

Universidade de Brasília

Instituto de Geociências

Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica

# Estudo sísmico sob Greenstone Belt de Crixás

Nº:148

Jadson Muniz de Oliveira

Orientador: Welitom Rodrigues Borges

Coorientador: Oleg Bokhonok

26 de Março de 2019

BRASÍLIA, DF



"A única fonte de conhecimento é a experiência."

**Albert Einstein**

Jadson Muniz de Oliveira

## Estudo sísmico sob Greenstone Belt de Crixás

Dissertação apresentada ao programa de Pós-graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica do Instituto de Geociências - IG da Universidade de Brasília UnB.

Area de concentração: Geofísica

Orientador: Dr. Welitom Rodrigues Borges

Coorientador: Dr. Oleg Bokhonok

Brasília, DF  
Fevereiro/2019

FOLHA DE APROVAÇÃO

Jadson Muniz de Oliveira

Estudo sísmico sob Greenstone Belt de Crixás

Banca Examinadora

Data: / /

---

*Assinatura*

---

*Assinatura*

---

*Assinatura*

---

*Assinatura*

Agradecimentos;

Gostaria de agradecer a toda minha família, por fornecer a base e suporte; em especial à Rosilene Ferreira, Francisco Muniz e Jéssica Muniz.

Aos Orientadores e guias; Welitom Rodrigues, Oleg Bokhonok e Bruno Santos. Pelo conhecimento técnico, profissional e de vida transmitidos durante o trabalho. Agradeço também pela confiança depositada e ao profissionalismo durante as dificuldades do projeto (não foram poucas).

A equipe de geofísica da Universidade Federal do Paraná, ao Professor Marcelo Rocha (UnB), e Laboratório de geofísica aplicada da UnB por dispor o equipamento sísmico utilizado em campo.

Aos gestores envolvidos no projeto; Adalene Moreira, Bruno Santos, Diogo Afonso e Marcelo Pereira.

Aos amigos; Eduardo (Dudu), Maria, Mariana, Moara, Rafael Canata e Vicente.

A equipe de exploração e demais integrantes da Mineração Serra Grande. Em especial aos senhores Carlos André, Leidiane Gonçalves, Carol, Divino, Débora, Renan e Adalaisa.

Esse projeto é fruto do esforço conjunto e gostaria de agradecer a todos os envolvidos direta e indiretamente, em especial a:

Equipe do teste de fontes; Wolney(Cap. panetone), Rubens, Ézinha, Geraldo, Douglas e Thiago.

Equipe de petrofísica; Leocimar, Saul, Djalma e técnicos do galpão.

Equipe de aquisição sísmica; Joaquim(santinho), Francisco, Ozeias, Junin, Clever, Diego, Oceanil, Manuel, Pablo e Dezin.

Foi um prazer conhecer e conviver com os senhores!

## Resumo

O Greenstone Belt de Crixás hospeda um depósito aurífero de classe mundial. A compreensão de seu processo de formação e de sua estrutura profunda ( $> 1$  km) é de fundamental importância para guiar os investimentos exploratórios na busca de novos alvos prospectivos. A obtenção de informações da geometria das litologias é um desafio na indústria mineral devido ao elevado custo de sondagens sistemáticas com o aumento da profundidade. Nesse contexto a utilização de métodos geofísicos é uma opção adequada para gerar imagens da subsuperfície. Essa dissertação constitui as várias etapas de um Projeto Sísmico sobre o Greenstone Belt de Crixás e tem como objetivo avaliar a resposta da metodologia ao contexto geológico. Inicialmente realizaram-se testes com fontes sísmicas (quedas de peso e explosivos) para avaliar a resposta relacionada à recuperação de energia e a banda de frequência do sinal sísmico. Os resultados evidenciaram as cargas de ANFO como a única opção viável para investigações maiores que 1 km. A análise petrofísica consistiu em 2 abordagens. A primeira consistiu em utilizar um medidor ultrassônico para obter valores de  $V_p$ . A segunda propôs uma nova metodologia para estimar as velocidades  $V_p$  e  $V_s$  utilizando um levantamento multicomponente de detalhe sob a rocha não intemperizada. As análises petrofísicas realizadas em amostras de furos de sondagens definiram os principais refletores como os metabasaltos e as rochas metassedimentares (dolomitos e filitos carbonosos). Modelagens diretas são construídas para definir os parâmetros de aquisição que satisfazem as necessidades do projeto, além de auxiliar na escolha do tipo de migração (Pré-stack em profundidade) que apresenta a melhor opção de imageamento para recuperar a geometria profunda nessa região. A aquisição de 4.2 km de perfil sísmico é descrita, identificando as dificuldades e soluções propostas durante as etapas de campo. O trabalho é concluído com a apresentação do empilhamento bruto da seção, sendo possível identificar energia refletida para tempos de até 1.5 s. Existem diferenças entre o modelo inicial proposto para o Greenstone Belt de Crixás e o resultado obtido na seção sísmica, no resultado sísmico registram-se refletores na parte sudeste do Greenstone mergulhando para NE, ou seja, contrário ao mergulho da foliação regional. Os resultados prévios indicam a presença de refletores na região de maior interesse, local com menor conhecimento geológico de perfilagens, indicando a continuidade e formato do greenstone.

## Abstract

Crixás greenstone belt hosts a world class gold deposit. The knowledge about deep structure formation and geometry guides exploration efforts choosing new targets. Get information over subsurface geometry is a challenging task due increase costs of drilling with depth. Thus, geophysical methods is a suitable choice to image the subsurface. This work describes the seismic project phases over crixás greenstone belt, and aims to evaluate the seismic response applied over this geological setting. Source tests are developed (explosive charges and free fall weights) to evaluate signal energy and frequency bandwidth. Results shows ANFO charges as the only suitable source to image beneath 1 km. Petrophysical study are split in two sections and approaches, one uses a ultrasonic detector to evaluate P wave velocity, the other proposes a new way to estimate  $V_p$  and  $V_s$  velocities using a small scale multicomponent survey over a unweathered rock. Petrophysical characterization defines the stronger reflectors as the contact between metabasalt and metasedimentaries(dolomites and carbonatic schist). Direct modeling defines the acquisition parameters that best suits the project and defines Pré-stack depth migration as imaging tool to recover the deep structure. Field acquisition are shown, identifying difficulties and proposed solutions over the 4,2 kilometers profile. This study is concluded showing a real data raw stack in which is possible to indentify reflectors up to 1.5 seconds. It's possible to observe the difference between the modeled and real data, from data we can derive a dip to NE at southwest greenstone belt, with opposite direction from expected regional foliation. Preliminary results shows reflections correlated to the expected target, over the region with no geological information (no drillcore), that suggests the greenstone continuation in depth and its geometry.





# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>7</b>
1.1	Objetivo . . . . .	10
1.1.1	Objetivos específicos . . . . .	10
1.1.2	Métodos e estrutura da Dissertação . . . . .	11
<b>2</b>	<b>Contexto geológico</b>	<b>12</b>
2.1	Geologia regional - Província Tocantins . . . . .	12
2.2	Unidades Imageadas pela linha sísmica . . . . .	16
2.2.1	Complexo Anta . . . . .	16
2.2.2	Sequência Santa Terezinha . . . . .	16
2.2.3	Greenstone Belt Crixás . . . . .	16
<b>3</b>	<b>Teste de fontes e carga</b>	<b>20</b>
	Pátio de tiro 1 - Filito Carbonoso . . . . .	23
3.1	Análise comparativa: Cargas explosivas . . . . .	24
3.2	Análise comparativa: Queda de peso e Empilhamento de janela de tiros . . . . .	26
3.3	Análise comparativa: Queda de peso X Explosivo . . . . .	28
3.3.1	Considerações quanto ao levantamento . . . . .	28
	Pátio de tiro 2 - Metabasalto . . . . .	29
3.4	Análise comparativa: 1.5kg de explosivo a 2m,3m e 5m . . . . .	29
3.5	Análise comparativa: 1.5kg, 3kg e 4kg de explosivo a 3m . . . . .	31
3.6	Avaliação de tiros abaixo da zona intemperizada . . . . .	33
3.7	Resultados . . . . .	36
<b>4</b>	<b>Petrofísica</b>	<b>37</b>
4.1	Levantamento em testemunhos com Medidor Ultrassônico . . . . .	38
4.1.1	Descrição do Método e Objetivos . . . . .	38
4.1.2	Discussão dos dados . . . . .	39
4.1.3	Modelagem Acústica . . . . .	40
4.1.4	Resultados . . . . .	41
4.2	Estimativa $V_p$ e $V_s$ na Mina . . . . .	43

4.2.1	Introduction . . . . .	44
4.2.2	Material and methods . . . . .	45
4.2.3	Theory . . . . .	48
4.2.4	Wave modes and interpretation . . . . .	48
4.2.5	Results . . . . .	49
4.2.6	Conclusions . . . . .	50
4.2.7	Acknowledgments . . . . .	50
<b>5</b>	<b>Modelagem e Escolha dos parâmetros de aquisição</b>	<b>52</b>
5.1	Influência da camada de solo e topografia . . . . .	56
5.2	Definição dos parâmetros de aquisição . . . . .	57
5.2.1	Análise de velocidade - Discussão . . . . .	59
5.3	Resultados - Multiplicidade e Logística . . . . .	61
<b>6</b>	<b>Aquisição e Dados Reais</b>	<b>63</b>
6.1	Topografia . . . . .	64
6.2	Perfuração . . . . .	65
6.3	Carregamento . . . . .	66
6.4	Deslocamento do equipamento e Manutenção . . . . .	69
6.5	Pré-Processamento . . . . .	71
6.6	Avaliação dos dados brutos . . . . .	73
6.7	Resultados . . . . .	73
<b>7</b>	<b>Resultados</b>	<b>75</b>
<b>8</b>	<b>Conclusões</b>	<b>81</b>
<b>A</b>	<b>Script para inclusão de geometria</b>	<b>83</b>

# Lista de Figuras

2.1	Mapa Geológico da Província Tocantins com destaque para o Bloco Arqueano de Goiás (Jost et al. 2014) . . . . .	14
2.2	Mapa de compartimentação tectônica do Bloco Arqueano de Goiás (Jost et al. 2014) . . . . .	15
2.3	Mapa Geológico do Geenstone Belt de Crixás (Jost et al. 2014) . . . . .	17
2.4	Coluna estratigráfica de Crixás (Jost et al. 2014) . . . . .	17
2.5	Mapa geológico e perfil sísmico cortando as principais unidades de interesse.	19
3.1	a) Mapa geológico da área onde desenvolveram-se os experimentos de fontes sísmicas com a localização dos pátios de tiro e dos receptores da sísmica. b) Exemplo modelo do pátio de tiro 1 . . . . .	22
3.2	Fotografias evidenciam as fontes de onda sísmica utilizadas nos testes de fonte. a) Queda de peso de 60 kg. b) Queda de peso de 300 kg. c) Cargas Explosivas de ANFO. . . . .	23
3.3	Sismogramas e espectro de frequência referente ao uso de explosivo nos filitos carbonosos (GXN). Os sismogramas apresentam diferentes densidades de traço devido ao arranjo de receptores, espaçamento de 5 m na parte mais densa e 10 m na porção menos densa, o ensaio foi relaizado dessa forma devido a limitação de cabos de transmissão de dados. Sismogramas em escala de cor são apresentados para melhor visualização. . . . .	25
3.4	Sismogramas e espectro de frequência referente à queda de peso . . . . .	27
3.5	Espectro de frequência referente às quedas de peso. . . . .	27
3.6	Espectros de frequências comparativos entre as janelas de tiros referentes as fontes de cargas explosivas e as quedas de peso. . . . .	28
3.7	Sismogramas e espectro de frequência referente a 1,5kg de explosivo instalados em diferente profundidades nos metabasaltos (MBA). Os sismogramas apresentam diferentes densidades de traço devido ao arranjo de receptores, espaçamento de 5 m na parte mais densa e 10 m na porção menos densa, o ensaio foi relaizado dessa forma devido a limitação de cabos de transmissão de dados. Sismogramas adquiridos em diferentes profundidades de perfuração no metabasalto (MBA) em escala de cor. . . . .	30

3.8	Sismogramas e espectro de frequência referente às diversas quantidades de explosivo instaladas na profundidade de 3 metros no metabasalto (MBA). Sismogramas registrados com diferentes cargas explosivas instaladas a 3 metros de profundidade sob o metabasalto (MBA) em escala de cor. . . . .	32
3.9	Sistemas de detonação: a) Sistema completo com cordel, cordel detonante e exel. b) Sistema reduzido para evitar o atraso da explosão, composto por cordel e cordel detonante. c) Sistema eletrônico. . . . .	33
3.10	Sismogramas e espectro de frequência registrados com fontes explosivas instaladas abaixo da zona de intemperismo. Sismogramas registrados com fontes explosivas instaladas abaixo da zona de intemperismo em escala de cor. . . . .	35
4.1	Foto evidencia o levantamento petrofísico realizado nos testemunhos de sondagens da área do Greenstone Belt de Crixás. . . . .	39
4.2	Resultados do poço NM134 exemplificando a heterogeneidade da refletividade. Alta impedância nos basaltos e CBCX (de 500m à 700m), e baixa impedância nos filitos carbonosos e dolomitos (de 720m à 800m) (retirado de Villahermosa and Turner (2017)). Os perfís correnpondem a Velocidade da onda P (Vp), Densidade (SG) e Impedância acústica (AI), Litologia, Índice de recuperação da amostra (RQD) e contagem de ouro na amostra (ppm). . . . .	41
4.3	Modelo geológico, seção sísmica sintética (Migração pré-stack em profundidade) e sobreposição de ambos os painéis (retirado de Villahermosa and Turner (2017)) . . . . .	42
4.4	Survey line, transversal wave mode acquisition and cross-line source displacement vector. . . . .	45
4.5	Surveyed places within Crixás greenstone belt cross section. . . . .	46
4.6	Processing fluxogram. . . . .	46
4.7	Processing steps; A) Values obtained in linear regression, B) Populaion Histogram for P velocity (blue) and S velocity (red), C) Gaussiand distribution related to te histogram, and D) Resulting manifold with P and S better estimative in its apex. . . . .	47
4.8	a) Direct wave propagation in homogeneous media and receiver signature. b) Reflected wave propagation over a layered media and receiver signature.	49
4.9	Shots gates: P (inline source displacement vector, radial component), SV (vertical displacement vector, Vertical component), and SH (Cross-line displacement vector, Transversal component) . . . . .	50
4.10	Velocity estimated using the proposed method . . . . .	51

5.1	Modelo geológico elaborado com informações de furos de sondagens (raso 1,5 km) e o modelo sísmico extrapolado em profundidade (10,5 km) . . . . .	53
5.2	Sismogramas sintéticos de tiros realizados ao longo do perfil sísmico programado para a área do Greenstone Belt de Crixás . . . . .	55
5.3	Modelo sísmico; a esquerda: sem zona de intemperismo e topografia e a direita: com zona de intemperismo e topografia, o quadrado apresenta região fortemente influenciada por ruído de fonte . . . . .	56
5.4	Comparativo dos resultados considerando a limitação de equipamento. a)Receptores ao longo de toda a área. b)Receptores de 0 m a 1 km de offset. . . . .	57
5.5	Ilustração referente aos parâmetros modelados, A) Aquisição 0 offset e B) Aquisição com offset mínimo de 1 quilômetro. . . . .	58
5.6	Migração pré-stack em profundidade para aquisições a 0 e 1 km de offset mínimo. Idenificação do contato entre o greenstone e o TTG (seta) para profundidade de 2 km. A porção rasa do greenstone possui menor resolução com o aumento do offset (retângulo na imagem). . . . .	59
5.7	Ilustração do arranjo utilizado para a aquisição. . . . .	61
5.8	Cobertura de CMP considerando diferentes movimentações do arranjo. . . . .	62
6.1	Fotos evidenciam uma estaca usada para indicar o ponto para a perfuração e a equipe de topografia que atuou no projeto. . . . .	65
6.2	Fotos evidenciam alguns componentes do trado com maior necessidade de manutenção. a) Nip. b) Concha. c) Alavanca. . . . .	66
6.3	Foto evidencia da equipe de perfuração operando um trado motorizado na área da pesquisa. . . . .	66
6.4	Fotos evidenciam: a) Blaster para a espuleta elétrica. b) Ponte de diodos para limitar a voltagem produzida pelo piezoelétrico. c) Pastilhas piezoelétricas para acionar o equipamento. . . . .	68
6.5	Fotos evidenciam: a) Cabo cortado. b) Cabos dentro da mangueira. c) Baterias e carregador. d) Equipe de operação. . . . .	71
6.6	Janela CMP de 500m a 550m . . . . .	74
7.1	Painéis de empilhamento cmp considerando velocidades constantes . . . . .	76
7.2	Esboço dos refletores em diferentes painéis da figura 7.1. . . . .	77
7.3	Integração dos dados litológicos da MSG, modelo extendido em profundidade e empilhamento sísmico . . . . .	78
7.4	Integração dos dados litológicos da MSG, modelo extendido em profundidade e empilhamento sísmico . . . . .	79
7.5	Integração dos dados com o esboço dos refletores mais evidentes encontrados nas seções sísmicas e uma proposição simplificada . . . . .	80

# Lista de Tabelas

4.1	Tabela de amostras utilizadas . . . . .	39
4.2	Tabela com as velocidades, densidades e impedâncias acústicas médias dos registros nas unidades geológicas presentes nos testemunhos de sondagens.	40
4.3	standard reflected wave interpretation . . . . .	48
4.4	Direct Wave near offset interpretation . . . . .	48
6.1	Parte da Tabela de Tiros com a coordenada de cada shot ( $S_x$ $S_y$ $S_z$ ), o numero do primeiro geofone (ngeof), a quantidade de geofones ativos (geof), e número do tiro (numb). . . . .	72
6.2	Parte da Tabela de coordenadas dos geofones. . . . .	72

# Capítulo 1

## Introdução

O estado de Goiás é historicamente relacionado à produção de ouro no Brasil. O estado nasceu devido ao esforço das Entradas e das Bandeiras na busca pelo minério. Em 1727, o Segundo Anhanguera recebeu uma concessão de sesmaria, e um ano depois descobriu um veio aurífero batizado como mina Nossa Senhora de Santana, que mais tarde se tornou Vila Boa (a primeira cidade de Goiás) atualmente conhecida como Goiás velho. Outras minas foram desenvolvidas na região como a de Papuã (atual Pilar de Goiás), Meia Ponte (atual Pirenópolis), Calhares (atual Caiamar) e Guarinos. Os altos custos de extração aliados aos altos impostos tornaram a mineração um mal negócio e assim a exploração do ouro cedeu espaço à atividade garimpeira, a qual perdurou até o final da década de 1980 (Jost et al. 1999).

Mesmo com a produtividade de ouro na região, pouco conhecimento geológico foi produzido ao longo da história. Em 1969, as primeiras descrições das litologias locais foram feitas por Barbosa et al. 1969. Posteriormente, essas rochas foram interpretadas como terrenos vulcano-sedimentares arqueanos sobre o embasamento granito-gnáissico (Jost et al. 1999). Após 5 anos de sondagens sistemáticas para a pesquisa de ouro, em 1985, foi instalada uma lavra experimental pela Mineração Serra Grande na Região de Crixás, que compreende o objeto de estudo dessa dissertação. Desde então os terrenos arqueanos de Goiás tiveram maior atenção devido à sua importância científica e econômica.

A cidade de Crixás, localizada ao norte do estado de Goiás, tem uma economia baseada na atividade agropecuária e mineradora. A mineração constitui boa parte da geração de emprego e renda da população, assim devido às flutuações no preço do minério, um dos pilares econômicos do município é relativamente instável. As reservas comprovadas apresentam tempo de vida relativamente curto ou mesmo alguns corpos são inviáveis devido ao alto custo de produção. Com as minas ficando cada vez mais profundas os desafios logísticos aumentam, logo a busca por novas jazidas é um desafio constante.



Quanto melhor for o conhecimento geológico da região maiores são as chances de sucesso na busca de alvos prospectivos. O êxito na busca por novos depósitos depende da interpretação conjunta de várias fontes de informação. Devido à exploração mineral na região e o esforço das mineradoras em compreender o processo de formação de seus prospectos, atualmente existe uma ampla base de dados; testemunhos de sondagem, datações, mapas estruturais, análises geoquímicas, estudos geofísicos, entre outros. Essas informações perfazem boa parte do Greenstone e auxiliam na delimitação das unidades geológicas e sua evolução temporal. A região dispõe de modelos geológicos baseados em sondagens que chegam até 1,3km de profundidade. É importante frisar que sondagens se tornam mais caras com a profundidade e maior custo para gerar um modelo da estrutura profunda. Além disso informações de sondagens são pontuais e muitas vezes descontínuas lateralmente em ambientes estruturalmente complexos.

Os próximos depósitos minerais serão descobertos por estudos geológicos profundos e em ambientes com maior complexidade geológica. Essa tendência se deve ao fato de que a maioria dos alvos próximos a superfície já foram localizados ou estão em fase de extração. A mudança exige o surgimento de novas tecnologias e modelos conceituais voltados para a nova realidade exploratória.

Dada a complexidade estrutural da região, as informações provenientes apenas de sondagens não são capazes de modelar a estrutura profunda em uma resolução adequada às necessidades da indústria. Nesse contexto, a geofísica surge como uma ferramenta na tentativa de mapear horizontes de contatos geológicos em profundidades superiores a 1 km. Assim, é possível informar sobre o arranjo estrutural em subsuperfície, reduzir o custo de sondagens excessivas e aumentar o retorno sobre o capital investido na atividade mineradora. (Malehmir et al. 2012)

Este estudo é parte integrante de um projeto que objetiva definir o sistema mineral no Greenstone Belt de Crixás. O conceito “mineral system” considera os depósitos minerais expressões em pequena escala de processos geológicos ocorridos em diferentes escalas temporal e espacial (McCuaig and Hronsky 2014). A compreensão do sistema de larga escala pode apresentar um guia para a estratégia exploratória na região de interesse. Atualmente modelos análogos são utilizados na indústria mineral e existe uma tendência em utilizar a abordagem de sistema mineral. Modelos análogos focam na descrição física e química das rochas em escala de depósito. Considerando a origem do fluido e a química da rocha (Hagemann et al. 2016), já a compreensão do sistema mineral possibilita associar espacialmente diferentes tipos de depósitos de uma forma lógica e menos dependentes do contexto geológico. Identificar elementos que definem o processo geológico que possibilitou o aparecimento do depósito no lugar de utilizar modelos fixos que dependem da especificidade de cada depósito traz maior possibilidade de sucesso na exploração (McCuaig and Hronsky 2014). A tomada de decisão possui informações que seguem um modelo

lógico de larga escala espacial e menos focado na descrição de estudos de caso existentes.

Nesse contexto a sísmica de reflexão tem a finalidade de mapear a geometria do greenstone. Entender o arranjo espacial das unidades geológicas e possivelmente mapear as principais zonas de descontinuidades. Não é esperada a detecção direta de depósitos minerais. Na literatura existem alguns estudos de sucesso com esse objetivo, contudo os produtos da sísmica serão utilizados para identificar elementos que possibilitem a compreensão do sistema mineral como; zonas alteradas, trapas estruturais, estruturas de percolação de fluidos, e eventuais depósitos. O foco será mapear a geometria das estruturas profundas e a morfologia do embasamento do greenstone. O método de reflexão sísmica é considerado para a área de estudo por possuir a melhor resolução em profundidade.

Entre os métodos indiretos de investigação geológica a sísmica de reflexão apresenta melhor resolução espacial para profundidades maiores que 1km. Devido a própria propriedade física medida a quantidade de informação que representa uma porção do espaço é bem superior a outros métodos geofísicos essa maior capacidade de resolução torna possível gerar imagens dos refletores. Muito utilizado na indústria do petróleo a sísmica de reflexão é uma metodologia pouco difundida na exploração mineral atualmente devido ao alto custo e pouco background para a interpretação e solução de problemas comuns nas diversas etapas de um projeto: aquisição, processamento e interpretação. Esse novo nicho de aplicação da sísmica possui vários desafios, e com isso, novas oportunidades. Existe uma tendência mundial de migração da metodologia para estudos geotécnicos, geotermiais e mapeamento de possíveis regiões para depósitos de lixo radioativo. Esses alvos apresentam desafios similares aos obtidos na prospecção mineral. (McCuaig and Hronsky 2014)

Devido a tecnologia ter sido desenvolvida visando melhores resultados para o mundo do petróleo existem algumas adaptações necessárias para reproduzir resultados satisfatórios no universo da exploração mineral. Há necessidade de ajustes nas etapas de aquisição, de processamento e de interpretação de seções sísmicas. Parte desse trabalho se trata dessa adaptação, descrevendo testes e análises que possibilitam a escolha de parâmetros utilizados ao longo do projeto.

O problema alvo deste estudo é avaliar a possibilidade de resolver contatos geológicos entre os diferentes componentes do Greenstone em profundidades superiores a 1km.

A hipótese proposta é que a reflexão sísmica pode imagear a estrutura profunda, mesmo em um contexto metavulcano-sedimentar estruturalmente complexo, considerando adaptações nas etapas de aquisição, processamento e interpretação dos dados.

A principal finalidade do projeto é contribuir para o conhecimento da estrutura geológica profunda (abaixo de 1 km) da região, geometria e forma do greenstone, esses dados servem de novas fontes de informação para reinterpretar ou corroborar os modelos geológicos anteriores. Além de fomentar a exploração mineral através da identificação de possíveis assinaturas geofísicas relacionadas aos corpos mineralizados. Dessa forma, o projeto sísmico é composto por um teste de fontes sísmicas, que obtêm os parâmetros de fonte a serem utilizadas no projeto. em seguida é realizado uma análise petrofísica das unidades representativas da região, conhecer as propriedades físicas das rochas nos permite inferir e prever erros de aquisição e compreender a refletividade do alvo. Com os dados de fonte e petrofísicos é possível realizar modelagens diretas e compreender o campo de onda produzido pelo alvo, essa etapa é de extrema importancia para definir a melhor estratégia de aquisição. O trabalho é finalizado com a descrição da etapa de campo e apresenta o empilhamento de dados brutos utilizando painéis de velocidade constante que demonstram a presença de energia refletida.

## 1.1 Objetivo

Avaliar o uso do método sísmico de reflexão aplicado no contexto geológico do Greenstone Belt de Crixás.

### 1.1.1 Objetivos específicos

- Realizar testes de fontes, como queda de peso e cargas explosivas com diferentes condições de acoplamento. Para avaliando a capacidade de recuperar energia e assim definir uma fonte para a aquisição de dados.
- Obter as velocidades de onda P e as densidades de rochas do greenstone com estudos petrofísicos desenvolvidos em testemunhos de sondagens. E assim elaborar modelos acústicos sintéticos para a região.
- Desenvolver experimentos sísmicos multicomponentes em rochas expostas na frente da lavra subterrânea para correlacionar os parâmetros elásticos medidos em diferentes escalas.
- Gerar um modelo geológico conceitual do Greenstone, com informações de mapas superficiais, dados de sondagens e modelos estruturais produzidos pelo know how da mineradora. Agrupar os parâmetros físicos obtidos tanto na análises petrofísicas como no teste de fonte ao modelo geológico para gerar dados sintéticos e avaliar os melhores parâmetros de aquisição a serem utilizados no campo. Considerando as limitação logística e de material.

- Aquisição de dados sísmicos de reflexão ao longo de uma seção de 8 km de comprimento.
- Realizar pré-processamento e empilhamento bruto do dado com o objetivo de avaliar a funcionalidade do método e estratégia utilizada.

### 1.1.2 Métodos e estrutura da Dissertação

A dissertação encontra-se organizada em 6 partes.

- Descrição do contexto geológico
  - Teste de carga
  - Análise petrofísica
    - Testemunhos de sondagem
    - Levantamento in situ multicomponente
- Modelagem e definição de parâmetros de aquisição
- Aquisição e Avaliação dos dados reais
- Resultados e discussões

A ordem de apresentação dos capítulos seguem a ordem cronológica realizada durante o projeto. Cada capítulo contém a motivação, objetivos e resultados obtidos tornando-os independentes e não lineares.

# Capítulo 2

## Contexto geológico

Os terrenos greenstone belts guardam evidências sobre o passado mais remoto da litosfera terrestre pois são compostos de colagens de blocos arqueanos ou paleoproterozóicos que preservaram informações da história geológica de um local. Os registros nas formações como alterações estruturais e litológicas indicam os estágios de evolução geotectônicas sofridos ao longo do tempo. Essas regiões apresentam diferentes ambientes geológicos em sua estrutura tornando sua compreensão complexa e desafiadora. Além do interesse acadêmico no processo de evolução geológica esses terrenos contem comumente importantes depósitos minerais. Atualmente são considerados cinturões orogênicos similares aos mais recentes e são alvos de estudo na pesquisa acadêmica devido a sua importância científica e econômica. (De Wit and Ashwal 1995)

A aplicação de novas tecnologias mudaram a forma como esses cinturões orogênicos são compreendidos, tanto a sua forma estrutural quanto a sua composição litológica. Neste capítulo o foco será dado as unidades geológicas cortadas pelo levantamento sísmico, são elas: o Greenstone Belt de Crixás, o Complexo Anta e a parte sul do arco Magmático do Goiás (Sequência Santa Terezinha).

### 2.1 Geologia regional - Província Tocantins

A província Tocantins se localiza a oeste do Cráton do São Francisco e engloba as faixas Brasília, Paraguai e Araguaia, o Arco magmático do Goiás e o Maciço de Goiás (Figura 2.1). Fuck (1994) subdivide a porção oriental da província nas compartimentações tectônicas; Zona cratônica, Faixa Brasília (interna e externa), Maciço do Goiás e Arco magmático do Goiás.

## **Arco magmático**

A linha sísmica termina ao sul desta unidade, na Sequência Santa Terezinha. Essa unidade é composta por sequências vulcano-sedimentares neoproterozóicas e ortognaisses subordinados, associação típicas de arcos magmáticos intra-oceânicos.

## **Maciço do goiás**

Os terrenos Arqueanos e paleoproterozóicos situam-se na porção central do estado e representam uma típica associação de complexos granito-gnáissicos e greenstone belts. Os principais elementos são ortognaisses, greenstone belts e intrusões mais jovens.

Os terrenos granito-gnáissicos representam 80% do segmento crustal arqueano e são formados por gnaisses e intrusões granitoides de composição tonalítica e granodiorítica, em sua maioria. O terreno é dividido nos complexos Anta, Caiamar, Hidrolina, Caiçara e Uvá que não possuem limites bem definidos e Bloco Moquem que possui limite tectônico definido por zonas de cisalhamento vertical. Cada complexo apresenta idade e evolução distinta. (Figura 2.2)

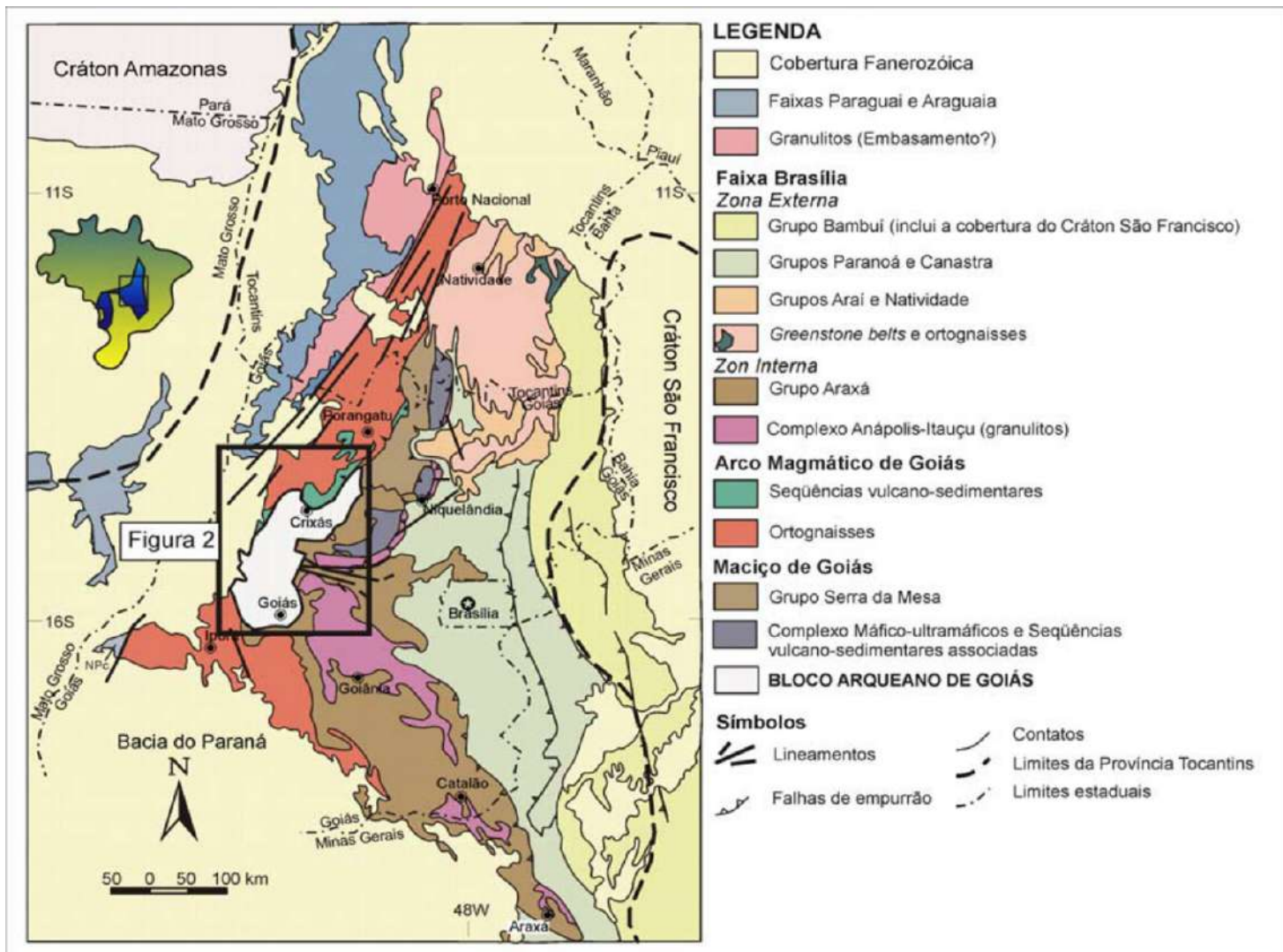


Figura 2.1: Mapa Geológico da Província Tocantins com destaque para o Bloco Arqueano de Goiás (Jost et al. 2014)

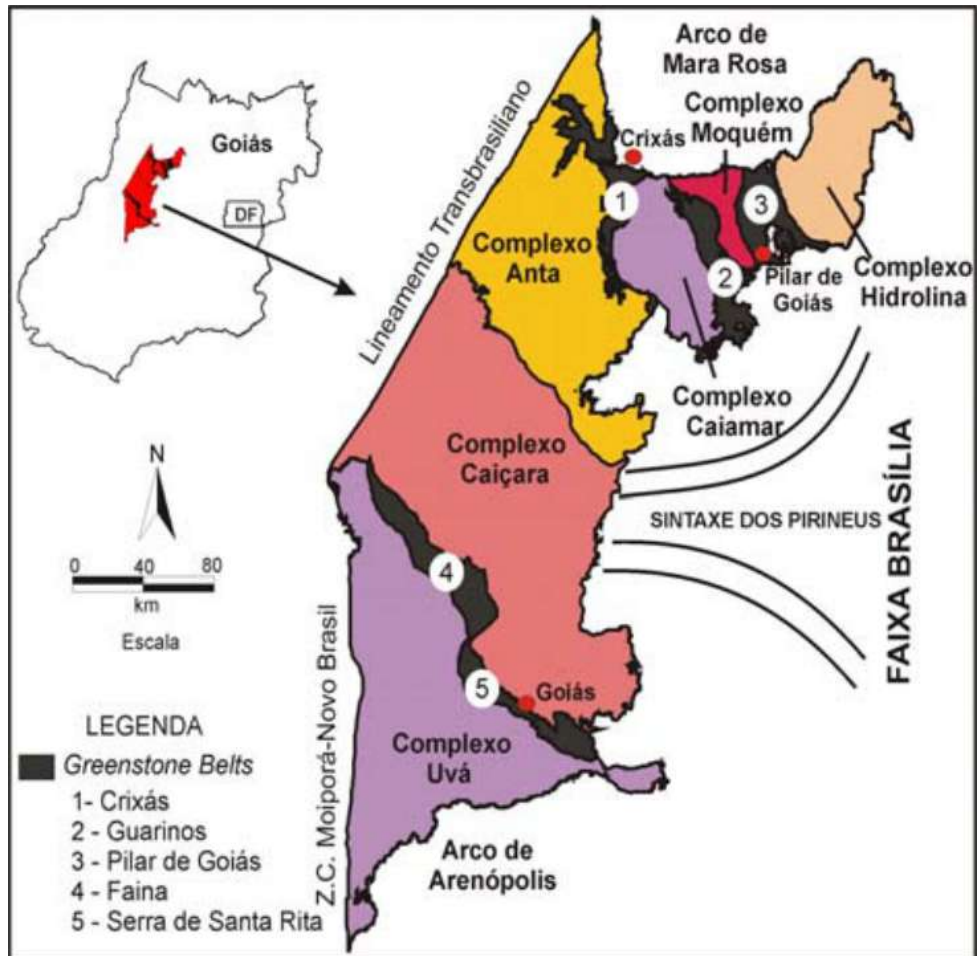


Figura 2.2: Mapa de compartimentação tectônica do Bloco Arqueano de Goiás (Jost et al. 2014)

Os greenstones ocorrem em 5 faixas alongadas; Crixás, Guarinos, Pilar, Faina e Serra de Santa Rita. O contato entre estes com os complexos ortognaissicos adjacentes é tectônico e a ocorrência de klippen indicam que essas rochas supracrustais estão alóctones. (Queiroz (2000))

As rochas diagnóstico dos greenstones são unidades vulcânicas e sedimentares, cada qual com sua história evolutiva. A reconstituição estratigráfica é complexa devido ao estado fragmentário, pela presença de vários eventos tectônicos e raridade de horizontes guia. Estratigraficamente são compostos por seções inferiores de metakomatiitos, seguidos de metabasaltos toleíticos, e rochas metassedimentares.



## **2.2 Unidades Imageadas pela linha sísmica**

### **2.2.1 Complexo Anta**

Situado a sul do Greenstone Belt de Crixás, é composto por granodioritos, tonalitos e granitos. Os corpos individuais são homogêneos. O contato deste com o greenstone é irregular com reentrâncias. A parte sul da linha sísmica está sob essa unidade.(Queiroz (2000))

### **2.2.2 Sequência Santa Terezinha**

Faz contato com o greenstone de Crixás ao norte e é composta por sequências vulcano-sedimentares com química similar aos komatiitos de Crixás. Kuyumjian et al. 2004 sugere que a sequência é paleoproterozóica. A parte norte da linha sísmica atravessa xistos metamorfizados na fácies xisto verde pertencentes a essa unidade.

### **2.2.3 Greenstone Belt Crixás**

O Greenstone Belt de Crixas é uma faixa alongada de comportamento aproximado N/S com comprimento de aproximadamente 45 km e largura de 6 km. Limitado pelo complexo da Anta a oeste e pelo Complexo Caiamar a leste e a norte pela Sequencia Santa Terezinha. (Figura 2.3)

Saboia 1979 subdivide as rochas da faixa Crixás em três unidades: Basal - Compostas por rochas vulcânicas ultrabásicas, Médio: Compostas por rochas vulcânicas básicas, e Topo - Formado por sedimentos clásticos e químicos. Essas unidades foram agrupadas nas Formações Córrego do alagadinho, Rio vermelho e Ribeirão das Antas, da base para o topo. (Figura 2.4)

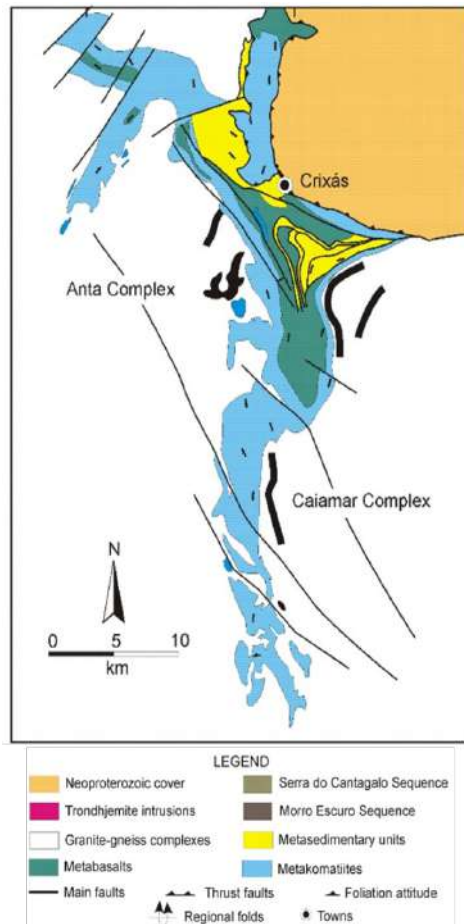


Figura 2.3: Mapa Geológico do Geenstone Belt de Crixás (Jost et al. 2014)

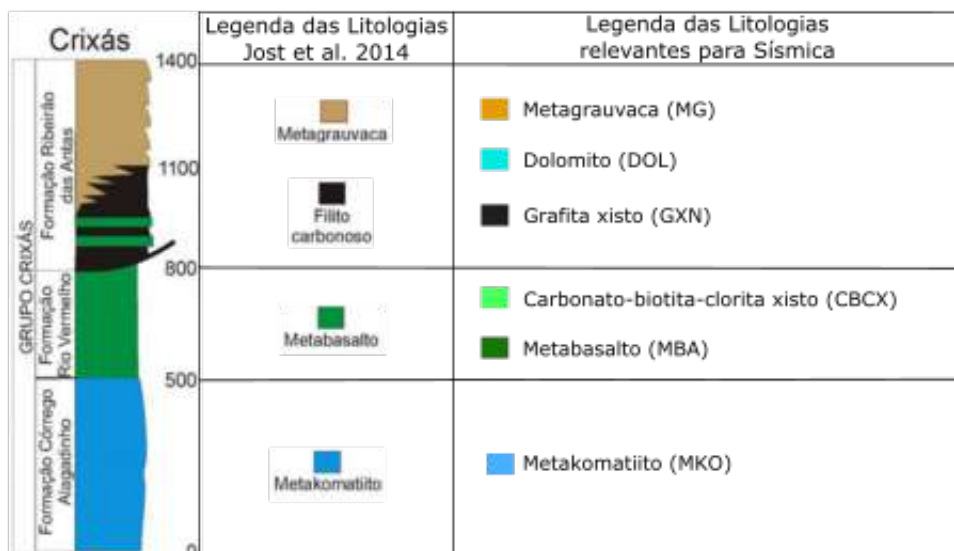


Figura 2.4: Coluna estratigráfica de Crixás (Jost et al. 2014)

A Formação Córrego do Alagadinho é composta por rochas ultramáficas efusivas e komatiitos transformados em xistos. Sondagens indicam a espessura dessa formação em aproximadamente 500 m. (Saboia (1979))

A Formação Rio Vermelho é dominada por metabasaltos e basaltos komatiíticos. Sondagens indicam uma espessura de 350m para essa formação. (Saboia (1979))

A Formação Ribeirão das Antas é composta por xistos carbonosos com lentes de mármore e uma lente de grauvaca. Teores altos de fluorapatita no xisto carbonoso indicam ambiente marinho de deposição. Segundo Theodoro (1995) essa formação pode ser subdividida em 4 membros: filitos carbonosos, mármore, filito carbonoso com fragmentos piroclásticos e metaturbiditos distais. A associação dos litotipos e estruturas sugerem deposição lacustre ou plataforma restrita de águas rasas com evolução gradativa, interrompida pela deposição de turbiditos. O topo dessa formação é caracterizado por um contato brusco entre o xisto carbonoso e o metarritimito, em algumas ocasiões os metarritimitos apresentam clastos de xisto carbonoso indicando um contato por discordância erosiva.

O Contato entre a Formação Ribeirão das Antas e Rio Vermelho é gradual e ocorre ao longo de algumas dezenas de metros. Indicando que a sedimentação iniciou sob ambiente euxínico as costas do declínio da atividade vulcânica. Os metabasaltos e metakomatiitos são unidades de fluxo formadas por sucessões de derrames. Essas unidades são intercaladas por xistos carbonosos, hiatos que indicam uma quiescência da atividade eruptiva. Dados mais recentes indicam que a evolução do greenstone de Crixás em dois eventos tectônicos dando origem a pelo menos 3 fases de deformação. A primeira fase resulta na ascensão de domos granito-gnaissicos, originando a estrutura de domos e quilhas de provável idade arqueana. E as demais fases já no Neoproterozóico resultando em movimentos reversos e transcorrentes. (Queiroz (2000))

A Figura 2.5 mostra o mapa geológico regional com a projeção da linha sísmica programada.

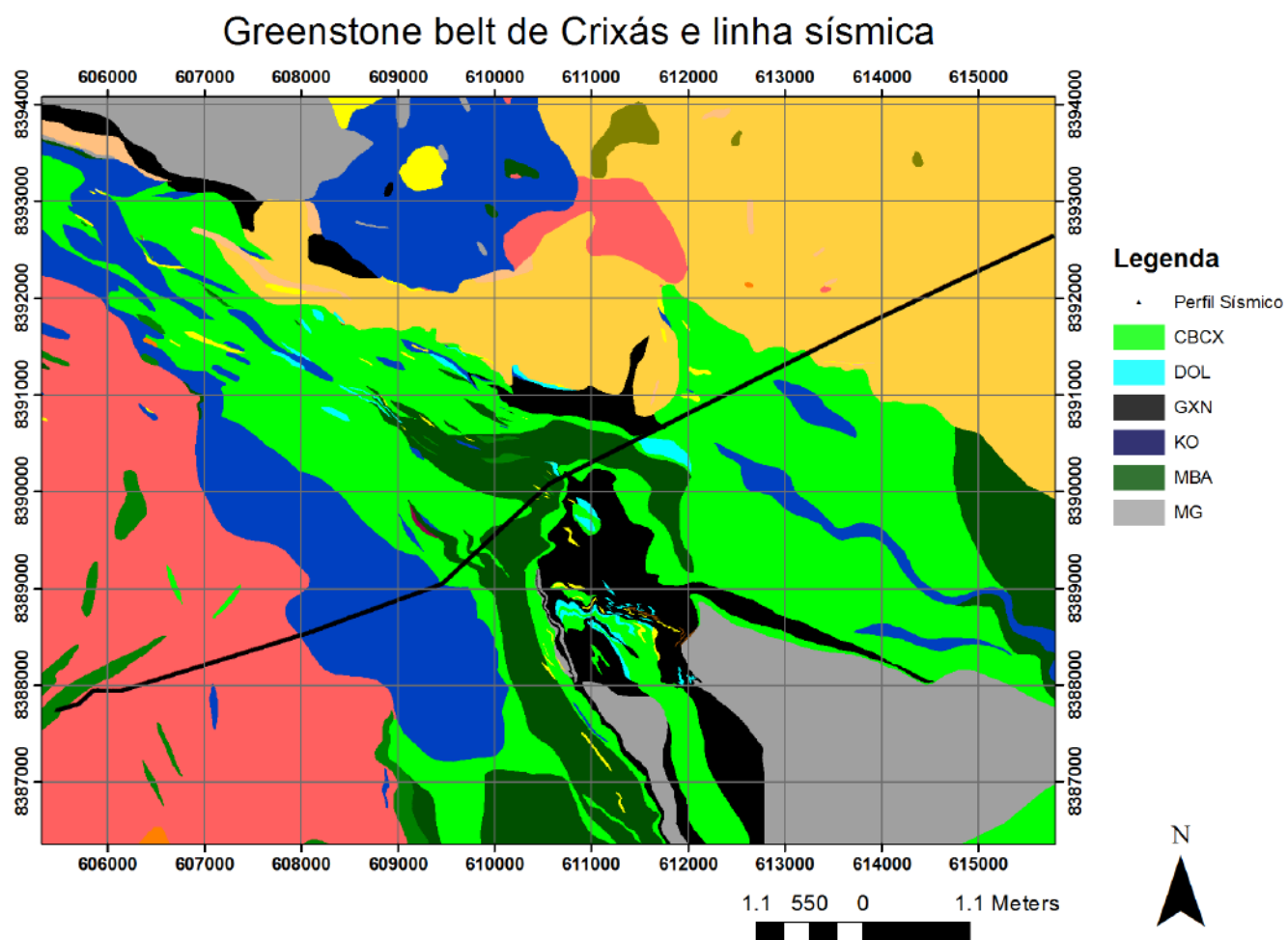


Figura 2.5: Mapa geológico e perfil sísmico cortando as principais unidades de interesse.

## Capítulo 3

# Teste de fontes e carga

Em pesquisas sísmicas de áreas heterogêneas polideformadas recomenda-se avaliar a eficiência do registro sísmico usando-se várias fontes de ondas mecânicas. A partir dos dados de um tiro, avalia-se o campo de ondas para a identificação da fonte com maior eficácia, assim como os melhores parâmetros para os registros sísmicos.

As queda de peso e os explosivos foram testados devido às facilidades para a construção da fonte (queda de peso) e ao uso do explosivo (know how da mineradora). A escolha da fonte levou em consideração fatores como a qualidade do dado (energia recuperada), o custo e a logística.

A habilidade de resolver o alvo depende principalmente da relação sinal/ruído e da banda de frequência do sinal sísmico registrado. Sendo que a relação sinal ruído indica a presença ou não de informação, e a banda de frequência indica a capacidade de resolução dessa informação. O teste de fonte tem por objetivo observar essas duas características a partir do dado real.

### **Relação Sinal/ruído**

O sinal é toda a informação de interesse registrada no dado, e a razão sinal/ruído mede a porção da energia que contem informação se comparado com o ruído tanto da fonte artificial quanto da sismicidade natural. A relação sinal/ruído indica se um projeto sísmico pode atingir seus objetivos ou não.

### **Banda de Frequência do sinal**

Quanto maior a banda de frequência gerada pela fonte, melhor a resolução do dado. A resolução pode ser definida como a capacidade de ver em menor escala, definir o alvo com maior precisão. As frequências registradas no sinal refletido depende majoritariamente

de 3 características: fonte, condição de acoplamento e meio no qual o sinal é propagado. Dentre os fatores citados são possíveis de controle, o tipo de fonte e seu acoplamento. As características petrofísicas influenciam na absorção de energia pelo meio. As rochas cristalinas tem a vantagem de ser meios elásticos que transmitem energia mecânica sem produzir perdas significativas na forma de calor. Na parte rasa existe grande perda de altas frequências pois o solo não apresenta comportamento elástico para altas frequências, agindo como um filtro passa baixa.

### **Objetivos e descrição do experimento**

Os dados do teste de fonte compreendem a primeira informação sísmica sobre o local de investigação, todo conhecimento extraído nessa etapa é utilizado na definição dos melhores parâmetros de aquisição. Com os testes tornam-se possíveis a avaliação da refletividade, do ruído da fonte, da camada de intemperismo e de alguns desafios que serão parte do processamento. Compreender o campo de onda gerado pela fonte e a resposta do meio é o primeiro passo para construir um projeto sísmico.

O teste foi projetado inicialmente em dois “pátios de tiro” (regiões onde as fontes foram acionadas). A Figura 3.1 apresenta esses pontos de tiro em vermelho e a linha de receptores em azul. Os pontos foram posicionados em uma área de ocorrência de filitos carbonosos e em outra área de afloramentos de metabasaltos. A disposição dos pontos de tiros nestas áreas objetivaram a observação do comportamento da fonte sob essas litologias, além da avaliação do sinal refletido em diferentes posições ao longo da linha.

O arranjo de geofones foi instalado na porção central do greenstone (Figura 3.1) e foi projetado para obter o maior offset de aquisição possível, 1440m, considerando os limites dos cabeamentos do equipamento. A área foi escolhida por pertencer a Mineradora e estar situada próximo a linha sísmica a ser adquirida.

### Mapa referente ao Teste de Fontes

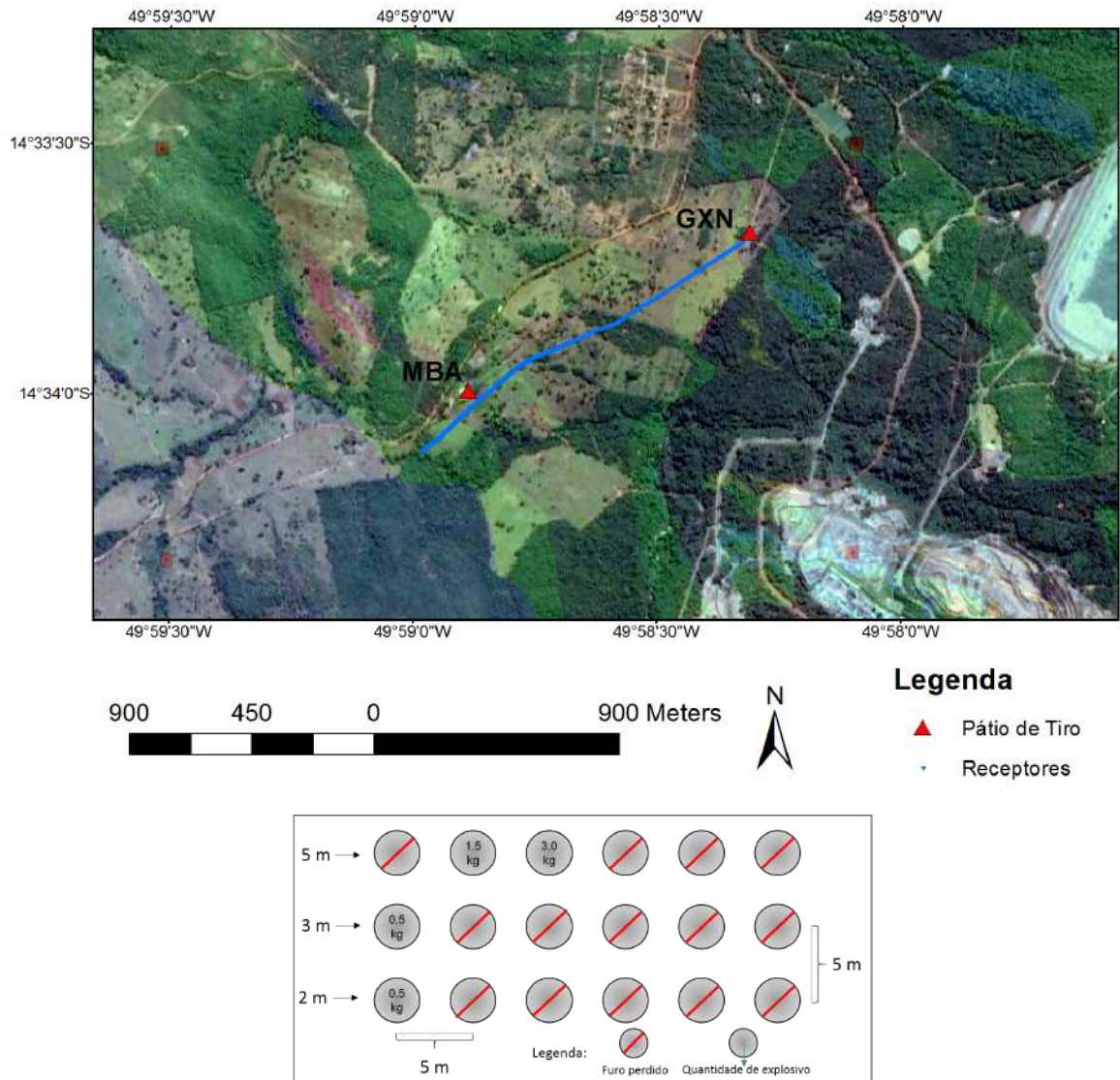


Figura 3.1: a) Mapa geológico da área onde desenvolveram-se os experimentos de fontes sísmicas com a localização dos pátios de tiro e dos receptores da sísmica. b) Exemplo modelo do pátio de tiro 1

Nos pátios de tiro perfuraram-se 18 furos a trado, equiespaçados em 5 metros, com profundidades de 2, 3 e 5 metros como a Figura 3.1. Nesses poços as cargas explosivas de Ammonium Nitrate/Fuel Oil (ANFO) foram detonadas com diferentes condições de acoplamento, e distintas montagem do explosivo (detonação composta de cordel, cordel detonante, exel e espoleta). No campo ocorreram testes também com detonadores eletrônicos para evitar o registro da onda aérea produzida pelo cordel detonante.

Os pesos utilizados na queda livre foram desenvolvidos pela equipe de engenharia da Mineração Serra Grande. O formato de projétil foi escolhido por apresentar um único ponto de impacto com extensão reduzida. (Figura 3.2)





Figura 3.2: Fotografias evidenciam as fontes de onda sísmica utilizadas nos testes de fonte. a) Queda de peso de 60 kg. b) Queda de peso de 300 kg. c) Cargas Explosivas de ANFO.



## Pátio de tiro 1 - Filito Carbonoso

Neste pátio, os furos foram carregados com cargas de 0.5kg, 1.5kg e 3kg, assim como testaram-se as quedas de peso de 60kg e de 300kg. Inicialmente será discutido a qualidade dos dados e o espectro de frequência referente aos explosivos. Em seguida, serão apresentados os dados referentes as quedas de peso e os stacks de 4 repetições e por ultimo avaliou-se o espectro de frequência comparativo entre todas as fontes testadas. O ensaio nesse ponto permitiu estabilizar o processo de aquisição dos dados sísmicos como apresentado na subseção 6.3.

### 3.1 Análise comparativa: Cargas explosivas

Nos registros sísmicos obtidos com o teste de carga de explosivos notam-se que há um aumento na relação sinal ruído com o acréscimo de carga, basta analisar a energia refratada na primeira chegada na Figura 3.3. É interessante observar que a seção de tiro comum não apresenta reflexões nítidas e contínuas ao longo da seção.

Esse fator pode ser resultado de baixa refletividade entre as unidades geológicas se comparado com o ruído ambiente. Outro fator importante é a geometria 3D da estrutura fazendo com que reflexões de todas as direções sejam atingidas pelo arranjo, a composição de reflexões torna difícil uma interpretação simplista de um refletor guia.

Nos resultados é possível comparar a capacidade de resolução de cada carga explosiva na Figura 3.3. A energia em alta frequência (aproximadamente 60HZ) aumenta significativamente para cargas explosivas maiores, indicando um aumento de resolução no dado adquirido.

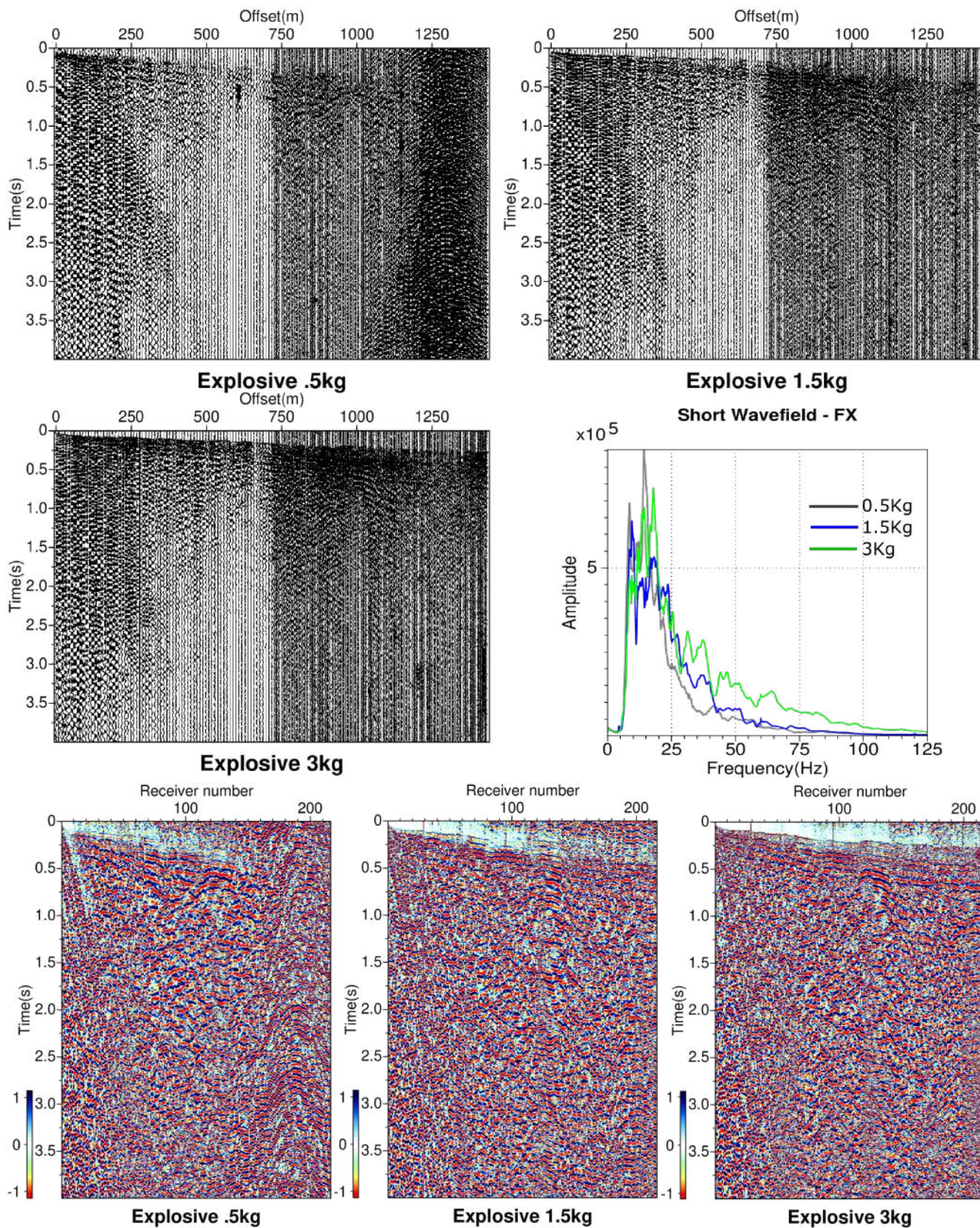


Figura 3.3: Sismogramas e espectro de frequência referente ao uso de explosivo nos filitos carbonosos (GXN). Os sismogramas apresentam diferentes densidades de traço devido ao arranjo de receptores, espaçamento de 5 m na parte mais densa e 10 m na porção menos densa, o ensaio foi realizado dessa forma devido a limitação de cabos de transmissão de dados. Sismogramas em escala de cor são apresentados para melhor visualização.

## 3.2 Análise comparativa: Queda de peso e Empilhamento de janela de tiros

Fontes sísmicas utilizando queda de peso podem facilitar a etapa de campo, caso seja possível recuperar energia e obter imagens satisfatórias com esse tipo de fonte, poderíamos reduzir o tempo de aquisição e o custo relacionado a utilização de explosivo. Nesse ensaio diferentes pesos foram utilizados e verificou-se que não é possível recuperar energia referente a profundidade alvo nem com o empilhamento de janelas de tiro.

A Figura 3.4 apresenta os resultados da queda de peso de 60kg e o stack de 4 tiros. No gráfico observa-se pouca energia coerente na refração e reflexão para os 500m de offset próximo. Até mesmo após a aplicação de ganho AGC não é possível observar energia retro espalhada nítida. Essa fonte não apresenta uma opção viável para a aquisição.

A Figura 3.4 também mostra os resultados para a queda de peso de 300kg e o stack de 4 tiros. A energia em ambas as janelas de tiro para a parte rasa, aproximadamente 1s, pode ser observada com qualidade superior se comparado com os resultados obtidos com a queda de peso de 60kg.

O espectro de frequência para a queda de peso Figura 3.5 mostra pouca mudança fora das frequências de 10hz a 50hz, o que indica que essa fonte não pode recuperar frequências acima desta resolução. Apesar de se observar uma melhor qualidade nos dados com o aumento do peso e somando traços, o espectro de frequência dos resultados não apresenta uma relação de crescimento linear para altas frequências (35hz a 45hz). Para esse range a queda de peso de 60kg e o respectivo stack apresentaram a mesma energia que é produzido pelo peso de 300kg. Ou seja, o aumento do peso amplia a relação sinal/ruído mas não apresenta mudança significativa nas altas frequências, mantendo a resolução do sinal.



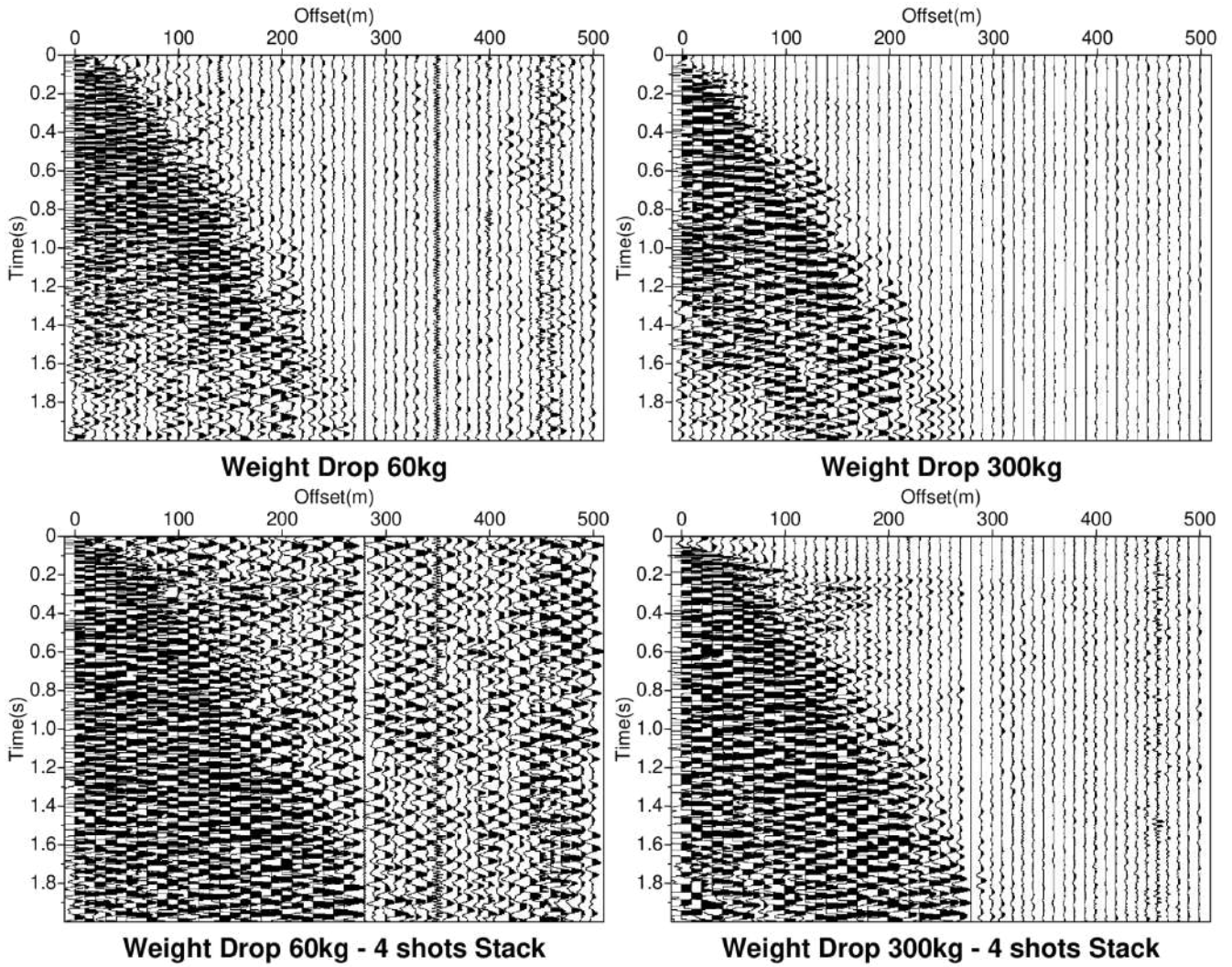


Figura 3.4: Sismogramas e espectro de frequência referente à queda de peso

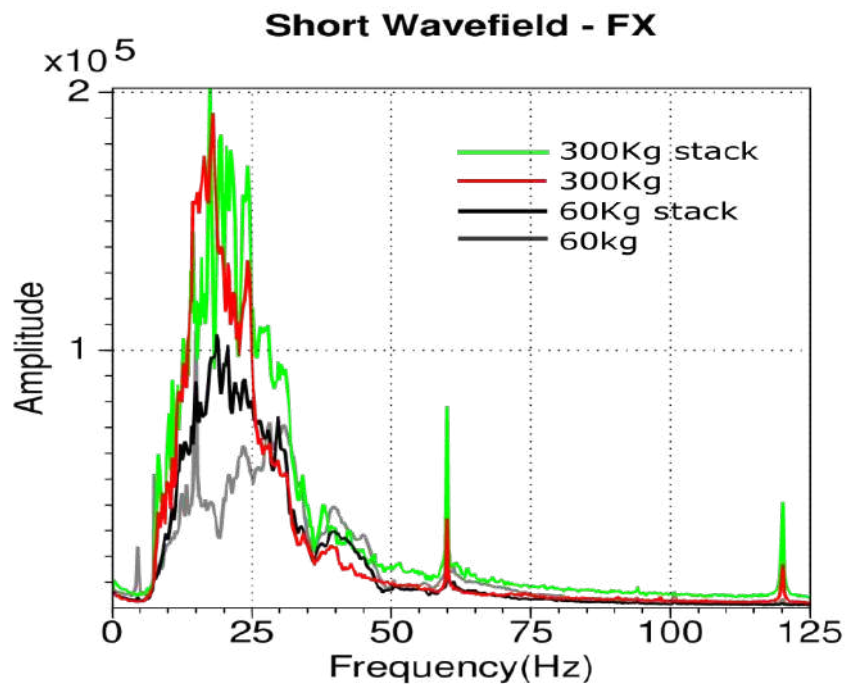


Figura 3.5: Espectro de frequência referente às quedas de peso.

### 3.3 Análise comparativa: Queda de peso X Explosivo

É possível avaliar a grande diferença no conteúdo de energia comparando fontes explosivas e queda de peso. A comparação do espectro de amplitude na Figura 3.6 deixa claro o maior conteúdo de frequência dos explosivos, indo de 5hz a 70hz, além de observar o sinal gerado em maiores offsets para as cargas explosivas

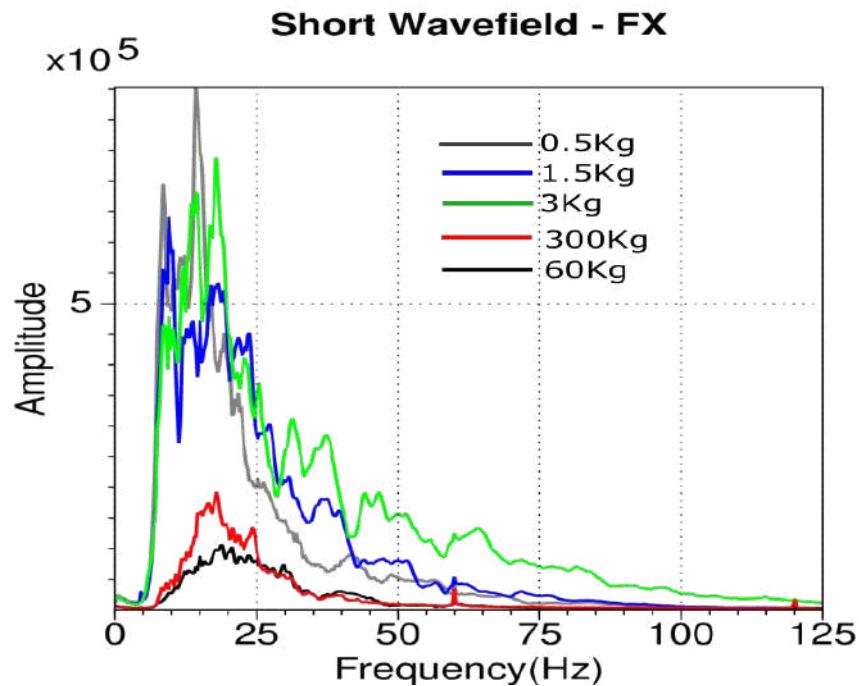


Figura 3.6: Espectros de frequências comparativos entre as janelas de tiros referentes as fontes de cargas explosivas e as quedas de peso.

#### 3.3.1 Considerações quanto ao levantamento

Considerando que o objetivo do projeto é imagear a estrutura acima de 1km de profundidade e subestimando uma velocidade sísmica de 3km/s (baixa para o contexto geológico de greenstone) projetam-se o registro de refletores a partir de 0.6 segundo.

Os testes realizados com a queda de peso não apresentam sinal nítido para tempos superiores a 0.6s o que a torna inviável para uso da mesma no estudo. Assim, nesta etapa definiu-se que apenas as fontes de cargas explosivas podem atingir os objetivos propostos.

A obtenção de energia em offsets distantes tem relação direta com a quantidade de carga utilizada. É possível observar que para offsets de 1400 km apenas cargas iguais ou superiores a 3kg podem atingir sinal satisfatório (Figura 3.3). Essa análise de sinal por offset deve ser levado em conta para a aquisição dos dados pois devido ao limite

do equipamento (restrito comprimento de registro) realizou-se a aquisição sísmica no greenstone com a técnica optimum offset.

## **Pátio de tiro 2 - Metabasalto**

Com o equipamento adaptado ao uso do explosivo, o segundo pátio de tiro teve como objetivos;

- Avaliar a relação da profundidade do explosivo e sinal, para uma mesma carga.
- Avaliar a relação entre aumento de carga (quantidade de explosivo) e sinal, para uma mesma profundidade.
- Realizar testes aumentando a carga e a profundidade de detonação para avaliar o sinal sem o efeito da zona de baixa velocidade.

### **3.4 Análise comparativa: 1.5kg de explosivo a 2m,3m e 5m**

Nos registros sísmicos da Figura 3.7 observam-se que para offsets de 800m, 1,5 kg de explosivo tem a capacidade de gerar sinal em todos os canais. A mesma ilustração apresenta acréscimo no conteúdo de altas frequências com o aumento da profundidade da carga, o que acarreta dados com melhor resolução. As imagens não apresentam refletores nítidos, o único artefato evidente é a onda aérea produzida pelo cordel explosivo. Nos registros observa-se que o conteúdo de frequência do sismograma a direita se mantém alto enquanto que no registro da esquerda do ponto de tiro, a energia decai mais depressa. Esse fato se deve a composição da rocha, visto que o registro da direita provém da propagação do sinal de metabasaltos, e os registros da esquerda provêm de camadas de filitos carbonosos.



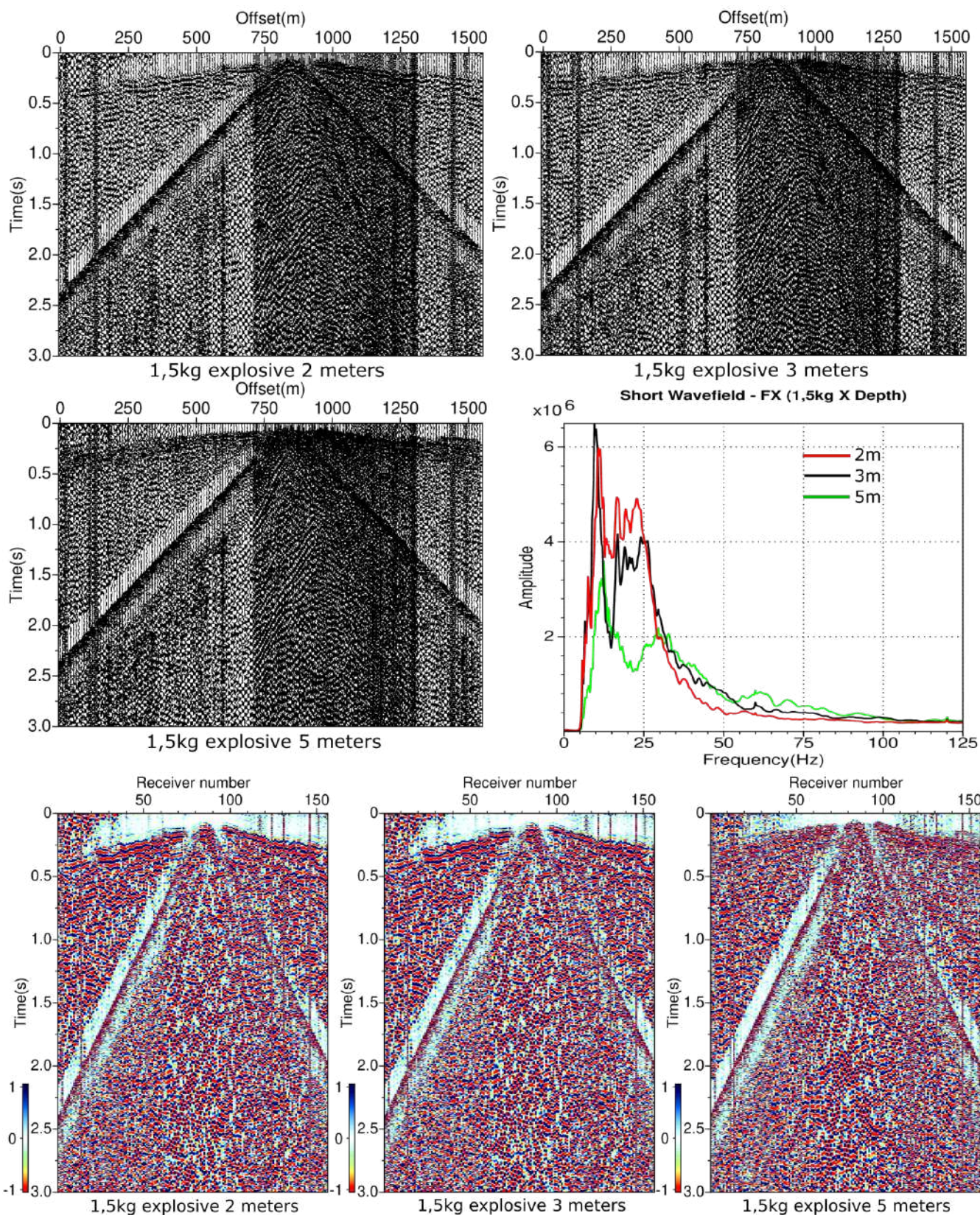


Figura 3.7: Sismogramas e espectro de frequência referente a 1,5kg de explosivo instalados em diferente profundidades nos metabasaltos (MBA). Os sismogramas apresentam diferentes densidades de traço devido ao arranjo de receptores, espaçamento de 5 m na parte mais densa e 10 m na porção menos densa, o ensaio foi realizado dessa forma devido a limitação de cabos de transmissão de dados. Sismogramas adquiridos em diferentes profundidades de perfuração no metabasalto (MBA) em escala de cor.

### 3.5 Análise comparativa: 1.5kg, 3kg e 4kg de explosivo a 3m

O aumento da carga explosiva é capaz de amplificar a energia transmitida ao longo da linha sísmica, tornando possível a investigação em offsets mais distantes e maiores profundidades, contudo a banda de frequência recuperada apresenta maior variação quando a profundidade da fonte é aumentada. Logo, existe um crescimento na relação sinal ruído com o aumento da carga mas pouco acréscimo na capacidade de resolução do dado. A resolução apresenta maior crescimento com o aumento da profundidade do tiro.(Figura 3.8)

As formas distintas de montagem das cargas de explosivos produzem respostas distintas.(Figura 3.9)

- A Figura 3.8-(1,5kg) apresenta a detonação com o cordel detonante direto no explosivo. Esse arranjo produz a onda aérea no mesmo tempo de explosão. (Figura 3.9-B)
- A Figura 3.8-(3kg) apresenta o uso de excel (cordão de gás) utilizado para atrasar a detonação da carga alguns segundos. Esse arranjo é o padrão utilizado na mina. A carga é acionada alguns segundos após a onda aérea produzida pelo cordel detonante. (Figura 3.9-A)
- A Figura 3.8-(4kg) exemplifica o uso de espoleta eletrônica, preferível por não apresentar o ruído referente a onda aérea.(Figura 3.9-C)

Novamente, as cargas acionadas nesse pátio apresentaram amplitudes coerentes com sinal de refração e reflexão apenas para os primeiros 3.5 segundos de registro. Indicando que os alvos refletores estão rasos ou que a relação sinal/ruído para a parte profunda não permite a visualização de eventos coerentes.



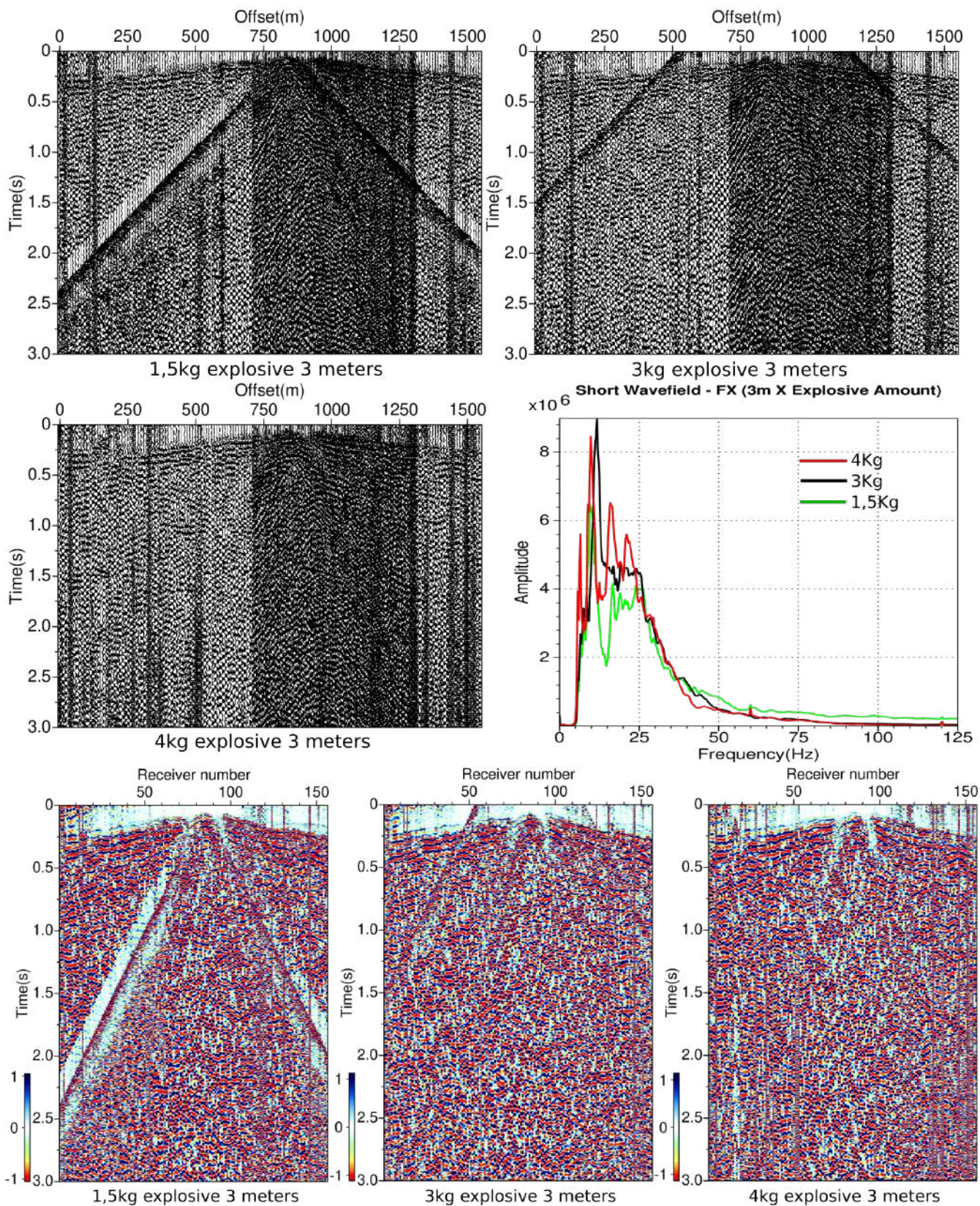


Figura 3.8: Sismogramas e espectro de frequência referente às diversas quantidades de explosivo instaladas na profundidade de 3 metros no metabasalto (MBA). Sismogramas registrados com diferentes cargas explosivas instaladas a 3 metros de profundidade sob o metabasalto (MBA) em escala de cor.



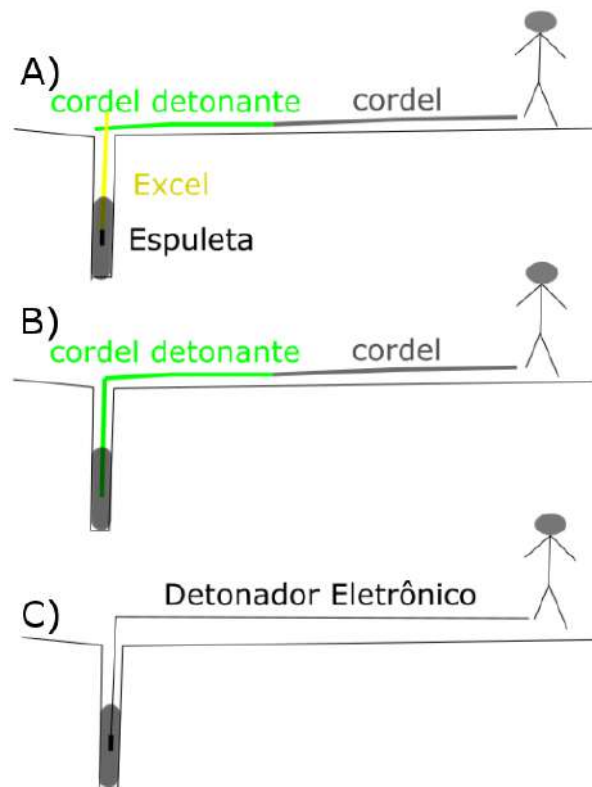


Figura 3.9: Sistemas de detonação: a) Sistema completo com cordel, cordel detonante e excel. b) Sistema reduzido para evitar o atraso da explosão, composto por cordel e cordel detonante. c) Sistema eletrônico.

A análise dos resultados em campo identificou uma forte zona de baixa velocidade que apresenta alta refletividade. Para avaliar o efeito da zona de baixa velocidade foram projetados dois tiros a uma profundidade de 14m e 30m, esse ensaio permite avaliar a frequência do sinal recuperado caso a fonte for colocada direto na rocha não intemperizada.

### 3.6 Avaliação de tiros abaixo da zona intemperizada

A Figura 3.10 apresenta a melhora do sinal com o aumento da carga e profundidade. É possível observar a maior capacidade de resolução conforme a fonte é acionada abaixo da rocha intemperizada. Basta observar a qualidade do sinal obtido a 30m de profundidade. A recuperação de altas frequências pode ser observada no espectro de amplitude da Figura 3.10. É interessante notar a ausência ou redução significativa de ondas superficiais se comparado com os shots rasos da Figura 3.8.

Nesse caso, para entender melhor o espectro de amplitude da Figura 3.10 é importante discutir as condições de acoplamento das cargas;

- A Figura 3.10-(8kg 5m) apresenta um furo de 5 metros completamente tamponado. (ideal para evitar perda de energia)

- A Figura 3.10-(8kg 14m) mostra os resultados para a profundidade de 14 metros, contudo o furo de não pôde ser tamponado devido a normas de segurança. Esse tiro produziu pouca energia em altas frequências (curva preta no espectro de frequência da Figura 3.10)
- A Figura 3.10(15kg 30m) apresenta a melhor resolução em frequência entre todos os dados. Essa carga foi colocada abaixo da zona freática, submersa na água, o que tornou o acoplamento mais eficaz que no caso da Figura 3.10-(8kg 14m). Apesar de não possuir tamponamento a água age como mecanismo de acoplamento da carga e o meio.



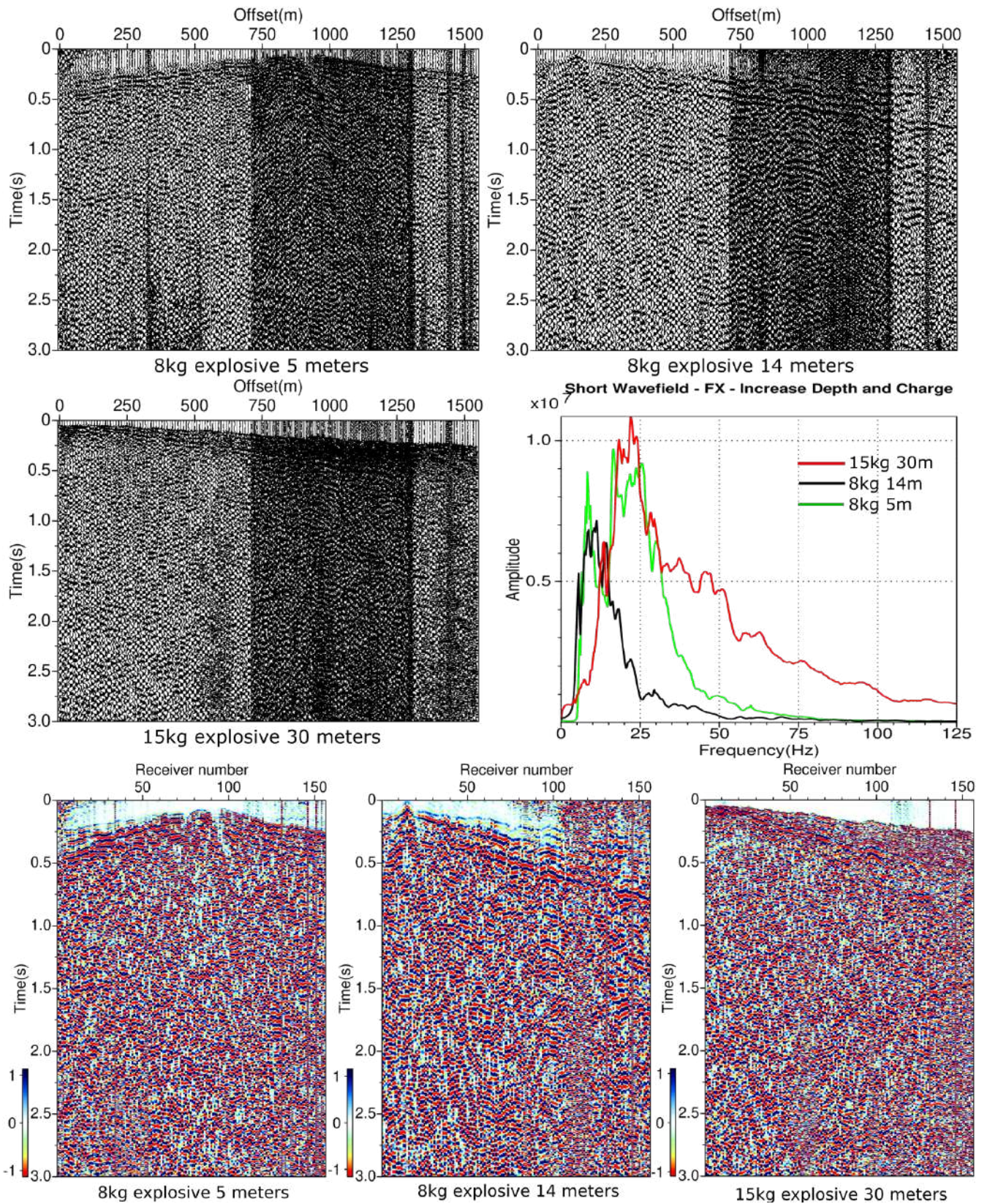


Figura 3.10: Sismogramas e espectro de frequência registrados com fontes explosivas instaladas abaixo da zona de intemperismo. Sismogramas registrados com fontes explosivas instaladas abaixo da zona de intemperismo em escala de cor.

## 3.7 Resultados

Foi possível observar o aumento da resolução com o aumento da profundidade de detonação. Assim como obter maior amplitude para cargas explosivas maiores. Contudo, os resultados indicam que apenas o aumento da carga explosiva não apresenta melhor resolução do sinal (maiores frequências).

É interessante salientar também a importância do sistema montado para a detonação e tamponamento. Tamponar o furo é uma tarefa essencial, tornando a acoplagem do explosivo eficaz. A forma de montagem do explosivo pode apresentar forte ruído no dado adquirido sendo aconselhável sempre o uso de espoletas eletrônicas.

Os principais resultados dessa etapa considerando os objetivos do projeto sísmico foram definir as cargas explosivas à profundidades de 2 m para o levantamento. O alto custo relacionado a sondagens de maior profundidade torna inviável aumentar significativamente essa metragem. Aparentemente o aumento da carga produziria melhores resultados contudo a carga limite, por questões de segurança, imposta pelo blaster é de 3 kg para a profundidade de 2m.

Apesar de não ser possível identificar refletores nítidos em um painel de tiro, observam-se ruídos coerentes ao longo do dado adquirido. Esses ruídos podem ser refletores com baixa refletividade, que apenas com um ponto de tiro, não tornam-se alvos coerentes. Espera-se que com o stack de dados em ponto médio comum seja possível observar a energia empilhada. Com o aumento da relação sinal/ruído pode ser possível identificar energia retro espalhada para guiar a etapa de processamento.

A frequência máxima obtida para essa carga e profundidade é de 60hz. Essa informação será utilizada para suprir a criação de dados sintéticos durante a modelagem.

O padrão de utilização do explosivo utilizado pela Mineração Serra Grande apresenta ruídos de onda aérea, logo tornou-se necessário a utilização de espoletas eletrônicas no lugar de cordel detonante. As espoletas apresentaram maior custo e necessidade de treinamento do operador.



# Capítulo 4

## Petrofísica

Antes de realizar o levantamento sísmico, etapa que representa o maior custo do projeto, é importante avaliar a capacidade da metodologia atender aos objetivos propostos. A modelagem sísmica serve para sustentar essa tomada de decisão, gerando confiança para o investimento ou rejeitando a proposta para prevenir gastos desnecessários. Com as simulações numéricas criam-se dados sintéticos e definem-se as melhores abordagens para os desafios encontrados. As informações essenciais para a simulação numérica são a velocidade da onda sísmica e a densidade do meio, esse capítulo tem como objetivo descrever como esses parâmetros foram obtidos, além de propor uma metodologia para estimar as velocidades do meio.

O estudo petrofísico é dividido em 2 partes: a primeira composta pela leitura dos valores de velocidade  $V_p$  utilizando um detector ultrassônico manual, e a segunda propõe uma metodologia para obter valores de  $V_p$  e  $V_s$  com um experimento sísmico multicomponente. A última é descrita no formato de artigo.

A partir dos dados de  $V_p$  e de densidades, construiu-se um modelo acústico, essa modelagem teve como objetivo avaliar a refletividade das unidades geológicas em uma escala de 2km de profundidade na porção central do greenstone. O objetivo foi desenvolver estratégias para avaliar a continuidade das estruturas alvos já conhecidas pela mineradora como: estrutura 3, 4 e palmeiras. As modelagens acústicas não consideram ondas cisalhantes no meio, assim a identificação de ondas S e convertidas podem ser de grande importância em terrenos cristalinos devido a menor velocidade de propagação. O processamento sísmico padrão trata ondas cisalhantes como ruídos nos dados, suprimindo-as para aumentar a relação sinal ruído.

Os benefícios de usar ondas cisalhantes são conhecidos para estudar diversos desafios sísmicos como zonas fraturadas, contatos geológicos de baixa refletividade P, identificar litologias e imagear abaixo de camadas de altas velocidades como camadas de sal e de ba-

saltos (Garotta (1999)). Características similares são presentes na área de estudo, como a baixa refletividade entre as unidades e a presença de metassedimentos (menor velocidade) entre camadas de metabasaltos (maior velocidade) .

Eaton et al. (2003) descreve a importância da modelagem elástica para regiões de rocha cristalina e discute o efeito da rugosidade dos alvos e direcionalidade da energia retro-espalhada nos dados adquiridos. Aparentemente a direcionalidade da energia sísmica tem um papel fundamental em rochas duras se comparado com os ambientes sedimentares onde consideram-se refletores especulares.

O mesmo conceito de direcionalidade do raio sísmico é utilizado para desenvolver uma metodologia que estima a velocidade de onda compressional e cisalhante. O experimento multicomponente sob afloramentos dentro da mina subterrânea são descritos na segunda parte do capítulo. A motivação que justifica o experimento é reduzir custo de análises petrofísicas, principalmente para ondas cisalhantes, essa nova abordagem pode viabilizar a obtenção dos parâmetros  $V_p$  e  $V_s$  em regiões com acesso a rocha não intemperizada.

## **4.1 Levantamento em testemunhos com Medidor Ultrassônico**

### **4.1.1 Descrição do Método e Objetivos**

Nas análises petrofísicas usaram-se 3 furos de sondagem que foram escolhidos porque amostram as principais unidades estratigráficas do Greenstone Belt. Estes poços encontram-se na projeção da linha sísmica terrestre para posterior correlação com as informações sísmicas. O levantamento foi realizado em conjunto com consultores da Hiseis, empresa especializada em sísmica sob rochas duras. (Figura 4.3)

O equipamento Surfer Ultrasonic detector UK1401 foi usado para medir  $V_p$  nos testemunhos de sondagens. O medidor de onda P é aplicado no testemunho seco e consolidado. Cada medida é composta pela média de 3 registros de sondagens ultrassônicas na mesma amostra, variando-se a posição do equipamento para evitar o registro em foliações preferenciais ou em fraturas nos testemunhos causadas no processo de extração da amostra.

As medidas de densidade foram realizadas pelo Método de Arquimedes, utilizando um tubo de PVC com graduação de volume para medir o deslocamento da coluna de água gerado pelo mergulho da amostra. Os dados de massa são adquiridos com o testemunho seco em uma balança de precisão de 0.01 gramas.

Os registros de onda P e de densidade nos testemunhos totalizaram 828 medidas em amostras distintas. A tabela 4.1 contem os respectivos números e intervalos de registros sísmicos de cada furo de sondagem.

Tabela 4.1: Tabela de amostras utilizadas

Furo ID	No. de amostras	Da profundidade (m)	Até a profundidade (m)
CPIVES0024	90	648.42	1149.12
CPIVES0029	401	40.39	1160.04
NM134	337	24.16	1202.27



Figura 4.1: Foto evidencia o levantamento petrofísico realizado nos testemunhos de sondagens da área do Greenstone Belt de Crixás.

#### 4.1.2 Discussão dos dados

Os resultados obtidos podem ser descritos no formato de uma simples tabela 4.2. Com as análises identificam-se baixa impedância acústica nos dolomitos e metagrauvascas, valores



médios para CBCX e GXN, e altos valores nas ultramáficas e metabasaltos que compõem a porção estratigráfica inferior do greenstone.

Os registros petrofísicos apresentam uma ampla variação de impedância, a Figura 4.2 exemplifica a alta variação litológica dentro de 400 metros de profundidade. Nos registros nota-se uma queda de impedância entre as unidades superiores metabasaltos e CBCX (de 500m à 700m) se comparado com as unidades inferiores GXN e dolomitos (de 720m à 800m).

A complexidade estratigráfica apresenta desafios para a metodologia se comparado com as bacias sedimentares onde as unidades geológicas são contínuas e espessas ao longo do perfil. A presença de vários refletores produz um padrão caótico nas chegadas em superfície devido a composição de várias chegadas em um pequeno intervalo de tempo.

Ou seja, o comportamento do campo de velocidade pode ser definido em duas ordens de variação; existe alta variação litológica e de refletividade para pequenos intervalos de profundidade, assim como uma variação de impedância consistente do campo de velocidade em escala regional entre as rochas metassedimentares e os metabasaltos. A variação regional possui maior contraste de impedância o que indica que possivelmente terá maior expressão nos resultados obtidos.

Tabela 4.2: Tabela com as velocidades, densidades e impedâncias acústicas médias dos registros nas unidades geológicas presentes nos testemunhos de sondagens.

Unidade	$V_p(m s^{-1})$	Densidade( $g cm^{-3}$ )	$AI(kgm^{-2}s^{-1}x10^6)$
MG	5200	2.6	13.5
MBA	5400	3.2	17.3
CBCX	5000	3.1	15.5
DOL	4500	2.8	12.6
GXN	5200	2.9	15.1
Ultramafics	5300	3.1	16.4
MVA	5500	2.7	14.8
MG2	5000	2.3	11.5
Structure 4	4000	2.5	10

### 4.1.3 Modelagem Acústica

O modelo geológico construído pela equipe de exploração da Mineração Serra Grande representa o perfil sob a linha até 2km de profundidade. As propriedades físicas da Tabela 4.2 são inseridas para cada litologia constituindo o modelo acústico visto na Figura 4.3.

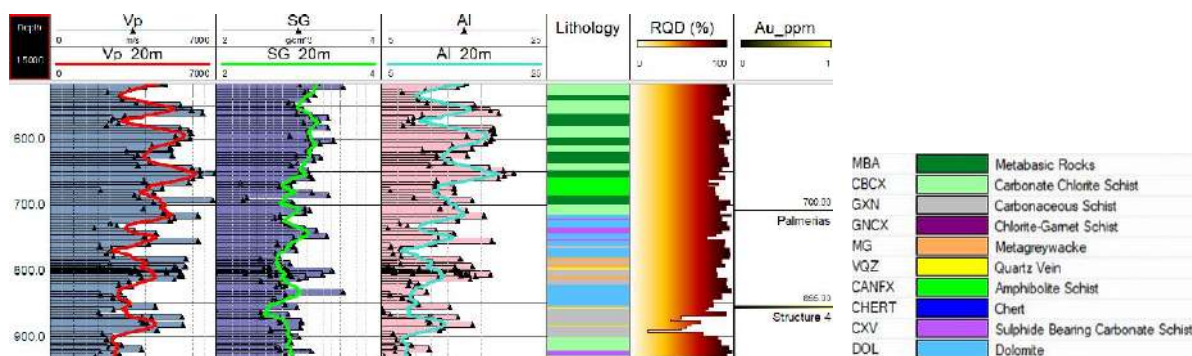


Figura 4.2: Resultados do poço NM134 exemplificando a heterogeneidade da refletividade. Alta impedância nos basaltos e CBCX (de 500m à 700m), e baixa impedância nos filitos carbonosos e dolomitos (de 720m à 800m) (retirado de Villahermosa and Turner (2017)). Os perfis correspondem a Velocidade da onda P (Vp), Densidade (SG) e Impedância acústica (AI), Litologia, Índice de recuperação da amostra (RQD) e contagem de ouro na amostra (ppm).

A seção sísmica apresenta o resultado da migração pré-stack em profundidade, com dados sintéticos simulando uma aquisição com tiros a cada 20m e receptores a cada 10m. A ondaleta Ricker é utilizada como sinal e a frequência de 30Hz é definida pela experiência em regiões similares.

Na Figura 4.3 os refletores mais nítidos representam os contatos entre metabasalto/meta-grauvaca e metabasalto/dolomitos. O contato MBA/MG pode indicar o Horizonte guia que define a estrutura profunda do greenstone. Já a interface MBA/DOL deve produzir refletores de alta amplitude sem continuidade lateral nítida.

A refletividade entre o metabasalto e GXN é de menor amplitude, espera-se que esse refletor seja contínuo lateralmente.

As unidades CBCX são alterações do metabasalto e estão contidas dentro da camada de rochas máficas. O CBCX apresenta alta refletividade devido a baixa velocidade se comparada com a unidade MBA. Dessa forma, as alterações possuem alta refletividade podendo variar em forma geométrica e tamanho. (Figura 4.2).

#### 4.1.4 Resultados

O principal resultado dessa etapa é a obtenção de valores de velocidades da onda P e de densidades das principais litologias que compõem o greenstone.

Os perfis petrofísicos e a modelagem acústica identificam os principais refletores (maior

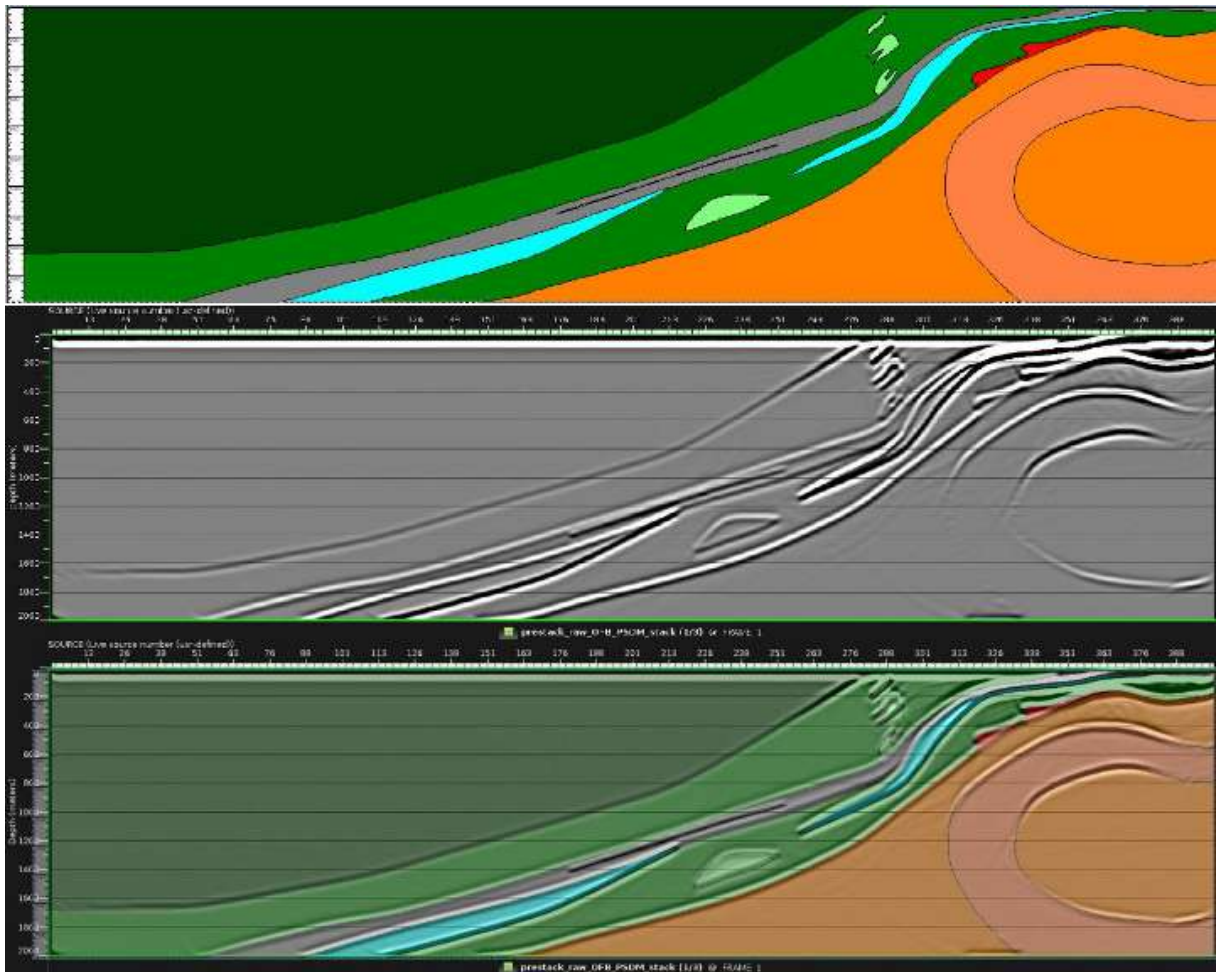


Figura 4.3: Modelo geológico, seção sísmica sintética (Migração pré-stack em profundidade) e sobreposição de ambos os painéis (retirado de Villahermosa and Turner (2017))

contraste) como os contatos entre o metabasalto/dolomito e metabasalto/MG. Essa última pode definir a forma geométrica do greenstone, servindo como horizonte guia para um estudo regional.

Em um estudo de detalhe, com escala de 2km de profundidade, para mapear a continuidade os principais alvos de interesse da MSG, as seguintes estratégias são propostas:

A estrutura palmeiras pode ser limitada pelo contato Metabasalto/Filito carbonoso(GXN), o horizonte pode servir como guia acompanhando a estrutura.

A definição da estrutura 3 dependerá do contraste entre o filito carbonoso(GXN) e a metagrauvaca, espera-se que esse refletor tenha menor amplitude no registro sísmico.

A estrutura 4 pode ser imageada devido às fraturas associadas dentro da unidade indicado pelo índice RQD de recuperação da rocha. Possivelmente essa unidade sera vista

como refletores hiperbólicos e não como um refletor devido a sua expressão geométrica.

## 4.2 Estimativa $V_p$ e $V_s$ na Mina

## Vp and Vs estimation with Near Offset multicomponent acquisition

### Abstract

Velocity estimations is essential in seismic projects, from modeling to interpretation all steps takes advantage of this basic building block. Estimate compressional and shear velocities usually needs costly equipment, this study propose a new approach to get estimations using standard seismic acquisition equipment in regions with access to unweathered rocks as underground mine and preserved outcrops. Instead of using surface waves our experiment aims to obtain velocities using direct wave in a multicomponent survey. Results shows P and S velocities over Crixás Greenstone Belt (Central Brazil). Standard petrophysical P waves measurements using ultrasonic detector validates obtained results.

#### 4.2.1 Introduction

A representative velocity estimation from geological units is essential for a seismic project, seismic image quality depends upon understand of geometry and rock parameters. This study intent to extract P and S waves velocities ( $V_p$  and  $V_s$ ) analyzing direct wave over unweathered rocks. Assumptions as homogeneity and direct ray transmission along a small-scale (less than 3m) multicomponent survey is used.

Seismic industry used to focus its efforts in P waves processing a modeling, so P wave velocity estimation would cover their needs. Probably the major interests over shear velocities rose in geotechnical and engienering problems to estimate Young's modulus. Determination of elastic constants using dinamic method dates back 1936 (Ide (1936)), and consists of obtain elastic moduli from S wave velocities. Currently there are various methods to estimate seismic waves velocities, it can be split in indirect methods; surface wave, tomography, seismic reflection velocity analysis... or direct methods; laboratory core measurements, full wave sonic loggins and borehole surveys. Each tecnique is suitable for a specific problem and its reliability is discussed to each challenge. (Garofalo et al. (2016a), Garofalo et al. (2016b), Crice (2002) and Mari and Vergniault (2018))

This work aims to obtain seismic velocities for geological units that can be recognised in outcrops. It can reduce the petrophysical costs in places with access to fresh rock exposition, thus it is specially suitable in hard rock environments as mine sites that usually has underground galleries and open pits. This method takes advantage to use standard seismic survey equipment, so any seismic crew that has acess to outcrops can estimate  $V_p$  and  $V_s$ .

---

<sup>01</sup> Geoscience Institute, University of Brasilia, <sup>2</sup> Catholic University of Santos

## 4.2.2 Material and methods

The common methods to estimate seismic velocity needs drill hole cores or borehole logging tools, both techniques has its own limitations and advantages sometimes acting as complementary information to solve a real problem.

Our approach to estimate velocity aims to acquire vertical, radial and transverse wave modes using an array composed by 24 three-component geophones. 0.1 m spacing between receivers has been used with 3kg hammer source, Figure 4.4 shows Sh acquisition with horizontal receivers.



Figura 4.4: Survey line, transversal wave mode acquisition and cross-line source displacement vector.

Survey is carried over unweathered rock, the place should carefully be chosen to avoid static effects and heterogeneities. The source should be shot over all directions (inline, cross-line and vertical), Ideally source coupling is made drilling a square hole in which the hammer can hit its face directioning the source vector in order to suppress or enhance wave components. Figure 4.5 shows a sketch of surveyed places in Crixás Greenstone belt.

Table 4.4 shows the best coupling conditions and source displacement vector used to image each wave mode. This variation intent to enhance one wave and suppress other using geometrical coupling. Detailed information about source vector displacement and receiver component correlation can be seen in Garotta (1999) and Hardage et al. (2011).

### Data Processing and considerations

Since survey takes place using near offset wavefield, probably P and S waves are superposed. For a given source frequency one can choose between increase the shot distance,

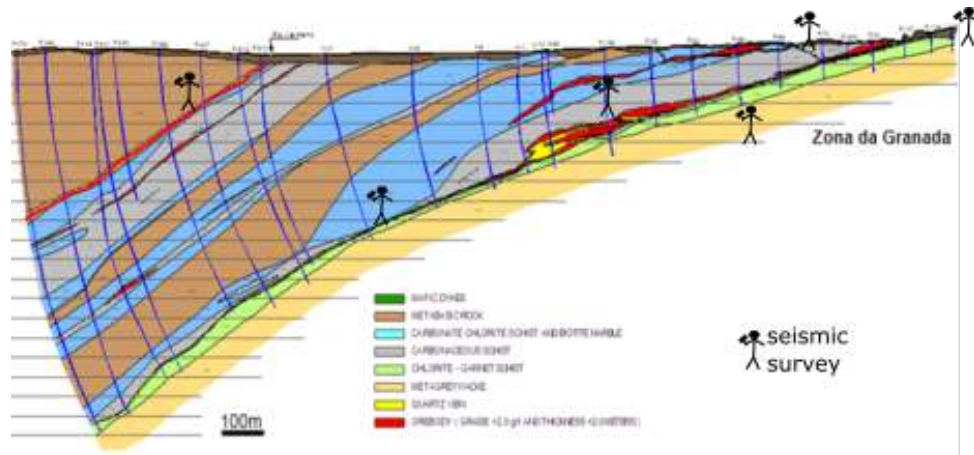


Figura 4.5: Surveyed places within Crixás greenstone belt cross section.

aiming the waves separation, or pick the first break before the superposition in order to characterize the first arrival velocities.

Increasing offset implies new wavefield components and more complexity over the observed wavefield. In order to avoid misinterpretation and dispersion effects we pick first arrivals instead of high energetic amplitudes. By geometrical analysis is possible to suppress P wave and enhance S waves choosing a correct receiver component and source displacement vector. It differentiates between P and S waves.

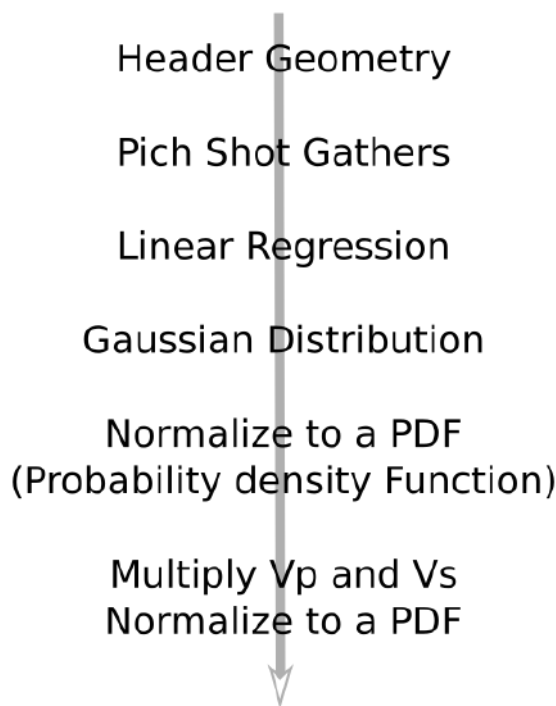


Figura 4.6: Processing fluxogram



A standard processing flux was used in this study (Figure 4.6), starts inserting geometrical parameters and picking shot-gates. Then, a standard linear regression estimates velocities for each shot (Figure 4.7-(A)), those measurements builds histogram to derive a smooth normal distribution graphic for a wave component (Figure 4.7-(B and C)). This curve is normalized in order to generate a probability density function. The same processing steps applies for S and P waves thus, Vp x Vs probability density function gives the best velocity estimation shown in Figure 4.7-(D).

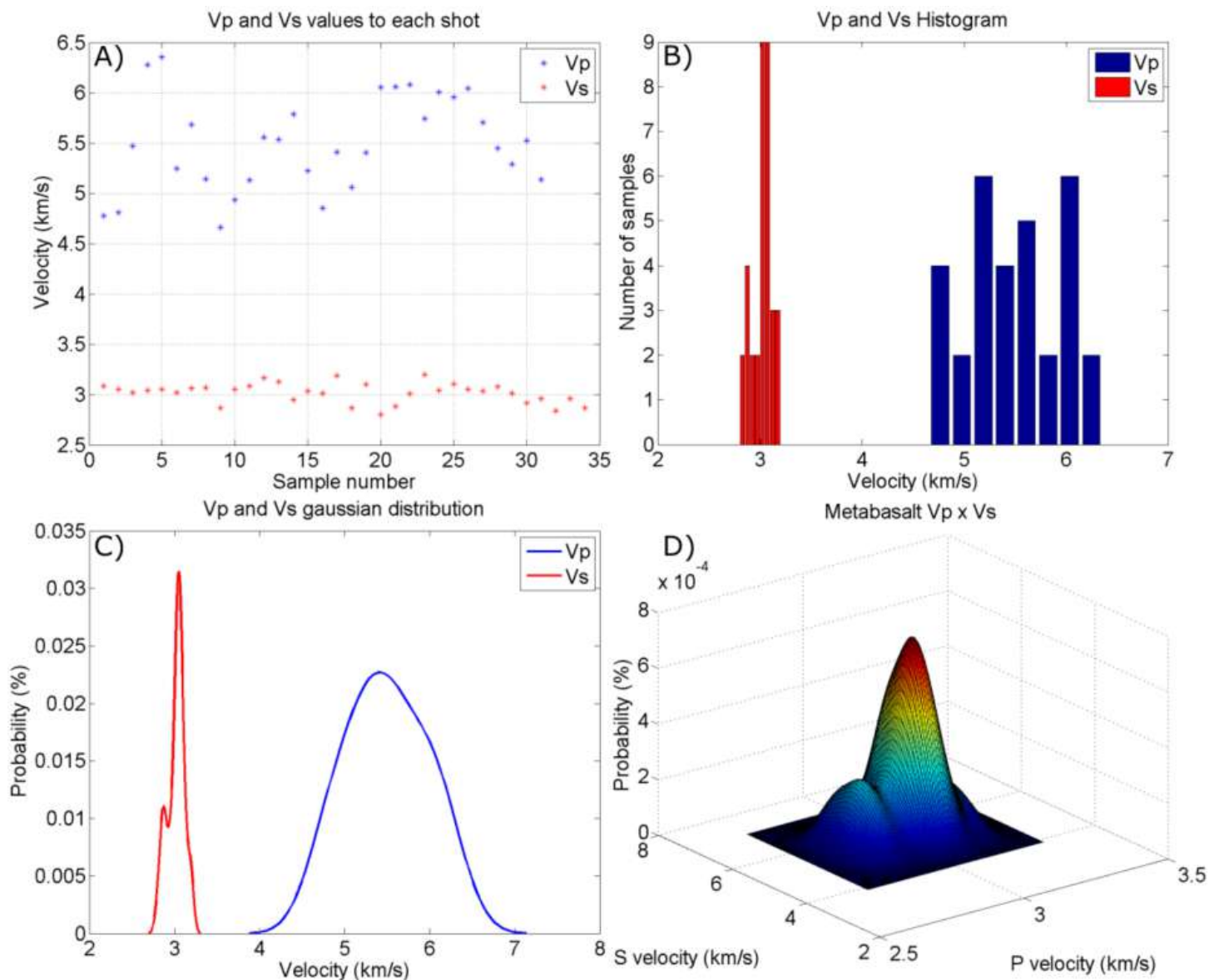


Figura 4.7: Processing steps; A) Values obtained in linear regression, B) Population Histogram for P velocity (blue) and S velocity (red), C) Gaussian distribution related to the histogram, and D) Resulting manifold with P and S better estimative in its apex.



### 4.2.3 Theory

### 4.2.4 Wave modes and interpretation

Standard multicomponent acquisition assumes a quasi-vertical emergence of waves due to weathering and increasing velocities in depth, this assumption produces enhanced P wave in vertical, Sh and Sv waves in horizontal transverse and radial components respectively. Table 4.3 correlate source displacement vector and receiver geometry to enhance a respective wave mode in reflection surveys.

Tabela 4.3: standard reflected wave interpretation

Source \ Receiver	Vertical	Radial	Transverse
Vertical	P	PSv	
Radial	SvP	Sv	
Transverse			Sh

Since proposed survey is done over a fresh rock environment one can consider this would be a homogeneous half-space for a 2m survey. Therefore, the ray for near offsets are as direct as possible and does not produce ascending behavior. Hard rock or crystalline samples has elastic constant greater than sedimentary ones, wich implies in better results due lower dispersion and absortion effects, consequently, recovering higer frequencies.

Figure 4.8 exemplifies the direct wave and it's signatures at the receivers. The near offset wavefield behavior for the homogeneous medium has slightly different interpretation from the used in standard reflection multicomponent data. Using geometrical logic one should expect to see shear waves in Vertical and Traversal direction and Compressional waves in Radial direction (Figure 4.8 (a)). Table 4.4 correlate source displacement vector and receiver geometry to enhance a respective wave mode in near offset homogeneous half space.

Tabela 4.4: Direct Wave near offset interpretation

Source \ Receiver	Vertical	Radial	Transverse
Vertical	Sv		
Radial		P	
Transverse			Sh

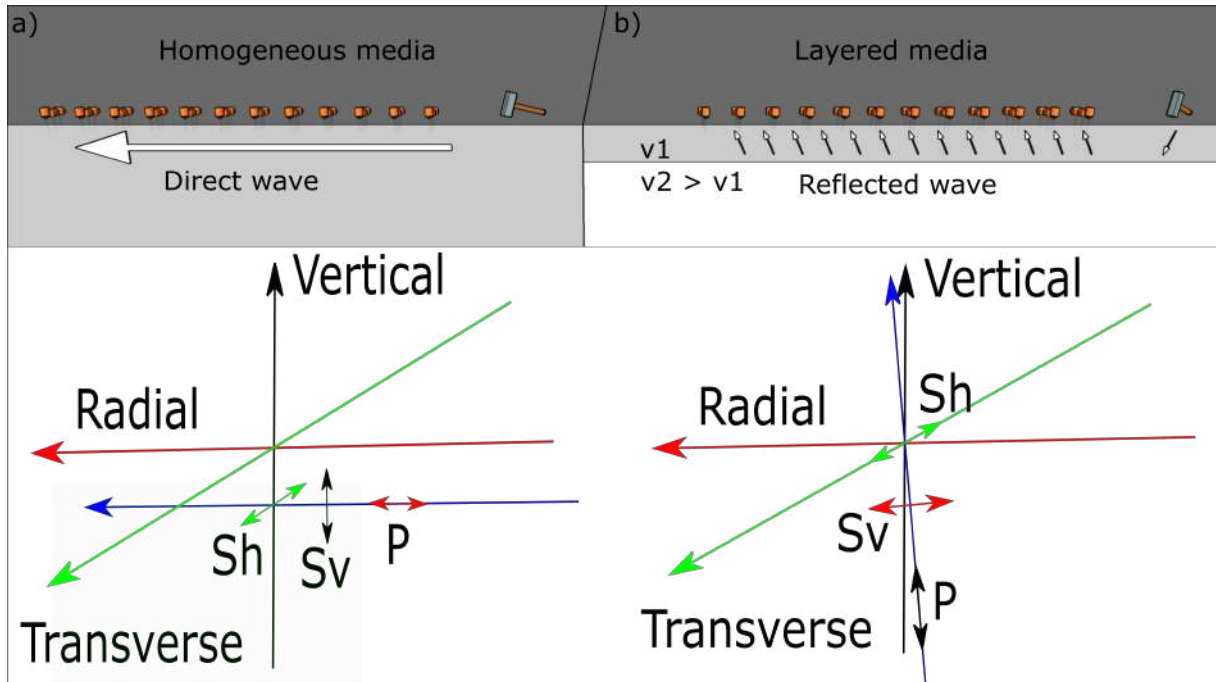


Figura 4.8: a) Direct wave propagation in homogeneous media and receiver signature. b) Reflected wave propagation over a layered media and receiver signature.

#### 4.2.5 Results

Metabasalt shot gate is shown as example, it's straight forward to identify the first break due high energetic waves in near offset, frequency filters should be avoided in order to obtain better resolution. Higher declination on S wave arrival can be observed due low velocities if compared to P wave (Figure 4.9). This methodology is very sensitive to noisy arrivals, since the observer can misplace the first break, but using a great population of shots statistical analysis increases estimated velocity precision. It was possible to derive  $V_p=5,5$  km/s and  $V_s=3,01$  km/s for this unit wich fits the expected value in literature and  $V_p$  measurement using a ultrasonic detector.

Four lithological units is shown in this paper; metabasalt, metagrawake, schists and clorite-schist(CBCX) from Crixas greenstone belt, Central Brazil. It's possible to verify a high probability when  $V_p=5,4$  km/s in metabasalt and 4,8 km/s in metagrawakes. Measurements made with a hand ultrasonic detector obtained respectively 5,4 km/s and 5 km/s wich gives an error lower than 4%. CBCX shows higher variance for P and S waves but it still has its center at 4,9 km/s wich correlate with obtained result 5 km/s using the ultrasonic detector. Schists showed anomalous low velocity if compared with ultrasonic detector, probably due foliation and fractures caused during mine excavation. Also, it's possible to observe that S waves velocity distribution is more accurate than P waves (Figure 4.10).

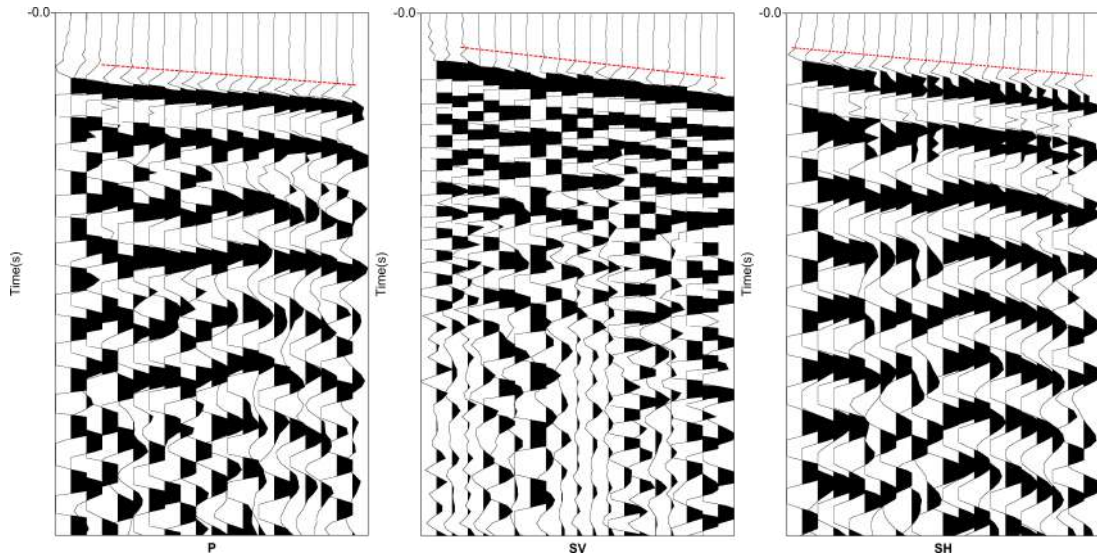


Figura 4.9: Shots gates: P (inline source displacement vector, radial component), SV (vertical displacement vector, Vertical component), and SH (Cross-line displacement vector, Transversal component)

#### 4.2.6 Conclusions

This paper makes a proposition of a straightforward technique to obtain shear and compressional velocities based upon direct wave behavior within near offset wavefield. The method has its own limitations as well but can bring useful estimations for seismic modeling at a low cost, using just standard acquisition equipment.  $V_p$  measurement correlates with those obtained from Surfer Ultrasonic Detector UK1401.

#### 4.2.7 Acknowledgments

We would like to thank CAPES (Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel) for economic sponsorship and AngloGold Ashanti exploration staff for logistical and financial support.

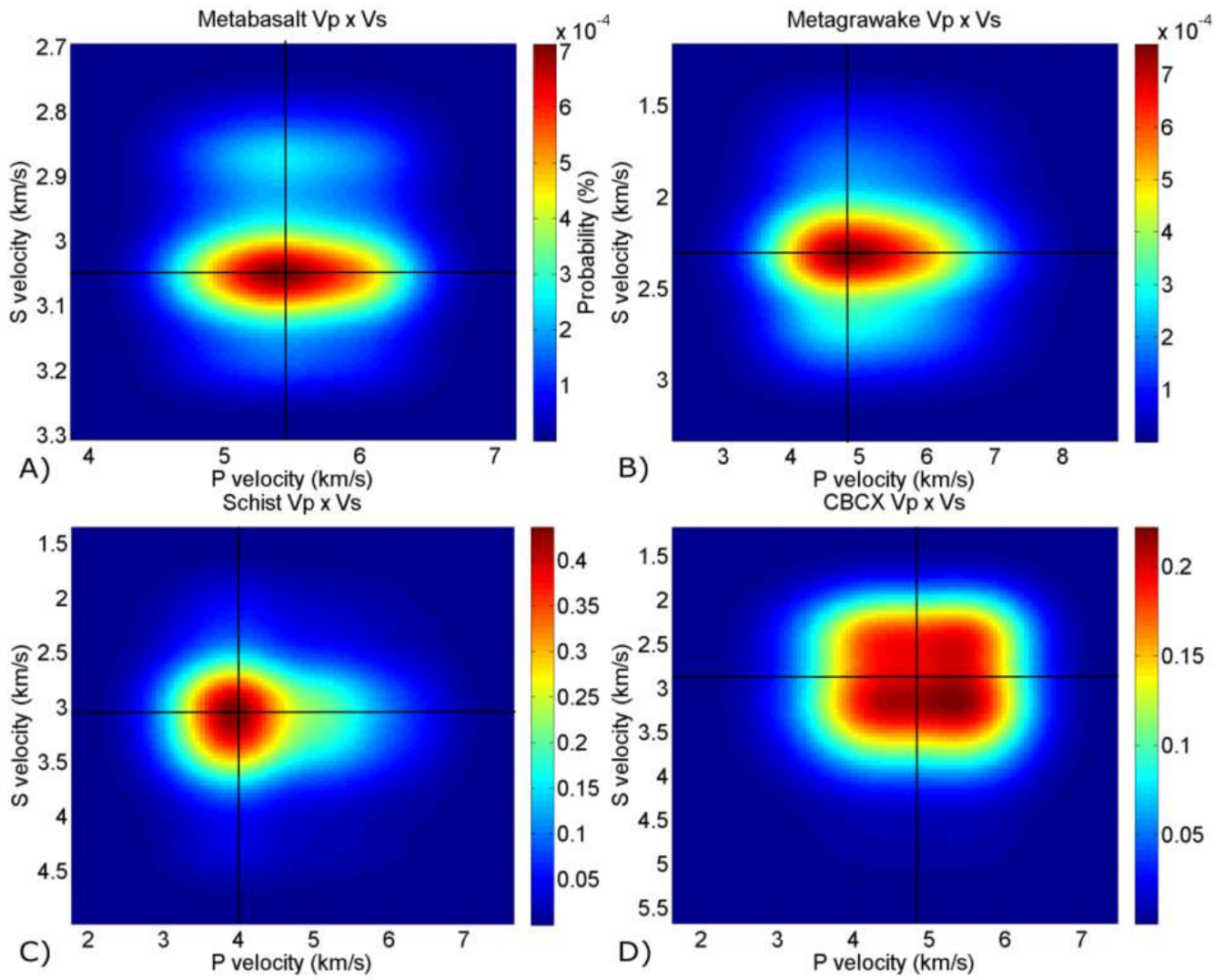


Figure 4.10: Velocity estimated using the proposed method

## Capítulo 5

# Modelagem e Escolha dos parâmetros de aquisição

A elaboração do modelo geológico vinculado às análises petrofísicas serve de base para a criação do modelo sísmico para a área pesquisada. A modelagem tem como objetivo suprir informações nas diversas etapas do projeto como definir os parâmetros de aquisição, definir as melhores estratégias de processamento, e interpretar o campo de ondas gerado no dado real. Assim esse capítulo tem como objetivo apresentar o processo de modelagem para a determinação dos melhores parâmetros de aquisição.

Os perfis litológicos foram construídos com base em amostras de sondagem descritas pela Mineração Serra Grande, Figura 5.1. O perfil construído é extrapolado em profundidade de acordo com o conhecimento geológico da área. A partir da modelagem geológica selecionaram-se as litologias que possuem maior representatividade para fazer as análises de velocidades.

A aplicação da sísmica em rochas polideformadas é relativamente recente e apresenta desafios incomuns ao principal nicho de aplicação do método (Eaton et al. (2003)). Logo, produzir dados sintéticos que assemelham a situação real pode trazer benefícios, prevendo dificuldades e oportunidades. Modelagens elásticas são construídas com o intuito de simular as amplitudes, as fases e os tempos de transito. Essa simulação considera a terra como um sólido, propagando ondas compressionais e cisalhantes. Os modelos acústicos como o apresentado na Seção 4.1.3 consideram apenas ondas compressionais que são a informação de principal interesse no processamento. Para uma maior compreensão do dado real é necessário incluir a influência de ondas cisalhantes na seção sísmica, o que gera ruídos coerentes ao longo dos dados. Nesse capítulo o software Tesseral Pro foi utilizado para a modelagem, processamento e migração dos dados sísmicos. O pacote de onda completa 2D foi utilizado.

Os preparos necessários para uma aquisição sísmica levam em consideração toda informação a priori sobre o alvo a ser analisado. Dados como; descrição de poço, contexto estrutural, profundidade do alvo, mergulho das camadas, análise petrofísica e capacidade de resolução da fonte são integrados na simulação. Modelar a situação esperada tem como finalidade assegurar que os objetivos sejam atingidos da melhor forma possível.

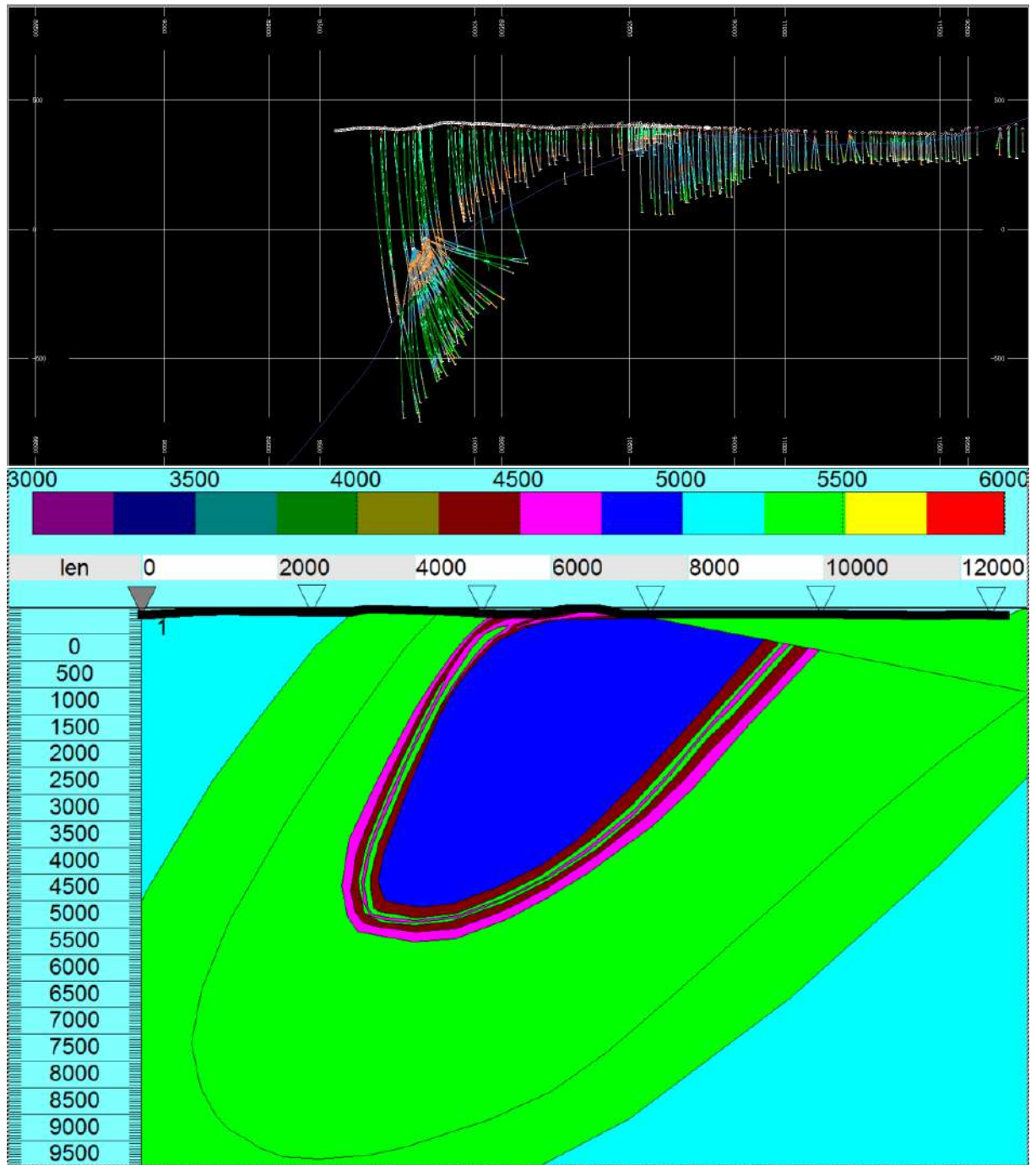


Figura 5.1: Modelo geológico elaborado com informações de furos de sondagens (raso 1.5 km) e o modelo sísmico extrapolado em profundidade (10,5 km)

Shots gerados a cada 2.5 km são modelados para compreender o campo de onda ao

longo da linha sísmica, nessa modelagem não é levado em conta a camada de material inconsolidado (solo) e a topografia do terreno (Figura 5.2), o objetivo é ter uma primeira aproximação de como seria o dado em condições mais favoráveis (ideais). A intensa refletividade nos dados (Figura 5.2) indicam energia retro espalhada dos refletores que compõem o greenstone. O contato do greenstone com o TTG assim como o contato do basalto e as unidades metassedimentares que compõem o horizonte estratigráfico mais profundo do greenstone são refletores bem marcados na imagem. (Refletores A e B, respectivamente) É possível observar a alta complexidade do campo na porção rasa do greenstone (de 5 km a 7.5 km ao longo do perfil) essa complexidade está relacionada a grande variação litológica. A porção central de (5km a 8km) apresenta a maior dificuldade para o processamento pois ruídos de fonte interferem na parte rasa e reflexões simultâneas de diferentes porções da subsuperfície interferem na parte profunda, causadas devido a geometria concava dos refletores.

As reflexões produzidas no perfil são características de camadas com alto mergulho ( $> 25$  graus) e contatos verticais. As reflexões possuem o formato meia hipérbole na janela de tiro, tendo início no contato com a onda refratada. Nos resultados esperam-se dificuldade na estimativa de velocidade rms das camadas a partir dos dados utilizando o método CMP, o mergulho das unidades desloca o ponto médio comum para cada par fonte-receptor, e assim, a velocidade que lineariza a hipérbole com a correção nmo é superior a  $V_{rms}$  real (Yilmaz (2001)).



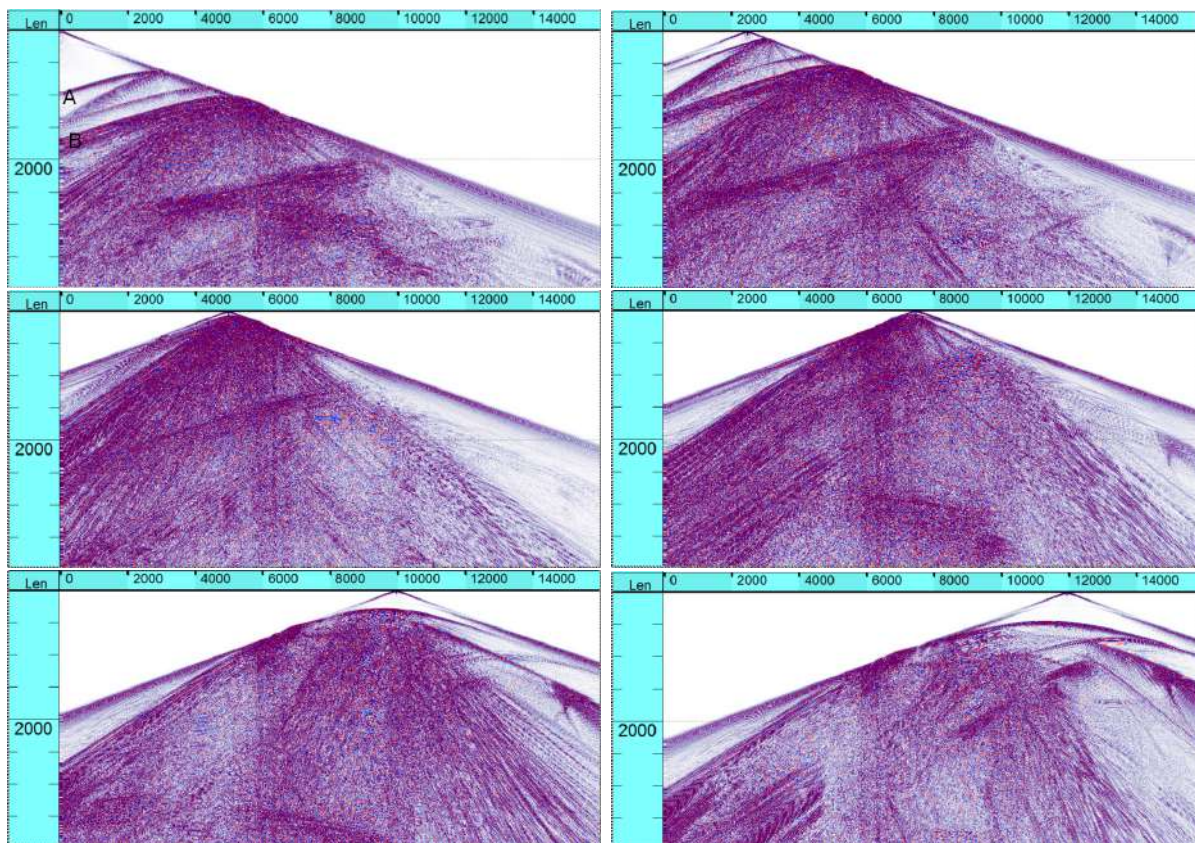


Figura 5.2: Sismogramas sintéticos de tiros realizados ao longo do perfil sísmico programado para a área do Greenstone Belt de Crixás



## 5.1 Influência da camada de solo e topografia

A experiência sugere o carregamento de furos abaixo da zona de intemperismo para evitar perda de energia na camada de baixa velocidade (Sheriff and Geldart (1995)). Essa seção tem como objetivo avaliar o efeito do solo sob o dado através da análise de dados sintéticos. A modelagem da camada de baixa velocidade possibilita a definição do spread mínimo para evitar a influência de ondas superficiais (quadrado na Figura 5.3) e identificação da perda de energia considerando o explosivo em um furo raso, que é o caso desse levantamento.

A Figura 5.3 exemplifica a diferença sinal/ruído, a esquerda sem camada de intemperismo e a direita com a camada. Na imagem nota-se a dificuldade de definir reflexões nítidas, tanto rasas quanto profundas, nos shots a direita, dificultando o processamento das informações e a qualidade do resultado final. Os resultados indicam forte influência de ruídos de baixa velocidade para os primeiros 1.5 km de offset próximo. Mesmo com o aumento do ganho é possível verificar baixa amplitude dos refletores considerando o solo.

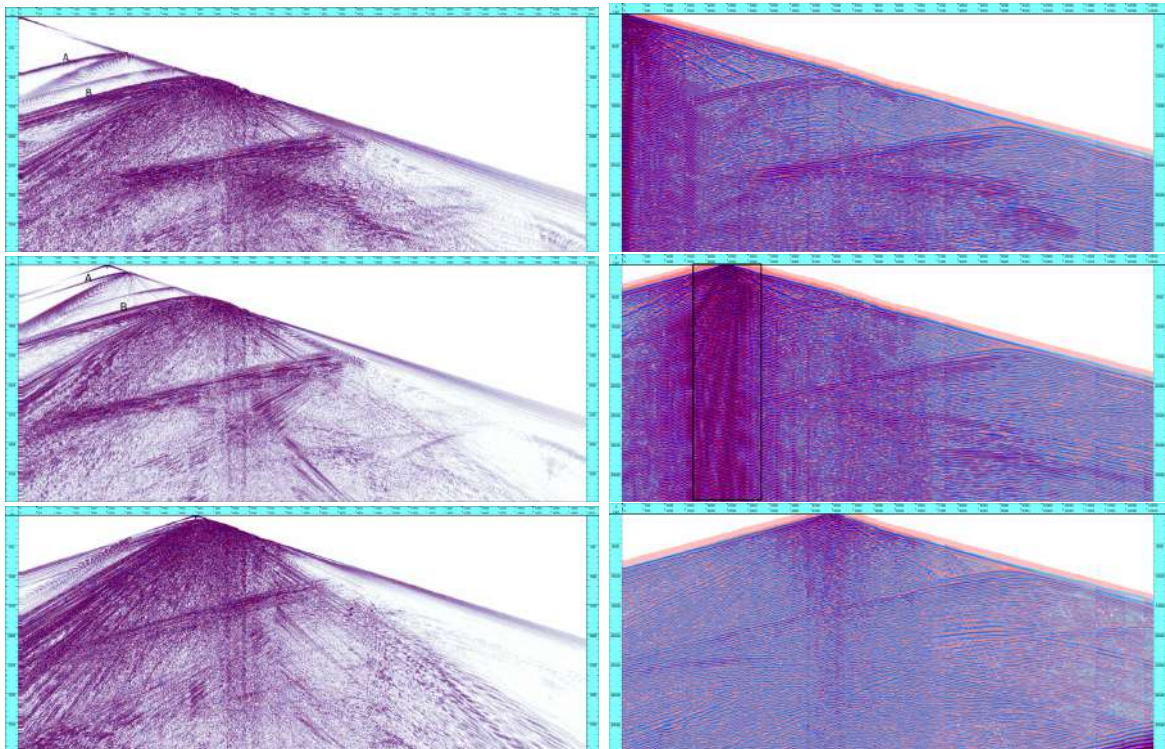


Figura 5.3: Modelo sísmico; a esquerda: sem zona de intemperismo e topografia e a direita: com zona de intemperismo e topografia, o quadrado apresenta região fortemente influenciada por ruído de fonte

## 5.2 Definição dos parâmetros de aquisição

Considerando as limitações do equipamento, 9 módulos com 216 canais espaçados a 5 metros, o spread máximo de geofones é de 1075 m. O ideal é trabalhar com offsets de aquisição maiores do que a profundidade de interesse e registrar tanto a porção próxima quanto a parte distal do campo de onda. Contudo, o projeto não dispõe de equipamentos suficientes, o que tornou necessário fazer a escolha de qual porção do campo de ondas deveria ser registrado.

A Figura 5.4 demonstra a diferença do resultado final considerando receptores em toda a área de aquisição (A) e a aquisição com a quantidade de receptores utilizados no projeto (B). A continuidade dos refletores abaixo de 2 km é observada quando há maior spread na aquisição, como indicado pela seta.

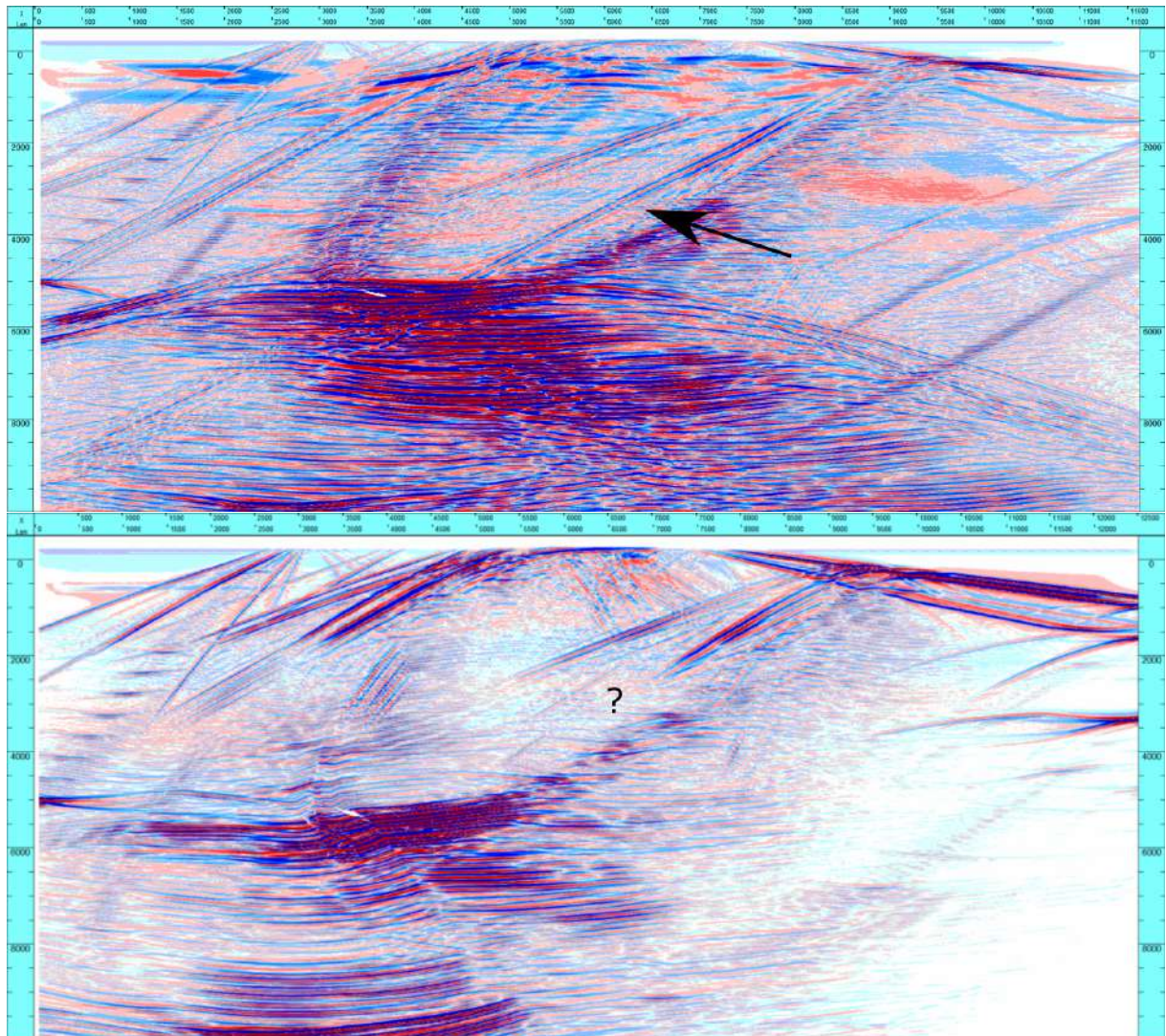


Figura 5.4: Comparativo dos resultados considerando a limitação de equipamento. a)Receptores ao longo de toda a área. b)Receptores de 0 m a 1 km de offset.



A escolha do offset ideal leva em consideração aspectos avaliados anteriormente como;

- Ruído gerado pela fonte; a escolha de 800 m para offset mínimo é definida com auxílio da modelagem e teste de fonte.
- Capacidade da fonte gerar sinal no offset distal; no teste de carga é possível observar energia até, pelo menos, 2 km de offset para a carga definida.
- Capacidade de imagear o alvo; essa etapa consiste em avaliar os resultados do imageamento para aquisições considerando o equipamento disponível.(Figura 5.6)

Com o objetivo de avaliar os resultados de diferentes estratégias de aquisição duas modelagens foram propostas, com o offset mínimo de 0 m e 1000 m. A Figura 5.5 apresenta o arranjo de aquisição utilizado na modelagem. A Figura 5.6 apresenta os resultados obtidos considerando a limitação do equipamento, é possível observar que a imagem referente a 1 quilômetro apresenta melhor empilhamento para a base do greenstone (seta na imagem), indicando que esse arranjo pode produzir melhores resultados.

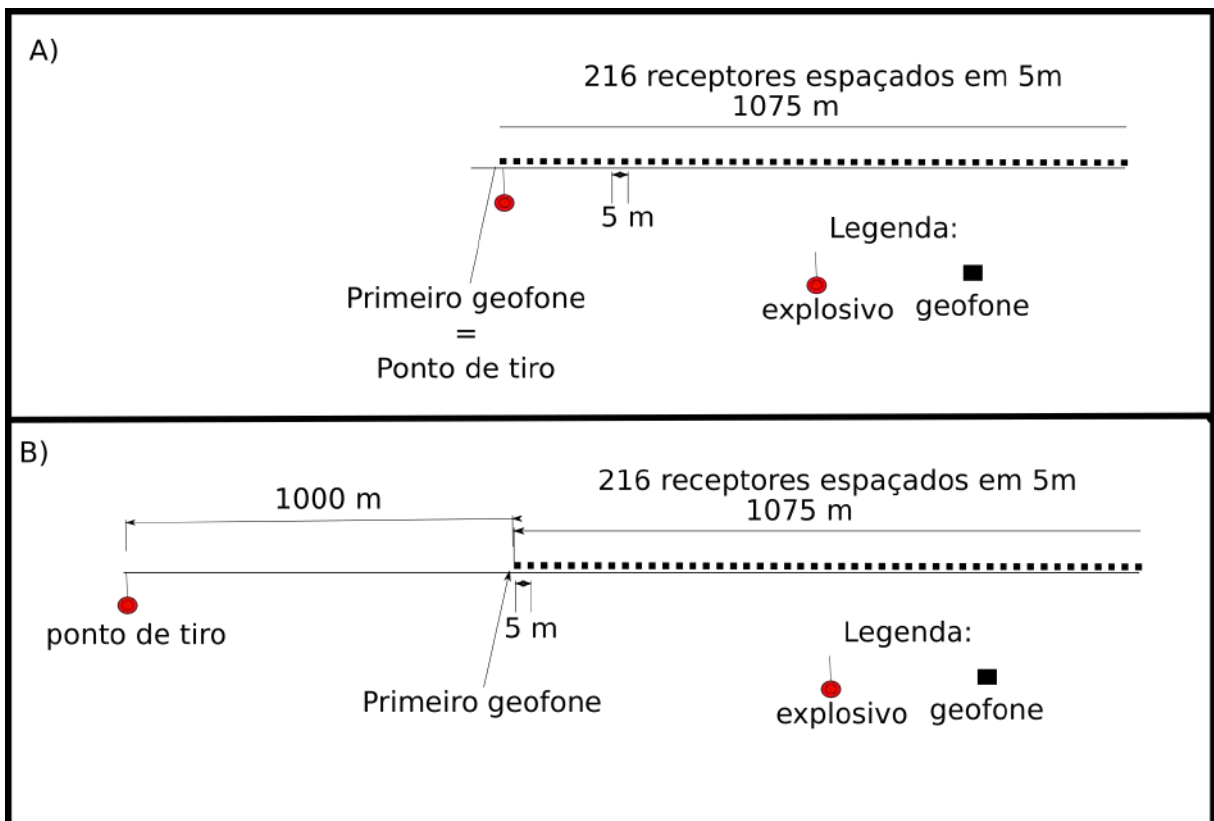


Figura 5.5: Ilustração referente aos parâmetros modelados, A) Aquisição 0 offset e B) Aquisição com offset mínimo de 1 quilômetro.

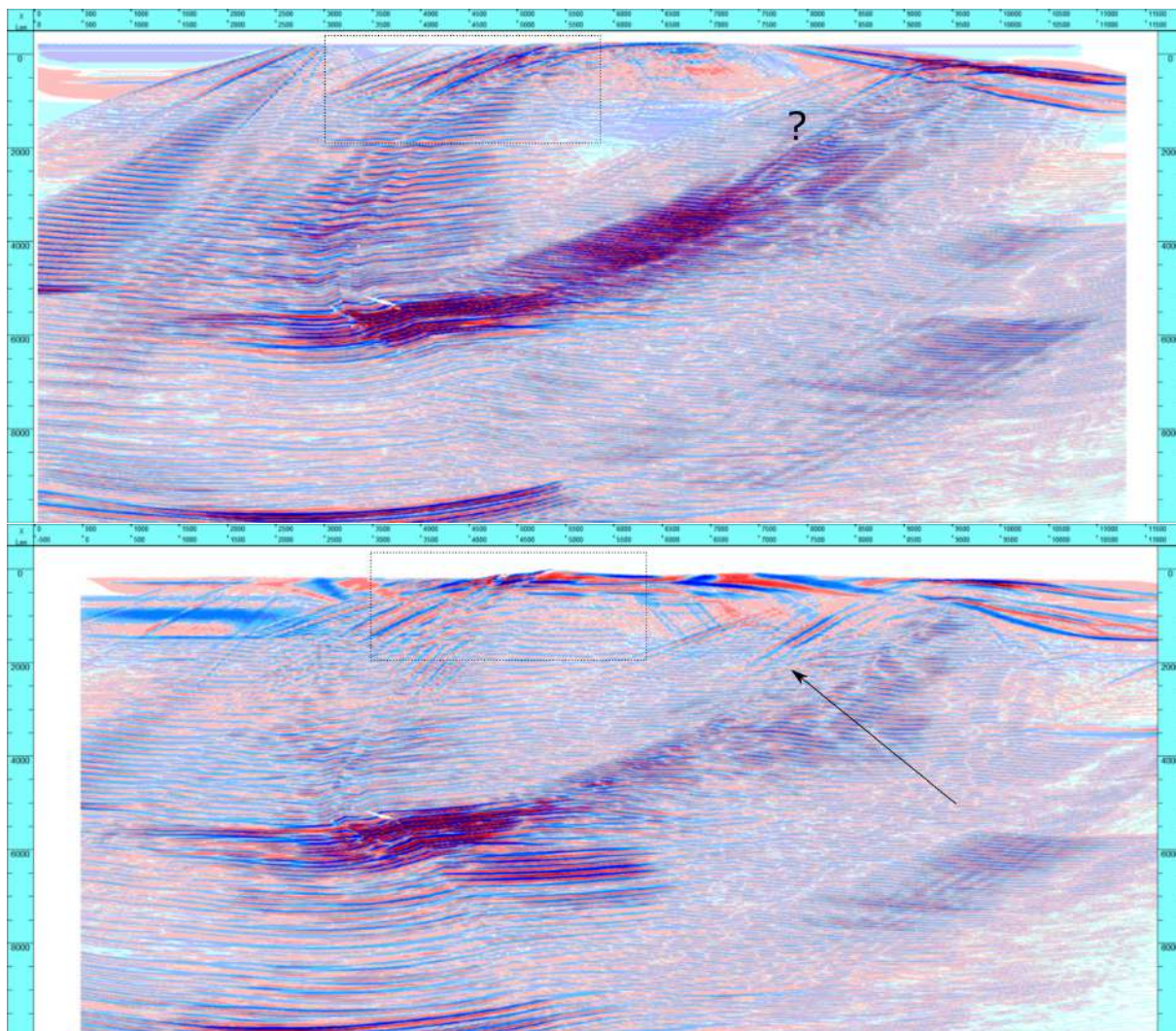


Figura 5.6: Migração pré-stack em profundidade para aquisições a 0 e 1 km de offset mínimo. Identificação do contato entre o greenstone e o TTG (seta) para profundidade de 2 km. A porção rasa do greenstone possui menor resolução com o aumento do offset (retângulo na imagem).

### 5.2.1 Análise de velocidade - Discussão

Considerando os desafios em realizar a análise de velocidade por cmps nesse contexto geológico a escolha dos parâmetros de aquisição deve buscar um compromisso entre as seguintes observações:

- Camadas com alta velocidade criam hipérboles planas no offset próximo, o que dificulta o alinhamento visual que infere a velocidade do meio. Logo, é mandatório e necessário trabalhar com offsets distantes para observar a curvatura.
- A análise nmo, que define a velocidade do meio, deve ser realizada no campo de onda próximo pois em maiores distâncias existe maior heterogeneidades do meio.

- Trabalhar sem registrar o offset próximo indica perda de informação; torna inviável realizar correção estática de refração, imageamento raso e reduz a qualidade da análise de velocidade.

A dualidade pode ser vista da seguinte forma; ao aumentar a distância de offset a variação lateral de velocidade influencia na inclusão de erro nos dados, erro que não pode ser corrigido sem estática de refração (que depende dos dados de offset próximo).

Contudo, a tomada de decisão consiste em utilizar a menor distância, livre dos ruídos de fonte, capaz de imagear a estrutura alvo. O afastamento mínimo de 750 m é escolhido para o trabalho, tendo em vista a atenuação do sinal observado no teste de carga. Os resultados do imageamento pré-stack em profundidade visto na Figura 5.6 corroboram para essa escolha, a seta indica o refletor alvo sendo imageado em profundidades superiores a 1 km de profundidade.

### 5.3 Resultados - Multiplicidade e Logística

O mapa de cobertura de pontos cmp é visualizado na Figura 5.8. Como não há possibilidade de definir refletores hiperbólicos no teste de carga espera-se que com o stack aumente a relação sinal/ruído e a energia coerente apareça na seção.

O espaçamento de 30 metros entre tiros define um total de 400 pontos de fogo ao longo da linha. No total, 3 opções de logística são propostas para o levantamento (Figura 5.8), cada mapa simula a movimentação de 24, 48 e 72 canais por vez. A estimativa de tempo da aquisição é de 50, 35 e 25 dias respectivamente. Quanto maior o número de canais movimentados por vez, menor a homogeneidade de cmps ao longo do perfil (Figura 5.8). Do ponto de vista logístico, a movimentação do maior número de registradores torna a aquisição mais veloz e facilita a operação com explosivos. A alternativa que apresenta folding mínimo de 16 traços e o tempo de aquisição de 35 dias satisfaz as necessidades do projeto.

A aquisição foi projetada com offset mínimo variando entre 750 e 960 metros. O arranjo é composto por 216 geofones espaçados em 5m e a produção diária esperada é de 8 tiros movimentando 48 canais por vez.(Figura 5.7) Para a aquisição foi escolhido uma janela mínima de 5 segundos, com amostragem de 0.002 s. A aquisição consiste em efetuar 8 disparos com o arranjo estático, como esposto na Figura 5.7 e depois efetuar o caminhamento de 48 receptores para a frente da linha, realizando um avanço de 240 m por etapa.

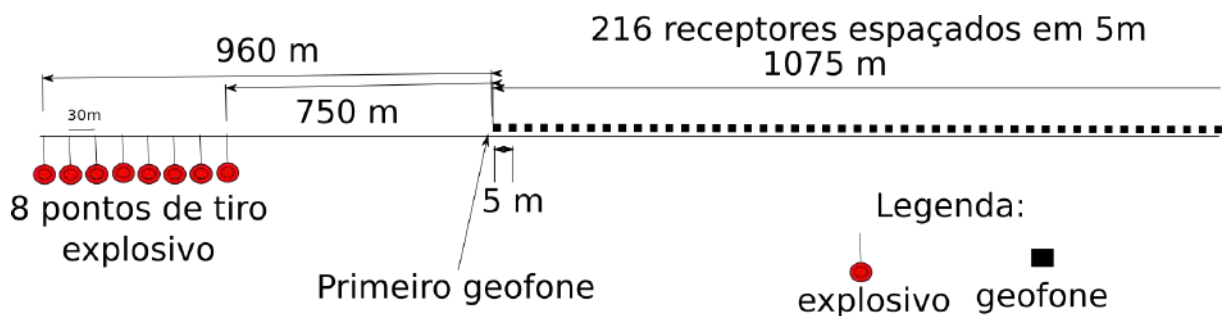


Figura 5.7: Ilustração do arranjo utilizado para a aquisição.

Modelagens sintéticas refletem um modelo simplista e sem ruído, servem como base para compreender os dados reais e assim guiar as várias etapas do projeto sísmico contudo, dificuldades relacionadas a ruído ambiental, ruídos coerentes e perda de energia com a transmissão do sinal nas unidades litológicas não são previstos nessa etapa e podem significar fatores limitantes quando tratando dados reais.

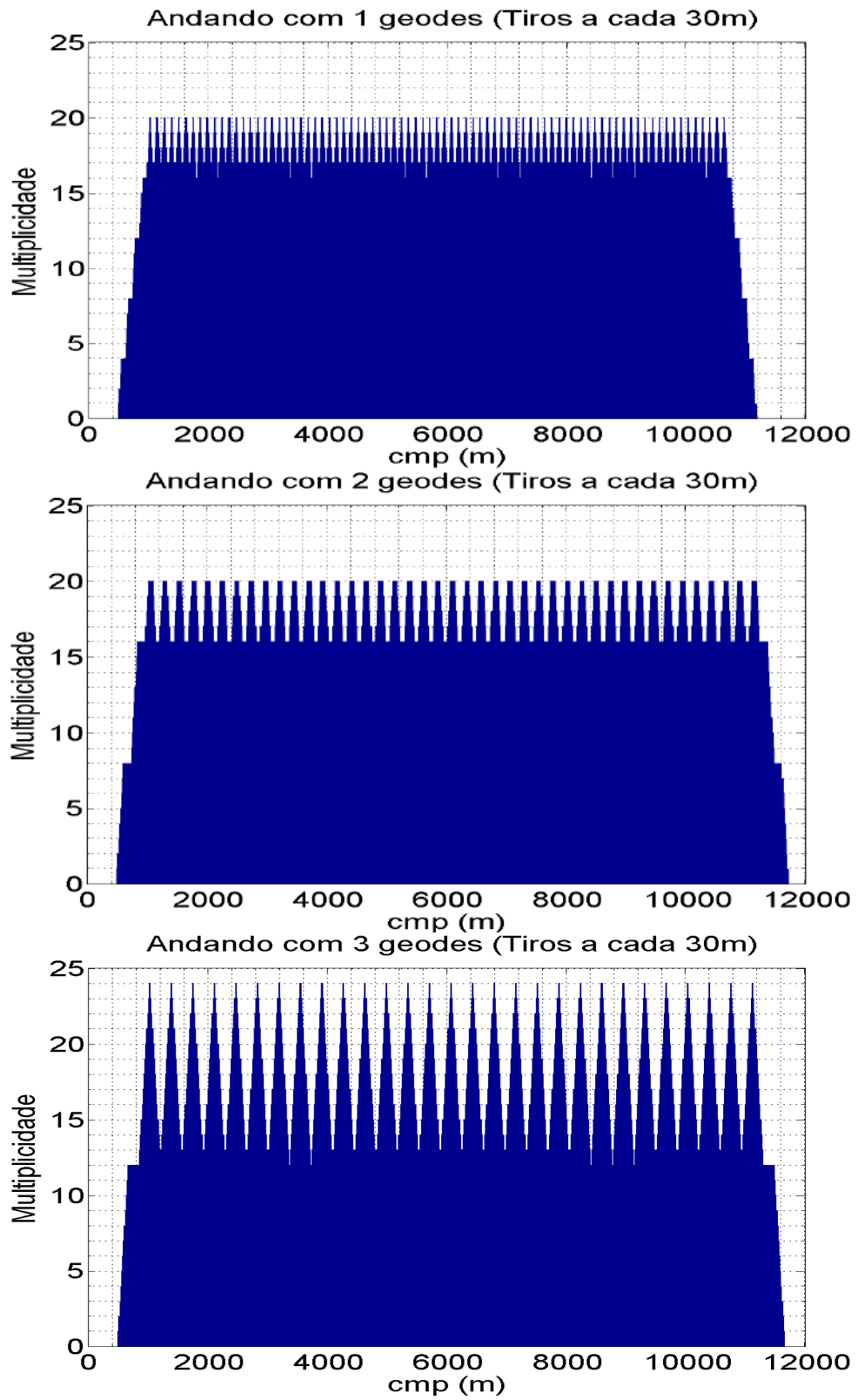


Figura 5.8: Cobertura de CMP considerando diferentes movimentações do arranjo.



# Capítulo 6

## Aquisição e Dados Reais

O levantamento de sísmica realizado na área do Greenstone Belt de Crixás é composto por 5 etapas integrantes: Topografia, Perfuração, Montagem da linha, Carregamento e Movimentação do arranjo. Os desafios de cada etapa são descritas em conjunto com proposições de estratégias para futuros levantamentos.

A série lógica de eventos é:

- 1 - Implantar os pontos com estacas (topografia)
- 2 - Realizar as perfurações dos pontos de carregamento
- 3 - Montagem da linha completa
- 4 - Carregamento de furos e detonação
- 5 - Movimentação do arranjo

A forma mais eficaz de aquisição é realizar as etapas 1, 2 e 3 com antecedência e realizar diariamente os procedimentos 4 e 5. Essa forma reduz a mobilização de pessoas e equipamento durante o registro dos dados. Contudo devido as condições impostas pelo projeto as etapas 1 e 2 foram desenvolvidas em partes e a montagem e a retirada do arranjo completo foi realizada semanalmente.

O projeto dispôs de 233 tiros registrados, que corresponde a aproximadamente 6 quilômetros de perfil sísmico. A operação foi suspensa para a manutenção de equipamentos e avaliação da qualidade e eficiência dos dados. Os tiros foram espaçados de 30 em 30 metros com geofones espaçados de 5 m. O primeiro geofone se encontra a 750m de distância da fonte. Esse arranjo foi escolhido por reproduzir os melhores resultados nos estudos de modelagem.(Figura 5.7)

## 6.1 Topografia

Corresponde a primeira etapa do processo de aquisição. Pode ser dividida em 2 processos:

- Marcar os pontos de tiro para a equipe de perfuração, essa etapa pode ser realizada independente das demais.
- Após a perfuração e montagem do arranjo é necessário registrar os valores de topografia para furos e receptores. Essa etapa deve ser feita durante a aquisição conforme a movimentação do arranjo sísmico.

A equipe também foi responsável pela abertura de picadas na vegetação densa, além de comunicar sobre o trabalho aos superficiários e negociar as condições para utilizar a superfície temporariamente.

Inicialmente a posição dos furos e dos receptores foram obtidos individualmente utilizando um GPS diferencial. Contudo devido ao alto custo do contrato, que cobrava por ponto levantado, a estratégia foi modificada para a aquisição de nuvem de pontos. Nesse modo de aquisição o GPS foi configurado para fazer leituras a cada 2 segundos e o operador anda sobre a linha sísmica onde os receptores serão implantados.

A interpolação dos valores de topografia obtidos no campo formam um mapa topográfico. Os pontos referentes aos receptores e furos são criados no Arcgis e utilizados para extrair o valores de altitude do mapa topográfico. As tabelas 6.1 e 6.2 demonstram a estrutura de saída dos dados.

O dado topográfico recebido passou por um controle de qualidade. Os números de receptores e furos foram verificados para avaliar excesso ou falta de registros pelo gps e sua posição foi comparada com a projetada. Cada perfuração serviu de ponto de referência para iniciar um conjunto de 6 receptores. Esses pontos foram utilizados como baliza para evitar qualquer erro sistemático gerado pelo uso de trenas em superfície.



Figura 6.1: Fotos evidenciam uma estaca usada para indicar o ponto para a perfuração e a equipe de topografia que atuou no projeto.

## 6.2 Perfuração

Esta etapa consiste na perfuração dos pontos programados para os tiros sísmicos, bem como providenciar uma proteção na boca do poço para evitar o fechamento ou obstrução que evite o carregamento. A equipe ficou responsável pela perfuração, manutenção do trado, ferramentas para a supressão da vegetação, e preparo para o carregamento.

O equipamento de perfuração foi um trado motorizado (Figura 6.3) ferramenta que não possibilita o rompimento de camadas de cascalhos e de rochas duras. Assim houve a necessidade de romper alguns obstáculos com uma alavanca manual. O limite de profundidade depende da capacidade do operador quebrar e retirar os fragmentos de rocha dura com uma aste de ferro. O uso da alavanca tornou o serviço lento em regiões com cascalho ou blocos de rocha, o que diminuiu a produção diária. Assim aconselha-se utilizar máquinas mais robustas em futuros projetos para atingir maiores profundidades. Nesse trabalho os furos foram perfurados até 2m.

As principais dificuldades estão relacionadas à manutenção das partes do trado como o motor, conchas e nip (Figura 6.2). A produção é influenciada principalmente pelo tipo de solo, podendo variar entre 9 a 23 perfurações em um dia. O serviço pode ser realizado com antecedência ao início da aquisição de dados na época de seca contudo, na época de chuva, os furos são colapsados tendo a necessidade de reabrir os poços no dia de aquisição.



Figura 6.2: Fotos evidenciam alguns componentes do trado com maior necessidade de manutenção. a) Nip. b) Concha. c) Alavanca.



Figura 6.3: Foto evidencia da equipe de perfuração operando um trado motorizado na área da pesquisa.

### 6.3 Carregamento

Esta é a etapa que mais exigiu segurança e atenção de todos os envolvidos nas atividades de campo. A equipe tem como objetivo a montagem do explosivo, sensor de acionamento, tamponamento e efetuação da detonação nos moldes de segurança da Mineração Serra Grande. O processo de carregamento pode ser dividido da seguinte forma:

- Escolha do ponto de detonação e distância mínima segura.

- Montagem da espoleta eletrônica no explosivo.
- Montagem do acionador do equipamento no explosivo.
- Acoplamento do explosivo no furo e preenchimento com solo (tamponamento).
- Ligação dos cabos do detonador e trigger do equipamento.
- Estabelecer uma área segura, com o isolamento de estradas próximas e da área de detonação.

A utilização de fonte explosiva foi um desafio devido à questão de segurança. Houve a necessidade de um número elevado de profissionais (blaster, guarda patrimonial e segurança do trabalho) no serviço diário, adaptação do carro para transporte de explosivo, e isolamento da área em todas as etapas do processo.

Devido a regras de operação não foi permitido deixar furos carregados e tamponados com antecedência, assim, a retirada de explosivo e acionadores do paiol foi diária, tendo a necessidade de passar por várias etapas de liberação de material no complexo industrial da mina. Uma vez que o explosivo chegou ao ponto de tiro, a montagem da carga, tamponamento e conexão dos sensores foram feitos, um furo por vez, obedecendo os padrão de segurança sugerido pelo blaster. A produtividade e o andamento das demais etapas dependeu do funcionamento correto desses integrantes. No estágio inicial do projeto essa etapa compôs o maior desafio para a aquisição, contudo o treinamento dos integrantes e a definição de padrões de funcionamento tornou possível estabilizar o processo. Alguns consultores da empresa de detonação Orica realizaram o treinamento da equipe e acompanharam a aquisição nas primeiras semanas de campo.

Durante a aquisição o acionador do equipamento sísmico foi o que mais apresentou problemas técnicos. Os principais pontos de dificuldade foram a adaptação do trigger e a indução elétrica no cabo de 1km que liga o sensor ao sismógrafo.

## **Acionador - Trigger**

O equipamento da geometrics é vendido com um acionador elétrico (HBV1, Figura 6.4-a) que ajusta o tempo zero de aquisição com a descarga de uma espoleta elétrica. Contudo o uso de espoletas elétricas são proibidas, no âmbito da Mineração Serra Grande, por questões de segurança.

As opções de acionadores utilizados pela mineradora são cordel explosivo e espoletas eletrônicas, ambos foram testadas durante o teste de fontes (Figura 3.8).



A empresa fabricante do equipamento não forneceu soluções para a comunicação entre o acionador das espoletas com o trigger do equipamento. Para resolver a questão foram utilizados sensores piezoelétricos adaptados pela Universidade de Brasília (Figura 6.4-c) em conjunto com uma ponte de diodos para cortar o sinal no limite de entrada do equipamento (Figura 6.4-b). Esses sensores apresentaram uma redução considerável no custo de aquisição e viabilizaram o campo.

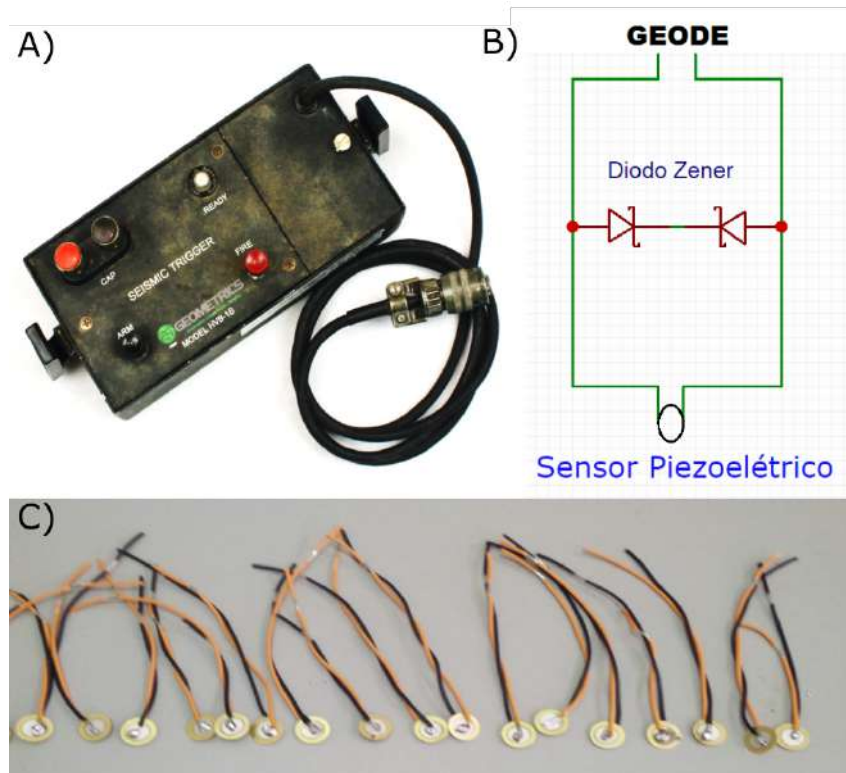


Figura 6.4: Fotos evidenciam: a) Blaster para a espoleta elétrica. b) Ponte de diodos para limitar a voltagem produzida pelo piezoelétrico. c) Pastilhas piezoelétricas para acionar o equipamento.

Além da adaptação do equipamento, algumas regiões apresentaram indução elétrica no cabo de trigger. O efeito de indução impede o acionamento correto entre o detonador e início do registro dos geofones. Para evitar a paralisação da equipe em campo, a janela de aquisição foi aumentada e o acionamento foi feito manualmente. O acionamento manual não possui tempo zero bem definido, e qualquer meio de aproximação utilizado para pré-processar o dado real deve levar em conta esse erro.

No campo a equipe usou um cabo coaxial blindado para evitar o efeito de indução, entretanto sem sucesso, visto que a equipe dispôs de apenas 700 metros desse cabo, metragem insuficiente para a operação diária. Contudo foi possível observar que ao longo dos 700 metros o equipamento permanecia estável. Dessa forma é aconselhável o uso do



mesmo em futuras aquisições.

## 6.4 Deslocamento do equipamento e Manutenção

O processo de montagem e recolhimento do arranjo foi o mais penoso tecnicamente, devido ao acesso de algumas áreas e a necessidade de carregar cabos e baterias por longas distancias. A equipe ficou responsável pela manutenção dos receptores, montagem e retirada da linha sísmica. Inicialmente o maior desafio foi o de ensinar os integrantes da equipe o funcionamento básico do equipamento e a ordem de disposição dos cabos em campo. O equipamento possui conectores pouco intuitivos e um sistema para acoplar os cabos em série que funciona apenas se estiverem na ordem correta. O desafio foi aprender a montar o equipamento e desmonta-lo de forma a manter a integridade dos componentes. Essa etapa pode ser dividida da seguinte forma:

- Montagem do arranjo
  - Medir os espaçamentos com a trena
  - Perfuração do subsolo com a furadeira para plugar os spikes dos receptores
  - Acoplar os geofones
  - Dispor os cabos de registro e de comunicação ao longo da linha
  - Conectar os receptores no cabo de registro sísmico
- Montar a base de aquisição
  - Computador, Inversor e baterias.
- Colocar as baterias e geodes ao longo da linha, plugando os conectores adequadamente.
- Movimentar 48 canais diariamente. (repetir o processo)

A logística semanal utilizada segue as condições impostas tanto pela MSG quanto pela UnB. O procedimento padrão consistiu em montar a linha (geofones e cabos) na segunda feira. De terça a sexta o trabalho foi instalar os módulos e baterias na parte da manhã, enquanto o blaster começava o processo de retirada do explosivo do paiol. Uma vez que o blaster chega em campo os furos foram carregados um por vez, a produtividade foi de 8 detonações por dia e uma movimentação de 48 receptores no fim da seção. Ao fim do dia, módulos e baterias eram recolhidos. Na Sexta feira toda a linha era recolhida pois não havia permissão de funcionar nos finais de semana.

No início do projeto, a montagem de todo equipamento durava até 2 dias, tornando muito difícil a produção de dados. Eram necessários 2 dias para montar e um dia para desmontar todo o equipamento. Logo, a semana dispunha de 2 dias de efetiva aquisição de dados. Muito esforço foi despendido montando e desmontando a linha sísmica e uma produtividade extremamente baixa (16 detonações por semana). Com o treinamento da equipe foi possível montar a linha em 1 dia, e aumentar a produtividade semanal significativamente. Assim recomenda-se a aquisição contínua de dados durante o fim de semana, evitando a montagem/retirada semanal do equipamento completo. A redução de esforço e aumento de produtividade pode apresentar alto custo/benefício para o projeto.

Outra dificuldade encontrada nessa etapa foi manter o equipamento operacional, mais de uma vez os cabos foram danificados por animais durante a noite (Figura 6.5-a), em alguns locais os cabos foram inseridos dentro de mangueiras para evitar que o gado avariasse o equipamento (Figura 6.5-b). Outro cuidado é o de manter as baterias carregadas e efetuando o devido rodízio durante a noite. (Figura 6.5-c)

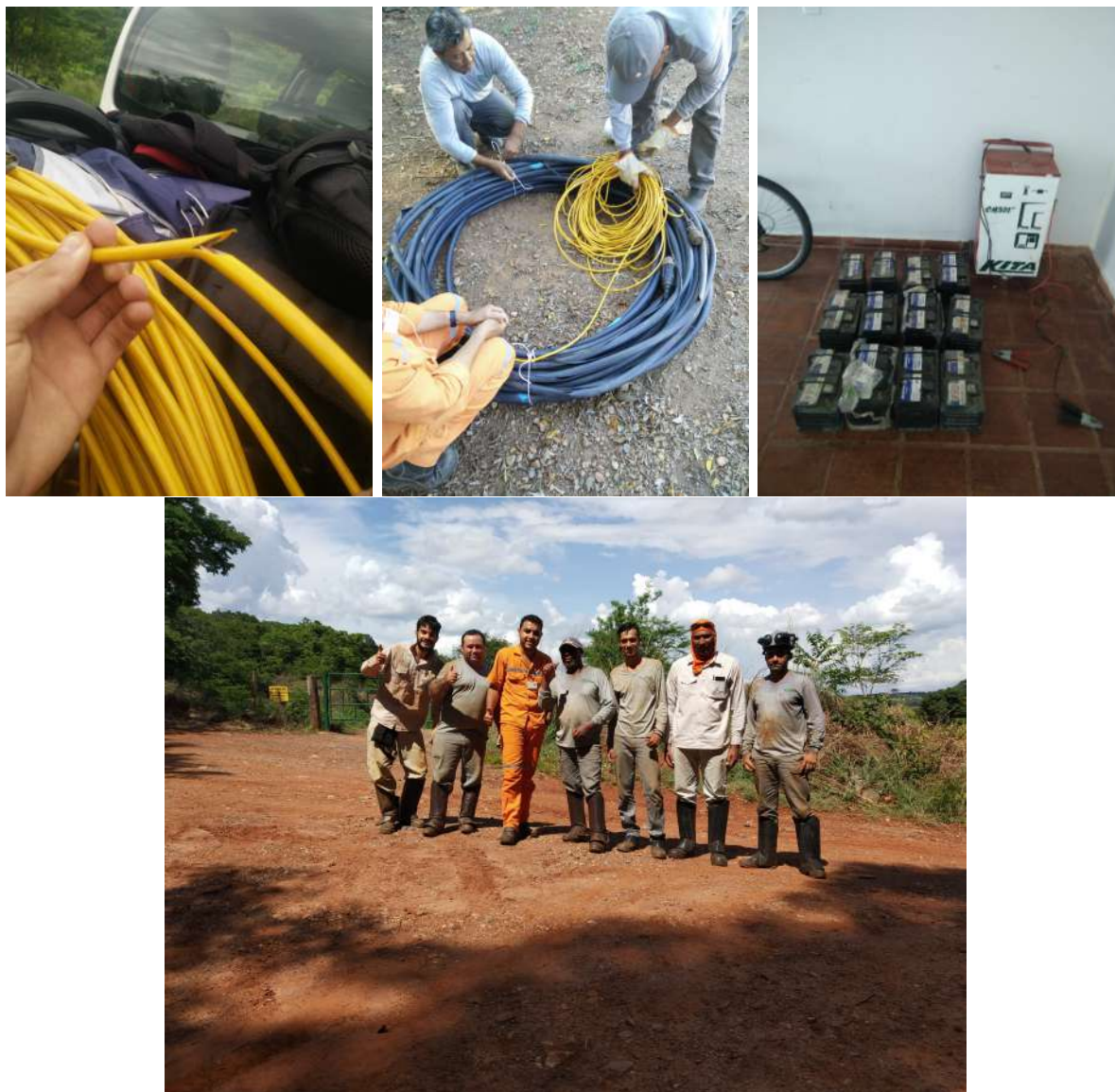


Figura 6.5: Fotos evidenciam: a) Cabo cortado. b) Cabos dentro da mangueira. c) Baterias e carregador. d) Equipe de operação.

## 6.5 Pré-Processamento

Os dados brutos adquiridos em SegY foram pré-processados em uma primeira etapa; um mesmo arquivo de tiro apresenta vários acionamentos ocasionais devido a sensibilidade do acionador, é necessário visualizar todos os registros e cortar o que possui a informação do explosivo. Em seguida, os dados adquiridos com acionamento manual são cortados no tempo, utilizando o ruído instrumental gerado durante a ativação do sensor. Toda a base foi reamostrada no tempo para um mesmo padrão, esses dados são visualizados e traços ruidosos são descartados. Nessa etapa é feito um controle de qualidade no dado adquirido.

O software Seismic Unix foi utilizado para a inclusão da geometria. Para automatizar o processo tabelas com as informações da base de dados foram construídas e funcionam

como a informação de entrada para o script que inclui a geometria. Essas tabelas foram construídas com as informações do log do observador em campo. É essencial a acurácia das anotações de campo nessa etapa, toda a mudança do arranjo feita em campo deve ser incluída durante esse processo.

Durante o campo aconteceu da equipe pular um sensor ou iniciar a montagem da linha em uma posição deslocada ao projetado, existem duas escolhas para lidar com o problema; corrigir manualmente, mudando receptores e cabos, ou anotar o desvio no log de campo de forma a incluir a falha no cabeçalho do dado.

A base de dados do campo é composta de 2 tabelas, a Tabela de informações de cada shot e Tabela de coordenada de Geofones. As tabelas(6.1 e 6.2) exemplificam a estrutura.

Tabela 6.1: Parte da Tabela de Tiros com a coordenada de cada shot (Sx Sy Sz), o numero do primeiro geofone (ngeof), a quantidade de geofones ativos (geof), e número do tiro (numb).

FUROS	Sx	Sy	Sz	ngeof	geof	numb
FURO1	604554.10	8387456.10	418.89	1	192	1
FURO2	604582.70	8387464.55	418.89	1	192	2
...	...	...	...	...	...	...

Essa tabela contem a coordenada de cada shot (Sx Sy Sz) o numero do primeiro geofone (ngeof) e a quantidade de geofones ativos (geof). O último parâmetro (numb) define o numero do shot ao longo da linha.

Tabela 6.2: Parte da Tabela de coordenadas dos geofones.

GEOFONE	X	Y	Z
FONE1	605473.41020	8387738.67600	440.79490
FONE2	605478.06910	8387740.26900	440.85270
FONE3	605482.73840	8387742.24000	441.03890
...	...	...	...

Após a construção das duas tabelas projetou-se um script em bash para gerar os arquivos de geometria para cada tiro. O script teve por objetivo incluir o valor das tabelas na respectiva estrutura do dado sísmico. Em seguida, os dados já possuindo geometria foram concatenados em apenas um arquivo SEG Y. O script encontra-se descrito no Anexo A.

## 6.6 Avaliação dos dados brutos

Como não foi possível observar refletores nítidos no teste de fonte, o stack de dados brutos é proposto para identificar a energia retro-espalhada. O stack tem por finalidade aumentar a relação sinal/ruído, o empilhando de energia coerente construtivamente, e remoção de ruído aleatório.

O modelo de velocidade utilizado para a correção nmo normalmente é retirado do alinhamento de eventos no domínio cmp, contudo, não foi possível observar refletores nítidos nesse domínio. A escolha de painéis de velocidades constantes foi realizado para contornar esse desafio. Nesse contexto, o processamento foi realizado com vários valores de velocidade separadamente. Espera-se observar o empilhamento de diferentes refletores ao longo da seção a depender do painel de velocidades utilizado no empilhamento.

Antes de apresentar as seções empilhadas foi essencial observar o efeito de estática na janela CMP. A Figura 6.6 apresenta o efeito da estática e da topografia nos dados, basta observar a variação do refletor ao longo do offset na janela de cmp. Essa variação impede o stack da energia refletida, reduzindo a qualidade do resultado final. A aplicação de correção estática é de fundamental importância para melhorar a qualidade do empilhamento.

## 6.7 Resultados

A aquisição representa o maior custo e esforço do projeto sísmico. O maior desafio para ser produtivo é treinar a equipe em todas as funções do trabalho até que a operação flua sem maiores dificuldades.

No campo foi possível adquirir os dados de topografia e reduzir o custo, mudando a abordagem de aquisição.

Durante a etapa de perfuração é aconselhável o uso de ferramentas mais robustas capazes de perfurar as rochas para assim atingir maiores profundidades.

O principal produto dessa etapa são os dados reais pré-processados, com a geometria e prontos para o processamento.



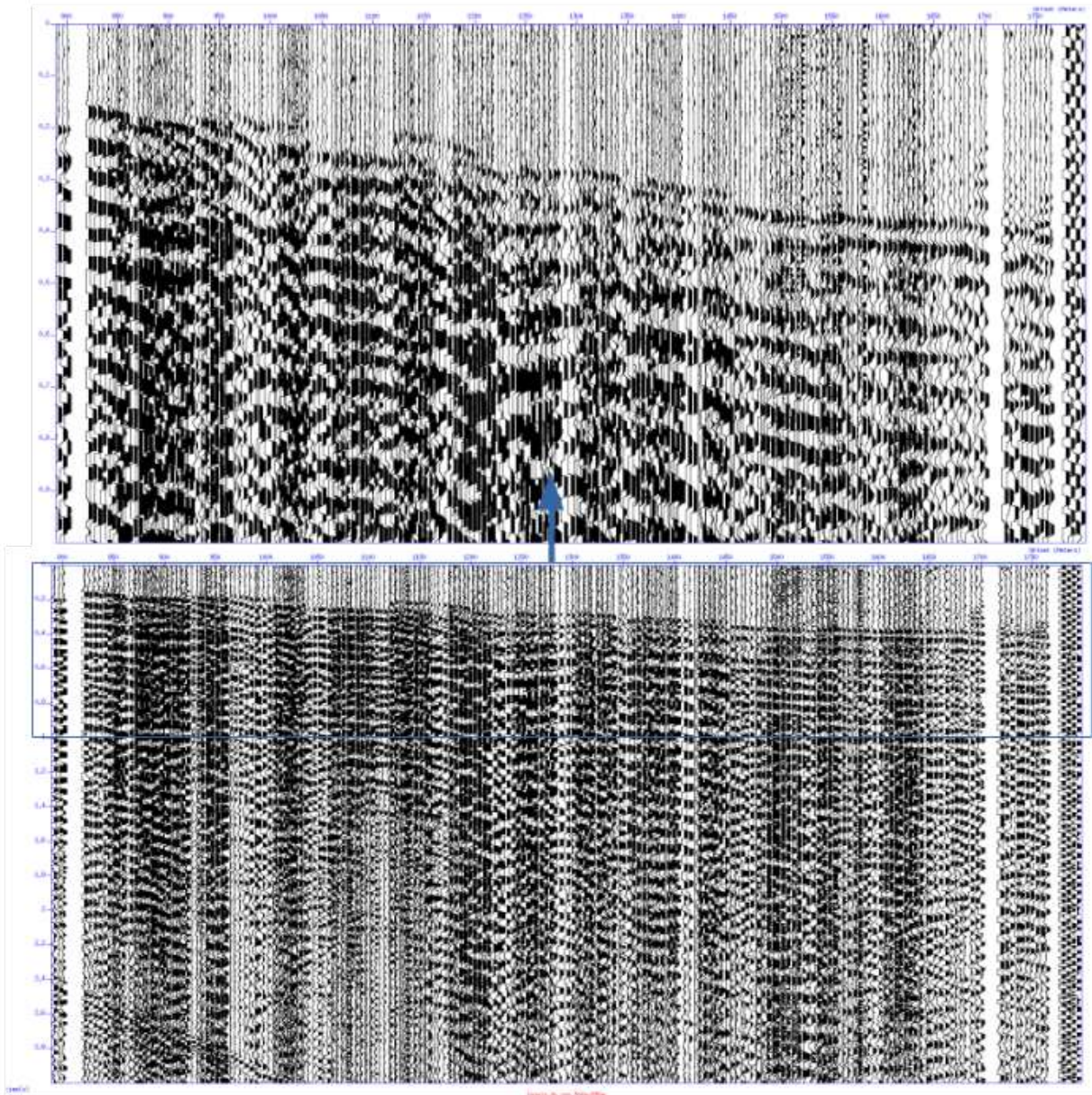


Figura 6.6: Janela CMP de 500m a 550m



# Capítulo 7

## Resultados

Mesmo sem a aplicação de correção estática os resultados trazem informações importantes, indicando que existe energia refletida. A Figura 7.1 apresenta refletores na porção central do perfil (de 1200m a 2800m). Nos dados empilhados observam-se fortes amplitudes até 1s para os painéis de 1, 2 e 3 km/s.

Existem alguns refletores discretos e contínuos na parte profunda ( $> 2s$ ) mas nada que afirme a definição de um modelo profundo nesse estágio do processamento. Os resultados indicam pouca ou nenhuma refletividade abaixo de 2,5 segundos.

O dado apresenta um desafio de ser processado, tendo em vista a baixa refletividade e alto mergulho dos refletores, é necessário um processamento dos dados com softwares robustos para retirar informações precisas da seção sísmica.

Os refletores mais evidentes presentes na Figura 7.1 foram marcados para formar um rascunho simplificado da subsuperfície. A Figura 7.2 apresenta a sobreposição do refletor sobre a seção empilhada. O mergulho dos refletores para a direita (Figura 7.2-azul) indica que o modelo proposto não representa a realidade vista no dado adquirido, sendo possível inferir novos arranjos geométricos que expliquem a geologia local.

Observando os painéis de empilhamento com velocidade constante, considerando que o dado ainda não possui correção estática, é possível inferir energia refletida na parte rasa do greenstone até 2,5s. Não identificaram-se refletores nítidos na parte profunda apenas com o empilhamento bruto dos dados, o que indica a necessidade de um processamento mais detalhado e robusto para definir se as seções correspondem a baixa refletividade ou a homogeneidade sísmica abaixo de 2.5s. A integração das informações de poço, do modelo geológico conceitual e das seções empilhadas resultaram nas figuras 7.3 e 7.4.

Duas características interessantes de observar seriam a continuidade em profundidade

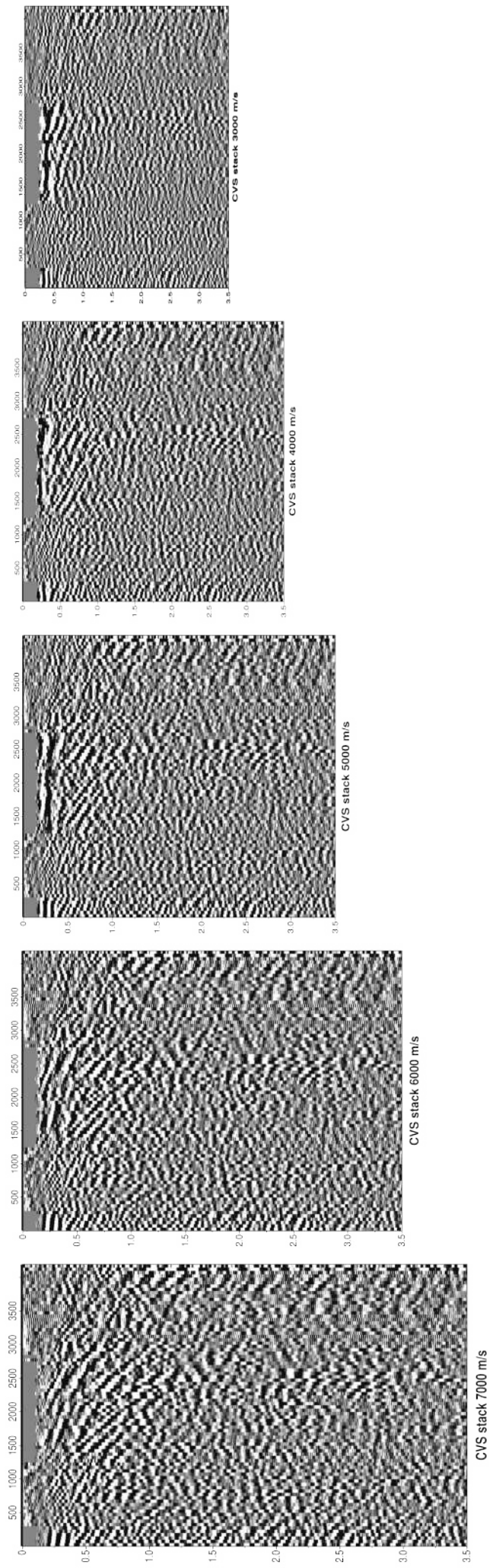


Figura 7.1: Painéis de empilhamento cmp considerando velocidades constantes

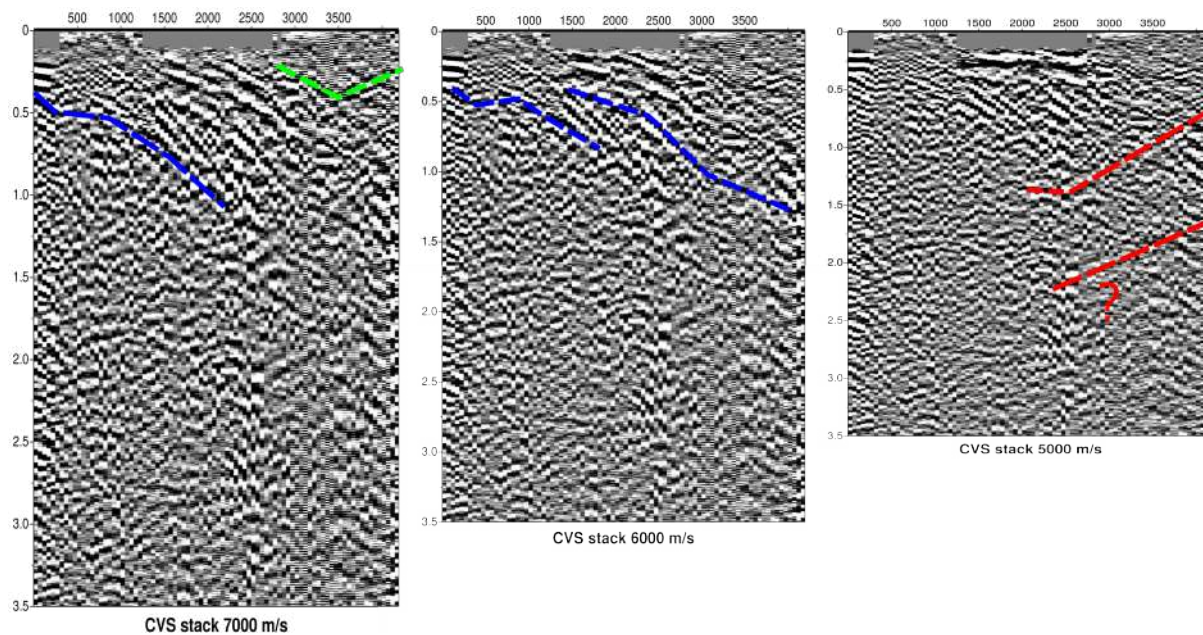


Figura 7.2: Esboço dos refletores em diferentes painéis da figura 7.1.

da estrutura já conhecida pela mineradora, principalmente para o painel de 4km/s da figura 7.3, e a presença de refletores com mergulho na direção contrária ao esperado entre o offset 1,2km e 2,5km. Os principais refletores foram agrupados na Figura 7.5 e uma proposta simplificada de estrutura profunda é apresentada.

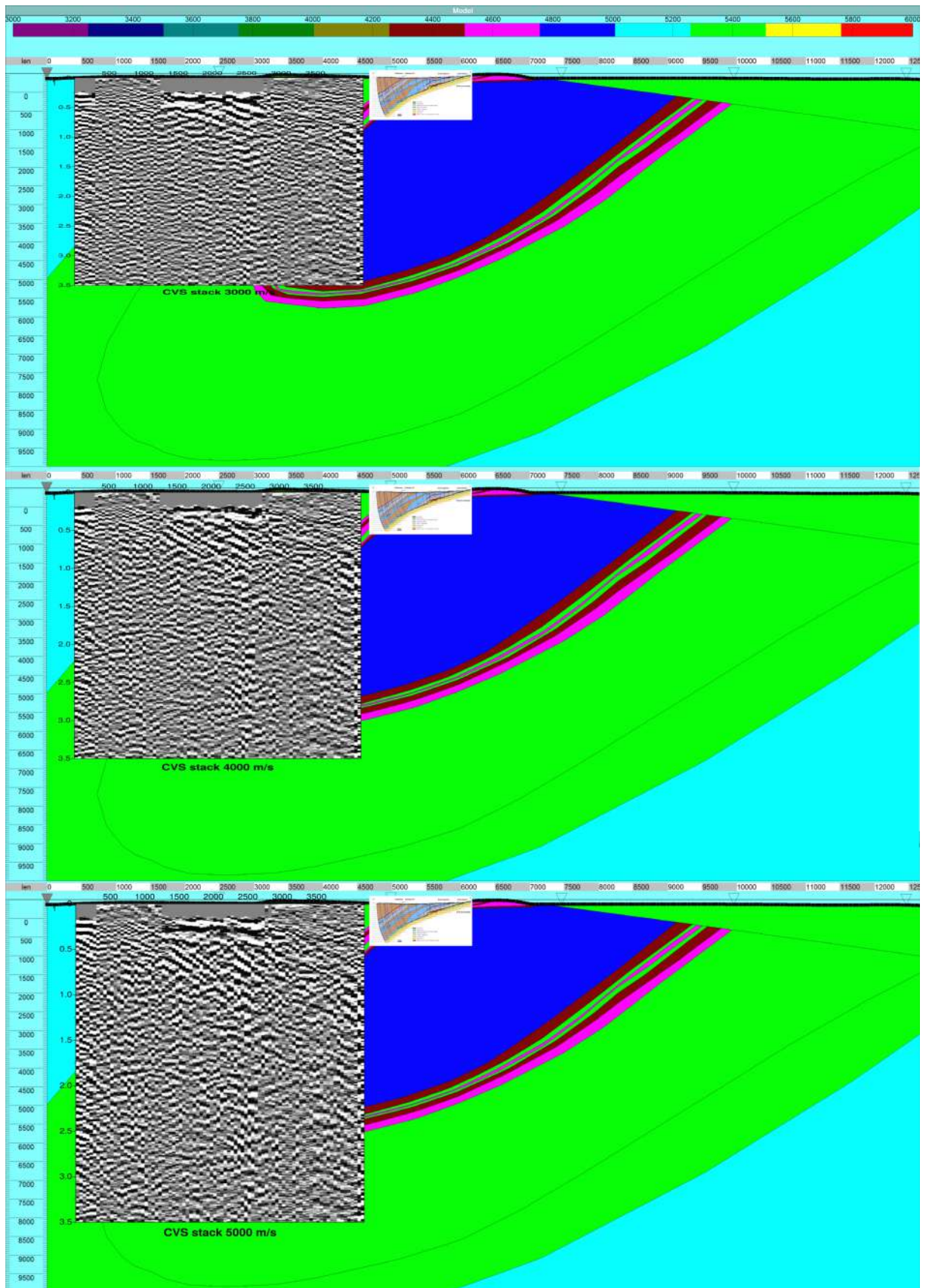


Figura 7.3: Integração dos dados litológicos da MSG, modelo estendido em profundidade e empilhamento sísmico



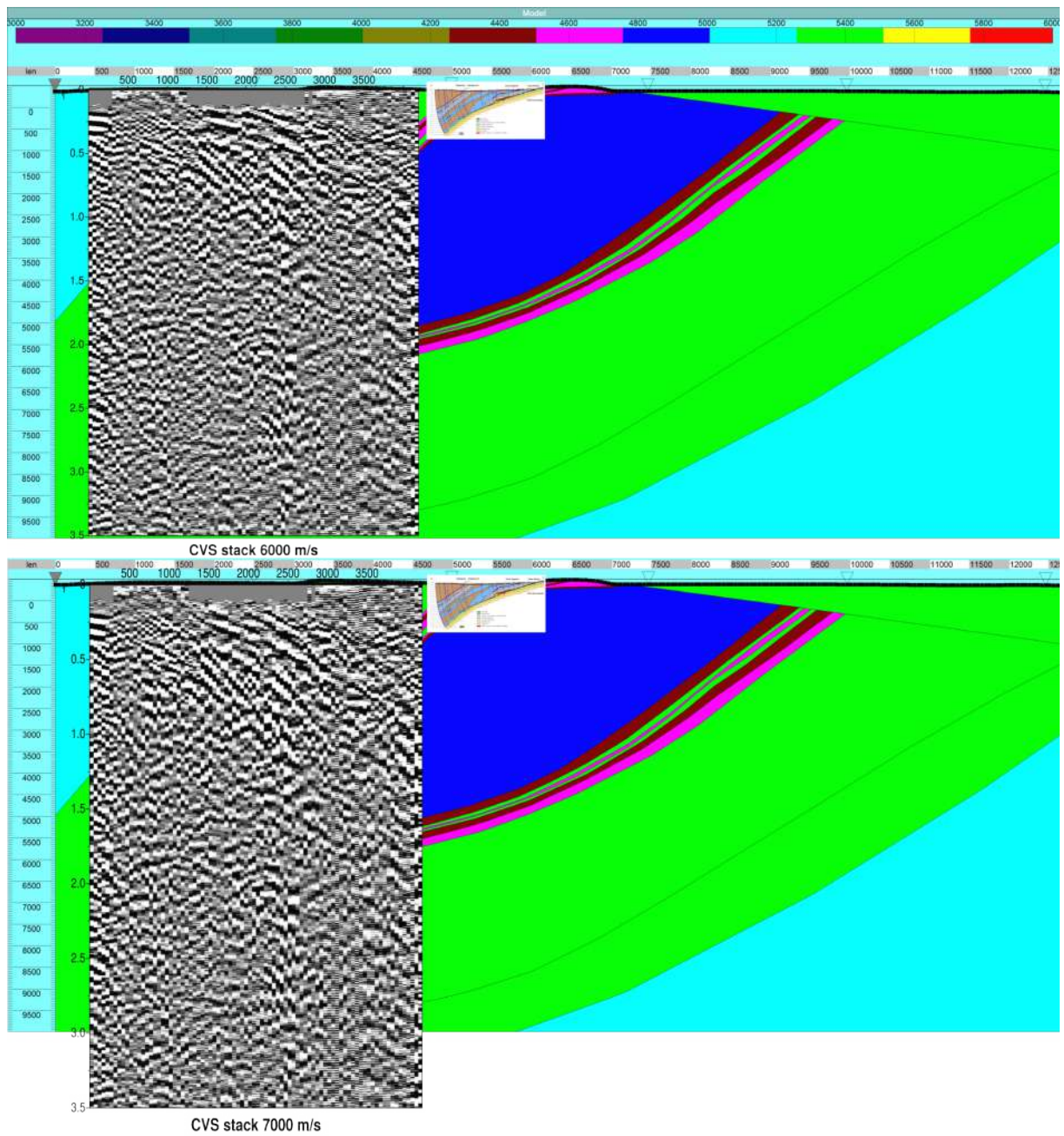


Figura 7.4: Integração dos dados litológicos da MSG, modelo extendido em profundidade e empilhamento sísmico

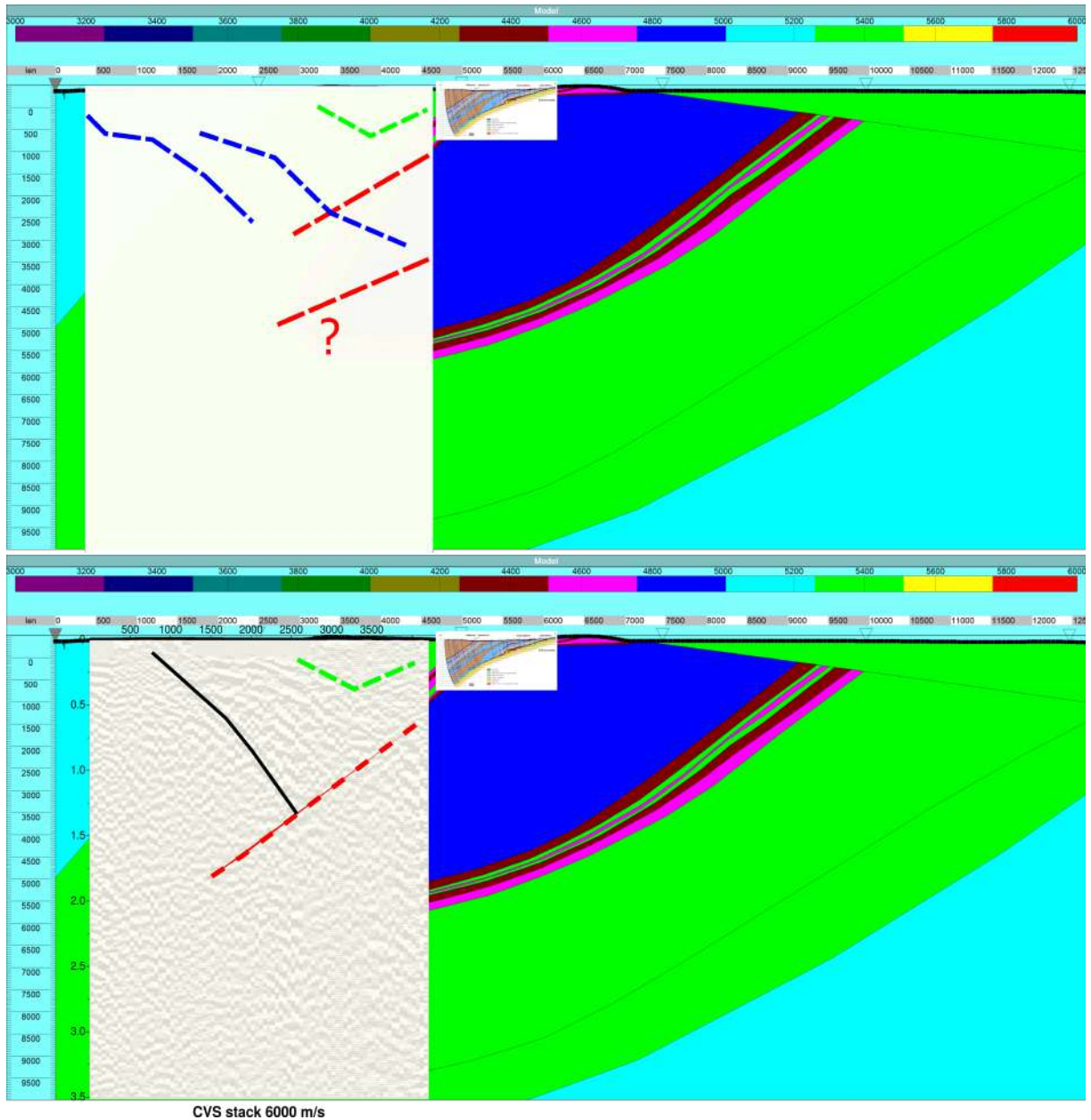


Figura 7.5: Integração dos dados com o esboço dos refletos mais evidentes encontrados nas seções sísmicas e uma proposição simplificada



# Capítulo 8

## Conclusões

O projeto sísmico em Crixás apresenta um desafio para a metodologia sísmica, principalmente considerando as condições de aquisição e processamento enfrentadas pela Universidade. O projeto é estruturado para adquirir informação e confiança em cada etapa de forma a reduzir o risco do investimento aplicado.

Os resultados são apresentados por etapa, identificando o processo de tomada de decisão na escolha dos parâmetros utilizados;

Com o teste de fonte pode-se definir a fonte, estabilizar o processo de aquisição, mensurar a quantidade de carga e a janela de frequência do dado sísmico. A primeira análise já indicava um ambiente desafiador para a metodologia principalmente relacionado aos dados provenientes dos tiros abaixo da camada de intemperismo onde, até mesmo em condições próximas à ideal, os dados não apresentaram evidentes refletores.

O estudo petrofísico caracterizou as unidades dentro do greenstone que representam os refletores com maior contraste de impedância, sendo possível identificar o contato entre os metabasaltos e as rochas metassedimentares. A baixa refletividade entre as unidades geológicas, assim como a grande diferença entre a velocidade do solo (2000 m/s) e a rocha ( $> 4000\text{m/s}$ ) constituem as principais informações.

Uma nova metodologia é proposta para estimar velocidade de ondas P e S em áreas de rochas não intemperizadas. O método é muito sensível a qualidade do dado adquirido em campo, além de ser necessário acesso a rocha não intemperizada. Os resultados obtidos para onda P são coerentes com os obtidos pelo detector ultrassônico. Identificar a velocidade da onda S possibilitou gerar modelos elásticos e dados mais próximos da realidade.

A modelagem auxiliou no processo de compreensão do dado adquirido e na identificação dos parâmetros de aquisição que mais se enquadram ao projeto. Com base no conhecimento geológico prévio propôs-se um modelo geológico estendido em profundidade.

As modelagens elásticas, construídas com diferentes arranjos de aquisição, possibilitaram a definição dos melhores parâmetros para resolver o modelo geológico proposto.

O offset mínimo variando entre 750 e 960 metros, aliado a movimentação de 48 canais por vez e tiros a cada 30 metros produzem uma multiplicidade mínima de 16. Considerada razoavelmente adequada para resolver as estruturas geológicas pretendidas.

As seções sísmicas empilhadas em velocidade constante apresentam energia coerente na parte central do perfil. Essa alta refletividade indica que o processamento mais robusto pode aumentar a qualidade dos resultados e criar imagens interpretáveis. A porção mais profunda ( $> 2,5s$ ) não indicou nenhum horizonte refletido nítido, o que sugere baixa refletividade ou necessidade de um processamento mais adequado.

Os resultados permitem inferir um refletor a sudoeste do greenstone com mergulho para a direção NE. Assim como a continuidade das unidades geológicas já mapeadas pela mineradora até cerca de 1,5 segundos (cerca de 2.5km de profundidade utilizando uma estimativa pelo painel de velocidade constante).

### **Sugestão para trabalhos futuros:**

Recomenda-se direcionar os esforços do projeto no processamento dos dados adquiridos antes de dar prosseguimento da etapa de campo. Para efetuar o processamento o projeto necessita fazer uso de um software comercial em função da necessidade de ferramentas mais robustas, e de suporte técnico (know how) para o uso do software.

O pré-processamento dos dados torna-se difícil em função da perda do tempo zero em alguns tiros. Essa etapa não possui solução simples e toda forma de recuperar essa marcação apresenta um pequeno deslocamento que introduz erro durante o processamento. A compra de cabo coaxial pode resolver o problema em futuras aquisições de campo.

O método cmp tradicional não apresenta refletores nítidos, com isso existe uma necessidade de identificar estratégias para obter o modelo de velocidade nesse ambiente. Seria interessante avaliar fluxos de processamento em ambos, dado real e sintético. A capacidade de recuperar o modelo de velocidade usando o dado sintético pode servir para corroborar ou refutar um fluxo de trabalho. Como sugestão, uma adaptação do processamento exposto por Yilmaz (2017) poderia ser avaliado.

# Apêndice A

## Script para inclusão de geometria

```
#!/bin/bash

# Script para gerar arquivos de geometria para cada tiro.
# loop em todo todos os tiros
a=1 # contador de tiros
rm /*-geom.txt # apaga arquivos gerados anteriormente
sed 1d < FUROS_TOPO1 > FUROS_TOPO1tmp # Corta o cabeçalho do arquivo

# loop para ler numero do tiro, primeiro geofone, numero de traços
while IFS= read -r furo sx sy sz ngeof geof fldr zeros
do
echo "Trabalhando no furo $a"
# busca a coordenada do geofone para cada traço e monta a tabela
start=$((ngeof+1)) # linha referente ao primeiro geofone do shot gate
nf=$((geof+ngeof)) # linha referente ao ultimo geofone do shot gate

# corta a tabela no primeiro e ultimo geofone
awk 'NR==$start; NR=='$nf'' GEOFONES_TOPO.txt > tmp

# Leitura da tabela gerada linha por linha
while IFS= read r nome gx gy gz
do
cmpx=$(echo "($gx+$sx)/ 2 bc -l)
cmpy=$(echo "($gy+$sy)/ 2 bc -l)
offset=$(echo "sqrt(($gx - $sx)^2 + ($gy - $sy)^2) bc -l)
cmp=$(echo "sqrt(($cmpx - $cmpx1)^2 + ($cmpy - $cmpy1)^2 ) bc -l)
# Escreve a posição do shot (x y z) e geofone (x y z) para cada shot gate
```

```
echo "$sx $sy $sz $gx $gy $gz $fldr $offset $cmp» > $furo-geo.txt
done < tmp
a=$((a+1)) # contador de tiros
done < FUROS_TOPO1tmp
echo" Processoconcluido!"
```

# Bibliografia

- Barbosa, O., Batista, M. B., Dyer, R. C., Braun, O. P. G., and Cotta, J. C. *Geologia e inventário dos recursos minerais do projeto Brasília*, 1969.
- Crice, D. *Borehole shear-wave surveys for engineering site investigations*. 2002.
- De Wit, M.J. and Ashwal, L.D. Greenstone belts: what are they? 98:505–520, 01 1995.
- Eaton, D., Milkereit, B., and Salisbury, M. *Hardrock Seismic Exploration*. Society of Exploration Geophysicists, 2003. doi: 10.1190/1.9781560802396. URL <https://library.seg.org/doi/abs/10.1190/1.9781560802396>.
- Garofalo, F., Foti, S., Hollender, F., Bard, P.Y., Cornou, C., Cox, B.R., Dechamp, A., Ohrnberger, M., Perron, V., Sicilia, D., Teague, D., and Vergnault, C. Interpacific project: Comparison of invasive and non-invasive methods for seismic site characterization. part ii: Inter-comparison between surface-wave and borehole methods. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 82:241 – 254, 2016a. ISSN 0267-7261. doi: <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2015.12.009>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0267726115003188>.
- Garofalo, F., Foti, S., Hollender, F., Bard, P.Y., Cornou, C., Cox, B.R., Ohrnberger, M., Sicilia, D., Asten, M., Giulio, G. Di, Forbriger, T., Guillier, B., Hayashi, K., Martin, A., Matsushima, S., Mercerat, D., Poggi, V., and Yamanaka, H. Interpacific project: Comparison of invasive and non-invasive methods for seismic site characterization. part i: Intra-comparison of surface wave methods. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 82:222 – 240, 2016b. ISSN 0267-7261. doi: <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2015.12.010>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026772611500319X>.
- Garotta, R. *Shear Waves from Acquisition to Interpretation*. Society of Exploration Geophysicists, 1999. doi: 10.1190/1.9781560802402. URL <https://library.seg.org/doi/abs/10.1190/1.9781560802402>.
- Hagemann, S., Lisitsin, V., and Huston, D. Mineral system analysis: Quo vadis. 01 2016.



- Hardage, B., DeAngelo, M., Murray, P., and Sava, D. *Multicomponent Seismic Technology*. Society of Exploration Geophysicists, 2011. doi: 10.1190/1.9781560802891. URL <https://library.seg.org/doi/abs/10.1190/1.9781560802891>.
- Ide, J. M. An experimental study of the elastic properties of rocks. *GEOPHYSICS*, 1(3): 347–352, 1936. doi: 10.1190/1.1437125. URL <https://doi.org/10.1190/1.1437125>.
- Jost, H., Resende, M., Kuyumjian, R. M., Queiroz, C. L., Osborne, G. A., Blum, M. L. B., Pires, A. C. B., and Moraes, R. A. V. Terrenos arqueanos de goiás, 1999.
- Jost, H., Carvalho, J. M., Rodrigues, V. M., and Martins, R. Metalogenia dos greenstone belts de goiás, 09 2014.
- Kuyumjian, R., Oliveira, C., Campos, J., and Queiroz, C. Geologia do limite entre os terrenos arqueanos e o arco magmático de goiásna região de chapada-campinorte, goiás. 34:329–334, 09 2004.
- Malehmir, A., Durrheim, R., Bellefleur, G., Urosevic, M., Juhlin, C., White, D. J., Milkereit, B., and Campbell, G. Seismic methods in mineral exploration and mine planning: A general overview of past and present case histories and a look into the future. *GEOPHYSICS*, 77(5):WC173–WC190, 2012. doi: 10.1190/geo2012-0028.1. URL <https://doi.org/10.1190/geo2012-0028.1>.
- Mari, Jean-Luc and Vergniault, Christophe. *An overview of the current state of knowledge in the geotechnical field and possible methodology transfers from the oil industry to near surface studies*. 2018. doi: 10.1051/978-2-7598-2263-8.
- McCuaig, T. and Hronsky, J. The mineral system concept: The key to exploration targeting. 18:153–175, 01 2014.
- Queiroz, C. L. Evolução tectono-estrutural dos terrenos granito-greenstone belt de crixás, brasil central, 2000.
- Saboia, L. A. Os greenstones belts de crixas e goias, go. 34, 1979.
- Sheriff, R. E. and Geldart, L. P. *Exploration Seismology*. Cambridge University Press, 2 edition, 1995. doi: 10.1017/CBO9781139168359.
- Theodoro, S. M. C. H. Ambiente de sedimentacao da formacao ribeirao das antas, grupo crixas, go, 1995.
- Villahermosa, B. and Turner, G. Anglogold ashanti crixas operations de-risking report. *Geoexploration*, page 48, 2017.

Yilmaz, Oz. *Circumventing velocity uncertainty in imaging complex structures*, pages 5706–5710. 2017. doi: 10.1190/segam2017-17415496.1. URL <https://library.seg.org/doi/abs/10.1190/segam2017-17415496.1>.

Yilmaz, Ö. *Seismic Data Analysis*. Society of Exploration Geophysicists, 2001. doi: 10.1190/1.9781560801580. URL <https://library.seg.org/doi/abs/10.1190/1.9781560801580>.