o intervalo de tempo gasto pela onda aérea e onda direta, t_1 é o intervalo de tempo de propagação do sinal na camada de água e t_2 é o intervalo de tempo gasto para percorrer a camada ocupada pelo sedimento, lembrando que estes intervalos de tempos são referentes à ida e volta do sinal.

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 matriz de dados 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 princípio básico de funcionamento do GPR é que conhecendo o intervalo de tempo t e a velocidade média v de propagação do pulso ao longo do caminho percorrido, é possível determinar a distância d (Equação 1) em que um determinado objeto refletor está da fonte emissora do pulso (Saarenketo, 2006). A velocidade de propagação da onda eletromagnética emitida pelo GPR no ar pode ser tomada como sendo igual à velocidade de propagação da luz no vácuo (0,3 m/ns). A velocidade da onda eletromagnética na água destilada é de 0,033 m/ns, enquanto na água do mar a velocidade cai para 0,01 m/ns (Annan, 2003).

$$d = \frac{v \times t}{2} \quad (1)$$

2. Metodologia

Para realização deste trabalho foi desenvolvido um aplicativo gratuito, em Matlab®, na versão 2012b, chamado “GPR Bathymetry”, para a análise dos radargramas. O objetivo do desenvolvimento desse aplicativo é de disponibilizar ao usuário que trabalha com o GPR uma ferramenta gratuita e inicialmente desenvolvida para aplicações batimétricas. Ainda na primeira versão, conta com ferramentas de visualização, interpoladores de superfície, filtros de detecção de bordas, filtros de suavização, filtros morfológicos, *set time zero*, *remove background*, edição de dados, ganhos, cálculos de áreas e volumes, espacialização de radargramas em X, Y e Z e classificação manual. Está em desenvolvimento módulos para classificação semiautomatizada, filtros no domínio da frequência, e multivisualização de radargramas georreferenciados.

2.1 Caracterização da área de estudo

Para a realização do experimento os dados foram coletados em uma caixa de decantação da Estação de Tratamento de Água (ETA), situada na Universidade

Federal de Viçosa (UFV). A caixa de decantação é construída em concreto armado e possui aproximadamente 18 metros de diâmetro. A parte mais rasa possui em média 2,989 metros e a mais profunda 3,548 metros. O local foi escolhido por apresentar características favoráveis a uma área experimental controlada e por já se ter dados de levantamento topográfico realizados com estação total, levantamentos estes extraído de Carmo (2014).

A Figura 3 apresenta o aspecto da estação de tratamento de água e do levantamento realizado com o GPR (Sistema *RAMAC* desenvolvido pela *MALA Geoscience*), com uma antena *unshielded* 200 MHz. Utilizou-se um fio de nylon para puxar o flutuador mantendo-o alinhado.

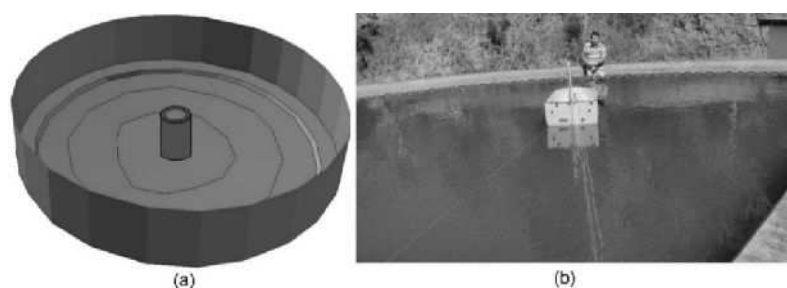


Figura 3. (a) Modelo 3D da Caixa de decantação modificado de Carmo (2014). (b) Foto mostrando o levantamento de uma seção.

2.2 Coleta dos dados

Para a realização deste ensaio foram determinadas previamente 13 seções distribuídas radialmente de maneira uniforme. A Figura 4 mostra a distribuição dos pontos amostrados na ETA com estação total, os quais serão adotados como referência, bem como as direções dos 13 perfis levantados com o GPR.

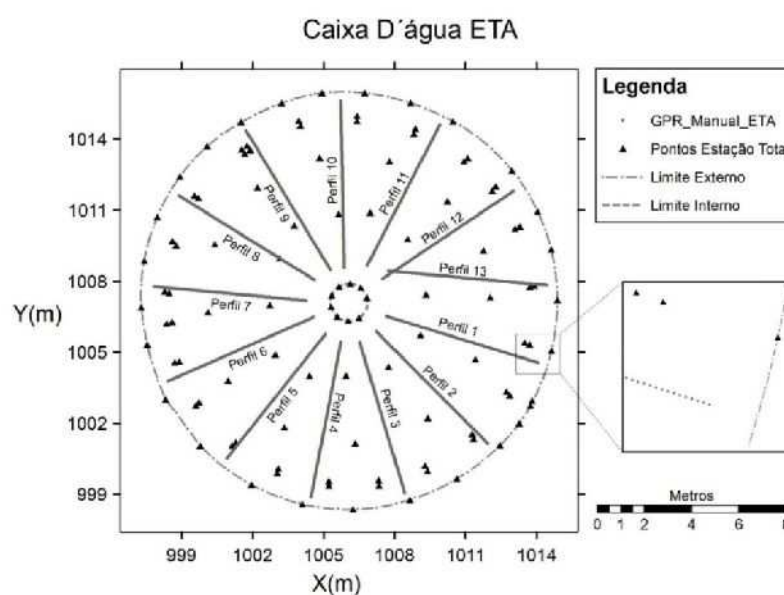


Figura 4. Pontos amostrados pela estação total e as direções dos 13 perfis levantados com o GPR.

2.3 Análise dos radargramas

Os perfis foram analisados no aplicativo “GPR Bathymetry”, aplicando ao radargrama a função “*set time zero*” para a localização e remoção da onda direta, que está na superfície da água, e a função “*remove background*” para remoção dos ruídos. A Figura 5 apresenta o perfil 1 no estado bruto e a Figura 6 apresenta o aspecto do mesmo perfil após o processamento.

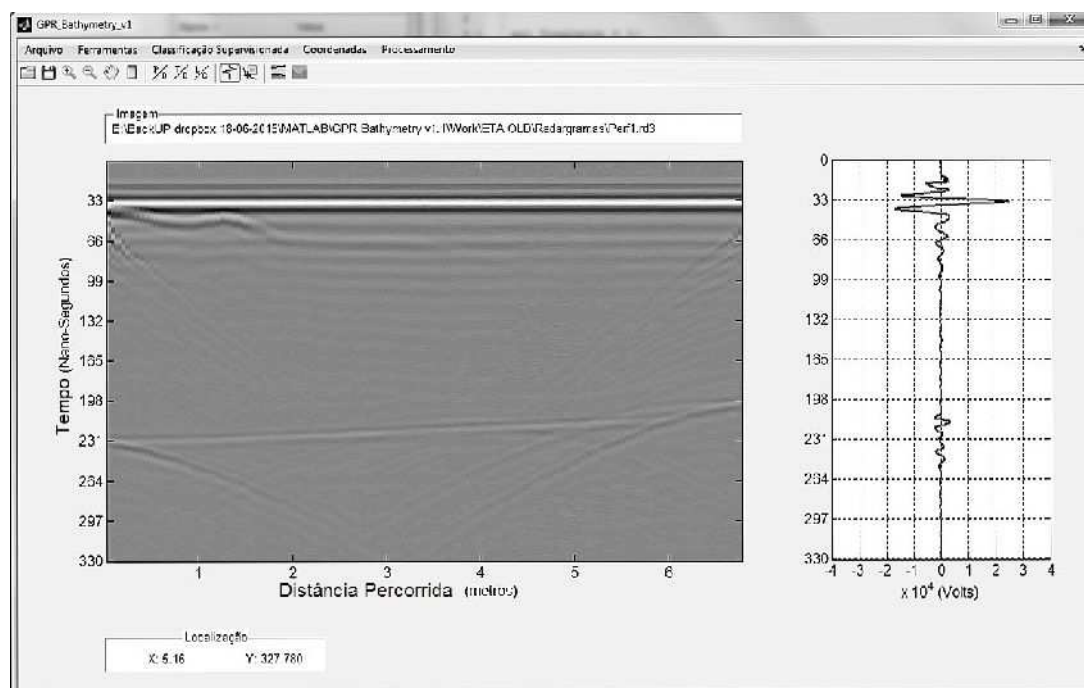


Figura 5. Radargrama do perfil 1 exibido na janela principal do “GPR Bathymetry”.

2.4 Identificação Manual do fundo da caixa e do ponto de controle.

Para a identificação manual da reflexão do pulso captado, foi utilizada uma ferramenta de edição disponível no “GPR Bathymetry”. Esta ferramenta possui funcionalidades de inserir linhas, polilinhas, *splines* e polígonos, tornando possível uma classificação manual, como mostrado na Figura 6.

Da Figura 6 é possível extrair, para uma determinada posição, o intervalo de tempo de propagação do sinal (ida e volta). Conhecendo-se a profundidade nesta mesma posição, medida por outro método qualquer, é possível determinar a velocidade de propagação do sinal no meio, supondo-a constante, empregando a Equação 1. Na Figura 6 é destacada uma posição a 2 metros do centro da caixa, sobre o perfil, em que o intervalo de tempo foi de 209 ns e a profundidade observada de 3,386 m. Com estas informações é possível determinar o valor da velocidade (Equação 2).

$$v = \frac{2d}{t} = \frac{2 \times 3,39 \text{ m}}{209 \text{ ns}} = 0,0324 \text{ m/ns} \quad (2)$$

O mesmo procedimento foi adotado para os perfis 5 e 10, obtendo como velocidades 0,0320 e 0,0328 m/ns. O valor médio obtido de 0,0324 m/ns foi muito próximo do valor de 0,033 m/ns encontrado nas bibliografias para a água destilada (Annan, 2003).

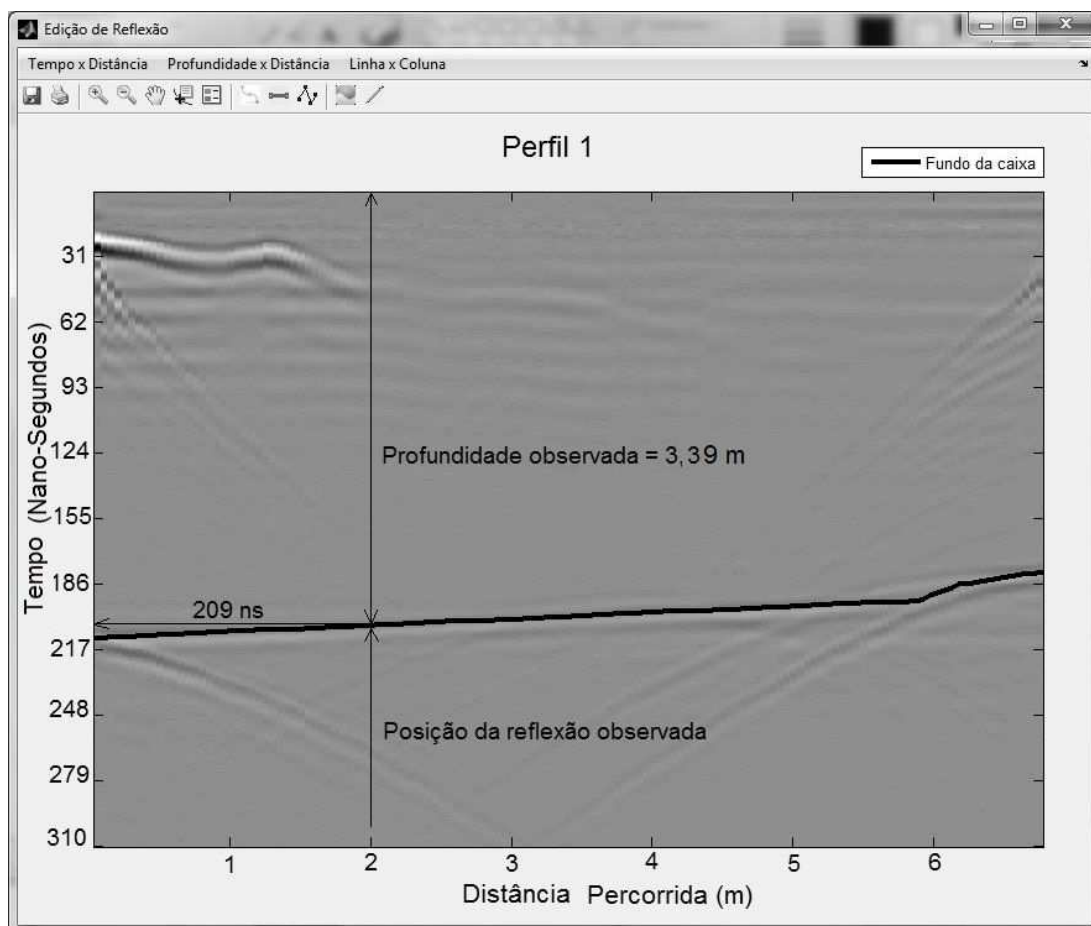


Figura 6. Profundidade e tempo de propagação em uma mesma posição.

Uma vez inserido o valor da velocidade média de propagação do sinal, na água da caixa em estudo, no aplicativo, torna-se possível a conversão do radargrama de tempo (ns) para profundidade (metros). Também é possível exportar um arquivo, na extensão *.zzz, contendo os valores de profundidade para cada traço a partir da linha inserida pelo usuário na demarcação da reflexão do sinal com o piso de concreto da ETA (Figura 6). Este arquivo será usado na etapa de espacialização do radargrama.

2.5 Espacialização dos radargramas

Durante o levantamento dos dados foram medidas, em um sistema de referência topográfico, as coordenadas X, Y e Z dos pontos inicial e final de cada radargrama utilizando estação total, uma vez que os perfis seguiram um determinado alinhamento (Figura 4). De posse dessa informação torna-se possível a atribuição das coordenadas

planas X, Y e da coordenada Z para cada traço do radargrama, correspondente à superfície. Para isso foi desenvolvida uma ferramenta que calcula o comprimento de cada radargrama, o seu número de traços e realiza uma interpolação, que pode ser linear ou cúbica (caso se tenha mais de 2 pontos de controle), de modo que os traços estejam igualmente espaçados entre si. Os pontos de controle podem ser inseridos manualmente em uma tabela de entrada de dados ou por meio de um arquivo no formato de texto com extensão *.xyz. O aspecto dos pontos de controle e dos pontos interpolados podem ser visualizados na Figura 7. As coordenadas interpoladas da superfície também podem ser salvas no mesmo formato ou acrescentadas no arquivo *.RAD.

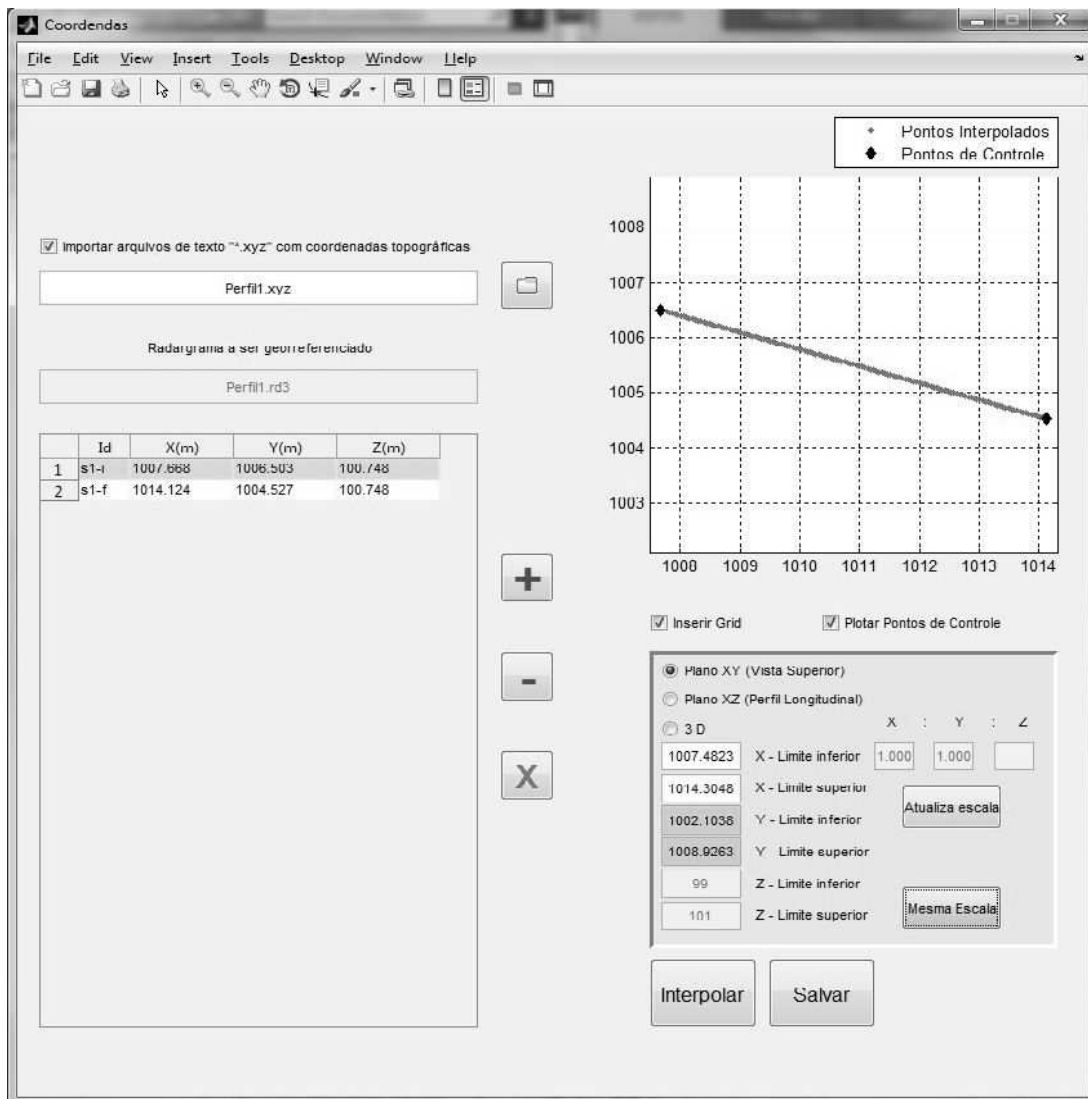


Figura 7. Espacialização de todos os traços do radargrama para o perfil 1.

De posse das coordenadas topográficas (X, Y, Z), na superfície, de cada traço (arquivos *.xyz) e dos valores de profundidade para cada ponto onde ocorreu a reflexão (arquivos *.zzz), é possível determinar as coordenadas topográficas (X, Y, Z) de cada ponto da reflexão no interior da caixa d'água. Para realizar essa tarefa, foi desenvolvida uma ferramenta cujos resultados são apresentados na Figura 8, onde se vê tabelas com os dados de entrada, os arquivos *.xyz e *.zzz, e os dados de saída, que são as coordenadas tridimensionais de todos os traços refletidos no fundo da

ETA, para as 13 radiais. Os dados de saída podem ser gravados no formato de texto *.xyz do “GPR Bathymetry”, *.txt do ArcGis e *.xlsx do excel.

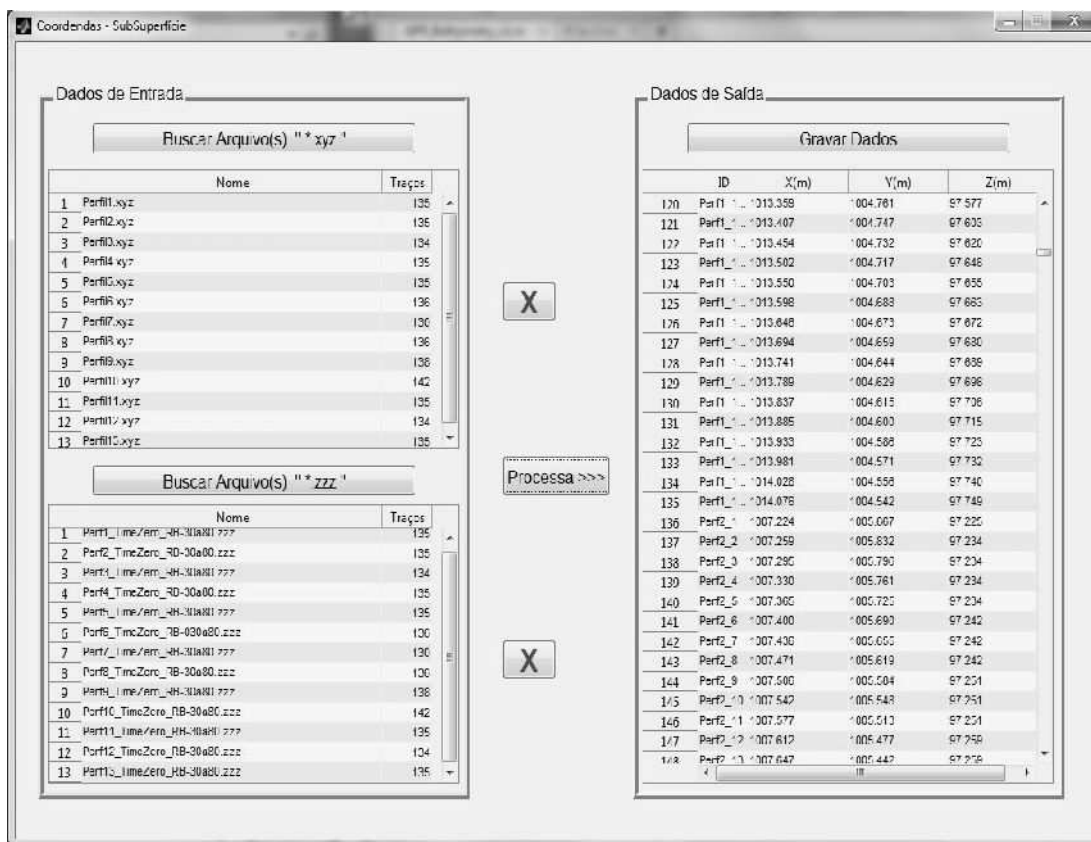


Figura 8. Coordenadas de todos os traços de todos os perfis do relevo submerso.

2.6 Interpolação dos dados

Para a interpolação e geração do modelo digital de elevação (MDE) foi utilizado o interpolador *Topo to Raster* disponível no *software* ArcGIS por apresentar melhor RMS para a caixa d’água de acordo com o estudo realizado por (Carmo, 2014). Como não foi possível amostrar com o GPR as bordas interna e externa da caixa d’água, por causa das dimensões do barco usado para transportar as antenas, foram utilizadas as coordenadas obtidas com a estação total para compor os dados a serem interpolados.

2.7 Comparação empregando pontos medidos com a topografia

Como não se têm coordenadas observadas com a estação total coincidentes com os traços do radargrama, e sabendo que a caixa d’água investigada possui uma simetria geométrica muito regular, como é possível observar pelos dados medidos com a estação total e Figuras 3a e 9, foi adotado o critério de realizar a comparação da profundidade a partir da média dos pontos observados pela estação total ajustados em circunferências, a partir da borda central da caixa.

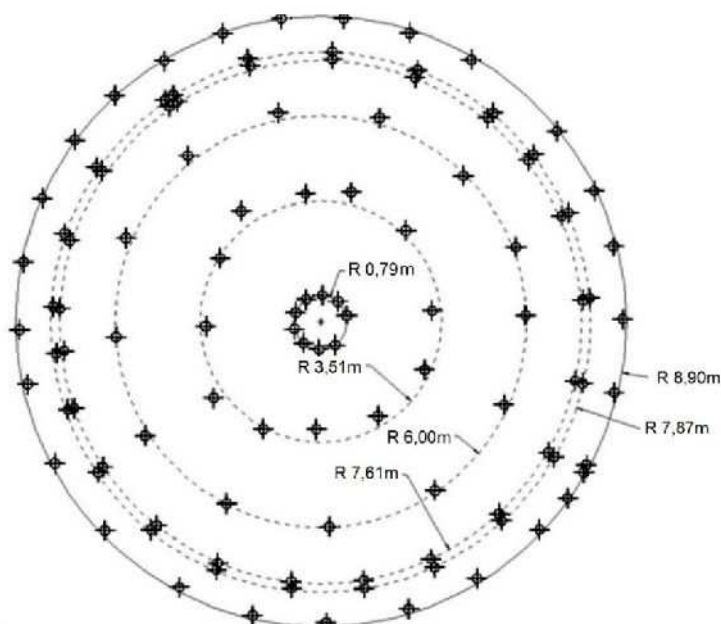


Figura 9. Disposição dos pontos observados na caixa d'água (ETA) com a estação total, com diferentes raios de circunferência ajustados aos pontos.

A Tabela 1 apresenta uma análise exploratória das profundidades levantadas com estação total próximas às circunferências, com o objetivo de verificar a regularidade geométrica observada em campo.

Tabela 1. Análise exploratória das profundidades levantadas com estação total

	Profundidade na circunferência a partir da Borda interna (metros)			
	R 3,51	R 6,00 m	R 7,61 m	R7,87 m
Menor profundidade observada	3,50	3,36	3,22	3,07
Maior profundidade observada	3,52	3,37	3,24	3,08
Amplitude (m)	0,02	0,01	0,02	0,01
Média (m)	3,51	3,36	3,23	3,08
Desvio padrão (m)	0,005	0,003	0,005	0,004

Pode-se observar que o maior desvio padrão foi de 5 mm e uma amplitude máxima igual a 2 cm, mostrando que a média representa bem os valores observados para as circunferências. Portanto, a análise será realizada a partir das discrepâncias entre as profundidades médias contidas na Tabela 1 e as profundidades extraídas dos radargramas nessas mesmas circunferências.

2.8 Comparação entre MDE's

De acordo com Li (1988), uma das maneiras de comparação entre dois modelos de elevação é considerar como variável randômica a diferença de altura (h) entre os modelos digitais de elevação. Para isso ele sugere a coleta de amostras sobre os MDE's para a estimativa de toda a superfície. Para a obtenção das variáveis randômicas foi criada uma malha regular, com espaçamento de 1 metro, totalizando

241 pontos e computadas as discrepâncias h_i entre as cotas empregando a Equação 3.

$$\Delta h_i = Z_{Ref}(l_i) - Z_{GPR}(l_i) \quad (3)$$

Sendo:

$Z_{GPR}(l_i)$: valor estimado para a profundidade na posição l_i , extraído do MDE (GPR);

$Z_{Ref}(l_i)$: valor observado para a profundidade na posição l_i , extraído do MDE (estação total).

Considerando h como uma variável randômica alguns parâmetros estatísticos podem ser calculados (Li, 1988):

Amplitude, diferença entre os extremos da discrepância:

$$R = \Delta h_{m\acute{a}x} - \Delta h_{m\acute{i}n} \quad (4)$$

Uma característica dessa medida é que ela leva em consideração apenas dois valores de h , descartando todos os outros.

Média das discrepâncias, medida de tendência central:

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta h_i \quad (5)$$

Desvio padrão da amostra de discrepâncias, medida de dispersão:

$$Sd = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta h_i - \bar{d})^2} \quad (6)$$

Um estimador que pode ser utilizado para descrever um conjunto de dados, independente da sua distribuição de probabilidade, é o RMS. Os *outliers* presentes no conjunto de dados devem ser eliminados uma vez que o valor do RMS é influenciado por eles. Este estimador retorna a incerteza presente no dado espacial avaliado, expondo a magnitude da discrepância que ocorre em campo (Santos, 2010).

Raiz da média dos quadrados das discrepâncias ($RMS_{\Delta h}$):

$$RMS_{\Delta h} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta h_i)^2} \quad (7)$$

Segundo Li (1988), uma combinação da média das discrepâncias com o desvio padrão da amostra pode ser usada como uma medida da acurácia, AC , do MDE.

$$Ac = \bar{d} \pm Sd \quad (8)$$

De acordo com 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_{Ref} e Z_{GPR} , Equação (3), bem como à efeitos sistemáticos. Se for nula, Ac é igual ao RMS. O desvio padrão Sd , mostra o quão bem o MDE se ajustou às observações de referência.

2.9 Cálculo do volume

O MDE gerado por ferramentas do ArcGIS foi importado pelo “GPR Bathymetry” no módulo para cálculo de volume. Foram inseridos os limites interno e externo da caixa d’água para o cálculo correto do volume. As Figuras 10 e 11 mostram a interface desenvolvida, os MDE’s e os valores dos volumes obtidos respectivamente pelos métodos utilizando a estação total e GPR.

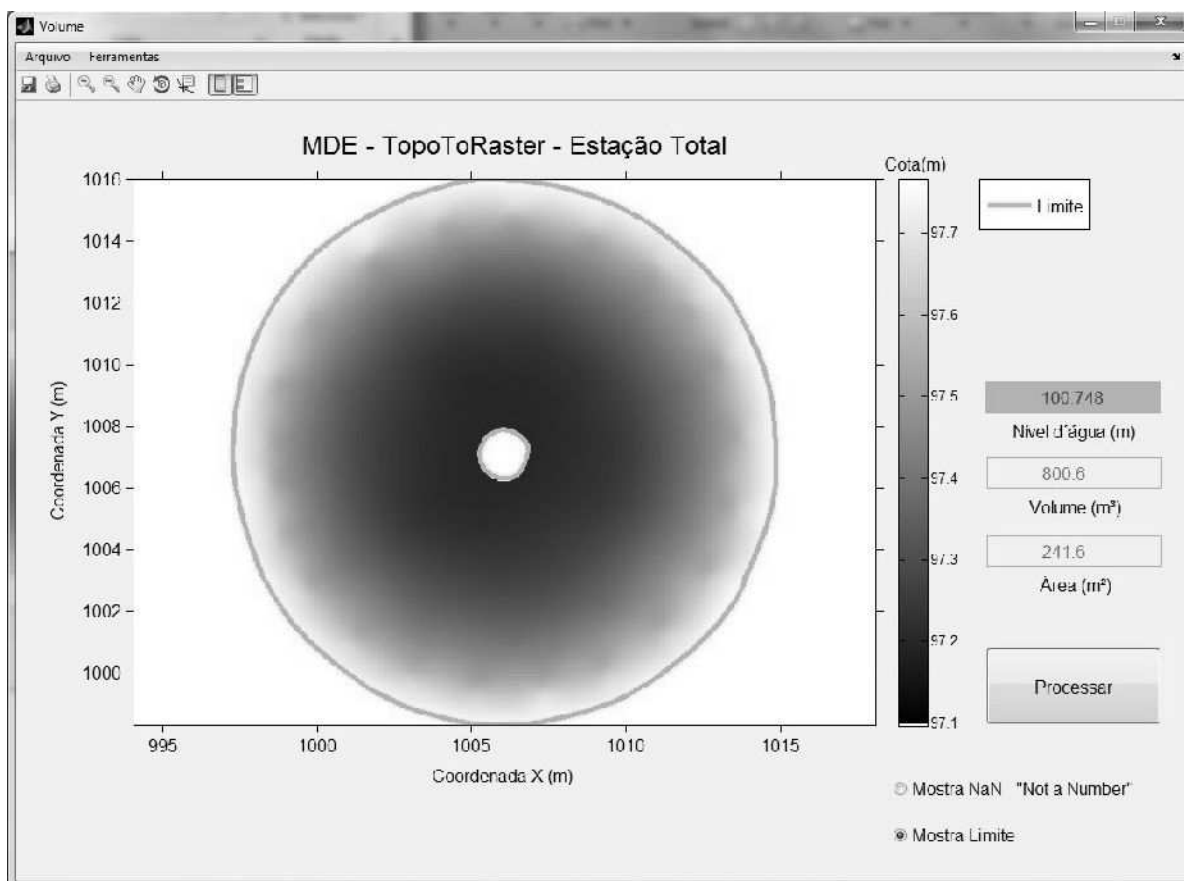


Figura 10. MDE gerado pelo interpolador *Topo to Raster* utilizando os pontos da Estação Total.

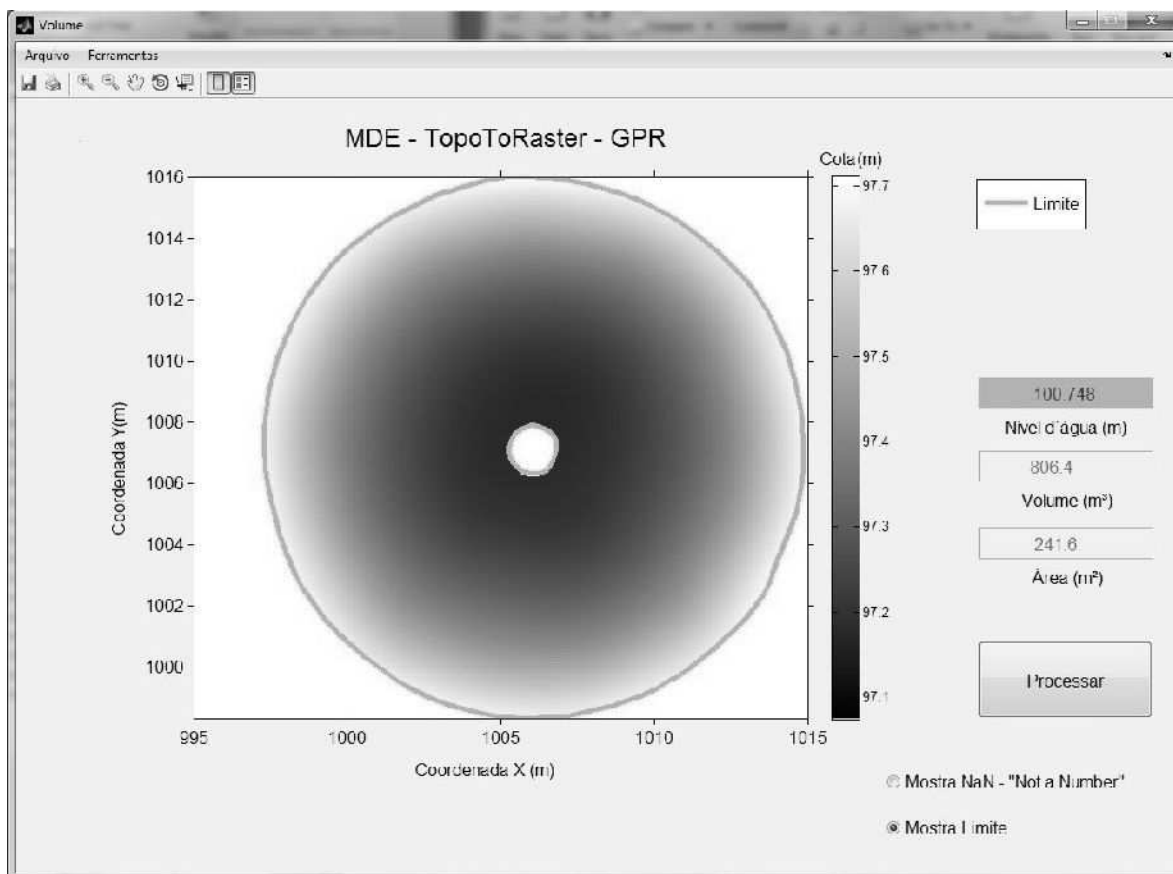


Figura 11. MDE gerado pelo interpolador *Topo to Raster* utilizando os pontos obtidos de modo manual (visual) com o GPR.

3. Resultados e Discussões

Para a primeira análise, tomou-se inicialmente os pontos observados pelo GPR na posição mais próxima das circunferências em estudo, gerando a Tabela 2. Enquanto com o levantamento topográfico as amplitudes foram menores que 2 cm e os desvios menores que 5 mm, com o levantamento por GPR as amplitudes chegaram a 10 cm e os desvios 3 cm.

Tabela 2. Análise exploratória das radiais levantadas com GPR.

	Profundidade a partir da Borda interna (metros)			
	R 3,51 m	R 6,00 m	R 7,61 m	R7,87 m
Menor profundidade observada (m)	3,54	3,37	3,25	3,24
Maior profundidade observada (m)	3,47	3,35	3,22	3,14
Amplitude (m)	0,07	0,02	0,03	0,10
Média (m)	3,49	3,36	3,24	3,16
Desvio padrão (m)	0,02	0,01	0,01	0,03

Para comparar as médias obtidas pelos pontos amostrados com a estação total e as obtidas pelo georadar, para as circunferências de estudo, elaborou-se a Tabela 3.

Onde pode-se verificar os valores para as discrepâncias das médias. A maior discrepância foi de -8cm enquanto a menor foi de 0 cm.

Tabela 3. Comparação das profundidades obtidas com o GPR com e com a estação total.

Raios a partir do centro da ETA	Profundidade a partir da Borda interna (metros)			
	R 3,51 m	R 6,00 m	R 7,61 m	R7,87 m
Média (Perfis GPR) (m)	3,49	3,36	3,24	3,16
Média (Estação Total) (m)	3,51	3,36	3,23	3,08
Discrepância das médias (m)	0,02	0,00	-0,01	-0,08

Para a segunda análise, onde se comparou o MDE gerado pela topografia com o MDE gerado pelo GPR, foi aplicado inicialmente o *boxplot* para a remoção de 4 *outliers*, identificados num universo de 241 pontos gerados por uma malha regular espaçada de 1m em 1m. Em seguida foi realizada a análise estatística dos dados com base nas discrepâncias entre os MDE's (Tabela 4).

Tabela 4. Análise estatística da amostra de discrepâncias.

Índices estatísticos	MDE (Estação Total) x MDE (GPR)
$\Delta h_{máx}$ (m)	0,01
Δh_{min} (m)	- 0,08
Amplitude (m)	0,09
Média (m)	- 0,02
Desvio padrão (m)	0,02
RMS (m)	0,03

Na Tabela 4 se verifica que a amplitude das discrepâncias entre os MDE's foi de 9 cm, a média de -2 cm, desvio da amostra de 2 cm e o RMS das discrepâncias de 3 cm, levando a uma acurácia estimada de 4 cm pela Equação 8.

Na comparação entre os MDE's o mapa de discrepâncias apresentado pela Figura 12, mostra que os pontos situados antes do início da elevação abrupta da caixa (Raio 7,61 m) não são muito discrepantes entre si e que as maiores discrepâncias ocorrem nas bordas.

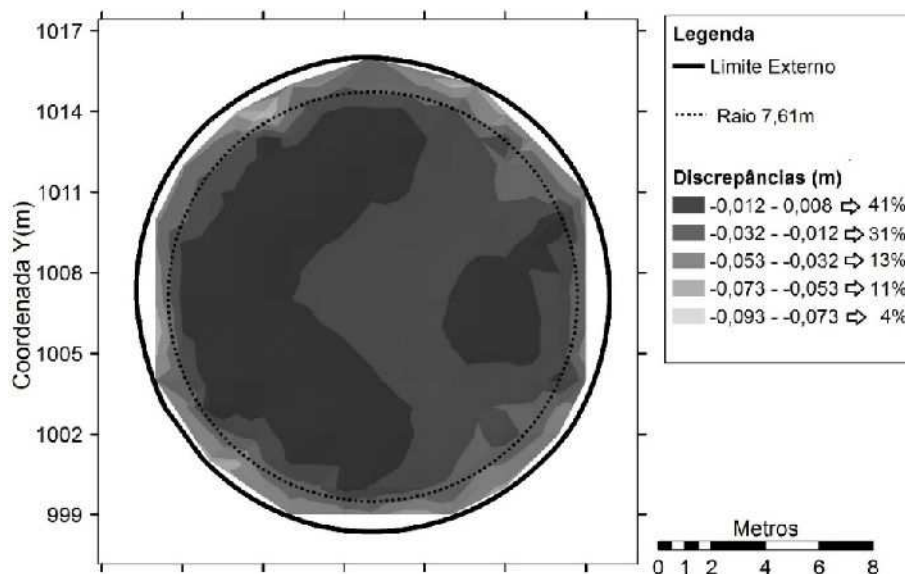


Figura 12. Mapa das discrepâncias.

Ao observar o mapa de discrepâncias pode-se dizer que 72% dos dados possuem discrepâncias entre 1cm a -3cm, mostrando ser este um modelo consistente para essa faixa. Acredita-se que o aumento da discrepância nas bordas pode ser em função da distribuição espacial dos pontos e de efeitos de borda (*edge effects*) oriundos da interpolação do gride. Pode-se observar nas Figuras 4 e 9 que os pontos obtidos com o GPR não possuem uma distribuição espacial regular, estando mais próximos junto ao centro da ETA e mais afastados à medida que se aproximam da borda externa. Já os pontos levantados pela estação total estão mais bem distribuídos espacialmente.

Comparando os volumes determinados com os MDE's, observa-se que os volumes encontrados pelos dois métodos foram de 800,6 m³ para a estação total e 806,4 m³ para o GPR, o que corresponde a uma diferença de 1%.

4. Conclusões

A comparação dos radargramas com as circunferências ajustadas aos pontos obtidos pela estação total, tomando-se a variável Z como a média aritmética desses pontos, apresentou resultados satisfatórios. Três, das quatro referências de comparação, apresentaram valores de discrepâncias inferiores a 2 cm e duas delas apresentou o valor 0 cm.

Quando analisados os dois modelos digitais de elevação observa-se uma discrepância inferior a 0,03 m para 72% da área mapeada e um RMS para toda a superfície também de 0,03 m. Atribui-se o aumento da discrepância, à medida que se afasta da borda central da ETA, ao aumento do espaçamento entre os perfis que foram obtidos de maneira radial. Neste sentido, um ponto limitante na obtenção dos dados de GPR foi a distribuição não uniforme (Figura 4).

Os resultados obtidos no cálculo de volume se mostraram muito promissores, uma vez que se obteve uma diferença de 1% quando comparado com uma técnica tradicional e de melhor acurácia.

O objetivo de construir um aplicativo para acesso gratuito, visando a manipulação de dados de GPR foi alcançado com sucesso. Também foi possível realizar alguns processamentos básicos como: *remove background*; *set time zero*; edição do radargrama com linhas e polígonos; espacialização do radargrama em x, y e z; cálculo de velocidade de propagação; conversão do eixo y de tempo para distância; cálculo de áreas e volumes, dentre outros. Já estão sendo implementadas outras funcionalidades, como interpoladores para geração de MDE's e classificadores semiautomáticos.

O GPR se mostrou uma ferramenta multidisciplinar, isto é, uma ferramenta que apesar de ter sido inicialmente desenvolvida para trabalhos geológicos, apresentou-se como uma boa alternativa para trabalhos em tanques e reservatórios rasos confinados, como pode ser verificado para os resultados dos experimentos neste trabalho.

Para um reservatório de uma estação de tratamento de água construído em concreto armado, com profundidades variando de 3 a 3,5 metros, o levantamento do relevo submerso empregando um georadar, GPR, resultou em um modelo digital de elevação com acurácia estimada de 4 cm, com as discrepâncias podendo chegar a 10 cm.

AGRADECIMENTOS

O autor externa seus **agradecimentos** à UFMG e ao professor Paulo Roberto Antunes Aranha por ceder o GPR e ajudar na coleta de dados, bem como a Edilson José do Carmo pela colaboração e disponibilização dos dados referentes ao levantamento topográfico da ETA.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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>.
- 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." *Jornal of Applied Geophysics*, 2002.
- Blondel, P. and Murton, B.J. *Handbook of Seafloor Sonar Imagery*. Eastergate, Chicester, West Sussex, England: Praxis Publishing Ltd . Hardcover, 75 Sterling. ISBN 0-471- 96217-1. 1997.
- Botelho, M. A. B. "Modelamento Sísmico na Bacia do Recôncavo usando a Técnica de Traçamento de Raios". *Tese de Doutorado*. Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Geofísica, UFBA. 1986.

Carmo, E. J. “Avaliação dos interpoladores krigagem e topo to raster na geração de modelos digitais de elevação a partir de dados batimétricos”. *Dissertação de Mestrado*. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, Minas Gerais, 2014.

Castelo Branco, R. M. G., and Castro, D. L. “Ground penetrating radar monitoring of a hydrocarbon leakage site in Fortaleza (Brazil) during its remediation process.” *Journal of Applied Geophysics*. 2003.

Faria, S. H. “O uso do georadar na determinação de parâmetros da estrutura de pavimentos flexíveis”. *Dissertação de mestrado*. UFV - Universidade Federal de Viçosa. Viçosa - MG. 125p. 2010.

Gandolfo, O. C. B. “Um estudo do imageamento geoeletrico na investigação rasa. *Tese de Doutorado*. Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia, USP. 2007.

Li, Zhilin. “On the measure of digital terrain model accuracy.” University of Glasgow. *Photogrammetric Record*, 1988: pags: 873-877.

Queiroz, E. P., I. M. Nascimento, E J. R. R. Fialho. “A dimensão do transporte hidroviário de carga e passageiros: a extensão das vias economicamente navegadas.” *8º Seminário de Transporte e Desenvolvimento Hidroviário Interior*, FATEC-Jahu, Jaú-SP - 27 a 29 de agosto de 2013.

Saarenketo, Timo. “Electrical properties of road materials and subgrade soils and the use of ground penetrating radar in traffic infrastructure surveys”. *PhD thesis*: Faculty of Science, Department of Geoscience, University of Oulu, P.O. Box 3000, FI-90014. Edição: Professor Olli Vuolteenaho. Oulu: Oulu University Prees, 2006.

Santos, Afonso P. “Avaliação da Acurácia Posicional em Dados Espaciais com o uso de Estatística Espacial.” *Dissertação de mestrado*. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, Minas Gerais, Brasil, 2010.

Shiraiwa, S., Bertol, G. A., and Hirooka, E. S. S.. “Aplicação de GPR na localização de artefatos arqueológicos na Casa Dom Aquino em Cuiabá, MT.” *In: 1º Simpósio de Geofísica, São Paulo*. Anais do I Simpósio de Geofísica. São Paulo: Regional Sul da SBGF. v. CD-ROM. p. 1-4., 2004.

Transportes, Ministério dos. *Projeto de Lei nº 1.176-H de 1995. Seção III - Do Subsistema Aquaviário Federal. Anexo IV*. 1995. Acesso em 1 de agosto, 2015. <http://www.transportes.gov.br/conteudo/770>.

ARTIGO 3: AVALIAÇÃO DE RADARGRAMAS BATIMÉTRICOS PARA CÁLCULO DE VOLUME DE REPRESA EMPREGANDO O CLASSIFICADOR “FCLASS2”.

Artigo intitulado “Avaliação de radargramas batimétricos para cálculo de volume de represa empregando o classificador “*fclass2*”” aceito com revisões em 13/04/2016 para publicação no Boletim de Ciências Geodésicas, na versão original em português.

Sandro Henrique de Faria ^{1,2}
Dalto Domingos Rodrigues ²
Nilcilene das Graças Medeiros ²
Paulo Roberto Antunes Aranha ³

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sudeste de Minas, Juiz de Fora – MG, Brasil, Email: sandro.faria@ifsudestemg.edu.br.

²Universidade Federal de Viçosa – Viçosa - MG, Brasil, Emails: dalto@ufv.br, nilcilene.medeiros@ufv.br.

³Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, Brasil, Email: 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 98m³ em 75.000m³, para a função *Griddata* com o interpolador v4. Considerando todos os *MDEs* gerados, a maior diferença entre os volumes foi de 2%, cerca de 1900m³. 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. Was generated Digital Elevation Models (*DEM*), employing three different interpolations using echo sounder and GPR observations. These *DEMs* were compared in pairs, for each interpolator, applying the paired t test. Were performed Comparisons 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 m³ in 75000 m³, for *Griddata* function with interpolator v4. Considering all *DEMs*, the biggest difference between volumes was 2%, about 1900m³. 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 ciência 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 (*Ground Penetrating RADAR*). 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.

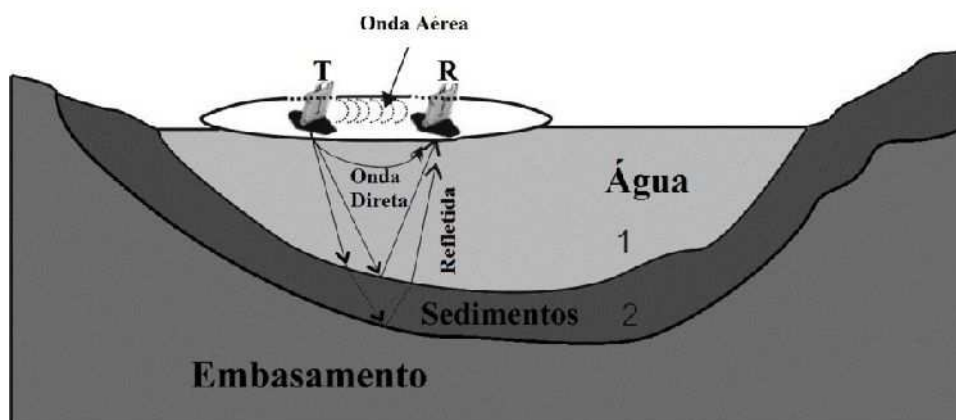


Figura 1. Princípio básico da técnica GPR onde T é a antena transmissora, R a antena receptora e 1, 2 as interfaces de reflexão.

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.

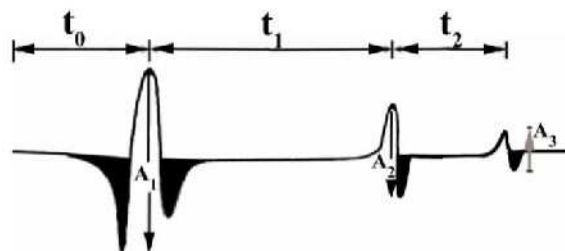


Figura 2. Exemplo do traço do GPR, no qual se observam a onda direta A_1 , e as reflexões nas interfaces 1 e 2, respectivamente A_2 e A_3 .

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 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 matriz de dados 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 é uma imagem digital oriundas 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* a fim 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).

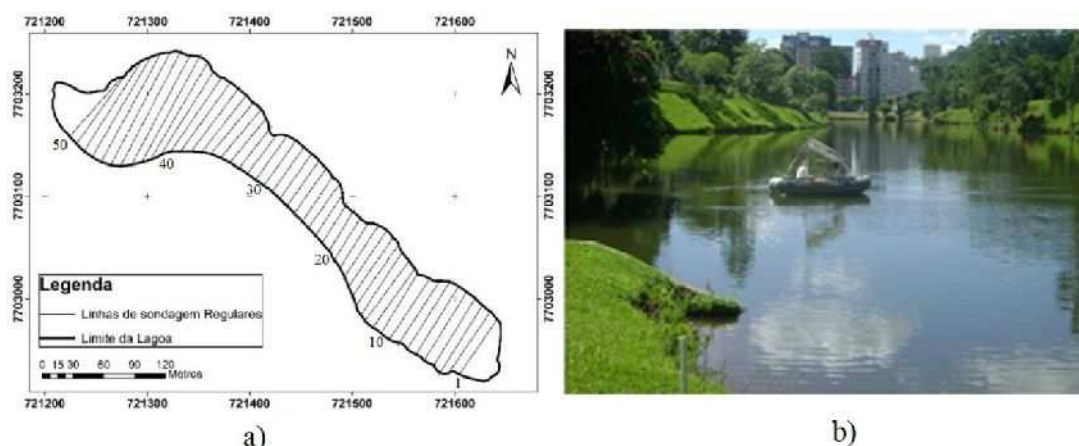


Figura 3. (a) Limite da lagoa e as linhas de sondagem. Sistema de coordenadas WGS84, projeção UTM. (b) Foto da aquisição dos dados na represa.

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 m³ e 35.000 m², se enquadrando, portanto, na categoria de reservatório de pequeno porte.

Tabela 1. Classificação dos reservatórios

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

Para a definição das linhas regulares de sondagem deve-se procurar o adensamento das seções de forma a obter uma precisão adequada. 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, 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 (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.

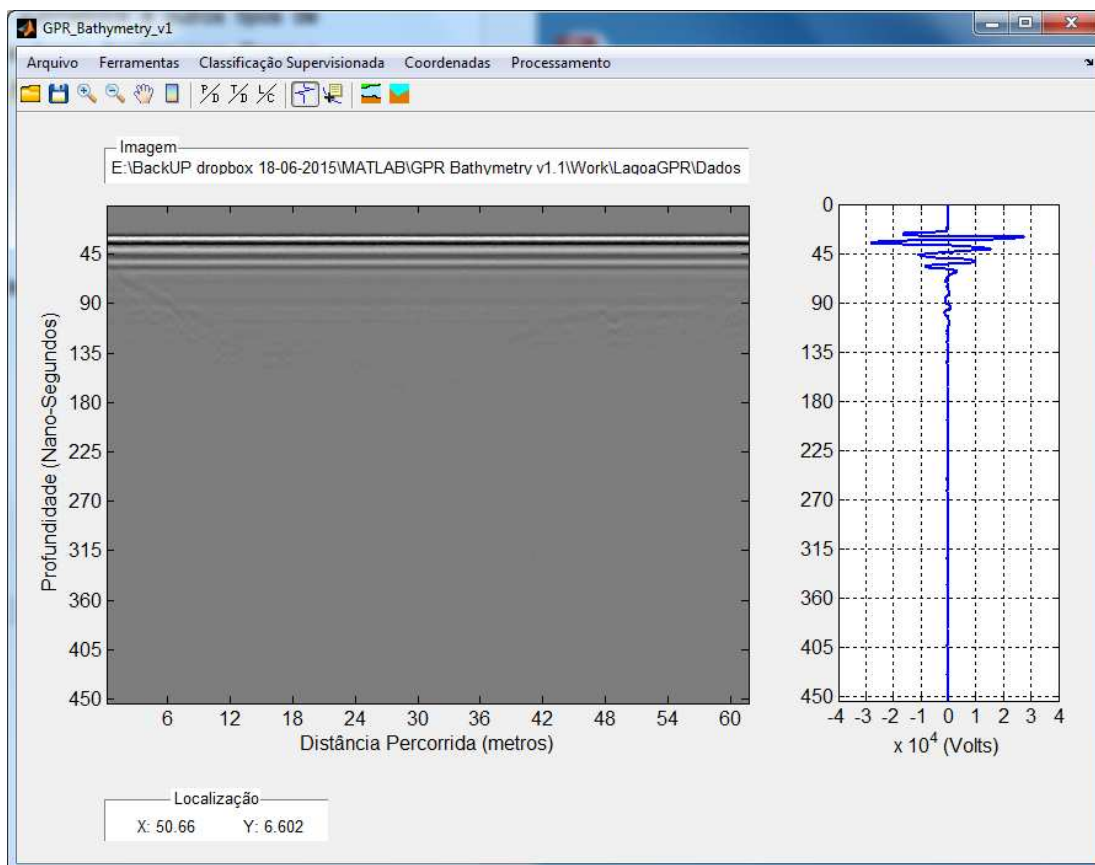


Figura 5. Radargrama da seção 1 sem processamento.

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.

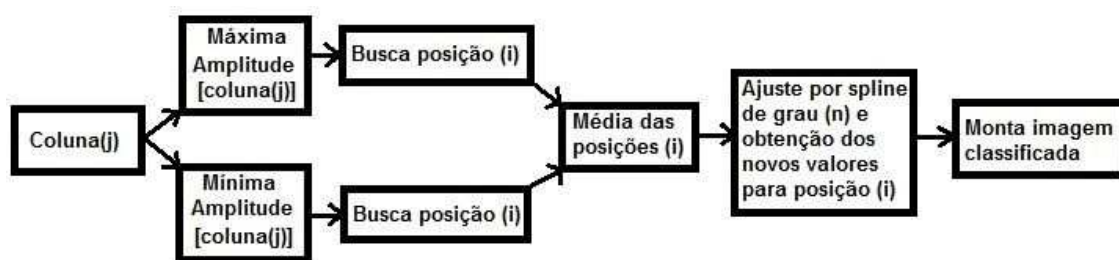


Figura 6. Fluxograma da função fclass2.

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 altitude 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 e podem ser exportados para o formato de texto *.xyz do *GPR Bathymetry*, *.txt do ArcGis e *.xlsx do excel.

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.

- a) *Scattered Interpolant*: retorna uma superfície que passa pelos pontos observados. Esta função usa como método de interpolação: linear, *nearest* e natural (Mathworks, 2015).
- b) *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 (h) entre os modelos digitais de elevação. Para isso foram computadas as discrepâncias 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* (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:

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

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

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

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

Onde $\overline{\Delta h}$ é o valor para a média das discrepâncias que se quer testar; Sd desvio padrão; n tamanho da amostra; $t_{\text{calculado}}$ 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 (α) 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[®]” para o cálculo do tamanho da amostra com os seguintes parâmetros: nível de significância (α) = 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[®]”.

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 (α) e erro do tipo II (β), 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.

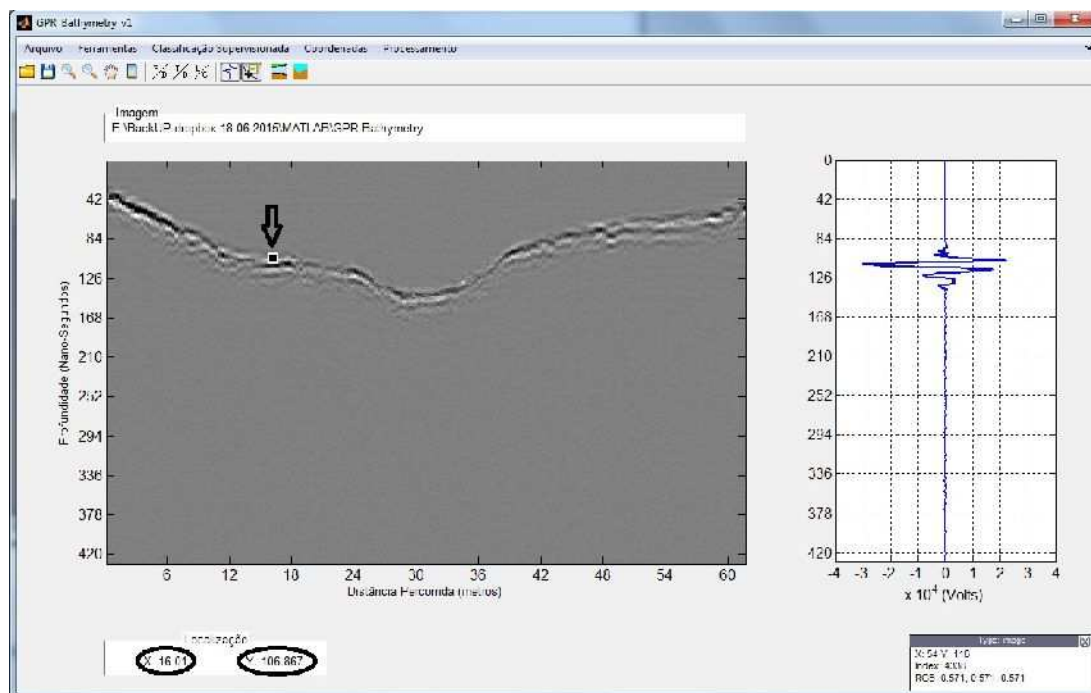


Figura 7. Seção 1 pós-processada. Também mostra um dos pontos de controle e suas coordenadas.

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.

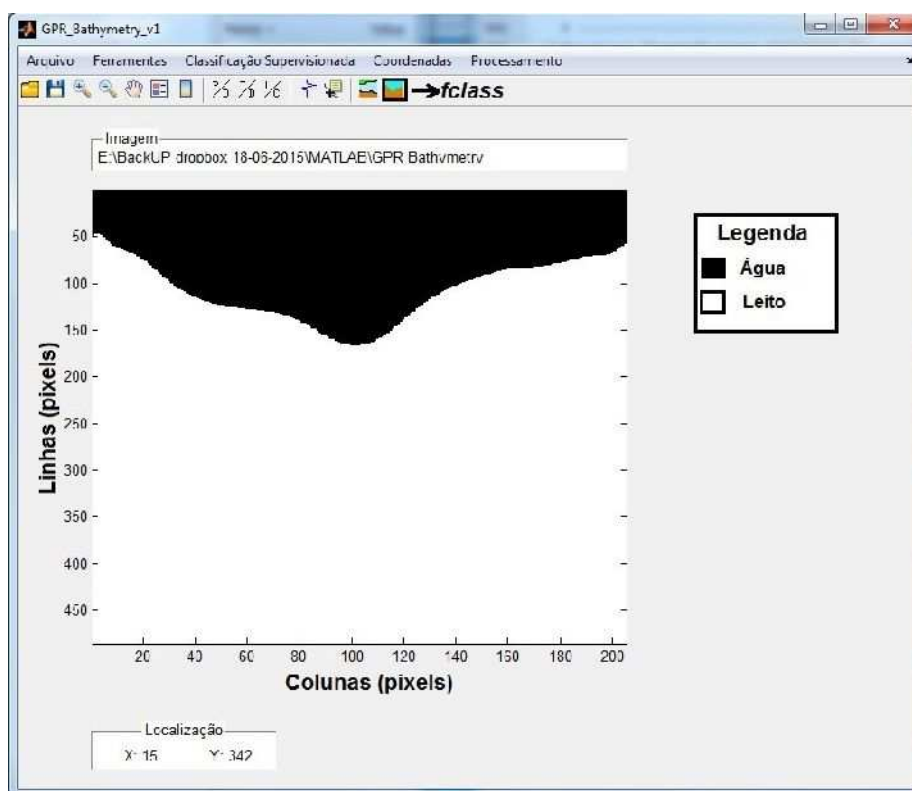


Figura 8. Aspecto da seção após classificação pelo *fclass2*.

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

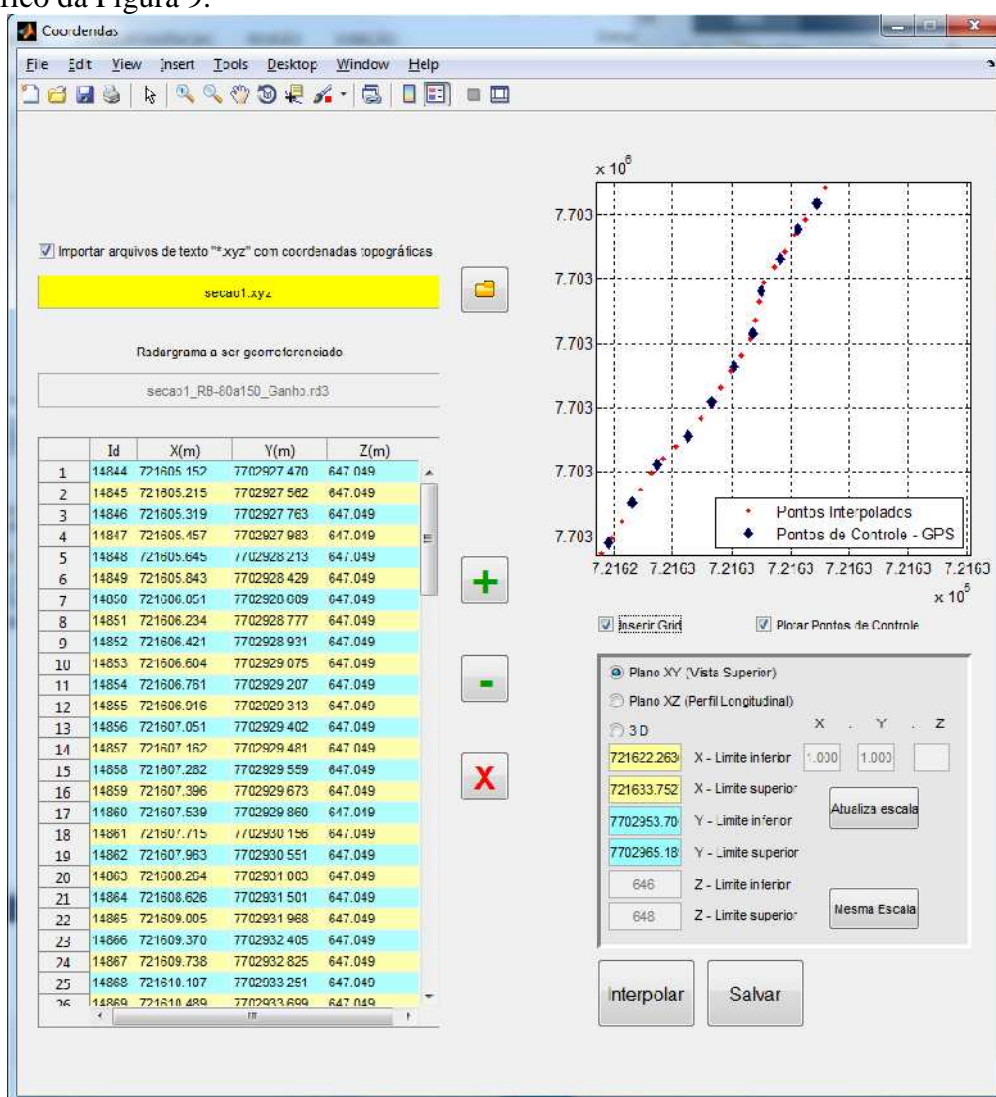


Figura 9. Espacialização de todos os traços do radargrama para o perfil 1 (Superfície).

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

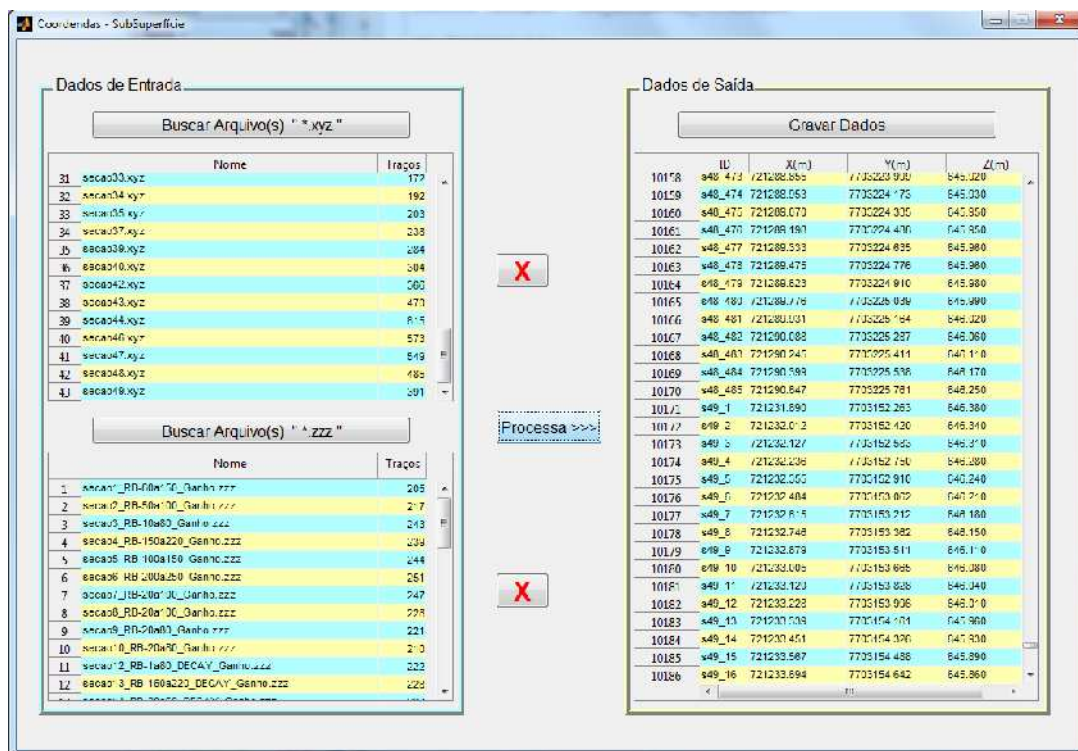


Figura 10: Arquivos de entrada e coordenadas do relevo submerso.

Os resultados da interpolação para os dados provenientes do GPR e ecobatímetro, respectivamente, com a função *Scattered Interpolant* com o interpolador natural podem ser visualizados nas Figuras 11 e 12. A escala em níveis de cinza se refere às altitudes que estão em metros.

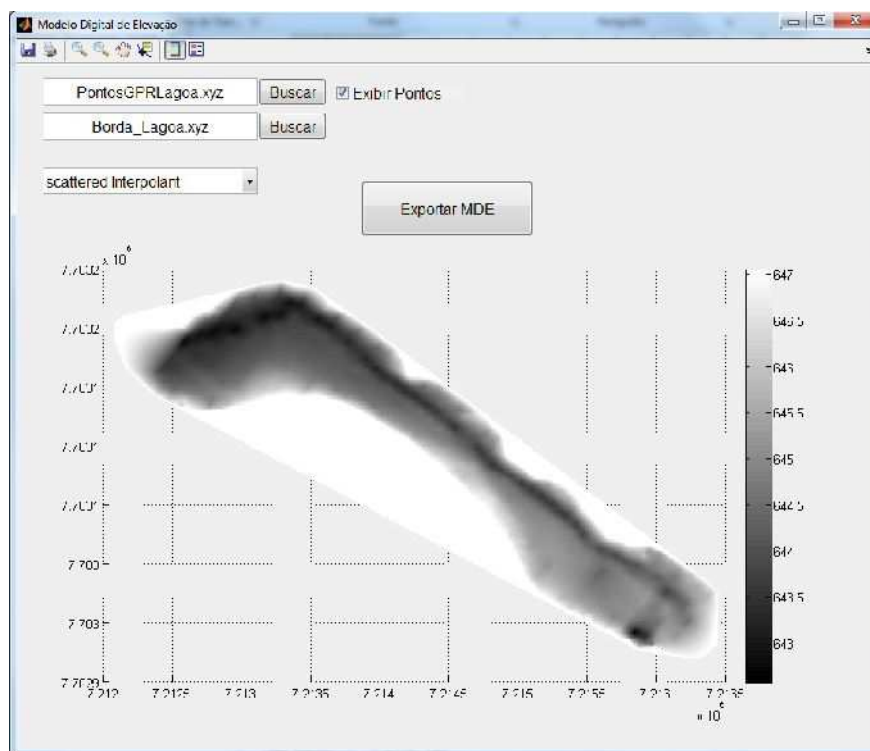


Figura 11. MDE gerado pela função *Scattered Interpolant* com o método natural (GPR).

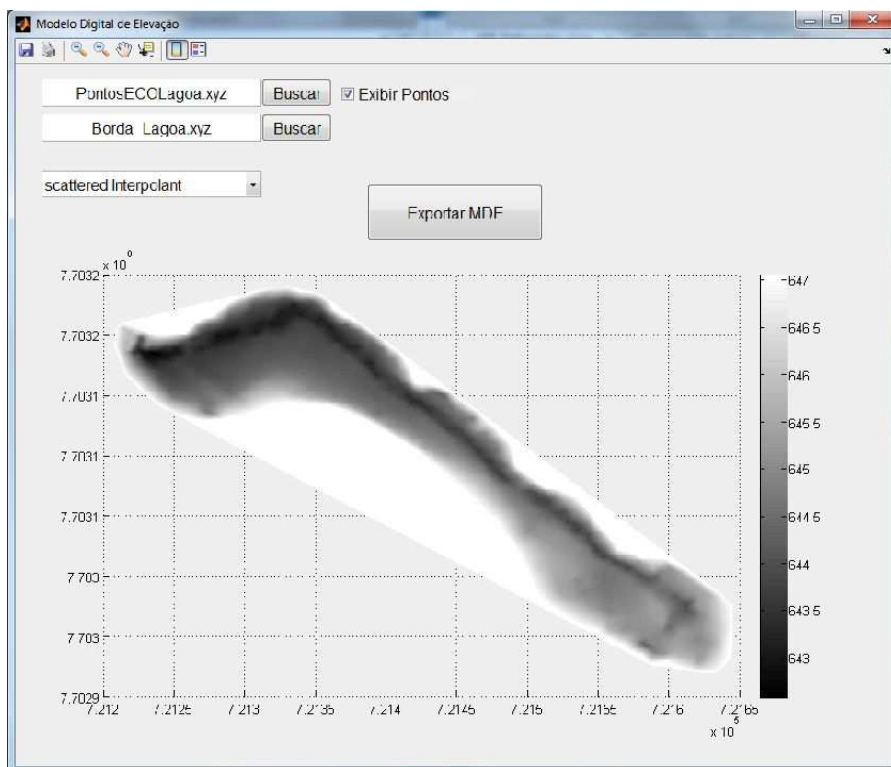


Figura 12. MDE gerado pela função *Scattered Interplant* com o interpolador natural (ecobatímetro).

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 13 e 14. Nesses, a escala em níveis de cinza se refere às altitudes que estão em metros.

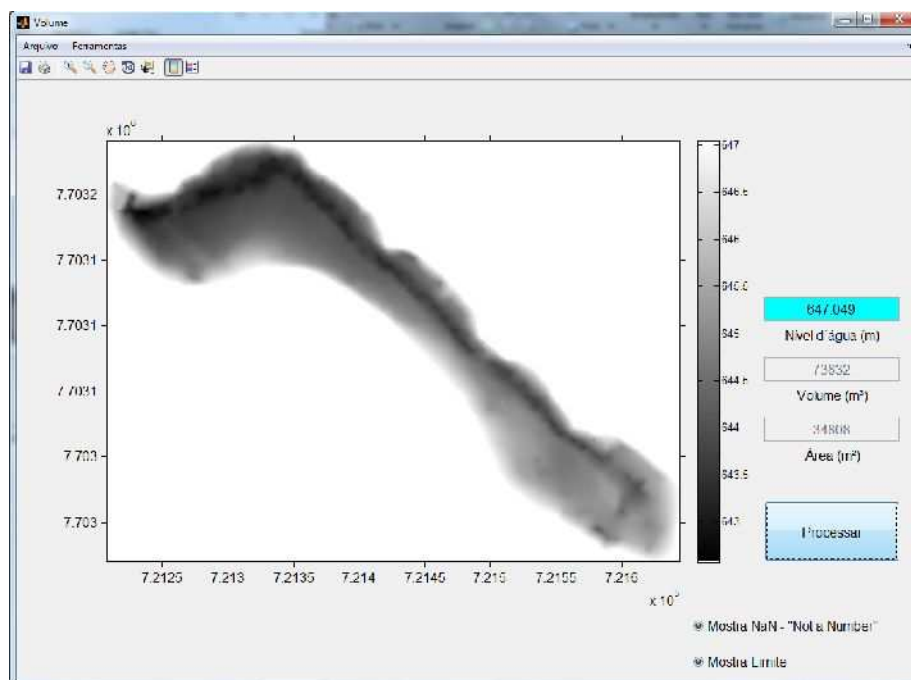


Figura 13. Volume calculado a partir do MDE gerado pela função *Scattered Interplant*, interpolador natural, com dados do ecobatímetro.

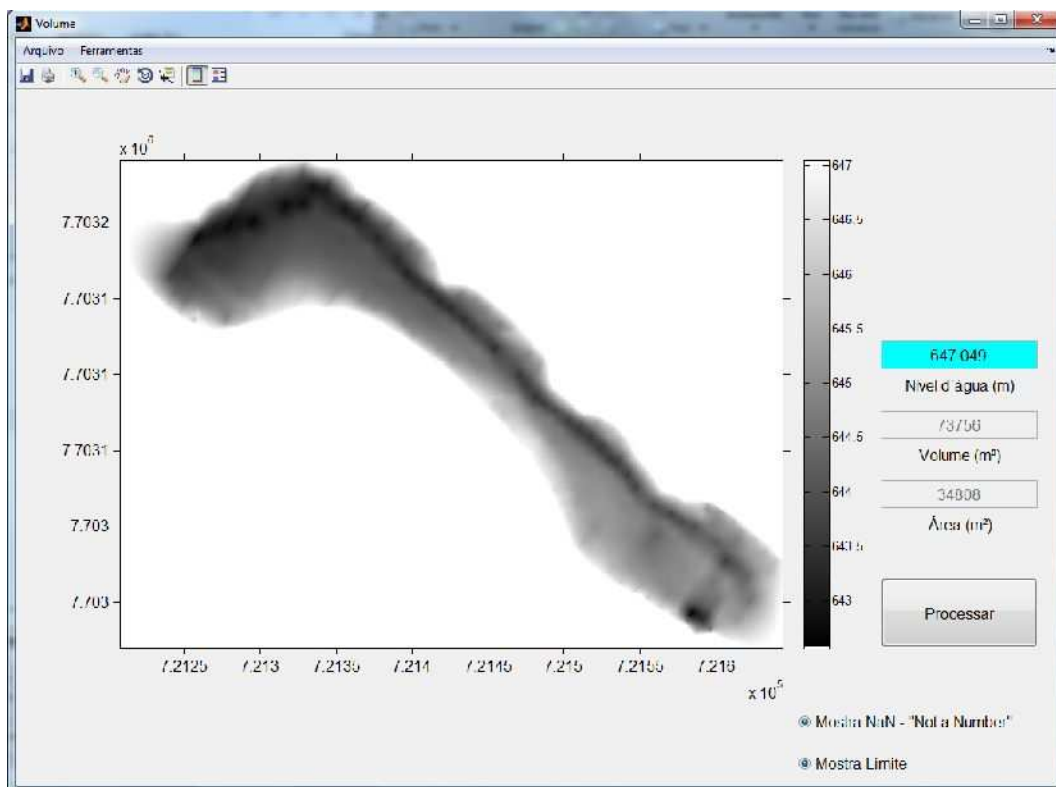


Figura 14. Volume calculado a partir do *MDE* gerado pela função *Scattered Interpolant*, interpolador natural com dados do GPR.

Analisando as Figuras 11, 12, 13 e 14 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 m³ e a menor para a função *Gridfit* com 15 m³, 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)
Perímetro (m)	1484	1484	1484	1484	1484	1484
Área (m ²)	34808	34549	34689	34808	34698	34693
Volume (m ³)	73756	75314	75624	73832	75412	75639
Maior Z (m)	647,05	647,05	647,05	647,05	647,05	647,05
Menor Z (m)	642,56	642,51	642,51	642,57	642,31	642,25
Amplitude (m)	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	ECOBATÍMETRO			GPR	
	Altitude (m)	Área (m ²)	Volume (m ³)	Área (m ²)	Volume (m ³)
Scattered (Natural)	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
Griddata (V4)	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
Gridfit (Bilinear)	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 alcançadas pelo GPR para os *MDEs* gerados pelas funções *Scattered Interpolant*, *Griddata* e *Gridfit* foram de 5 ± 14 cm, 4 ± 15 cm e 4 ± 15 cm, respectivamente.

Tabela 5. Análise estatística das discrepâncias.

Índices estatísticos	MDE (Ecobatímetro) x MDE (GPR)		
	Scattered Interpolant (Natural)	Griddata (V4)	Gridfit (Bilinear)
Δh_{\max} (m)	0,42	0,43	0,43
Δh_{\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
Gráus de liberdade	72	63	72
Estatística t (<i>T-valor</i>)	-1,98 < 0,19 < +1,98	-1,98 < - 0,27 < +1,98	-1,98 < 0,01 < +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

Conclui-se que, pela análise dos dados apresentados nas Tabelas 3 e 4, não houve 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.

De acordo com a metodologia sugerida por Li (1988) as acurácias alcançadas pelo GPR para os *MDEs* gerados pelas funções *Scattered Interpolant*, *Griddata* e *Gridfit* foram de 5 ± 14 cm, 4 ± 15 cm e 4 ± 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 m³ e a menor com o

uso da função *Gridfit* com 15 m³, 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 m³.

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 x 135 pixels.

Assim, o objetivo de construir um aplicativo para acesso gratuito, visando a manipulação de dados de GPR foi alcançado com sucesso. Também foi possível realizar alguns processamentos necessários para a realização deste trabalho, como: aplicação de filtros; espacialização do radargrama em x, y e z; cálculo de velocidade de propagação; conversão do eixo y de tempo para distância; cálculo de áreas e volumes, classificação, dentre outros.

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.

Por fim, 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.

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., 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., 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.

4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES GERAIS

O método GPR mostrou-se eficaz para a identificação do fundo da represa e da ETA. 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 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. Sugere-se diminuir o *time window* e o intervalo de coleta entre os traços, além de fazer teste de condutividade na água da represa e sedimentos.

O Software GPR *Bathymetry* desenvolvido visando o acesso gratuito, para a manipulação de dados de GPR foi alcançado com sucesso. Atualmente conta com 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, classificação automática e semiautomática por meio do *fclass2* e *fclass3*, respectivamente. Sugere-se a implementação de outras ferramentas a fim de torná-lo mais robusto.

Os classificadores *fclass2*, para 2 classes (água e leito), assim como o *fclass3*, para 3 classes (offset, água e leito), funcionaram bem. Ambos foram capazes de gerar MDEs que estatisticamente não foram diferentes dos MDEs gerados pelo ecobatímetro e topografia convencional, respectivamente. A classificação dos radargramas, usando um processador core i7, utilizou um tempo de 0,36 segundos em média para os dois classificadores utilizando imagens com resolução aproximada 630 x 135 *pixels*. Recomenda-se um estudo mais detalhado a fim de melhorar o desempenho do *fclass3*, melhorando a distinção entre as reflexões oriundas da parede e do fundo, eliminando desta forma a confusão que ocorreu em alguns perfis da ETA,

bem como aprimorar o classificador fclass2, a fim de minimizar as etapas de processamento antes da aplicação do classificador.

O maior problema prático encontrado neste trabalho está correlacionado ao método de coleta empregado. Este funciona bem para represas e lagoas com comprimento de linhas de sondagens de no máximo 100 metros, pois a utilização de cordas é um fator limitante na aquisição de dados. Para a eliminação das cordas e utilização do motor da embarcação é necessário melhorar o sistema de posicionamento, pois não se terá mais o parâmetro de distância fornecido pelo GPR para a interpolação e obtenção das coordenadas de cada traço, uma vez que os pulsos serão disparados por intervalo de tempo e conseqüentemente intervalos distintos. O Posicionamento cinemático relativo funcionou bem, mas ainda é preciso uma maneira de sincronizar o pulso com o dado gravado pelo sistema GNSS. Por fim, sugere-se maiores estudos com relação a qualidade posicional na aquisição dos dados GPR.

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*. 2013. Pag 10-19.
- AGUIAR, J. C. **Radar de Penetração no Solo (GPR): Aspectos geofísicos e geodésicos, processamento e análises em pavimento flexível**. Dissertação de mestrado. Recife, Pernambuco, Brasil. 2005.
- ALMEIDA, R. F. **Modelagem Geológica do Entorno da Lagoa de Jacarepaguá**. Dissertação de Mestrado. PUC-Rio. Rio de Janeiro. 2011.
- ANNAN, A. P. **Ground penetrating radar: Principles, procedures & applications**. *Sensors & Software Inc. Technical Paper*. Disponível em: <http://www-rohan.sdsu.edu/~geology/jiracek/sage/documents/Sensors%20and%20Software%20GPR%20Manual.pdf>. Acesso em 1 de julho de 2008. 2003.
- ANNAN, A. P. e DAVIS, J. L. **Ground Penetrating Radar - Coming of Age at Last!!**. Fourth Decennial International Conference on Mineral Exploration. Vol. Electrical, n° paper 66. 1997. p. 515–522.
- AQUINO, W. F. e LOPEZ, A. G. **Estudo do assoreamento de corpos d'água pelo método geofísico de geo-radar**. XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, Porto Alegre - RS. 2000.
- ARANHA, P. R.; AUGUSTIN, C. H. 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.
- ARANHA, P. R.; PORSANI, M. J. e CARVALHO, R. F. **Deconvolução Preditiva de Perfis de Georadar Obtidos no Lago da Represa Serra Azul - Copasa, Minas Gerais**. SBGf - Simpósio Brasileiro de Geofísica. 11° simpósio, Salvador - BA, Brasil, 24-28 de agosto. 2009.
- ARANHA, P. R. **Apostila de Georadar - v.8**. Departamento de Geologia, Instituto de Geociências. Belo Horizonte. 2011.
- BAPTISTA, C. N. **Pavimentação - Ensaio fundamentais para a pavimentação e dimensionamentos dos pavimentos flexíveis**. (2 ed., Vol. I). Porto Alegre, RS, Brasil: Editora Globo. 1976.
- BOTELHO, M. A. e MUFIT, I. R. **Migração em profundidade de dados 2-D e 3-D de radar penetrante no solo**. Anais do XIII Encontro de Físicos do Nordeste, p.32, Salvador-Ba. 1995.

- CARCIONE, J. M. e CAVALLINE, F. **Ground penetrating radar: Wave theory and numerical simulation in lossy anisotropic media**. *Geophysics*, vol61,N 6(nov-dez, 1996). Págs 1664-1677. 1996.
- CARMO, E. J. **Avaliação dos interpoladores krigagem e *Topo to Raster* na geração de modelos digitais de elevação a partir de dados batimétricos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, Minas Gerais, Brasil. 2014.
- CARVALHO, N. O.; JÚNIOR, N. P.; SANTOS, P. M. e LIMA, J. E. **Guia de avaliação de assoreamento de reservatório**. Brasília, DF. ANEEL, Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas. 2000.
- CLAERBOUT, J. F. **Basic Earth Imaging**. Disponível em <<http://sepwww.stanford.edu/sep/prof/>>. Acesso em 25 de julho de 2014. 2010.
- DANIELS, D. J. **Ground Penetrating Radar**. London, United Kingdom: The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom. Second Edition. 2004. 761p.
- DAVIS, J. e ANNAN, A. P. **Ground Penetrating Radar for High-Resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy**. European Association of Geoscientists & Engineers. *Geophysical Prospecting*, Volume 37, Issue 5. 1989. Pages 531 - 551.
- DOURADO, T. C. **Aplicação de Técnicas Clássicas do Processamento Sísmico de Reflexão em dados de Radar (GPR) para Detecção de Hidrocarbonetos em Sedimentos Arenosos**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal da Bahia. Salvador. 2004.
- EDMINISTER, J. A. **Eletrromagnetismo**. 2º Edição. Porto Alegre - RS.: Bookman. 2006.
- D'ERRICO, J. **Surface Fitting using gridfit**. Disponível em: <<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/8998-surface-fitting-using-gridfit>>. Acesso em 10 de outubro. 2015.
- FARIA, S. H. **O uso do georadar na determinação de parâmetros da estrutura de pavimentos flexíveis**. Dissertação de mestrado. UFV - Universidade Federal de Viçosa. Viçosa - MG. 2010.125p.
- FERREIRA, I. O. **Coleta, processamento e análise de dados batimétricos visando a representação computacional do relevo submerso utilizando interpoladores determinísticos e probabilísticos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG. 2013.
- FISCHER, E.; MCMECHAN, G. A.; e ANNAN, A. P. **Acquisition and processing of wide-aperture ground penetrating radar data**. *Geophysics*, v.57, n.4, 1992. p.495-504.

- FONSECA, L. M. **Processamento digital de imagens**. Notas de aulas da disciplina Processamento Digital de Imagens nos programas de pós-graduação dos cursos de Sensoriamento Remoto e Computação Aplicada. INPE. 2000.
- FRAZÃO, R. H. **O emprego do GPR na caracterização da superfície e depósitos de fundo da represa guarapiranga, São Paulo / SP**. Dissertação de Mestrado. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, Departamento de Geofísica. São Paulo. 2006.
- FREITAS, J. C. **Modelagem eletromagnética de meios heterogêneos com base na teoria do raio: implicações para o método do RADAR de investigação do subsolo (GPR)**. Tese de doutorado. Universidade Federal da Bahia. Salvador - BA. 2004.
- GONÇALVES, F. P. e CERATTI, J. A. **Utilização do Ground Penetrating Radar na Avaliação de Pavimentos**. 31ª Reunião Anual de Pavimentação, São Paulo - SP. 1998
- GONZALEZ, R. C. e WOODS, R. E. **Processamento Digital de Imagens**. São Paulo - SP.: 3ª Edição. Pearson. 2009.
- HAENI, F. P.; BUURSINK, M. L.; COSTA, J. E.; MELCHER, N. B.; CHENG, R. T. e PLANT, W. J. **Ground-Penetrating RADAR Methods Used in Surface-Water Discharge Measurements**. Proceedings of the Eighth International Conference on Ground Penetrating Radar: University of Queensland, Queensland, Australia, p.494-500. Acesso em 13 de novembro de 2013, disponível em <http://water.usgs.gov/ogw/bgas/publications/gpr_surfwater/gpr_surfwater.pdf>. 2000.
- HARDAGE, B. **Instantaneous Seismic Attributes Calculated by the Hilbert Transform**. AAPG Datapages - Search and Discovery. 2010.
- HOEKSTRA, P. e DELANEY, A. **Dielectric Properties of Soils at UHF and Microwave Frequencies**. Journal of Geophysical Research, V.79, No. 11: 1699-1708. 1974.
- JOL, H. M. **Ground Penetrating Radar: Theory and Applications**. Elsevier. 2009.
- JOL, H. M. e SMITH, D. **Ground Penetrating Radar Surveys of Peatlands for Oilfied Pipelines in Canada**. Journal of Applied Geophysics, 34: 109-123. 1995.
- 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. ISSN 0974-5904. 2012. p. 30 -34.
- KIRSCH, R. **Groundwater Geophysics: A Tool for Hydrogeology**. Edited: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2006.

- KNIGHT, R. **Ground Penetrating Radar for Environmental Applications**. Annual Reviews. Earth Planet. Sci. 2001. 29:229–55. 2001.
- LOPES, O. A. **Uso do GPR (Ground Penetrating Radar) em trechos de pavimentos da cidade universitária da UFRJ**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro - RJ. 2009.
- MANCILLA, L. O. e TREVIÑO, G. E. **Synthetic Radargrams from Electrical Conductivity**. Journal of Applied Geophysics, Vol. 34: 283–290. 1996.
- MATHER, P. M. **Computer processing remotely-sensed images: an introduction**. University of Nottingham. (3ª ed.). Nottingham, England. 2004.
- MATHWORKS. **Documentation**. Disponível em: <<http://www.mathworks.com/help/>>. Acesso em 12 de outubro de 2015. 2015.
- MELO, M. S. **Geofísica aplicada à arqueologia: Investigação no centro histórico Engenho Murututu, em Belém, Pará**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa De Pós-Graduação em Geofísica 2007.
- MITCHELL, J. K. **Fundamentals of soil Behaviour**. 2nd ed. Wiley, New York. 1993. p. 437.
- MOUTINHO, L., PORSANI, J. L., e PORSANI, M. J. **Deconvolução preditiva de dados GPR adquiridos sobre lâmina d'água: exemplo do Rio Taquari, Pantanal Matogrossense**. Revista Brasileira de Geofísica, 23. 2005.
- PARIZZI, M. G., ARANHA, P. R., COSTA, R. D., FILHO, J. A., TUPINAMBÁS, M. M., e 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, 19.(2.), pp. 152-162. 2011.
- PEREIRA, J. P., e BARACUHY, J. V. **Ecobatimetria**. Campina Grande - PB.: Gráfica Agenda. 84p. il. 2008.
- PESTANA, R. C., e BOTELHO, M. A. **Migração de dados de radar (GPR) com correção topográfica simultânea**. Rev. Bras. Geof. vol.15 no.1 São Paulo. 1997.
- POPINI, M. V. **Processamento de Dados de GPR Utilizando o Método da Sísmica de Reflexão**. Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA. 2001.
- POTIER, G. C., GAZZANA, D. S., DIAS, G. A., SILVA, L. C., e TELLÓ, M. **Física dos Raios & Engenharia de Proteção**. 2º Edição. Porto Alegre - RS: Editora EdiPUCRS. 2010.
- RAUSCH, D. L., e HEINEMANN, H. G. **Reservoir Sedimentation Survey Methods**. Research Bulletin 939. University of Missouri. College of Agriculture. Agricultural Experiment Station. Columbia, Missouri. 1968.

- SAARENKETO, T. **Using ground penetrating radar and dielectric probe measurements in pavement density quality control.** Paper submitted for presentation and publication at the Annual Meeting of the Transportation Research Board Washington, D.C. 1997.
- SAARENKETO, T. **Electral properties of water in clay and silty soil.** Journal of Applied Geophysics 40. pp 73 - 78. Finnish National Road Administration, Road District of Lapland, FIN-96101 Rovaniemi, Finland. 1998.
- SAARENKETO, T. **Measuring electromagnetic properties of asphalt for pavement quality control and defect mapping.** Disponível em: <[http://vgwww.vegagerdin.is/nvf33.nsf/7c5e95b3edddb9e980256f620045f483/6423655ed26a5bd400256de90031ecaf/\\$FILE/Asphalt_electromagnetics_TimoS_030603.pdf](http://vgwww.vegagerdin.is/nvf33.nsf/7c5e95b3edddb9e980256f620045f483/6423655ed26a5bd400256de90031ecaf/$FILE/Asphalt_electromagnetics_TimoS_030603.pdf)>. Acesso em 14 de julho de 2008. 2003.
- SAARENKETO, T. **Electrical properties of road materials and subgrade soils and the use of ground penetrating radar in traffic infrastructure surveys.** PhD thesis. Faculty of Science, Department of *Geoscience*, University of Oulu, P.O. Box 3000, FI-90014. (P. O. Vuolteenaho, Ed.) Oulu, Finland: Oulu University Press. 2006.
- SANDWELL, D. T. **Biharmonic Spline interpolation of GEOS-3 and SEASAT altimeter data.** Geophysical Research Letters, Vol. 14, n° 2, Pages 139-142. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=A1290C71F201B9D96728B101DB0D9BE7?doi=10.1.1.453.6141&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em 23 de outubro de 2015. 1987.
- SINGH, K. K. **Application of Ground Penetrating Radar for hydro-geological study.** Journal of Scientific & Industrial Research. 2006.
- SOUZA, L. A., PORSANI, J. L., SOUZA, O. C., e MOUTINHO, L. **Levantamento experimental GPR no rio Taguari, Bacia do Pantanal matogrossense.** Revista Brasileira de Geofísica, Vol. 20 (1). 2003.
- SPICER, K. R., COSTA, J. E., e PLACZEK, G. **Measuring flood discharge in unstable stream channels using ground-penetrating radar.** Disponível em: <http://vulcan.wr.usgs.gov/Projects/GPRadar/ground_penetrating_radar.html>. Acesso em 16 de janeiro de 2011.
- TELFORD, W. M., GELDART, L. P., e SHERIF, R. E. **Applied Geophysics.** 2ª ed. Cambridge: Cambridge University Press, 770pp. 1990.
- TRANSPORTES, M. D. **Projeto de Lei nº 1.176-H de 1995.** Seção III - Do Subsistema Aquaviário Federal. Anexo IV. Fonte: <<http://www.transportes.gov.br/conteudo/770>>. Acesso em 10 de dezembro de 2013. 1995.
- WALTHER, E. G., PITCHFORD, A. M., e OLHOEFT, G. R. **A strategy for detecting subsurface organic contaminants.** Natl. Water Well Assoc./API Conf. Petrol. Hydrocarb.Org. Chem. Ground Water Prev., Detect. Restor., Houston, Nov.12-14, pp. 357-81. Dublin, OH: Natl.Water Well Assoc. 1986.

ZHU, Z., HE, X., LU, G., LIU, Q., e LI, J. **Ground Penetrating Radar Exploration for Ground Water and Contamination.** PIERS Proceedings, Moscow, Russia, 18 - 21 de August. pp. 1316 - 1320. 2009.

APÊNDICE

Nesta seção apresenta-se um tutorial de uso do *GPR Bathymetry* para alcançar os objetivos propostos para as metodologias organizadas nos artigos 1, 2 e 3.

a) Configurações

Para utilizar o classificador *fclass3* e converter a ordenada do radargrama de tempo para profundidade foi criada uma interface para configuração que pode ser acessada em menu *ferramentas>configurações* (Figura a.1).

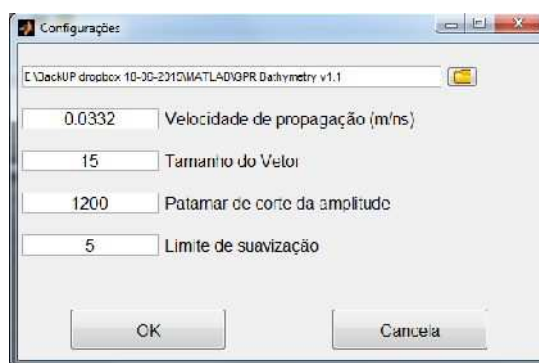


Figura a.1. Menu configurações

Pode-se observar que a janela de configurações apresenta o diretório onde está salvo o arquivo contendo os dados de configuração, a velocidade média de propagação no meio, o tamanho do vetor que irá percorrer os traços, o patamar de corte para o qual o algoritmo entende que abaixo desse valor se encontra a região de suavização e acima uma nova reflexão e o limite de suavização para a etapa de eliminação das elevações e depressões espúrias.

b) Visualização de Radargramas

A barra de ferramentas e menus da janela principal do *GPR Bathymetry* é apresentada na Figura (a.2).

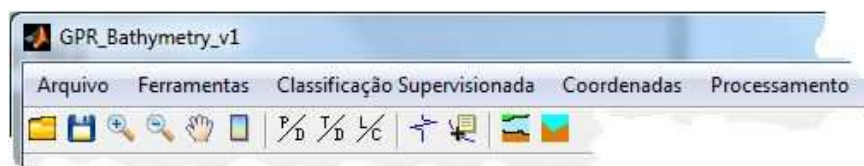




Figura a.2. Barra de ferramentas e menus da janela principal.

A visualização do radargrama na extensão “rd3”, utilizado pela MALA Geoscience, pode ser feita por meio da barra de *menu arquivo* > *abrir* ou através da barra de ferramentas .

A imagem é exibida inicialmente em linhas e colunas. Porém o usuário pode alterar a exibição das abcissas e ordenadas através da barra de ferramenta.

Onde:


 Altera eixo Y para profundidade (m) e eixo X para distância (m);


 Altera eixo Y para tempo (ns) e eixo X para distância (m);

 Altera eixo Y para linhas (*pixels*) e eixo X para colunas (*pixels*).


Para apresentar o eixo Y como profundidade é necessário informar o valor da velocidade de propagação da onda EM, que pode ser acessado através do *menu ferramentas>configurações*.


Outras funcionalidades aplicadas na visualização dos radargramas são apresentadas a seguir:

 Salva a imagem exibida nos formatos rd3, tiff (8 bits), tiff (16 bits), tiff (32 bits), xlsx e txt;

 Aplica zoom mais e zoom menos, respectivamente;

 Pan;

 Mostra / oculta / altera a paleta de cores do radargrama;

 Mostra informações sobre o *pixel* selecionado e as apresenta de 2 formas possíveis (Figura a.3).

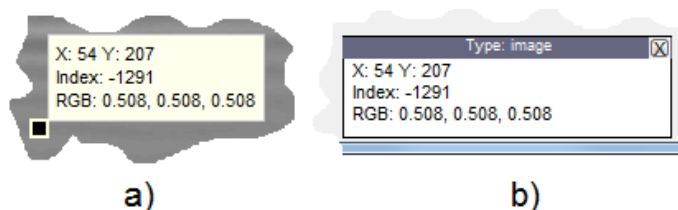



Figura a.3. Ferramenta de informação do pixel do Matlab. a) Data tip. b) Window.

A Figura (a.4) mostra o radargrama bruto do perfil 1 exibido no *GPR Bathymetry*. A ferramenta  mostra e oculta o traço corrente definido pelo movimento do *mouse*. Neste exemplo o traço exibido corresponde ao de número 129.

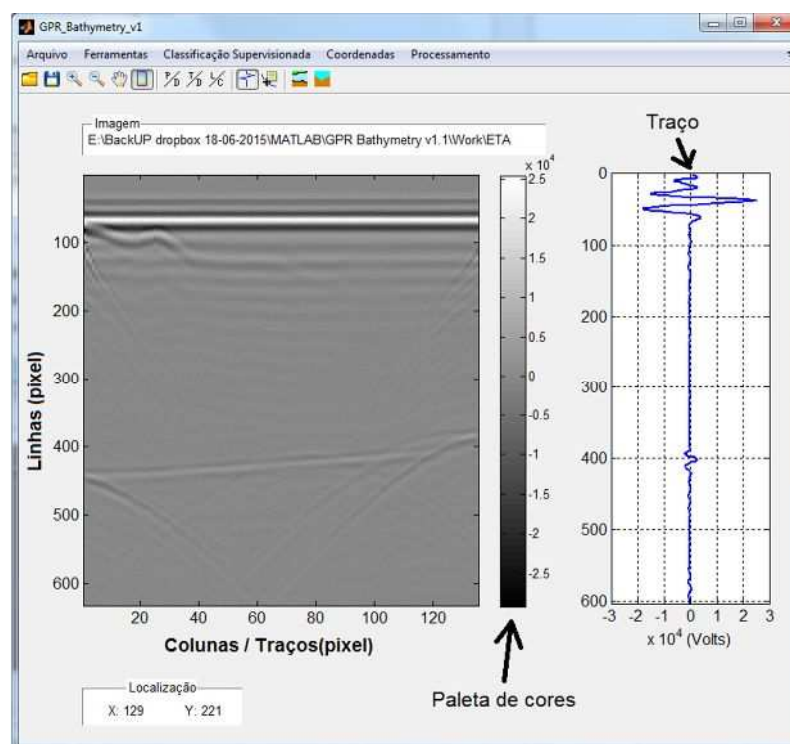


Figura a.4. Radargrama da seção1 exibido na janela principal do *GPR Bathymetry*.

c) Ferramenta de Edição

Para a identificação manual da posição da reflexão do pulso, foi utilizada uma ferramenta de edição disponível no *GPR Bathymetry*. Esta ferramenta possui funcionalidades que tornam possível uma classificação manual. Pode ser acessada pela ferramenta assinalada na Figura (a.5).

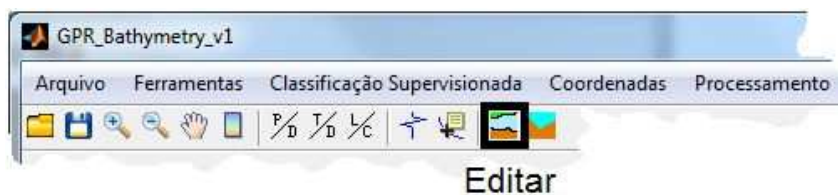


Figura a.5. Acesso à ferramenta de edição.

A Figura (a.6) apresenta o menu de ferramentas e a barra de ferramentas disponível na interface gráfica de edição.

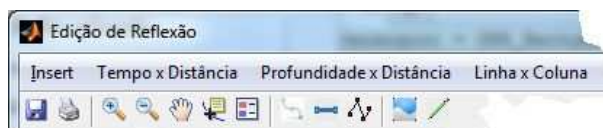


Figura a.6. Ferramenta de edição.

A barra de ferramentas assinalada na Figura (a.7) altera a escala dos eixos.

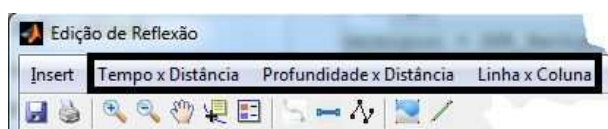



Figura a.7. Escala dos eixos x e y.

A ferramenta “*Insert*”, disponível no menu de ferramentas é nativo do Matlab[®] e foi disponibilizado pela sua facilidade de uso e utilidade (Figura a.8).



Figura a.8. Menu *Insert*.

Uma descrição sucinta do menu *Insert* é dada a seguir:

- *X Label*: Insere rótulo no eixo X;
- *Y Label*: Insere rótulo no eixo Y;
- *Title*: Insere título;
- *Legend*: Insere legenda, ;
- *Colorbar*: Insere paleta de cores;
- *Line*: Insere linha;
- *Arrow*: Insere linha com seta em uma extremidade;
- *Text Arrow*: Insere texto juntamente com um *Arrow*;
- *Double Arrow*: Insere linha com seta nas duas extremidades;
- *TextBox*: Insere caixa de texto;
- *Rectangle*: Insere uma figura do tipo retângulo;
- *Ellipse*: Insere figura do tipo elipse.



Insere *Spline*.



Insere *offset*. Pode ser arrastada pela ação do *mouse*.



Insere Polilinha.



Realiza o preenchimento entre os objetos, *Spline*, *Offset* e Polilinha.



Habilita edição dos objetos, *Spline*, *Offset* e Polilinha.

Ao clicar sobre um objeto com o botão direito do *mouse*, uma vez habilitada a ferramenta de edição, aparecerá a janela mostrada na Figura (a.9), onde é possível alterar os parâmetros de tipo, cor e espessura da linha, assim como, apagar e exportar as profundidades para um arquivo de texto na extensão (*.zzz) (Figura a.10).

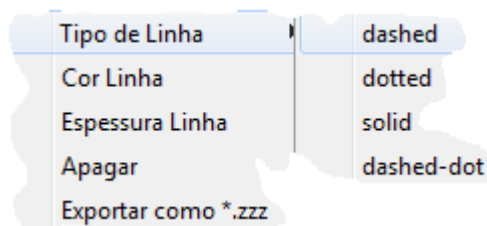


Figura a.9. Opções de edição dos objetos.

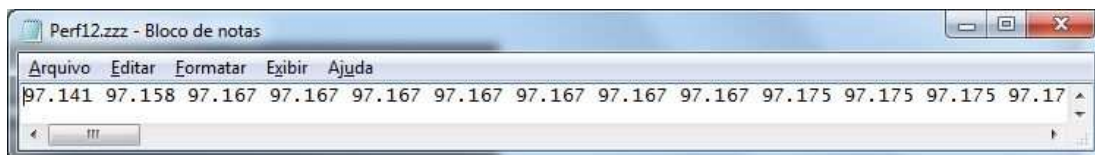


Figura a.10. Arquivo formato *.zzz.

O radargrama editado, oriundo do levantamento realizado na seção 1 da ETA, está apresentado na Figura (a.11), onde se pode observar alguns tipos de reflexões que ocorreram na superfície, nas paredes e no fundo.

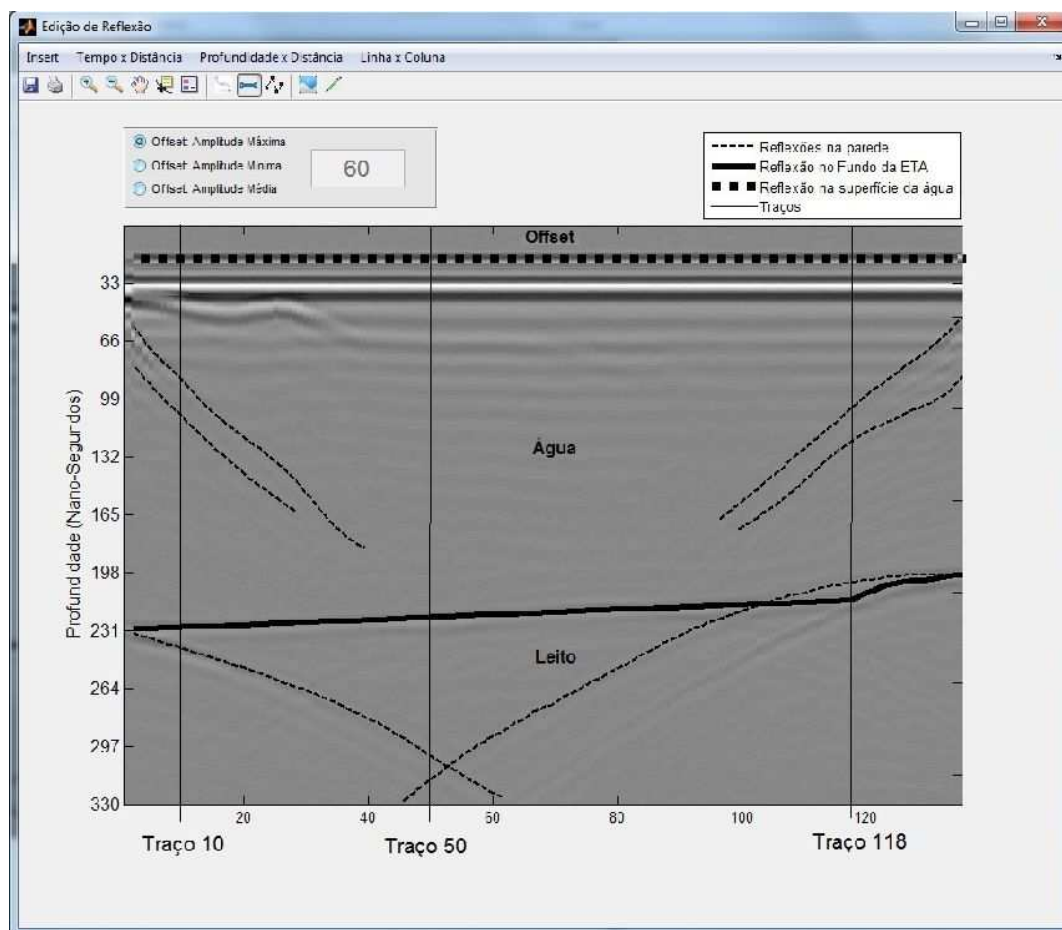


Figura a.11. Ferramenta de edição do GPR *Bathymetry*.

d) Uso do Classificador *fclass2*

Para a utilização do *fclass2* é necessário ter um radargrama ativo na janela principal do GPR *Bathymetry*. Uma vez clicando no menu indicado na Figura (a.12) a classificação é iniciada. Em seguida aparecerá uma caixa de diálogo (Figura a.13) onde o usuário deverá informar a cota/altitude do Nível d'água e o grau no polinômio suavizador.

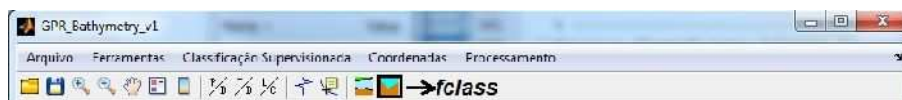


Figura a.12. Aspecto da seção após classificação pelo *fclass2*.

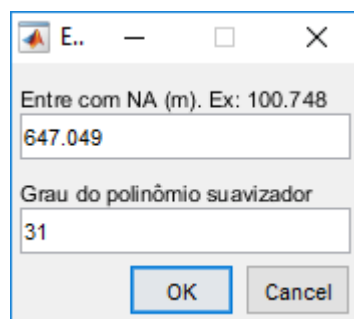


Figura a.13. Dados de entrada do *fclass2*.

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

e) Uso do classificador *fclass3*

Para a utilização do classificador *fclass3* basta acessar o menu *Classificação supervisionada > fclass3*. Em seguida será aberta uma caixa de diálogo solicitando ao usuário que informe o Nível d'água (NA) para que seja possível o cálculo das cotas correspondente às reflexões no fundo. A Figura (a.14) mostra o resultado obtido para o Perfil 12 da ETA. Esta interface possui diversas funcionalidades intuitivas para gravação, impressão, e manipulação dos dados.

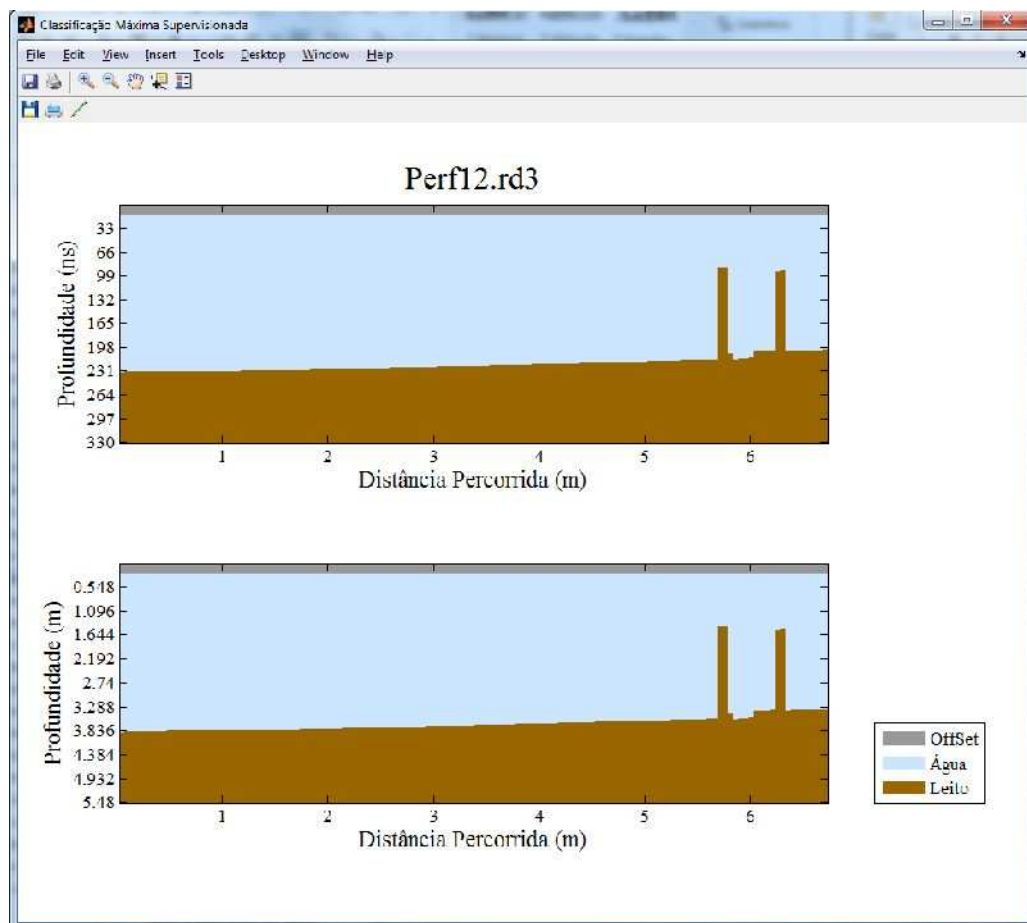


Figura a.14. Perfil 12 classificado com *fclass3* sem o filtro de remoção das depressões e elevações espúrias.

Um arquivo de extensão *.zzz, contendo as cotas para cada traço, é salvo em um diretório criado automaticamente dentro do diretório que é instalado o *GPR Bathymetry*.

f) Uso do classificador *fclass3* suavizado

A classificação *fclass3* com o emprego do filtro para remoção das depressões e elevações espúrias pode ser acessada no menu *Classificação supervisionada > fclass3 suavizado*. A Figura (a.15) apresenta o perfil 12 após a aplicação do filtro.

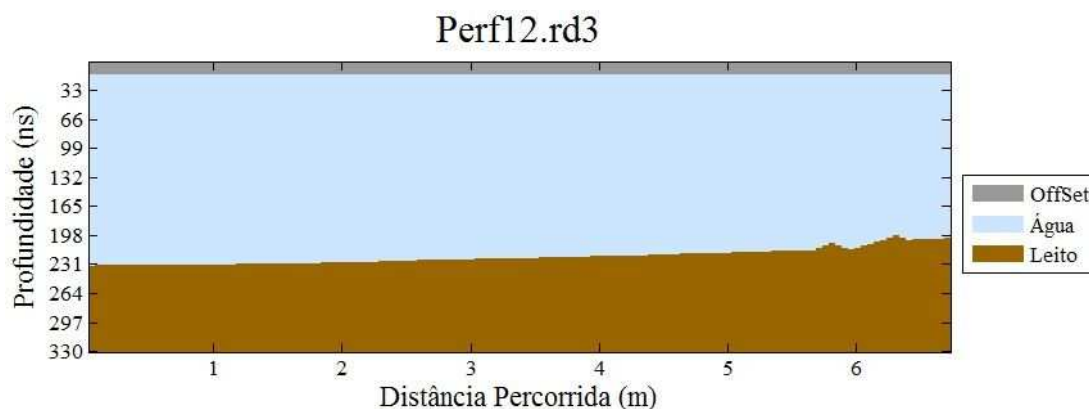


Figura a.16. Perfil 12 após aplicação do filtro para remoção de elevações e depressões espúrias.

g) Espacialização de Radargrama – SUPERFÍCIE

Esta interface foi desenvolvida para atribuir coordenadas X, Y e Z, para cada traço do radargrama, correspondente à superfície. Ela calcula o comprimento de cada radargrama, o seu número de traços e realiza uma interpolação, que pode ser linear ou cúbica, de modo que os traços estejam igualmente espaçados entre si. A Figura (a.17) mostra como acessar essa ferramenta.

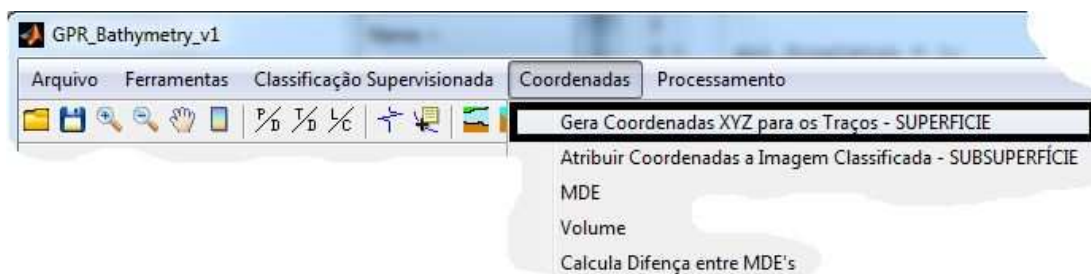


Figura a.17. Acesso à ferramenta de espacialização dos radargramas, atribuindo coordenadas aos traços, referentes à superfície (Nível d'água).

A Figura (a.18) apresenta a interface gráfica desenvolvida para a realização da tarefa descrita no parágrafo anterior.

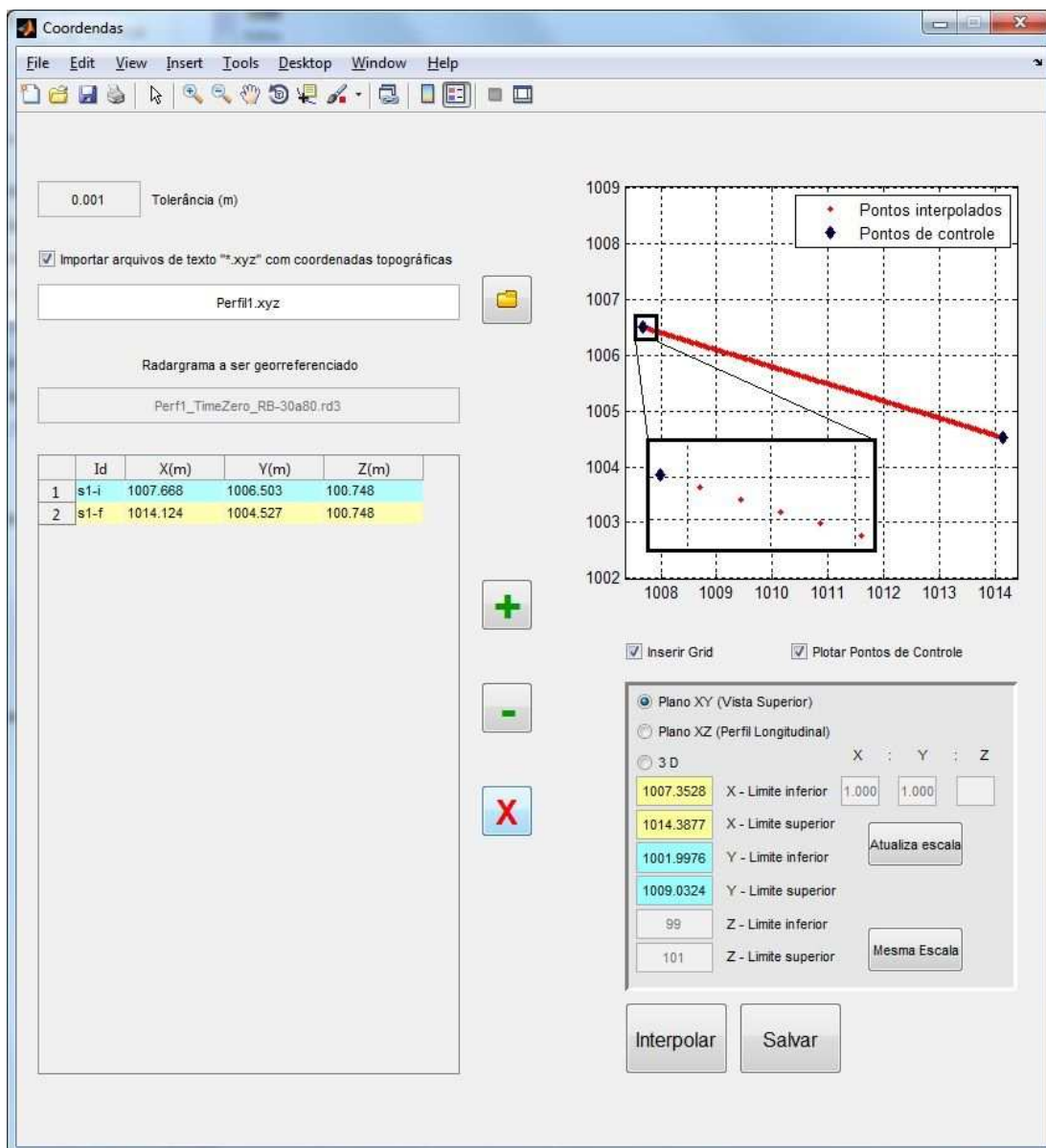


Figura a.18. Espacialização de todos os traços do radargrama.

Os pontos de controle podem ser inseridos manualmente em uma tabela de entrada ou por meio de um arquivo no formato de texto com extensão *.xyz (Figura a.19).

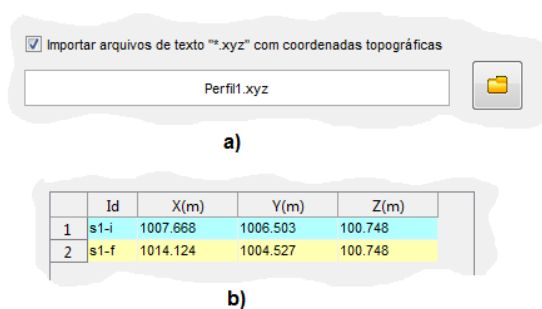


Figura a.19. a) Importa pontos de controle. b) Entra manualmente com pontos de controle.

A Figura (a.20) apresenta as ferramentas de interação com a tabela de entrada.

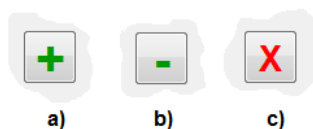


Figura a.20. a) Adiciona uma linha no final da tabela. b) exclui a última linha da tabela. c) Exclui a(s) linha(s) selecionada(s).

Para o processo, utilizando interpolação por *Spline*, é necessário que o usuário informe a precisão desejada para os intervalos de distância entre os traços. Isso porque é usado um processo de iteração, onde a rotina calcula uma primeira distância e a partir dessa distância vai realizando incrementos ou decrementos até atingir a precisão informada pelo usuário e apresentada na Figura (a.21).



Figura a.2133. Precisão dos intervalos de distâncias entre os traços.

Para realizar a interpolação o usuário deve clicar no *pushbutton* “Interpolar”. Em seguida é apresentada uma janela de diálogo (Figura a.22) contendo informações preliminares sobre dados de distância, sendo elas: as distâncias originais do radargrama, as obtidas pelo método linear e pela interpolação por *Spline*, para que o usuário possa decidir qual é a melhor opção.

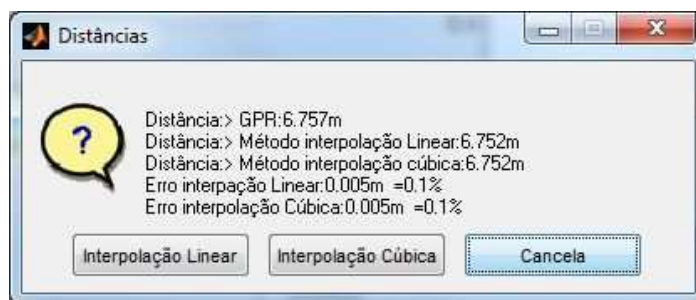


Figura a.22. Janela de diálogo com informações preliminares sobre o processo de interpolação.

O aspecto dos pontos de controle e dos pontos interpolados podem ser visualizados no gráfico da Figura (a.23).

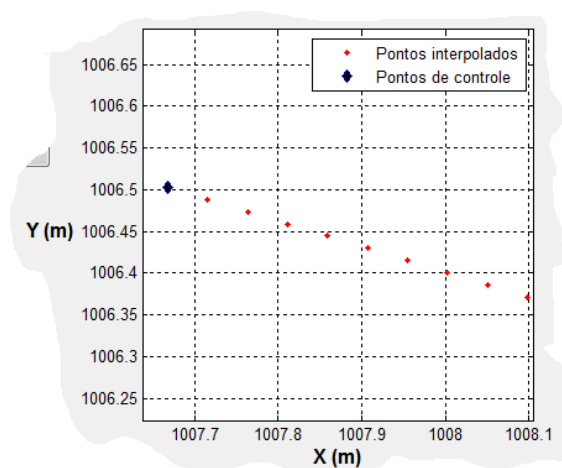


Figura a.23. Gráfico para exibição dos resultados.

A Figura (a.24) apresenta um conjunto de ferramentas de interação com o gráfico da Figura (a.23). Nela é possível intercambiar o plano de exibição dos dados entre XY, XZ e 3D (*Radio Buttons*). O usuário pode inserir manualmente os limites para os eixos X, Y e Z através da caixa de texto (*Text Edit*). Caso a escala entre os eixos estejam diferentes ela pode ser ajustada para a mesma escala por meio do botão “mesma escala”. A relação de escala entre os eixos pode ser visualizada na Figura (a.25). Recomenda-se clicar no botão “atualizar escala” antes.

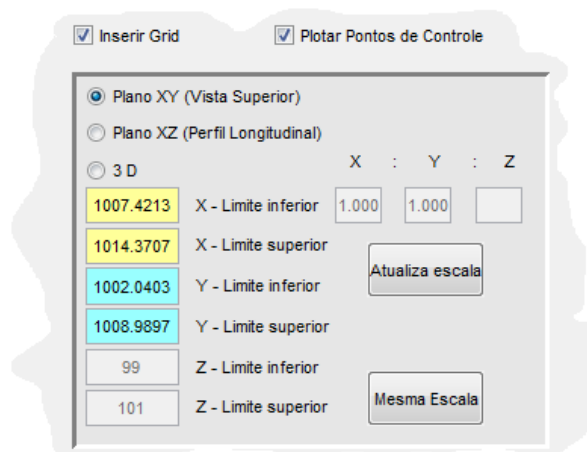
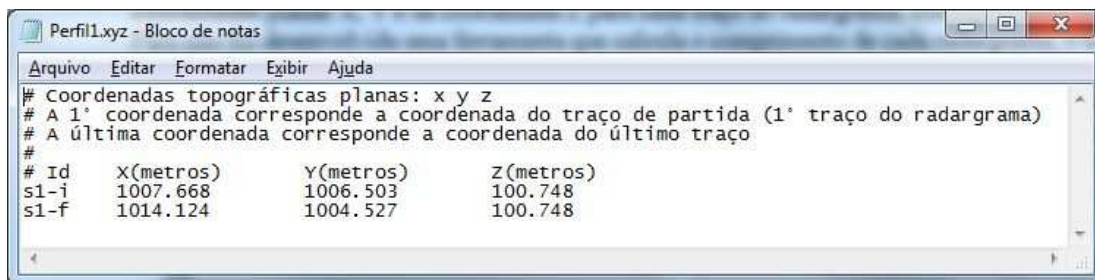


Figura a.24. Ferramenta de interação com o gráfico.



Figura a.25. Relação entre escalas.

As coordenadas interpoladas da superfície também podem ser salvas no formato *.xyz (Figura a.26).



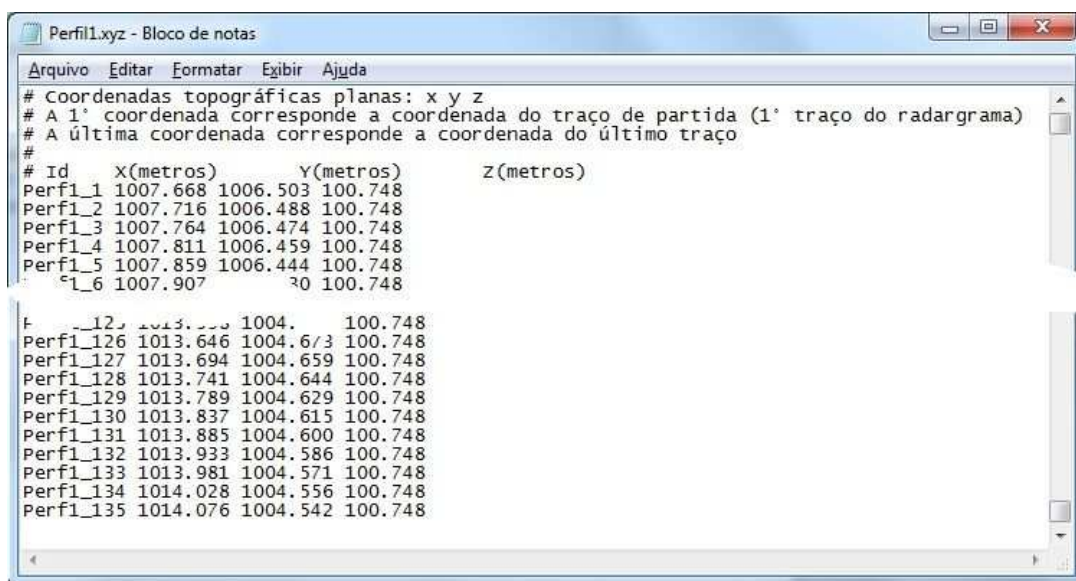
```

Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda
# Coordenadas topográficas planas: x y z
# A 1ª coordenada corresponde a coordenada do traço de partida (1º traço do radargrama)
# A última coordenada corresponde a coordenada do último traço
#
# Id      X(metros)      Y(metros)      Z(metros)
s1-i     1007.668       1006.503       100.748
s1-f     1014.124       1004.527       100.748

```

Figura a.26. Ponto de controle para o perfil 1. Formato do arquivo *.xyz.

As coordenadas interpoladas da superfície também podem ser salvas no mesmo formato *.xyz. Onde “Perfl_” é o Id padrão inserido no momento de salvar o arquivo. Esse Id é acrescido automaticamente pelo número do traço correspondente, isto é, o Id “Perfl_131” corresponde ao traço 131 do perfil 1 (Figura a.27).



```

Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda
# Coordenadas topográficas planas: x y z
# A 1ª coordenada corresponde a coordenada do traço de partida (1º traço do radargrama)
# A última coordenada corresponde a coordenada do último traço
#
# Id      X(metros)      Y(metros)      Z(metros)
Perfl_1  1007.668       1006.503       100.748
Perfl_2  1007.716       1006.488       100.748
Perfl_3  1007.764       1006.474       100.748
Perfl_4  1007.811       1006.459       100.748
Perfl_5  1007.859       1006.444       100.748
Perfl_6  1007.907       1006.430       100.748
Perfl_7  1007.955       1006.415       100.748
Perfl_8  1008.003       1006.400       100.748
Perfl_9  1008.051       1006.385       100.748
Perfl_10 1008.099       1006.370       100.748
Perfl_11 1008.147       1006.355       100.748
Perfl_12 1008.195       1006.340       100.748
Perfl_126 1013.646       1004.673       100.748
Perfl_127 1013.694       1004.659       100.748
Perfl_128 1013.741       1004.644       100.748
Perfl_129 1013.789       1004.629       100.748
Perfl_130 1013.837       1004.615       100.748
Perfl_131 1013.885       1004.600       100.748
Perfl_132 1013.933       1004.586       100.748
Perfl_133 1013.981       1004.571       100.748
Perfl_134 1014.028       1004.556       100.748
Perfl_135 1014.076       1004.542       100.748

```

Figura a.27. Arquivo no formato *.xyz com as coordenadas de superfície do perfil 1.

O arquivo oriundo do levantamento de GRP utilizando o sistema RAMAC é salvo em 2 arquivos que se complementam. No arquivo de extensão *.RAD são gravadas todas as informações de configuração do sistema durante o levantamento, bem como as informações de cabeçalho do radargrama. No arquivo *.rd3, binário, são armazenadas somente as intensidades do nível de cinza.

As coordenadas de superfície dos traços também podem ser acrescentadas no arquivo *.RAD (Figura a.28).

```

15 ANTENNAS:200 MHz unshielded
16 ANTENNA ORIENTATION:NOT VALID FIELD
17 ANTENNA SEPARATION:0.600000
18 COMMENT:
   TIME: 00:31:31.9397
   DATE: 2015-06-18
   FIXED POSITION:0.0000000000
37 WHEEL CALIBRATION:999.0000000000
38 POSITIVE DIRECTION:1
39 COORDENADA INTERPOLADA - X:1007.668 1007.716 1007.764 1007.811 1007.859 1007.907
40 COORDENADA INTERPOLADA - Y:1006.503 1006.488 1006.474 1006.459 1006.444 1006.430
41 COORDENADA INTERPOLADA - Z:100.748 100.748 100.748 100.748 100.748 100.748 100.748

```

Figura a.28. Parte do arquivo no formato *.RAD com as coordenadas de superfície do perfil 1.

h) Espacialização de Radargrama – SUBSUPERFÍCIE

Esta ferramenta foi desenvolvida para obtenção das coordenadas da subsuperfície, isto é, as coordenadas dos traços na posição de reflexão do sinal e pode ser acessada conforme Figura (a.29). É necessário ter as coordenadas topográficas (X, Y, Z) na superfície, de cada traço (arquivos *.xyz) e dos valores de profundidade para cada ponto onde ocorreu a reflexão (arquivos *.zzz).

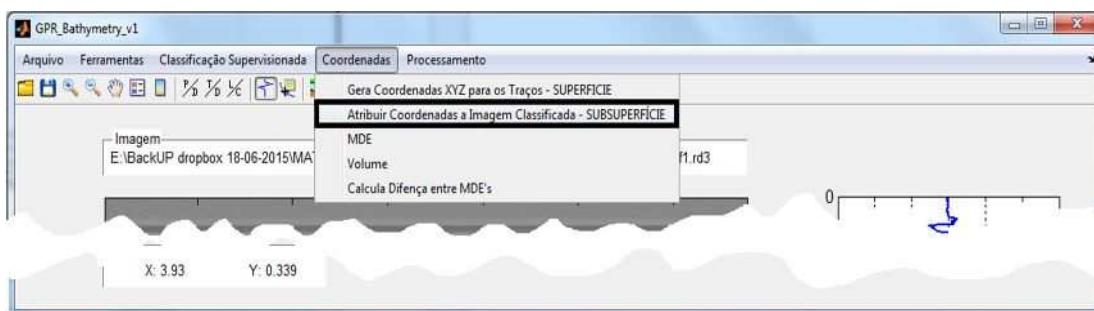


Figura a.29. Menu de acesso a ferramenta que atribui coordenadas à subsuperfície.

A interface desta ferramenta é apresentada na Figura (a.30), onde se vê tabelas com os dados de entrada, os arquivos *.xyz e *.zzz, e os dados de saída, que são as coordenadas tridimensionais de todos os traços refletidos no fundo.

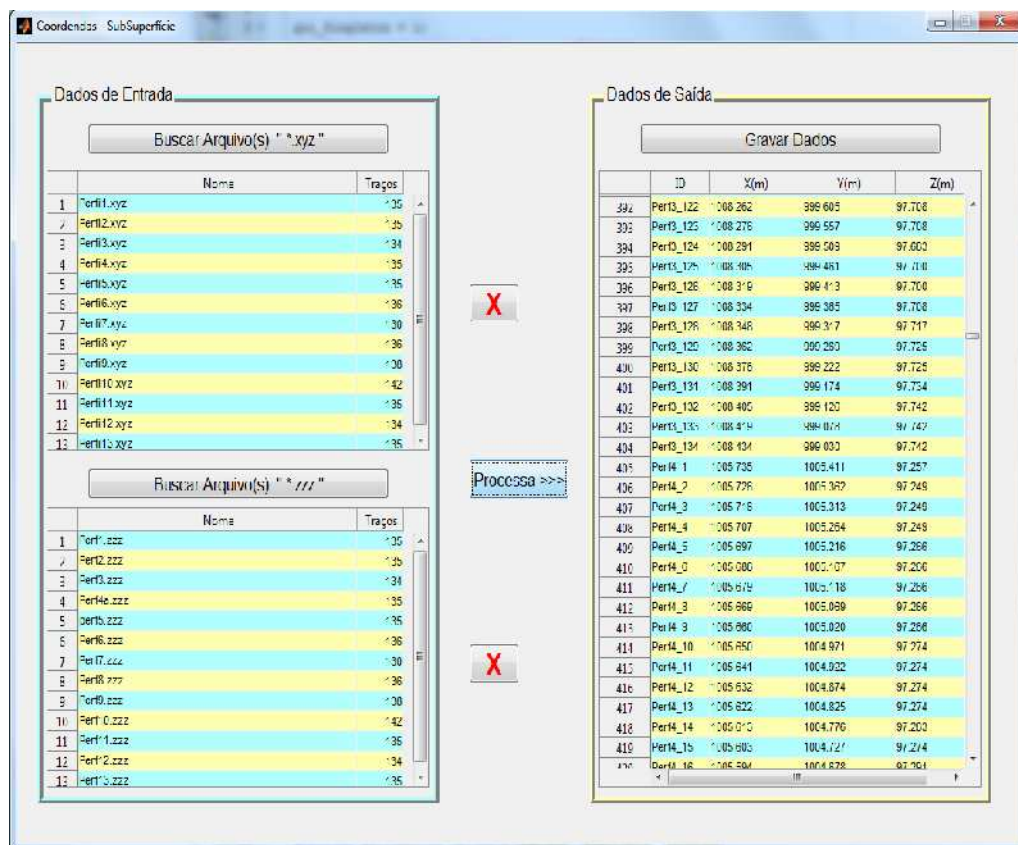


Figura a.30. Coordenadas de todos os traços de todos os perfis do relevo submerso.

As coordenadas x, y e z de saída podem ser gravadas no formato de texto *.xyz do *GPR Bathymetry*, *.txt do ArcGIS (Figura a.31) e *.xlsx do excel.

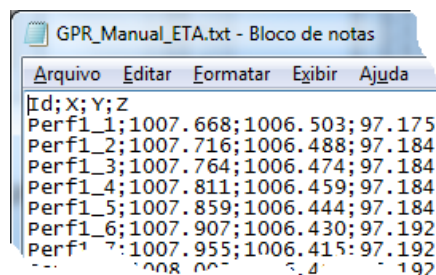


Figura a.31. Formato de texto usado pelo software ArcGIS para coordenadas tridimensionais.

i) Modelo Digital de Elevação - MDE

A ferramenta desenvolvida para a geração de MDE's, teve como base funções disponíveis no *software* Matlab[®]. Foram disponibilizados no *GPR Bathymetry* 3 tipos de funções: 1) *Scattered Interpolant*; 2) *Gridada* e 3) *Gridfit*:

1. *Scattered Interpolant*: retorna uma superfície que passa pelos pontos observados. Esta função usa como método de interpolação a linear, a *nearest*

e a natural. Possui como método de extrapolação o interpolador *nearest* e o linear. Também é possível escolher o espaçamento do *grid* (MATHWORKS, 2015).

2. *Griddata*: a superfície gerada sempre passa pelos pontos observados. Esta função dispõe dos seguintes métodos de interpolação: linear, *nearest*, natural, cubic e v4, este último, é um interpolador do tipo *Spline* bi harmônico (SANDWELL, 1987). Também é possível escolher o espaçamento do *grid*, assim como o sombreamento (*flat*, *faceted* e *interp*) (MATHWORKS, 2015).
3. *Gridfit*: Trata-se de uma função que permite mais interação com o usuário que as anteriores, mas que, até a presente data, não está inclusa no *software* Matlab® (D'ERRICO, 2015):
 - 3.1 *Smoothness*: escalar ou vetor com o grau de suavização da superfície;
 - 3.2 *Interp*: esquema de interpolação usado (triangular, bilinear, *nearest*);
 - 3.3 *Regularizer*: denota o paradigma de regularização (gradiente, laplaciano e *springs*);
 - 3.4 *Solver*: indica o agente de resolução utilizado para o sistema linear resultante (*symmlq*, *lsqr*, normal);
 - 3.5 *Extend*: controla se os primeiros e os últimos nós em cada dimensão serão ajustados para limitar os dados (*warning*, *never*, *always*);
 - 3.6 Espaçamento: espaçamento do *grid*;
 - 3.7 Sombreamento: *flat*, *faceted* e *interp*.

A Figura (a.32) apresenta o aspecto da interface gráfica da ferramenta desenvolvida para a criação de MDE's e também a disposição dos perfis sondados pelo ecobatímetro e GPR, respectivamente. A interface consta com dois dispositivos de busca, sendo o primeiro para a nuvem de pontos da sondagem e o segundo para os pontos que formam o limite. O *Popup menu* disponibiliza as 3 funções descritas acima, disponíveis para os processos de interpolação dos dados e geração do MDE. O *pushbotton* "exportar MDE", permite exportar o MDE gerado no formato "*txt" do ArcGIS, que também é aceito no *GPR Bathymetry*.

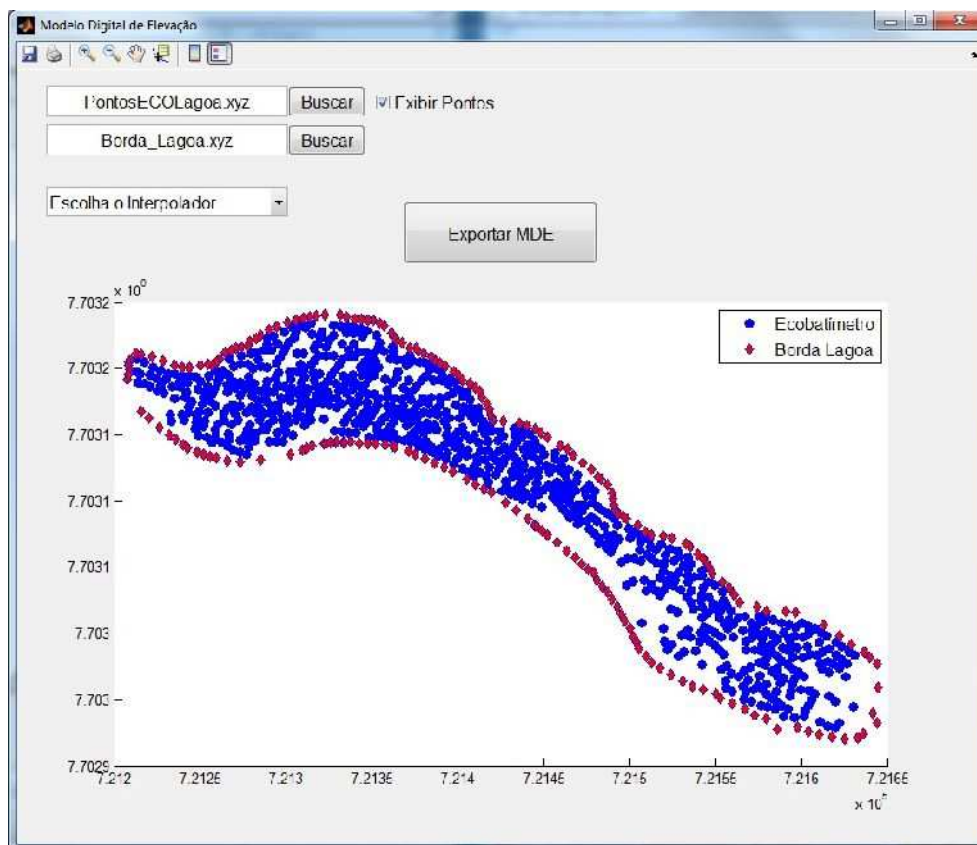


Figura a.32. Disposição dos pontos do ecobatímetro.

Ao escolher uma das funções de interpolação é exibida uma interface onde o usuário deverá escolher sua configuração de interesse. Como exemplo, ao escolher a função *Scattered Interplant*, é exibida uma janela de configurações para esta função como mostra a Figura (a.33). A Figura (a.34) mostra o MDE gerado.

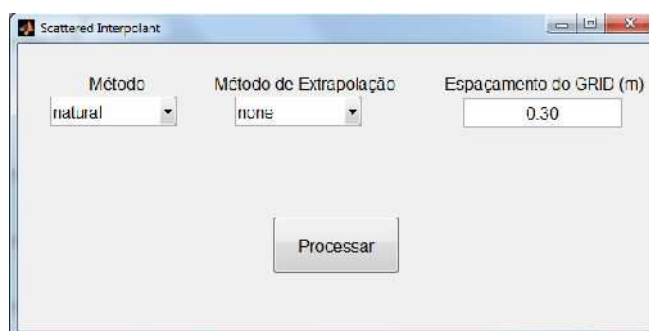


Figura a.33. Janela de interação da função Scattered Interplant com o método de interpolação natural.

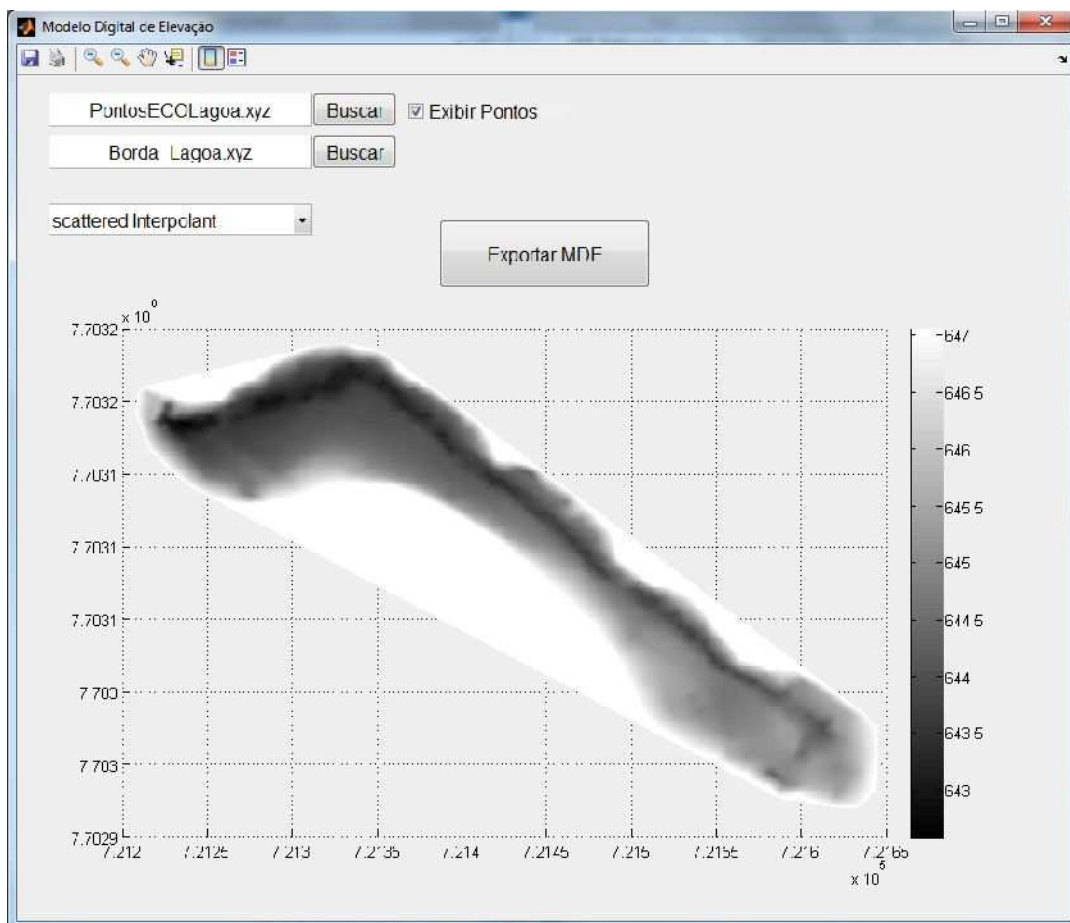


Figura a.34. MDE gerado a partir da função Scattered Interpolant com o interpolador natural (Ecobatímetro).

j) Módulo de Volume

Esta ferramenta computa o volume contido entre o MDE e uma altitude/cota qualquer. O módulo para cálculo de volume que pode ser acessado como mostra a Figura (a.35).

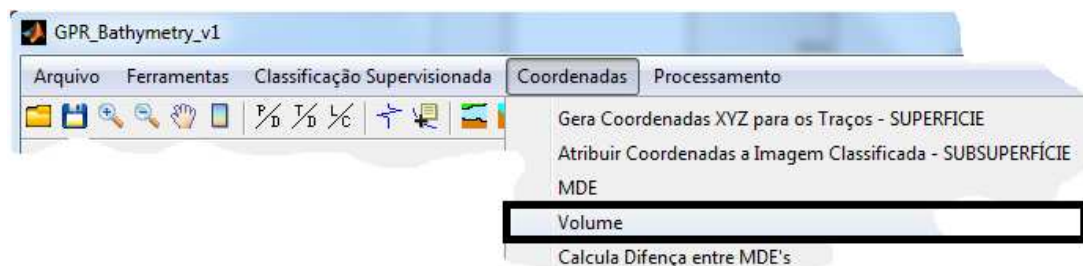


Figura a.35. Acesso ao módulo de cálculo de volume.

É necessário importar o MDE que servirá de base para o cálculo de volume para este módulo através do *menu>Importar MDE* (Figura a.36).

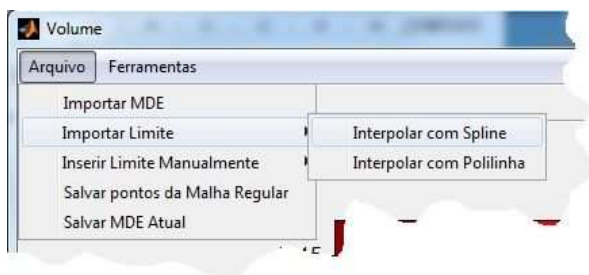


Figura a.36. Menu importar limite e interpolar com *Spline*

Para que seja corretamente calculado o volume e área é necessário inserir o limite da área. Este pode ser inserido de duas formas: manual (mouse) ou por meio de arquivo no formato *.xyz, contendo as coordenadas que fazem parte do limite. Para fechar o polígono o usuário pode escolher interpolar com *Spline* ou polilinha (Figura a.36).

Para efetuar o recorte da parte interna basta acessar o menu *ferramentas > recortar > retirar parte interna* e clicar sobre o limite interno. Para efetuar o recorte de uma região externa acesse menu *ferramentas > recortar > retirar parte externa* e clicar sobre o limite externo. Os valores destas regiões passarão a ser “NaN” (*Not a Number*) e não serão levados em consideração nos cálculos. Para exibir as regiões NaN com uma outra cor qualquer o usuário pode usar a ferramenta *colorbar*. A Figura (a.37) mostra o MDE dos dados de referência editado. Ao clicar no *pushbotton* “Processar” o volume e a área são calculados.

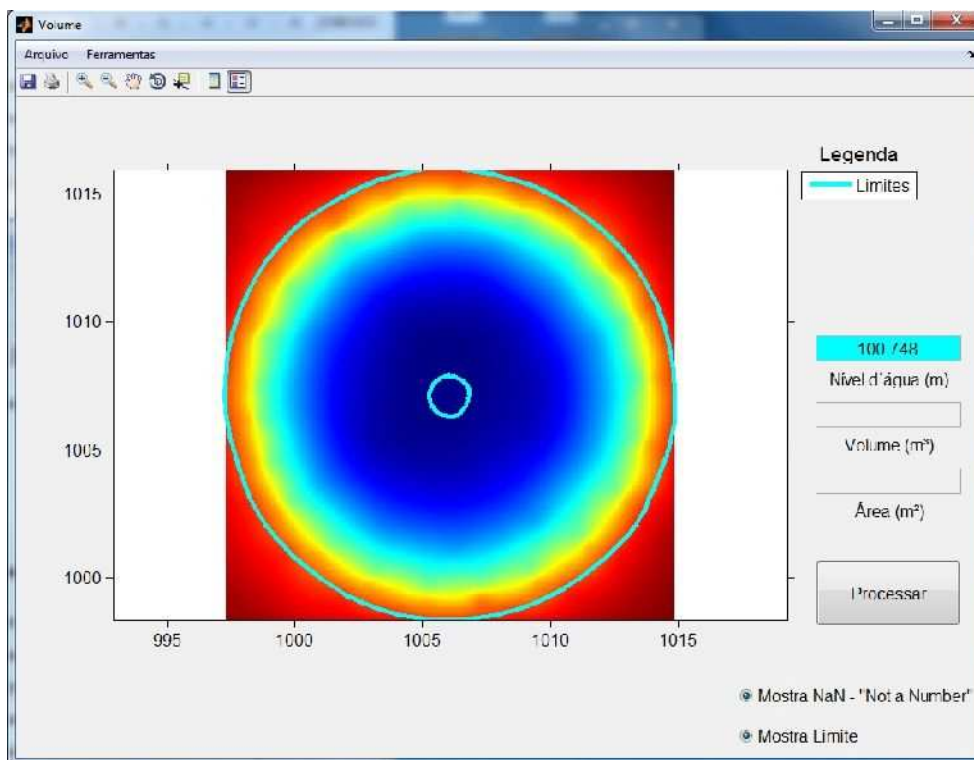


Figura a.37. Aspecto da interface do módulo de volume com os limites interno e externo da ETA. O MDE exibido corresponde ao dos dados de referência (Estação Total).

k) Comparação entre MDEs

Para computar a diferença entre dois MDEs, sugeri-se utilizar os MDEs gerados pelo módulo de volume, pois já estão com os limites aplicados. Esta ferramenta pode ser acessada como mostra a Figura (a.38) e sua interface pode ser visualizada na Figura a.39.

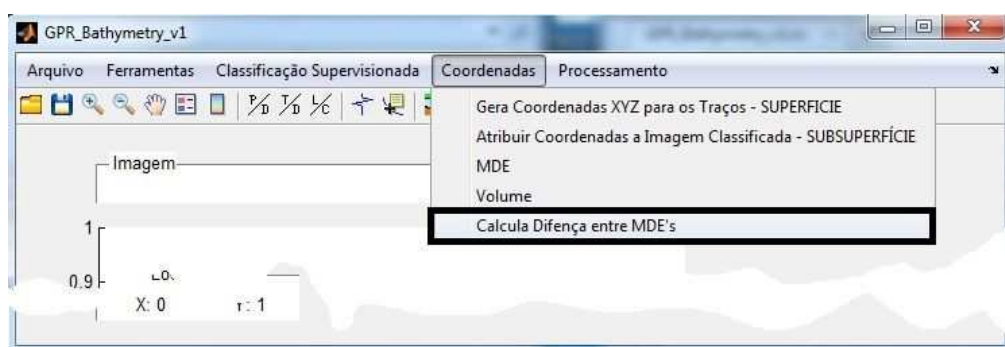


Figura a.38. Menu de acesso ao módulo para cálculo de diferença entre MDEs.

Utilizando a opção menu *arquivo>importar 2 MDEs* o aplicativo já computa automaticamente a diferença entre os MDEs importados. A diferença entre os MDEs *pixel a pixels* pode ser salva em formato de texto do ArcGis.

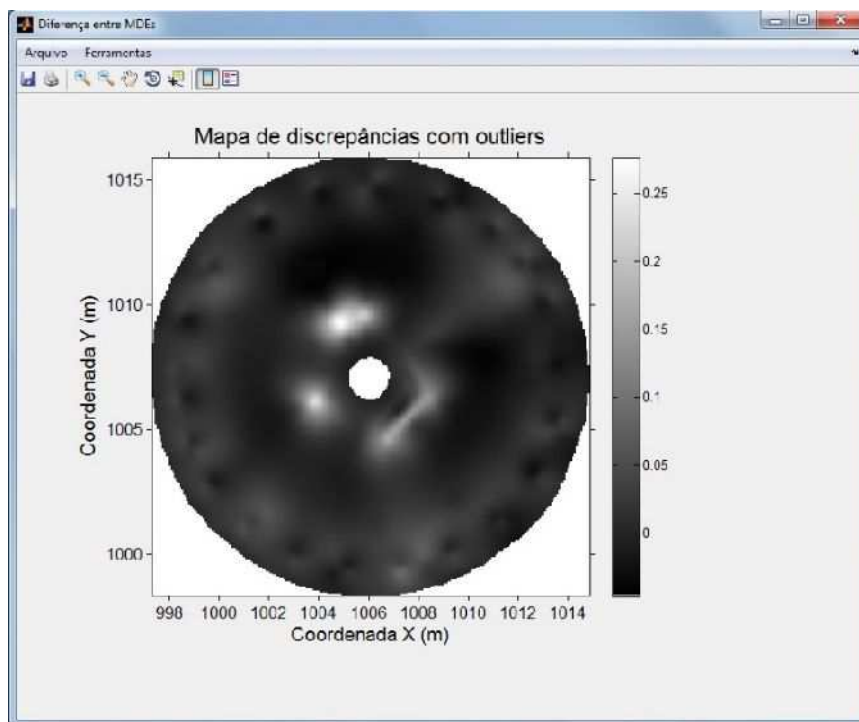


Figura a.39. Mapa de discrepância entre dois MDEs.

Para a obtenção das variáveis randômicas sobre o MDE de discrepâncias foi desenvolvida uma ferramenta que cria uma malha regular com um espaçamento qualquer nas direções X e Y. Ela pode ser acessada pelo *menu ferramentas > extrair coordenadas a partir da malha regular* (Figura a.40). O usuário define as coordenadas X e Y iniciais e o espaçamento desejado para as direções X e Y. O resultado pode ser visto na Figura (a.41).

Malha Regular

Cria uma malha regular sobre o MDE e extrai as coordenadas dos vértices. Para fins estatísticos.

1016.002
Y (max)

997.2758 X (min) 1014.8578 X (máx)

990.3497
Y (min)

997.5 X (inicial) 1 X (Espaçamento)

998.5 Y (inicial) 1 Y (Espaçamento)

Gerar Malha

Figura a.40. Gera malha regular.

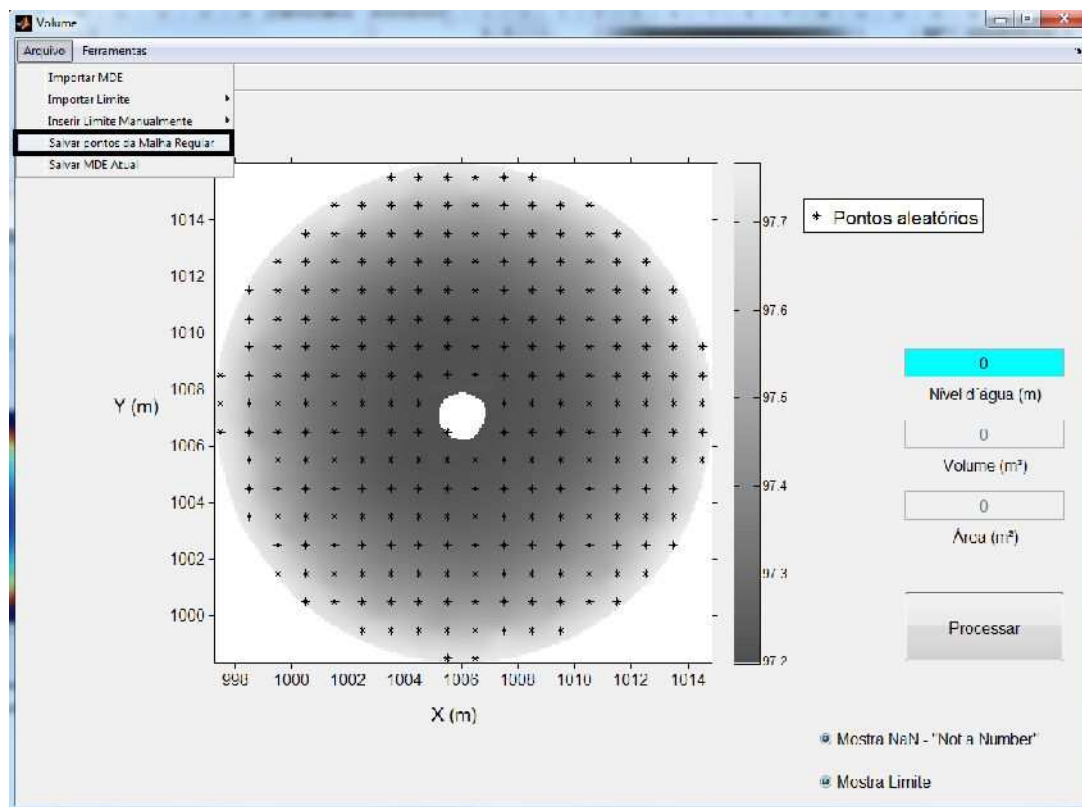


Figura a.41. Malha regular de 1m em 1m sobre o MDE de referência.

O arquivo gerado pela malha regular pode ser salvo no formato *.xlsx, conforme pode ser visualizado na Figura (a.42) onde é mostrado o aspecto dos dados gravados, a coluna A representa a coordenada X(m), coluna B a coordenada Y(m) e a coluna C a coordenada Z(m).

	A	B	C
1	997,500	1006,500	97,742
2	997,500	1007,500	97,729
3	997,500	1008,500	97,742
4	998,500	1003,500	97,714
5	998,500	1004,500	97,675
6	998,500	1005,500	97,638
7	998,500	1006,500	97,591
8	998,500	1007,500	97,571
9	998,500	1008,500	97,597
10		1009,500	97,621

Figura a.42. Arquivo *.xlsx, gerado a partir da malha regular para os dados de referência.

1) *Set Time Zero*

Esta interface que pode ser acessada como mostra a Figura (a.43).

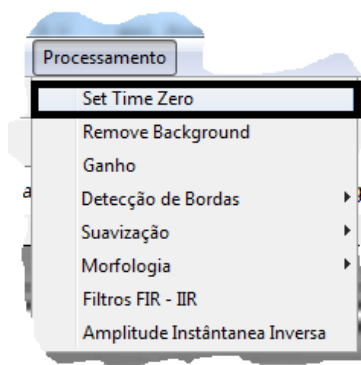


Figura a.43. Acesso a ferramenta *Set Time Zero*.

Para efetuar o *offset* o usuário pode escolher por uma das opções disponíveis no *radio button* ou por meio do *mouse*, arrastando a linha horizontal que aparece no gráfico da Figura (a.44) e a posicionando no local desejado.

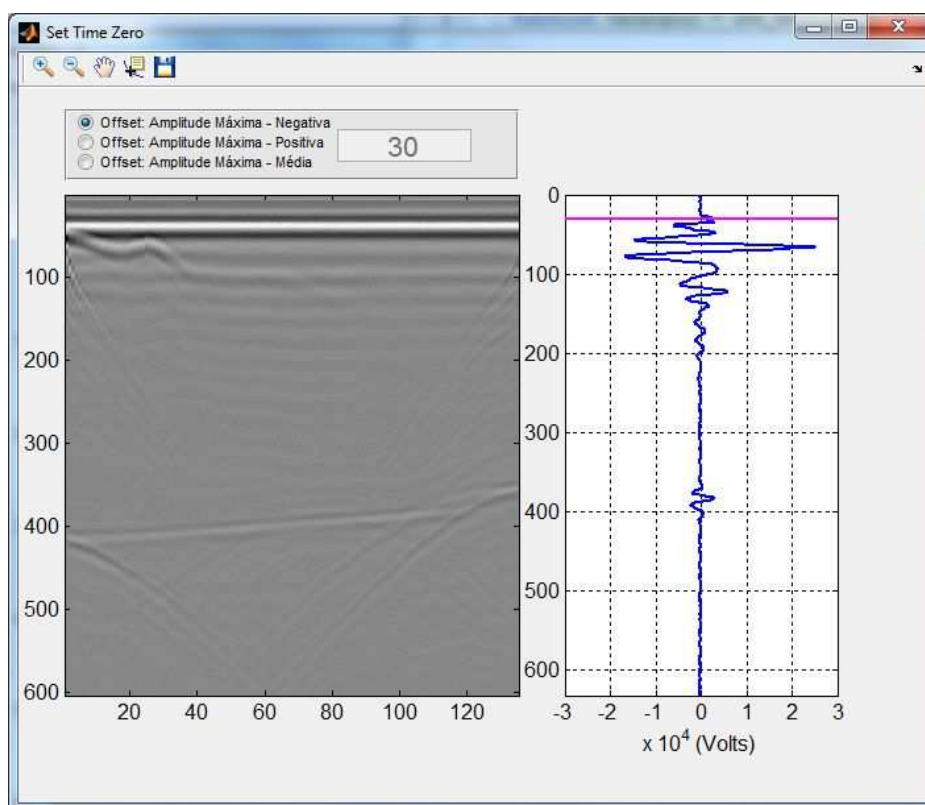


Figura a.44. Interface gráfica da ferramenta *Set Time Zero* com o radargrama da seção 1 já processado.

Uma vez posicionada a linha na reflexão de *offset*, basta salvar a imagem clicando em . A Figura (a.45) mostra a interface para salvar a imagem, bem como os formatos aceitos.

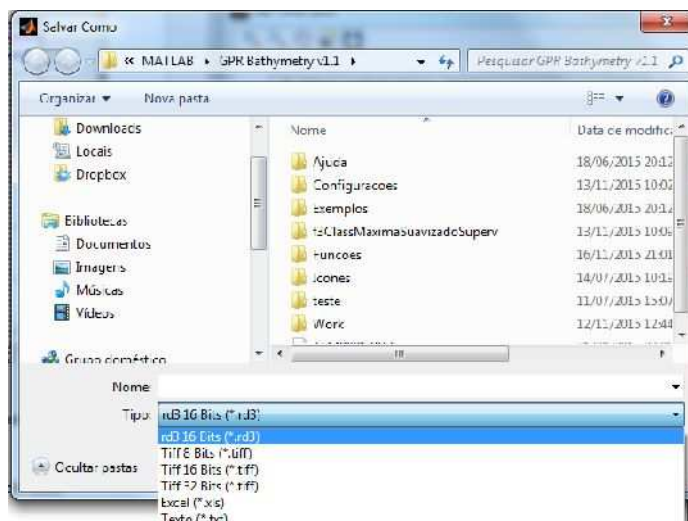




Figura a.45. Interface gráfica da função “Salvar”.

m) *Remove Background*

A ferramenta desenvolvida e implementada possibilita a interação com o usuário, podendo o analista escolher quais traços irão compor o traço de referência. A Figura (a.46) mostra a interface desta função juntamente com o radargrama da seção 2 já processado. É possível salvar o radargrama processado e imprimi-lo por meio das ferramentas  e , respectivamente.

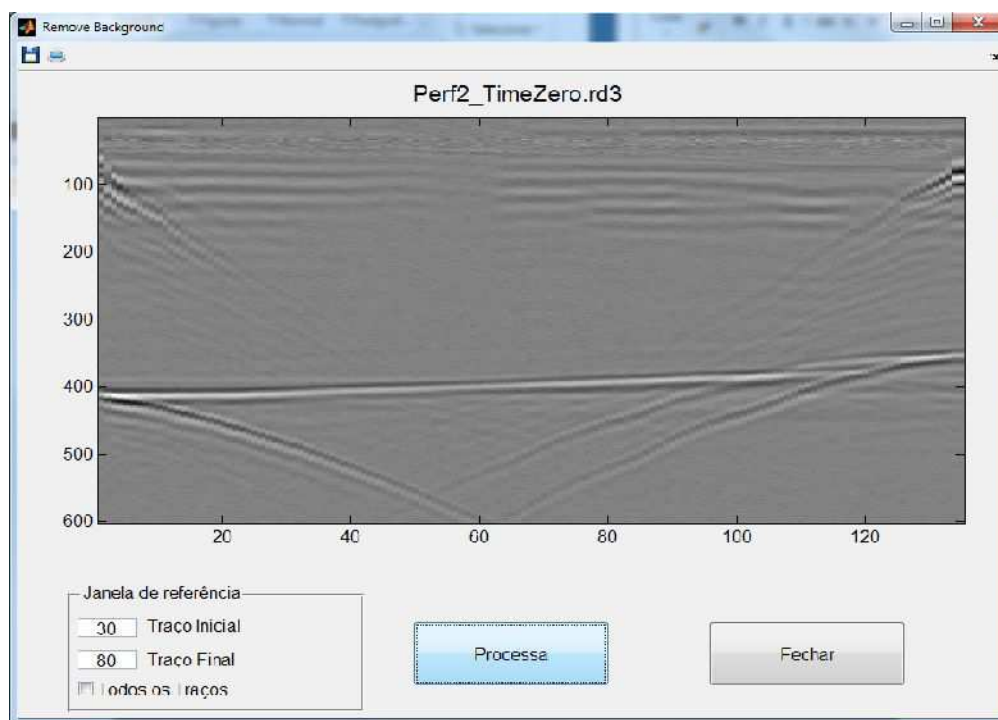


Figura a.46. Interface gráfica da função *Remove Background*.

n) Amplitude instantânea inversa

A Figura (a.47) mostra a interface gráfica desenvolvida para esse filtro *menu Processamento>Amplitude instantânea Inversa*. O usuário pode escolher interpolar à curva de amplitude instantânea uma função polinomial ou uma *Spline*. Também é possível escolher o grau do polinômio ou o parâmetro de suavização da *Spline*. Ao clicar em “processar” o filtro é aplicado sobre o radargrama.

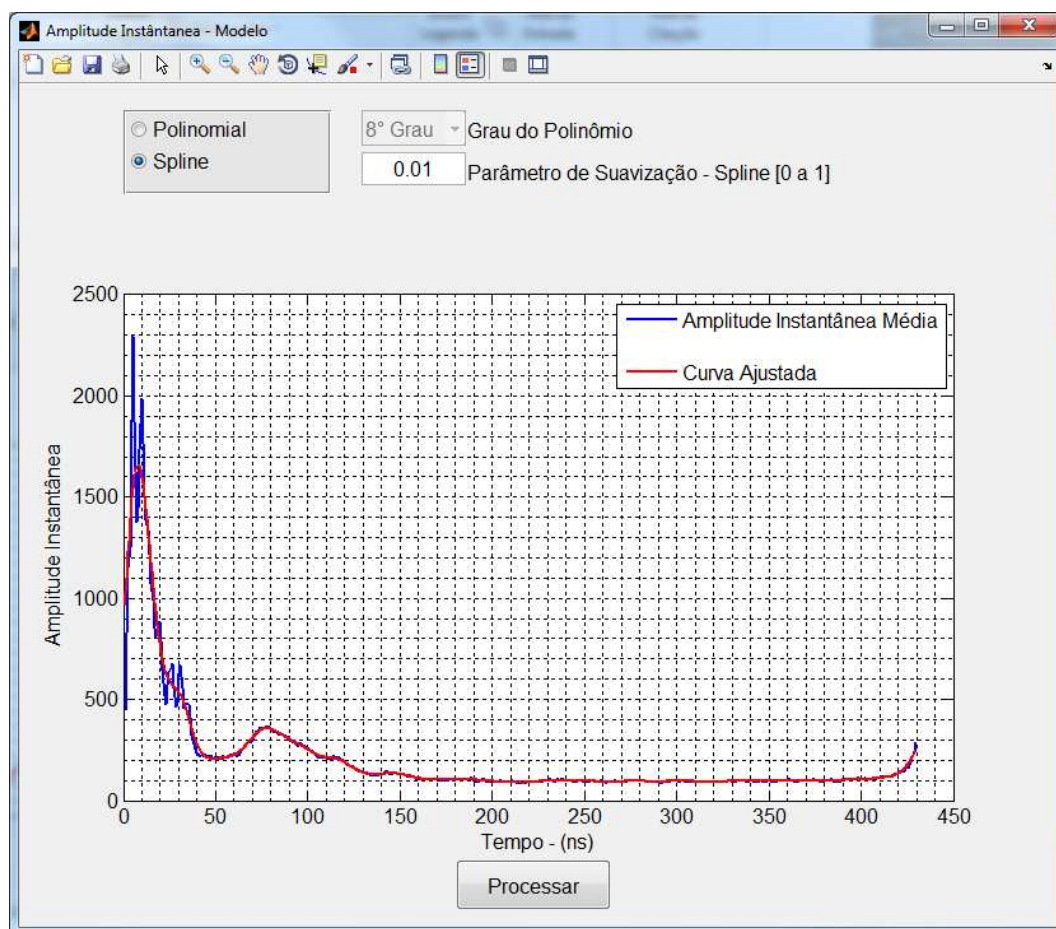


Figura a.47. *Spline* ajustada sobre a amplitude instantânea.

o) Ganho variável por região

Esta ferramenta conta com 3 tipos de ganhos: Ganho linear, Ganho linear variável e Ganho variável por região. As duas primeiras são similares a tipos de ganhos já disponíveis em alguns *softwares* para processamento de radargramas, onde pode ser dado um ganho variável com o tempo, enquanto a última está disponível apenas no *GPR Bathymetry*. Ela pode ser acessada pelo *menu Processamento>Ganho*.

No modelo da Figura (a.48), no gráfico do radargrama estão dispostos os pontos de controle onde o usuário deseja que passe a posição “zero” do gráfico da “seção tipo do ganho”. Na caixa de entrada de dados, à direita do gráfico, onde aparece o número “100”, é informado o alcance da “seção tipo do ganho”, neste exemplo 100 linhas. Os pontos de controle presentes no gráfico da “seção tipo do ganho” podem ser arrastados e posicionados onde o usuário desejar, sendo posteriormente interpolados por uma *Spline* que dará um ganho individual para cada *pixel* sobre a mesma. Nota-se que, no gráfico da “seção tipo do ganho”, a região situada acima da ordenada 1 receberá um acréscimo do ganho e abaixo um decréscimo. Os *pixels* situados à esquerda de “P1” receberão o valor de “P1” e os situados à direita de “P7” receberão o valor de “P7”. A intensidade do ganho também pode ser ajustada pela caixa de entrada de texto referente ao “valor máximo de ganho”. Para uma melhor visualização do resultado desse processamento é apresentada a Figura (a.49).

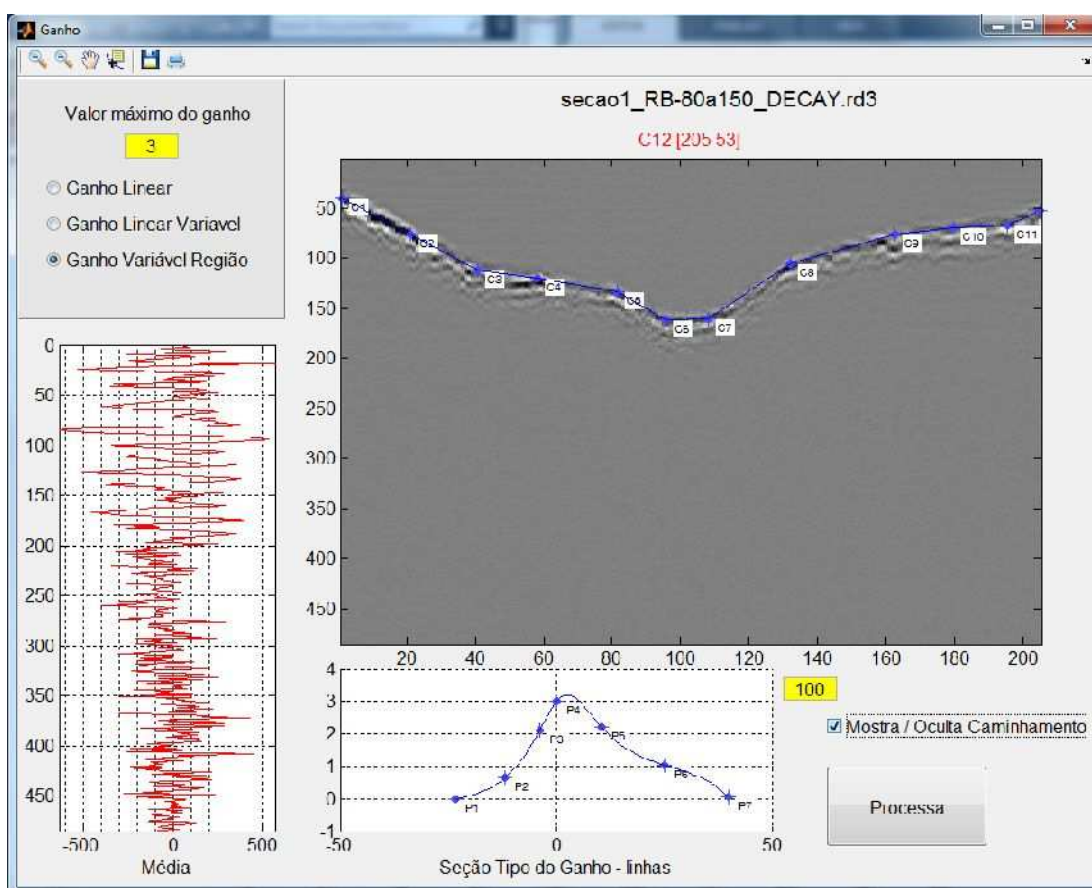


Figura a.48. Ferramentas de ganho disponíveis no GPR *Bathymetry*.

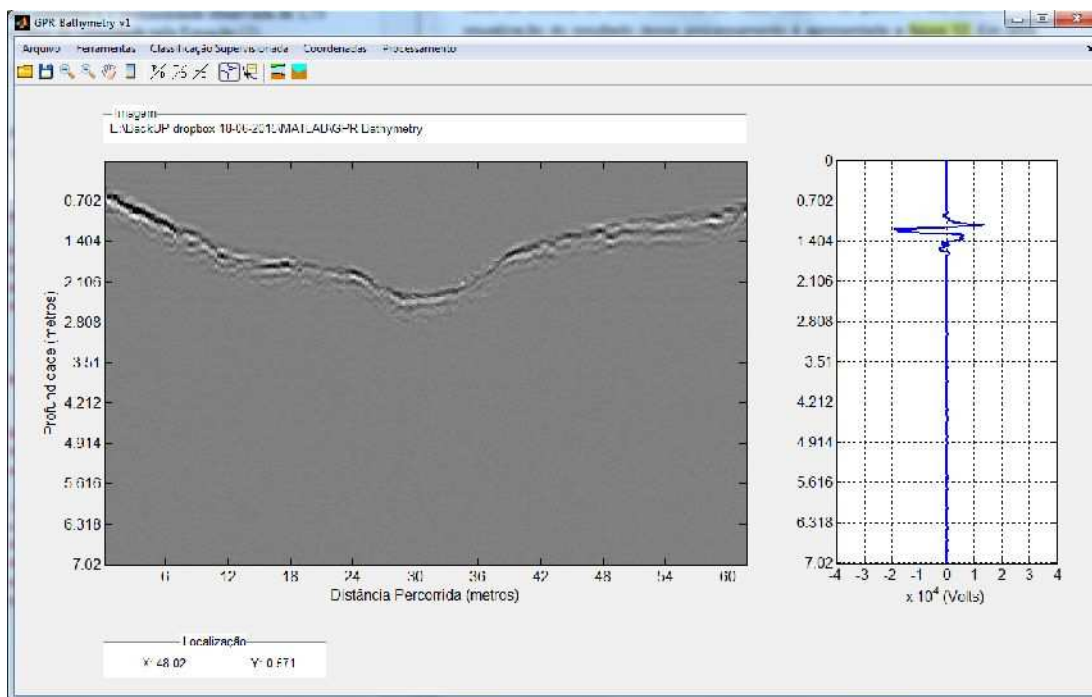


Figura a.49. Seção 1 pós-processada.