



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

MAPEAMENTO DE INTERFERÊNCIAS COM GPR:
UMA APLICAÇÃO NA MINA FAZENDA
BRASILEIRO, TEOFILÂNDIA, BA

LEONARDO AUGUSTO DE OLIVEIRA MENDES

SALVADOR – BAHIA

Agosto – 2008

**Mapeamento de Interferências com GPR: Uma Aplicação na Mina Fazenda
Brasileiro, Teofilândia, BA**

por

LEONARDO AUGUSTO DE OLIVEIRA MENDES

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA E GEOFÍSICA APLICADA

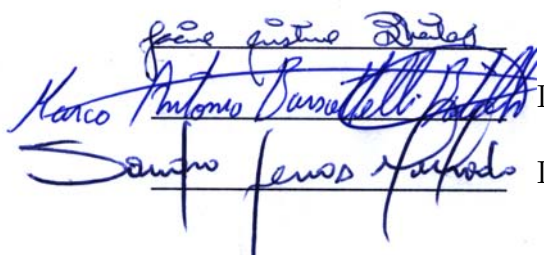
DO

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DA

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

Comissão Examinadora



Dra. Jacira Cristina Batista de Freitas - Orientadora

Dr. Marco Antônio Barsottelli Botelho - Co-orientador

Dr. Sandro Lemos Machado

Data da aprovação: 04/08/2008

Eu dedico este trabalho a Deus por
fazer-me sentir constantemente a
sua presença, e a minha maravilhosa
família, em especial à memória de
minha querida avó, que sempre
estiveram me apoiando,
incentivando e participando em
todos os momentos da minha vida.

RESUMO

Os métodos geofísicos de campo são técnicas sofisticadas, extremamente importantes nas investigações de natureza geológica, entre outras áreas, e por isso largamente utilizadas nas atividades de exploração mineral. Entre as diversas técnicas geofísicas existentes uma se destaca pela extensa aplicabilidade e eficiência no imageamento da subsuperfície em profundidades rasas que é o método GPR (Ground Penetrating Radar) ou Radar de Penetração no Solo.

O presente trabalho teve por objetivo testar o desempenho do método GPR em questões comuns à atividade da mineração. A pesquisa foi realizada na área da Mina Fazenda Brasileiro, localizada na região nordeste do estado da Bahia, contemplando as seguintes situações: (a) detecção de tubulações enterradas em área de antigas instalações da Mina (antiga usina de lixiviação); (b) determinar a resposta do GPR na detecção de veios de quartzo e outras mineralizações em uma galeria da mina.

Nesta campanha o modelo de GPR utilizado foi um SIR SYSTEM 2000 fabricado pela GSSI, com antenas de frequência central de 200 MHz úteis à investigação de profundidades mais rasas que era o objetivo desta etapa. Foram realizados sete perfis com o radar na área da antiga planta de lixiviação da mina e dois perfis numa galeria perpendicular a um veio de quartzo. O processamento dos dados foi realizado utilizando-se o software RADAM 6.5 (GSSI, 2005) seguindo-se um fluxograma básico de processamento com as imagens da subsuperfície sendo reveladas através de radargramas no modo linescan.

Após a etapa de processamento dos dados, os radargramas produzidos foram interpretados sendo possível identificar as interferências registradas nos dados na forma de refletores hiperbólicos apertados devido às tubulações enterradas, isto, para o caso do item (a) supracitado, e anomalias causadas por corpos grafitosos, sulfetados e carbonáticos posicionados na litologia local, e ainda intervalos de baixo contraste de amplitudes identificados como veios de quartzo, para o caso do item (b), confirmando a aplicabilidade e eficiência do método para imagear a subsuperfície.

ABSTRACT

The geophysical methods of field are sophisticated techniques, very important in investigations of geological nature, among other areas, and therefore widely used in the activities of mineral exploration. Among the various geophysical techniques existing one stands out by the extensive applicability and efficiency in the imaging of subsurface at shallow depths which is the GPR method (Ground Penetrating Radar).

This study aimed to test the performance of the GPR method on common issues on activity of mining. The survey was conducted in the area of Fazenda Brasileiro Mine, located in the northeastern state of Bahia, including the following situations: (a) detection of buried pipelines in the area of old facilities Mina (formerly of leaching plant), (b) determine the response of the GPR in detecting veins of quartz and other mineralization in a gallery of the mine.

In this campaign the GPR model used was SIR SYSTEM 2000 manufactured by GSSI, with antennas of central frequency of 200 MHz useful for research into more shallow depths that was the aim of this step. Seven profiles were conducted with the radar in the area of the former leaching plant from the mine and two profiles in a perpendicular gallery to a vein of quartz. The processing of data was performed using the software RADAM 6.5 (GSSI, 2005) followed by a processing basic flow with the subsurface images is revealed through radargramas in order linescan.

After the processing data stage, the radargramas produced were interpreted being possible identify the interference recorded in the data in the form of tight hyperbolic reflectors because of buried pipelines, that, in the case of the item (a) above, and anomalies caused by bodies of graphite, sulfide and carbonatic embedded in lithology place, and yet intervals of low breadth contrast identified with veins of quartz, in the case of the item (b), confirming the applicability and efficiency of the method to image the subsurface.

ÍNDICE

RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
ÍNDICE	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 1 Princípios e teoria do método GPR	5
1.1 Conceitos e princípio de funcionamento do radar	5
1.2 Propagação de ondas eletromagnéticas	8
1.3 Parâmetros de propagação de ondas	9
1.4 Perda da energia e atenuação do sinal	12
1.5 Profundidade de penetração do GPR	15
1.6 Resolução vertical e horizontal	16
1.7 Figuras de radiação	17
1.8 Propriedades dielétricas das rochas	18
1.9 Aquisição dos dados	23
1.10 Técnicas de aquisição de dados	23
1.11 Parâmetros de aquisição dos dados	24
CAPÍTULO 2 Geologia Regional	28
2.1 Introdução	28
2.2 Geologia do Greenstone Belt do Rio Itapicuru	28
2.3 Evolução Estrutural	31
2.4 Tipos Litológicos Regionais	32
2.5 Litoestratigrafia da Faixa Weber	32
2.5.1 Sequência Fazenda Brasileiro	32
CAPÍTULO 3 Processamento e Interpretação dos Dados de Radar	35
3.1 Procedimento empregado na aquisição	35
3.2 Pré-Processamento de campo	36
3.3 Aplicação de ganhos	36
3.4 Filtragem DC (dewowing)	36

3.5	Filtragem temporal	36
3.6	Filtragem espacial	37
3.7	Deconvolução	37
3.8	Migração	37
3.9	Interpretação dos dados	38
3.9.1	Interpretação dos radargramas obtidos na antiga planta de lixiviação	38
3.9.2	Interpretação do radargrama obtido em uma galeria perpendicular a veios de quartzo e outras mineralizações	49
CAPÍTULO 4	Conclusões	51
	Agradecimentos	52
	Referências Bibliográficas	53

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Constituintes Básicos do Sistema GPR (Reynolds, 1997).	6
1.2	Seção de radar revelada no formato <i>Wiggle Trace</i>	7
1.3	Equipamento SIR-2000 da GSSI em operação no campo. As antenas (transmissora e receptora) estão dentro da caixa laranja, a roda, vista na figura, é o odômetro do sistema, a CPU não pode ser vista na figura.	7
1.4	Relação entre velocidades e frequências para diferentes condutividades (adaptada de Davis e Annan, 1989).	11
1.5	Relação entre atenuação e frequências para diferentes condutividades (adaptada de Davis e Annan, 1989).	12
1.6	Principais processos que provocam a perda do sinal eletromagnético (Reynolds, 1997).	13
1.7	Variação do <i>Skin Depht</i> (m) em função da resistividade (ohm.m), para $\epsilon_r = 8$ e 40 (McCann, Jackson, Fenning, 1988).	14
1.8	Bloco diagrama ilustrando a energia irradiada e recebida no sistema GPR (Annan e Davis, 1977).	15
1.9	Padrões de radiação TE e TM de uma antena de radar, quando colocada sobre a superfície da Terra com constante dielétrica de 3,2 (adaptada de Annan, 1992).	18
1.10	Distâncias proibitivas em função da frequência para diferentes materiais (Cook, 1975).	19
1.11	Velocidades da onda eletromagnética em função da porosidade para materiais granulares saturados com ar e água (Reynolds, 1997).	22
1.12	Principais técnicas de aquisição de dados de radar: a) Afastamento constante, b) WARR, c) CMP, d) Transiluminação (tomografia) (Pinto, 2007).	26
1.13	Modos de orientação das antenas de radar (Annan e Cosway, 1992).	27
1.14	Área de recobrimento das antenas de GPR para as configurações PR-BD e PL-BD (Annan e Cosway, 1992).	27
2.1	Mapa de localização da Mina Fazenda Brasileiro (Adaptado de Teixeira, 1984).	29
2.2	À esquerda, mapa de localização do Greenstone Belt do Rio Itapicuru. À direita, mapa geológico regional do setor centro-sul do Greenstone Belt do Rio Itapicuru, com destaque para a Mina Fazenda Brasileiro (Modificado de Rocha Neto, 1994).	30

2.3	Bloco diagrama representando a interpretação estrutural para a área Fazenda Brasileiro, onde se observa o estilo de superposição de 4 fases de dobramento, todas afetando o <i>sill</i> estratigráfico (hachurado) (Modificado de Teixeira, 1984).	31
2.4	Mapa geológico do distrito aurífero de Fazenda Brasileiro (Modificado de Silva, Coelho et al. 2001).	33
2.5	Perfil geológico da Faixa Weber (Silva, Coelho et al. 2001).	33
2.6	Seção esquemática através do <i>sill</i> estratificado de Fazenda Brasileiro, mostrando a localização dos corpos de minério estrato-controlados (Teixeira, 1984).	34
3.1	Vista lateral da usina de lixiviação, onde se iniciou o levantamento geofísico com o GPR.	39
3.2	Representação das trajetórias de levantamento dos perfis de GPR com afastamento constante, onde pode-se vislumbrar o ponto de saída e chegada dos dois perfis e também de uma tubulação aflorante no trajeto dos perfis.	39
3.3	Radargrama correspondente ao perfil 1.	40
3.4	Radargrama correspondente ao perfil 2.	41
3.5	Imagem mostrando duas tubulações desenterradas que correspondem as anomalias à 19.0m e 19.5m de distância do início do perfil 1.	41
3.6	Imagem mostrando outra tubulação desenterrada desta feita correspondente ao ponto 3 dos perfis 1 e 2.	42
3.7	Imagem mostrando no início do perfil 2 duas tubulações que correspondem às interferências 1 e 2 do mesmo perfil.	42
3.8	Imagem ilustrando a trajetória de levantamento deste perfil, bem como, a referência de seu início (seta amarela). Pode-se ver também o equipamento empregado no presente trabalho, neste caso, um SIR SYSTEM 2000 fabricado pela GSSI com antena de frequência central de 200 MHz (o CPU que armazena os dados não pôde ser visto na imagem).	43
3.9	Radargrama correspondente ao perfil 3.	44
3.10	Representação das linhas de aquisição dos perfis 4 e 5.	45
3.11	Radargrama correspondente ao perfil 4.	45
3.12	Radargrama correspondente ao perfil 5.	46
3.13	Imagem mostrando a tubulação indicada como ponto 2 nos perfis 4 e 5.	46
3.14	Representação da trajetória da linha de aquisição dos perfis 6 e 7 acompanhada de suas referências (setas amarelas indicando os postes) de saída e de chegada.	47
3.15	Radargrama correspondente ao perfil 6.	48
3.16	Radargrama correspondente ao perfil 7.	48
3.17	Seção vertical da área correspondente à galeria com as principais mineralizações.	49

3.18 (a) Radargrama correspondente ao perfil da galeria com os dados apresentados em tempo; (b) Radargrama anterior interpretado e com os dados em profundidade; (c) Destaque do perfil geológico mostrando também a trajetória do GPR.	50
---	----

INTRODUÇÃO

A técnica GPR (Ground Penetrating Radar) é um produto aprimorado obtido da evolução de uma série de estudos e pesquisas desenvolvidas por notáveis cientistas na área do eletromagnetismo tendo como ponto de partida os estudos do físico escocês James Clerk Maxwell, em 1865, que deram origem à teoria das ondas eletromagnéticas. Esta teoria obteve sua total validação e comprovação experimental em 1888 através dos ensaios científicos do físico alemão Heinrich Rudolf Hertz que possibilitaram a produção e propagação das ondas eletromagnéticas, como também, formas de controlar a frequência das ondas produzidas, o que foi essencial para o desenvolvimento tecnológico de diversas áreas. E foi justamente se utilizando deste conhecimento, o controle sobre as ondas hertzianas, que o físico italiano Guglielmo Marconi deu origem ao primeiro sistema prático de telegrafia sem fios em 1897, que é tido como o precursor do rádio.

O emprego de ondas eletromagnéticas em frequências de rádio voltadas à identificação de objetos data de 1904 e é atribuído ao inventor alemão Christian Hülsmeier que desenvolveu um detector de metais que foi primeiramente testado em navios similarmente à técnica do Sonar hoje conhecida. Depois deste invento pioneiro, já em 1926, Hülsenbeck, desenvolveu e patenteou o que se tornaria o grande passo em direção à criação do sistema GPR que é a possibilidade de uso de pulsos eletromagnéticos curtos para investigar o subsolo.

Durante o período entre as duas grandes guerras várias técnicas que empregam pulsos eletromagnéticos de curta duração foram desenvolvidas por diversos países, inclusive sendo usadas durante a 2ª Guerra Mundial para detecção de aviões e de túneis. Na década de 60 essas técnicas foram utilizadas para estudos glaciológicos principalmente para determinação das espessuras das camadas de gelo das calotas polares (Cook, 1960); (Evans, 1965); (Swithinbank, 1968).

Entretanto, o sistema GPR moderno tal como conhecemos hoje foi desenvolvido pelo exército dos Estados Unidos durante a guerra do Vietnã com objetivo de localizar labirintos e túneis construídos no subsolo pelos comunistas do norte. Com a tecnologia conquistada após a guerra, a empresa americana Geophysical Survey Systems Inc. (GSSI) identificou o potencial do GPR e passou a fabricá-lo com finalidade de uso civil em diversos domínios, se tornando o maior fabricante de sistemas GPR. Desde então, outras empresas também desenvolveram sistemas de GPR com propósitos comerciais, destacando-se entre elas a sueca Mala Ramac, a canadense PulseEKKO (Sensor & Software Ltd) e a italiana IDS.

Devido ao controle da frequência do pulso eletromagnético nos sistemas de GPR seu uso

pode ser dividido em duas linhas principais: A primeira, com larga aplicação na geologia, se concentra no uso de frequências inferiores a 500 MHz. A segunda, voltada às aplicações na engenharia, utilizam frequências superiores a 500 MHz. Isto se deve ao interesse específico de cada área. Na geologia busca-se atingir profundidades maiores nas investigações do subsolo em detrimento da resolução da imagem, o que é conseguido empregando frequências menores. Já para as investigações na engenharia deseja-se uma melhor resolução da imagem a profundidades mais rasas, obtida com o uso de frequências maiores, conforme Reynolds (1997). Abaixo estão listadas as principais aplicações do método GPR podendo ser observada a grande versatilidade desta técnica devido à ampla empregabilidade nas mais diferentes áreas do conhecimento:

- **Exploração mineral:**

- localização de zonas mineralizadas (greisens);
- localização de depósitos de placers;
- desenvolvimento de minas subterrâneas e a céu aberto, etc.

- **Geologia:**

- mapeamento estratigráfico;
- localização de falhas, diques, intrusões, etc.;
- detecção de fissuras e cavidades naturais;

- **Engenharia e construção civil:**

- localização de objetos metálicos e não-metálicos enterrados (ex: dutos, tubulações, cabos, galerias de águas pluviais);
- análise de asfaltos;
- localização de vazios em estruturas de concreto;

- **Ambiental:**

- mapeamento de plumas de contaminação;
- investigações com aterros sanitários e lixões;
- localização de tanques de combustível enterrados;

- **Hidrogeologia:**

- exploração de água subterrânea;
- determinação do lençol freático;
- localização de paleocanais;

- **Glaciologia:**

- determinação da espessura das camadas de gelo;
- estudo da movimentação das geleiras;
- determinação do balanço de massa sub-glacial.

- **Arqueologia:**

- localização de sítios arqueológicos (ex: utensílios, fundações de construções, túneis, criptas e tumbas);
- mapeamento pré-escavação.

- **Forense:**

- localização de corpos e objetos enterrados.

Muitas das aplicações supracitadas estão bem descritas na literatura. A seguir serão apresentados alguns trabalhos que ilustram este fato.

Utilizaram o método GPR: Harrison (1970), Campbell e Orange (1974) e Annan e Davis (1976) na determinação das espessuras das camadas de gelo da Antártica e do Ártico; Thierbach (1974) e Unterberger (1978) para detectar fraturas em rochas de sal; Bevan e Kenyon (1975) e Imai et al. (1987) em investigações arqueológicas; Coon et al. (1981) para investigações em corpos de carvão; Davis et al. (1985) na exploração de depósitos de placer; Darracott e Lake (1981), Ulriksen (1982), Leggo e Leech (1983) e Davis e Annan (1989), entre outros, na engenharia civil e na solução de problemas geológicos. A Partir da década de 90, com o GPR tendo adquirido o status de uma técnica precisa de imageamento de subsuperfície rasas, inúmeros trabalhos foram realizados em vários países e nas mais diferentes áreas ampliando de maneira formidável o espectro de uso e estudo do método.

Nesse sentido, este trabalho pretende corroborar a validade da aplicação do GPR em estudos de detecção de corpos enterrados. No presente trabalho o objetivo foi a detecção

de tubulações enterradas em área de antigas atividades da Mina Fazenda Brasileiro (antiga usina de lixiviação) e o levantamento em uma galeria que corta perpendicularmente um veio de quartzo. A Mina está localizada no município de Teofilândia a nordeste do estado da Bahia e distando 210 km da cidade de Salvador.

Tendo no capítulo 1 a síntese dos conceitos e princípios de funcionamento do radar, bem como dos fundamentos teóricos do método, o texto desta monografia está distribuído em quatro capítulos. A descrição da geologia da área estudada é apresentada no capítulo 2. Os resultados obtidos no levantamento, seguidos de suas respectivas interpretações, são mostrados no capítulo 3, que também trata da aquisição e processamento dos dados. Finalizando, o capítulo 4 apresenta as conclusões referentes aos dados investigados, sendo feitas ainda sugestões para o melhor aproveitamento dos dados obtidos.

CAPÍTULO 1

Princípios e teoria do método GPR

1.1 Conceitos e princípio de funcionamento do radar

A técnica do radar de penetração no solo (GPR) é um método geofísico não-invasivo fundamentado nas leis do eletromagnetismo que utiliza ondas de rádio em frequências muito altas (10 a 2500 MHz) para investigar o interior da Terra em rasas profundidades através da emissão no solo dessas ondas eletromagnéticas geradas pelo radar.

Para tanto, o sistema GPR é composto de uma fonte geradora de pulsos elétricos curtos de altas frequências que produzem ondas eletromagnéticas, uma antena transmissora colocada na superfície que irá radiar as ondas para dentro da Terra, uma antena receptora também colocada na superfície do terreno que receberá as ondas refletidas e difratadas em subsuperfície e uma unidade de armazenamento de dados (CPU). A CPU além de armazenar os dados tem uma vantagem adicional que é a possibilidade de se verificar, no momento do levantamento, a qualidade e a coerência dos dados, permitindo inclusive a realização de um pré-processamento no campo.

A propagação da onda eletromagnética em subsuperfície além de ser controlada pela frequência do sinal transmitido depende das propriedades elétricas do solo, principalmente da condutividade elétrica e da permissividade dielétrica. À medida que o sinal percorre o interior da Terra vai rastreando os diferentes materiais existentes e sendo afetado pelas mudanças nas propriedades elétricas desses materiais em subsuperfície. É justamente esse contraste das propriedades elétricas dos materiais que causa a reflexão de parte do sinal que retorna à superfície sendo então captado pela antena receptora posicionada na superfície do terreno. O sinal refletido é registrado na CPU em função do seu tempo de percurso que é o tempo duplo de trânsito da onda eletromagnética, ou seja, o tempo que a onda leva desde a saída da antena transmissora até a reflexão na interface em subsuperfície e o seu imediato retorno à antena receptora. Vale ressaltar que esse tempo é da ordem de algumas dezenas de nanossegundos ($1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$) por isso exige-se uma instrumentação bastante precisa para medir o tempo de viagem da onda de maneira satisfatória.

Existem duas configurações básicas para as antenas de radar, que são os modos monoestático e o biestático. O primeiro se caracteriza pelas antenas transmissora e receptora

ficarem sempre juntas no momento da aquisição, como se fossem uma mesma antena. No outro modo as antenas estão separadas podendo ser afastadas uma da outra, o que permite realizar determinados tipos de aquisição como CMP e WARR que serão discutidos neste capítulo. As antenas são arrastadas sobre o solo, com a antena transmissora disparando os pulsos com uma taxa de repetição fixa e a antena receptora captando os sinais refletidos e/ou refratados que serão armazenados e exibidos pela CPU em função do tempo duplo de viagem. A Figura 1.1 ilustra de forma esquemática esse funcionamento e mostra os constituintes básicos do sistema GPR. O registro dos dados se dá na forma de traços que representam as reflexões da onda nas interfaces correspondentes à posição daquele traço no perfil. Sendo que cada traço representa o empilhamento automático de uma série de pulsos emitidos, onde esta série é determinada por uma taxa de repetição do sistema. Na Figura 1.2 pode-se ver o registro dos dados na forma de *Wiggle Trace*, sendo apresentado aqui apenas de maneira ilustrativa, já que, as imagens neste trabalho foram reveladas no modo *Linescan* do *software* usado no processamento. Já na Figura 1.3 pode-se ver o equipamento de GPR usado no trabalho de campo.

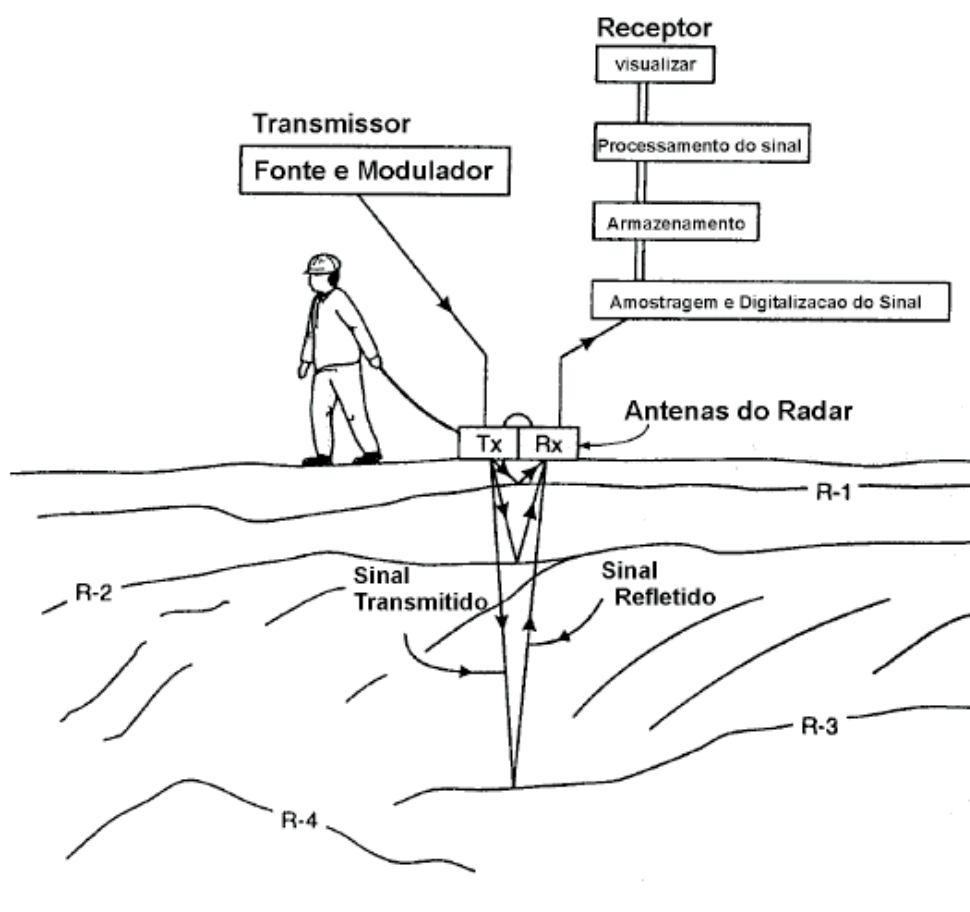


Figura 1.1: Constituintes Básicos do Sistema GPR (Reynolds, 1997).

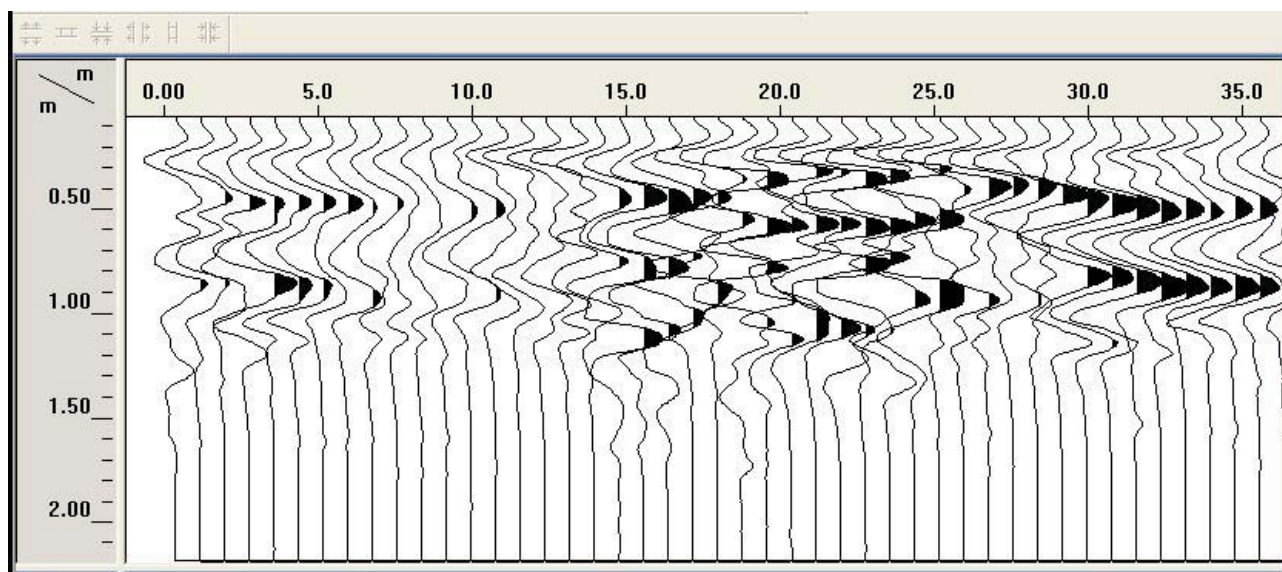


Figura 1.2: Seção de radar revelada no formato *Wiggle Trace*.



Figura 1.3: Equipamento SIR-2000 da GSSI em operação no campo. As antenas (transmissora e receptora) estão dentro da caixa laranja, a roda, vista na figura, é o odômetro do sistema, a CPU não pode ser vista na figura.

1.2 Propagação de ondas eletromagnéticas

Sendo o GPR um método eletromagnético sua operação baseia-se no princípio de transmissão e reflexão de ondas eletromagnéticas. Portanto, toda teoria esta fundamentada nas equações de Maxwell, que descrevem o comportamento dos fenômenos eletromagnéticos com base em cinco campos vetoriais: $\vec{B}$ (indução magnética, em *Weber/m²*), $\vec{H}$ (campo magnético, em *A/m*), $\vec{E}$ (campo elétrico, *V/m*) e $\vec{J}$ (densidade da corrente elétrica, *A/m²*), $\vec{D}$ (vetor deslocamento elétrico, *C/m²*).

Esses cinco campos vetoriais relacionam-se através das equações:

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (1.1)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = \rho \quad (1.2)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (1.3)$$

e

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1.4)$$

onde, ρ é a densidade de carga livre em *C/m²*.

Como as equações de Maxwell são desacopladas o acoplamento é conseguido através das relações constitutivas, empíricas, que valem-se das propriedades elétricas e magnéticas dos materiais para relacionar o campo elétrico externo aplicado e o campo interno (Sato, 1999).

- Primeira relação constitutiva: Lei de Ohm.

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (1.5)$$

onde σ é a condutividade elétrica. Em meios isotrópicos σ é uma grandeza escalar, enquanto que, em ambientes anisotrópicos, é um tensor. Essa relação descreve o fluxo de cargas livres por uma corrente quando um campo elétrico está presente. Ao cessar o campo elétrico, cessa o movimento das cargas que, para ambientes geológicos rasos, têm como formas mais importantes os elétrons dos minerais metálicos e os íons contidos nas soluções eletrolíticas presentes nos poros, fissuras e fratura das rochas. Esse fenômeno é conhecido como corrente de condução.

- Segunda relação constitutiva: relaciona o vetor deslocamento elétrico $\vec{D}$ e o campo elétrico $\vec{E}$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (1.6)$$

onde o parâmetro ϵ é chamado de permissividade dielétrica. Sendo que, o parâmetro mais utilizado é a permissividade relativa ou constante dielétrica (ϵ^*), que é a razão entre a permissividade do material e a permissividade do vácuo: $\epsilon^* = \epsilon/\epsilon_0$ (Annan, 1992).

As correntes de deslocamento ($\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$) são associadas às cargas que se movimentam polarizadas pela influência de um campo elétrico externo, ocorrendo, durante esse movimento, uma transferência de energia do campo elétrico para o meio, que irá liberar essa energia armazenada devido ao retorno das cargas à posição de equilíbrio quando o campo elétrico for retirado.

A permissividade dielétrica no ambiente terrestre é fortemente controlada pela presença de água, podendo apresentar variações de duas ordens de grandeza (variando de 1 a 80), por isso esta propriedade é a mais importante em trabalhos com GPR afetando diretamente a propagação das ondas de radar.

- Terceira relação constitutiva: que é a relação entre a indução magnética $\vec{B}$ e o campo magnético $\vec{H}$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (1.7)$$

onde μ é a permeabilidade magnética.

É comum desconsiderar o efeito da permeabilidade magnética ao se realizar levantamentos com GPR, pois as frequências comumente usadas por este método são consideradas independentes da permeabilidade magnética da maioria dos materiais geológicos, não variando, portanto, com relação a esta.

Para maiores detalhes sobre os parâmetros físicos e matemáticos que envolvem as equações de Maxwell do eletromagnetismo pode-se recorrer a Freitas (2004), que apresenta uma discussão ampla sobre o assunto.

1.3 Parâmetros de propagação de ondas

A propagação das ondas de radar têm como principais fatores determinantes a velocidade de propagação e a atenuação, sendo estes condicionados às propriedades elétricas do meio, como condutividade e constante dielétrica.

Como os sistemas de radar normalmente operam em frequências entre 10 e 1000 MHz temos que, nessa faixa de frequência, as propriedades de deslocamento (polarização) são dominantes sobre as propriedades condutivas para a maioria dos materiais geológicos.

Mesmo sendo o comportamento dinâmico (atenuação da amplitude e dispersão) dos métodos sísmicos e do radar diferentes, o comportamento cinemático (tempo de propagação do pulso) é o mesmo.

O pulso eletromagnético tem velocidade de propagação controlada apenas pelas propriedades dielétricas dos materiais.

Segundo Davis e Annan (1989), a constante dielétrica ϵ^* (ou permissividade relativa) é dada por:

$$\epsilon^* = \epsilon' + i\epsilon'' \quad (1.8)$$

onde ϵ' é a parte real da constante dielétrica e ϵ'' sua parte imaginária (ou a parte relativa às perdas de energia).

Separando ϵ'' em seus componentes de alta frequência e condutividade de corrente contínua (D.C.), a constante dielétrica pode ser escrita como:

$$\epsilon^* = \epsilon' + i \left[\epsilon'' + \frac{\sigma_{dc}}{\omega \epsilon_0} \right] \quad (1.9)$$

onde σ_{dc} é a condutividade (em S/m); ω é a frequência angular ($2\pi f$); ϵ_0 é a permissividade no vácuo ($8,854 \times 10^{-2}$ F/m), e ϵ'' é um termo dependente da frequência, relativo às perdas associadas ao fenômeno de relaxação.

Este fenômeno pode ser observado através da figura 1.4 que mostra a relação entre a velocidade da onda eletromagnética e a frequência para diferentes condutividades (Davis e Annan, 1989). Nesta figura nota-se também que a velocidade permanece constante entre 10^{-1} e 1000 MHz para as condutividades até 1000 mS/m. Como abordado anteriormente, os sistemas de radar normalmente operam em frequências entre 10 e 1000 MHz, somente para frequências maiores que 1000 MHz que o fenômeno da relaxação da molécula da água provocará aumento da velocidade, não afetando, portanto, a faixa de frequência utilizada pelo GPR.

Para haver reflexões e/ou refrações das ondas eletromagnéticas no meio é necessária a existência de contraste suficiente entre as propriedades elétricas do alvo e do meio encaixante, pois, não havendo tal contraste, torna-se impossível detectar qualquer anomalia causada pelo alvo. O coeficiente de reflexão nos fornece uma estimativa da possibilidade de propagação das ondas eletromagnéticas, medindo a quantidade de energia refletida num semi-espaço plano no caso de incidência normal, sua formulação matemática é:

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon'_1} - \sqrt{\epsilon'_2}}{\sqrt{\epsilon'_1} + \sqrt{\epsilon'_2}} \quad (1.10)$$

onde R é a quantidade de energia refletida, ϵ'_1 e ϵ'_2 são as constantes dielétricas dos meios 1 e 2 respectivamente.

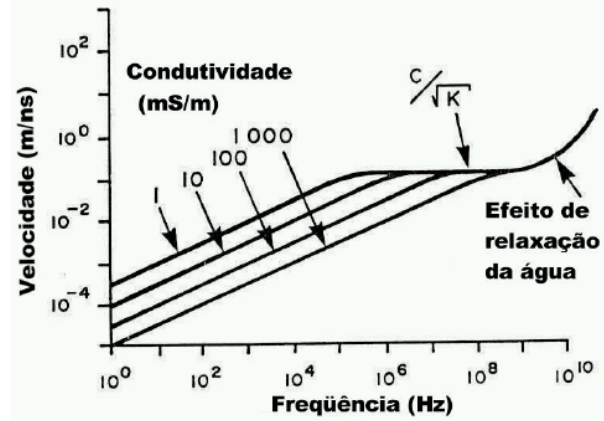


Figura 1.4: Relação entre velocidades e frequências para diferentes condutividades (adaptada de Davis e Annan, 1989).

De acordo com Reynolds (1997), a velocidade da onda eletromagnética nos materiais é descrita por:

$$v = c / \{ (\epsilon_r \mu_r / 2) [(1 + P^2) + 1] \}^{1/2} \quad (1.11)$$

onde c é a velocidade de propagação da onda eletromagnética no vácuo (3×10^8 m/s), ϵ_r é a permissividade dielétrica relativa, μ_r é a permeabilidade magnética e P é o fator de perda dado por:

$$P = \sigma / w \epsilon \quad (1.12)$$

onde σ é a condutividade, a frequência angular $w = 2\pi f$, onde f é a frequência (no caso do GPR é a frequência central da antena), a permissividade $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$, onde ϵ_0 é a permissividade no vácuo que têm o valor de $8,854 \times 10^{-12}$ F/m.

Em materiais geológicos resistivos, ou seja, com baixa perda dielétrica temos que, $\epsilon''' \approx 0$, logo, $\epsilon_r = \epsilon'$, também, $P \approx 0$ e $\mu_r \approx 1$, então a velocidade da onda se reduz a:

$$v = \frac{c}{(\epsilon')^{1/2}} \quad (1.13)$$

No subitem à seguir, serão apresentados valores de ϵ' para diversos materiais que auxiliam na determinação da velocidade de propagação de ondas de radar em diferentes meios, assim como, serão discutidos os fenômenos de perda de energia e atenuação do sinal GPR.

1.4 Perda da energia e atenuação do sinal

Como a perda de energia influencia a profundidade de penetração do sinal, este fator deve ser observado visando a obtenção de bons resultados.

A perda da energia eletromagnética ocorre em consequência da incidência do pulso em interfaces entre meios com diferentes propriedades físicas ocorrendo as reflexões e transmissões da onda nas interfaces. Quando o pulso de radar passa por algum objeto com dimensão menor ou igual ao seu comprimento de onda, ocorrerá um espalhamento de energia de uma maneira aleatória, resultando nas difrações que são fontes de ruídos nas seções de radar.

Parte da energia também é perdida por absorção, onde a energia eletromagnética transforma-se em energia térmica (calor). Outro tipo de perda é causada pelo espalhamento geométrico, pois o sinal de GPR é transmitido em feixes com abertura angular em forma de cone de 90° e propagando-se desde o transmissor sofrem uma redução da energia por unidade de área a uma taxa de $1/r^2$, onde r é a distância percorrida em relação à fonte.

No entanto, a atenuação é a principal causa de perda da energia, sendo função complexa das propriedades elétricas e dielétricas dos meios pelos quais o sinal de radar se propaga. O fator de atenuação (α) é função da condutividade (σ), da permeabilidade magnética (μ) e da constante dielétrica (ϵ) do meio, assim como da frequência do sinal emitido pela fonte ($2\pi f$). A figura 1.5 apresenta a relação entre atenuação e frequência a diferentes condutividades.

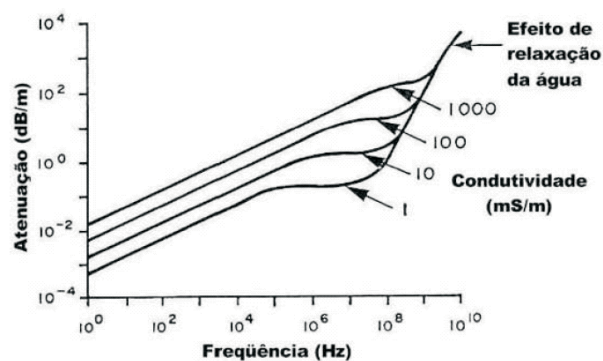


Figura 1.5: Relação entre atenuação e frequências para diferentes condutividades (adaptada de Davis e Annan, 1989).

Em meios com baixo fator de perda (meios resistivos) a atenuação do sinal de radar é usualmente expressa, segundo Davis e Annan (1989) como:

$$\alpha = \frac{1,69 \times 10^3 \sigma}{(\epsilon')^{1/2}} \text{ dB/m} \quad (1.14)$$

onde $\sigma = \sigma_{dc} + w \epsilon'' \epsilon_0$ associa condutividade de corrente contínua (d.c.) e as perdas dielétricas. Deve ser ressaltado que as equações (1.11) e (1.12) são aproximadas, e requerem que $\sigma/w \epsilon' \epsilon_0$ seja muito menor que 1.

A figura 1.6 ilustra os principais processos de perda de energia do sinal eletromagnético. E a tabela 1.1 lista os valores da constante dielétrica, velocidade, condutividade e atenuação a uma frequência central de 100 MHz para alguns materiais geológicos.

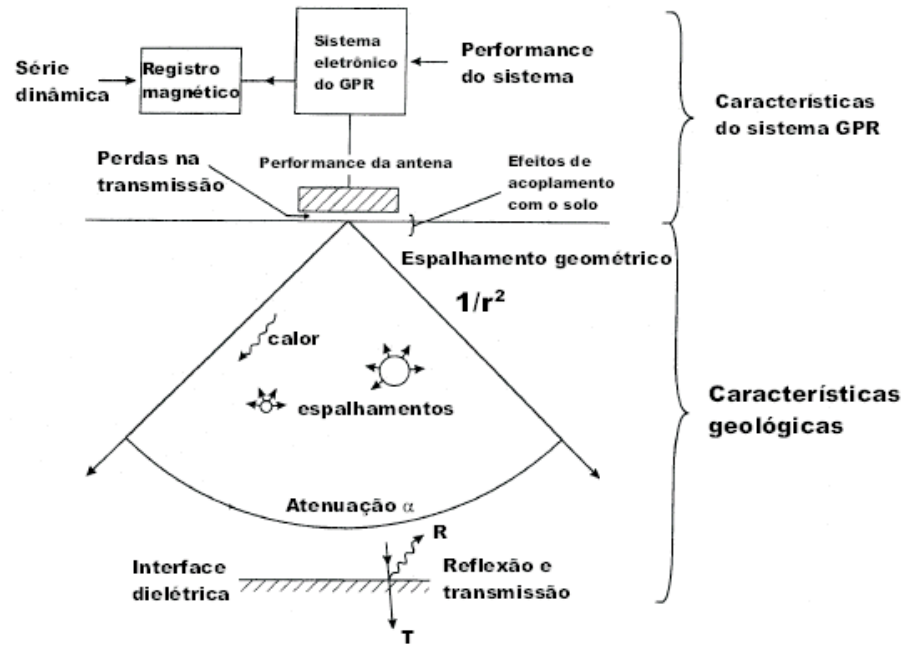


Figura 1.6: Principais processos que provocam a perda do sinal eletromagnético (Reynolds, 1997).

Outro parâmetro importante para o estudo do alcance do sinal de radar é o *Skin Depht* (δ) definido como a profundidade na qual o sinal diminui sua amplitude a $(1/e)$ (37%) do seu valor inicial e é inversamente proporcional ao fator de atenuação (isto é $\delta = 1/\alpha$). Em Reynolds (1997), o *Skin Depht* é escrito por:

$$\delta = 5,31 \frac{\sqrt{\epsilon_r}}{\sigma} \quad (1.15)$$

onde σ é dado em mS/m e assumindo que a razão $\sigma/w \epsilon << 1$. A figura 1.7 mostra a variação do *Skin Depht* (m) em função da resistividade (ohm.m), para $\epsilon_r = 8$ e 40.

Material	ϵ'	$\sigma(mS/m)$	$v (m/ns)$	$\alpha(dB/m)$
Ar	1	0	0,30	0
Água destilada	80	0,01	0,033	2×10^{-3}
Água doce	80	0,5	0,033	0,1
Água do mar	80	3×10^4	0,01	10^3
Areia seca	3 - 5	0,01	0,15	0,01
Areia saturada	20 - 30	0,1 - 1	0,06	0,03 - 0,3
Calcário	4 - 8	0,5 - 2	0,12	0,4 - 1
Folhelho	5 - 15	1 - 100	0,09	1 - 100
Silte	5 - 30	1 - 100	0,07	1 - 100
Argila	5 - 40	2 - 1000	0,06	1 - 300
Granito	4 - 6	0,01 - 1	0,13	0,01 - 1
Sal	5 - 6	0,01 - 1	0,13	0,01 - 1
Gelo	3 - 4	0,01	0,16	0,01

Tabela 1.1: Valores da constante dielétrica, condutividade elétrica, velocidade e atenuação para alguns materiais geológicos a 100 MHz (Davis e Annan, 1989).

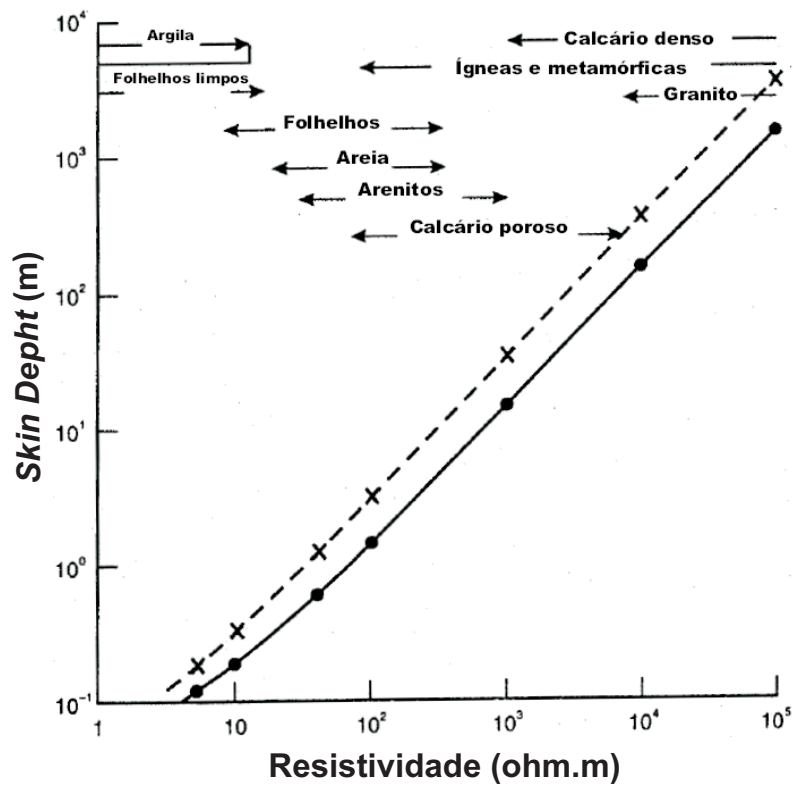


Figura 1.7: Variação do *Skin Depth* (m) em função da resistividade (ohm.m), para $\epsilon_r = 8$ e 40 (McCann, Jackson, Fenning, 1988).

1.5 Profundidade de penetração do GPR

Existem vários fatores que afetam a penetração do sinal de radar no solo. Os principais fatores são a performace do sistema (Q), a atenuação no subsolo e as reflexões nas interfaces, onde as propriedades elétricas variam. A penetração do sinal de radar pode ser determinada a partir da expressão:

$$Q = \frac{\epsilon_t \epsilon_r G_t G_r g \sigma_c e^{-4\alpha l}}{64 \pi^3 f^2 l^4} \quad (1.16)$$

onde, Q é a performace do sistema ou razão entre a amplitude do sinal transmitido e o mínimo da sensibilidade recebida, ϵ_t a eficiência da antena transmissora, ϵ_r a eficiência da antena receptora, G_t os ganhos na antena transmissora, G_r os ganhos na antena receptora, l a distância ao alvo, α a atenuação do meio, f a frequência, g os ganhos por retroespalhamento (backscatter) no alvo, e σ_c a área da seção transversal do espalhamento. Os fatores que afetam a energia irradiada e a energia recebida pelo sistema GPR são apresentados esquematicamente na figura abaixo:

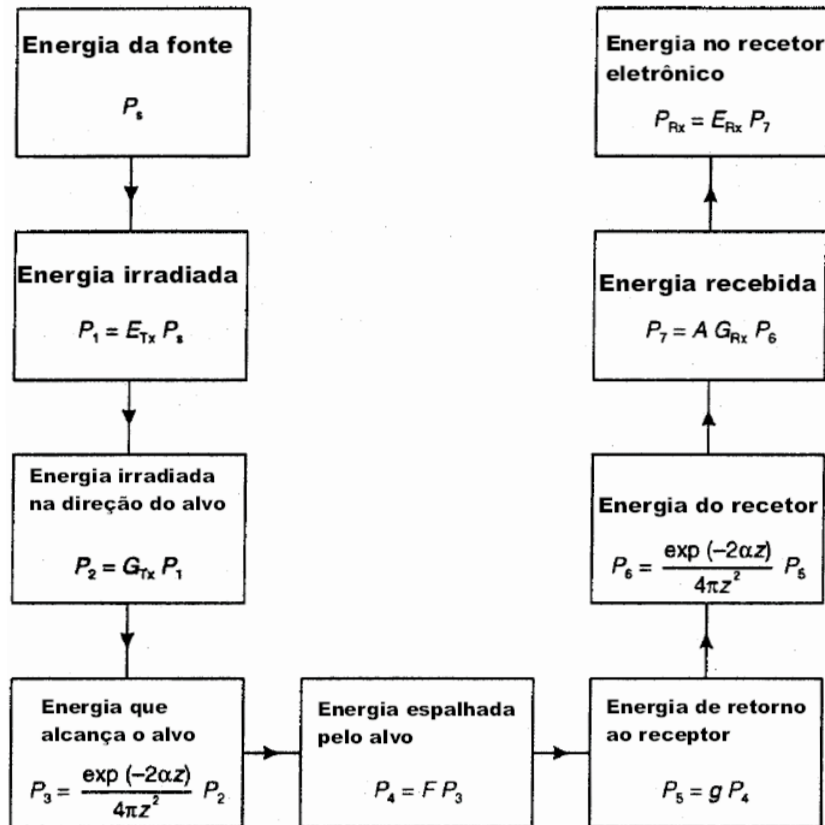


Figura 1.8: Bloco diagrama ilustrando a energia irradiada e recebida no sistema GPR (Annan e Davis, 1977).

onde:

E_{Tx}, Rx = eficiência das antenas transmissora e receptora;

G_{Tx}, Rx = ganhos nas antenas transmissora e receptora;

g = ganho retro-espalhado pelo alvo;

F = área da seção transversal do alvo;

z = distância do alvo até a antena;

α = coeficiente de atenuação do meio;

V = velocidade da onda eletromagnética no meio;

A = área efetiva da antena receptora ($v^2/4\pi f^2$);

f = frequência do sinal.

Para auxiliar nos trabalhos de campo onde pouca ou nenhuma informação, a priori, é conhecida, pode-se fazer uso de uma tabela (tabela 1.2) que serve como um guia prático. Os valores foram obtidos com base em experimentos práticos realizados pelas empresas (RA-MAC/MALA, Sensors & Software e GSSI).

Frequência central (MHz)	Profundidade máxima de penetração (m)
1000	1
400	2
200	4
100	25
50	30
25	40
10	50

Tabela 1.2: Estimativa da profundidade máxima de penetração em função da frequência central das antenas (Porsani, 1999).

1.6 Resolução vertical e horizontal

A resolução vertical é uma medida da habilidade do sistema em distinguir dois sinais provenientes de refletores próximos entre si, ou seja, que tenham tempos de trânsito do sinal próximos, ressaltando que o sistema GPR registra o tempo duplo de trânsito das ondas eletromagnéticas (transmitida e refletida). A resolução vertical aumenta com o aumento da frequência e teoricamente é dada por $\lambda/4$ (Sheriff, 1991). Entretanto, devido às incertezas

das velocidades e das variações na forma da onda do radar durante sua propagação, a resolução conseguida, na prática, é de $\lambda/2$ a $\lambda/3$ (Beres & Haeni, 1991). O limite da resolução teórica é de $\lambda/4$ a $\lambda/2$. Como exemplo, a tabela 1.3 apresenta faixas de resolução teórica obtidas para algumas frequências centrais.

Frequência central (MHz)	Resolução teórica (m)
200	0,125 - 0,25
100	0,25 - 0,5
50	0,5 - 1
25	1 - 2

Tabela 1.3: Resolução teórica em função da frequência central das antenas (Porsani, 1999).

O comprimento de onda é dado pela equação:

$$\lambda = v/f_c \quad (1.17)$$

onde v é a velocidade (foi assumido $v = 0,1$ m/ns), e f_c é a frequência central das antenas.

A resolução horizontal, para o GPR, é determinada pelo padrão de radiação da antena, que é comparável a um feixe de luz de uma lanterna cuja área de iluminação se expande com a distância do alvo. Este padrão é complexo, mas pode ser aproximado por um cone vertical, com um ângulo de abertura 30° e vértice na antena transmissora. Assim, a informação refletida é uma média sobre o refletor “iluminado” por esse feixe de ondas eletromagnéticas (Greenhouse et. al., 1995).

1.7 Figuras de radiação

A figura de radiação de uma antena determina a direção do perfil onde o GPR terá melhor resposta e a área de cobertura do sistema. A forma dos lobos de irradiação de energia sofrerá mudanças com a constante dielétrica do meio. Existem dois padrões de radiação da onda eletromagnética: o padrão TE - Transversal Elétrico; e o padrão TM - Transversal Magnético, sendo que o padrão TE possui maior cobertura angular do que o padrão TM. Assim, nos levantamentos GPR, utiliza-se normalmente o padrão de radiação TE. A figura 1.9 ilustra tais padrões de radiação para uma antena colocada sobre a superfície da Terra com constante dielétrica de 3,2.

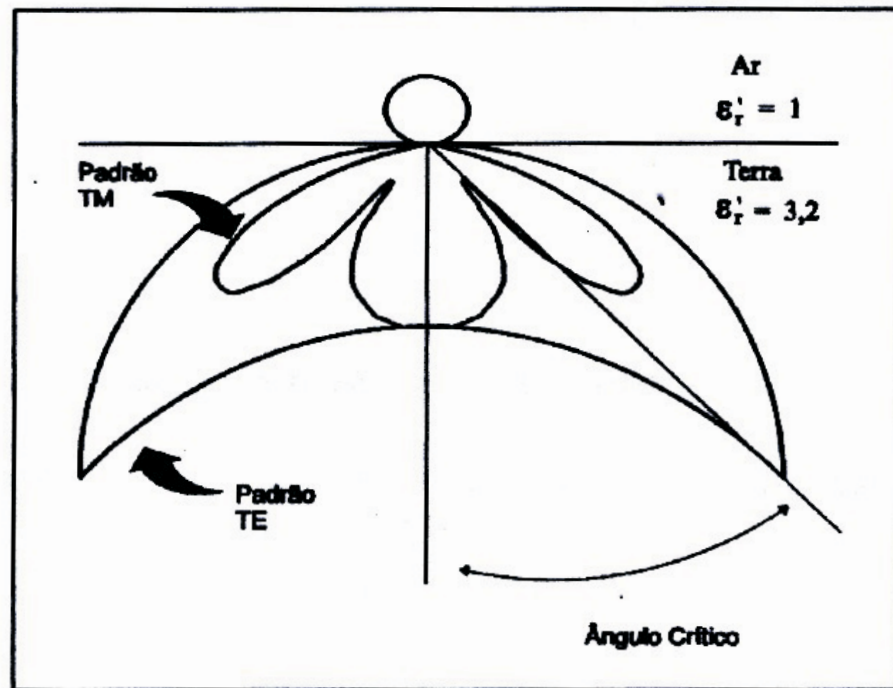


Figura 1.9: Padrões de radiação TE e TM de uma antena de radar, quando colocada sobre a superfície da Terra com constante dielétrica de 3,2 (adaptada de Annan, 1992).

1.8 Propriedades dielétricas das rochas

A constante dielétrica relativa e a condutividade elétrica são as principais propriedades a governar tanto a propagação da onda de radar em um determinado meio quanto as perdas de energia que o sinal sofre como já descrito anteriormente.

A constante dielétrica relativa (ϵ_r) varia de 1 (ar) até 81 (água). No entanto, para a maioria dos materiais geológicos, ϵ_r varia de 3 - 30. Consequentemente, o intervalo de velocidade das ondas de radar é grande, indo de 0,06 a 0,175 m/ns. Já a velocidade da onda eletromagnética no ar é de aproximadamente 0,30 m/ns.

Uma lista das constantes dielétricas relativas e das velocidades da onda eletromagnética para uma grande variedade de materiais geológicos é apresentada na tabela 1.4, observando que a lista deve ser ampliada em relação aos intervalos de medidas de alguns materiais. Outra importante ferramenta para auxiliar na investigação da subsuperfície é o gráfico (Figura 1.10) elaborado por (Cook, 1975) mostrando as prováveis profundidades de exploração do GPR para diferentes materiais geológicos utilizando frequências de 1 - 500 MHz. Pode-se observar como materiais ricos em argila têm menor profundidade de exploração que a maioria das rochas devido à forte atenuação da onda de radar neste meio, e materiais maciços como granito e calcário apresentam boa penetração do sinal de radar.

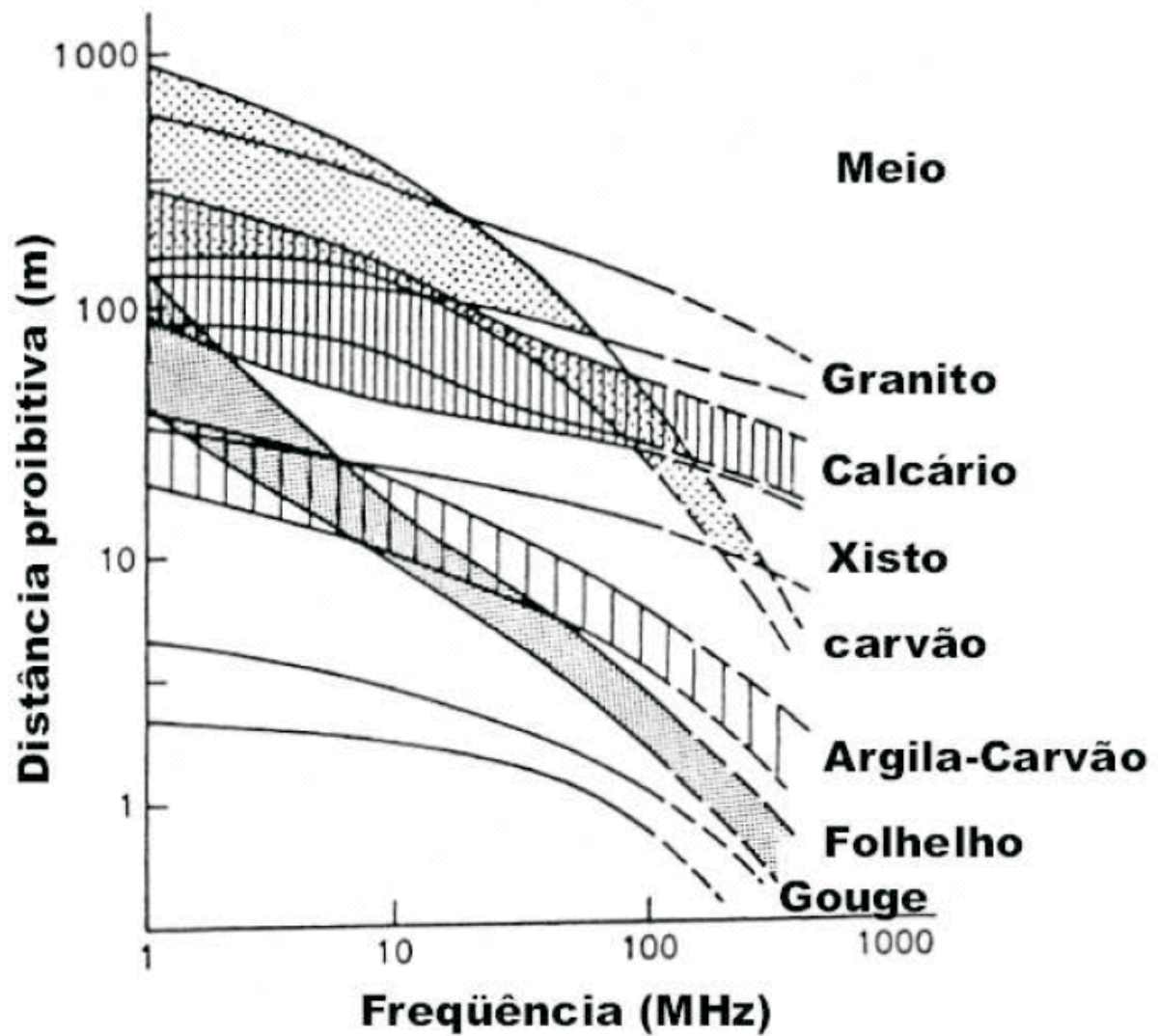


Figura 1.10: Distâncias proibitivas em função da frequência para diferentes materiais (Cook, 1975).

Material	ϵ_r	$V(mm/ns)$
Ar	1	300
Água doce	81	33
Água do mar	81	33
Neve polar	1,4 – 3	194 – 252
Gelo polar	3 – 3,15	168
Gelo temperado	3,2	167
Gelo puro	3,2	167
Lago congelado (água doce)	4	150
Gelo do mar	2,5 – 8	78 – 157
Permafrost (solo congelado)	1 – 8	106 – 300
Areia de praia	10	95
Areia seca	3 – 6	120 – 170
Areia saturada	25 – 30	55 – 60
Silte saturado	10	95
Argila saturada	8 – 15	86 – 100
Solo argiloso seco	3	173
Pântano	12	86
Campo agrícola	15	77
Campo de pastagem	13	83
Solo comum	16	75
Granito	5 – 8	106 – 120
Calcário	7 – 9	100 – 113
Dolomito	6,8 – 8	106 – 115
Basalto	8	106
Xisto	7	113
Arenito	6	112
Carvão	4 – 5	134 – 150
Quartzo	4,3	145
Concreto	6 – 30	55 – 112
Asfalto	3 – 5	134 – 173
PVC (polímeros)	3	173

Tabela 1.4: Valores das constantes dielétricas relativas e velocidades da onda eletromagnética para alguns materiais geológicos e artificiais (Reynolds, 1997).

Como muitos materiais, geológicos ou não, são misturas complexas onde cada componente tem suas propriedades físicas diferenciadas, o tamanho e a forma dos grãos dos diferentes materiais podem influenciar no comportamento elétrico e dielétrico do meio. Pelo fato das rochas poderem abrigar em seus espaços porosos diferentes fluidos essa questão tem grande relevância nos estudos envolvendo GPR, pois a presença de água na rocha, mesmo em pequenas quantidades, seja através de líquido livre ocupando os poros ou pela presença de minerais hidratados como a maioria das argilas, é suficiente para alterar a constante dielétrica relativa da rocha, visto que a água apresenta o maior valor de ϵ_r (81) entre os materiais geológicos, ver tabela 1.4. Além disso a presença de água em uma rocha também influencia na velocidade de propagação da onda eletromagnética, pois a velocidade da onda na água é de $3,3 \times 10^7$ m/s (0,033 m/ns) e de um arenito de baixa porosidade, ou seja, com baixo teor de água a velocidade é de $1,2 \times 10^8$ m/s (0,12 m/ns) (McCann et al., 1988), então, quando houver a presença de água em uma rocha, a menor velocidade de propagação da onda eletromagnética na água em comparação com a rocha que a contém, resultará na redução da velocidade da onda no meio.

A constante dielétrica relativa ϵ_r de materiais geológicos pode ser relacionada também com a porosidade da rocha ϕ , levando-se em consideração a proporção dos constituintes presentes e suas respectivas constantes dielétricas relativas. Esta relação entre ϵ_r e ϕ foi apresentada em Reynolds (1997) como sendo:

$$\epsilon_r = (1 - \phi) \epsilon_m + \phi \epsilon_w \quad (1.18)$$

onde ϕ é a porosidade, ϵ_m e ϵ_w são as constantes dielétricas relativas para a matriz da rocha e do fluido dos poros, respectivamente. Para a validade desta relação um campo externo deve ser aplicado paralelamente ao acamamento da rocha.

Quando um campo externo é aplicado perpendicularmente ao acamamento, tem-se:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon_m \epsilon_w}{(1 - \phi) \epsilon_m + \phi \epsilon_w} \quad (1.19)$$

Usando a relação simplificada onde $v = c/\sqrt{\epsilon_r}$, para materiais com baixa perda, onde c é a velocidade da luz no ar, e substituindo na equação 1.18 para ϵ_r , tem-se:

$$v = \frac{c}{[(1 - \phi) \epsilon_m + \phi \epsilon_w]^{1/2}} \quad (1.20)$$

Portanto, se for conhecida a constante dielétrica relativa de cada constituinte da rocha e se seu volume foi medido ou derivado a partir da velocidade da onda, então a porosidade total pode ser calculada.

Na determinação da porosidade, assume-se que o material é composto de uma matriz e de um espaço poroso preenchido (o que nem sempre acontece) por um fluido de constante dielétrica relativa conhecida.

A variação da velocidade da onda com a porosidade para materiais saturados com ar e com água é apresentada na figura 1.11. Nela, pode-se observar que a velocidade da onda diminui com o aumento da porosidade para meios saturados em água, enquanto que para meios saturados em ar, a velocidade aumenta.

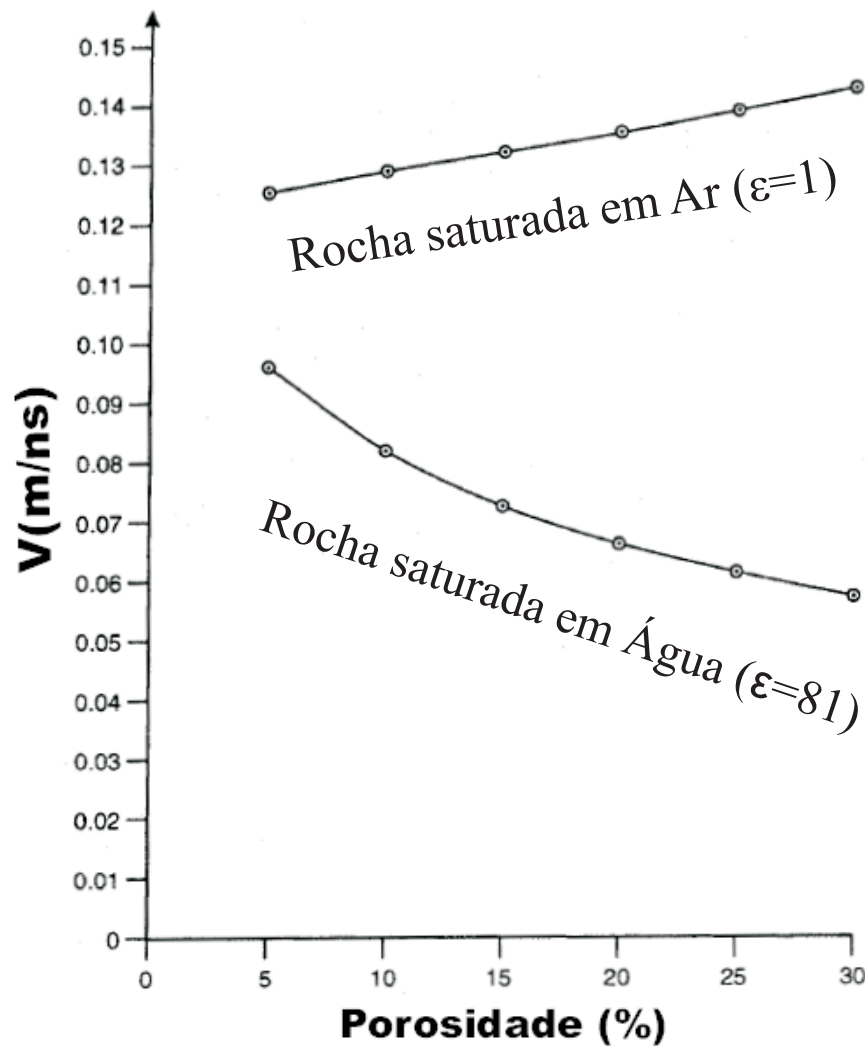


Figura 1.11: Velocidades da onda eletromagnética em função da porosidade para materiais granulares saturados com ar e água (Reynolds, 1997).

A condutividade elétrica é afetada pela geometria dos poros e pela área superficial destes. A argila não só afeta a comunicação física entre os poros, mas também provê diferentes áreas superficiais para a dupla polarização iônica (Reynolds e Taylor, 1992). Por exemplo, a caulinita ocorre como discos e a illita em forma de tiras (Klimentos e McCann, 1990) e (Klimentos, 1991). Portanto, a forma da argila pode afetar a área superficial dentro do espaço

poroso e é provável que, na escala da ordem de microns, a microporosidade tenha efeito mensurável nas propriedades elétricas. Por isso, o conhecimento das propriedades elétricas e dielétricas dos materiais é de extrema importância para se realizar um trabalho de GPR de alta precisão. Ressalta-se ainda que a constante dielétrica relativa apresenta alto grau de variabilidade, podendo variar mais de 50% em uma distância de menos de 0,1 m dentro do mesmo material, provocando também mudanças na velocidade das ondas de radar.

O trabalho desenvolvido por Botelho et al. (2003) apresenta resultados laboratoriais com testes de corpos arenosos saturados em água que comprovam a curva da rocha saturada em água do gráfico acima.

1.9 Aquisição dos dados

Para realizar levantamentos utilizando o método GPR é importante um bom planejamento a ser executado em campo, onde, a observação prévia de alguns aspectos relativos ao local de estudo torna-se indispensável à boa consecussão dos trabalhos.

Destacam-se entre esses aspectos o conhecimento aproximado da profundidade do alvo que, permitindo a escolha adequada das antenas, possibilitará o sinal do radar alcançá-lo. Também a geometria do alvo deve ser avaliada, como, tamanho, ângulo de mergulho e direção.

Como abordado anteriormente, é necessário que exista contraste nas propriedades elétricas dos materiais para que haja resposta do sinal emitido. Portanto, saber de que material é composto o alvo e a área que o circunda é importante a fim de se evitar uma campanha inviável.

Deve-se avaliar também questões relacionadas à logística da campanha, tais como, dificuldade de acesso (matas fechadas, lagoas, etc), topografia, entre outros. Assim como se há presença de possíveis fontes de ruídos eletromagnéticos, por exemplo, estruturas metálicas, torres de alta-tensão, antenas de rádio FM, etc.

Por último, pesquisar a existência de dados disponíveis de levantamentos geológicos, geofísicos e de poços da área investigada, que serão de extrema importância na etapa de interpretação.

1.10 Técnicas de aquisição de dados

Existem quatro modos para a aquisição dos dados com GPR: perfil de reflexão com afastamento constante ou “common offset”, reflexão e refração de grande abertura ou “wide aperture reflection or refraction” (WARR), ponto médio comum ou “common midpoint”

(CMP) e a transiluminação ou tomografia. A seguir são descritas estas técnicas.

Perfil de reflexão com afastamento constante

É o modo mais comum de operação. Nesta técnica as antenas, transmissora e receptora, são mantidas a uma distância fixa constante, sendo então transportadas ao longo do perfil obtendo-se como resultado um perfil onde, no eixo vertical, temos a medida do tempo duplo de viagem das ondas refletidas, enquanto no eixo horizontal estão as posições das antenas (distâncias). Como a distância entre as antenas é, geralmente, bastante pequena, as seções podem ser consideradas zero-offset. No entanto se essa distância for grande deve-se considerá-la no processamento dos dados. Esse perfil está ilustrado na figura 1.12 - a.

Perfil de reflexão e refração de grande abertura angular (WARR)

Neste modo uma das antenas permanece fixa enquanto a outra é afastada lateralmente na direção do perfil (Figura 1.12 - b). Para este tipo de perfil, a área investigada deve ter os refletores planos e/ou horizontais, ou com inclinação pequena, o que contraria a maioria dos casos.

Perfil do tipo CMP

Nesta técnica, ambas antenas são afastadas, só que em sentidos opostos na mesma direção do perfil, de forma que o ponto médio entre elas permaneça fixo. Este modo, ilustrado pela figura 1.12 - c, apresenta a vantagem de poder realizar vários tiros na mesma área, aumentando a precisão do método e permitido realizar análises de velocidade com mais precisão.

Transiluminação ou tomografia

Para este tipo de aquisição, as antenas transmissora e receptora são posicionadas em lados opostos do meio a ser investigado como em poços verticais lateralmente contíguos (Figura 1.12 - d). Este caso é chamado tomografia interpoços. Esta técnica pode ser utilizada em inspeção de colunas de concreto, galeria de minas subterrâneas, cavernas e outras aplicações.

1.11 Parâmetros de aquisição dos dados

Uma vez definido o objetivo do trabalho e tendo feito o planejamento da aquisição, assim como a viabilidade desta, é necessário definir e ajustar os parâmetros de aquisição dos dados, que são:

1) Frequência da antena: é definida de acordo com o objetivo do levantamento, como, a provável profundidade do alvo e sua geometria, pois a profundidade de penetração da onda do radar e a resolução são dependentes da frequência.

2) Frequência de amostragem (f_a): é controlada pelo conceito de frequência de Nyquist (f_n):

$$f_n = \frac{1}{2\Delta t} ; f_a = 2f_n \quad (1.21)$$

onde Δt corresponde ao intervalo de amostragem temporal.

3) Abertura da janela temporal (T_w): corresponde ao intervalo temporal em que a janela de tempo deve ser deixada aberta para que o sinal seja transmitido, refletido e captado pela antena receptora. Está vinculado à frequência de Nyquist:

$$T_w = \frac{N_a}{f_a} \times 1000 (ns) \quad (1.22)$$

onde N_a corresponde ao número de amostras.

4) Amostragem espacial: corresponde ao intervalo entre as estações (receptores) e, para evitar uma falsa amostragem, não se deve exceder o intervalo de amostragem espacial de Nyquist ($\lambda/4$ a $\lambda/2$).

5) Espaçamento entre as antenas: pode-se estimar a separação entre as antenas transmissora e receptora como sendo cerca de 20% da profundidade do alvo. Na prática, o espaçamento pode ser considerado igual ao comprimento das antenas.

6) Orientação do perfil: geralmente, os perfis são orientados perpendicularmente às estruturas em subsuperfície.

7) Orientação das antenas: normalmente orienta-se as antenas perpendicularmente à direção do perfil GPR, onde o campo elétrico do sinal irradiado será transversal a essa direção. As principais orientações das antenas de radar estão ilustradas na figura 1.13. Segundo Annan e Cosway (1992), se o objetivo do levantamento geofísico for a estratigrafia, a configuração ideal a ser utilizada é a PR-BD, enquanto que para localizar objetos enterrados, a configuração PL-BD seria mais apropriada. Isto porque, na aplicação estratigráfica a configuração PR-BD minimiza os efeitos de estruturas fora do plano da seção de radar. Já, para localizar objetos enterrados é fundamental a maior área de recobrimento fora do plano possível (configuração PL-BD), pois aumenta a probabilidade de atingir o alvo. A figura 1.14 mostra essas configurações e suas respectivas áreas de recobrimento das antenas.

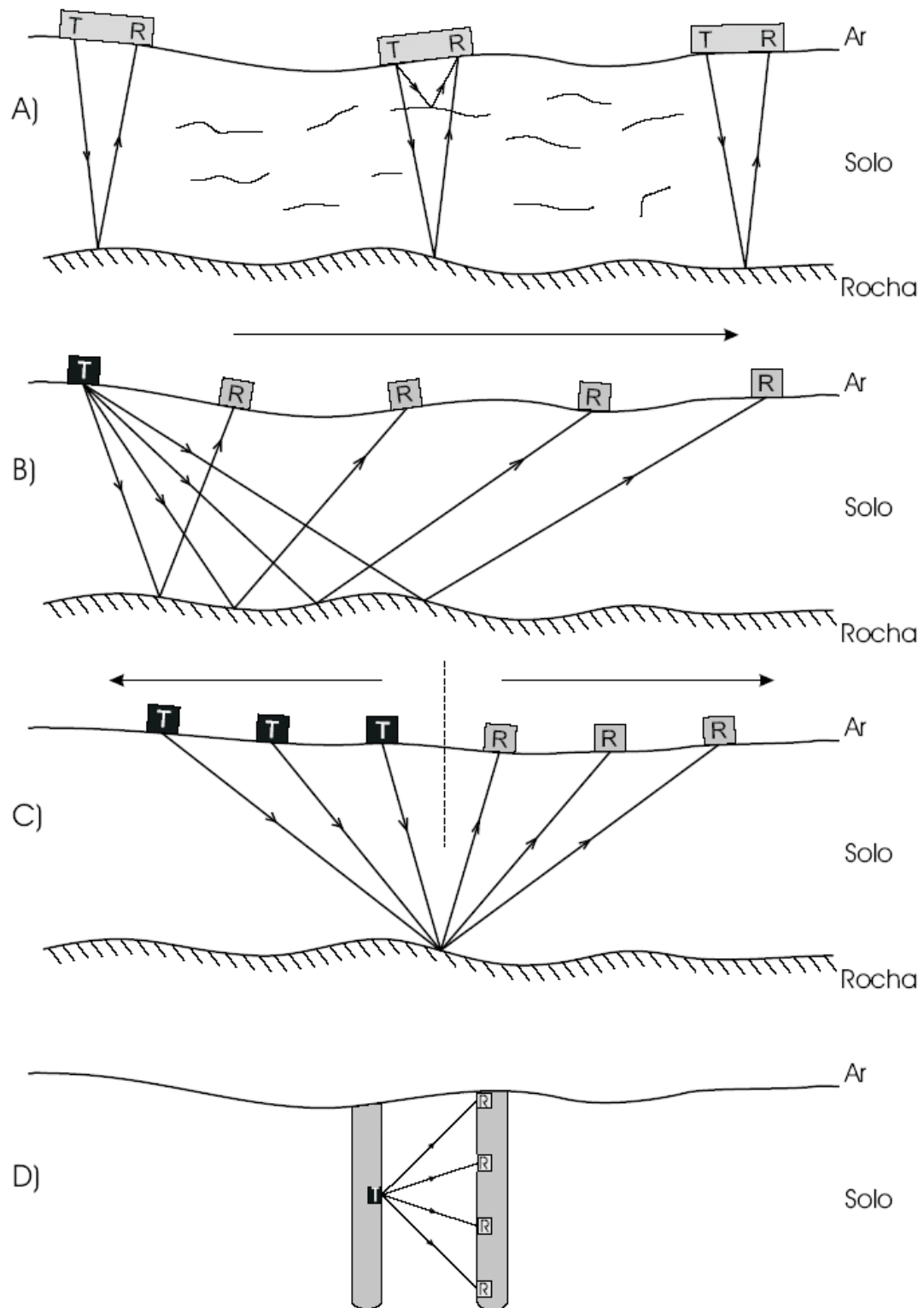


Figura 1.12: Principais técnicas de aquisição de dados de radar: a) Afastamento constante, b) WARR, c) CMP, d) Transiluminação (tomografia) (Pinto, 2007).

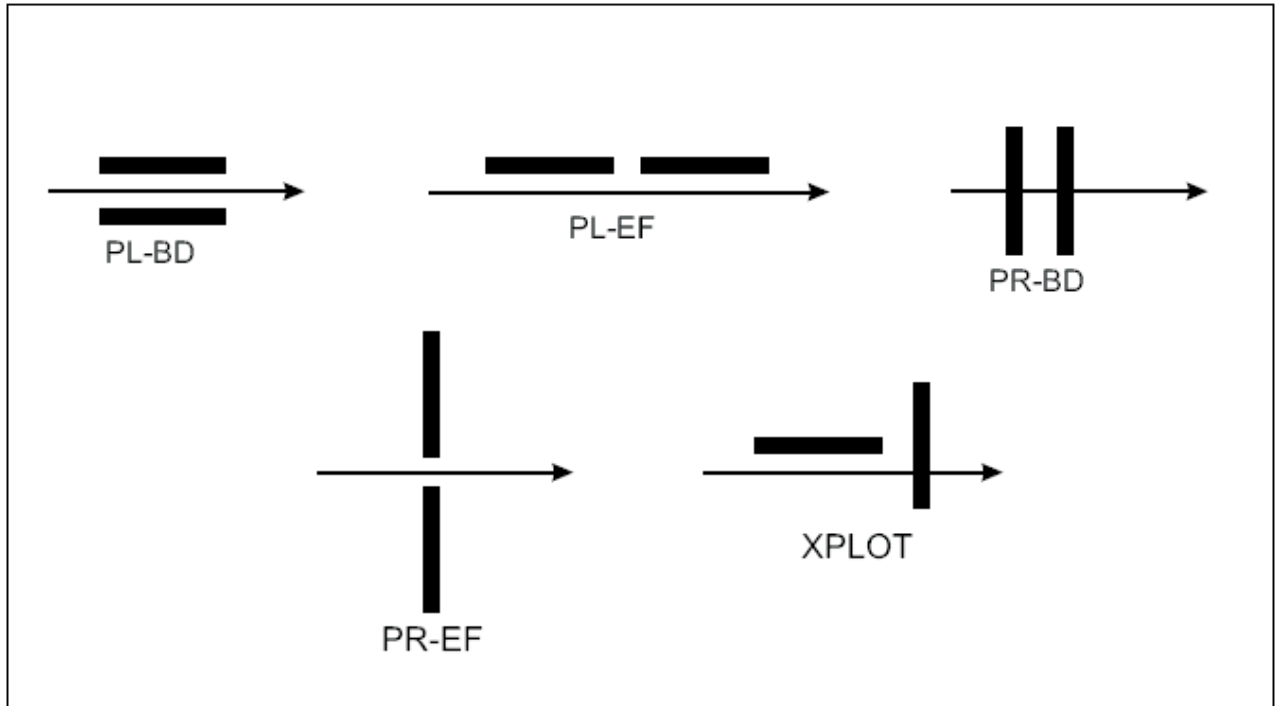


Figura 1.13: Modos de orientação das antenas de radar (Annan e Cosway, 1992).

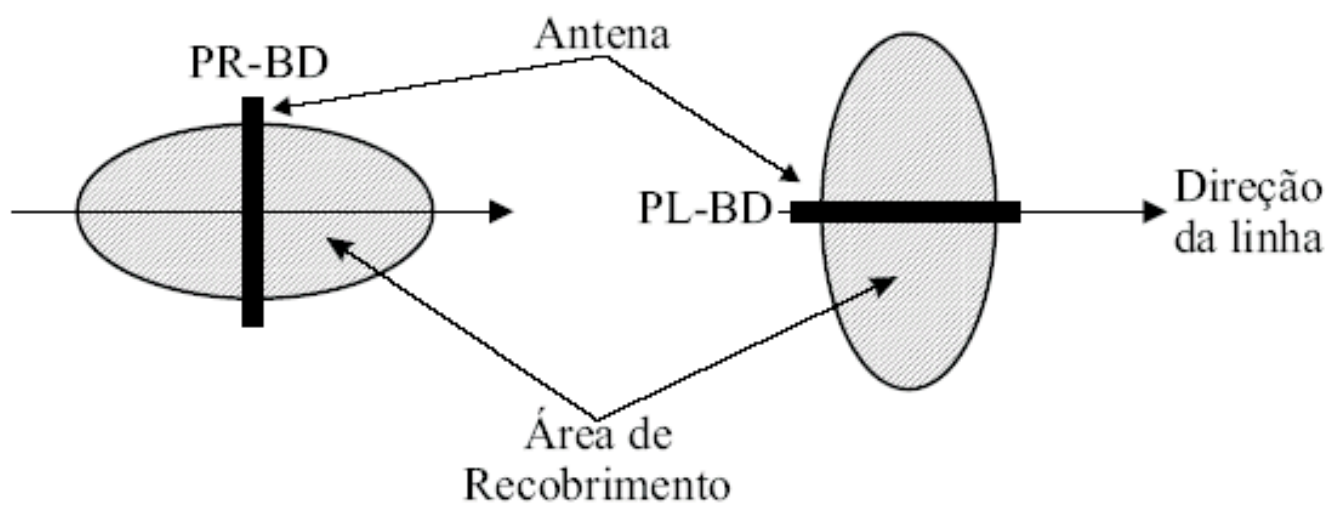


Figura 1.14: Área de recobrimento das antenas de GPR para as configurações PR-BD e PL-BD (Annan e Cosway, 1992).

CAPÍTULO 2

Geologia Regional

2.1 Introdução

A Mina Fazenda Brasileiro está situada na parte sul do Greenstone Belt do Rio Itapicuru, na região nordeste do estado da Bahia, e abriga depósitos de minério com concentrações auríferas, em parte associadas a sulfetos, que ocorrem em zonas de alteração hidrotermal dentro da seqüência vulcano-sedimentar denominada Faixa Weber.

O acesso à área é possível, partindo-se de Salvador, através da BR-324 até a cidade de Feira de Santana e depois via BR-116 até a cidade de Teofilândia, perfazendo um total de 210 km, de onde o percurso é completado percorrendo cerca de 12 km em estrada de terra até a Mina Fazenda Brasileiro (Figura 2.1).

2.2 Geologia do Greenstone Belt do Rio Itapicuru

Os terrenos granito-gnáissicos do embasamento do Cráton do São Francisco (Almeida, 1977), uma entidade geotectônica consolidada no proterozóico inferior, no ciclo Transamazônico a cerca de 2 Ga, abriga, em sua porção nordeste as seqüências vulcano-sedimentares, metamorfisadas em baixo grau, denominada de Greenstone Belt do Rio Itapicuru (Kishida & Riccio, 1980). Estes terrenos estendem-se por mais de 100 km no sentido norte-sul tendo largura média de 40 km.

Esta seqüência é circundada e intrudida por corpos félsicos, máficos e corpos granitóides caracterizados por estruturas dômicas elipsoidais que limitam lateralmente o greenstone, a sul e a oeste por rochas gnáissicas-migmatíticas e a leste por rochas fanerozóicas da Bacia de Tucano, conforme ilustrado pela Figura 2.2. O setor centro-sul do Greenstone Belt do Rio Itapicuru caracteriza-se pelo formato alongado dos domos granito-gnáissicos e domínios vulcano-sedimentares na seqüência supracrustal (vide Figura 2.2), resultantes da interferência de pelo menos quatro fases tectônicas compressivas, cujos esforços nem sempre estiveram atuando segundo direções coincidentes entre si (Teixeira, 1984).

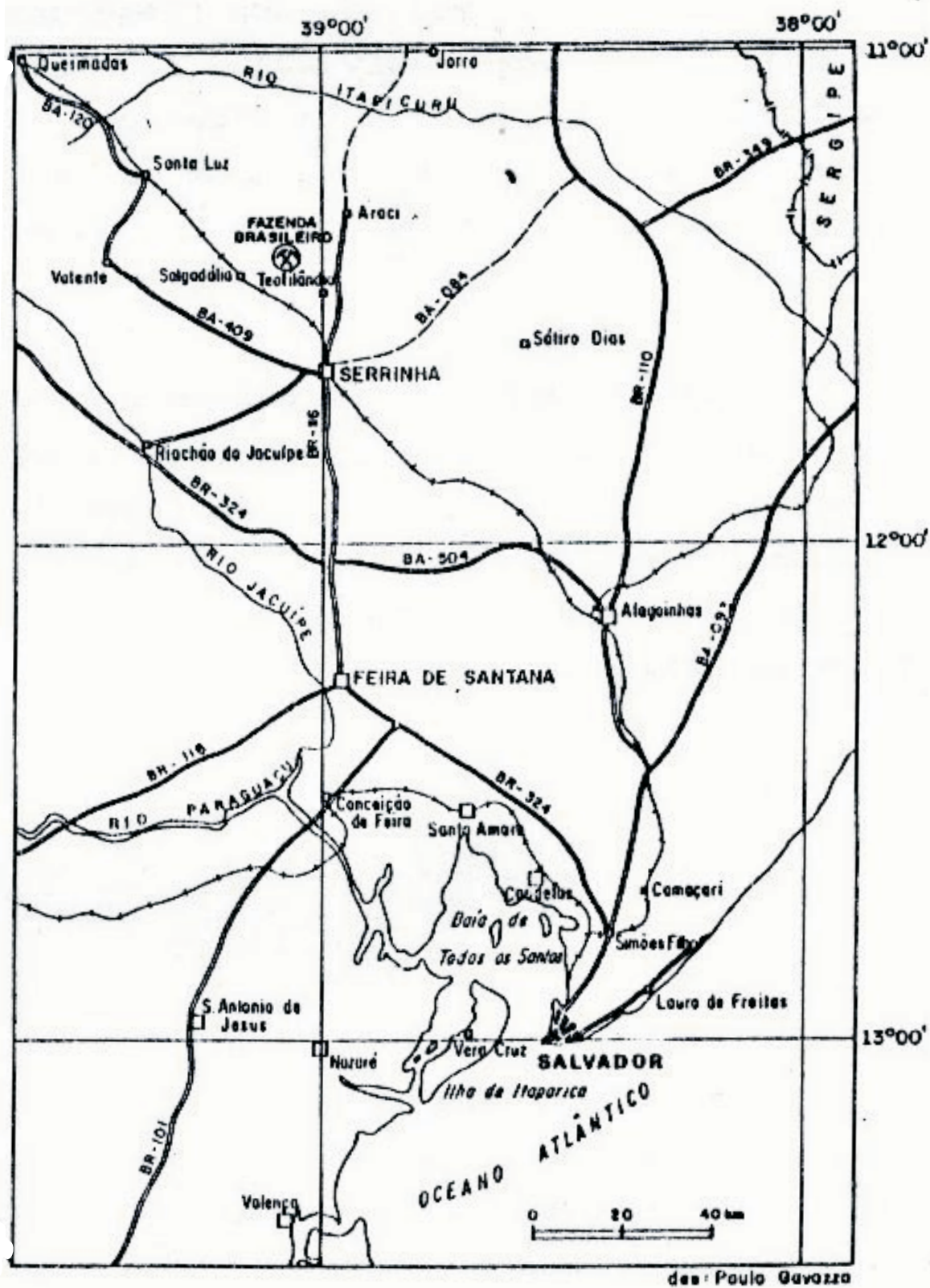


Figura 2.1: Mapa de localização da Mina Fazenda Brasileiro (Adaptado de Teixeira, 1984).

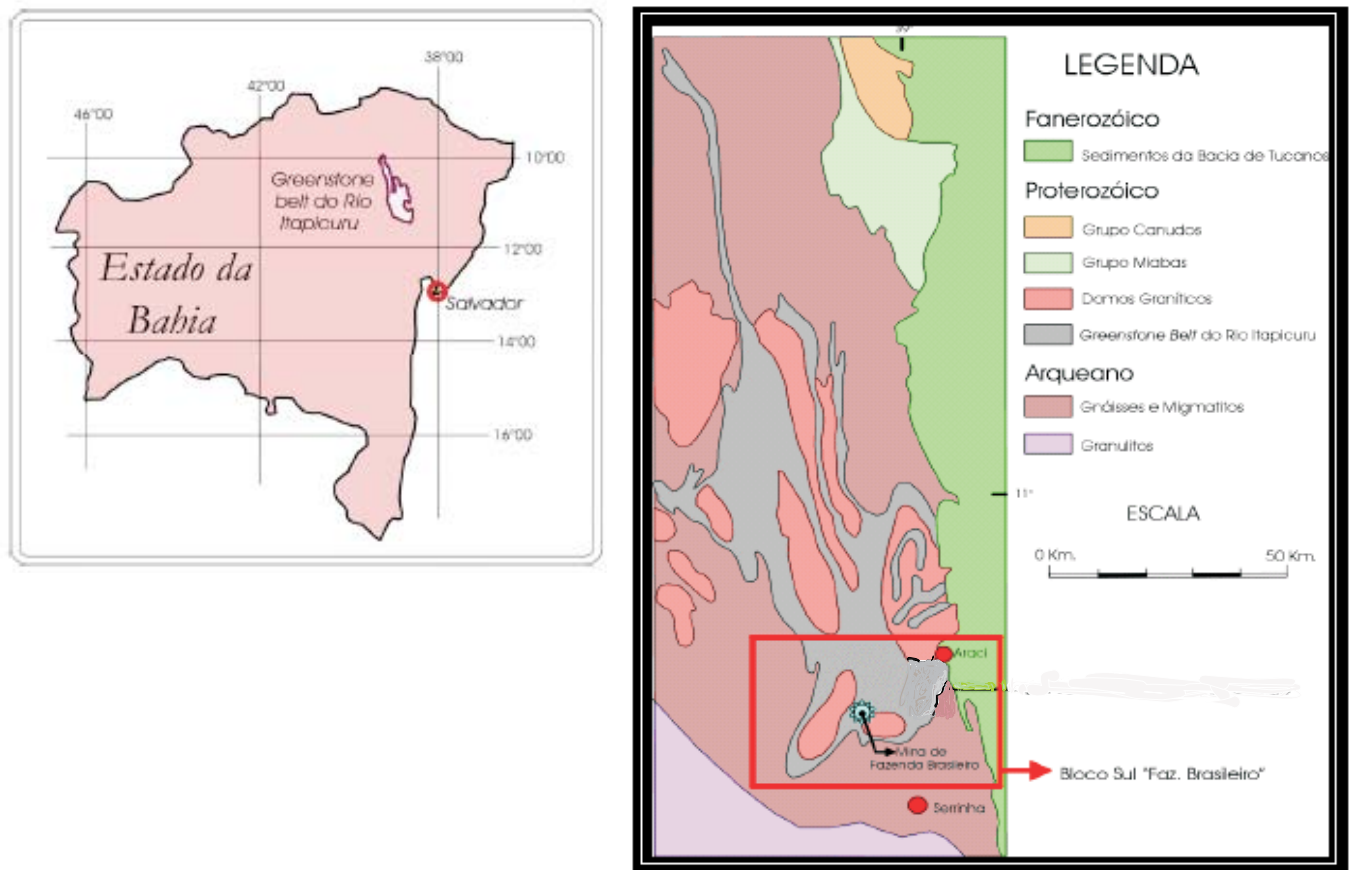


Figura 2.2: À esquerda, mapa de localização do Greenstone Belt do Rio Itapicuru. À direita, mapa geológico regional do setor centro-sul do Greenstone Belt do Rio Itapicuru, com destaque para a Mina Fazenda Brasileiro (Modificado de Rocha Neto, 1994).

2.3 Evolução Estrutural

O modelo tectônico do Greenstone Belt do Rio Itapicuru desenvolvido por Alves da Silva et al. (1993), apresenta três principais estágios com deformações progressivas no paleoproterozóico, sob um regime transpressivo e direção máxima de compressão NW-SE. No estágio inicial ocorreu o transporte tectônico para SE, associado com grandes cavalgamentos e dobramentos, onde apenas determinados locais apresentam boa preservação de fábricas e estruturas, como na porção S-SE do greenstone (Faixa Weber). O estágio intermediário é marcado pela cinemática de cisalhamento transcorrente sinistral N-S e pela colocação dos diversos domos granito-gnássicos (Domos de Salgadália, Barrocas, Teofilândia, Araci e outros). Este estágio gerou e/ou modificou a maior parte das estruturas e fábricas registradas no greenstone. O estágio tardio apresenta dobramentos regionais e marca o redirecionamento da porção sul do greenstone para a presente orientação E-W, esta mudança afetou a Faixa Weber através de zonas de cisalhamento E-W dextrais desenvolvidas ao longo do nível de CLX (clorita-xisto) (Reinhardt & Davison, 1991). A Figura 2.3 mostra esquematicamente esta evolução.

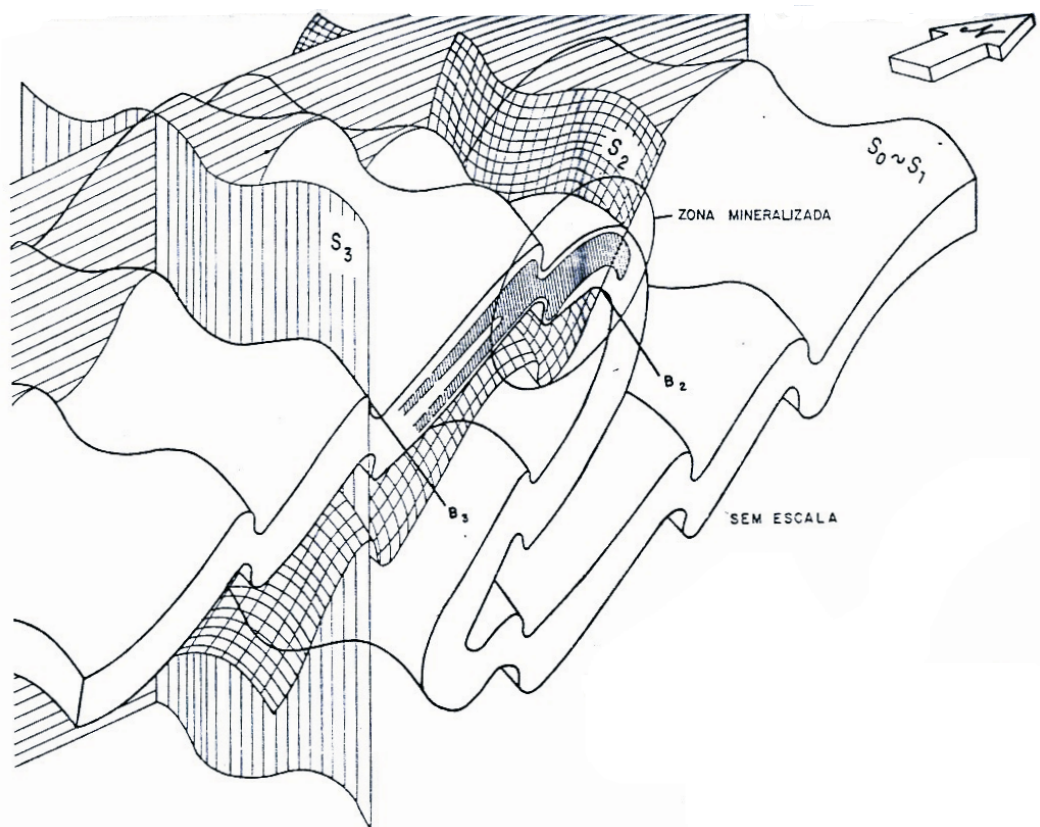


Figura 2.3: Bloco diagrama representando a interpretação estrutural para a área Fazenda Brasileiro, onde se observa o estilo de superposição de 4 fases de dobramento, todas afetando o *sill* estratigráfico (hachurado) (Modificado de Teixeira, 1984).

2.4 Tipos Litológicos Regionais

Os litotipos que formam o Greenstone Belt do Rio Itapicuru, podem ser agrupados em três grandes compartimentos: rochas supracrustais, granitóides intrusivos e intrusivas máficas. Sendo que cada um desses grupos são constituídos por subdivisões com litoestratigrafias características. Todas as unidades geológicas supracitadas que compõem o greenstone, bem como suas respectivas subdivisões, podem ser encontradas de maneira detalhada em Teixeira et al. (1982) e Silva (1983).

2.5 Litoestratigrafia da Faixa Weber

Localizada no extremo sul do Greenstone Belt do Rio Itapicuru, a Faixa Weber, corresponde a um trend arqueado com orientação essencialmente EW e com mais de 8 km de extensão. Três seqüências principais agrupadas segundo domínios de associações litológicas distintas compõem esta unidade geológica (Teixeira, 1984), sendo na base a Seqüência Riacho do Incó, no topo a Seqüência Fazenda Canto e na porção intermediária a Seqüência Fazenda Brasileiro que será descrita à parte no subitem a seguir.

Ao norte, tem-se a Seqüência Riacho do Incó representando a unidade basal, seria composta de metassedimentos pelíticos, com estruturas de turbiditos, apresentam algumas feições sedimentares primárias, como, estratificação gradacional, laminação convoluta, brechas intraformacionais e estruturas de escorregamento, isto num pacote com espessura em torno de 500 m. Ao sul, aparece a Seqüência Fazenda Canto que constitui o topo da Faixa Weber e seria composta de metabasaltos alterados e convertidos em xistos máficos, metassedimentos carbonosos e metagabros com granulometria variando de fina a grosseira, e teria espessura superior a 1000 m. As Figuras 2.4 e 2.5 ilustram a Faixa Weber com suas respectivas litologias.

2.5.1 Seqüência Fazenda Brasileiro

Localiza-se na porção intermediária da Faixa Weber e hospeda o maior corpo mineralizado da área. Esta unidade litoestratigráfica, de cerca de 100 m de espessura, consiste de metapelitos carbonosos associados a chert, constituindo uma camada fina de grande continuidade lateral formando a capa da intrusão máfica, ao longo de toda a sua extensão, sendo por isso denominado “horizonte guia” na área da jazida. Essa rochas estão associadas a metabasaltos e pertencem a base da Seqüência Fazenda Canto.

O cisalhamento e a alteração hidrotermal que afetou as rochas gabróicas, um *sill* colocado entre a Seqüência Fazenda Canto no topo e a Seqüência Riacho do Incó na base,

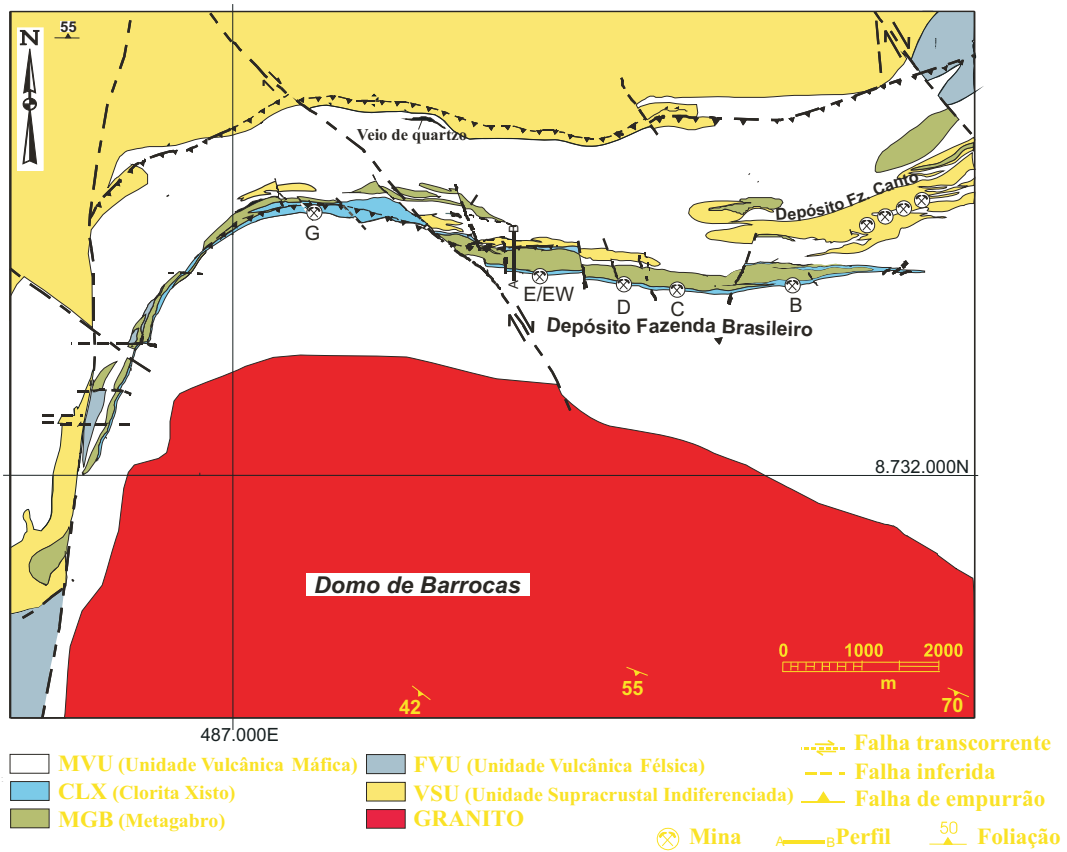


Figura 2.4: Mapa geológico do distrito aurífero de Fazenda Brasileiro (Modificado de Silva, Coelho et al. 2001).

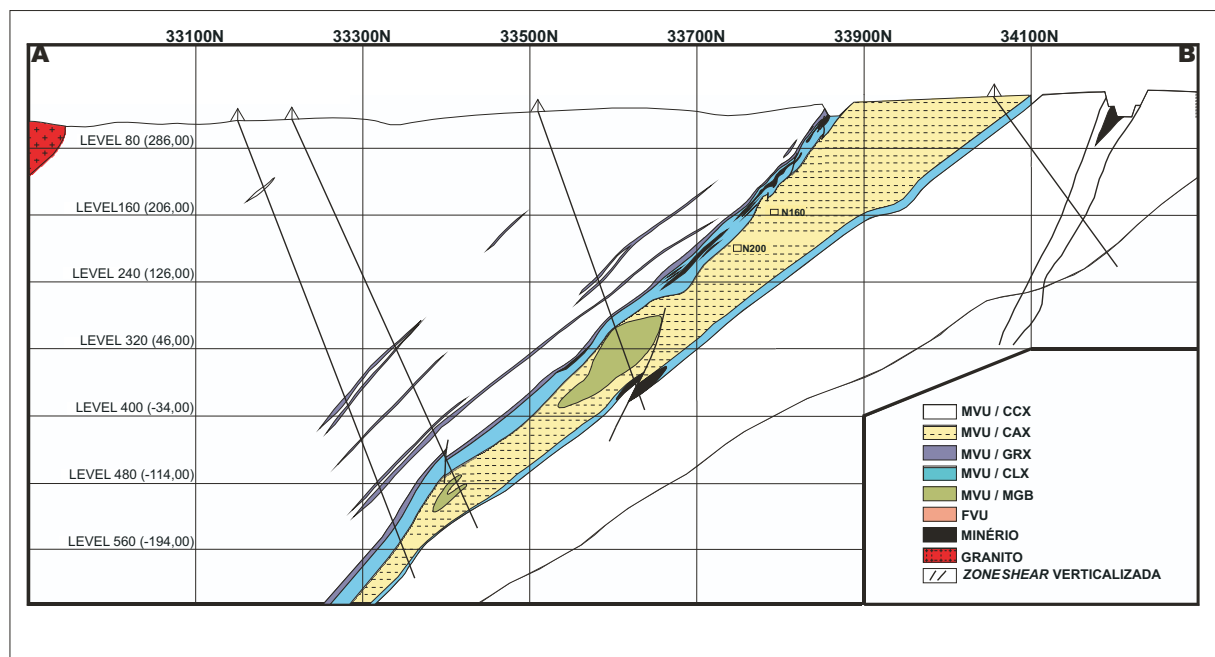


Figura 2.5: Perfil geológico da Faixa Weber (Silva, Coelho et al. 2001).

produziu, entre outros minerais, um quartzo-clorita xisto (CLX) esverdeado que quando muito rico em magnetita é denominado xisto magnético (XM) (Silva, Coelho et al. 2001). O xisto magnético ocorreria ao longo de 2 níveis paralelos e dobrados e encerraria lentes de uma rocha brechada, de composição essencialmente quartzo-feldspática, que seria a principal hospedeira da mineralização aurífera (Figura 2.4), esta, associada a sulfetos, principalmente pirita e arsenopirita (Teixeira, 1984). O *sill* gabróico citado acima compreende a maior parte da Seqüência Fazenda Brasileiro sendo formado por três tipos litológicos: metagabro na base, gradando a metaferrogabro na parte intermediária e meta-anordosito no topo da intrusão (Figura 2.5).

Uma rocha classificada como intrusiva félsica sub-vulcânica de composição riodacítica ocorre sob forma de *sills* dentro da camada “horizonte guia” ou na forma de estreitos diques cortando a intrusão máfica. Esta rocha como as demais que compõem a Seqüência Fazenda Brasileiro estão ilustradas em seção esquemática na Figura 2.6.

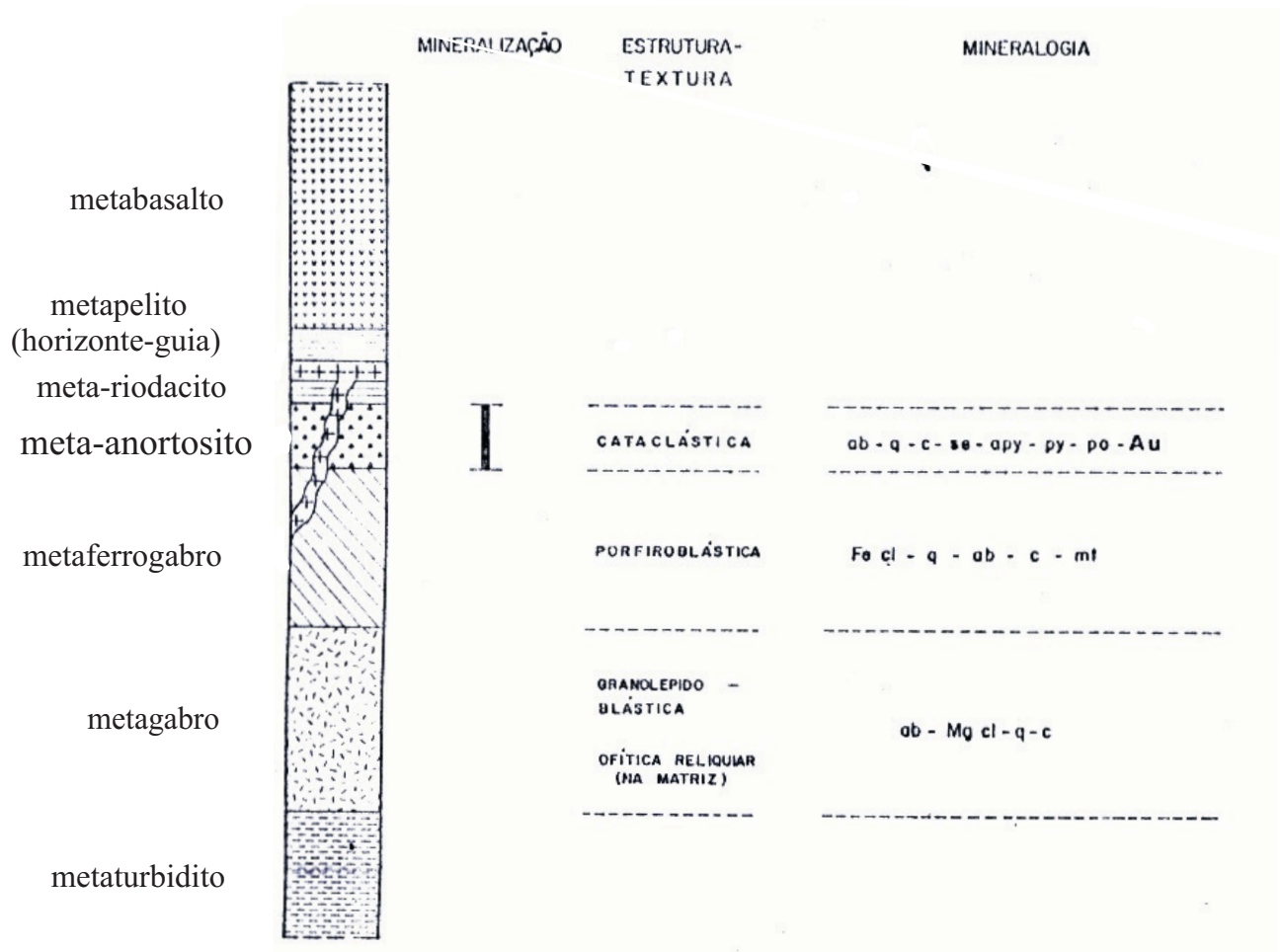


Figura 2.6: Seção esquemática através do *sill* estratificado de Fazenda Brasileiro, mostrando a localização dos corpos de minério estrato-controlados (Teixeira, 1984).

CAPÍTULO 3

Processamento e Interpretação dos Dados de Radar

O processamento dos dados de radar pode ser realizado utilizando-se muitas das etapas aplicadas para o processamento sísmico devido às similaridades cinemáticas entre os métodos. Este fato permite que se possa utilizar para o tratamento dos dados de GPR uma gama de softwares usados no processamento sísmico.

As principais etapas no processamento dos dados de radar serão apresentadas abaixo. A escolha da rotina a ser empregada no processamento dos dados se dará de acordo com as necessidades do intérprete, onde uma ou mais etapas podem ser preteridas ou repetidas dentro da mesma rotina. No presente trabalho o processamento dos dados foi realizado utilizando-se o software RADAM 6.5 (GSSI, 2005) com as imagens da subsuperfície sendo apresentadas através de radargramas na forma “gray scale”. A rotina adotada foi a correção do tempo zero, ganho exponencial, filtragem passa-banda, conversão tempo-profundidade.

3.1 Procedimento empregado na aquisição

Neste trabalho, os dados foram adquiridos com o equipamento SIR SYSTEM 2000 fabricado pela GSSI, com antenas de frequência central de 200 MHz, sendo armazenados no disco rígido da CPU do mesmo. Foram realizados 9 perfis com o radar seguindo as disposições espaciais que estão ilustradas nas figuras do corrente capítulo que contém imagens da área. Cada perfil foi registrado a partir de uma configuração designada por perfil contínuo ou seção de afastamento constante utilizando antenas no modo monoestático com espaçamento de 0.5 m entre elas. Os equipamentos modernos de GPR permitem um pré-processamento dos dados durante a fase de aquisição que é fundamental para se avaliar a qualidade dos dados registrados dando segurança à continuidade do levantamento.

3.2 Pré-Processamento de campo

Como citado acima, esta etapa visa avaliar a qualidade dos dados registrados, com o objetivo de se verificar a presença de interferências provenientes da superfície como, cercas metálicas, redes elétricas, edificações, entre outros objetos. Nesta etapa é feita a edição dos dados, eliminando traços de má qualidade, corrigindo possíveis erros no cabeçalho, mudar a polaridade dos traços, etc. É possível ainda nesta etapa a aplicação de ganhos para realçar as amplitudes dos refletores e de filtros para diminuir o ruído. No entanto, recomenda-se aplicar filtros com bandas largas e não exagerar nos ganhos a fim de se preservar os dados para posterior realização do processamento com os softwares apropriados.

3.3 Aplicação de ganhos

O controle de ganho é utilizado na correção da redução de amplitude do sinal adquirido, devido à atenuação da onda no meio de propagação em subsuperfície, realçando assim os refletores mais profundos.

Os tipos de ganho mais comumente utilizados são o controle de ganho automático (AGC), que amplifica ou atenua a amplitude de todos os pontos ao longo de um traço para um nível determinado, e a compensação esférica e exponencial (SEC), sendo aplicada numa determinada janela de tempo que contém informações de maior interesse, sem afetar o restante da seção.

3.4 Filtragem DC (dewowing)

Etapa na qual um filtro é aplicado visando remover dos dados os componentes de frequências muito baixas que estão associados à saturação eletrônica do receptor, devido à alta energia das ondas aérea e terrestre.

3.5 Filtragem temporal

A filtragem temporal, embora de simples aplicação, é a ferramenta mais potente na análise de dados GPR, pois conhecendo-se o espectro de amplitude do sinal em função da frequência pode-se determinar a região desse espectro que concentra a maioria das amplitudes em torno da frequência desejada que, como dito no capítulo 1, deve estar próxima da frequência central da antena usada na aquisição dos dados. Assim aplicam-se os filtros corta-baixa e corta-alta para remover as bandas de frequência relacionadas a sinais espúrios realçando deste modo as estruturas que estão sendo investigadas.

3.6 Filtragem espacial

Tipo de filtro que permite remover ou realçar os diferentes tipos de variação espacial, ou seja, determinados eventos registrados. Através desta filtragem é possível realçar a continuidade lateral dos refletores horizontais, de interesse na estratigrafia, eliminando os refletores inclinados, os ruídos aleatórios e difrações, para tanto utiliza-se filtro passa-baixa, do tipo “média-móvel”. Já se o interesse for realçar os eventos localizados, tais como refletores pontuais e/ou refletores inclinados deve-se aplicar filtragens passa-alta do tipo “remoção do background”.

3.7 Deconvolução

Etapa do processamento que visa aumentar a resolução temporal do sinal a partir da compressão do pulso de radar. Esta etapa pode ser usada para atenuar reflexões múltiplas presentes nos dados. Entretanto, a eficácia desta ferramenta no processamento de dados de GPR ainda é discutida entre os pesquisadores.

3.8 Migração

A finalidade desta etapa do processamento é posicionar os diferentes refletores da seção de radar na sua verdadeira posição espacial representando assim a melhor imagem da subsuperfície. As distorções que causam o deslocamento dos refletores de suas posições originais derivam do fenômeno da difração que produz o espalhamento da energia da onda de radar distribuindo-a ao longo de um domínio maior do que a extensão exata dos refletores correspondentes na seção de afastamento nulo ou zero-offset. No entanto, para se obter êxito na aplicação desta etapa é necessária uma boa estimativa da velocidade de propagação da onda no meio geológico, pois quanto mais precisa for a medida dessa velocidade melhor será a conversão do tempo duplo de viagem da onda em profundidade.

É importante ainda destacar que a migração não é útil quando o interesse da investigação for tubulações enterradas, ou outros tipos de objetos 2D e 3D enterrados, pois as feições característica desses objetos, que são hipérboles apertadas, serão colapsadas na migração perdendo a referência das anomalias na seção. Neste caso utiliza-se a migração apenas para realizar a conversão tempo-pronfundidade, apresentando os dados sem a migração, destacando-se as feições hiperbólicas.

3.9 Interpretação dos dados

Como citado no início deste capítulo os dados processados são apresentados através de radargramas tendo sido escolhido o formato linescan, com tonalidades de cinza, para tanto. Porém existem outras formas de apresentação dos dados de radar como, por exemplo, o formato wiggle trace, que, como na sísmica de reflexão, mostra os traços individualizados, útil no estudo da amplitude do sinal em função do tempo.

A escolha da exposição dos dados ficará a cargo do intérprete que deverá defini-la de acordo com os objetivos do levantamento, facilitando a interpretação dos dados. As seções de GPR podem apresentar feições como, refletores com continuidade horizontal, refletores de objetos 2D e 3D (hipérboles apertadas), refletores com descontinuidade lateral, e também reflexões causadas por fontes de interferência (cercas metálicas, postes, edificações, redes de alta-tensão, etc.), estas são caracterizadas por feições hiperbólicas abertas.

Os perfis que são apresentados nos itens a seguir contêm, cada um, imagem correspondente à área onde foi feito o levantamento com a disposição espacial da linha de aquisição, acompanhados de suas respectivas interpretações.

3.9.1 Interpretação dos radargramas obtidos na antiga planta de lixiviação

O primeiro perfil de radar foi realizado em uma pista de acesso lateral à antiga usina de lixiviação (Figura 3.1) tendo como referência para o ponto de partida a pedra indicada pela seta amarela e como ponto de chegada o final da linha de aquisição junto a uma cerca com tela de arame, vide Figura 3.2 (a cerca pode ser melhor vista na Figura 3.7). A trajetória percorrida pelo GPR tem extensão de 35,9m, marcado pela trilha vermelha na citada figura. O radargrama correspondente a este perfil (Figura 3.3) nos permite observar nos intervalos entre 6 a 13m e 25 a 28m zonas de atenuação de radar que podem estar associadas à mudança de material para mais argiloso, ou zonas saturadas por água ou ainda contendo substâncias muito condutivas, como por exemplo, derrames de ácidos. No ponto 1 nas distâncias de 15.0 e 15.5m cruzamos duas tubulações, com a primeira aflorante como pode ser visto nas Figuras 3.1 e 3.2, ambas a uma profundidade de 0.20m. Os tubos posicionados a 19.0 e 19.5m do início do perfil também foram estimados à profundidade de 0.20m. Estes podem ser vistos na Figura 3.5 confirmando os dados de radar após realizadas as escavações. No ponto 3 à distância de 24.00m e uma profundidade estimada de 0.30m também é verificada uma anomalia associada a uma tubulação que sai da usina e termina no reservatório e que pode ser visto na Figura 3.6. O ponto 2 à distância de 21.5m e profundidade estimada de 0.20m apresenta um pequeno refletor podendo ser interpretado como um cabo. Por último, ao final do perfil, no ponto 4, distante 36.0m do ponto de partida da linha de aquisição e apresentando profundidade aproximada de 0.20m constata-se a presença de mais uma anomalia associada

a um tubo que pode ser verificado na Figura 3.7. Nesta Figura, o ponto 2 refere-se ao perfil 2 que será mostrado a seguir, mas a título de comparação este ponto corresponde ao ponto 4 do perfil 1.



Figura 3.1: Vista lateral da usina de lixiviação, onde se iniciou o levantamento geofísico com o GPR.

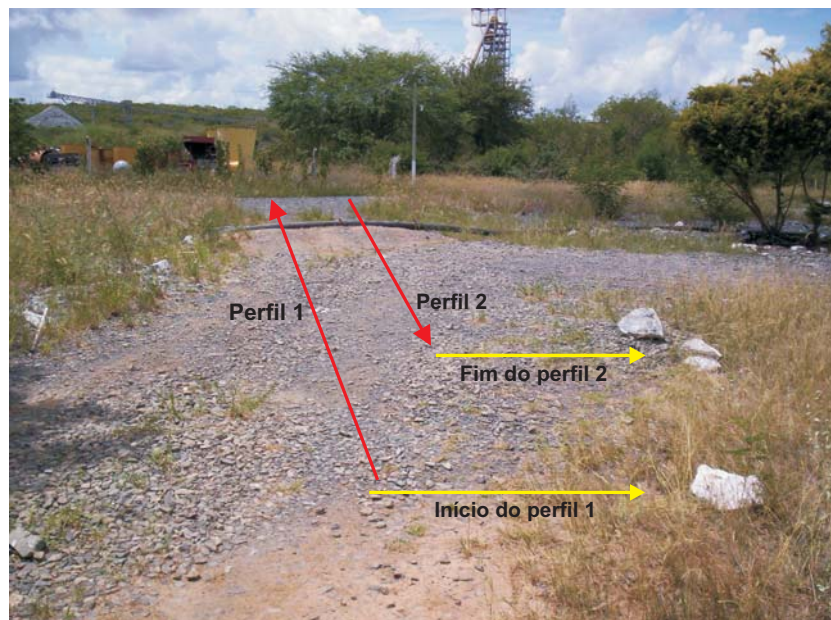


Figura 3.2: Representação das trajetórias de levantamento dos perfis de GPR com afastamento constante, onde pode-se vislumbrar o ponto de saída e chegada dos dois perfis e também de uma tubulação aflorante no trajeto dos perfis.

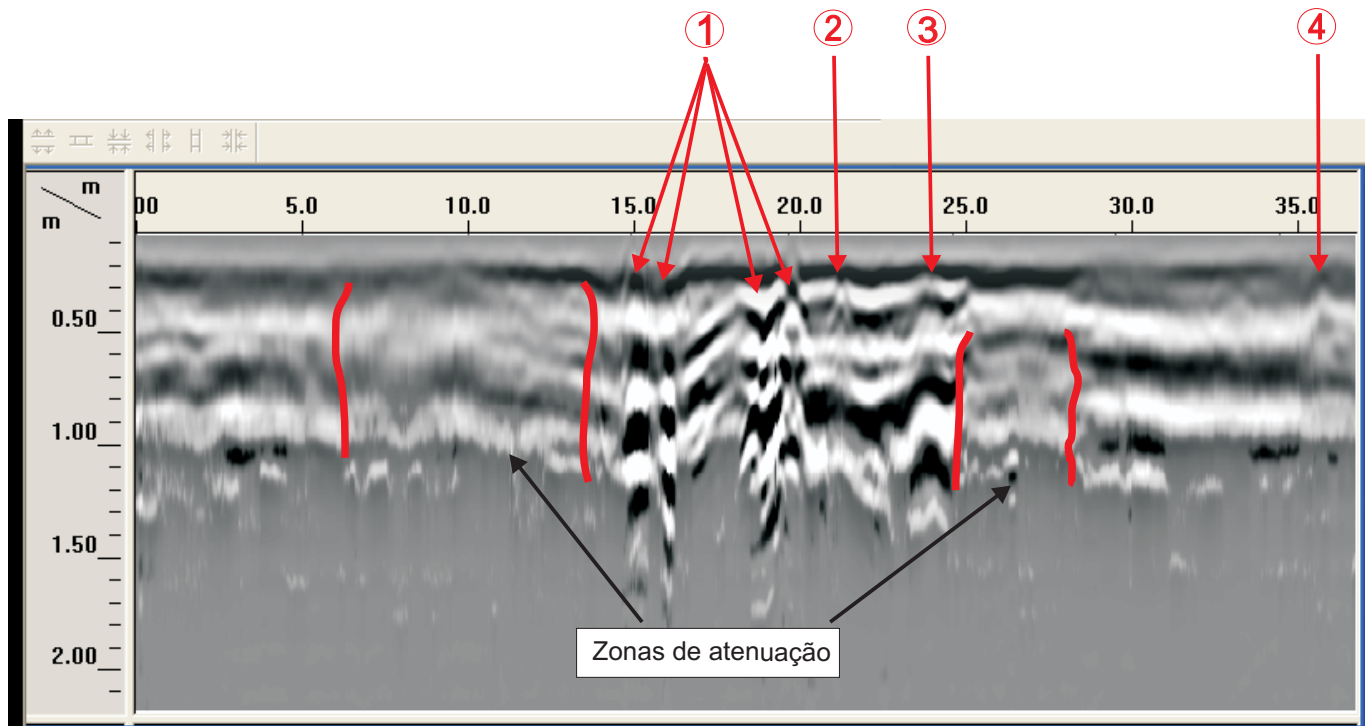


Figura 3.3: Radargrama correspondente ao perfil 1.

O perfil de radar correspondendo a volta, subparalelo ao levantamento anterior, é apresentado no radargrama da Figura 3.4, tendo início da linha de aquisição do perfil a cerca com tela de arame citada na descrição do perfil anterior e o seu fim na seta amarela indicada na Figura 3.2. Nele podemos verificar que os pontos indicados como 3 e 4 representam respectivamente os pontos 1 e 3 da Figura 3.3. Este segundo perfil, mostrou nos pontos 1 e 2 interferências associadas a duas tubulações existentes e possíveis de ser ver na imagem da Figura 3.7 feita após a escavação. No primeiro ponto o tubo está próximo à posição inicial de funcionamento da antena do radar e no segundo ponto o tubo está a uma distância de 1.5m do início do perfil, ambos a uma profundidade estimada de 0.30m. Esta seção, que tem comprimento de 32,7m, apresentou um resultado com menor contraste de amplitude do sinal de radar do que a seção anterior.

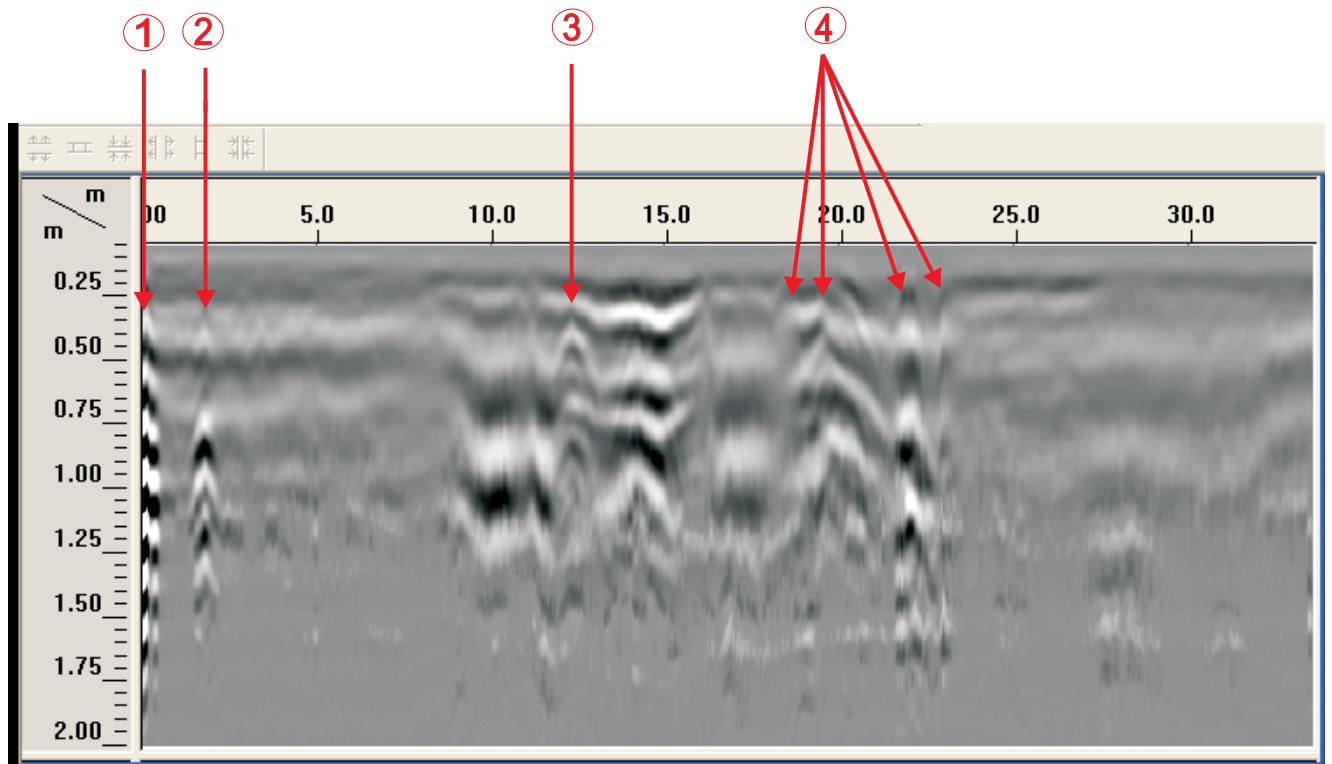


Figura 3.4: Radargrama correspondente ao perfil 2.



Figura 3.5: Imagem mostrando duas tubulações desenterradas que correspondem as anomalias à 19.0m e 19.5m de distância do início do perfil 1.

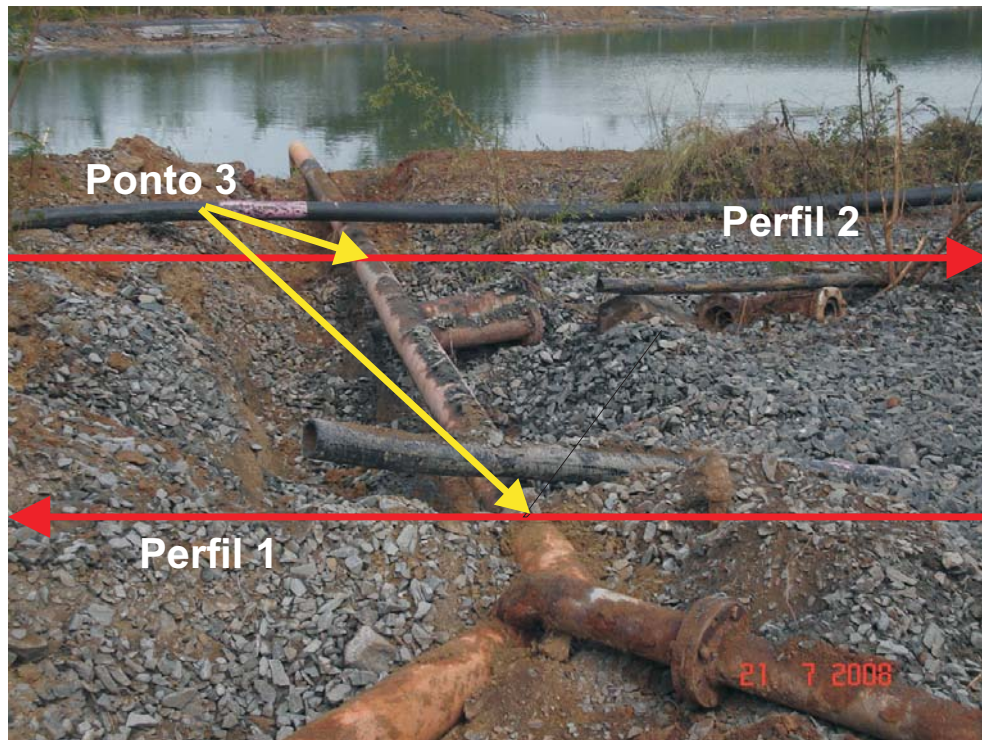


Figura 3.6: Imagem mostrando outra tubulação desenterrada desta feita correspondente ao ponto 3 dos perfis 1 e 2.



Figura 3.7: Imagem mostrando no início do perfil 2 duas tubulações que correspondem às interferências 1 e 2 do mesmo perfil.

Na Figura 3.8 está indicado o perfil 3 cujo radargrama é mostrado na Figura 3.9, esse perfil tem comprimento de 56,15m e com início da trajetória percorrida pelo GPR no rumo da seta amarela indicada na Figura 3.8 (tem uma pequena árvore que não aparece nesta Figura que serve como referência para o início desta seção) e seu término próximo ao poste no final da linha do perfil indicada pela trilha vermelha na mesma Figura. Observa-se aqui interferências nos pontos 1 e 3 indicando a existência de tubulações, sendo que, no ponto 1 aparecem três setas indicando as interferências à distância de 14.0, 15.0 e 18.5m do ponto de partida da seção, todas à profundidade estimada de 0.35m, enquanto no ponto 3 estão indicadas duas anomalias, a primeira à distância de 38.5m do início do perfil e 0.35m de profundidade e a segunda à distancia de 43.5m e profundidade de 0.45m. No ponto 2, à 32.5m de distância do início do perfil, existe a possibilidade de se ter algum corpo porém não está bastante visível a sua feição estando à profundidade de 0.40m. Já no ponto 4 as interferências registradas apresentam a forma de uma pequena vala preenchida com material condutivo onde as setas indicariam as paredes desta vala. Nota: Este perfil por ter sido longo não coube na forma de visualização de apenas um radargrama, sendo feita uma pequena junção do dado restante que pode ser visto na Figura 3.9. Este fato se deve a uma limitação do próprio software.



Figura 3.8: Imagem ilustrando a trajetória de levantamento deste perfil, bem como, a referência de seu início (seta amarela). Pode-se ver também o equipamento empregado no presente trabalho, neste caso, um SIR SYSTEM 2000 fabricado pela GSSI com antena de frequência central de 200 MHz (o CPU que armazena os dados não pôde ser visto na imagem).

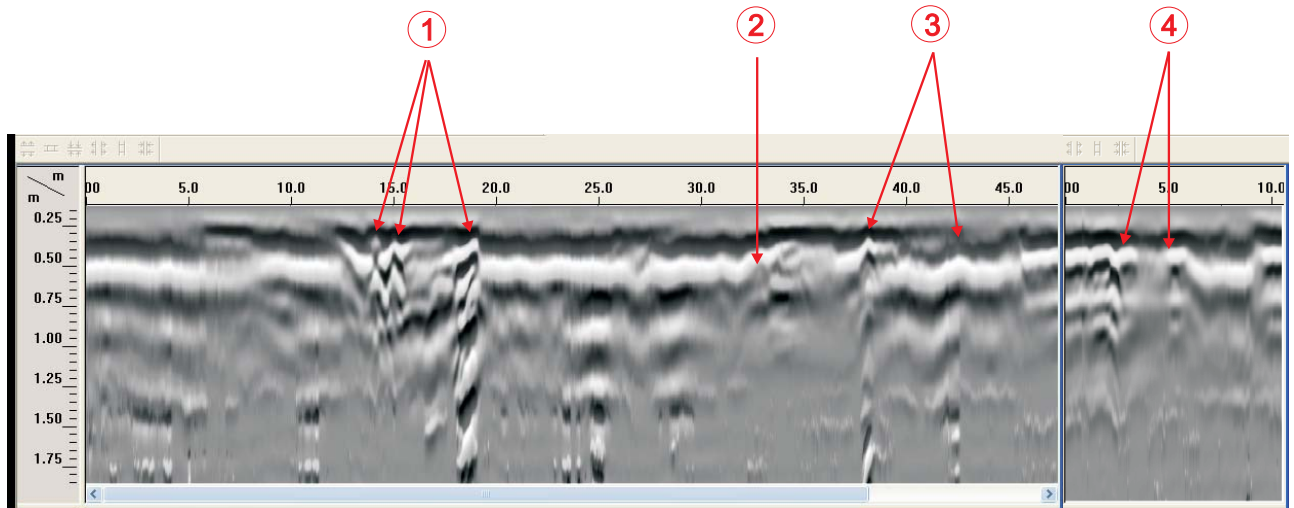


Figura 3.9: Radargrama correspondente ao perfil 3.

As duas próximas seções foram realizadas em linhas de aquisição subparalelas tendo os seus pontos de partida e de chegada com orientações inversas, mas próximos como mostra a Figura 3.10. Os resultados estão expressos nos radargramas apresentados nas Figuras 3.11 e 3.12, que correspondem, respectivamente, ao perfil de ida na direção da seta vermelha (sentido do chuveiro visto ao fundo na Figura 3.10 e que marca o final deste perfil) e o perfil de volta ao lado em sentido contrário. Estes perfis foram feitos entre os reservatórios da usina e tiveram, ambos, o comprimento de 43,45m. Comparando-os podemos constatar a coerência de algumas anomalias registradas, destacando-se os pontos 2 e 3 do perfil 4 e indicados na Figura 3.11 e distando do início da seção 28.0 e 35.0m, respectivamente, a uma profundidade de 0.20m, tendo como anomalias correspondentes no perfil 5 de retorno os pontos 2 e 1 do perfil 5 da Figura 3.12, que são interpretados como interferências devido à existência de tubos, sendo que foi constatada uma tubulação após a escavação como mostra a Figura 3.13 correspondendo nos dois perfis ao ponto 2. Também houve concordância entre os perfis 4 e 5 nas interferências próximas identificadas no ponto 1 do perfil 4 que corresponde ao ponto 3 do perfil 5, podendo ser interpretados também como tubulações. Já o ponto 4 do perfil 4 apresenta uma reflexão que pode estar associada a um corpo enterrado estando a 37,5m de distância do início da aquisição e profundidade de 0.60m. No perfil 4 também foi possível identificar mais uma anomalia indicada no ponto 4, ocorrendo a 36.0m de distância e avaliada em 0.50m de profundidade, assim como, duas zonas de atenuação de radar, a primeira entre o intervalo de 0 a 6.5m e profundidade estimada em 0.45 e 1.20m e a segunda entre 15.5 e 25.0m à mesma profundidade, resultantes, possivelmente, dos mesmos fenômenos citados para as atenuações da Figura 3.3. Nos dois perfis observa-se ainda a existência de uma zona de atenuação de radar no início da seção para o perfil 4 e ao final para o perfil 5. As causas seriam as mesmas das outras zonas de atenuação.

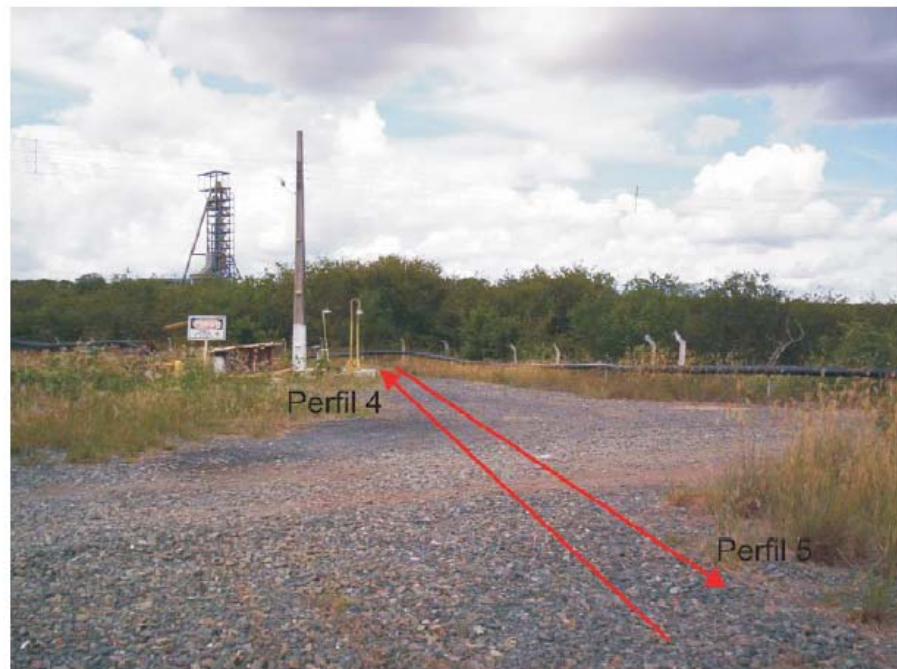


Figura 3.10: Representação das linhas de aquisição dos perfis 4 e 5.

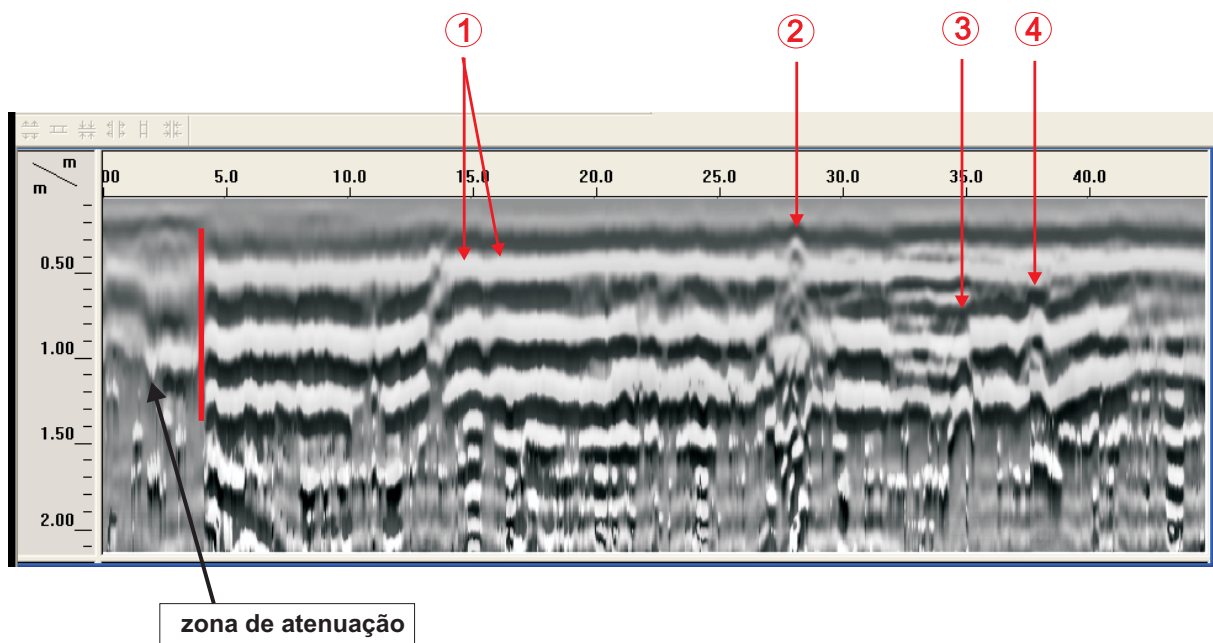


Figura 3.11: Radargrama correspondente ao perfil 4.

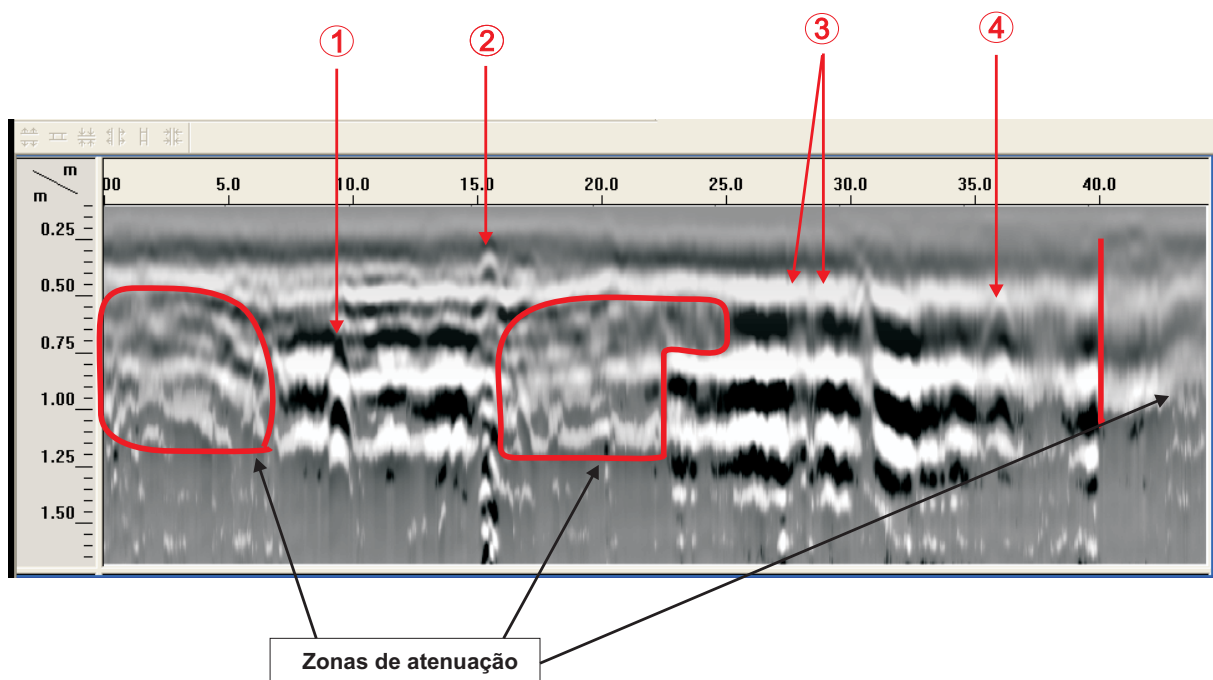


Figura 3.12: Radargrama correspondente ao perfil 5.

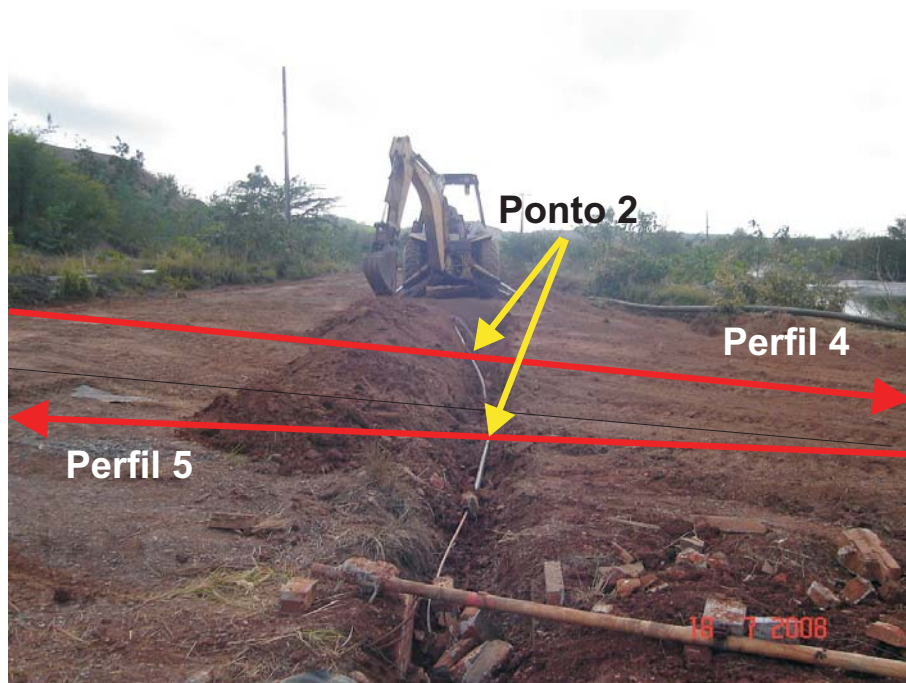


Figura 3.13: Imagem mostrando a tubulação indicada como ponto 2 nos perfis 4 e 5.

Os dois últimos perfis foram realizados num trajeto de ida e volta ao longo do mesmo perfil de aquisição, sendo a Figura 3.15 referente a ida e a Figura 3.16 ao retorno. Eles foram realizados em uma pista lateral a um dos reservatórios, onde, a seção correspondente a ida iniciou-se no rumo da seta amarela indicando o poste de referência do ponto de partida e o término ao lado de outro poste também indicado por uma seta amarela mais ao fundo como mostra a Figura 3.14. Podemos conferir a semelhança de anomalias encontradas em ambos os perfis ressaltando que o radargrama contido na Figura 3.16 teve uma resolução do sinal de radar melhor do que o da Figura 3.15, entretanto ambos confirmaram as mesmas interferências. Destaca-se os pontos 1 e 4 da Figura 3.15, respectivamente, 4 e 1 da Figura 3.16 como sendo interferências provocadas por fontes de ruídos não-naturais (os postes usados como referência da linha de aquisição). Já as anomalias dos pontos 2 e 3 vistos na Figura 3.15 (pontos 3 e 2 da Figura 3.16, respectivamente) podem ter sido causados por tubos com distâncias de 10.5m para o ponto 2 e 42.5 e 43.5m para os refletores do ponto 3 a partir do início da linha de aquisição estando todos a 0.30m de profundidade. Observa-se ainda neste mesmo perfil uma anomalia entre a distância de 20 e 26m e com profundidade de 1.50m. Esta interferência é devido a uma vala existente, onde, ocorrendo reverberação do pulso no ar, causa esta forte reflexão. Ao lado desta vala à distância entre 28.5 e 33.5m na mesma Figura pode-se constatar outra heterogeneidade superficial podendo se tratar de uma tampa ou piso. As interferências constatadas na Figura 3.15 podem ser verificadas com grande concordância na Figura 3.16.

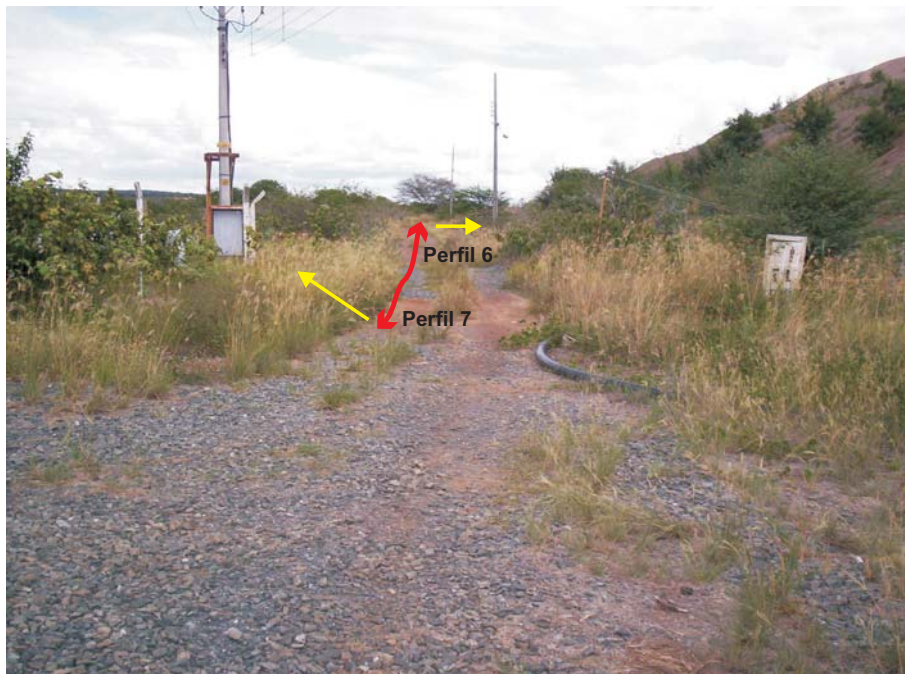


Figura 3.14: Representação da trajetória da linha de aquisição dos perfis 6 e 7 acompanhada de suas referências (setas amarelas indicando os postes) de saída e de chegada.

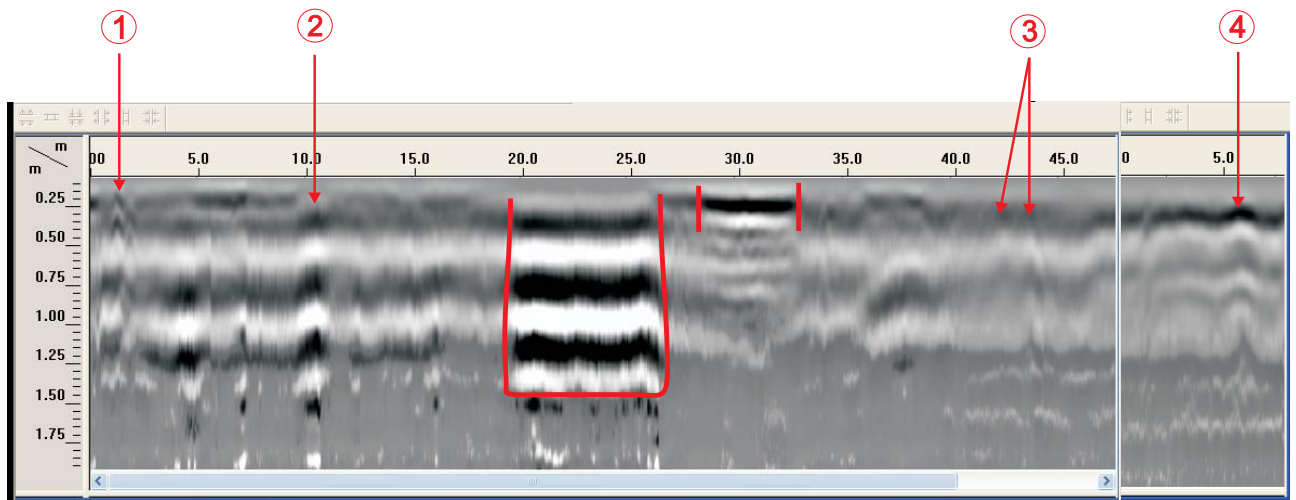


Figura 3.15: Radargrama correspondente ao perfil 6.

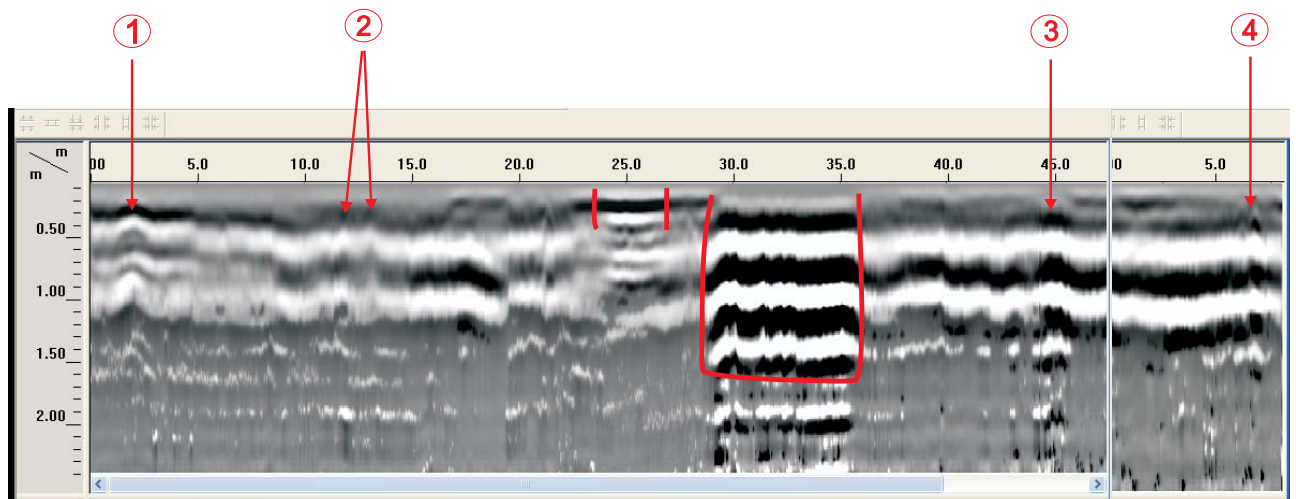


Figura 3.16: Radargrama correspondente ao perfil 7.

3.9.2 Interpretação do radargrama obtido em uma galeria perpendicular a veios de quartzo e outras mineralizações

Neste levantamento subterrâneo realizamos um perfil de 120 m de comprimento utilizando o GPR ao longo da galeria C15Ac da Mina Fazenda Brasileiro. Este perfil, correspondente às Figuras 3.18a (dados em tempo) e 3.18b (dados em profundidade), cortou veios de quartzo e outras mineralizações que foram interpretadas com o auxílio do perfil geológico (Figura 3.17) cedido pelo geólogo da mina, Silas Santos.

Na Figura 3.18b destacamos com a cor amarela os corpos interpretados como veios de quartzo posicionados nas rochas encaixantes pertencentes à Sequência Canto. Nos intervalos correspondentes a presença destes corpos ocorre uma diminuição ou falta de reflexões do sinal do radar, como pode ser melhor visto na Figura 3.18a, pois eles apresentam um aspecto homogêneo dificultando a presença de contraste de amplitudes dentro deste material. Já o corpo de cor cinza no início do perfil é descrito como a mineralização de xisto grafitoso identificado no perfil geológico. O resultado observado no radargrama em relação a este corpo, apresentando fortes reflexões e difrações, decorrem do contraste de impedância no contato entre a rocha encaixante (meta-tufos) e o xisto grafitoso.

No intervalo entre 50 e 64 m do início do perfil pode ser vista outra anomalia com fortes amplitudes, interpretada também como um possível bolsão de xisto grafitoso em contato com a rocha encaixante que é, neste caso, um meta-gabro. Outra reflexão registrada no radargrama (Figura 3.18b) e que aparece identificada na cor verde na mesma Figura se refere ao veio de clorita xisto com sulfetos visto no perfil geológico. Ao final do perfil duas interferências ainda foram registradas e interpretadas como corpos de xisto carbonático formando um possível bolsão deste material (p.ex., calcita) e aparecem delimitados em vermelho na Figura 3.18b.

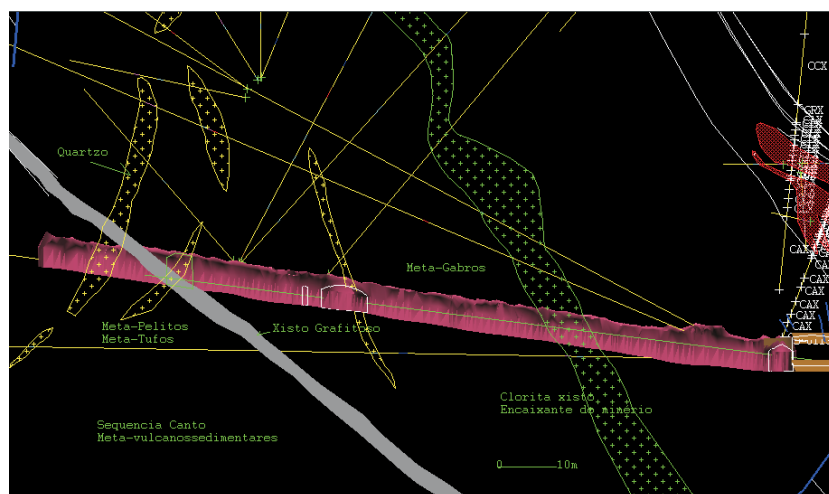


Figura 3.17: Seção vertical da área correspondente à galeria com as principais mineralizações.

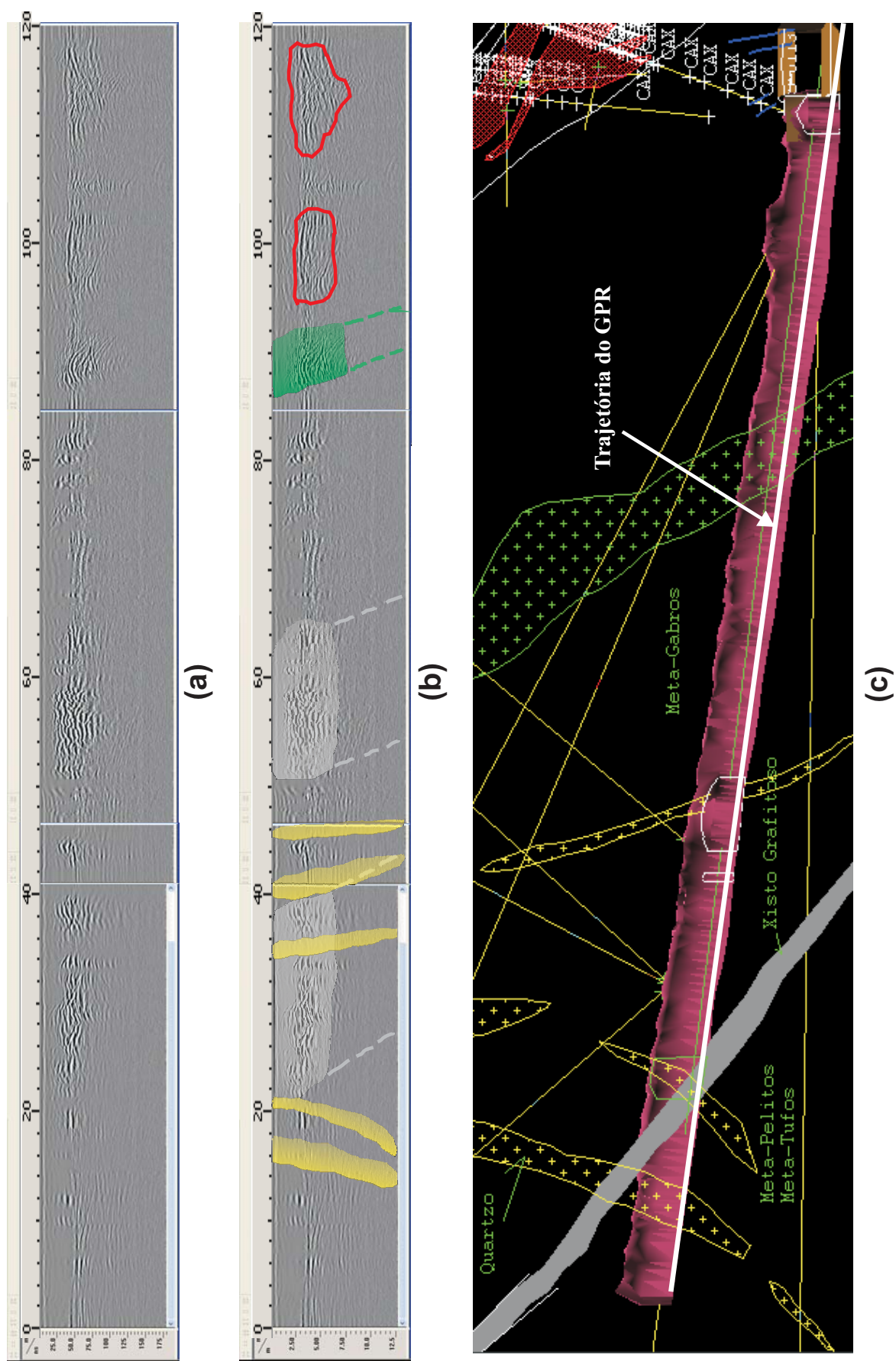


Figura 3.18: (a) Radargrama correspondente ao perfil da galeria com os dados apresentados em tempo; (b) Radargrama anterior interpretado e com os dados em profundidade; (c) Destaque do perfil geológico mostrando também a trajetória do GPR.

CAPÍTULO 4

Conclusões

Pelos resultados apresentados neste trabalho pode-se constatar que o método geofísico GPR tem grande utilidade na área da mineração, podendo ser empregado em diversas situações pertinentes aos trabalhos desenvolvidos nesta atividade. Sua versatilidade em campo, aliada à fácil aplicabilidade, quando comparado a outros métodos geofísicos, o tornam uma ferramenta poderosa no imageamento da subsuperfície.

Em todas as seções adquiridas na área da usina foi possível identificar interferências que podem ser associadas à presença de tubulações. Também foi possível definir intervalos anômalos (zonas de atenuação) e seus limites, caracterizados por elevada condutividade elétrica em relação ao meio em redor, resultando na atenuação da onda de radar.

O aumento de condutividade elétrica pode indicar que ocorreu no local do levantamento mudança de material para mais argiloso, ou zonas com saturação em água ou ainda a presença de alguma substância mais condutiva, como ácido.

Para maior compreensão das zonas de atenuação identificadas é recomendável o monitoramento da área investigada através de poços de monitoramento, assim como a realização de outros levantamentos futuros com o propósito de uma análise comparativa, temporal e espacial da área. Já para as interferências causadas por tubulações recomenda-se pequenas escavações nos locais onde os perfis demonstraram existir tais anomalias com o intuito de confirmar a presença dos corpos enterrados.

A respeito do levantamento realizado na galeria o resultado foi satisfatório vide que o radar identificou intervalos com baixo contraste de amplitudes (diminuição ou falta de reflexões do sinal) que foram interpretados de acordo com o perfil geológico da área e as respectivas distâncias na seção do radar como veios de quartzo existentes no local, assim como outras mineralizações (corpos grafitosos, sufetados e carbonáticos) que produzem forte contraste de impedância no contato entre estes corpos e as rochas encaixantes que formam a Sequência Canto. O passo seguinte seria a realização de sondagens para a confirmação dos dados.

Agradecimentos

Agradeço a Deus em primeiro lugar por iluminar sempre o meu caminho me amparando a todo instante nessa longa jornada.

A toda minha família pelo carinho, incentivo e apoio permanentes sem os quais não teria chegado até aqui, especialmente a minha mãe, que representa tudo pra mim, e que, mesmo à distância, sentiu o pulsar deste trabalho.

A querida Prof^a Dr^a Jacira Cristina Batista de Freitas pela oportunidade de tê-la como orientadora me ensinando não só sobre ciência, mas também sobre valores e princípios, e me passando com paciência e dedicação os ensinamentos e orientações para a boa consecução do trabalho.

Ao Prof^o Dr^o Marco Antônio Barsottelli Botelho, co-orientador, por toda a colaboração e ensinamentos indispensáveis à elaboração do presente trabalho, e por fazer-me enxergar que naquele seu jeito durão existe uma excelente pessoa.

Ao Prof^o Sandro Lemos Machado pela participação na comissão examinadora.

A Mineradora Fazenda Brasileiro - MFB, em nome do gerente geral, Sérgio Cardoso, pela oportunidade de desenvolver este trabalho na Mina, do coordenador de geologia, Maurício Assis, do geólogo da mina, Silas Santos, e do gerente ambiental, Cid Moreira, por todo o apoio logístico e atenção dispensada nas etapas do trabalho de campo, assim como em outras tantas colaborações.

Ao CPGG/UFBA e ao LAGEP/UFBA, por disponibilizar a infra-estrutura necessária para o desenvolvimento deste trabalho, em especial a Joaquim Bonfim Lago e Tiago Cavalcante de Pinho pela paciência com que sempre me ajudaram.

A Sociedade Brasileira de Geofísica - SBGf, pelo suporte na forma de bolsa de estudos.

A todos os professores que participaram dessa caminhada sempre contribuindo no meu aprendizado, e a todos os colegas de curso pela amizade e companheirismo, e constante auxílio na realização deste trabalho.

E, finalmente, agradeço aos autores das obras relacionadas à geofísica que proporcionaram os conhecimentos utilizados neste trabalho.

Referências Bibliográficas

- Almeida, F. F. M. (1977) Origem e evolução da plataforma brasileira, vol. 241.
- Annan, A. P. e Cosway, S. W. (1992) Simplified gpr beam model for survey design, SEG Technical Program Expanded Abstracts, **11(EG1.7)**:356–359.
- Annan, A. P. e Davis, J. L. (1976) Impulse radar soundings in permafrost, Radio Science, **11**:383–394.
- Annan, A. P. e Davis, J. L. (1977) Radar range analysis for geological materials, Report of activities, Geological Survey of Canada, **77-1(B)**:117–124.
- Beres, M. e Haeni, F. P. (1991) Application of ground penetrating radar methods in hidro-geologic studies, Ground Water, **29(3)**:375–386.
- Bevan, B. W. e Kenyon, J. (1975) Ground penetrating radar for historical archaeology, MASCA Newsletter, **11(2)**:2–7.
- Botelho, M. A. B.; Machado, S. L.; Dourado, T. C. e Amparo, N. S. (2005) Experimentos laboratoriais com gpr (1 ghz) em corpos arenosos para analisar a influência da água e de hidrocarbonetos na sua velocidade de propagação, Sociedade Brasileira de Geofísica, **1**:1–6.
- Campbell, K. J. e Orange, A. S. (1974) A continuous profile of sea ice and freshwater ice thickness by impulse radar, Polar Record, **17(106)**:34–41.
- Cook, J. C. (1960) Proposed monocyple-pulse very-high-freqüency radar for air-born ice and snow measurement, AIEE Comm. Eletron., **51**:588–594.
- Cook, J. C. (1975) Radar transparencies of mine and tunenel rocks, Geophysics, **40(5)**:865–885.
- Coon, J. B.; Fowler, J. C. e Shafers, C. J. (1981) Experimental uses of short pulse radar in coal seams, Geophysics, **46**:1163–1168.
- Darracott, B. W. e Lake, M. I. (1981) An initial appraisal of ground probing radar for site investigation in britain, Ground Engineering, **14**:14–18.
- Davis, J. L. e Annan, A. P. (1989) Ground-penetration radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy, Geoph. Prosp., **37(5)**:531–551.
- Davis, J. L.; Annan, A. P. e Vaughan, C. J. (1985) Placer exploration using radar and seismic methods, Can. Inst. Min. Bull., **80**:67–72.

- Evans, S. (1965) Dielectric properties of ice and snow: a review, *Journal of Glaciology*, **5(42)**:773–792.
- Freitas, J. C. B. (2004) 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, Brasil.
- Greenhouse, J.; Gudjurgis, P. e Slaine, D. (1995) Applications of surface geophysics to environmental investigations: Reference notes for an eegs short course.
- GSSI (2005) RADAM 6.5 User´s Manual, Geophysical Survey Systems, Inc, North Salem, NH, USA.
- Harrison, C. H. (1970) Reconstruction of subglacial relief from radio echo sounding records, *Geophysics*, **35**:1109–1115.
- Hulsenbeck (1926) German patent n°489434.
- Kishida, A. e Riccio, L. (1980) Chemostratigraphy of lava sequences from the rio itapicuru greenstone belt, bahia, brazil, *Prec. Res.*, **11**:161–178.
- Klimentos, T. (1991) The effects of porosity-permeability-clay content on the velocity of compressional waves, *Geophysics*, **56(12)**:1930–1939.
- Klimentos, T. e McCann (1990) Relationships among compressional wave attenuation, porosity, clay content and permeability in sandstones, *Geophysics*, **55(8)**:998–1014.
- Leggo, P. J. e Leech, C. (1983) Subsurface investigations for shallow mine workings and cavities by the ground impulse radar technique, *Ground Enginnering*, **16**:20–23.
- McCann, D. M.; Jackson, P. D. e Fenning, P. (1988) Comparison of the sismic and ground-probing radar methods in geological surveying, *IEE Proceedings*, **135(f,4)**:380–390.
- Pinto, M. V. (2007) Imageamento de depósitos sedimentares análogos a reservatórios de hidrocarbonetos da Bacia do Recôncavo utilizando o GPR, Trabalho final de graduação, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil.
- Porsani, J. L. (1999) Ground Penetrating Radar (GPR): Proposta metodológica de emprego em estudos geológicos-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado, SP, Tese de doutorado, UNESP, Campus de Rio Claro, SP, São Paulo, Brasil.
- Reinhardt, M. C. (1988) Controles lito-estruturais da mineralização aurífera em zona de cisalhamento da Mina Fazenda Brasileiro, Bahia, Tese de mestrado, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil.
- Reynolds, J. M. (1997) An introduction to applied and environmental geophysics, John Wiley and Sons, England.
- Reynolds, J. M. e Taylor, D. (1992) The use of sub-surface imaging techniques in the investigation of contaminated sites, *Rel. Tec.*, Brunel University.

- Rocha, M. B. (1994) Geologia e recursos minerais do greesntone belt do rio itapicuru, bahia, In: *Série Arquivos Abertos*, vol. n°4.
- Sato, H. K. (1999) Notas de aula do curso de Métodos Geofísicos Elétricos, CPGG-UFBA.
- Sheriff, R. E. (1991) Encyclopedic Dictionary of Exploration Geophysics, vol. 3, SEG, Tulsa.
- Silva, M. G. & Coelho, C. E. S. . S. R. A. . O. P. H. (2001) Mina fazenda brasileiro - greenstone belt do rio itapicuru, ba, In: *Caracterização de depósitos auríferos em distritos mineiros brasileiros*, Agência para o Desenvolvimento Tecnológico da Indústria Mineral Brasileira, Brasília, Brasil.
- Silva, M. G. (1983) A seqüência vulcanossedimentar do médio Rio Itapicuru, Bahia: caracterização petrográfica, considerações petrogenéticas preliminares e zoneografia metamórfica, Tese de mestrado, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil.
- Swithinbank, C. S. M. (1968) Radio ecosounding of antartic glaciers from light aircraft, Int. Ass. Sci. Hydrol., **79**:405–414.
- Teixeira, J. B. G. (1984) Geologia e controles da mineralização de ouro da Fazenda Brasileiro, Serrinha (BA), Tese de mestrado, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil.
- Thierbach, R. (1974) Eletromagnetic reflections in salt deposits, Journal of Geophysics, **40**:633–637.
- Ulriksen, C. P. F. (1982) Aplication of impulse radar to civil engineering, Doctoral Thesis - Lund University of Technology, 179p.
- Unterberger, R. R. (1978) Radar propagation in rock salt, Geophysical Prospecting, **26(2)**:312–328.