

Universidade de Brasília - UnB
Instituto de Geociências - IGD
Laboratório de Geofísica Aplicada



HEITOR VALENTIM RAMPINI VEIGA

**APLICAÇÃO DE SÍSMICA MULTICANAL NO ESTUDO DA
ESTRATIGRAFIA DO RIO NEGRO - AM**

Brasília

2024

Universidade de Brasília - UnB
Instituto de Geociências - IGD
Laboratório de Geofísica Aquática



HEITOR VALENTIM RAMPINI VEIGA

**APLICAÇÃO DE SÍSMICA MULTICANAL NO ESTUDO DA
ESTRATIGRAFIA DO RIO NEGRO - AM**

Trabalho de conclusão de curso para a graduação
em Geofísica do Instituto de Geociências – IG da
Universidade de Brasília – UnB.

Orientador: Prof. Dr. Marco Ianniruberto.

Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Peres Rocha.

Brasília
2024

FOLHA DE APROVAÇÃO

Heitor Valentim Rampini Veiga

APLICAÇÃO DE SÍSMICA MULTICANAL NO ESTUDO DA ESTRATIGRAFIA DO RIO NEGRO - AM

Trabalho de conclusão de curso de graduação em
Geofísica do Instituto de Geociências – IG da
Universidade de Brasília – UnB.

Orientador: Prof. Dr. Marco Ianniruberto

Co-orientador: Prof. Dr. Marcelo Peres Rocha

Banca Examinadora

Prof. Dra. Lucieth Cruz Vieira

Instituição: IG/UnB

Prof. Dr. Giuliano Sant'Anna Marotta

Instituição: IG/UnB

DEDICATÓRIA

Dedico a conclusão deste trabalho a minha família e amigos, por todo sacrifício e apoio durante meus anos de academia.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente é preciso exaltar a gratidão pelo esforço dos meus pais e irmã em me apoiar, encorajar, inspirar, ensinar, além de me privilegiar de tantas oportunidades. Às minhas famílias Rampini, Veiga, e como agregado, Garcia. Em especial a Tatiana Rampini Veiga, geóloga e irmã que me apresentou e introduziu ao mundo das geociências. Obrigado pela inspiração e ajuda ao longo de todos esses anos!

Agradeço a minha namorada Vida pela companhia, paciência, conversas e infinitas ajudas nos meus piores e melhores momentos. Aos meus amigos, e primos, Rafa e Edu Coutinho. Amigos queridos que me apoiaram nos dias na UnB, Malu, Nana, Marcos, Douglas, Aline, Ana Livia, Erick, Genesson, Celso, Victor, Dhamaria, Natan, Fredão, Luquinhas, Scarpa, Luiza, Lucas C., Caio e muitos outros que levarei para a vida.

Aos meus pais Brasilienses, Paulo Veiga (*in memoriam*), Angélica Garcia, e irmão gêmeo, Pedro Henrique. Obrigado pela contribuição na minha formação como pessoa e ajuda imensurável desde que cheguei a Brasília. Agradeço também as minhas outras famílias de Brasília, em especial Coutinho, Yuri, Simões, Thomaz, Thiago e Malu

Aos meus grandes parceiros da Rural Tech, companheiros de rotina e mestres de muitos ensinamentos, em especial ao Jonas. E aos amigos da Digimap por me deixarem craque na cartografia.

Por fim, porém não menos importante, obrigado aos meus professores, técnicos e funcionários de todo o Instituto de Geociências, as pessoas responsáveis por um curso de uma das melhores universidades da América do Sul. Agradecer ao Marco Ianniruberto por toda a paciência e dedicação em repassar seus conhecimentos e conselhos ao longo dos meus anos de estudos. Ao Welitom por todas as ricas conversas cheias de conhecimentos e risadas. Ao Marcelo por todo apoio a este trabalho e em minha graduação, assim como o Leão, Adalene, Soares entre outros queridos professores.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo investigar a estratigrafia do Rio Amazonas por meio da aplicação de sísmica multicanal, com ênfase na caracterização de camadas geológicas e esforços neotectônicos. Esse estudo é relevante não apenas para o entendimento geológico da região, mas também para fornecer subsídios a áreas como geofísica, geologia, engenharia e meio ambiente. A metodologia aplicada envolve o uso da sísmica multicanal, que permite a obtenção de perfis detalhados das estruturas subaquáticas. A aquisição dos dados sísmicos foi realizada em uma campanha da parceria entre pesquisadores brasileiros e Franceses, do projeto AMANAUS, ao longo de 600 km do Rio Amazonas, utilizando uma fonte de energia sísmica do tipo Sparker e um sistema de receptores com 48 canais. Além disso, os dados foram processados com o software Seismic Unix (SU), um pacote de código aberto com grande abrangência nas operações necessárias. O processamento dos dados envolveu várias etapas, incluindo a filtragem de ruídos, análise de velocidades, empilhamento e migração dos dados sísmicos. Foram utilizados métodos específicos para melhorar a qualidade dos sinais refletidos, e resultados em perfis sísmicos que pudessem ser interpretados para identificar as camadas geológicas e possíveis sinais de deformações tectônicas. Os produtos alcançados mostraram a eficácia e potencial do uso de ferramentas de código aberto como o Seismic Unix. Apesar de desafios técnicos, como a dificuldade na supressão de múltiplas, os perfis gerados permitiram identificar algumas das principais características geológicas do subsfundo do Rio Amazonas, com destaque para refletores sísmicos bem demarcados em profundidades de até 80 metros. Este estudo é uma contribuição para o conhecimento das características do subsfundo da região amazônica. Assim como o uso de metodologias acessíveis, como o Seismic Unix, é um reforço do compromisso com a acessibilidade e a democratização da pesquisa científica, permitindo que outros pesquisadores possam replicar e expandir os resultados obtidos.

Palavras-chave: Sísmica Multicanal, Formação Alter do Chão, Rio Negro, Geofísica Aquática, Estratigrafia.

ABSTRACT

This research aims to investigate the stratigraphy of the Amazon River through the application of multichannel seismic and has emphasis on the characterization of geological layers and neotectonic efforts. This study is relevant not only for understanding the region's geology but also for providing support to fields such as geophysics, geology, engineering, and the environment. The applied methodology involves the use of multichannel seismic, which can provide detailed profiles of underwater structures. Seismic data acquisition was conducted during the AMANAUS project campaign, covering 600 km of the Amazon River, using a Sparker as seismic energy source and a 48-channel stream system. Additionally, the data was processed with Seismic Unix (SU) software, an open-source package with extensive functionality for the required operations. Data processing involved several stages, including noise filtering, velocity analysis, stacking, and data migration. Specific methods were used to enhance the quality of the reflected signals, the result consists in seismic profiles with good resolution to identify geological layers and possible signs of tectonic deformations. The results demonstrated the effectiveness and potential of using open-source tools such as Seismic Unix. Despite technical challenges, such as the difficulty in suppressing multiples, the generated profiles resulted in the identification of geological features of the Amazon River subbottom, with well-defined seismic reflectors at depths of up to 80 meters. This study contributes to the knowledge of the subfloor characteristics of the Amazon region. The use of accessible methodologies, such as Seismic Unix, reinforces the commitment to accessibility and the democratization of scientific research, allowing other researchers to replicate and expand the obtained results.

Keywords: Multichannel Seismic, Alter do Chão Formation, Negro River, Waterborne Geophysics, Stratigraphy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 2-1: Representação da bacia hidrográfica do Amazonas e seus limites (dos Santos Silva, 2023)..... | 14 |
| Figura 2-2: Mapa de localização indicando a posição da linha sísmica a sudoeste de Manaus e hidrografia do Amazonas. | 15 |
| Figura 2-3: Mapa batimétrico da região de encontro dos Rios Negro e Solimões. As áreas em vermelho indicam feições morfológicas da confluência. (IANNIRUBERTO et al., 2018)..... | 16 |
| Figura 2-4: Recorte em detalhe do mapeamento batimétrico da confluência entre Rios Negro e Solimões. Os terraços são identificados pelos altos morfológicos destacados em azul. | 18 |
| Figura 2-5: Mapa das províncias geotectônicas do Cráton Amazônico (COSTA, 2020). | 19 |
| Figura 2-6: Mapa geológico simplificado do estado do Amazonas. (SGB, 2005). | 20 |
| Figura 2-7: Carta estratigráfica Mesozóica e Cenozóica da Bacia do Amazonas proposta por Caputo (2011)..... | 22 |
| Figura 3-8: Propagação da energia na reflexão (VL1) e refração (VL2). | 26 |
| Figura 4-9: Disposição dos traços sísmicos refletidos com uma fonte estática. (KEAREY, 2009)..... | 30 |
| Figura 4-10: Croqui da disposição dos elementos utilizados no levantamento. Demonstrate os espaçamentos e posições dos equipamentos relativos ao barco. Os hidrofones estão representados como triângulos, a fonte de energia como linhas vermelhas. Modificado de Dupont (2023). | 31 |
| Figura 4-11: (a) Sparker de água salgada como exemplo da disposição dos eletrodos; (b) Sparker de água doce utilizado durante a campanha; (c) Fonte de energia utilizada durante a campanha; (d) Cabo de alta tensão utilizado durante a campanha. Adaptado de Dupont (2023). | 33 |
| Figura 4-12: Gráfico de energia necessária para penetração em diferentes substratos. Adaptado de Souza (2006). | 33 |
| Figura 4-13: <i>Streamer</i> sísmico utilizado durante a campanha (DUPONT, 2023). | 34 |
| Figura 4-14: Fluxograma das etapas de processamento do dado sísmico de reflexão. ... | 37 |
| Figura 4-15: Espectro de frequências com eixos em nº de traço e Hz. As cores mais quentes indicam uma alta amplitude no domínio das frequências. | 38 |

| | |
|--|----|
| Figura 4-16: Modelo convolutivo do traço sísmico de reflexão. (KEAREY, 2009). | 40 |
| Figura 4-17: Espectro de velocidades de Velocidade por Tempo. A imagem demonstra em cores quentes regiões de maior amplitude na reflexão do sinal. O primeiro traço fortemente é resultado da onda direta..... | 42 |
| Figura 4-18: Modelo esquemático da correção NMO (GAMA et al., 2017). | 43 |
| Figura 4-19: Representação esquemática do empilhamento de uma família CMP (GAMA et al., 2017)..... | 44 |
| Figura 4-20: Modelo esquemático da migração. (a) Representação do refletor real; e (b) representação do refletor pré-migração (Yilmaz, 2001)..... | 45 |
| Figura 5-21: Espectro de frequência após a aplicação do filtro. | 48 |
| Figura 5-22: (a) Traço sísmico bruto; (b) Traço sísmico com o filtro passa banda aplicado. | 48 |
| Figura 5-23: Em (a) traço sísmico bruto. Em (b) traço sísmico após aplicação da deconvolução..... | 49 |
| Figura 5-24: Autocorrelação demonstra um padrão marcado em 0.084 s, dobro da onda primaria..... | 50 |
| Figura 5-25: Perfil sísmico deconvolvido para supressão de múltiplas | 50 |
| Figura 5-26: Perfil resultado da correção NMO..... | 53 |
| Figura 5-27: Resultado de insucesso da operação de remoção da múltipla pós-stack. .. | 54 |
| Figura 5-28: Perfis sísmicos com profundidade de 75 m. Dispostos em escala de cor cinza acima e colorido abaixo..... | 56 |
| Figura 5-29: Perfis sísmicos com profundidade de 105 m. Dispostos em escala de cor cinza acima e colorido abaixo. | 57 |
| Figura 5-30: Resultado obtido no processamento preliminar do projeto AMANAUS. (DUPONT, 2023)..... | 58 |
| Figura 5-31: Seção sísmica com a interpretação estratigráfica. | 60 |
| Figura 5-32: Interpretação estratigráfica final da seção sísmica obtida. | 61 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 5-1: Exemplos dos valores de tempo e velocidade adquiridos na análise de velocidades. | 51 |
|---|----|

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 10 |
| 1.1 | Objetivos..... | 12 |
| 2 | ÁREA DE ESTUDO..... | 13 |
| 2.1 | Localização da área de estudo..... | 15 |
| 2.2 | Contexto geológico regional..... | 18 |
| | 2.2.1 Formação Alter do Chão..... | 21 |
| 3 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... | 24 |
| 3.1 | Sísmica de reflexão..... | 24 |
| | 3.1.1 Fenômenos de reflexão e refração..... | 25 |
| | 3.1.2 Impedância acústica..... | 26 |
| 4 | METODOLOGIA..... | 28 |
| 4.1 | Sísmica multicanal..... | 28 |
| | 4.1.1 Aquisição..... | 30 |
| | 4.1.1.1 Fonte sísmica..... | 31 |
| | 4.1.1.2 Streamer Sísmico..... | 34 |
| | 4.1.1.3 Posicionamento GNSS..... | 35 |
| 4.2 | Processamento..... | 36 |
| | 4.2.1 Análise de frequência..... | 38 |
| | 4.2.2 Espalhamento Geométrico..... | 39 |
| | 4.2.3 Deconvolução..... | 40 |
| | 4.2.4 Múltiplas..... | 41 |
| | 4.2.5 Análise de velocidades..... | 41 |
| | 4.2.6 Correção NMO..... | 42 |
| | 4.2.7 Empilhamento..... | 44 |
| | 4.2.8 Migração Stolt ou migração ($f-k$)..... | 44 |
| | 4.2.9 Conversão tempo-profundidade..... | 46 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 47 |
| 6 | CONCLUSÕES..... | 62 |
| | REFERÊNCIAS..... | 63 |

1 INTRODUÇÃO

O Rio Amazonas, é de grande relevância devido à sua extensão, complexidade geológica e impacto global. Com uma descarga equivalente a cinco vezes a do rio Zaire (Congo), dez vezes a do Mississippi e 3.500 vezes a do Tâmsa, o Rio Amazonas é responsável por aproximadamente um quinto de toda a água doce despejada anualmente nos oceanos por todos os rios do mundo (GOULDING, 1997). Essa significativa vazão não só o torna o maior rio em volume de água, mas também contribui expressivamente para o transporte de sedimentos, influenciando a formação de depósitos sedimentares ao longo de sua bacia (MARTINEZ et al., 2009). Adicionalmente, a região de sua foz tem atraído um crescente interesse para a exploração de petróleo dado o potencial de reservas subterrâneas e o eficiente transporte fluvial, resultando em uma região com alta viabilidade econômica para exploração, pela possibilidade de transporte fluvial eficiente. Em suma, a importância do Rio Amazonas engloba um papel crucial na regulação do clima global, a manutenção da biodiversidade, o sustento das populações locais além dos importantes aspectos econômicos. Em vista disso, tamanha é a relevância de seu estudo em relação aos interesses tanto ambiental quanto econômico em escala mundial.

Estudos indicam que mais de 70% das atividades econômicas humanas em ambientes aquáticos ocorrem em lagos, rios e locais próximos a costa com menos de 30 metros de profundidade (GEOACOUSTICS, 2004; SOUZA E GANDOLFO, 2021; SOUZA, 2022). Por meio de métodos indiretos de forma não invasiva e/ou não destrutiva, a geofísica aquática se tornou uma solução indispensável e desempenha um papel fundamental ao auxiliar projetos de engenharia, navegação e científicos. Dentre essas técnicas, a sísmica de reflexão destaca-se pela sua capacidade de gerar imagens detalhadas das camadas internas da Terra e baseia-se no princípio de enviar ondas sísmicas ao subsolo e analisar o retorno das ondas refletidas nas interfaces entre diferentes tipos de rochas (REYNOLDS, 2011). Esse método não só possibilita a compreensão da estrutura geológica e a caracterização de recursos minerais e energéticos, mas também é uma ferramenta confiável para auxiliar no planejamento de infraestruturas e nos estudos de rios (SOUZA, 2006).

Nos estudos sísmicos empregados em águas rasas, a fonte de energia acústica Sparker é utilizada nos levantamentos de alta penetração, usualmente acima de 50 m. A

sua relativa baixa frequência (200-2500 Hz) e alto nível de energia, corroboram para uma resolução vertical aproximada de 1 m e confiabilidade que fazem desta técnica um recurso amplamente difundido para a exploração e o estudo de regiões complexas, como o subfundo do rio Amazonas (MARSSET et al., 2014; SOUZA, 2022).

O processamento de dados sísmicos é um passo essencial para a interpretação adequada das informações coletadas. Yilmaz (2001) pontua três considerações indispensáveis para a manipulação dos dados sísmicos: (1) A escolha apropriada do fluxo de processamento para o tipo de dado e seus objetivos; (2) Aprofundamento nos parâmetros escolhidos em cada etapa do fluxo; (3) Avaliação a cada etapa dos resultados proveniente dos parâmetros escolhidos. O autor ainda afirma que três principais processos se combinam para formar a fundação de uma boa rotina de processamento – deconvolução, empilhamento e migração.

No contexto deste trabalho será utilizado os pacotes de códigos abertos em Linux, *Seismic Unix (SU) - Colorado School of Mines*, uma ferramenta reconhecida na comunidade acadêmica e profissional pela sua eficácia e versatilidade no processamento de dados sísmicos. A escolha de um software de livre acesso não apenas viabiliza economicamente o estudo, mas também promove o avanço do conhecimento científico, permitindo que outros pesquisadores e instituições possam replicar e expandir os resultados obtidos. Através desse pacote, será realizado o processamento dos dados sísmicos seguindo as seguintes etapas básicas, visando à obtenção de perfis sísmicos de alta resolução: a filtragem de ruídos, análise de velocidades, empilhamento e a migração.

Espera-se que os resultados deste estudo possam oferecer informações sobre a geologia e a neotectônica do subfundo do Rio Amazonas. A caracterização detalhada das estruturas geológicas permitirá uma melhor avaliação dos potenciais econômicos e fornecerá subsídios para o desenvolvimento de estudos e pesquisas da região. Em resumo, este trabalho visa não apenas contribuir para o conhecimento científico da região do rio Amazonas, mas também em fornecer ferramentas e informações que possam ser utilizadas por diversas áreas do conhecimento, incluindo geologia, engenharia, meio ambiente e economia. A aplicação da sísmica de reflexão, aliada ao uso de ferramentas de software acessíveis, reforça o compromisso com a inovação e a sustentabilidade na pesquisa geofísica.

1.1 Objetivos

O escopo deste trabalho é definido no estudo da região a jusante do Rio Negro – AM, com uso da geofísica aquática ao aplicar o método de sísmica de reflexão para caracterização do subfundo do Rio Amazonas, com foco na definição da estrutura estratigráfica e esforços neotectônicos. Em sequência, é de interesse contemplar resultados e etapas de processamento dos dados sísmicos por meio do programa *Seismic Unix* com a finalidade de discorrer sobre sua eficácia e uso no processamento de perfis sísmicos multicanal e nas interpretações geofísicas e geológicas.

Arelado ao objetivo principal, este trabalho contará com o seguinte escopo:

- Definição de uma metodologia de processamento de perfis sísmicos multicanal utilizando o programa *Seismic Unix*;
- Confeção de um perfil sísmico de reflexão, com potencial interpretativo;
- Interpretação e análise do perfil sísmico de modo a caracterizar unidades estratigráficas e possíveis esforços neotectônicos do subfundo do Rio Amazonas.

2 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreende a região a jusante do Rio Negro, localizada na bacia hidrográfica do Amazonas e sub-bacia do Rio Negro. A bacia hidrográfica do Amazonas compreende 6.000.000 Km² e registra uma média de precipitação de 2200 mm/ano (Figura 2-1). Sua região é dividida em 3 grandes unidades morfológicas, sendo: 44% da área pertencente aos planaltos da Guiana e do Brasil, 45% à planície amazônica e 11% aos Andes (VILLAR et al., 2009a; VILLAR et al., 2009b). De tamanho proporcional à imensidão da bacia, o Rio Amazonas é o segundo maior rio do mundo em extensão, com uma vazão anual média de 209.000 m³/s de água e com grande aporte sedimentar evidenciado no fluxo de sedimentos em suspensão, onde pesquisas estimam um total de 800 x 10⁶ ton./ano carregados ao oceano Atlântico (MARTÍNEZ, 2009; FILIZOLA e GUYOT 2011).

A origem da alta descarga de sedimentos provém da margem leste da cordilheira dos Andes, com sua alta declividade e rochas facilmente erosíveis (GUYOT 1993). A deposição dos sedimentos é marcada pelo controle estrutural decorrente de afloramentos rochosos e de sistemas de dunas que variam em amplitude e comprimento de onda, atingindo sua máxima amplitude durante o alto fluxo de vazão, e aumentando em comprimento com redução de altura durante estágios de mais baixa energia (IANNIRUBERTO et al., 2018).

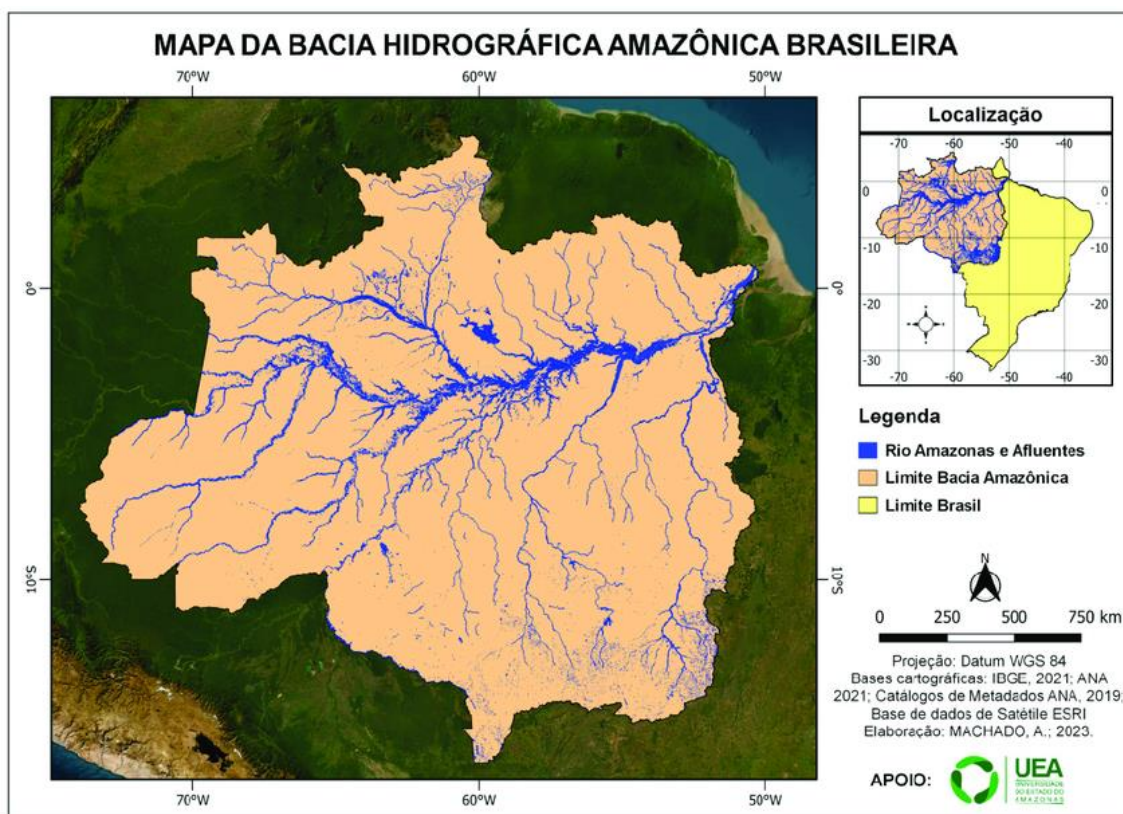


Figura 2-1: Representação da bacia hidrográfica do Amazonas e seus limites (dos Santos Silva, 2023).

De acordo com Goulding (1997) a história de evolução da bacia do Amazonas tem início a partir do final da era Mesozóica, onde o supercontinente Gondwana começou a se dividir. Com uma abundância enorme de vida, composta em sua maioria por plantas cicadáceas e samambaias, a bacia era uma grande planície úmida e teve papel fundamental na irradiação de diferentes nichos animais. A etapa crucial no seu desenvolvimento foi a elevação da cordilheira dos Andes, que ocorreu nos últimos 15 Ma, resultado do processo de colisão da placa continental Sul-Americana com a placa de Nazca (GOULDING 1997). A orogênese andina contribuiu com a evolução do Rio Amazonas para a paisagem de floresta pluvial conhecida atualmente, tornando-o profundo e volumoso e iniciando seu desague para Leste entre os planaltos do Brasil e das Guianas há 10 Ma, uma vez que se acredita que posteriormente a esse evento o seu curso fluía em direção noroeste, para região do Caribe (GOULDING, 1997).

Desde o período de sua formação, o rio Amazonas evoluiu em conjunto com a variação das eras glaciais do Pleistoceno, onde a retenção de água pelas calotas polares reduziu o nível do mar em até 130 metros em relação aos dias atuais. Durante esse período

os rios fluíam em um sistema de alta energia e contribuíram para a escavação de grandes cânions, com o carreamento de sedimentos para fora do sistema, através das terras rebaixadas. Posteriormente os sedimentos andinos subsidiaram a formação de suas áreas inundáveis e elevaram o nível do leito, contribuindo para que hoje a média de profundidades seja de 30 a 50 metros, podendo chegar a níveis superiores a 100 metros no baixo rio Negro (GOULDING, 1997), bem como em Óbidos e Itacoatiara (TRINDADE et al., 2023).

2.1 Localização da área de estudo

O local da aquisição geofísica realizada pelo projeto AMANAUS (DUPONT, 2023) compreende a área a jusante do Rio Negro, aproximadamente à 15 km da confluência com o Rio Solimões, nas imediações a sudoeste do município de Manaus. O local de interesse discutido neste trabalho e mapeado pelo perfil sísmico, configura uma extensão de 1200 metros (Figura 2-2).

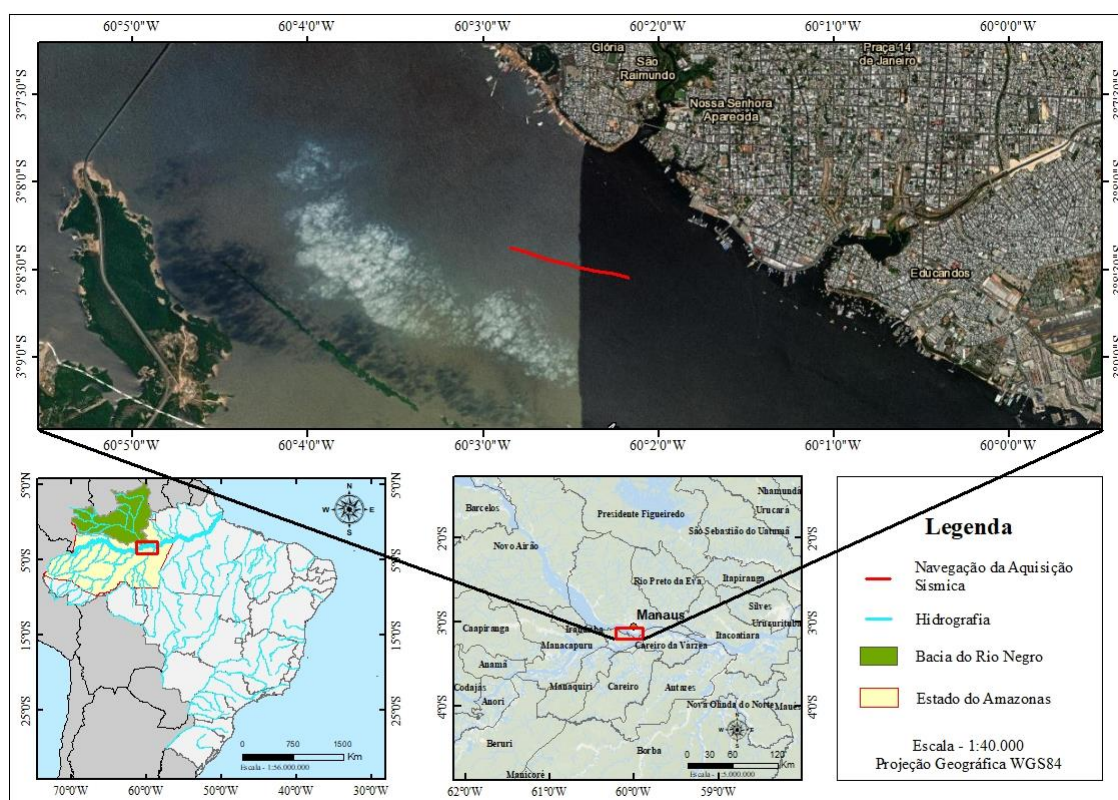


Figura 2-2: Mapa de localização indicando a posição da linha sísmica a sudoeste de Manaus e hidrografia do Amazonas.

É uma região sob influência do aporte sedimentar proveniente do Rio Solimões o que contribui com a formação de corpos sedimentares características deste ambiente. A

confluência é marcada por suas belezas e características únicas, tal qual os dois corpos hídricos (Negro e Solimões) se distinguem completamente em termos de sedimentos, morfologia e hidrodinâmica. O Rio Negro possui águas límpidas com baixa produção de sólidos, graças a densa vegetação e nascentes de baixa declividade providas dos planaltos do Escudo das Guianas. Sua vazão média anual foi constatada em $32.230 \text{ (m}^3 \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$ e um fluxo de sólidos de $8 \cdot 10^6 \text{ (t/ano)}$ considerado muito baixo dado o volume de água transportada. Por outro lado, o Rio Solimões possui uma vazão três vezes maior e é responsável pela metade da descarga total de sedimentos do Rio Amazonas, onde o fluxo estimado de sedimentos suspensos é de $447 \cdot 10^6 \text{ (t/ano)}$. Tais informações foram constatadas a partir das estações Paricatuba e Manacapuru respectivamente, analisadas por Filizola e Guyot (2011) (IANNIRUBERTO et al., 2018).

O mapa de batimetria multifeixe apresentado na Figura 2-3 exibe uma clara variação de profundidades através de uma escala cromática que vai do branco, representando áreas mais rasas, até o azul, que marca profundidades de até 75 metros. As cores gradativas permitem uma visualização intuitiva das variações de relevo submerso, facilitando a identificação de feições morfológicas no leito do corpo d'água mapeado.

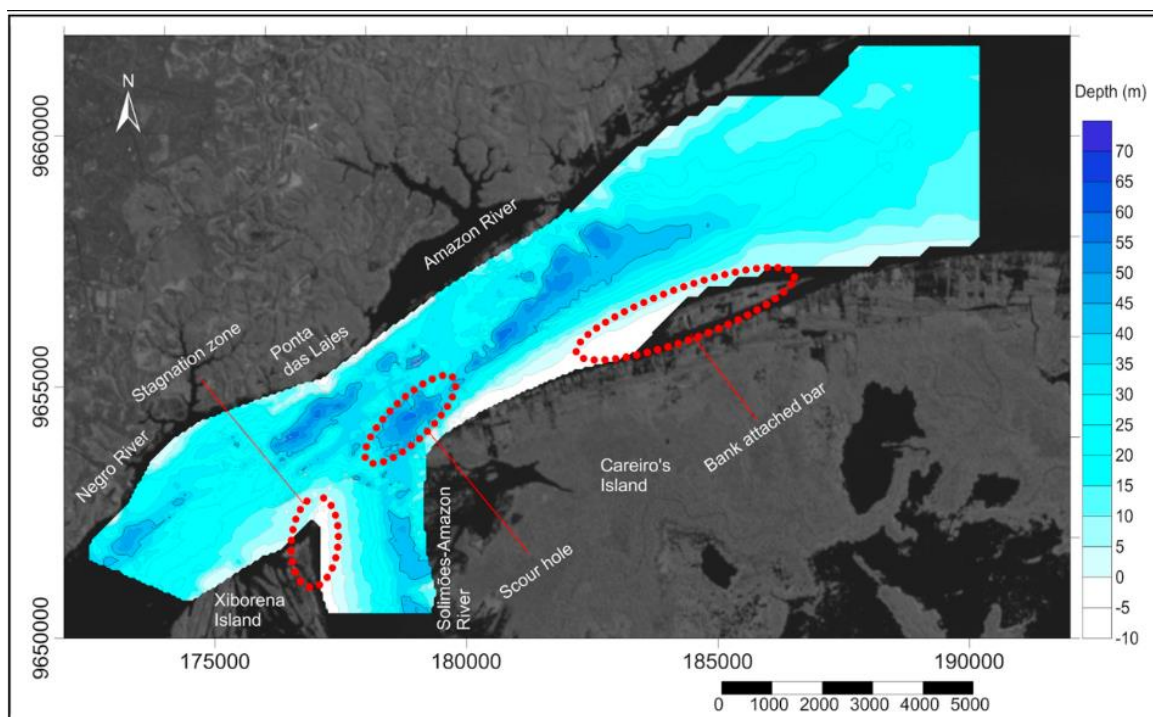


Figura 2-3: Mapa batimétrico da região de encontro dos Rios Negro e Solimões. As áreas em vermelho indicam feições morfológicas da confluência. (IANNIRUBERTO et al., 2018).

Nas imediações da confluência dos rios, é possível notar que os leitos desses dois rios quase se coincidem, sendo que o talvegue do Solimões é cerca de 10 metros mais profundo do que o do Negro. Ao redor da Ilha Xiborena, no lado do Rio Negro, o canal é caracterizado com um gradiente de velocidade e carga de sedimentos menores quando comparado com o do Rio Solimões, e por um leito rochoso e vales em forma de V, alinhados com a tendência estrutural da Falha de Aleixo. Tais características indicam que o Rio Negro se comporta como um sistema progradacional incompleto, com limitada deposição de sedimentos em seu último trecho devido ao efeito de refluxo (IANNIRUBERTO et al., 2018).

Ianniruberto (et al., 2018) descreve também em detalhes, um recorte do mapeamento batimétrico da confluência comentada (Figura 2-4). Na imagem, está representado um mapeamento do leito do rio e verifica-se pontos mais rasos em azul escuro e mais profundos em verde e amarelo. Neste mapa é identificado terraços em diferentes níveis de profundidade cortados por lineamentos de possível origem neotectônica, que são embasamentos rochosos expostos pelo efeito erosivo do fluxo do canal. Na parte indicada como “Ponta das Lajes”, a 10 m de profundidade, é identificado um afloramento da Formação Alter do Chão que possui continuidade por toda a margem esquerda deste recorte do Rio Amazonas. Estes terraços são identificados em 18, 28 e 36 m abaixo da lâmina d’água, e podem ser explicados pelas camadas de arenitos litificados que foram moldados pelas ações hidrodinâmicas. Estas feições demarcam um importante controle estrutural que pode estar presente no embasamento do Rio Negro e possivelmente caracterizam a área estudada neste trabalho.

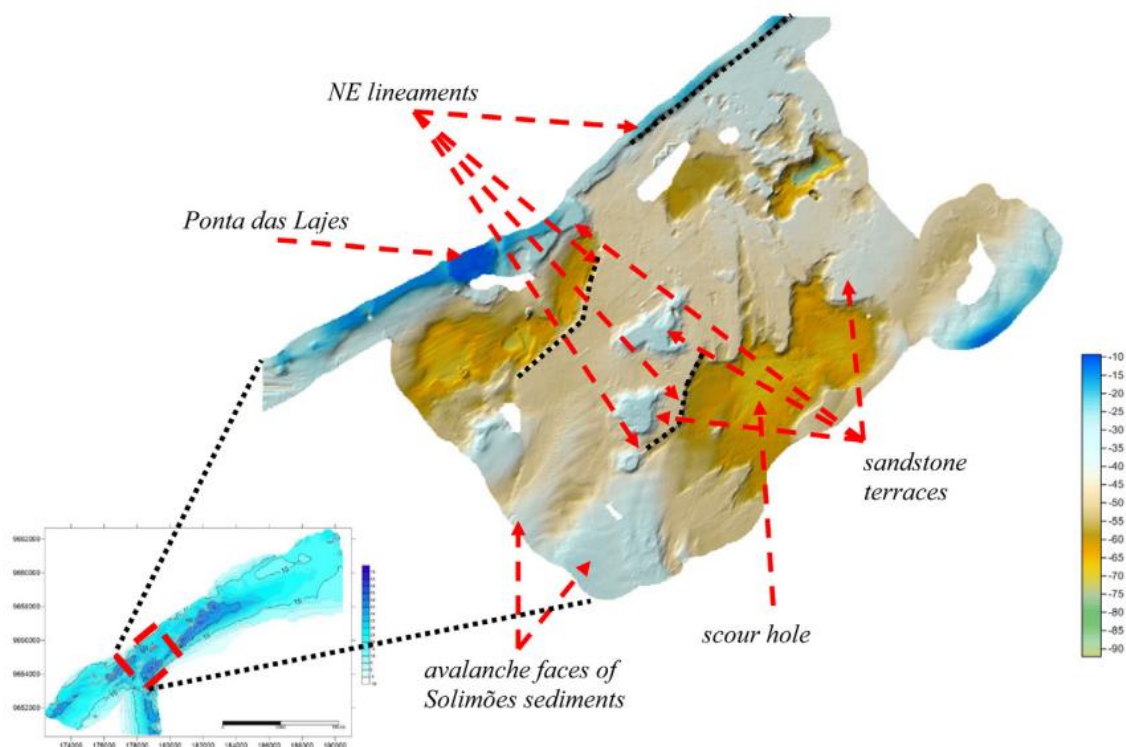


Figura 2-4: Recorte em detalhe do mapeamento batimétrico da confluência entre Rios Negro e Solimões. Os terraços são identificados pelos altos morfológicos destacados em azul.

2.2 Contexto geológico regional

A área de estudo está inserida no domínio do Cráton Amazônico, que é uma unidade geotectônica que teve comportamento estável no Neoproterozóico e é composto pelos escudos das Guianas e do Guaporé (ou do Brasil Central) nos extremos norte e sul, que são separados pelas bacias sedimentares do Solimões e do Amazonas (CORDANI, 2017).

Santos et al., (2000), divide o Cráton nas províncias geotectônicas Sunsas, K'Mudku, Rondônia-Juruena, Tapajós, Rio Negro, Amazônia Central, Tapajós-Parima, Transamazônica e Carajás-Imataca. Coutinho (2008) afirma que estas províncias englobam predominantemente complexos gnáissicos e coberturas plataformais pré-cambrianas, além da presença de unidades vulcânicas e sedimentares do Fanerozóico. A partir de estudos de sísmica profunda, Costa (2020) define um novo arranjo para os limites das diferentes províncias presentes no Cráton Amazônico (Figura 2-5).

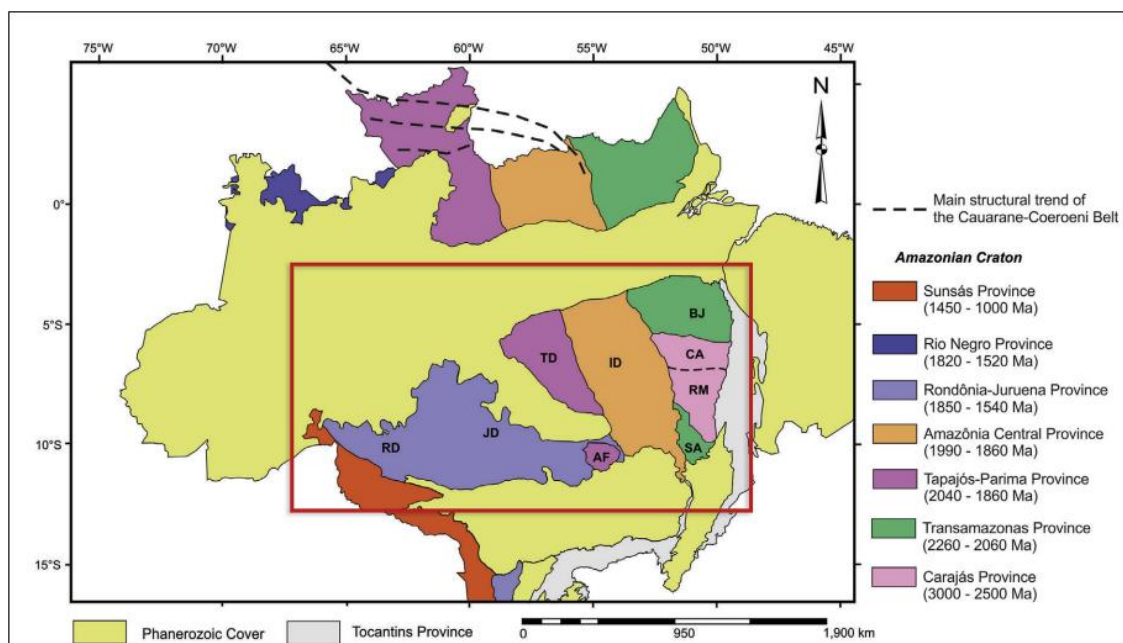


Figura 2-5: Mapa das províncias geotectônicas do Cráton Amazônico (COSTA, 2020).

A província Tapajós-Parima se caracteriza por um extenso cinturão com domínio de rochas orogênicas, expressivo magmatismo cálcioalcalino e um sistema plutono-vulcânico associado (rochas relacionadas ao Evento Uatumã: vulcânicas do tipo Iriri e granitóides Maloquinha), com rochas de idades que variam de 2,10 Ga a 1,87 Ga. A Província Amazônica Central é descrita pela presença de rochas vulcânicas ácidas a intermediárias (tipo Iriri-Surumu) e granitóides (tipos Maloquinha e Mapuera); sedimentos fluviais clásticos (tipo Roraima) e sill e diques básicos (intrusões tipo Crepori-Avanavero). Essa província consiste predominantemente em terreno plutônico do Proterozóico, originado da fusão parcial da crosta continental de idade do Arqueano (COUTINHO, 2008; SANTOS et al., 2000).

Em relação aos sedimentos da Bacia do Amazonas, a alta taxa de deposição é proveniente da convergência do fluxo dos rios por arcos tectônicos. Seu aporte sedimentar é dado por meio das nascentes do Rio Amazonas, localizado no alto das montanhas andinas formadas por rochas sedimentares e vulcânicas. A margem oriental dos Andes compreende a região de *fold-and-thrust belt* (cinturão de dobras e falhas) sub-andino, o que indica áreas de fortes declividades e rochas frágeis, contribuindo para uma erosão intensa e rápida (DUNNE et al., 1990; GUYOT, 1993; FILIZOLA et al., 2001). Variando entre rochas sedimentares do Paleozóico até o Terciário, os pacotes excedem 4.000 metros de espessura, e foram preservados devido a baixas declividades e baixas taxas de erosão da planície alagada (GOULDING, 1997).

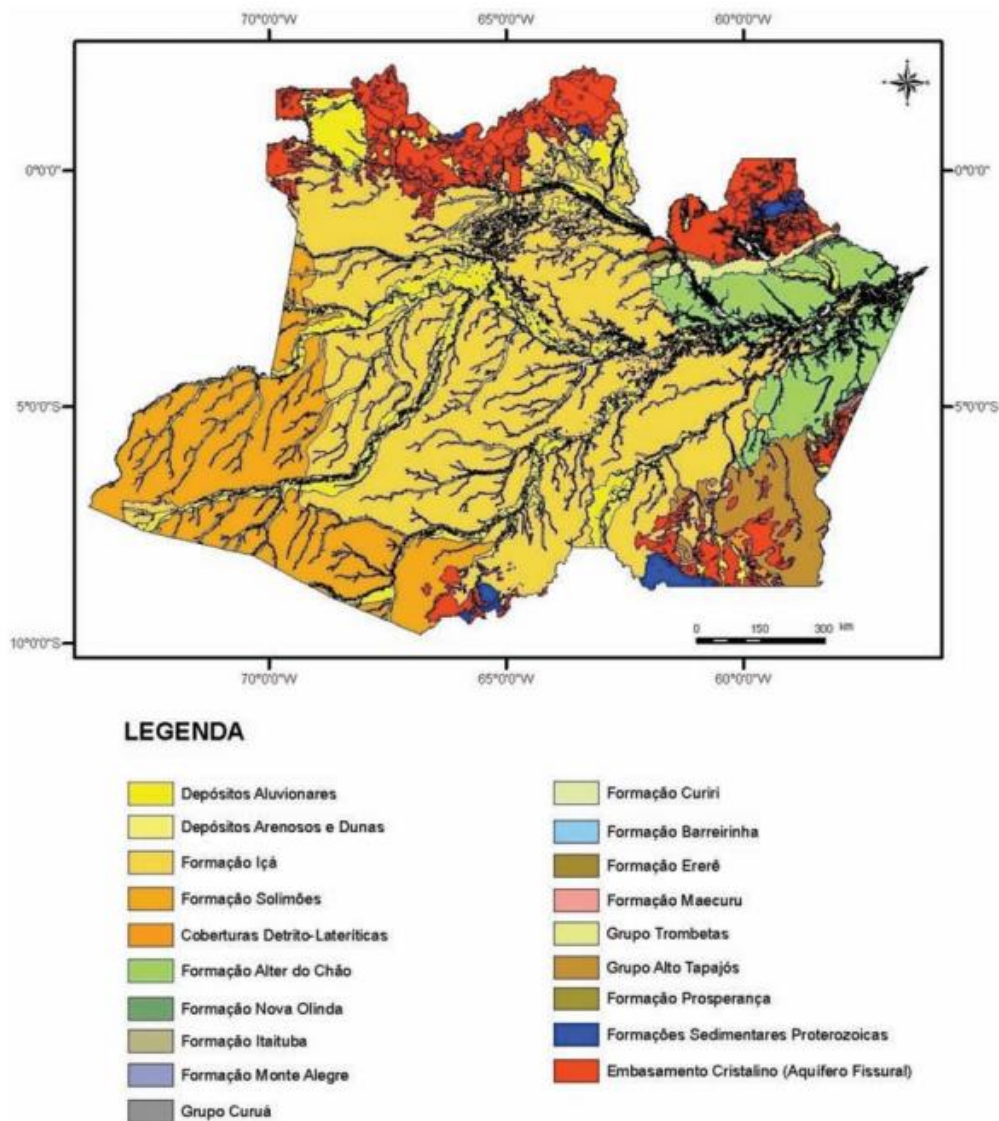


Figura 2-6: Mapa geológico simplificado do estado do Amazonas. (SGB, 2005).

A área de estudo está no domínio da Formação Alter do Chão, demarcado em verde na Figura 2-6. Os arenitos da Formação Alter do Chão, próximos à cidade de Óbidos - PA, apresentam características que indicam um ambiente deposicional fluvial meandrante com variações no padrão de fluxo ao longo do tempo. Sua classificação deposicional provem da carga mista dos sedimentos, envolvendo tanto transporte de material em suspensão quanto rolamento de partículas maiores. As análises de paleocorrentes revelam predominantemente fluxos unimodais, com direções preferenciais para o sul e sudoeste (S/SW), tal ambiente pode ser comparado a outros sistemas meandrantes, onde há variação de energia fluvial ao longo do tempo, resultando em uma estratigrafia complexa (MENDES, et al., 2012).

2.2.1 Formação Alter do Chão

A partir do Mesozoico e Cenozoico, a história da evolução tectônica da Bacia do Amazonas decorre no contexto do magmatismo Penatecaua, que, inicialmente, provocou uma erosão generalizada dos pacotes sedimentares paleozoicos, assim como, em épocas contemporâneas, sofreu o Diastrofismo Juruá. A subsidência e sedimentação retornaram apenas no Cretáceo com a deposição da Formação Jazida da Fazendinha. No início do Cenozoico, um sistema fluvial de alta energia foi estabelecido, alcançando as bacias subandinas. Na Bacia do Amazonas, esse processo resultou em um novo ciclo sedimentar na deposição de arenitos grosseiros e variegados da Formação Alter do Chão (COSTA 2002; CAPUTO 2011; CUNHA et al., 2007). O trabalho de Caputo (2011) indica estimativas de seu início no Paleoceno e término no Mioceno, embora outros autores como Cunha et al., (2007) determinam um início antecipado no Cretáceo.

A Formação Alter do Chão é definida por Caputo (2011) como composta por rochas sedimentares siliciclásticas de idade Cenozóica, depositadas em ambientes de leques aluviais, planícies aluviais e em deltas fluviais relacionados à ambientes lacustres, em clima tropical. Sua composição é definida por siliciclásticos avermelhados em intercalações de arenitos, argilitos, siltitos e, subordinadamente conglomerados. As camadas de granulação grosseira mostram composição ortoquartzítica a arcósica, com feldspatos frequentemente alterados para caulinita. Ocorrem frequentemente arenitos brancos.

A média de espessuras da Formação Alter do Chão é definida no intervalo entre 200 e 400 m, alcançando máximas de 1.250 m. Seus corpos arenosos se estendem lateralmente por dezenas a centenas de metros, com algumas variações, incluindo trechos descontínuos com espessura de até 10 m e extensões traçadas por até 1.000 m (MENDES et al., 2012; CAPUTO, 2011).

Em perfis sísmicos obtidos pela Petrobras ao sul de Manaus encontra-se duas significativas discordâncias erosivas que demarcam os limites da Formação. Esses perfis mostram variações nas velocidades intervalares, diferenciando as camadas do Cenozoico, Cretáceo e Paleozoico. O contato entre as formações paleozoicas e os sedimentos da Formação Alter do Chão ocorre de maneira brusca, enquanto os seus sedimentos vermelhos, de natureza grosseira, inconsolidados e mal selecionados, predominam

Além do modelo apresentado por Silva (2005), outra proposta da evolução tectônica no Cenozoico foi apresentada por Soares (2007) e Sarges (2008), onde foram pontuados esforços distensivos NW-SE, possivelmente radiais, que deformaram as Formações Alter do Chão e Novo Remanso, assim como reativaram falhas normais NE-SW. Tal hipótese foi fundamentada por uma análise de pulsos tectônicos em depósitos sedimentares do quaternário, em que representa esforços distensivos N-S, sucedidos por outros NE-SW e uma distensão E-W. Estes eventos foram relacionados à interação dos deslocamentos da Placa Sul-Americana para Oeste e da Placa do Caribe para leste (SOARES, 2007; SARGES, 2008).

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A geofísica é a ciência que investiga a Terra por meio de métodos indiretos com foco em quantificar e analisar as propriedades físicas do ambiente, e gerar modelos representativos que se assemelham a realidade. Há vários métodos geofísicos, cada um vinculado à medição de uma característica física do planeta, como a velocidade e atenuação das ondas P e S, eletrorresistividade, potencial induzido, radioatividade gama natural, além dos campos gravitacional e magnético. Cada uma dessas medições oferece dados importantes sobre as características geológicas de uma região específica (AYRES, 2000).

Na geofísica aquática, a Sísmica de Reflexão é um importante método que utiliza a propagação de ondas elásticas geradas por uma fonte para investigar o interior da Terra. Essas ondas se deslocam a diferentes velocidades conforme atravessam distintos tipos de rochas (SANTOS, 2014). Quando encontram camadas com impedâncias variadas, elas são refletidas, e os sinais retornados são captados por sensores. Esse método permite a obtenção de imagens atingindo grandes profundidades com alta resolução, o que possibilita análises detalhadas das espessuras das camadas, mergulho, presença de falhas e outros esforços tectônicos (AYRES, 2000, ARAÚJO, 2014).

3.1 Sísmica de reflexão

De acordo com Reynolds (1990) a sísmica de reflexão é o método geofísico mais disseminado na comunidade científica desde a década de 1930, com variadas aplicações em fontes rasas e profundas, onde destaca-se predominante na área de hidrocarbonetos e estudo da estrutura crustal. Telford (1990) indica que sua popularidade se deu por conta dos seus níveis excelentes de acurácia, resolução e penetração, sendo muito utilizado nas áreas de engenharia civil e estudos ambientais. Entretanto esse método ganhou notoriedade por conta de sua importância na exploração de hidrocarbonetos.

Diversos tipos de fontes sísmicas são empregados na investigação de ambientes submersos, cada uma emitindo sinais em diferentes espectros de frequência e com assinaturas específicas de acordo com a aplicação e finalidade desejada. Em geral, quanto maior a frequência de uma fonte sísmica, maior será sua atenuação e, conseqüentemente, menor sua capacidade de penetração (AYRES, 2000)

O princípio básico da medição registrada baseia-se no tempo total de deslocamento da onda sísmica, desde a fonte com emissão de energia conhecida, até a sua reflexão no subsolo, que retorna a um sensor receptor responsável por captar sinais de amplitudes respectivos às intensidades das interfaces refletidas. Este tempo de deslocamento representa o período de ida e volta da onda, sendo denominado *two-way travel time*, já a amplitude do sinal refletido pode ser caracterizada, de maneira simplificada, pela intensidade das impedâncias produzidas por ângulos de incidência normal à superfície refletora (SOUZA, 2006; ARAUJO, 2014).

As ondas de corpo analisadas na sísmica de reflexão são definidas pela onda tipo P, com característica de esforço compressional, e tipo S, cisalhante. A propagação da onda mecânicas em subsuperfície depende de constantes elásticas como o módulo de Young (E) (característico da composição do meio), módulo de compressão (k) e o módulo de rigidez (μ), e por fim, a densidade (ρ) das rochas. Essa relação da propagação de ondas P e S e os módulos é descrita pela Equação (1). Já os fenômenos acústicos de reflexão, refração e difusão são definidos pela propriedade de impedância acústica e dependem de seu contraste em cada interface (TELFORD, 1990; REYNOLDS, 1990).

Em ambientes aquáticos, devido ao módulo de rigidez da água ser igual a 0, as ondas S não vão se propagar. Definem-se então para levantamentos sísmicos aquáticos apenas os parâmetros da onda P, que se propagam na água a uma velocidade de cerca de 1500 m/s (NETO, 2000). Em águas rasas, a velocidade do som tende a não variar, sendo predominantemente constante, pois não há mudança significativa na salinidade, temperatura e pressão. Já a propagação em meio aos sedimentos de subfundo é influenciada predominantemente pela mineralogia, porosidade, teor de saturação e temperatura (ARAÚJO, 2014).

$$V_p = \sqrt{\frac{k + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} e V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (\text{Equação 1})$$

3.1.1 Fenômenos de reflexão e refração

Uma onda em propagação sofre o efeito de fenômenos físicos ao encontrar uma mudança abrupta nas propriedades elásticas, em outras palavras, é o que ocorre ao passar de uma camada para outra. A onda age de forma que, parte da energia é refletida na interface e retorna pelo mesmo meio, enquanto o restante da energia é refratado e propagado no próximo meio com mudanças na direção e velocidade de propagação. A

energia refletida é proporcional à amplitude do sinal emitido pela fonte em conjunto com a magnitude do contraste entre as distintas impedâncias acústicas na interface de dois meios. A direção da onda refletida é regida pela lei da reflexão, onde seu ângulo de incidência é igual ao refletido (Figura 3-8) (TELFORD, 1990; REYNOLDS, 1990).

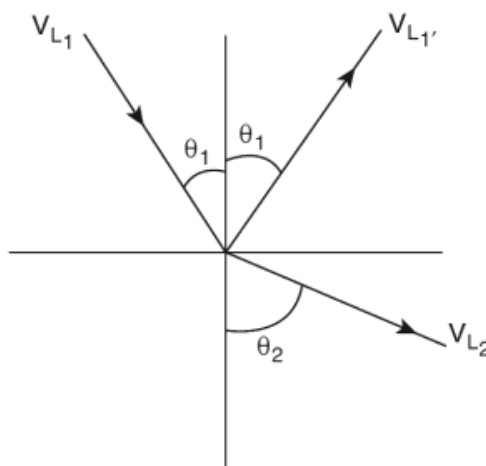


Figura 3-8: Propagação da energia na reflexão (V_{L1}) e refração (V_{L2}).

A lei de Snell (Equação 2) determina a propriedade, constante e representativa de cada raio acústico (e igual para refratado e refletido), chamada de “*horizontal slowness*”. Com característica recíproca à velocidade, essa propriedade está relacionada à forma como a mudança de direção das ondas acontece ao atravessar a interface entre dois meios com diferentes índices de refração. O efeito da refração ocorre quando V_2 for maior que V_1 até que atinja $\theta_2 = 90^\circ$ em que a onda propaga ao longo da interface, desta forma, o ângulo de incidência para que ocorra $\theta_2 = 90^\circ$ é denominado de ângulo crítico (TELFORD, 1990).

$$\frac{\sin\theta_1}{V_1} = \frac{\sin\theta_2}{V_2} \quad (\text{Equação 2})$$

3.1.2 Impedância acústica

Impedância acústica (i) é um conceito matematicamente representado pelo produto da velocidade de propagação do som num meio (v_1) pela densidade (d_1), descrita pela fórmula $i_1 = v_1 \cdot \rho_1$. O fenômeno da reflexão existirá apenas na ocorrência de contrastes expressivos entre a impedância acústica de dois meios, portanto, define-se que corpos homogêneos não apresentam refletores em sua continuidade. Um refletor sísmico

é definido por uma superfície contínua que delimita o contato entre dois meios acusticamente distintos.

Uma forma de dimensionar a intensidade do contraste de impedâncias é por meio do coeficiente de reflexão (R) que é dado pela razão entre a diferença e soma de impedâncias de dois meios diferentes. Uma simplificação desta relação é definida para ângulos de incidência normal à superfície do refletor na Equação 3 (REYNOLDS, 1990; SOUZA, 2006).

$$R = \frac{v_1 \cdot \rho_1 - v_2 \cdot \rho_2}{v_1 \cdot \rho_1 + v_2 \cdot \rho_2} \quad (\text{Equação 3})$$

4 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho visa garantir o processamento e interpretação de dados geofísicos de forma a caracterizar um recorte do Rio Amazonas de maneira precisa no ponto de vista estratigráfico. A sequência metodológica descrita a seguir detalha os procedimentos empregados, com foco na sísmica multicanal, que será apresentada desde o processo de aquisição e os equipamentos e tecnologias envolvidas, como a fonte sísmica, o *streamer* e o posicionamento GNSS, até os processos envolvidos no tratamento e manipulações dos dados ao utilizar o programa *Seismic Unix*, com as etapas de pré-processamento, pré-empilhamento e pós-empilhamento.

4.1 Sísmica multicanal

Com os fenômenos físicos definidos, é possível determinar os conceitos da metodologia empregada ao estudo. Na geofísica aquática, entendem-se os métodos sísmicos de reflexão como aqueles que dependem de uma fonte de sinais acústicos para obter os resultados da medição. Dentre eles, destacam-se a ecobatimetria, sonar de varredura lateral e perfilagem sísmica contínua, em que se diferem apenas pela frequência e amplitude dos sinais acústicos gerados pela fonte de energia. Os produtos finais de uma investigação geofísica são determinados pela distribuição de uma ou várias propriedades físicas. Neste caso, os parâmetros mapeados são definidos pela amplitude, frequência e polaridade do sinal das ondas acústicas, que variam de acordo com a impedância e homogeneidade dos meios (SOUZA, 2006).

A sísmica de reflexão multicanal é uma metodologia de perfilagem sísmica contínua, que estuda áreas submersas rasas, com níveis de detalhamento e alcance muito superiores aos demais métodos, devido à possibilidade de se somar sinais refletidos no mesmo ponto do assoalho do corpo hídrico para aumentar a razão sinal/ruído. Souza (2006) a descreve como sendo uma investigação sísmica de reflexão de alta resolução, que evidencia contatos de diferentes unidades geológicas, com baixos contrastes de impedância acústica e alta relação sinal/ruído. O autor também pontua características vantajosas desse método, quando comparado a outros métodos geofísicos:

- Grande precisão, resolução e penetração dos sinais sísmicos;

- Os perfis obtidos em campo, podem ser interpretados como uma seção geológica sobrelevada, possibilitando que decisões estratégicas possam ser tomadas durante a própria aquisição de dados;
- Os levantamentos podem ser conduzidos em embarcações de médio e grande porte, o que possibilita rápida e ampla cobertura da área investigada;
- Fontes acústicas não explosivas podem ser utilizadas (*boomers, sparkers e air-guns*) sem restrições ambientais, quando operadas em baixa potência, salvo exceções;
- A geração de ondas acústicas na superfície é relativamente fácil, bem como a propagação das ondas acústicas no meio, já que sofrem pouca absorção na coluna d'água.

Um princípio físico importante na reflexão de ondas, presente na sísmica multicanal, é regido pela lei de Snell em que se define o ângulo de reflexão igual ao de incidência. Desta forma, o ponto de reflexão das ondas acústicas ocorre na metade da distância entre a fonte e o receptor (Figura 4-9). Quando a aquisição é realizada com uma fonte móvel e arranjo linear, o conceito de Common Depth Points (CDP) é introduzido. A cada nova posição da fonte, diferentes pontos de reflexão se sobrepõem, gerando maior confiabilidade no resultado obtido pelo aumento da razão sinal/ruído. A sobreposição de reflexões em cada ponto de reflexão é conhecida como multiplicidade, e quanto mais reflexões ocorrerem em cada ponto melhor é o nível de confiabilidade do dado em cada ponto, uma vez que os sinais são somados permitindo o aumento da amplitude do sinal coerente em detrimento do ruído, que é aleatório. O conceito de CDP é trivial a partir de interfaces de reflexão horizontais. Quando há variações nas profundidades e inclinação dos refletores, diferentes pontos de reflexão ocorrem em uma região próxima, e então é utilizado a posição média dos pontos, que é definida como Common Mid Points (CMP) (YILMAZ, 2001; STEEPLES e MILLER; 1998; REYNOLDS, 2011).

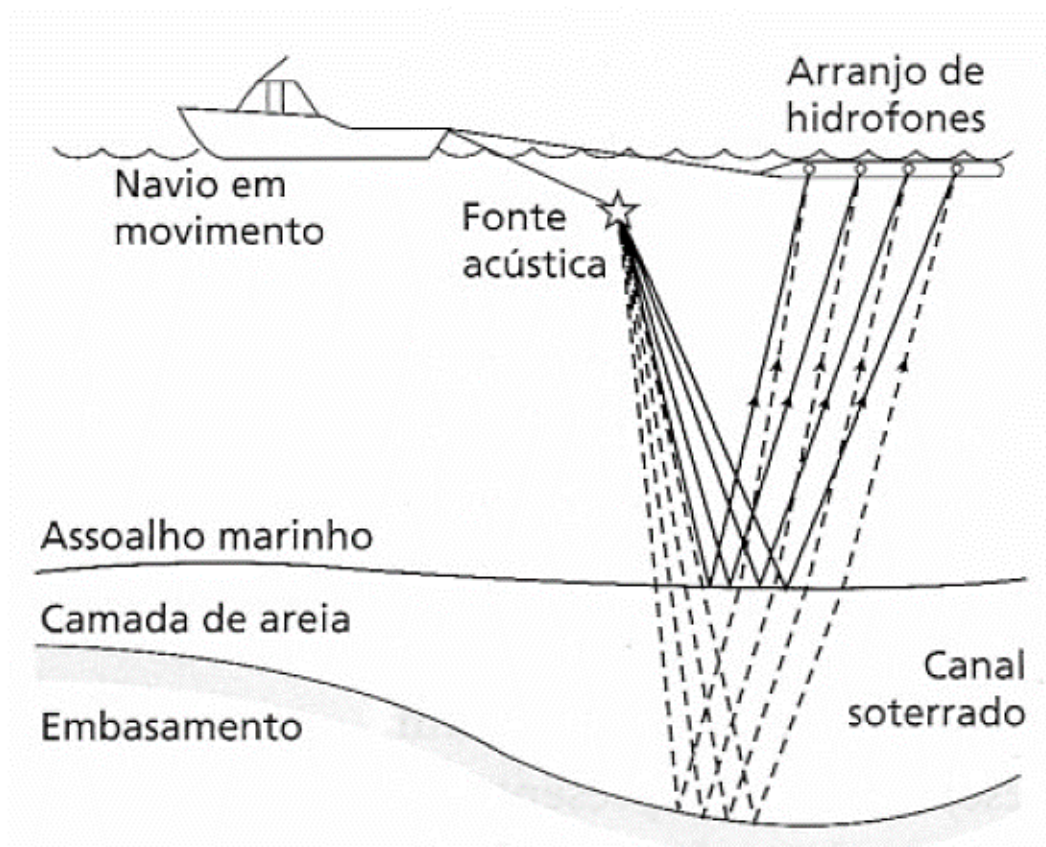


Figura 4-9: Disposição dos traços sísmicos refletidos com uma fonte estática. (KEAREY, 2009).

4.1.1 Aquisição

O trabalho de campo, realizado para adquirir os dados do estudo, consistiu no levantamento sísmico de reflexão multicanal ao longo do Rio Amazonas. A campanha contou com 600 km de aquisição percorridos entre Santarém e Manaus, e foi planejada e executada pela IFREMER em julho de 2023, tendo o dado deste projeto adquirido no dia 7 de julho de 2023 (DUPONT, 2023).

A configuração dos equipamentos (Figura 4-10) foi definida pela posição da fonte de energia (*Sparker*) a bombordo e do *streamer* a estibordo. Ambos foram posicionados na água e rebocados por uma corda, de forma a aumentar a distância entre os sensores e os diminuir os ruídos causados pela embarcação. O sistema de equipamentos do levantamento, também incluiu na popa, uma bomba de água salgada para o *Sparker*, e na sala de operações, uma central de energia e comunicação, que realiza as conexões com os computadores e o sistema de posicionamento GNSS.

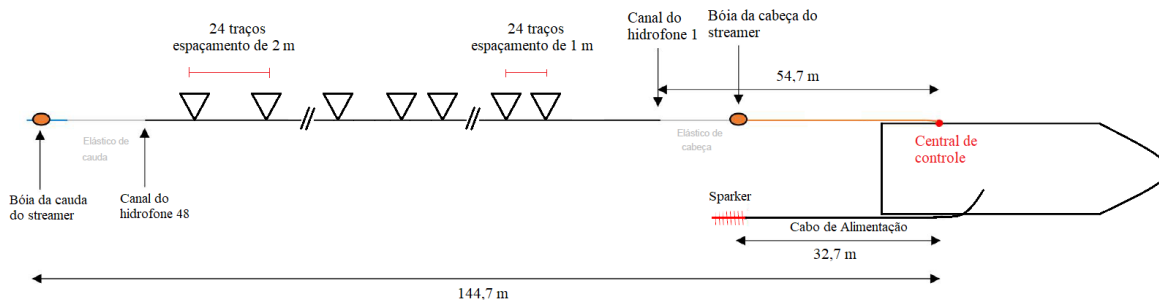


Figura 4-10: Croqui da disposição dos elementos utilizados no levantamento. Demonstra-se os espaçamentos e posições dos equipamentos relativos ao barco. Os hidrofones estão representados como triângulos, a fonte de energia como linhas vermelhas. Modificado de Dupont (2023).

Por fim, a definição das configurações de gravação é um passo importante na metodologia e tem influência direta na disposição da amostragem e resultados dos dados adquiridos. Para este trabalho foi definida uma taxa de amostragem em 10 kHz e um período de gravação dos dados com duração de 500 ms. Como resultado da gravação, é obtido um arquivo 32 bits em formato SEG Y (The Society of Exploration Geophysicists Y Format), que são limitados ao tamanho de 1 GB pelo software de aquisição, com a finalidade de diminuir o risco de corrupção. Os dados de posicionamento são salvos em um arquivo ASCII “.log” contendo os números de disparo (FFID) para referência cruzada com os arquivos sísmicos (DUPONT, 2023).

4.1.1.1 Fonte sísmica

Nos métodos acústicos, as fontes de transmissão de energia, e suas diferentes configurações, tem influência direta nos níveis de penetração e resolução dos dados obtidos. A escolha da fonte é a etapa crucial de um trabalho geofísico para garantir bons resultados, em que, é necessário ter um equilíbrio entre as propriedades físicas da propagação de ondas aliado aos objetivos do levantamento.

De acordo com Souza (2006), para o levantamento alcançar maiores profundidades, é preciso definir fontes com baixas frequências, e por outro lado, para uma maior resolução é necessário a emissão de largas bandas de frequências, que variam desde dezenas de Hz até poucos kHz. A emissão das fontes acústicas se manifesta no movimento de massa d’água em forma de variação de pressão e suas interações obedecem às leis da física de reflexão, absorção, refração e espalhamento.

Fontes de energia acústica podem ser diferenciadas de acordo com o tipo de emissão que geram, sendo comumente classificadas em duas categorias principais: ressonantes e impulsivas. Fontes ressonantes tendem a emitir ondas de alta frequência, mas limitadas a baixas energias, enquanto fontes impulsivas são caracterizadas por uma liberação súbita e intensa de energia. Essa liberação rápida resulta em uma alta aceleração de massa, que pode ocorrer de forma implosiva ou explosiva, gerando ondas de pressão com penetrabilidade considerável. A fonte acústica empregada no presente estudo se enquadra na categoria impulsiva e explosiva, sendo distintiva por sua capacidade de liberar uma quantidade significativa de energia em um período extremamente reduzido. Essas características tornam tais fontes particularmente eficazes em penetração de múltiplas camadas e em estudos geofísicos, onde a resolução temporal e o amplo espectro de frequências são fatores críticos para a obtenção de resultados precisos (McGEE 1995; MOSHER & SIMPKIN 1999).

Neste trabalho foi utilizado o *Sparker - GeoSource 400 Freshwater* (Figura 4-11b), fabricado pela *Geo Marine Survey Systems* que é uma fonte impulsiva adaptada para operar em águas doces, e sua funcionalidade é dada, a partir de uma descarga elétrica por capacitores que alimentam pares de eletrodos imersos em um meio condutor (água salgada). Os eletrodos excitados criam bolhas de vapor, que a partir de uma rápida expansão, geram um impulso positivo, seguido pelo pulso negativo produzido pela implosão das bolhas, que se propaga na coluna d'água (SOUZA, 2006).

O Sistema de registro sísmico idealizado pela fonte da fabricante *Geo Marine Survey Systems* conta com:

- Uma fonte de energia *Geo-Spark 2000 XF Geo Marine Survey Systems* (100 - 2000 J) (Figura 4-11b);
- Um gatilho para comunicação com a caixa fonte do *Sparker* pelo servidor *Mini-Trace* (Figura 4-11c);
- Uma unidade de digitalização *Mini-Trace II* (2 x 24 traços, 24 bits) fixada no tambor da bobina (Figura 4-11d);
- Um cabo de alimentação *Sparker Geo Marine Survey Systems* (25 m de comprimento no total (Figura 4-11d).

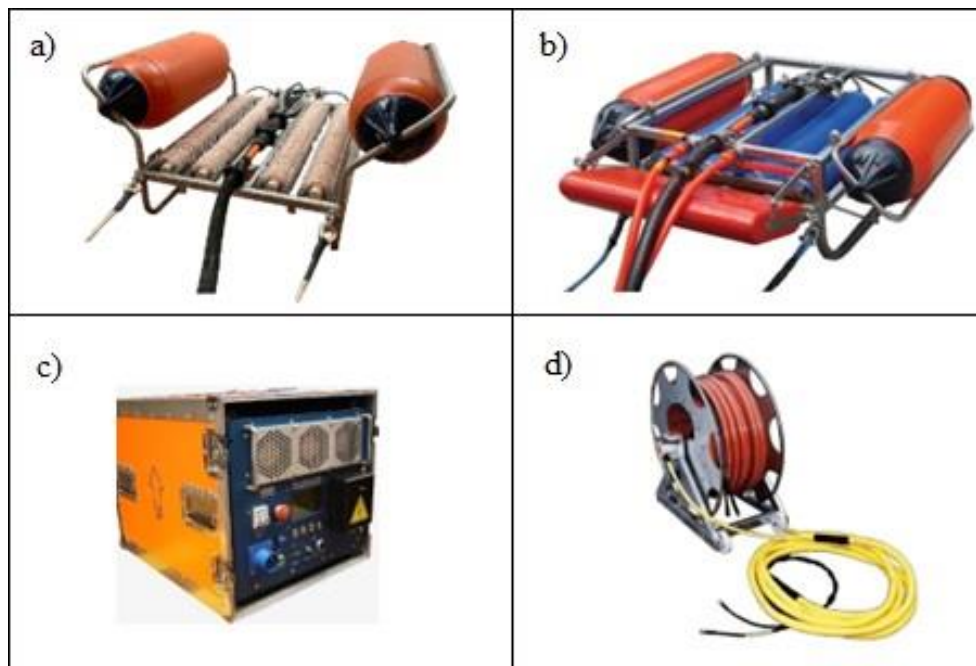


Figura 4-11: (a) Sparker de água salgada como exemplo da disposição dos eletrodos; (b) Sparker de água doce utilizado durante a campanha; (c) Fonte de energia utilizada durante a campanha; (d) Cabo de alta tensão utilizado durante a campanha. Adaptado de Dupont (2023).

Este equipamento se caracteriza por um baixo custo, relativamente alta potência (de 100 a 2000 J) e emissão de amplos espectros de frequências entre 200 e 2500 Hz, portanto, alcança altas profundidades com uma resolução razoável, como demonstrado graficamente na Figura 4-12) para diferentes meios de transmissão. Existem também algumas limitações técnicas como uma baixa capacidade de repetitividade, devido ao tempo de recarga dos capacitores, e diretividade, assim como, impactos ambientais à fauna aquática (MOSHER & SIMPKIN, 1999; SOUZA, 2006).

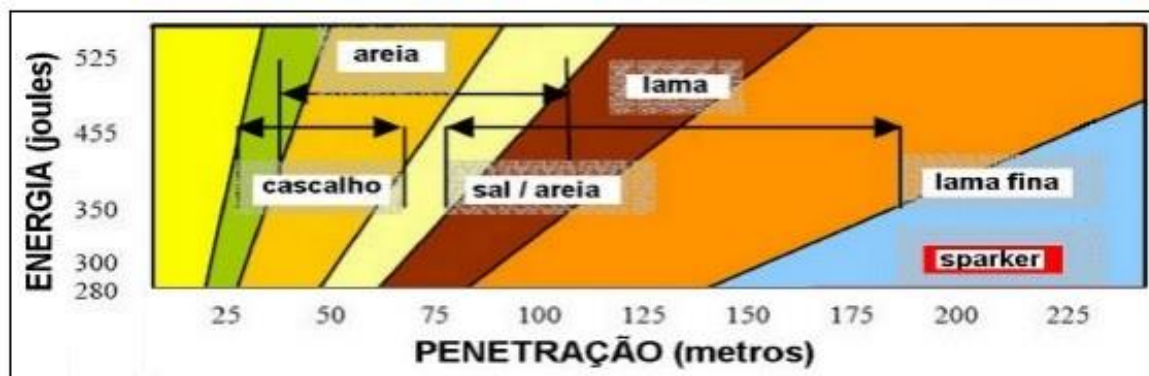


Figura 4-12: Gráfico de energia necessária para penetração em diferentes substratos. Adaptado de Souza (2006).

4.1.1.2 Streamer Sísmico

Um *streamer* (Figura 4-13) compreende um cabo de multi-conexões, adaptado com sensores acústicos que são sensíveis ao retorno dos sinais sísmicos emitidos e os transferem para a central de controle. Os sensores, denominados de hidrofones, são compostos por conjuntos de partículas piezelétricas, sensíveis a variação de pressão na massa d'água ao seu redor, e converte essas oscilações em voltagens proporcionais às amplitudes captadas (URICK, 1983; SOUZA, 2006)

A expedição AMANAUS contou com o *streamer Geo-Sense*, fabricado pela *Geo Marine Survey Systems*, de 24 traços com espaçamentos iniciais de 1 m, seguido de 24 traços finais com espaçamento de 2 m. Seu comprimento total é definido em torno de 130 m, somado a duas seções elásticas de 12,5 m, posicionadas logo após as boias na cabeça e cauda do *streamer*. O cabo é armazenado em tambor manual de 250 kg (DUPONT, 2023).



Figura 4-13: *Streamer* sísmico utilizado durante a campanha (DUPONT, 2023).

O *streamer* é analógico e a digitalização (24 bits) é realizada em uma caixa fixada no tambor da bobina (Figura 4-13), diretamente na saída da cabeça do *streamer* (cabo lead-in); os dados são então transmitidos para o PC de aquisição via cabo Ethernet.

A profundidade do *streamer* deve ser constante durante a aquisição dos dados. Por meio de duas boias uma no início e outra ao final do cabo, a configuração é disposta próxima ao modelo ideal, onde a linha é mantida reta e todos os hidrofones mantêm uma profundidade constante.

4.1.1.3 Posicionamento GNSS

A garantia das informações de posicionamento e precisão das coordenadas, a bordo durante a mobilização, se deu pelo uso da antena de GPS (Global Positioning System) *Novatel Vector dual-antenna GNSS differential positioning*. Com taxa de atualização de um segundo; para aquisição de navegação no computador de aquisição sísmica.

4.2 Processamento

Como produto da aquisição geofísica, os arquivos SEG-Y adquiridos estão em sua forma bruta com presença de ruídos indesejados, separados por inúmeros registros de diferentes tiros, traços sísmicos deslocados, assim como outras inconsistências que serão tratadas neste capítulo. Para solucionar estes problemas a fim de obter resultados com uma interpretação clara dos dados, rotinas de processamento em diferentes programas podem ser aplicadas. Cabe então à percepção do operador, avaliar uma metodologia eficiente, em que o resultado obtido deve-se ser julgado pela sua confiabilidade, velocidade de processamento e clareza nas informações repassadas (HAGEDOORN, 1954).

Yilmaz (2001) discute amplamente a importância e aplicações das diferentes metodologias de tratamento, processamento e interpretação dos dados sísmicos. Além dos principais processos – deconvolução, empilhamento e migração – outras importantes operações matemáticas compõem as rotinas, que podem ser separadas em etapas de pré-processamento, pré-empilhamento e pós-empilhamento (Figura 4-14).

A sísmica multicanal se aproveita da vantagem do método de combinações de CMP, no qual é possível realizar análises e manipulações pontuais ao longo do perfil sísmico. Ao somar e empilhar estes conjuntos é obtido um perfil único com os sinais de reflexões realçados, já que as informações concordantes, de cada traço dentre os CDPs, se somam enquanto as informações aleatórias (ruídos) não possuem repetitividade e são suprimidas. A partir deste processo, os tratamentos subsequentes estão na etapa do pós-empilhamento e compreendem as etapas de refinamento para se obter perfil representativo da linha adquirida (STEEPLES e MILLER, 1988).

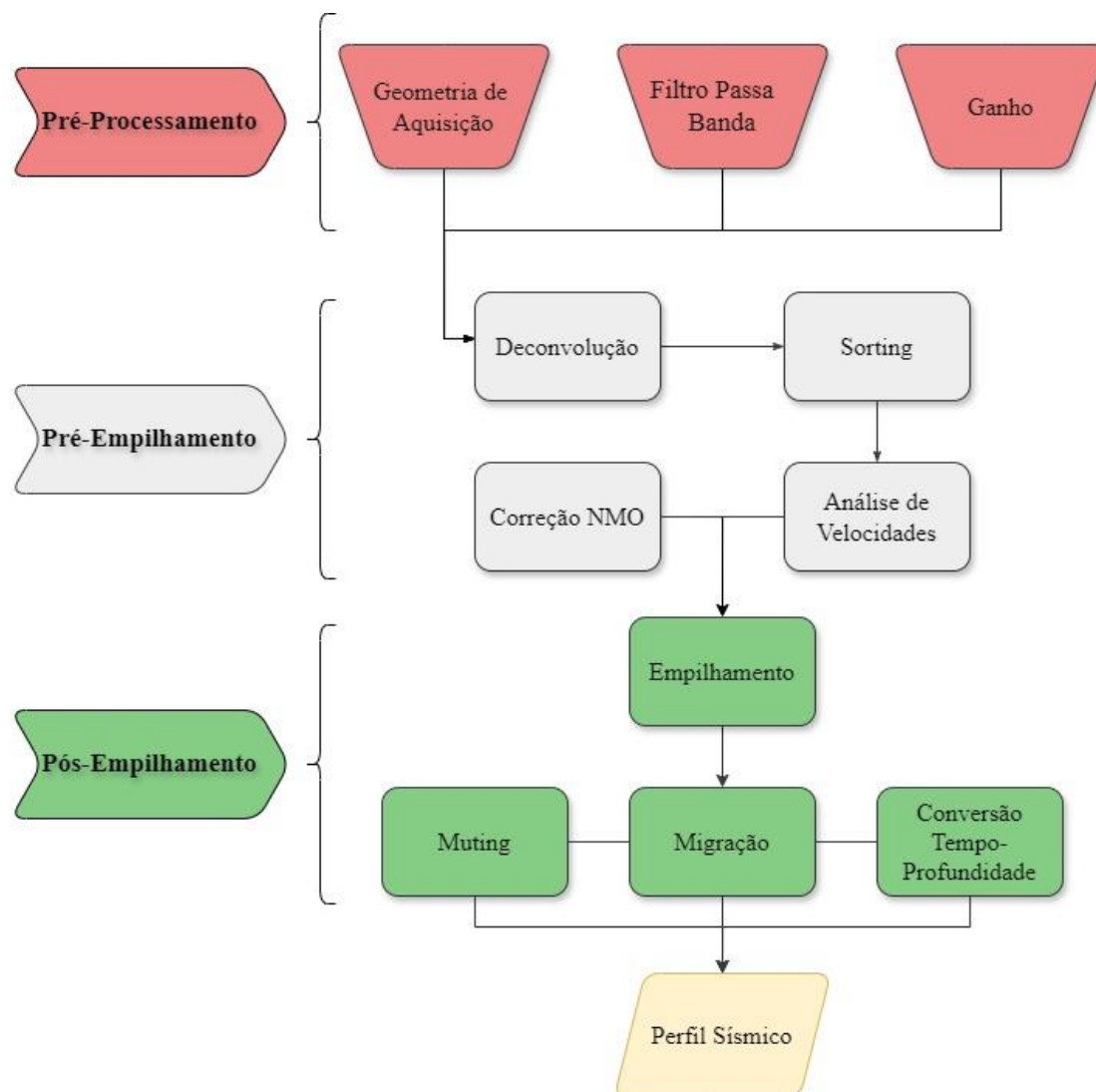


Figura 4-14: Fluxograma das etapas de processamento do dado sísmico de reflexão.

De forma a estabelecer o processamento ideal dos dados, foi pensado em priorizar as ferramentas e programas de acesso livre que contemplassem os objetivos do projeto. Com intenção de explorar e testar abordagens das etapas de processamento, o trabalho se deu por rotinas de códigos no programa *Seismic Unix* (SU), desenvolvido por John Stockwell - pesquisador associado da *Colorado School of Mines*. Esse programa foi construído no sistema operacional Linux e é tratado a partir de seu terminal, possibilitando a aplicação de manipulações matemáticas, alteração das informações, criação de imagens, gráficos, perfis e espectros voltados aos dados do método sísmico de reflexão. Para início do tratamento, os arquivos precisam ser transformados do formato convencional de dados sísmicos .SEG Y para o .SU, suportado na versão do programa utilizado.

4.2.1 Análise de frequência

De modo a definir a assinatura do sinal de onda, que é relevante ao dado, é necessário verificar as suas frequências dominantes. Para tal, utiliza-se a Transformada Rápida de Fourier, de maneira a converter a informação do domínio do tempo para o domínio da frequência, exibida pelo espectro de frequência do sinal. No SU executa-se o comando denominado *suspecfx*, em conjunto com o comando de visualização de imagem *suximage*, Figura 4-15.

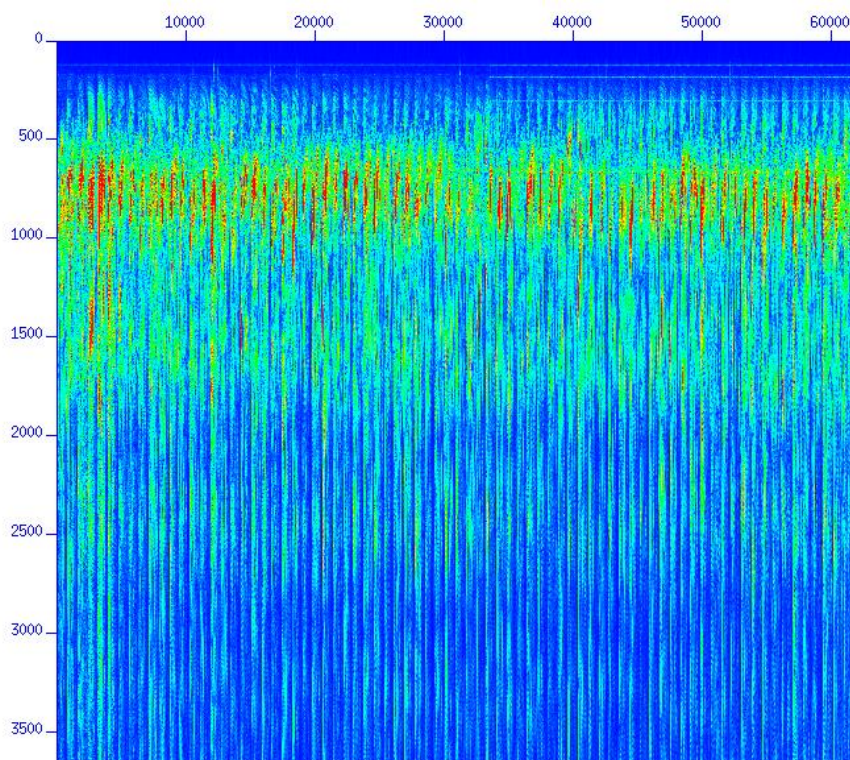


Figura 4-15: Espectro de frequências com eixos em nº de traço e Hz. As cores mais quentes indicam uma alta amplitude no domínio das frequências.

O filtro passa banda é comumente usado para que sinais com frequências indesejadas sejam eliminadas do sismograma. Este processo geralmente é realizado ao iniciar o processamento, visto que, elimina grande parte dos ruídos de baixa e alta frequência responsáveis pela atenuação do sinal e estão diretamente relacionados a qualidade da resolução vertical do dado sísmico (YILMAZ, 2001). O código aplicado foi construído a partir do comando *sufilter* (indicado abaixo) e atua de maneira a preservar o pacote de frequências de interesse provenientes do *Sparker* multicanal, que está entre 200Hz e 1050Hz (MARSSET et al.,2014).


```
suspecfx < input.su | suximage \
| sufilter f=250,450,1300,2000 > output.su
```

Ao realizar manipulações no domínio da frequência, o sinal está diretamente dependente aos coeficientes das séries de Fourier, no qual, se origina o fenômeno de Gibbs que cria oscilações no sinal onde há uma mudança brusca nos limites laterais da onda. De forma a evitar tal efeito, é recomendado aplicar o filtro com uma geometria trapezoidal, em que há uma faixa ou “franja” de atenuação gradual do sinal até o completo silenciamento (YILMAZ, 2001). A partir da visualização do espectro de frequência ficou perceptível as frequências dominantes entre 400 Hz e 1300 Hz, sendo coerente a atenuação nas baixas frequências entre 200 Hz e 400 Hz e nas altas entre 1300 Hz e 2000 Hz.

4.2.2 Espalhamento Geométrico

Com o dado filtrado nas frequências de interesse, outra etapa necessária é evidenciar as amplitudes suprimidas pela divergência esférica, definida pelo decaimento de amplitude a partir da distância percorrida pela onda em um espalhamento geométrico esférico. Em meios homogêneos, descreve-se o fator de atenuação das amplitudes em função do raio da esfera. Porém, se tratando de um modelo representativo de diferentes camadas a função ganho é aprofundada pela equação 4, onde é necessário incluir no fator de espalhamento, as velocidades RMS específicas em função do tempo total de trajetória da onda (*two-way travelttime*) como aproximadamente $1/[v^2(t)t]$ (YILMAZ, 2001).

$$g(t) = \frac{v^2(t)t}{v^2_0 t_0} \quad (\text{Equação 4})$$

Para minimizar os efeitos dessa atenuação, foi escolhido um ganho de função quadrática, a partir do comando *sugain*. Essa manipulação é definida pela alteração em relação a variação temporal do sinal, e tem impacto direto nas amplitudes registradas, dito isso, seu uso indevido contribui na criação de informações falsas ou compensações indesejadas (YILMAZ 2001). A exibição do dado, em forma de sismograma separado por traços sísmicos, foi gerada com o comando *suxwigb*. Para melhor análise com um aumento da escala de visualização, foi selecionado um CDP aleatório na função *suwind* abaixo.


```

suwind < input.su key=cdp min=500 max=500 \
| sugain tpow=2.0 | suxwigb > output.su

```

4.2.3 Deconvolução

Num trabalho de sísmica, a energia da onda é transportada por uma curta ondaleta (Figura 4-16) de natureza compressional que mantém praticamente a mesma forma durante longos trajetos percorridos (HAGEDOORN, 1954). O próximo passo do processamento é definir a ondaleta fruto da interferência do sinal emitido por ruídos do equipamento, e suprimi-la na técnica conhecida como deconvolução de picos (*spiking deconvolution*), que é baseada nos filtros de Wiener (YILMAZ, 2001).

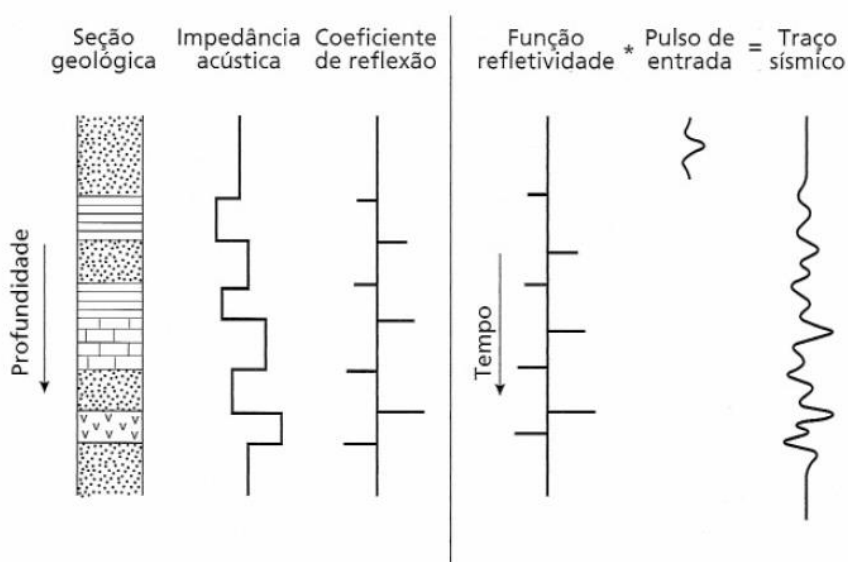


Figura 4-16: Modelo convolutivo do traço sísmico de reflexão. (KEAREY, 2009).

Nesta etapa, realiza-se então uma autocorrelação de forma a gerar um ruído sintético representativo. A partir do comando *suacor*, define-se os valores de dois vales característicos da *ondaleta* e os subtrai, resultando então no valor da sua extensão, *maxlag*, a ser integrado na função de deconvolução do sinal (STOCKWELL, 2012).

Os valores dos vales encontrados definem a chegada final e inicial da ondaleta no eixo do tempo, ao subtraí-los, é obtido o seu comprimento total, conhecido como o parâmetro *Maxlag*. Com o valor de *Maxlag* é possível realizar a deconvolução, que tem por finalidade corrigir a ondaleta, e utiliza a função *Supeq*, definida pelo filtro preditivo de Wiener-Levinson para estimar eventos periódicos, como múltiplas no sismograma,

permitindo assim que a componente seja removida (LIMA et al.,2003, STOCKWELL, 2012).

```

suwind > input.su key=cdp min=500 max=500 | \
                                     suacor | suximage
suwind > input.su key=cdp min=500 max=500 | supef \
                                     maxlag=0.000342 | suxwigg > output.su

```

4.2.4 Múltiplas

Nos métodos de geofísica aquática, o aparecimento de reflexões múltiplas no sismograma é comum, especialmente se a espessura das camadas de água for pequena. Este fenômeno ocorre a partir de uma reflexão secundária na superfície da lâmina d'água, após o raio sísmico já ter percorrido sua trajetória primária e ter refletido uma vez no leito marinho. Como resultado, o sinal primário, que compreende a reflexão da primeira interface água-solo, se repete com um padrão exatamente no dobro do tempo de chegada da onda primária (YILMAZ, 2001; SOUZA, 2006).

Yilmaz (2001) comenta sobre atenuação de reflexões de múltiplas e reverberações usando técnicas baseadas em sua periodicidade ou nas diferenças entre velocidades de deslocamento de múltiplas e primárias. Essas técnicas são aplicadas a dados em vários domínios, incluindo o domínio CMP, em que se discrimina profundamente a periodicidade e velocidade em cada traço. A deconvolução é um método de atenuação que explora o critério de periodicidade e pode remover uma parte significativa da energia associada a múltiplos de curto período e reverberações. Também pode atenuar múltiplos de longo período se aplicada em domínios de dados nos quais a periodicidade é preservada

4.2.5 Análise de velocidades

Uma etapa importante no processamento de dados sísmicos é identificar as velocidades RMS, características de cada camada. Seu cálculo se dá com a inclinação da reta t^2-x^2 do conjunto de velocidades da onda nas camadas. Estas contemplam a média quadrática de todos os pacotes de velocidades e são visualizadas no espectro de amplitudes das velocidades da onda pelo seu tempo de chegada.

A análise é realizada ao escolher o número de famílias CMP desejadas e seus respectivos intervalos. No espectro de velocidade (Figura 4-17) observa-se uma representatividade, em escala de cores, das medidas de sinais recorrentes ao longo de trajetórias hiperbólicas, que são regidas pela velocidade, *offset* e o tempo de viagem da onda. A recorrência demarca regiões de alta amplitude e possíveis reflexões indicam as velocidades RMS da família CMP. A partir desse processo é obtido como produto as informações das reflexões em cada CMP, com seus respectivos conjuntos de tempo-velocidade extraídos, que serão utilizados na correção Normal Move Out (NMO) (YILMAZ, 2001).

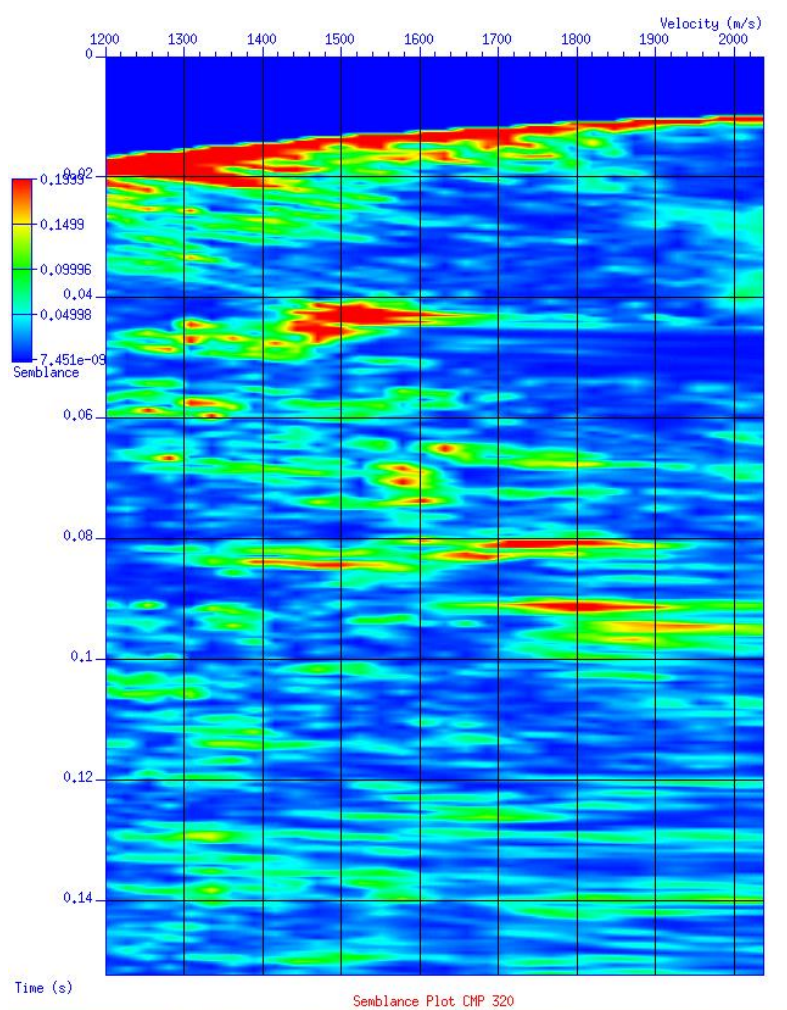


Figura 4-17: Espectro de velocidades de Velocidade por Tempo. A imagem demonstra em cores quentes regiões de maior amplitude na reflexão do sinal. O primeiro traço fortemente é resultado da onda direta.

4.2.6 Correção NMO

A partir dos valores obtidos na análise de velocidades por família CMP, é necessário corrigir o deslocamento dos traços sísmicos no eixo do tempo, no qual compreende uma compensação no tempo de chegadas das ondas sísmicas em percursos que tenham afastamento diferente de zero. Como resultado, os traços são alongados no domínio do tempo, criando distorções no conteúdo de frequência do sinal que tendem a variar para valores mais baixos (Figura 4-18). Com isso, refletores mais rasos tendem a perder de 20% a 30% das altas frequências além de distorções criadas nos geofones com maior afastamento. Com o empilhamento das famílias CMP posteriormente, tais problemas tendem a ser atenuados para os sinais coerentes aumentando a sua razão sinal-ruído (STEEPLES e MILLER, 1998; YILMAZ, 2001).

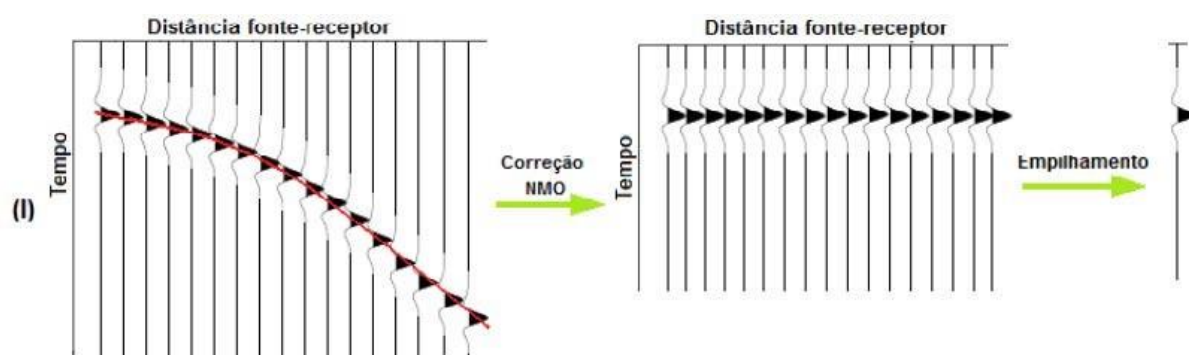


Figura 4-18: Modelo esquemático da correção NMO (GAMA et al., 2017).

Os diferentes tempos de chegada se alteram devido a variações nas distâncias dos hidrofones, e podem ser encontrados usando a expressão de tempo de trânsito hiperbólico da reflexão $t = t^2 + \frac{x^2}{V_{rms}^2}$. Com o valor de t definido, é possível calcular o tempo da incidência normal (Equação 5). Para determinar se a velocidade NMO está bem representativa para a correção do CMP, procura-se as que resultam nos refletores mais horizontalizados possíveis após a operação. (STEEPLES e MILLER, 1990; YILMAZ, 2001).

$$\Delta t_{nmo} = t_0 \cdot \left(\sqrt{1 + \left(\frac{x}{V_{nmo} \cdot t_0} \right)^2} - 1 \right) \quad (\text{Equação 5})$$

De modo a iniciar este processo é necessário organizar o dado utilizando a função *sunsort*, para separar os dados por tiros e os reorganizar nas famílias CDP. Com o dado preparado, no comando *sunmo* demonstrado abaixo são utilizadas as variáveis *tnmo* e *vnm* para armazenarem as informações obtidas na análise de velocidades.

```

susort < input.su cdp offset > output.su

```

```

sunmo < input.su tnmo=$tlnmo vnmo=$vlnmo ... > output.su

```

4.2.7 Empilhamento

Após a correção NMO, o próximo passo é empilhar o sinal de todos os canais, de modo a aumentar a razão sinal-ruído. A partir deste momento o perfil de traços sísmicos deixa de ser dividido em diferentes CMPs e onde cada família CMP gera um único traço (Figura 4-19). A junção de todos os traços sequenciais, resultantes do empilhamento para cada família CMP, gera a seção sísmica. O empilhamento é realizado partir da função *Sustack* demonstrada abaixo.

```

sustack < perfil_10_julho_nmo.su > output.su

```

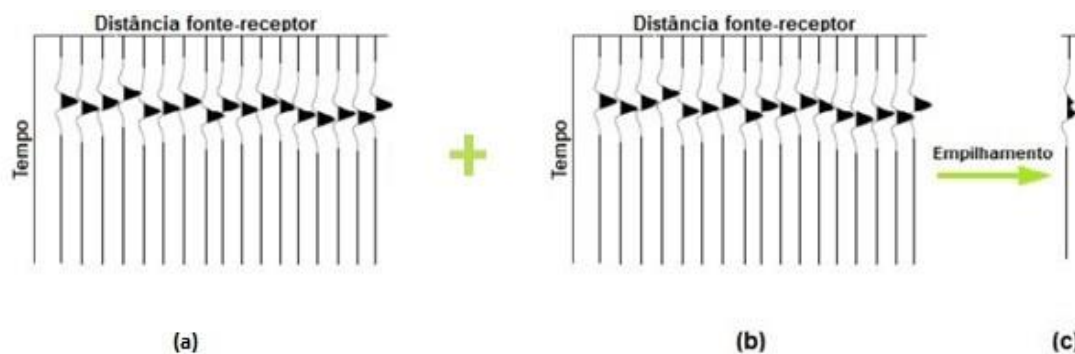


Figura 4-19: Representação esquemática do empilhamento de uma família CMP (GAMA et al., 2017).

4.2.8 Migração Stolt ou migração ($f-k$)

O método de Stolt é uma operação a partir transformada de Fourier, para deslocar as superfícies de refletores inclinados no dado, levando-os às suas posições verdadeiras. Essa correção leva em consideração um evento de extensão considerável que tenha seu ângulo de mergulho constante. Seu resultado torna os refletores mais íngremes, curtos e deslocados na direção acima ao ângulo de mergulho (Figura 4-20). Desta forma, pode-se dizer que essas modificações são puramente associadas ao deslocamento do tempo, e são eficientes ao aplicá-los em modelos de velocidade constante. A migração pode ser expressa por meio da frequência temporal ω e o número de onda vertical k_z , como demonstrado na primeira expressão referente a seção com offset zero (Equação 6), e em

seguida, na seção migrada no domínio frequência-número de onda (Equação 7) (HAGEDOORN, 1954; FRENCH, 1975; YILMAZ, 2001).

$$P(k_x, k_z, t = 0) = \left[\frac{v}{2} \frac{k_z}{\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \right] \quad (\text{Equação 6})$$

$$P \left[k_x, 0, \omega = \frac{v}{2} \frac{k_z}{\sqrt{k_y^2 + k_z^2}} \right] \quad (\text{Equação 7})$$

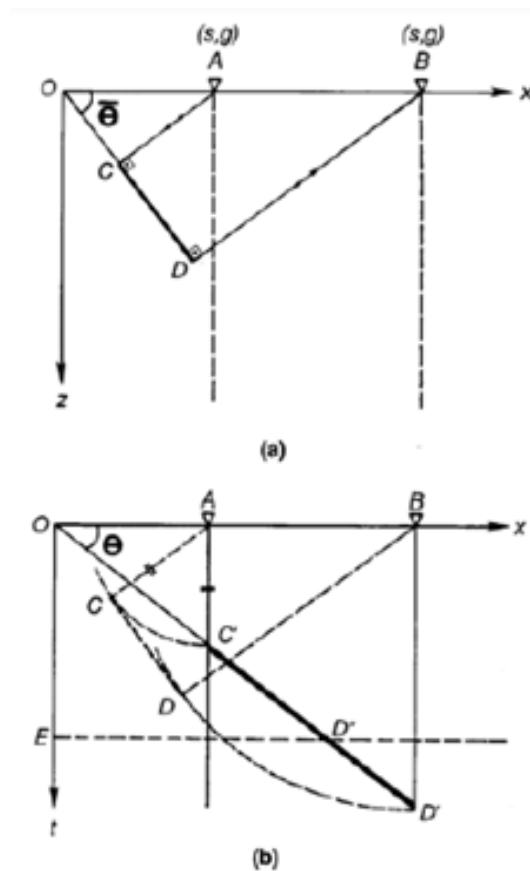


Figura 4-20: Modelo esquemático da migração. (a) Representação do refletor real; e (b) representação do refletor pré-migração (Yilmaz, 2001).

No SU o comando *Sustolt* realiza a migração *f-k*, com os parâmetros de *smig* igual ao fator de esticamento (*stretch factor*), *vscale* como a escala aplicada as velocidades, *lstaper* como amostragem vertical, *lbtaper* amostragem horizontal, e finalmente *dxcdp* como intervalo entre CMPs (STOCKWELL, 2012).

```
sustolt < input.su cdpmin=$mincdp cdpmax=$maxcdp \
dxcdp=$xcdp tmig=$t1,$t2... vmig=$v1,$v2... \
lstaper=$vert lbtaper=$hz > output.su
```

4.2.9 Conversão tempo-profundidade

Num perfil sísmico que possui seu eixo Y definido no domínio do tempo, ao considerar uma conversão para o domínio da profundidade, pensa-se inicialmente na simples expressão da velocidade em função do tempo. Portanto, considera-se a velocidade RMS, obtida no espectro de velocidades, para conversão em velocidades intervalares. Considerando um modelo de uma sucessão de camadas com velocidades crescentes espera-se que em tempos tardios haverá deslocamentos causados pelo aumento dos espaçamentos entre amostras. No SU, o comando *sutotz* aplica uma simples interpolação “*sinc*” com uma banda que varia de 0 a frequência de Nyquist (STOCKWELL, 2012).

```
suztot < input.su z=Z1,Z2,Z3... v=1500,2000,3000...\
> output.su
```

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com o resultado do trabalho, são apresentados os produtos de cada uma das etapas do processamento descritas na seção anterior, e também a interpretação do perfil sísmico resultante. Foram encontradas dificuldades no fluxo de processamento que influenciaram diretamente no produto almejado, logo, as percepções sobre as etapas serão discutidas de maneira aprofundada neste capítulo. Como fator comparativo e de validação do processamento realizado, foi utilizado um perfil processado pela equipe da INFREMER/AMANAUS que contempla os mesmos dados da área estudada.

Em uma primeira impressão, o *Seismic Unix* é apresentado como uma ferramenta versátil no tratamento de dados, onde possibilita ao usuário realizar a grande maioria das funções e operações matemáticas necessárias para a limpeza e realce do sinal de interesse. O programa permite também inúmeras variações dos parâmetros aplicados nos filtros, a exemplo do comando de ganho que permite cortar o dado com clip, alterar escala, remover spikes além das usuais funções quadráticas, exponenciais e AGC. Assim, este método de processamento se demonstrou extremamente útil e diverso, porém, em contrapartida, o sucesso de sua aplicação depende amplamente do conhecimento do operador, visto que, é exigido um conhecimento acerca dos parâmetros e características dos dados, que não se encontra facilmente.

Na etapa inicial de pré-processamento a rotina consistiu na conversão do dado bruto em SEG-Y para o formato .SU aceito pelo *Seismic Unix*. A análise dos metadados permitiu determinar os quantitativos de CDPs em 1288, a contagem de 5000 amostras e o intervalo de amostragem em 100 ms, além de determinar o offset aplicado e as coordenadas de geometria. Posteriormente, foi aplicado a partir do espectro de frequências, o filtro passa banda para suprimir os ruídos indesejados e preservar as frequências essenciais do sinal acústico produzido pela fonte *Sparker*. A geometria trapezoidal do filtro consistiu nos limites de passa alta entre 200 Hz e 400 Hz e passa baixa de 1300 Hz a 2000 Hz (Figura 5-21). Esta manipulação permitiu que fossem realçadas as amplitudes de interesse, logo, o sinal das ondas P, S e de superfície (Figura 5-22).

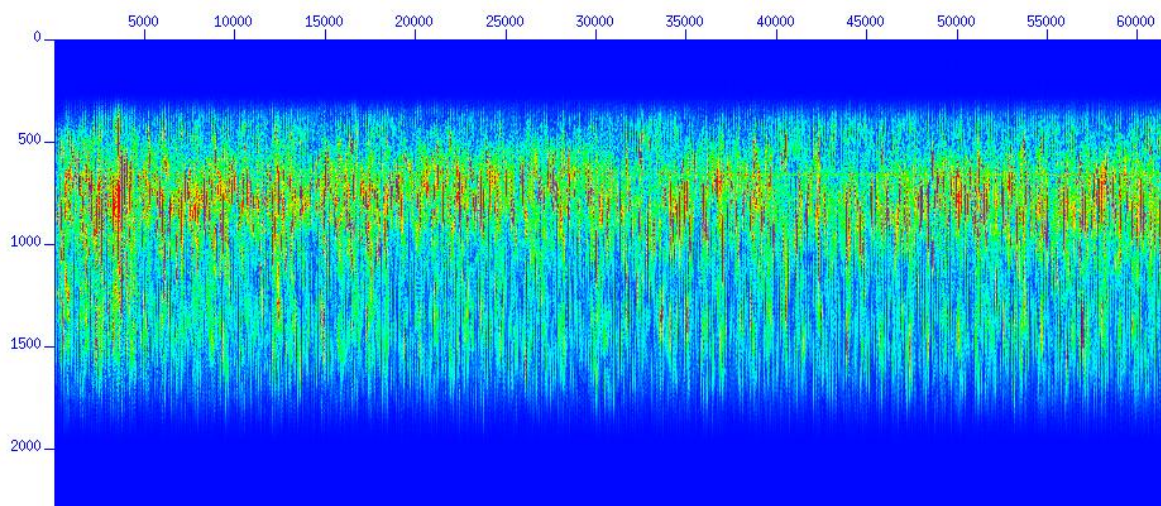


Figura 5-21: Espectro de frequência após a aplicação do filtro.

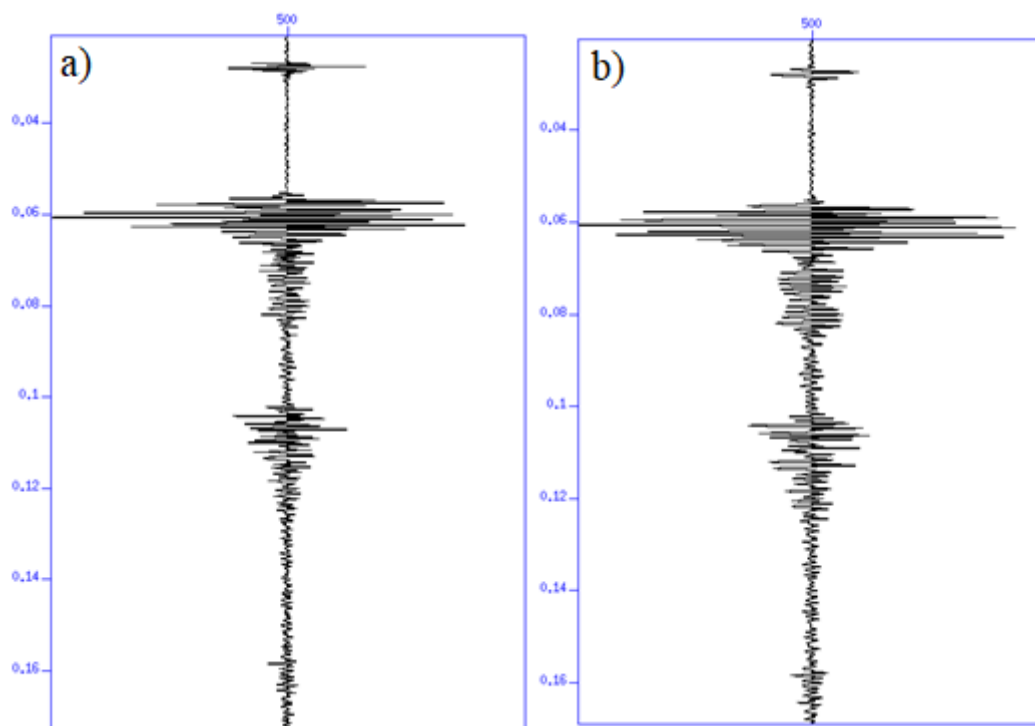


Figura 5-22: (a) Traço sísmico bruto; (b) Traço sísmico com o filtro passa banda aplicado.

Visando recuperar a amplitude dos sinais atenuados durante a propagação da onda, o ganho quadrático foi aplicado posteriormente ao filtro passa banda. A seguir foi aplicada a deconvolução do sinal (Figura 5-23

Figura 5-23), em que foi possível estipular em 0.00034 s o comprimento temporal da *wavelet*, visualizada a partir do gráfico de autocorrelação.

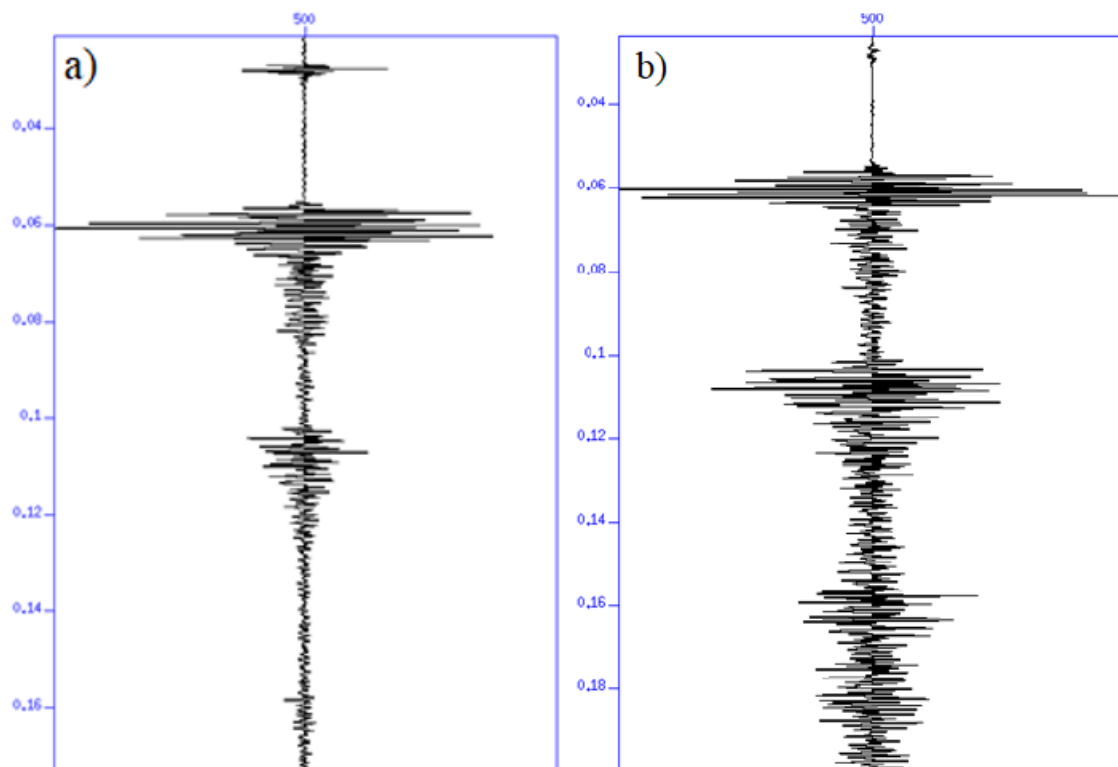


Figura 5-23: Em (a) traço sísmico bruto. Em (b) traço sísmico após aplicação da deconvolução.

Ao seguir nas etapas do fluxo de pré-empilhamento, foram realizadas tentativas de supressão de múltiplas com a técnica de deconvolução preditiva. A ideia central seria suprimir as múltiplas, a partir de cada um dos 1288 conjuntos CDP, para facilitar as análises posteriores do espectro de velocidades RMS, onde idealmente preservaria e exaltaria as amplitudes das reflexões de camadas. Como a autocorrelação é definida no domínio do tempo, pode-se utilizar do princípio de que o período de chegada da múltipla (0.08 s) é exatamente o dobro da onda primária (0.04 s) (Figura 5-24). A montagem do código foi desenvolvida utilizando-se os comandos *sunmo*, *supef* e *sunmo* invertido, com os objetivos de normalizar o traço da autocorrelação, aplicar a deconvolução e supressão da múltipla, e então reverter o dado ao original respectivamente. Embora essas etapas tenham sido cumpridas, o programa não conseguiu apresentar um resultado satisfatório para com o algoritmo empregado, sendo ainda possível visualizar as múltiplas após o procedimento, e também ocorrendo atenuação do sinal desejado (Figura 5-25).

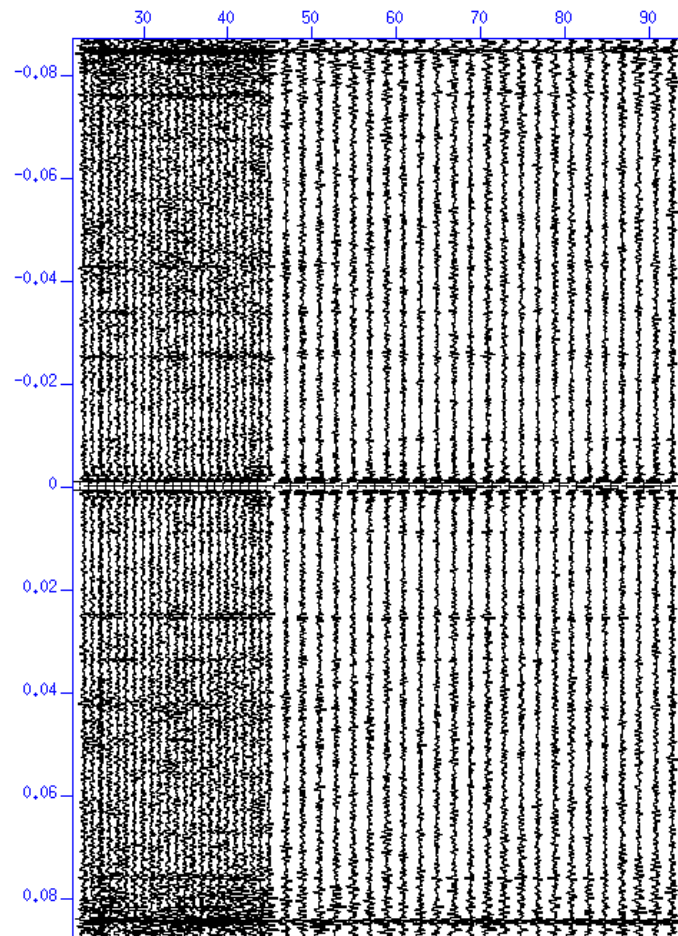


Figura 5-24: Autocorrelação demonstra um padrão marcado em 0.084 s, dobro da onda primária.

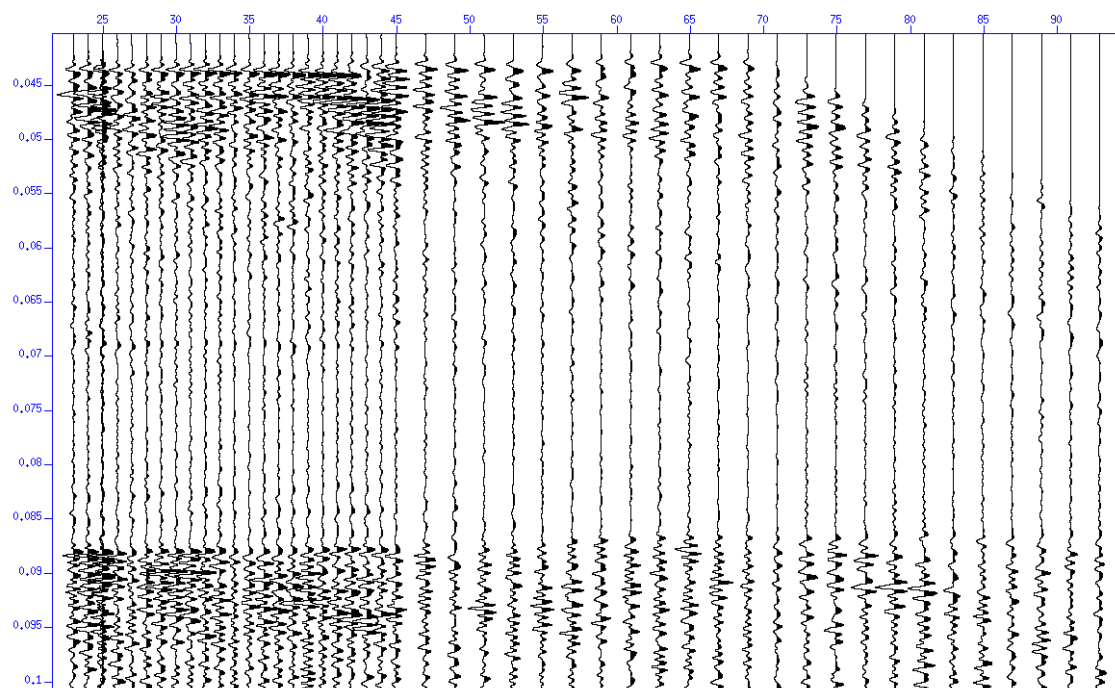


Figura 5-25: Perfil sísmico deconvolvido para supressão de múltiplas

Os procedimentos seguiram com a inversão de análise de velocidades (IVA) realizada sem a supressão das múltiplas. Na amostragem, a sucessão de reflexões das camadas foi escolhida num padrão crescente, com velocidades superiores ao valor da reflexão primária, de modo a contemplar apenas o dado real. Ao levar em consideração que as múltiplas viajam apenas em um meio, estas representam uma repetição de padrão uniforme no tempo de reflexão, a uma velocidade constante de 1500 m/s (Figura 5-26). Ao todo 18 CMPs tiveram suas reflexões analisadas e seus resultados foram aplicados ao dado organizado por CMP offset, para compor as velocidades e tempos da correção NMO exemplificados na Tabela 5-1.

Tabela 5-1: Exemplos dos valores de tempo e velocidade adquiridos na análise de velocidades.

| CMP | TNMO | VNMO |
|------------|-------------|-------------|
| 1 | 0.0442156 | 1576.84 |
| | 0.047781 | 1674.20 |
| | 0.0946118 | 1872.93 |
| 80 | 0.0405079 | 1523.66 |
| | 0.0856017 | 1831.72 |
| 160 | 0.131166 | 1626.97 |
| | 0.165739 | 1815.05 |
| | 0.0420586 | 1499.29 |
| | 0.0901764 | 1592.64 |
| 240 | 0.000334655 | 1209.74 |
| | 0.0414972 | 1539.59 |
| 320 | 0.0413753 | 1510.55 |
| | 0.0648839 | 1635.27 |
| | 0.0811833 | 1766.36 |
| | 0.0909002 | 1799.45 |
| | 0.094975 | 1900.00 |
| 400 | 0.0391964 | 1567.22 |
| | 0.0828181 | 1668.47 |

| | | |
|------|------------|---------|
| 480 | 0.178968 | 1997.81 |
| | 0.0399187 | 1531.31 |
| | 0.0820526 | 1708.17 |
| 560 | 0.00108945 | 1201.07 |
| | 0.0413991 | 1584.3 |
| 640 | 0.114166 | 1900.88 |
| | 0.0417095 | 1562.02 |
| 720 | 0.166894 | 1700.16 |
| | 0.0387702 | 1493.89 |
| 800 | 0.0422487 | 1684.55 |
| 880 | 0.11482 | 1696.14 |
| | 0.072063 | 1609.8 |
| | 0.0384336 | 1553.6 |
| 960 | 0.0390981 | 1550.39 |
| | 0.0702709 | 1613.28 |
| 1020 | 0.0419916 | 1548.83 |
| | 0.0691938 | 1717.77 |
| 1100 | 0.0423659 | 1520.78 |
| | 0.112635 | 1674.2 |
| 1180 | 0.077032 | 1772.1 |
| | 0.0402229 | 1562 |
| 1220 | 0.0331961 | 1554.86 |
| | 0.0670837 | 1631.52 |
| 1280 | 0.0385726 | 1524.73 |
| | 0.0569866 | 1557.57 |
| | 0.0740438 | 1635.41 |
| | 0.111453 | 1665.81 |

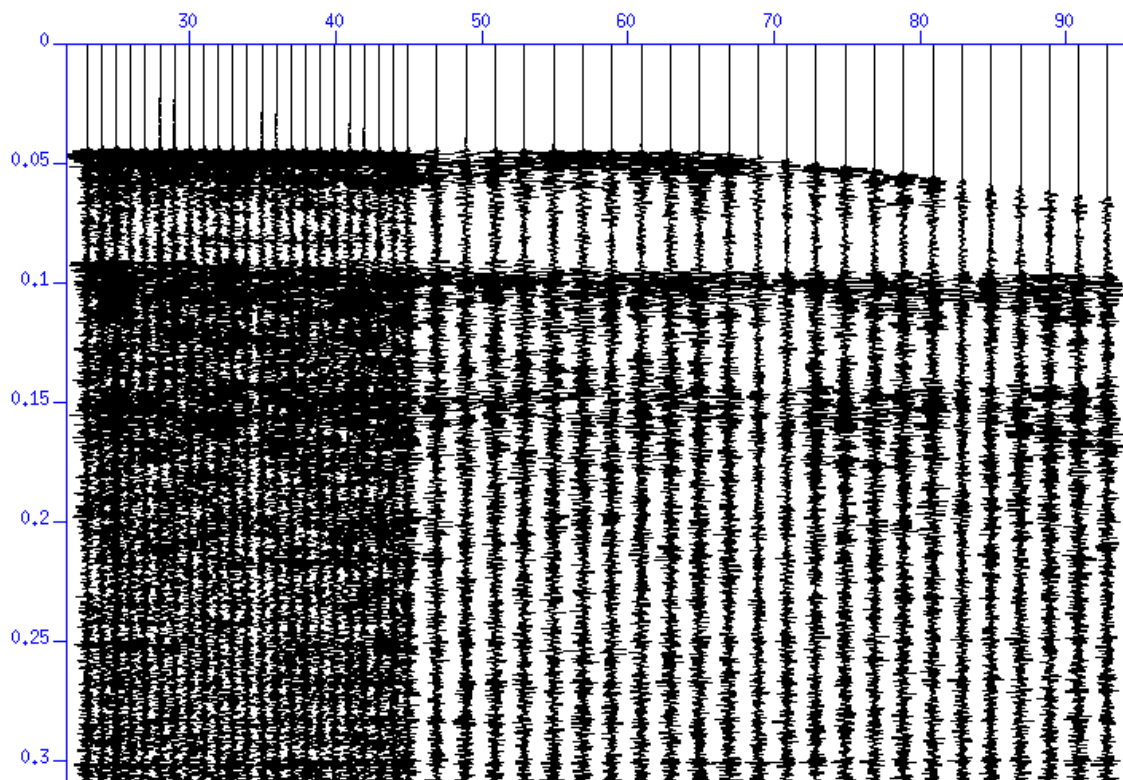


Figura 5-26: Perfil resultado da correção NMO.

Com as etapas de pré-empilhamento cumpridas iniciaram-se os processamentos finais e empilhamento do dado, restando apenas as correções de migração Stolt e transformação tempo-profundidade. Para a migração, foram escolhidos os parâmetros de acordo com os resultados visualizados na análise de velocidades, em que, a velocidade da onda, tempo de reflexão e escala vertical ditam o resultado do processamento. A partir de algumas tentativas, os parâmetros escolhidos foram se aperfeiçoando até encontrar uma combinação que permitisse o perfil final ter reflexões bem demarcadas, sem hipérbolas de erro de velocidades e um sinal mais limpo. Na decisão dos parâmetros foi definido uma média das velocidades e tempos encontrados na IVA, que variam entre 1520 e 1850 m/s, distribuídos no intervalo de até 0.09 s.

De volta a supressão de múltiplas, foi realizada uma tentativa com o dado empilhado na expectativa de ao menos minimizar suas amplitudes. Embora essas etapas tenham sido cumpridas, o programa não conseguiu apresentar um resultado de sucesso para o código empregado. Apesar de a supressão ter ocorrido de maneira efetiva em todo o sinal da múltipla, as amplitudes das demais camadas também foram eliminadas (Figura 5-27) resultando num perfil com reflexões e estratificações que não representam a realidade.

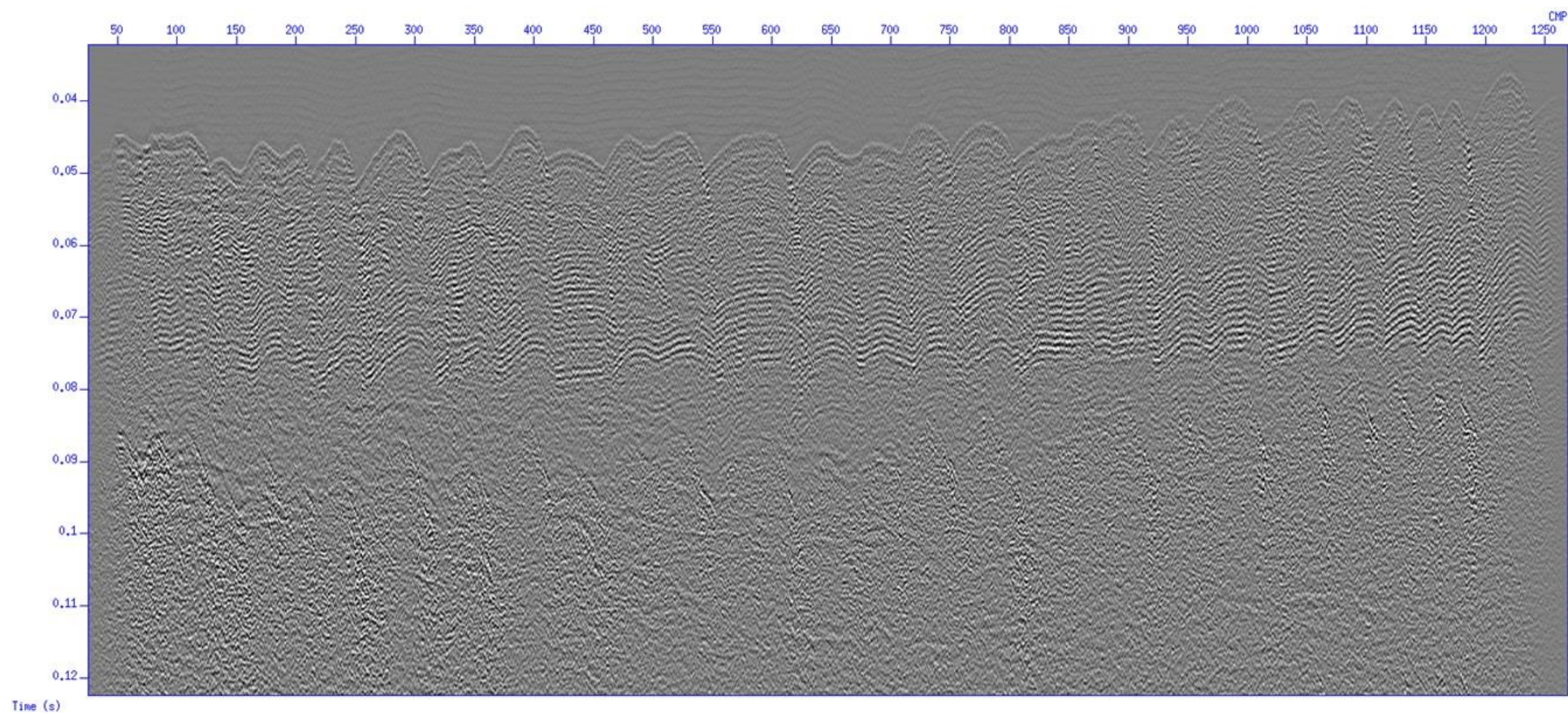


Figura 5-27: Resultado de insucesso da operação de remoção da múltipla pós-stack.

Finalmente, a composição final do perfil consistiu na transformação tempo-profundidade onde foi utilizada a velocidade RMS gerada novamente com a análise do tópico 4.2.5 Análise de velocidades. Dessa forma, foi realizado um corte na seção para omitir as informações abaixo de 0.09s, calculado em 80 m e outro abaixo de 1.2s, calculado em 105 m, que estavam sobre forte influência das múltiplas (Figura 5-28 e Figura 5-29).

Ao levar em consideração os passos e as dificuldades ao realizar o processamento dos dados sísmicos, o perfil final se mostrou eficaz em determinar algumas estruturas contidas no subfundo do Rio Amazonas. Com foco nos perfis de até 75m (Figura 5-28) é possível determinar um refletor plano sub-horizontal bem demarcado com aproximadamente 50m de profundidade em relação a superfície d'água. É perceptível também a descontínua aparição de refletores de amplitude muito alta, que parecem intercalar com a camada logo abaixo. Quanto a chegada da onda primária, o resultado ficou nítido, demonstrando um leito coberto por dunas e continuidade coerente. Ao analisar a borda do sinal referente ao leito, percebe-se um efeito de sombreamento do sinal logo acima das primeiras fortes amplitudes, recorrente no processamento, em que, pode ser explicado como uma baixa resolução resultada do empilhamento dos traços sísmicos. No perfil estendido de até 105 m (Figura 5-29) verifica-se a influência da múltipla, em que, é possível enxergar refletores mascarados em meio às altas amplitudes, porém, não é possível dar certeza em função da alta concentração de ruídos propagados pela repetição da camada primária.

Dada esta descrição inicial da seção gerada, compara-se os resultados obtidos com o perfil processado e demonstrado no relatório de expedição do projeto Amanaus (Figura 5-30) (DUPONT, 2023). Os dois produtos foram desenvolvidos a partir dos mesmos dados, sendo então uma fonte confiável de comparação e identificação de redundâncias para validação do processamento e interpretações. Em ambos os perfis se verifica fortes amplitudes nas camadas iniciais, demarcando o sedimento das dunas e outro refletor plano horizontal descontínuo. Identifica-se também os curtos, descontínuos refletores de alta intensidade, assim como, uma grande superfície continua, encontrada no tempo médio de 70 ms. A principal diferença é que a deconvolução no perfil do relatório do AMANAUS foi mais eficiente para remover o “padrão zebrado” dos refletores, especialmente os abaixo do assoalho. Entretanto, dada a similaridade entre os resultados pode-se dizer que a rotina de processamento realizada nesse trabalho utilizando o *Seismic Unix* foi eficiente.

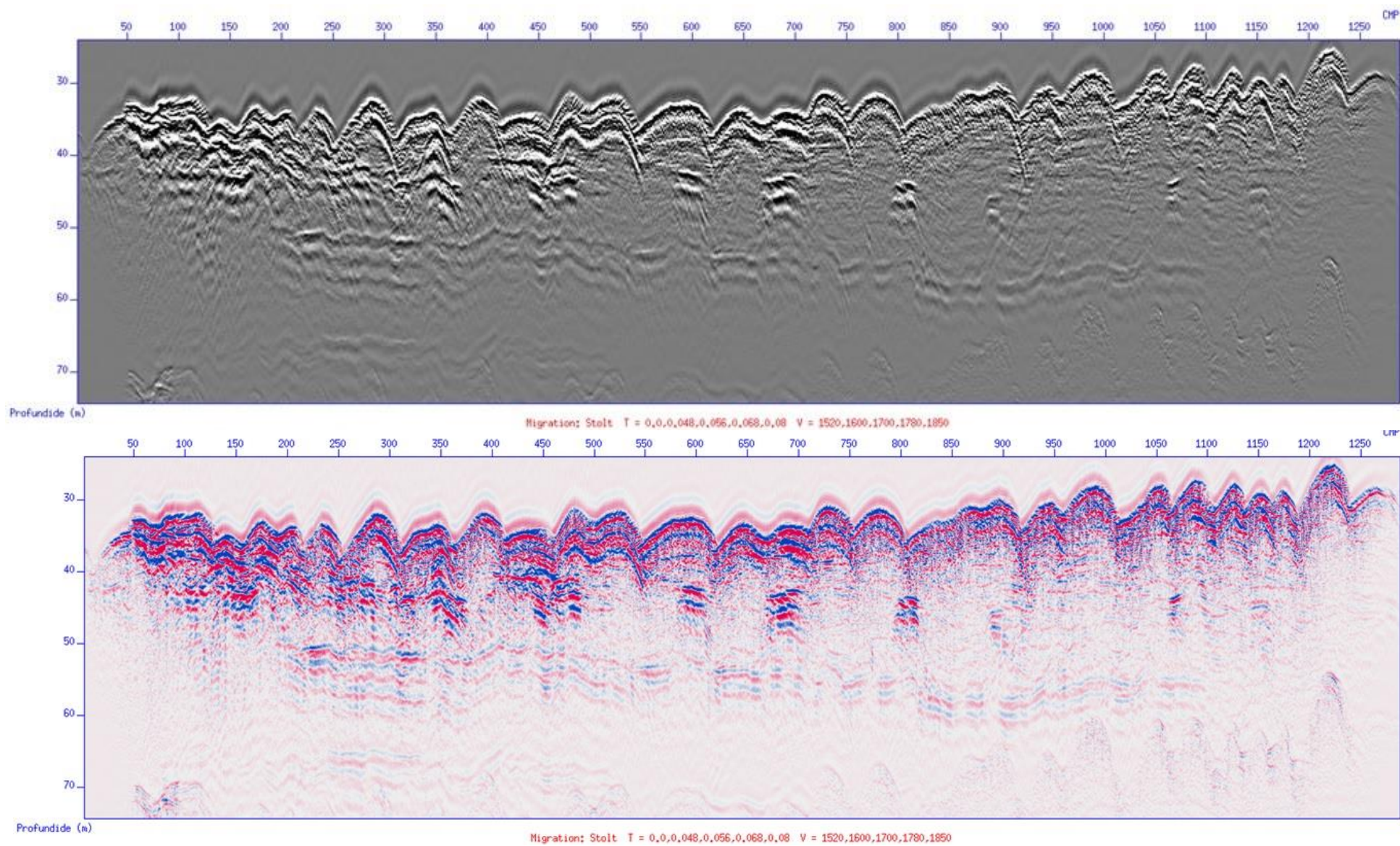


Figura 5-28: Perfis sísmicos com profundidade de 75 m. Dispostos em escala de cor cinza acima e colorido abaixo.

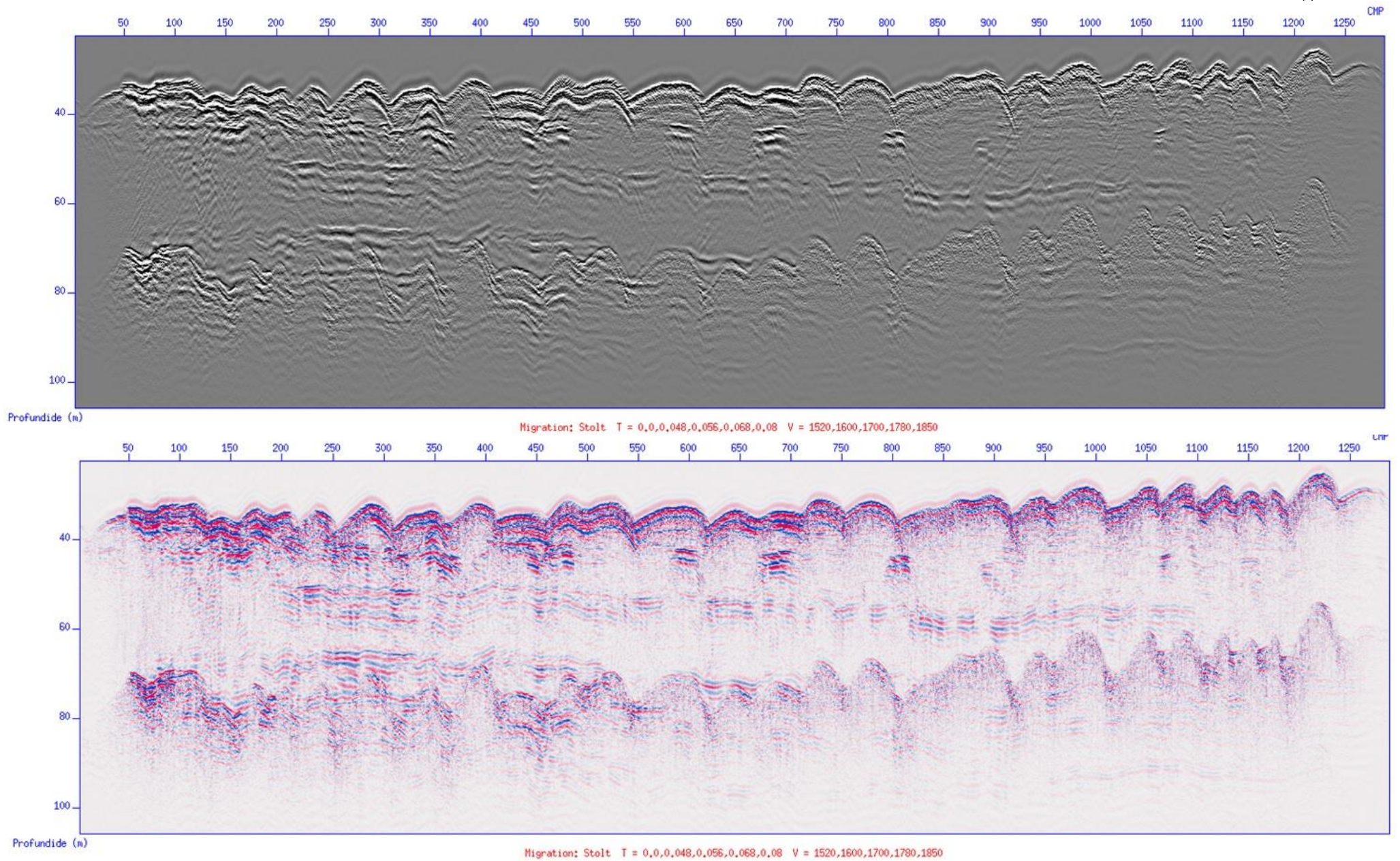


Figura 5-29: Perfis sísmicos com profundidade de 105 m. Dispostos em escala de cor cinza acima e colorido abaixo.

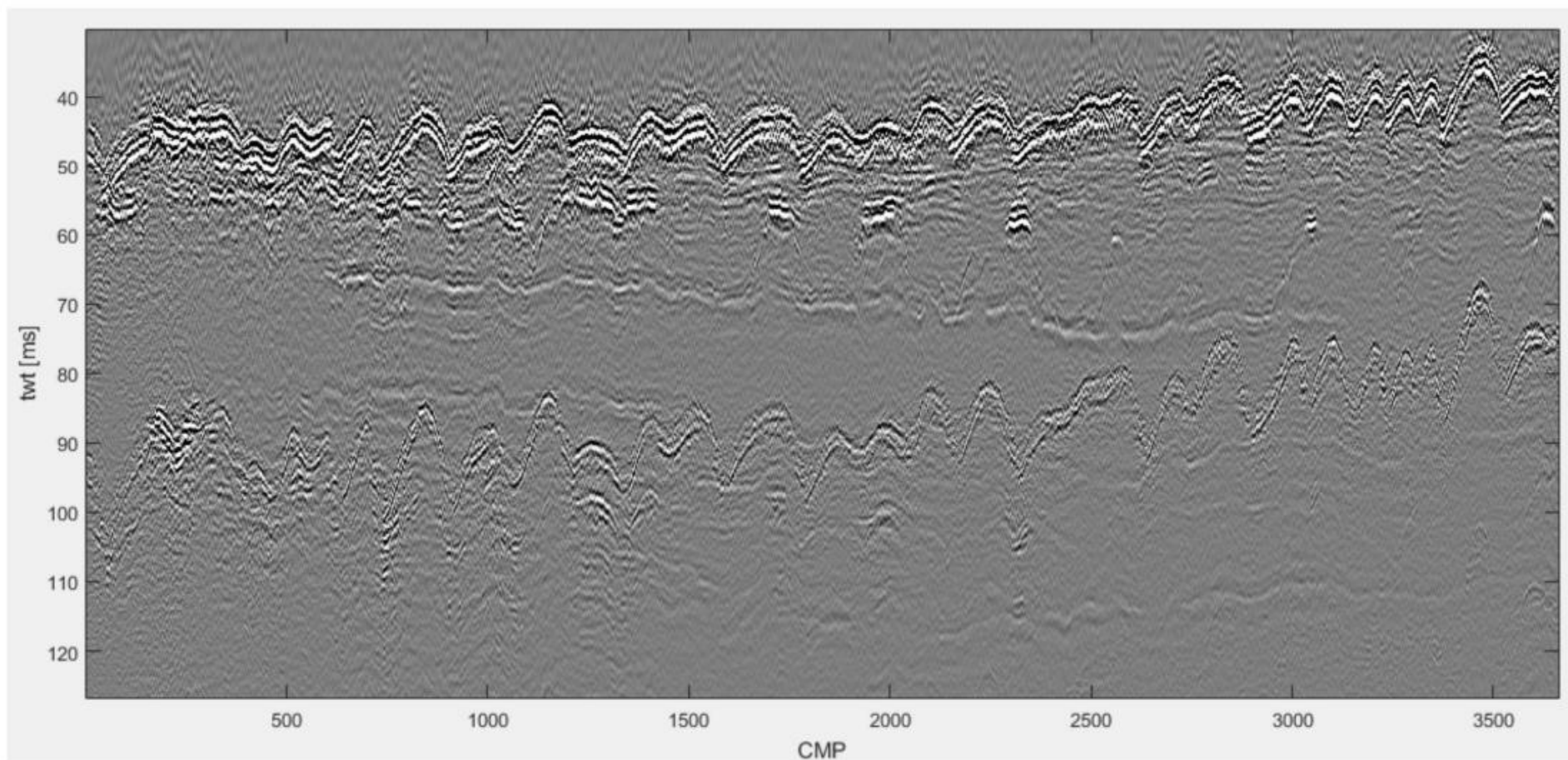


Figura 5-30: Resultado obtido no processamento preliminar do projeto AMANAUS. (DUPONT, 2023).

No perfil Figura 5-31 está apresentada a seção sísmica final interpretada, e na Figura 5-32 a interpretação final com detalhe. Foi possível interpretar três pacotes sedimentares, onde, a primeira se caracteriza por refletores bem demarcados com velocidade entre 1650 e 1700 m/s (Tabela 5-1), acompanhados da topografia ondulada das dunas do leito, o que indica uma zona de recuperação do fluxo do rio, em que se encontram sedimentos mais grossos (IANNIRUBERTO, et al., 2018). Avançando em profundidade foram inferidos dois refletores com continuidade e alta intensidade, possivelmente demarcando um material mais consolidado e estratificado. Na interface entre a segunda e terceira camada não é possível definir com certeza todo o limite do refletor devido a presença do sinal da múltipla, e com isso foram inferidas continuidades laterais que acompanhassem a continuidade da camada acima. Foram identificados também refletores plano paralelos, indicando um acamamento intercalado de baixa intensidade, além de lentes de areia mais grossa, demarcando um sinal descontínuo de alta amplitude, que se estende de alguns metros até dezenas de metros.

Na profundidade de 50 metros encontra-se uma interface muito bem demarcada indicando uma transição de um meio com velocidade aproximada de 1800 m/s. Com uma espessura que varia entre 12 e 15m, o refletor aparece de maneira contínua, salvo efeito de borda e a atenuação do sinal causada pelas lentes de areia. Este corpo sedimentar pode marcar o início da Formação Alter do Chão, a qual é definida pelas intercalações de arenitos, argilitos, siltitos e por fim conglomerados (CAPUTO, 2011).

Finalmente, na porção mais profunda da seção, é possível identificar refletores em meio aos ruídos do sinal da primeira múltipla. Se trata de uma superfície com maiores discontinuidades, porém, estão dispostas de modo a não interferir completamente na interpretação. Esta camada não tem sua espessura definida com precisão, ainda assim, demarca uma maior velocidade em 2000 m/s, podendo indicar sedimentos mais compactos justificados na presença de argilitos ou siltitos.

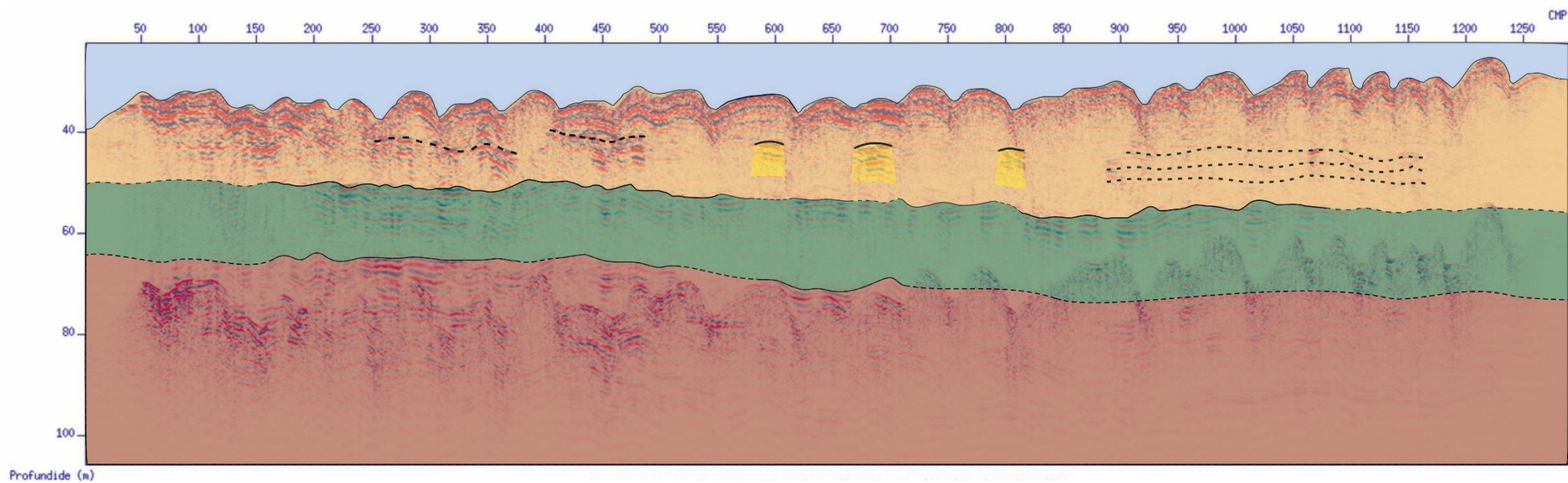


Figura 5-31: Seção sísmica com a interpretação estratigráfica.

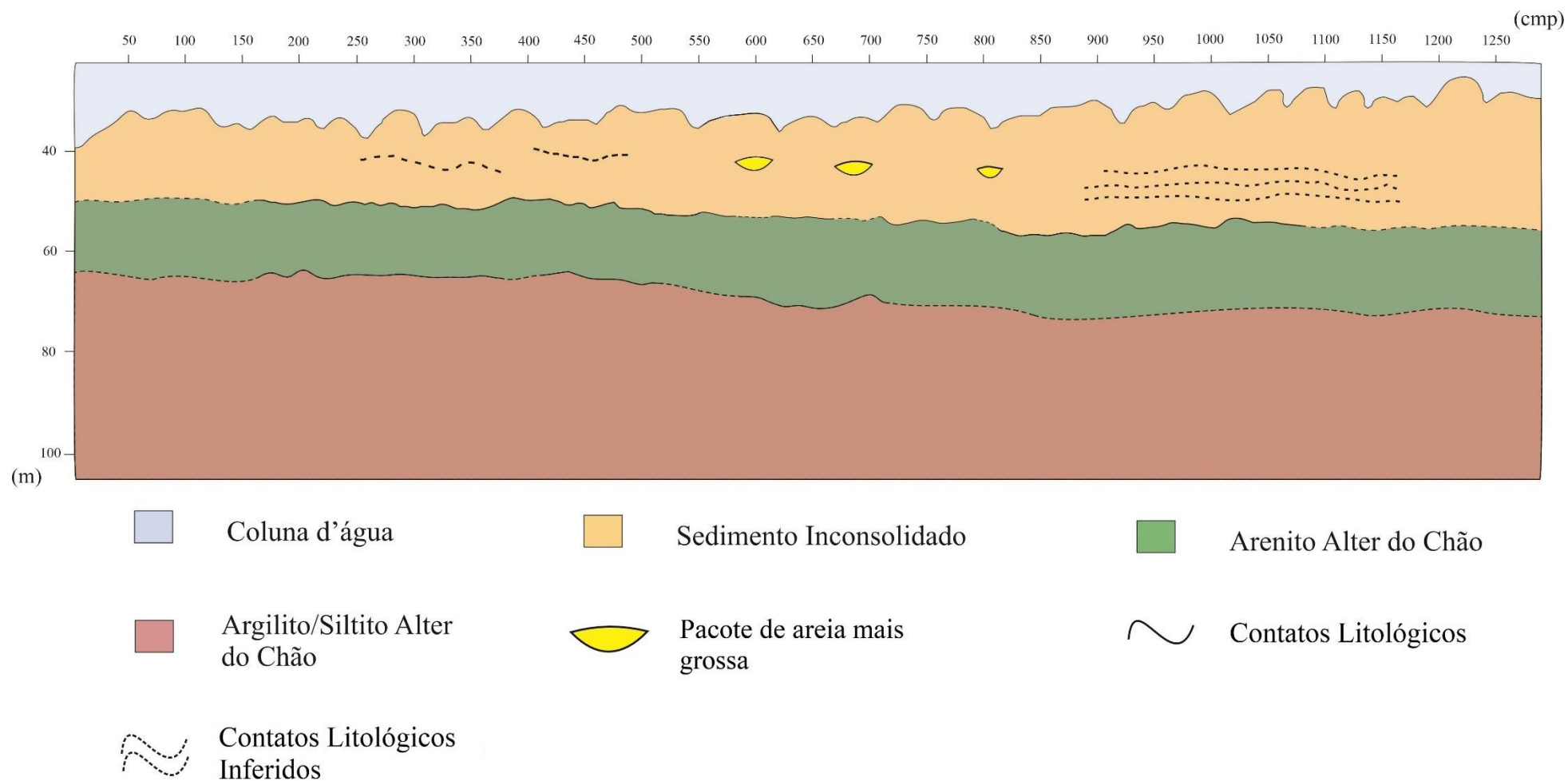


Figura 5-32: Interpretação estratigráfica final da seção sísmica obtida.

6 CONCLUSÕES

O uso da ferramenta *Seismic Unix* se mostrou eficiente para esse tipo de processamento, permitindo um tratamento efetivo dos dados sísmicos coletados, que permitiu obter uma seção similar à processada pela equipe do projeto AMANAUS com programas próprios. A aplicação das técnicas de filtragem, empilhamento e migração trouxeram resultados que permitiram a visualização efetiva das interfaces abaixo do assoalho do rio. Dessa forma, embora desafios tenham surgido, como a dificuldade em minimizar o impacto de ruídos e reverberações, o estudo conseguiu alcançar seus objetivos

A interpretação dos perfis revelou características das sucessões sedimentares e camadas geológicas do subfundo do Rio Negro. As diferentes camadas são bem marcadas, com interfaces de impedância significativa nas profundidades de cerca de 40, 50 e 65 metros. As velocidades das duas camadas principais observadas são aproximadamente 1650 e 1850 m/s da porção mais rasa para a mais profunda, compatíveis com areias saturadas e arenitos, respectivamente.

Não foi possível suprimir completamente o sinal das reflexões múltiplas da seção com a abordagem utilizada, o que prejudicou a interpretação de interfaces mais profundas. Mais testes são necessários para que o processamento de supressão de múltiplas seja efetivo, considerando que esse procedimento não é trivial.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, Vitto César Miranda de. Análise de métodos geológicos e geofísicos aplicados à identificação de potenciais depósitos de cascalho diamantífero no Rio Araguaia. 2014.
- AYRES NETO, Arthur. Uso da sísmica de reflexão de alta resolução e da sonografia na exploração mineral submarina. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 18, p. 241-256, 2000.
- CAPUTO, Mario Vicente. Discussão sobre a Formação Alter do Chão e o Alto de Monte Alegre. **Contribuição à Geologia da Amazônia, Manaus, SBG/Núcleo Norte**, v. 7, p. 7-23, 2011.
- CAPUTO, M. V. Bacia do Amazonas: estratigrafia, tectônica e magmatismo. 2020.
- CORDANI, Umberto G. História Geológica do Craton Amazônico. Anais do 15 **Simpósio de Geologia da Amazônia, Pará, Belém, Brasil**, p. 11-16, 2017.
- COSTA, I. S. L., ROCHA, M. P., KLEIN, E. L., & VASQUEZ, M. L. Lithospheric structure of the southern Amazonian Craton from multiple-frequency seismic tomography: Preliminary insights on tectonic and metallogenic implications. *Journal of South American Earth Sciences*, 101(February), 102608. 2020.
- COUTINHO, Maria Glícia da Nóbrega. Província Mineral do Tapajós: geologia, metalogenia e mapa previsional para ouro em SIG. 2008.
- DA CRUZ CUNHA, Paulo Roberto; GONÇALVES DE MELO, J. H.; DA SILVA, Osvaldo Braga. Bacia do Amazonas. **Boletim de Geociências da PETROBRAS**, v. 15, p. 227-251, 2007.
- DUPONT, PAULINE . Mission AMANAUS - Compte-rendu d'acquisition bathymétrique multifaisceaux et sismique multitrace Très Haute Résolution. PDG/REM/GEO-OCEAN/ANTIPOD-20231123-01. 2023.
- FILIZOLA, Naziano et al., Resultados preliminares da Expedição Humboldt quanto ao Fluxo de Matéria em Suspensão no trecho entre Santarém e a foz do Rio Amazonas. 2001.

FILIZOLA, Naziano; GUYOT, Jean Loup. Fluxo de sedimentos em suspensão nos rios da Amazônia. **Brazilian Journal of Geology**, v. 41, p. 566-576, 2011.

FRENCH, William S. Computer migration of oblique seismic reflection profiles. 1975.

GAMA, Clériston Silva et al., Influence of topography and low velocity layer on seismic image. In: **15th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF, Rio de Janeiro, Brazil, 31 July-3 August 2017**. Brazilian Geophysical Society, 2017. p. 1550-1555.

GEO MARINE SURVEYS. Figura Sparker, 2024.
<<https://ww2.geosys.nl/products/seismic/geo-source-400>> Disponível em: 25/Mar/2024.

GOULDING, Michael. História natural dos rios amazônicos. 1997.

GUYOT, Jean Loup. **Hydrogéochimie des fleuves de l'Amazonie bolivienne**. 1992. Tese de Doutorado. Bordeaux 1.

HAGEDOORN, Johan Gregorius. A process of seismic reflection interpretation. **Geophysical prospecting**, v. 2, n. 2, p. 85-127, 1954.

MENDES, Anderson Conceição; TRUCKENBRODT, Werner Hermann Walter; NOGUEIRA, Afonso César Rodrigues. Análise faciológica da Formação Alter do Chão (Cretáceo, Bacia do Amazonas), próximo à cidade de Óbidos, Pará, Brasil. 2012.

IANNIRUBERTO, Marco et al. A field study of the confluence between Negro and Solimões Rivers. Part 2: Bed morphology and stratigraphy. **Comptes Rendus. Géoscience**, v. 350, n. 1-2, p. 43-54, 2018.

LIMA, Adriano P.; PORSANI, Milton J. Deconvolução preditiva de reflexões múltiplas e peg-legs utilizando filtragem Wiener-Levinson multicanal. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 19, p. 303-314, 2001.

MARSSET, Bruno et al., Deep-towed high resolution multichannel seismic imaging. **Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers**, v. 93, p. 83-90, 2014.

NETO, 2000 - Uso da sísmica de reflexão de alta resolução e da sonografia na exploração mineral submarina

REYNOLDS, John M. **An introduction to applied and environmental geophysics**. John Wiley & Sons, 1990.

REYNOLDS, John M. **An introduction to applied and environmental geophysics**. John Wiley & Sons, 2011.

SANTOS, E. P. Método da sísmica de reflexão aplicado à identificação dos recursos minerais marinhos na Plataforma Continental: uma pesquisa bibliográfica. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Faculdade de Geofísica, Belém, 2014.

DOS SANTOS SILVA, Jonathan Miller et al. Sensoriamento remoto aplicado à prática de campo no ensino de hidrografia e geomorfologia fluvial: uma análise do arquipélago de anavilhanas (amazonas-brasil), 2023.

SARGES, Roseane Ribeiro et al., **Relações entre as estruturas tectônicas, sedimentação coluvial e geomorfogênese da região de Manaus, Amazonas**. 2008. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo (USP). Instituto de Geociências (IG/BT).

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Rigeo, 2005. Mapa Geológico do Amazonas. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/bitstream/doc/16624/1/Geodiversidade_AM.pdf>. Acesso em: 23/06/2024.

DA SILVA, Clauzionor Lima. **Análise da tectônica cenozóica da região de Manaus e adjacências**. 2005. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista, 30.11. 2005.

DE SOUZA, Luiz Antonio Pereira. Shallow-Water Sub-Bottom Seismic Investigation: A Multi-Frequency Approach. **Brazilian Journal of Geophysics**, v. 40, n. 5, 2022.

SOUZA, Luiz Antonio Pereira de. **Revisão crítica da aplicabilidade dos métodos geofísicos na investigação de áreas submersas rasas**. 2006. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

STEEPLES, Don W.; MILLER, Richard D. Avoiding pitfalls in shallow seismic reflection surveys. **Geophysics**, v. 63, n. 4, p. 1213-1224, 1998.

STEEPLES, Don W.; MILLER, Richard D. Seismic reflection methods applied to engineering, environmental, and ground-water problems. In: **1st EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems**. European Association of Geoscientists & Engineers, 1988. p. cp-214-00005.

STOCKWELL, J. W. A course in geophysical image processing with Seismic Unix. **Center for Wave Phenomena**, v. 194, 2011.

TELFORD, William Murray; GELDART, Lloyd P.; SHERIFF, Robert E. **Applied geophysics**. Cambridge university press, 1990.

TRINDADE, Cintia et al. The Amanaus Cruise (5-25 July 2023) In The Centraleastern Amazonia To Better Understand Source 2 Sink Sediment Transfer. In: **17º Simpósio de Geologia da Amazônia Geotecnologias E Sustentabilidade: A Geologia Na Amazônia Atual. 23-25 outubro 2023, Santarem-PA. 2023.**

VILLAR(a), Jhan Carlo Espinoza et al., Contrasting regional discharge evolutions in the Amazon basin (1974–2004). **Journal of Hydrology**, v. 375, n. 3-4, p. 297-311, 2009.

VILLAR(b), Jhan Carlo Espinoza et al., Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon basin countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia, and Ecuador). **International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 29, n. 11, p. 1574-1594, 2009.

YILMAZ, Öz. **Seismic data analysis: Processing, inversion, and interpretation of seismic data**. Society of exploration geophysicists, 2001.