**UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE**
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE PÓS GRADUAÇÃO EM DINÂMICA DOS OCEANOS E DA TERRA

EDUARDO DOS REIS LEAUBON

# EVOLUÇÃO PLIO-QUATERNÁRIA DA PORÇÃO NOROESTE DO CONE SUBMARINO DO AMAZONAS: INTEGRAÇÃO DE GEOMORFOLOGIAS SÍSMICAS 3D DE ALTA RESOLUÇÃO E ARQUITETURAS DEPOSICIONAIS-ESTRUTURAIS

Niterói, RJ
2026

EDUARDO DOS REIS LEAUBON

# EVOLUÇÃO PLIO-QUATERNÁRIA DA PORÇÃO NOROESTE DO CONE SUBMARINO DO AMAZONAS: INTEGRAÇÃO DE GEOMORFOLOGIAS SÍSMICAS 3D DE ALTA RESOLUÇÃO E ARQUITETURAS DEPOSICIONAIS-ESTRUTURAIS

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra da Universidade Federal Fluminense como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Geociências.

ORIENTADOR: PROF. DR. CLEVERSON GUIZAN DA SILVA

COORIENTADOR: DR. ANDRES GORDON

Niterói, RJ

2026

Ficha catalográfica automática - SDC/BIG
Gerada com informações fornecidas pelo autor

L433e Leaubon, Eduardo dos Reis
EVOLUÇÃO PLIO-QUATERNÁRIA DA PORÇÃO NOROESTE DO CONE SUBMARINO DO AMAZONAS : INTEGRAÇÃO DE GEOMORFOLOGIAS SÍSMICAS 3D DE ALTA RESOLUÇÃO E ARQUITETURAS DEPOSICIONAIS-ESTRUTURAIS / Eduardo dos Reis Leaubon. - 2026.
64 f.: il.

Orientador: Cleverson Da Silva.
Coorientador: Andres Gordon.
Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense, Instituto de Geociências, Niterói, 2026.

1. Foz do Amazonas. 2. Porção Noroeste do Leque Submarino do Amazonas. 3. Interpretação Sísmica Tridimensional. 4. Geometrias Sísmicas de Complexos Turbidíticos Confinados. 5. Produção intelectual. I. Da Silva, Cleverson, orientador. II. Gordon, Andres, coorientador. III. Universidade Federal Fluminense. Instituto de Geociências. IV. Título.

CDD - XXX

Bibliotecário responsável: Debora do Nascimento - CRB7/6368

EDUARDO DOS REIS LEAUBON

# EVOLUÇÃO PLIO-QUATERNÁRIA DA PORÇÃO NOROESTE DO CONE SUBMARINO DO AMAZONAS: INTEGRAÇÃO DE GEOMORFOLOGIAS SÍSMICAS 3D DE ALTA RESOLUÇÃO E ARQUITETURAS DEPOSICIONAIS-ESTRUTURAIS

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra da Universidade Federal Fluminense como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Geociências.

---

Prof. Dr. Cleverson Guizan da Silva (Orientador – UFF)

---

Dr. Andres Gordon (Coorientador – Viridien/UERJ)

---

Prof. Dr. Antonio Fernando Menezes Freire (GIECAR - UFF)

---

Prof. Dr. Arthur Ayres Neto (DOT - UFF)

---

Prof. Dr. Daniel Praeg (Géoazur - Unice)

Niterói, RJ

2026

## RESUMO

A Bacia da Foz do Amazonas constitui um dos principais sistemas sedimentares de águas profundas da Margem Equatorial Brasileira, destacando-se pelo elevado aporte sedimentar, grande espessura do prisma clástico e expressivo potencial exploratório. Este estudo investiga a evolução estratigráfica, estrutural e deposicional da porção noroeste do Cone Submarino do Amazonas, com foco na relação entre tectônica gravitacional e o desenvolvimento de sistemas turbidíticos confinados do Mioceno Superior ao Recente. A análise baseia-se na integração de dados sísmicos tridimensionais em profundidade, dados de poços e atributos sísmicos, com ênfase em amplitude mínima e decomposição espectral. Os resultados indicam que, no intervalo pré-Pleistoceno Médio (~0,8 Ma), a arquitetura deposicional é dominada por sistemas turbidíticos fortemente confinados, controlados pela compartimentalização estrutural associada à tectônica de folhelhos móveis, com fluxos sedimentares direcionados ao longo de minibacias e limitada conectividade entre depocentros. A partir do Pleistoceno Médio, observa-se uma mudança significativa no sistema, marcada por aumento do aporte sedimentar e desenvolvimento de superfícies erosivas regionais, resultando em maior eficiência de transporte sedimentar e capacidade dos canais em transpor barreiras estruturais previamente atuantes. No intervalo pós-Pleistoceno Médio, o sistema evolui para um regime parcialmente confinado, caracterizado por canais mais erosivos, maior ocorrência de *bypass* sedimentar e aumento na frequência de depósitos de transporte de massa, refletindo elevada instabilidade do talude. A aplicação integrada de atributos sísmicos permitiu refinar a identificação das geometrias deposicionais e sua evolução temporal, evidenciando a transição entre diferentes estágios de confinamento. Os resultados demonstram que a interação entre tectônica gravitacional e variações no aporte sedimentar constitui o principal fator controlador da arquitetura deposicional do Cone Submarino do Amazonas, com implicações diretas para a compreensão de sistemas turbidíticos em margens passivas.



**Palavras-Chave:** Sísmica 3D, Bacia da Foz do Amazonas, Porcão Noroeste do Cone Submarino do Amazonas, Complexos Turbiditicos Confinados.

## ABSTRACT

The Foz do Amazonas Basin constitutes one of the main deep-water sedimentary systems of the Brazilian Equatorial Margin, characterized by high sediment supply, a thick clastic prism, and significant exploration potential. This study investigates the stratigraphic, structural, and depositional evolution of the northwestern portion of the Amazon Submarine Fan, focusing on the relationship between gravitational tectonics and the development of confined turbidite systems from the Late Miocene to the Present. The analysis is based on the integration of depth-migrated 3D seismic data, well data, and seismic attributes, with emphasis on minimum amplitude and spectral decomposition. The results indicate that, during the pre–Middle Pleistocene interval (~0.8 Ma), the depositional architecture is dominated by strongly confined turbidite systems, controlled by structural compartmentalization associated with mobile shale tectonics, with sediment routing preferentially guided along minibasin axes and limited connectivity between depocenters. From the Middle Pleistocene onward, a significant shift in the depositional system is observed, marked by increased sediment supply and the development of regional erosional surfaces, leading to enhanced sediment transport efficiency and the ability of channels to overcome previously effective structural barriers. In the post–Middle Pleistocene interval, the system evolves into a partially confined regime, characterized by more erosive channels, increased sediment bypass, and a higher frequency of mass-transport deposits, reflecting enhanced slope instability. The integrated application of seismic attributes allowed for a refined identification of depositional geometries and their temporal evolution, highlighting the transition between different confinement stages. The results demonstrate that the interaction between gravitational tectonics and variations in sediment supply is the primary control on the depositional architecture of the Amazon Submarine Fan, with direct implications for the understanding of turbidite systems in passive margin settings.



**Keywords:** 3D Seismic, Foz do Amazonas Basin, Northwestern Amazon Submarine Fan, Confined Turbidite Systems.

# *Sumário*


**1. INTRODUÇÃO ..... 9**

**2. CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL ..... 11**

**3. RELEVÂNCIA DO TEMA E OBJETIVOS DA PESQUISA ..... 13**

**4. MÉTODOS E BASE DE DADOS ..... 14**

**4.1. Dados Utilizados ..... 14**

**4.2. Teorias e Métodos ..... 15**

4.2.1. Tectônica Gravitacional e de Folhelhos em Margens Passivas ..... 16

4.2.2. Estratigrafia e Tectônica de Leques Submarinos com Sistemas Turbidíticos Confinados em Margens Continentais ..... 17

4.2.3. Evolução Estratigráfica e Tectônica do Leque Submarino do Amazonas, com Foco na Porção Noroeste ..... 18

4.2.4. Interpretação de Morfologias Sísmicas e de Sísmofácies em Leques Submarinos ..... 20

4.2.5. Interpretação Sísmica Semi-Automática ..... 22

4.2.6. Análise de Poços ..... 23

4.2.7. Atributos Sísmicos ..... 24

**5. RESULTADOS ..... 26**

**5.1. Influência dos Folhelhos Móveis na Seção Cenozóica ..... 26**

**5.2. Identificação dos Refletores e Principais Sequências Estratigráficas ..... 29**

**5.3. Caraterização Sísmicas e Geomorfologias no Intervalo de Estudo ..... 35**

**5.4. Caracterização Sísmica do Intervalo Pré-Pleistoceno Médio – Plioceno e Pleistoceno Inferior ..... 36**

5.4.1. Mapa de Amplitude ..... 36

5.4.2. Identificação de Morfologias Sísmicas ..... 38

**5.5. Caracterização Sísmica do Intervalo Pós-Pleistoceno Médio – Pleistoceno Superior ..... 44**

5.5.1. Mapa de Amplitude ..... 44

5.5.2 Identificação de Morfologias Sísmicas ..... 45

**6. DISCUSSÃO ..... 52**

**6.1. Arquiteturas Deposicionais do Intervalo Pré-Pleistoceno Médio ..... 52**

**6.2. Arquiteturas Deposicionais do Invervalo Pós-Pleistoceno Médio ..... 55**

**7. CONCLUSÕES..... 60**

**8. REFERÊNCIAS..... 62**

# 1. Introdução

A Bacia da Foz do Amazonas, situada na Margem Equatorial Brasileira, delimitada a oeste pela Guiana Francesa e ao leste pela Bacia do Pará-Maranhão, englobando os estados do Amapá e Pará, constitui um dos mais extensos e complexos sistemas sedimentares marinhos do planeta, com uma área aproximada de 268.000 km². A bacia integra plataforma, talude e um domínio profundo caracterizado pelo desenvolvimento do Leque Submarino do Amazonas, cuja construção se iniciou entre o Mioceno médio e superior (aprox. 8–15 Ma) em resposta ao estabelecimento definitivo da drenagem amazônica e à intensificação do aporte sedimentar relacionado à orogenia andina (Damuth & Kumar, 1975; Flood et al., 1997).

A evolução estratigráfica da bacia é marcada por sucessivas fases de subsidência, reorganização deposicional e amplificação do transporte sedimentar gravitacional, resultando em uma espessa coluna sedimentar desde depósitos cretáceos a holocênicos que registra a transição entre sistemas fluvio-deltaicos, sistemas de talude e do leque submarino em águas profundas.

O arcabouço estrutural exerce papel determinante nessa organização. A partir do Mioceno superior, a ativação de um nível de descolamento regional promoveu a formação de um sistema gravitacional acoplado, caracterizado por falhas normais extensivas na porção proximal e cinturões de dobras e empurrões na região média do talude (Reis et al., 2010).

Esse sistema controla diretamente a compartimentação do fundo oceânico, a distribuição de paleoaltos e depressões e a recorrência de feições de instabilidade que por sua vez condicionam tanto o direcionamento dos fluxos turbidíticos quanto a localização de megadeslizamentos e outras fontes de sedimentação. Silva et al. (2016) demonstra a existência de três megacomplexos de movimentos de massa (Amapá, Central Amazon Fan e Pará-Maranhão) que se acumulam desde o Mioceno tardio, cobrindo mais de 300.000 km² e influenciam diretamente a arquitetura deposicional regional.

O Leque Submarino do Amazonas, com extensão superior a 700 km em direção ao oceano profundo, representa o ápice do sistema deposicional profundo e é globalmente reconhecido por sua dimensão e complexidade. Trabalhos pioneiros com sonar GLORIA, sísmica de alta resolução e testemunhos (Damuth et al., 1988; Flood et al., 1991) documentaram sistemas de canais distributários, construídos por fluxos turbidíticos capazes de transportar sedimentos por centenas de quilômetros. A coexistência de canais meandrantes ativos, sistemas de *submarine levees*, lóbulos deposicionais arenosos e sucessivos episódios de avulsão caracteriza um padrão típico de leques gigante, similar apenas aos sistemas do Golfo de Bengala, Congo e Indus (Normark & Carlson, 2003; Wynn et al., 2007).

No caso do Leque Submarino do Amazonas, processos adicionais são essenciais para explicar sua arquitetura singular. As taxas de sedimentação quaternárias são excepcionalmente elevadas,

variando de 50 a 115 cm/ka, com incrementos superiores a 30 cm/ka (Manley & Flood, 1988). Tal sedimentação rápida e excessiva culminou em processos de instabilidade sedimentar que originou uma tectônica gravitacional gerando compressão na parte distal e uma sucessão de depósitos caóticos, com sismofácies transparentes e de caráter massivo, que mascaram trechos significativos do registro estratigráfico e impõem desafios à reconstrução evolutiva do leque (Araújo et al., 2009). Tais depósitos, associados a pressões de poro elevadas e à mobilização de camadas argilosas subjacentes devido aos níveis de compressão, contribuem para a ciclicidade de colapso e reconstrução topográfica, influenciando a migração de canais e o posicionamento de lóbulos.

Variações glacioeustáticas também podem trabalhar modulando a transferência sedimentar na região: durante baixos níveis do mar, sedimentos terrígenos são entregues diretamente ao Cânion Submarino do Amazonas, acionando episódios intensivos de progradação do leque que podem possuir depósitos arenosos que atingem dezenas de metros, contrariando modelos clássicos que postulavam que o Leque Amazônico era totalmente dominado por finos (Damuth et al., 1988; Flood et al., 1991). Já durante os altos níveis do mar, é predominante a sedimentação mais fina, principalmente com hemipelágicos (siltes e folhelhos), além de uma intensa reorganização dos depocentros e mini-bacias (Flood & Piper, 1997).

Nesse contexto, a porção noroeste do leque se destaca como uma área tectono-estaratigraficamente complexa pois trata-se de uma região influenciada simultaneamente por falhamento extensional proximal, compressão distal, megadeslizamentos recorrentes e pela variação do aporte sedimentar. Consequentemente, apresenta diversidade de feições sísmicas, incluindo complexo de canais e lóbulos intercalados com hemipelágicos e movimentos de transporte de massa. Apesar do grande número de estudos regionais, faltam sínteses que integrem arquitetura sedimentar, morfologias sísmicas e evolução processual com foco específico nesse setor do leque, principalmente no que tange a utilização de dados sísmicos tridimensionais.

O presente trabalho responde a essa lacuna ao caracterizar a arquitetura sedimentar e as principais morfologias sísmicas da porção noroeste do Leque Submarino do Amazonas. O estudo associa dados sísmicos tridimensionais reprocessados com alta resolução e poços perfurados na área à literatura regional e a modelos globais de sistemas de Leques Submarinos em águas profundas, com objetivo de avançar a compreensão das relações entre tectônica gravitacional, variação eustáticas do nível do mar, dinâmica de fluxos turbidíticos, distribuição de transporte de massas (MTDs) e organização espacial de corpos arenosos. Essa abordagem permite esclarecer a evolução deposicional do setor NW e, simultaneamente, contribuir para discussões mais amplas sobre a estratigrafia de leques gigantes em margens passivas.




**Figura 1:** Mapa de localização da Bacia da Foz do Amazonas, destacando os conjuntos de dados sísmicos 3D disponíveis na área de estudo. Os polígonos em azul representam os volumes sísmicos utilizados. O polígono delimitado em vermelho indica a área de interesse deste estudo.

## 2. Contexto Geológico Regional

O arcabouço estratigráfico da Bacia da Foz do Amazonas é constituído por um embasamento pré-cambriano sobre o qual se desenvolvem três supersequências principais: Pré-rifte, Rifte e Drifte (Figueiredo; Zalán; Soares, 2007).

O embasamento é composto predominantemente por rochas metamórficas e ígneas associadas à Faixa Móvel Rokelides, de idade neoproterozoica, formada durante a amalgamação do Gondwana. Esse substrato estrutural apresenta forte anisotropia crustal e desempenhou papel fundamental na localização e geometria dos grábens rifte, controlando a orientação preferencial NNO–SSE das principais estruturas da bacia (Figueiredo; Zalán; Soares, 2007).

A Supersequência Pré-rifte é representada por depósitos essencialmente continentais associados à Formação Calçoene, composta por arenitos avermelhados intercalados com basaltos de idade mesotriássica a eojurássica. Esses depósitos refletem condições intracratônicas típicas de bacias do tipo sag, desenvolvidas em ambiente árido, anteriores à ruptura continental e caracterizadas por geometrias tabulares e baixa compartimentalização estrutural (Brandão; Feijó, 1994; Figueiredo; Zalán; Soares, 2007).

A Supersequência Rifte corresponde ao estágio de estiramento crustal e formação de grábens assimétricos, preenchidos por sucessões predominantemente siliciclásticas da Formação

Cassiporé, com intercalações pelíticas e episódios evaporíticos/carbonáticos associados à litofácies Codó. Esse intervalo registra ambientes continentais a transicionais, localmente influenciados por incursões marinhas, com espessuras que podem ultrapassar 7 km e forte controle tectônico sin-deposicional, evidenciado por crescimento de estratos em direção às falhas de borda (Brandão; Feijó, 1994; Figueiredo; Zalán; Soares, 2007).

A Supersequência Drifte inicia-se no final do Albiano (~102 Ma), marcando a instalação definitiva da margem passiva e o início da sedimentação marinha franca. Esse estágio é caracterizado por subsidência térmica regional e pela organização de sistemas deposicionais controlados por variações eustáticas e aporte sedimentar, sendo possível reconhecer três grandes domínios: um domínio siliciclástico neocretáceo, seguido por uma plataforma mista carbonático-siliciclástica no Paleógeno–Mioceno, e, por fim, o desenvolvimento do Cone Submarino do Amazonas a partir do Neomioceno (~10,7 Ma) (Figueiredo; Zalán; Soares, 2007).

A evolução da bacia passa então a ser dominada pela fase drifte, estabelecida após o rifteamento cretáceo associado à abertura do Atlântico Equatorial. Nesse contexto, a subsidência térmica regional, combinada a oscilações eustáticas globais e reativações tectônicas intraplaca, condicionou a arquitetura das sequências deposicionais marinhas ao longo do Neocretáceo e Paleógeno (Figueiredo; Zalán; Soares, 2007; Haq; Hardenbol; Vail, 1988).

Durante o Paleógeno, observa-se uma alternância entre sedimentação siliciclástica e desenvolvimento de plataformas carbonáticas (Formação Amapá), controlada por eventos de afogamento regional e reorganizações paleogeográficas (Figueiredo; Zalán; Soares, 2007; Rossetti, 2001). No entanto, é a partir do Mioceno que ocorre a principal inflexão na dinâmica deposicional da bacia, com o aumento expressivo do aporte terrígeno associado ao soerguimento andino e à reorganização do sistema de drenagem amazônico (Hoorn et al., 1995; Figueiredo; Zalán; Soares, 2007).

Esse processo culmina no estabelecimento do Cone Submarino do Amazonas, que passa a dominar o registro estratigráfico a partir do Neomioceno. Desde então, a bacia registra elevadas taxas de sedimentação siliciclástica, com desenvolvimento de sistemas turbidíticos de grande escala e progressiva progradação para águas profundas. Apesar de representar menos de 11 Ma, esse intervalo responde por mais de 50% do volume sedimentar da fase pós-rifte, evidenciando a magnitude do aporte sedimentar recente (Figueiredo; Zalán; Soares, 2007).

Nesse contexto, a evolução Neomioceno–Quaternária da bacia, foco deste estudo, reflete a interação entre aporte sedimentar elevado, variações glacioeustáticas e tectônica gravitacional, controlando a geração de espaço de acomodação e a arquitetura complexa dos sistemas deposicionais em águas profundas do Cone do Amazonas.

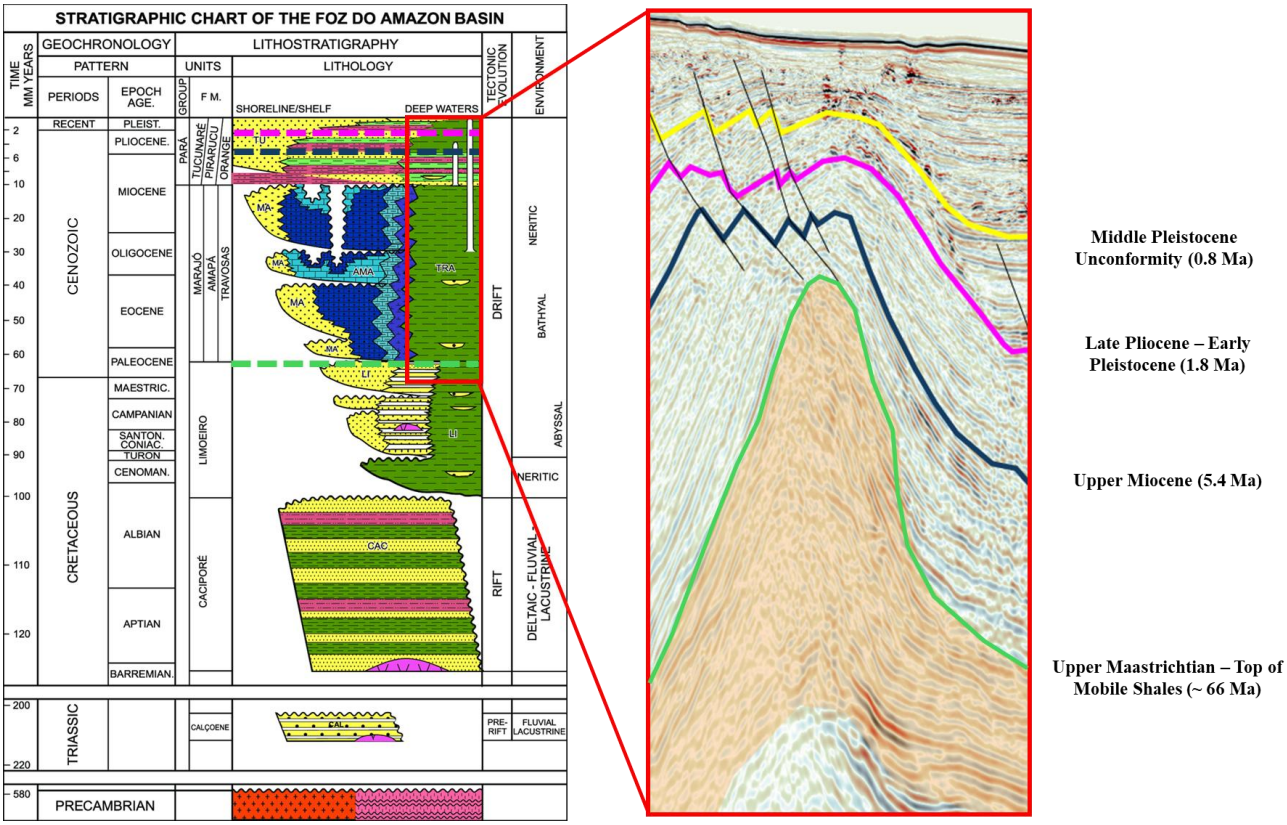



**Figura 2:** Carta cronoestratigráfica da Bacia da Foz do Amazonas, modificada de Brandão e Feijó (1994), escolhida por representar de forma mais detalhada o intervalo dos folhelhos móveis no Cone Submarino do Amazonas, com destaque para os principais horizontes utilizados neste estudo. As linhas tracejadas representam: em verde, o topo da Formação Limoeiro (nível de folhelhos móveis); em azul, o horizonte do Mioceno Superior (5,4 Ma); e em rosa, o horizonte do Pleistoceno Inferior (1,8 Ma). Na seção sísmica (cortesia Viridien) associada, as linhas nas mesmas cores correspondem aos respectivos horizontes interpretados. O intervalo preenchido em laranja representa o pacote de folhelhos móveis, enquanto a linha em amarelo indica a discordância do Pleistoceno Médio (~0,8 Ma), identificada a partir de dados de poço. O polígono em vermelho na carta delimita a área de estudo, localizada em águas profundas do Cone Submarino do Amazonas.

## *3. Relevância do Tema e Objetivos da Pesquisa*

Esta pesquisa tem como objetivo principal investigar a evolução estratigráfica e estrutural da porção noroeste do Leque Submarino do Amazonas, com ênfase na identificação e caracterização de possíveis sistemas turbidíticos parcialmente confinados associados à tectônica gravitacional do prisma sedimentar.

A pesquisa concentra-se na identificação de feições e morfologias sísmicas e a sua correlação com os principais momentos deposicionais e estruturais que atuaram desde o Mioceno Superior até o Recente. Busca-se avaliar como os sucessivos pulsos sedimentares, desde os eventos de

intensificação do aporte terrígeno associados ao soerguimento andino no Mioceno até as variações glacioeustáticas quaternárias, podem ter influenciado a ativação a migração da deformação gravitacional e o desenvolvimento de possíveis domínios confinados no sistema.

Dessa forma, o objetivo final deste estudo é estabelecer um modelo evolutivo integrado para a porção NW do Leque Submarino do Amazonas, no qual arquitetura turbidítica, pulsos sedimentares e dinâmica da tectônica gravitacional sejam interpretados de forma acoplada, contribuindo para o entendimento dos mecanismos de confinamento estrutural em margens passivas sedimentares e para o refinamento de modelos deposicionais aplicáveis a sistemas de águas profundas da região.

# 4. Métodos e Base de Dados

## 4.1. Dados Utilizados

Esta pesquisa baseia-se na integração de dados sísmicos tridimensionais em profundidade, informações de poços exploratórios e conceitos clássicos e contemporâneos de estratigrafia sísmica e geomorfologia sísmica aplicados a sistemas siliciclásticos de águas profundas influenciados por tectônica gravitacional. O principal conjunto de dados sísmicos corresponde ao volume Amapá Merge Re-Imaging, cedido por cortesia da Viridien (ex CGG) (Fig. 3), cuja qualidade de imagem e resolução vertical permitem a análise detalhada da arquitetura estratigráfica e estrutural.

Estes dados sísmicos estão migrados em profundidade com métodos Kirchhoff até 15 quilômetros de profundidade, utilizando modelo de velocidade *Full Waveform Inversion* (FWI) de 10 Hz. A resolução do modelo FWI permitiu identificação em detalhe de diversas feições, como por exemplo, os folhelhos móveis possivelmente da Formação Limoeiro.

Foram também utilizados os perfis compostos e digitais dos poços 1-BP-1A-APS e 1-BP-2-APS, incluindo informações de litologia, Raios Gama, resistividade, densidade, velocidade e marcadores cronoestratigráficos. Esses dados foram fundamentais para a calibração poço-sísmica, possibilitando a amarração entre superfícies sísmicas interpretadas e idades geológicas reconhecidas.

Os marcadores cronoestratigráficos adotados neste estudo incluem o Mioceno Superior (5,4 Ma), o Pleistoceno Inferior (1,8 Ma), o Pleistoceno Médio (800 ka) e o Fundo do Mar. Com base nesses horizontes-chave, foram definidos três intervalos principais de análise: (i) Mioceno Superior–Pleistoceno Inferior, (ii) Pleistoceno Inferior–Pleistoceno Médio e (iii) Pleistoceno Médio–

Recente. Esses intervalos estruturam toda a análise sismoestratigráfica subsequente e servem como arcabouço temporal para a interpretação dos pulsos sedimentares e dos eventos estruturais associados.

Os horizontes do Mioceno Superior, Pleistoceno Inferior, Pleistoceno Médio e Fundo do Mar foram mapeados em toda a cobertura 3D e utilizados como superfícies de referência para a extração semi-automática de mais de 100 horizontes intermediários. Essas superfícies constituíram a base para a geração de mapas estruturais, mapas de espessura e para a construção do Modelo de Tempo Geológico Relativo, empregado na análise cronoestratigráfica do empilhamento sedimentar.

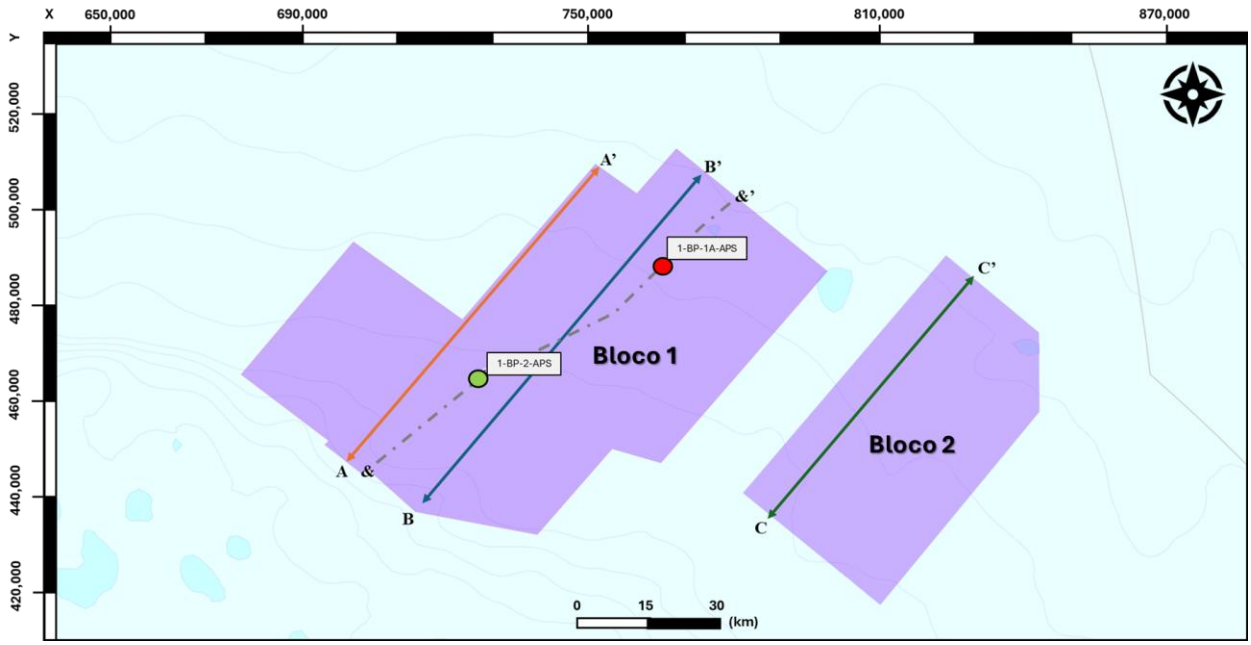



**Figura 3:** Mapa da base de dados utilizada neste estudo. O círculo em verde representa o poço 1-BP-2-APS, enquanto o círculo em vermelho indica o poço 1-BP-1A-APS. Os polígonos em roxo correspondem aos volumes sísmicos 3D (Amapá Merge Re-Imaging), cedidos por cortesia da Viridien, sendo o bloco localizado a oeste denominado Bloco 1 e o bloco a leste denominado Bloco 2. Os traços A–A', B–B', C–C' e D–D' representam a localização das linhas sísmicas regionais interpretadas, utilizadas ao longo deste estudo.

## *4.2. Teorias e Métodos*

### 4.2.1. Tectônica Gravitacional e de Folhelhos em Margens Passivas

Grandes sistemas deltaicos desenvolvidos sobre margens passivas apresentam deformação gravitacional da sucessão pós-rifte, acomodada por um arranjo cinemático composto por extensão a montante, domínio translacional intermediário e encurtamento distal em cinturões de dobras e empurrões (Brun; Fort, 2011; Cobbold; Szatmari, 1991; Rowan et al., 2004). Em sistemas dominados por folhelhos, a mobilidade é controlada por propriedades reológicas dependentes de sobrepressão e soterramento rápido, como no caso do Cone Submarino do Amazonas. Folhelhos móveis correspondem a sequências argilosas submetidas a condições críticas de tensão, nas quais ocorre destruição da fábrica sedimentar original e transição para comportamento plástico-dúctil (Brown, 1990; Cohen; Mcclay, 1996; Spina et al., 2025). A sobrepressão pode ser induzida por compactação associada a altas taxas de sedimentação, transformações diagenéticas (smectita–ilita), geração e expulsão de hidrocarbonetos e encurtamento tectônico (Osborne; Swarbrick, 1997; Flemings, 2021; Tingay et al., 2013; Spina et al., 2025).

Do ponto de vista mecânico, dois mecanismos principais são reconhecidos: *gravity spreading* e *gravity gliding*. O primeiro está associado à carga sedimentar diferencial sobre um substrato fraco; o segundo é controlado principalmente pelo basculamento regional da margem e variações de espessura da camada dúctil (Jackson et al., 1994; Rowan et al., 2004; Jackson; Hudec, 2017; Spina et al., 2025). Em margens hiperestendidas, a arquitetura litosférica herdada exerce influência direta sobre a geometria e a evolução do sistema gravitacional (Manatschal, 2004; Sibuet et al., 2004; Sapin et al., 2012; Spina et al., 2025).

A organização estrutural típica inclui: (a) domínio extensional updip, caracterizado por falhas normais lístricas de crescimento; (b) domínio de alta mobilidade de folhelhos, com cristas, paredes, diapiros e minibacias; (c) domínio translacional; e (d) cinturão de dobras e empurrões distal (Corredor et al., 2005; Damuth, 1994; Doust; Omatsola, 1990; Spina et al., 2025). Ainda, observa-se que existe um desbalanceamento entre extensão e encurtamento, com extensão updip aproximadamente duas vezes superior ao encurtamento distal, interpretado como resultado de compactação lateral tectônica dos folhelhos móveis (Butler; Paton, 2010; Spina et al., 2025). Na maioria dos casos, também, a evolução temporal do sistema gravitacional demonstra migração progressiva da deformação para jusante acompanhando a progradação deltaica do sistema sedimentar (Damuth, 1994; Rouby et al., 2011; Spina et al., 2025).

Em relação a prospecção de hidrocarbonetos, o nível de folhelhos móveis pode atuar como rocha geradora, sendo um elemento essencial para um sistema petrolífero ativo. Além disso, como os folhelhos móveis também geram um nível de descolamento regional, podem criar conduto de migração vertical, alimentando sistemas de reservatórios mais recentes (Bustin, 1988; Ekweozor; Daukoru, 1994; Spina et al., 2025).

### *4.2.2. Estratigrafia e Tectônica de Leques Submarinos com Sistemas Turbidíticos Confinados em Margens Continentais*

Os leques submarinos e os sistemas associados de deltas e cones de águas profundas constituem componentes importantes na arquitetura sedimentar de margens continentais passivas, atuando na transferência de grandes volumes de sedimentos terrígenos até o talude continental e áreas mais distais e profundas da bacia (Posamentier; Kolla, 2003). Em margens caracterizadas por elevado aporte sedimentar e subsidência contínua, como observado em grandes sistemas flúvio-deltaicos, a interação entre processos deposicionais, variações do nível relativo do mar e controles tectônicos resulta na formação de sucessões estratigráficas espessas e estruturalmente complexas (Weimer et al., 2007).

A evolução desses sistemas está ligada à eficiência do *bypass* sedimentar na plataforma continental, geralmente mediada por cânions submarinos incisos e sistemas de complexos de canais no talude, que conectam diretamente ambientes costeiros e fluviais a domínios de águas profundas (Prather et al., 1998). Dados sísmicos 3D de alta resolução demonstram que os leques submarinos não representam extensões passivas dos deltas subaéreos, mas sistemas dinâmicos, cuja organização estratigráfica e geomorfológica é condicionada por processos autogênicos, como avulsões e migração de canais, e alogênicos, como variações eustáticas e tectônicas (Zhang et al., 2019).

Em margens com elevado aporte sedimentar, a carga sedimentar contínua pode induzir instabilidade gravitacional do talude, promovendo a mobilização de níveis dúcteis, como folhelhos sobrepressurizados, que atuam como superfícies de descolamento regionais. Esse processo resulta no desenvolvimento de sistemas estruturais acoplados, caracterizados por domínios extensionais proximais e compressivos distais, organizados em minibacias e anticlinais em crescimento sinsedimentar (Reis et al., 2010; Souza et al., 2025). No Cone Submarino do Amazonas, esse arcabouço estrutural exerce controle direto sobre a paleotopografia do talude, condicionando o roteamento dos fluxos turbidíticos, a distribuição dos depocentros e o grau de confinamento dos sistemas deposicionais.

Sistemas turbidíticos confinados evoluem por meio de um acoplamento hierárquico entre desenvolvimento estrutural e processos sedimentares, operando desde a escala de bacia até a escala de leito (Kneller et al., 2016). Nesse contexto, o arcabouço tectônico regional define a geometria de primeira ordem da bacia, enquanto estruturas intermediárias impõem confinamento lateral e axial aos fluxos gravitacionais. Em escala local, depósitos de transporte de massa (MTDs) geram topografia dinâmica, criando novas áreas de acomodação e barreiras temporárias ao fluxo sedimentar (Kneller et al., 2016).

A relação entre crescimento estrutural e taxa de acumulação sedimentar controla a evolução desses sistemas. Quando o crescimento estrutural supera a sedimentação, ocorre desvio e aprisionamento dos fluxos; quando o suprimento sedimentar predomina, estruturas podem ser soterradas ou transpostas, reduzindo o grau de confinamento (Howlett et al., 2020; Kneller et al., 2016). Esse balanço dinâmico governa a transição entre fases dominadas por confinamento, *bypass* e maior conectividade entre depocentros.

Esse comportamento é amplamente documentado em sistemas modernos e antigos, nos quais domínios extensionais tendem a alinhar e confinar canais, enquanto domínios compressivos promovem deflexão, *ponding* e reorganização do fluxo sedimentar (Haughton et al., 2000; Mitchell et al., 2021). Depósitos de transporte de massa também desempenham papel relevante, remodelando o talude e influenciando diretamente a distribuição dos sistemas turbidíticos (Kneller et al., 2016).

Em síntese, o confinamento turbidítico resulta de um controle multiescalar, no qual o regime tectônico define a configuração da bacia, estruturas sinsedimentares controlam o roteamento dos fluxos e processos gravitacionais locais modulam a arquitetura deposicional. No Cone Submarino do Amazonas, essa interação é particularmente evidente, refletindo o acoplamento entre tectônica gravitacional, elevado aporte sedimentar e reorganização contínua dos sistemas deposicionais em águas profundas.

### *4.2.3. Evolução Estratigráfica e Tectônica do Leque Submarino do Amazonas, com Foco na Porção Noroeste*

O Leque Submarino do Amazonas constitui um dos maiores e mais volumosos sistemas de sedimentação em águas profundas do planeta, representando o principal depocentro da Margem Equatorial Brasileira desde o Mioceno Superior (Damuth; Kumar, 1975). Sua evolução está diretamente associada ao estabelecimento do Rio Amazonas como sistema fluvial transcontinental e ao soerguimento progressivo da Cordilheira dos Andes, que intensificaram significativamente o aporte sedimentar terrígeno à margem equatorial (Figueiredo et al., 2007; Hoorn et al., 2017).

O início efetivo da deposição do leque ocorreu entre aproximadamente 9 e 10 Ma, marcando uma mudança abrupta no regime deposicional da bacia (Figueiredo et al., 2007). A instalação inicial do prisma sedimentar concentrou-se no compartimento sudeste; entretanto, dados sísmicos regionais indicam que, a partir de ~5,5 Ma, ocorreu migração progressiva do principal eixo deposicional para o setor noroeste, acompanhada por espessamento diferencial do prisma clástico e desenvolvimento de assimetria estrutural persistente entre os compartimentos NW e SE (Cruz et al., 2019; Souza et al., 2025).

Desde o Mioceno Superior, a estratigrafia do leque é dominada por sucessões espessas de sedimentos turbidíticos organizados em complexos canal–levee, lobos arenosos distais, depósitos hemipelágicos e volumosos depósitos de transporte de massa (Damuth et al., 1988; Pirmez; Flood, 1995; Maslin et al., 2006). A arquitetura desses sistemas é fortemente modulada por variações eustáticas e controles orbitais no Neógeno e Quaternário, que regulam a eficiência de *bypass* sedimentar, a frequência de avulsões e a alternância entre fases dominadas por agradação arenosa e intervalos hemipelágicos (Maslin et al., 2006; Tortarolo et al., 2024). Contudo, além do controle eustático, o desenvolvimento do leque está intrinsecamente associado à ativação progressiva de um sistema de tectônica gravitacional regional.

A partir de aproximadamente 8 Ma, o aumento expressivo das taxas de sedimentação promoveu a ativação de falhas normais extensionais proximais e cinturões compressivos distais, configurando um sistema gravitacional acoplado (Cobbold et al., 2004; Reis et al., 2010). O principal nível de descolamento situa-se no topo da Formação Limoeiro (69–70 Ma), atuando como décollement basal para a maior parte da deformação fina (*thin-skinned*) associada ao colapso gravitacional do leque (Reis et al., 2010; Souza et al., 2025). Adicionalmente, no compartimento NW reconhecem-se múltiplos níveis de descolamento, incluindo um nível mais jovem desenvolvido próximo à interface entre os carbonatos da Plataforma Amapá e os sedimentos clásticos do leque (~10,5 Ma), os quais condicionam a distribuição vertical da deformação e a compartimentalização hidráulica do sistema (Perovano et al., 2009; Reis et al., 2010; Souza et al., 2025).

O primeiro pulso deformacional significativo ocorreu entre ~5,5 e 3,7 Ma, quando o redirecionamento do aporte sedimentar para NW intensificou a carga sobre o talude, promoveu aumento expressivo da sobrepressão ao longo do descolamento basal e desencadeou propagação frontal da deformação compressiva (Cruz et al., 2019; Souza et al., 2025). Esse intervalo marca o estabelecimento do padrão estrutural clássico do leque amazônico, caracterizado por domínio extensional a montante e cinturão compressivo a jusante, além de abandono progressivo de falhas extensionais internas em favor da ativação de estruturas mais distais.

Entre ~3,7 e 2 Ma, a continuidade do elevado aporte sedimentar, associada à geração de gás termogênico a partir de níveis ricos em matéria orgânica relacionados aos eventos anóxicos oceânicos (OAE2 e OAE3 – Cenomaniano-Turoniano e Coniaciano-Maastrichtiano respectivamente), intensificou o regime de sobrepressão ao longo do décollement, favorecendo migração progressiva da deformação para setores mais externos e ampliação da largura do cinturão compressivo (Souza et al., 2025).

A partir de aproximadamente 2 Ma, o incremento das taxas de sedimentação quaternárias, em parte controladas por intensificação dos ciclos glacioeustáticos deste período, desencadeou nova fase de aceleração da deformação gravitacional, caracterizada por ativação simultânea de múltiplas falhas extensionais mais distais, migração bacia-afora do front compressivo e compartimentalização da sobrepressão entre sistemas de falhas (Perovano et al., 2009; Maslin et al., 2006; Souza et al., 2025). No compartimento NW, diferentemente do setor SE onde a sobrepressão está

predominantemente associada à subcompactação, observa-se contribuição significativa de geração termogênica de gás e processos diagenéticos, o que explica a maior complexidade estrutural, maior espessura sedimentar (>9–10 km) e maior maturidade do sistema gravitacional nesse setor (Perovano et al., 2009; Cobbold et al., 2004; Souza et al., 2025).

Em síntese, o Leque Submarino do Amazonas, particularmente na porção noroeste, constitui um sistema de águas profundas no qual pulsos sedimentares mioceno–quaternários, herança estrutural cretácea e mecanismos térmicos e diagenéticos de geração de sobrepressão interagem de forma fortemente acoplada. Esse acoplamento controla a ativação e reativação de níveis de descolamento, a migração progressiva da deformação e a arquitetura estratigráfica e estrutural do prisma clástico desde o Mioceno Superior até o Recente, configurando-o como um modelo de referência para margens passivas sedimentares submetidas à tectônica gravitacional ativa.

À luz dos modelos conceituais discutidos anteriormente para sistemas turbidíticos estruturalmente controlados em margens passivas e contextos gravitacionais ativos, o Leque Submarino do Amazonas apresenta características compatíveis com o desenvolvimento de domínios parcialmente confinados, nos quais a interação entre crescimento estrutural, sobrepressão e elevada taxa de sedimentação pode ter condicionado o roteamento de canais, o aprisionamento de fluxos e a compartimentação de depocentros. A presença de múltiplos níveis de descolamento, cinturões compressivos ativos, falhas extensionais sinsedimentares e recorrência de depósitos de transporte de massa sugere que a arquitetura turbidítica do setor NW pode refletir mecanismos análogos aos descritos em sistemas confinados associados à tectônica gravitacional em outras margens sedimentares. Nesse contexto, este estudo concentra-se na avaliação integrada da arquitetura sísmica e estratigráfica da porção noroeste do leque, com o objetivo de investigar a existência, a geometria e a evolução de possíveis sistemas turbidíticos confinados associados à dinâmica gravitacional do prisma sedimentar amazônico.

### *4.2.4. Interpretação de Morfologias Sísmicas e de Sísmofácies em Leques Submarinos*

Baseado no contexto geológico apresentado para os sistemas de Leques Submarinos e Turbiditos Confinados, foi realizada a interpretação sísmica conduzida com base nos princípios da estratigrafia sísmica, segundo os quais refletores tendem a representar superfícies cronocorrelatas, permitindo reconstruir a arquitetura deposicional por meio da análise de continuidade, configuração externa, amplitude, padrões de terminação e, principalmente, a morfologia sísmica das estruturas típicas desses sistemas (Vail, 1976; Mitchum; Vail; Sangree, 1977).

A análise concentrou-se na identificação desses elementos arquiteturais típicos de sistemas de leques submarinos profundos. Sistemas de canais foram reconhecidos por geometrias côncavas,

padrões erosivos na base e forte expressão em mapas de amplitude e amplitude *Root Mean Square* (RMS), frequentemente exibindo traçados sinuosos ou anastomosados (Prather et al., 1998; Weimer et al., 2007; Zhang et al., 2019). Complexos canal–levee foram identificados por geometrias assimétricas e refletores contínuos de menor amplitude adjacentes aos eixos canalizados.

Corpos lobulares foram interpretados como lobos de fundo de bacia ou *splays* distais, caracterizados por geometrias tabulares, continuidade lateral moderada e padrões distributários evidenciados em mapas de atributos (Curray et al., 2002; Ma et al., 2023). Já pacotes sísmicos caóticos, com baixa continuidade interna e ausência de organização geométrica, foram interpretados como depósitos de transporte de massa (MTDs), associados a fases de instabilidade do talude relacionadas à sobrecarga sedimentar e tectônica gravitacional (Flood; Piper, 1997; Maslin et al., 2006; Zhang et al., 2019).

Além de tais feições, por ser um leque controlado por tectônica gravitacional e de folhelhos móveis, sismofácies plano paralelas, tiltadas, transparentes e levemente caóticas internamente, com redução abrupta de refletividade onde, na maioria das vezes, se encontra dificuldade na definição da base do intervalo devido a baixos contrastes de impedância e baixos valores de velocidade intervalar podem ser interpretadas como o pacote de folhelhos móveis (Morley, 2003; Soto; Hudec; Heidari, 2021; Spina et al., 2025).

A aplicação sistemática de atributos sísmicos, como amplitude mínima e RMS, ao longo das superfícies e em janelas estratigráficas, foi fundamental para realçar feições deposicionais e estruturalmente controladas. Esses atributos permitiram identificar padrões de empilhamento compensacional, espessamento diferencial, deflexão de trajetórias de canais e possíveis evidências de confinamento estrutural em minibacias, particularmente relevantes para a avaliação do papel da tectônica gravitacional na organização do sistema.

Essa abordagem integrada, combinando interpretação estrutural, análise de fácies sísmicas, atributos geomorfológicos e calibração estratigráfica, permitiu reconstruir de forma robusta a evolução deposicional da porção noroeste do Leque Submarino do Amazonas, fornecendo o arcabouço necessário para avaliar a interação entre pulsos sedimentares, dinâmica gravitacional e desenvolvimento de ambientes turbidíticos potencialmente confinados. As feições comentadas anteriormente como complexos de canais erosivos, complexos de canais levee, leques, transportes de massa e folhelhos moveis podem ser visualizadas na Tabela 1, onda existem alguns exemplos destas geometrias sísmicas no intervalo do Cone do Amazonas (Tortoniano ao Recente).

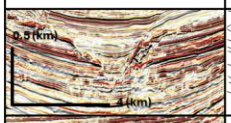
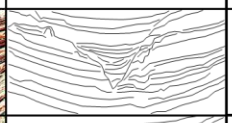
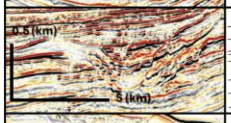
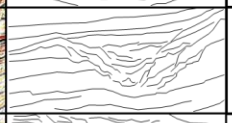
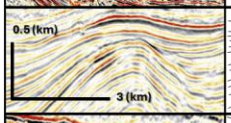
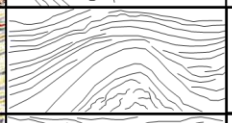
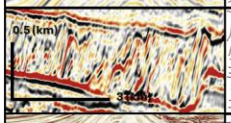
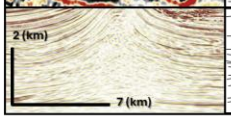
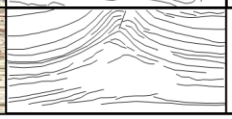
| Fácies Sísmicas | Refletores Sísmicos | Terminações Sísmicas | Descrição do Evento |
|---|---|---|---|
|  |  | Onlaps, truncamentos erosivos, refletores plano-paralelos e vales em forma de "V". | Cânions submarinos: grandes feições erosivas caracterizadas por geometrias sísmicas internas variáveis. Essas feições são identificadas principalmente do Pleistoceno Médio ao Recente, estando frequentemente associadas à Superfície Erosiva do Pleistoceno Médio. |
|  |  | Onlaps, truncamentos erosivos, refletores plano-paralelos e vales em forma de "U" | Complexo de canais progradacionais confinados de talude: elemento erosivo de grande porte, caracterizado por uma incisão proeminente ladeada por diques marginais (*outer levees*) em forma de cunha. Os depósitos do eixo do canal são caracterizados por refletores de alta amplitude descontínuos, resultantes da migração lateral e vertical do canal. |
|  |  | Truncamento erosivo, refletores plano-paralelos, circundados por fácies transparentes | Complexo canal–levee: os depósitos de levee são caracterizados por refletores de baixa amplitude, contínuos e/ou transparentes, apresentando geometria de dupla cunha (*double-wedge*) que se adelgaça lateralmente em direção ao exterior do canal. Os depósitos de preenchimento do canal (*channel-fill*) são caracterizados por refletores descontínuos de alta amplitude. |
|  |  | Onlaps, refletores subparalelos a plano-paralelos e fortes amplitudes | Frontal splays: caracterizam-se por um ou mais refletores de amplitude moderada a alta, paralelos a subparalelos, com continuidade moderada a boa. Essas feições ocorrem tipicamente em porções distais do sistema, intercaladas com depósitos pelíticos, sendo geralmente controladas pela compartimentalização estrutural imposta por anticlinais e sinclinais. |
|  |  | Refletores em forma de "S", fortes amplitudes e fácies caóticas | Depósitos de Transporte de Massa (MTDs): caracterizam-se por fácies sísmicas compostas por refletores caóticos a *hummocky*, com baixa continuidade, base erosiva bem definida e superfície superior irregular. Refletores internos com geometria em "S" representam deformação interna associada aos processos de remobilização do depósito. |
|  |  | Onlaps, fácies subparalelas a plano-paralelas, geometrias internas caóticas e baixas amplitudes | Folhelhos móveis: caracterizam-se por um pacote espesso e acusticamente transparente, contendo, ocasionalmente, refletores subparalelos de alta amplitude. Esses refletores tendem a apresentar aumento progressivo do conteúdo de frequência em direção à base da unidade, estando associados a anomalias de baixa velocidade, que podem persistir mesmo em intervalos mais profundos. |

**Tabela 1:** Síntese das principais geometrias sísmicas identificadas no Leque Submarino do Amazonas, incluindo complexos de canais erosivos, sistemas canal–levee, leques influenciados por controle estrutural (anticlinais), depósitos de transporte de massa (MTDs) e níveis associados a folhelhos móveis. Dados sísmicos cedidos por cortesia da Viridien.

### *4.2.5.Interpretação Sísmica Semi-Automática*

A interpretação dos horizontes identificados através dos marcadores dos poços (5.4 Ma – Mioceno Superior, 1.8 Ma – Pleistoceno Inferior, 800 Ka – Pleistoceno Médio e Fundo do Mar) foi utilizada para criar um modelo de tempo geológico relativo (RGT) (Fig. 4) onde, incialmente define-se uma malha estratigráfica estruturada com as superfícies-chave previamente interpretadas, garantindo continuidade geométrica e respeito às descontinuidades estruturais mapeadas.

Em seguida, calcula-se um volume contínuo de tempo relativo que ordena cada voxel sísmico de acordo com sua posição estratigráfica, permitindo o rebatimento (flattening) automático do pacote sedimentar e a extração de fatias cronoestratigráficas verdadeiramente isócronas.

Tal modelo, possibilita a extração de diversas horizontes e atributos entre cada horizonte interpretado, possibilitando realizar o estaqueamento das camadas e a caracterizar a evolução sedimentar dos sistemas de canais turbidíticos confinados através do tempo geológico e da evolução estrutural de cada intervalo.

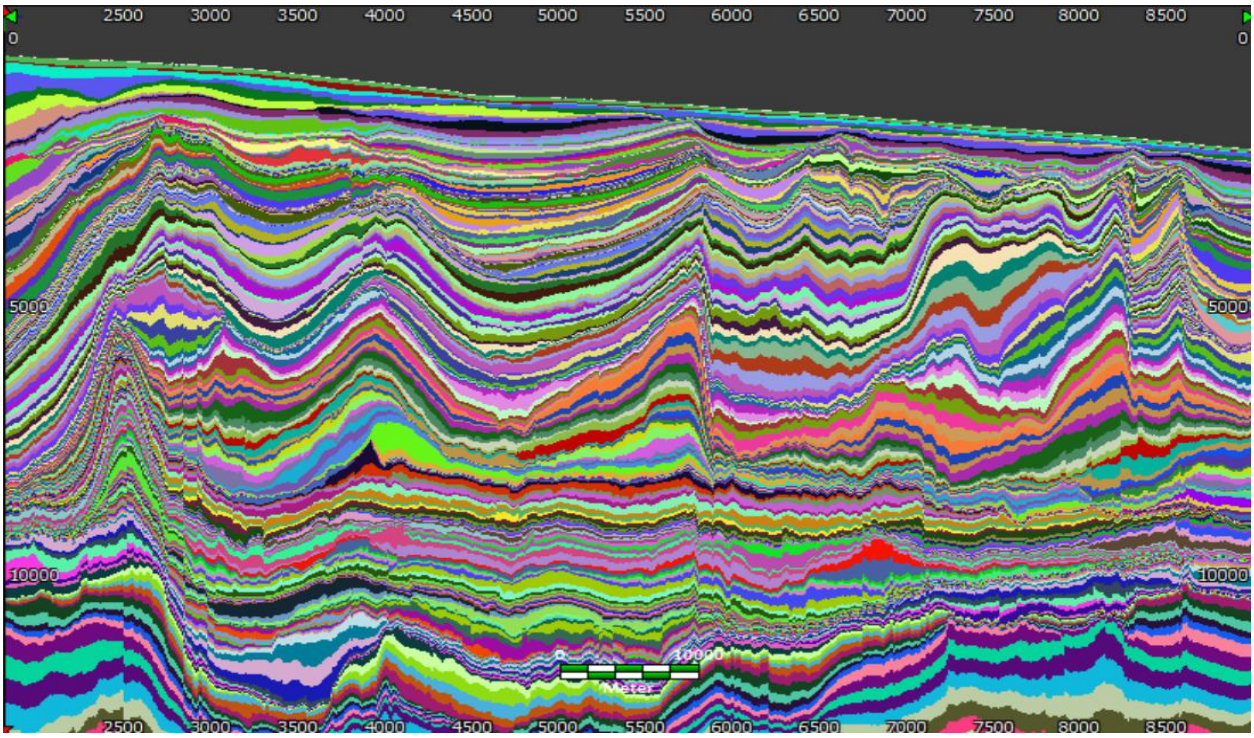



**Figura 4:** Modelo de Tempo Geológico Relativo (RGT) gerado a partir do Model Grid e dos horizontes interpretados (Topo do Mioceno – 5,4 Ma; Pleistoceno Inferior – 1,8 Ma; Pleistoceno Médio – ~0,8 Ma; e Fundo do Mar). O modelo evidencia o controle estrutural exercido pelos folhelhos móveis associados ao topo da Formação Limoeiro.

### *4.2.6. Análise de Poços*

Os poços 1-BP-1A-APS e 1-BP2-APS foram utilizados na calibração poço-sísmica guiando a interpretação sísmica dos horizontes chave e auxiliando na feição das superfícies das principais inconformidades e limites estratigráficos associados aos principais pulsos sedimentares do Mioceno ao Recente. A calibração poço-sísmica possibilitou a correlação direta entre refletores sísmicos e unidades litológicas, reduzindo ambiguidades na definição dos limites estratigráficos.

Os perfis digitais dos poços auxiliaram na identificação das principais litologias por intervalo identificado através dos marcadores. Perfis de Raios Gamma e Densidade guiaram a interpretação de maiores ou menores progradações sedimentares em cada pacote – Plioceno, Pleistoceno Inferior e Pleistoceno Superior – enquanto o perfil sônico possibilitou uma maior calibração entre os dados de poço e os dados sísmicos.

Ainda, uma análise petrofísica básica também foi realizada, incluindo a geração de perfis de volume de folhelho (Vshale) a partir dos registros de Raios Gama, permitindo estimar variações no aporte siliciclástico ao longo do tempo. Intervalos com menor volume de folhelho foram interpretados como fases de maior aporte arenoso (maior *net-to-gross*), potencialmente

correlacionáveis a períodos de intensificação sedimentar previamente reconhecidos na literatura. Essa integração permitiu relacionar tendências litológicas verticais com padrões geométricos observados na sísmica.

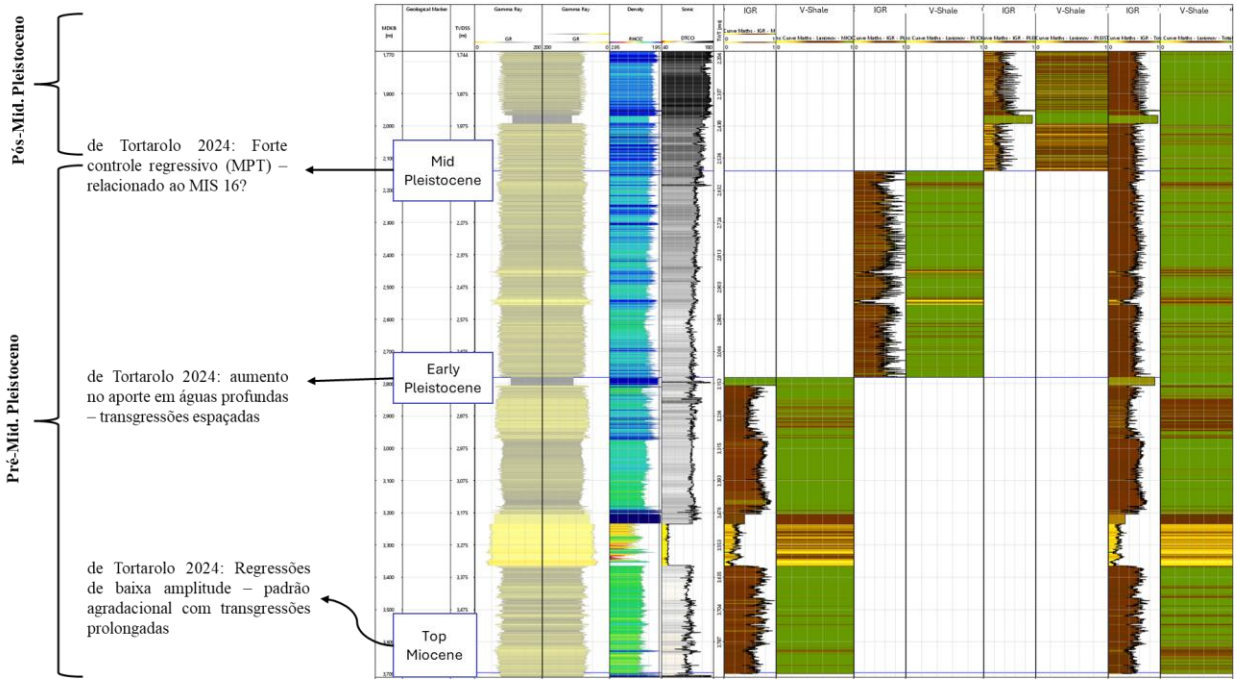



**Figura 5:** Perfis e marcadores estratigráficos do poço 1-BP-2-APS, localizado em uma das minibacias mais proximais do Bloco 1, na Bacia da Foz do Amazonas. Da esquerda para a direita, são apresentados os marcadores estratigráficos, profundidade, raios gama (Gamma Ray), densidade, sônico, índice de raios gama e volume de argila (Vclay). Os marcadores correspondem ao Mioceno Superior (5,4 Ma), Pleistoceno Inferior–topo do Plioceno (1,8 Ma) e evento do Pleistoceno Médio (~0,8 Ma). A análise integrada dos perfis mostra que, entre o Mioceno Superior e o Pleistoceno Médio, arenitos (amarelo no Vclay) e siltitos (marrom) ocorrem de forma localizada em uma matriz predominantemente argilosa (verde), padrão típico de sistemas turbidíticos confinados e dominados por finos, com corpos arenosos que podem ultrapassar 200 m de espessura, compatíveis com preenchimentos canalizados. No intervalo do Pleistoceno Médio ao Recente, observa-se aumento expressivo da proporção de siltitos e arenitos, indicando maior aporte sedimentar, tendência progradacional e maior conectividade dos fluxos, refletindo a expansão dos sistemas deposicionais no Leque Submarino do Amazonas.

### *4.2.7. Atributos Sísmicos*

Os principais atributos sísmicos utilizados neste estudo estão relacionados às propriedades de amplitude e frequência do sinal sísmico, com ênfase nos atributos de Amplitude Mínima Absoluta **e** Decomposição Espectral. O atributo de mínima amplitude foi empregado para realçar anomalias de baixa impedância acústica associadas a corpos arenosos em sistemas turbidíticos. Em ambientes siliciclásticos profundos, particularmente em contextos cenozoicos, arenitos turbidíticos tendem a

apresentar contraste negativo de impedância em relação aos folhelhos encaixantes, resultando em refletores de amplitude negativa bem definidos (Weimer et al., 2007; Zeng et al., 2013). Dessa forma, a extração de mínimas amplitudes ao longo das superfícies interpretadas permitiu delinear com maior clareza os principais *trends* deposicionais associados a canais submarinos, complexos canal–levee e sistemas de leques turbidíticos dentro do pacote estratigráfico analisado.

Adicinalmente, foi aplicada decomposição espectral, técnica que permite decompor o sinal sísmico em seus diferentes componentes de frequência, possibilitando identificar variações sutis na geometria e na espessura de corpos sedimentares (Partyka et al., 1999; Chopra; Marfurt, 2007). Esse método baseia-se na transformação do traço sísmico do domínio do tempo ou profundidade para o domínio da frequência, permitindo isolar bandas espectrais específicas do sinal. Como a resposta sísmica de um corpo sedimentar depende, entre outros fatores, de sua espessura e do contraste de impedância com as unidades encaixantes, diferentes elementos deposicionais podem apresentar assinaturas mais evidentes em determinadas frequências. Em termos gerais, corpos mais espessos ou mais profundos tendem a responder melhor em frequências mais baixas, enquanto feições mais delgadas ou rasas são frequentemente realçadas em frequências mais elevadas.

Nesse estudo, a decomposição espectral foi extraída ao longo das superfícies estratigráficas interpretadas e utilizada para realçar geometrias sísmicas específicas, como canais turbidíticos, lobos deposicionais e depósitos de transporte de massa previamente descritos na seção 4.2.4. A seleção das frequências utilizadas foi baseada em uma análise espectral preliminar do volume sísmico, na qual foram avaliadas as bandas de frequência que melhor realçavam os diferentes elementos deposicionais presentes na área de estudo (Fig. 6). Observou-se que estruturas deposicionais mais profundas, como canais e MTDs em intervalos mais antigos, apresentam menor conteúdo de frequência, enquanto estruturas equivalentes em níveis mais rasos tendem a apresentar frequências mais elevadas, refletindo menor profundidade de soterramento e melhor preservação do conteúdo espectral do sinal sísmico.

A partir dessa análise, volumes espectrais foram gerados para diferentes bandas de frequência selecionadas. Para facilitar a interpretação geomorfológica e destacar contrastes entre os diferentes componentes espectrais, os volumes resultantes foram integrados em uma visualização RGB (Red–Green–Blue). Nesse tipo de representação, três frequências distintas são atribuídas a cada canal de cor — vermelho, verde e azul — permitindo combinar simultaneamente diferentes respostas espectrais em uma única imagem. Em geral, frequências mais baixas são atribuídas ao canal vermelho, frequências intermediárias ao canal verde e frequências mais altas ao canal azul. A combinação dessas bandas gera variações cromáticas que destacam contrastes geomorfológicos e estratigráficos, facilitando a identificação de feições deposicionais e suas variações laterais.

Essa abordagem permitiu identificar com maior clareza as geometrias dos elementos sedimentares e avaliar sua distribuição espacial ao longo das superfícies estratigráficas, além de analisar sua evolução ao longo do tempo geológico e sua relação com a compartimentalização estrutural associada à tectônica gravitacional no setor noroeste do Cone Submarino do Amazonas.

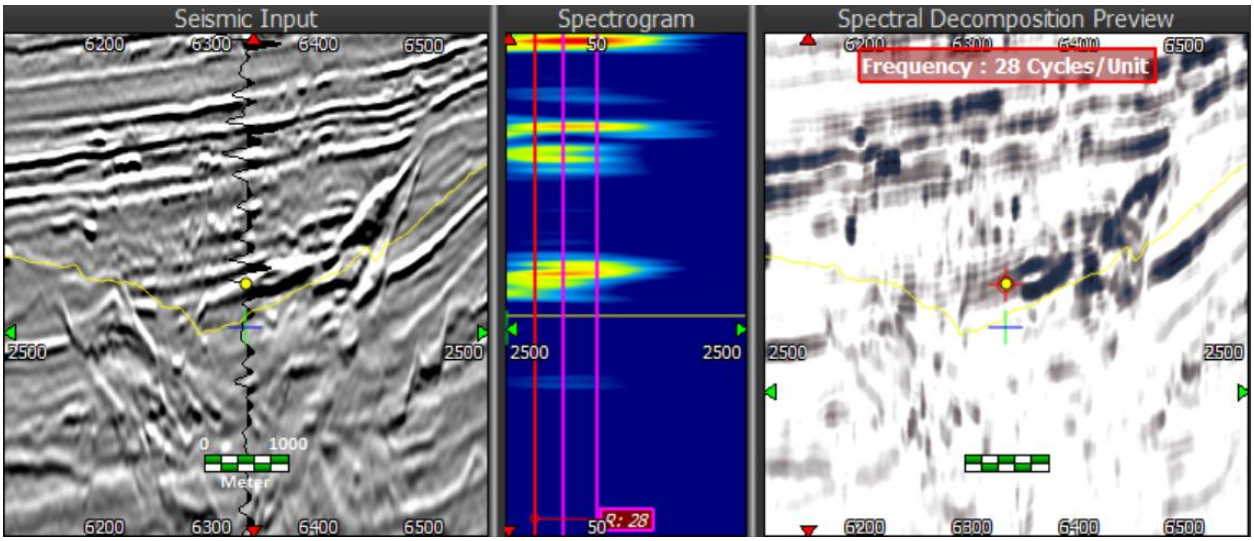



**Figura 6:** Análise espectral do volume sísmico. À esquerda, apresenta-se a seção sísmica (cortesia Viridien) destacando as principais feições canalizadas do Leque Submarino do Amazonas, utilizada como base para a identificação do conteúdo espectral associado a esses elementos. O espectrograma (painel central) exibe a distribuição de energia em função da frequência, onde as cores mais quentes indicam as faixas espectrais dominantes, utilizadas para a seleção das bandas de frequência mais representativas das geometrias de interesse. No painel de pré-visualização, são evidenciadas as principais anomalias sísmicas realçadas a partir das frequências selecionadas. Seção sísmica cortesia Viridien.

# 5. Resultados

## 5.1. Influência dos Folhelhos Móveis na Seção Cenozóica

Os folhelhos móveis exercem controle estrutural fundamental sobre a sequência Paleógeno–Neógeno na porção noroeste do Leque Submarino do Amazonas, configurando o principal nível de desacoplamento responsável pela deformação gravitacional do prisma sedimentar (Reis et al., 2010; Souza et al., 2025). A aquisição de novos volumes sísmicos 3D de alta qualidade permitiu aprimorar significativamente o imageamento desse intervalo, evidenciando um nível regional caracterizado por anomalias de baixa velocidade intervalar, tipicamente entre 2.000 e 2.300 m/s, situado em profundidades médias de 6–7 km, como pode ser visto na Figura 6. Esse intervalo apresenta refletores subplano-paralelos de baixa continuidade e resposta sísmica levemente atenuada, acompanhando o trend estrutural da deformação, padrão consistente com descrições sísmicas de folhelhos móveis sobrepressurizados em margens hipersedimentadas (Soto et al., 2021; Spina et al., 2025).

Do ponto de vista reológico, tais anomalias são atribuídas à combinação de baixa permeabilidade, elevada taxa de soterramento e geração de sobrepressão, que reduzem as tensões efetivas e promovem comportamento dúctil e mobilidade lateral do pacote argiloso (Soto et al., 2021). No caso do Leque Submarino do Amazonas, a manutenção de pressões próximas à litostática é reforçada por mecanismos adicionais, como geração termogênica de gás e transformações mineralógicas, particularmente a conversão esmectita–ilita, os quais contribuem para sustentar o desacoplamento mecânico ao longo do topo da Formação Limoeiro (Reis et al., 2010; Souza et al., 2025). Esse horizonte é interpretado como o principal décollement regional, controlando a deformação thin-skinned de todos os intervalos estratigráficos sobrejacentes desde o Mioceno Superior.

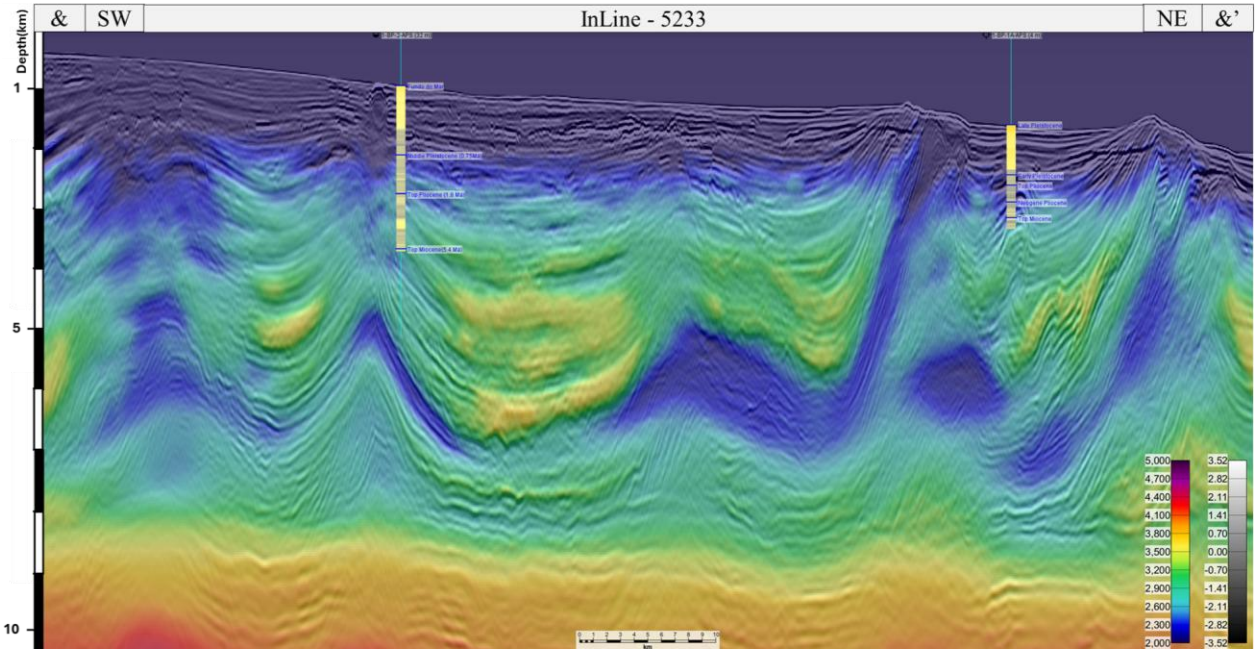



**Figura 7:** Seção sísmica (cortesia Viridien) em direção dip atravessando os poços perfurados no Leque Submarino do Amazonas, com exibição dos perfis de raios gama e marcadores estratigráficos. As cores em azul representam intervalos com velocidades entre 2.000 e 2.300 m/s. Entre aproximadamente 6 e 7 km de profundidade, observam-se feições onduladas e estruturas compressivas, mais pronunciadas na porção NE, associadas à presença de folhelhos móveis sobrepressurizados, caracterizados por baixos valores de velocidade intervalar.

A expressão estrutural desse desacoplamento é claramente segmentada ao longo do prisma. No domínio proximal (SW), observa-se regime predominantemente extensional, com desenvolvimento de falhas normais lístricas e rollover structures associadas ao escoamento gravitacional do pacote sedimentar sobre o nível de folhelhos móveis, padrão compatível com modelos clássicos de colapso gravitacional em margens passivas (Cobbold et al., 2004; Reis et al., 2010). Em contraste, no setor distal (NE), o encurtamento progressivo resulta na formação de

cinturões compressivos compostos por anticlinais, sistemas de empurrão e bacias piggyback, além de minibacias estruturalmente controladas, refletindo a propagação frontal da deformação ao longo do décollement basal (Fig. 8) (Reis et al., 2010; Perovano et al., 2009; Souza et al., 2025).

A influência da tectônica de folhelhos móveis é particularmente expressiva até os níveis pliocênicos, intervalo no qual a criação de espaço de acomodação, associada ao crescimento estrutural e à propagação do cinturão compressivo, aparentemente superou a taxa de preenchimento sedimentar em determinados compartimentos. Esse desequilíbrio favoreceu o desenvolvimento de minibacias estruturais e possível confinamento parcial de sistemas turbidíticos, conforme previsto em modelos de interação entre crescimento estrutural e sedimentação em sistemas gravitacionais (Howlett et al., 2020; Spina et al., 2025).

A partir do Pleistoceno Médio, contudo, observa-se incremento significativo das taxas de sedimentação, refletido em espessamentos diferenciais e maior progradação do sistema. Esse aumento é compatível com intensificação dos ciclos glacioeustáticos quaternários (Maslin et al., 2006; Tortarolo et al., 2024) e com a manutenção do elevado aporte terrígeno proveniente do soerguimento andino (Hoorn et al., 2017). O incremento da carga sedimentar favoreceu nova aceleração da deformação gravitacional, promovendo migração bacia-afora do front compressivo e reativação de estruturas extensionais mais distais (Perovano et al., 2009; Souza et al., 2025). Nesse contexto, a dinâmica entre geração de sobrepressão, mobilidade dos folhelhos e pulsos sedimentares mioceno–quaternários explica a persistência e evolução do sistema gravitacional no setor NW.

Assim, os dados sísmicos e de velocidade corroboram a interpretação de que os folhelhos móveis no topo da Formação Limoeiro constituem o principal elemento controlador da arquitetura estrutural e estratigráfica da porção noroeste do Leque Submarino do Amazonas, governando a distribuição espacial da deformação, a compartimentação hidráulica e a potencial formação de domínios turbidíticos parcialmente confinados ao longo do Neógeno–Quaternário.

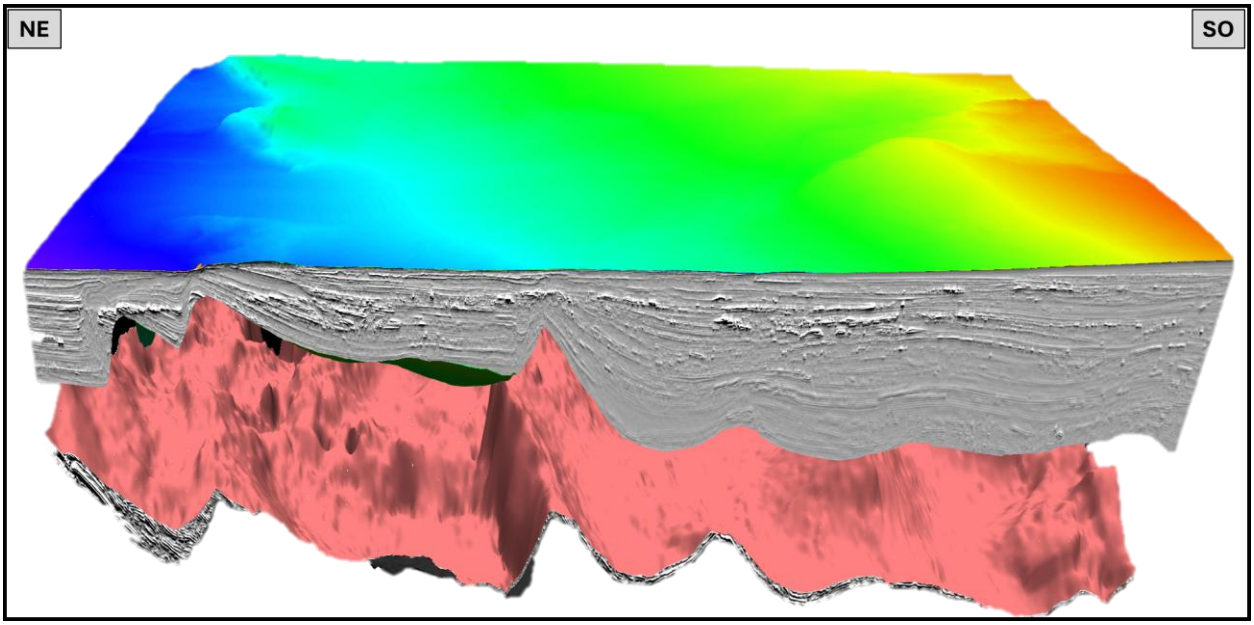



**Figura 8:** Visualização 3D do Bloco Sísmico 1, limitada inferiormente pelo topo dos folhelhos móveis (horizonte em rosa; Formação Limoeiro – Maastrichtiano) e superiormente pela superfície do fundo do mar. Observa-se que as porções mais proximais (SW) são dominadas por regime extensional, caracterizado pelo desenvolvimento de minibacias com maiores espessuras sedimentares. Em contraste, as porções mais distais (NE) correspondem ao domínio do prisma compressivo, onde se desenvolvem bacias do tipo piggyback associadas a anticlinais, apresentando menor espessura sedimentar e maior compartimentalização estrutural. Seção sísmica cortesia Viridien.

## *5.2. Identificação dos Refletores e Principais Sequências Estratigráficas*

A interpretação das superfícies-chave foi conduzida a partir da integração entre dados sísmicos 3D de alta resolução, marcadores cronoestratigráficos calibrados nos poços 1-BP-1A-APS e 1-BP-2-APS e a identificação prévia do principal nível de folhelhos móveis associado ao topo da Formação Limoeiro. Com base nessa integração, foram mapeadas as seguintes superfícies regionais: Mioceno Superior (5,4 Ma), Pleistoceno Inferior (1,8 Ma), discordância erosiva do Pleistoceno Médio (0,8 Ma) e o Fundo do Mar. A interpretação dessas superfícies respeitou explicitamente a compartimentação estrutural imposta pelo sistema de descolamento regional, reconhecido como o principal controlador da deformação thin-skinned no setor NW (Reis et al., 2010; Souza et al., 2025).

As seções sísmicas A–A’ (Figura 9), B–B’ (Figura 10) e C–C’ (Figura 11) evidenciam variações laterais significativas na expressão estrutural dessas superfícies ao longo do eixo NW–SE. No setor noroeste, observa-se maior espessamento do pacote Paleógeno–Neógeno e maior intensidade de deformação associada à mobilidade dos folhelhos sobrepressurizados. Esse padrão é coerente com

a migração do principal depocentro para NW a partir do Plioceno (Cruz et al., 2019) e com o aumento da sobrepressão sustentada por geração termogênica de gás e transformações diagenéticas no nível de décollement (Reis et al., 2010; Souza et al., 2025). A presença de anomalias de baixa velocidade nesse intervalo reforça sua interpretação como horizonte mecanicamente fraco e regionalmente contínuo, capaz de acomodar escoamento gravitacional progressivo (Soto et al., 2021; Spina et al., 2025).

No domínio distal do prisma (NE), o regime compressivo manifesta-se por cinturões de empurrão bem desenvolvidos, anticlinais de propagação frontal e bacias piggyback estruturalmente controladas. As superfícies estratigráficas interpretadas exibem forte arqueamento, truncamentos locais e espessamentos diferenciais associados ao crescimento estrutural sinsedimentar. Esse padrão é consistente com modelos de sistemas gravitacionais acoplados em margens hipersedimentadas, nos quais a propagação frontal da deformação acompanha pulsos de carregamento sedimentar (Cobbold et al., 2004; Reis et al., 2010; Howlett et al., 2020).

Em contraste, na porção mais proximal a sudoeste (SW), embora ainda influenciada pelo nível de descolamento, a deformação compressiva é menos intensa e o regime extensional associado ao escoamento gravitacional domina a arquitetura estrutural. Nesse setor, observam-se falhas normais lístricas, estruturas de rollover e domos de folhelho menos ativos, sugerindo menor intensidade de sobrepressão e/ou menor taxa de crescimento estrutural relativo. A espessura sedimentar total tende a ser maior nas porções mais externas desse compartimento com minibacias podendo atingir até ~5 km de espessura, refletindo acomodação controlada por subsidência gravitacional e variações na taxa de sedimentação.

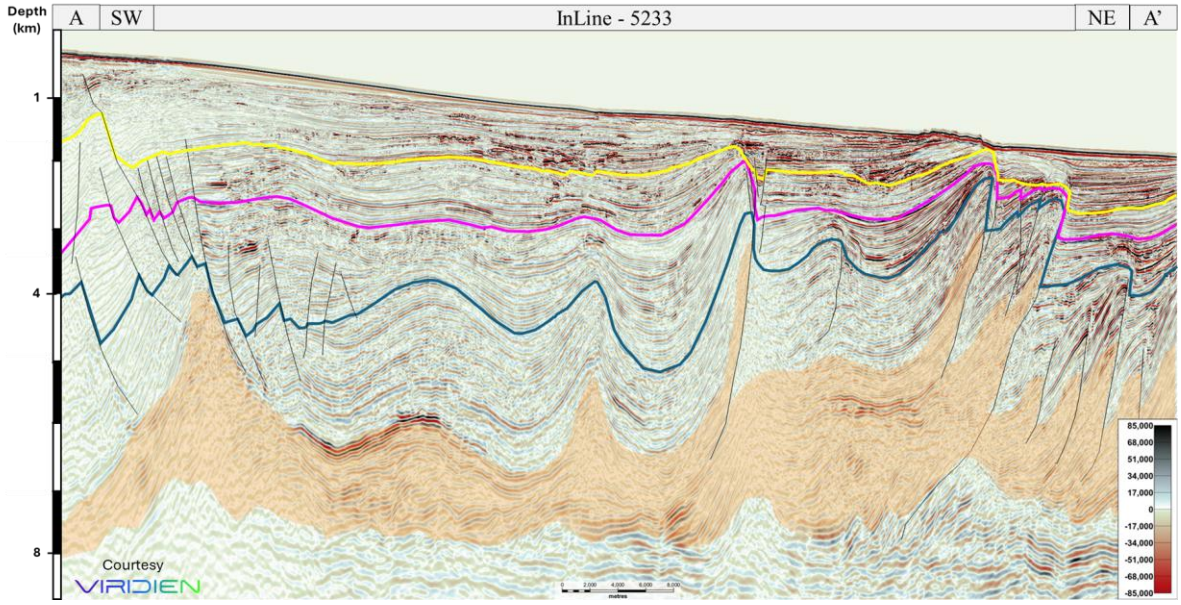



**Figura 9:** Seção sísmica (cortesia Viridien) em direção dip (SW–NE) atravessando o Bloco Sísmico 1, com localização indicada na Figura 3 (Seção 4.1). As linhas em azul, rosa e amarelo representam, respectivamente, os

horizontes do Mioceno Superior (5,4 Ma), Pleistoceno Inferior (1,8 Ma) e Pleistoceno Médio (~0,8 Ma). O intervalo em laranja corresponde ao pacote de folhelhos móveis do topo da Formação Limoeiro.

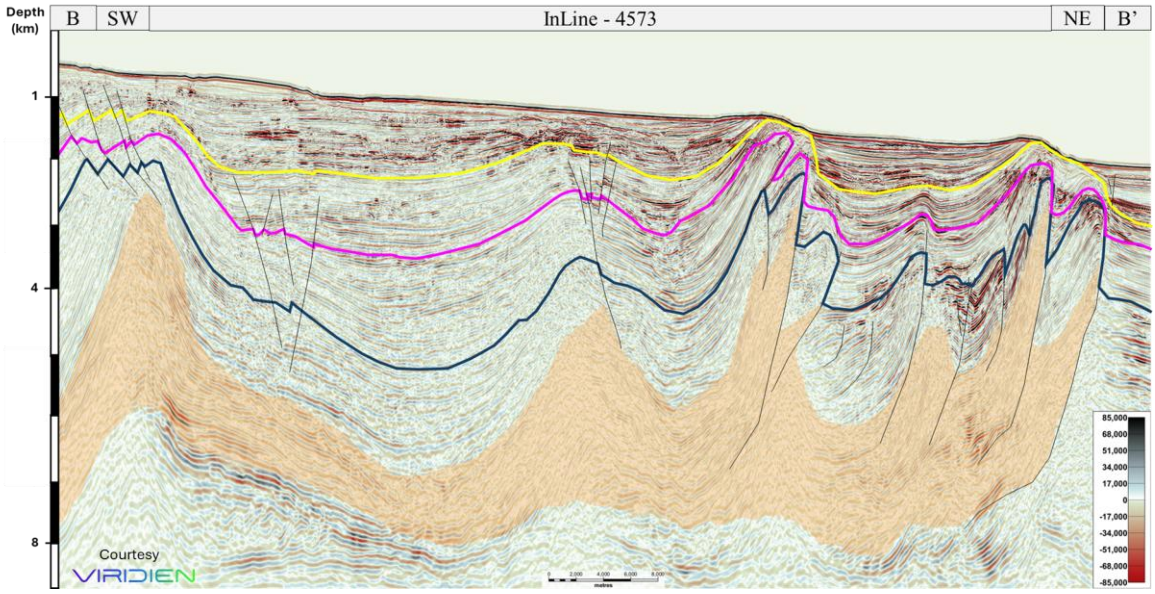



**Figura 10:** Seção sísmica (cortesia Viridien) em direção dip (SW–NE) atravessando o Bloco Sísmico 1, com localização indicada na Figura 3 (Seção 4.1). As linhas em azul, rosa e amarelo representam, respectivamente, os horizontes do Mioceno Superior (5,4 Ma), Pleistoceno Inferior (1,8 Ma) e Pleistoceno Médio (~0,8 Ma). O intervalo em laranja corresponde ao pacote de folhelhos móveis do topo da Formação Limoeiro.

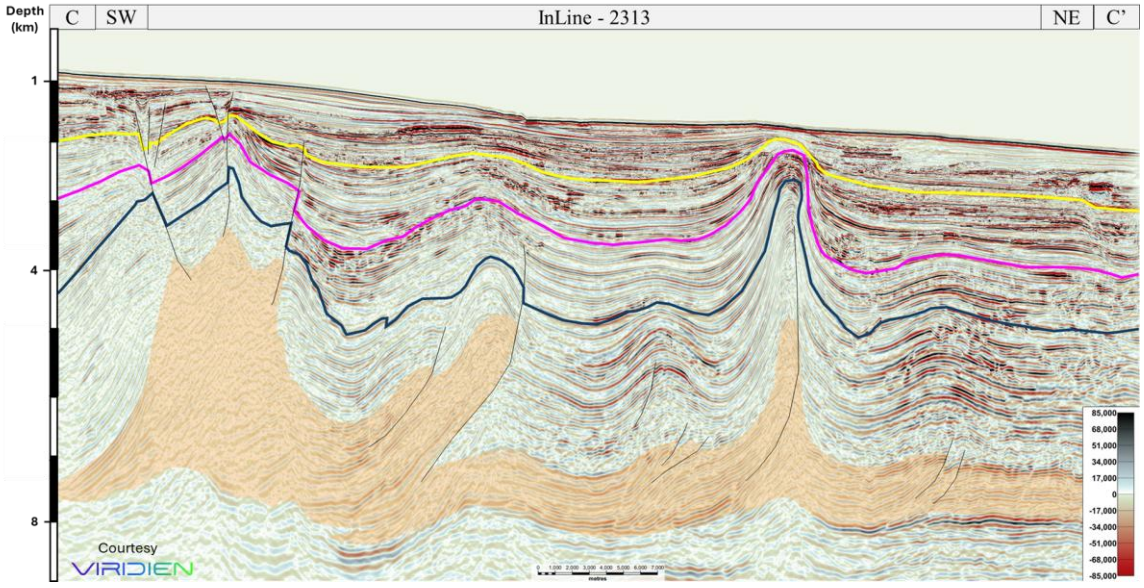



**Figura 11:** Seção sísmica (cortesia Viridien) em direção dip (SW–NE) atravessando o Bloco Sísmico 2, com localização indicada na Figura 3 (Seção 4.1). As linhas em azul, rosa e amarelo representam, respectivamente, os

horizontes do Mioceno Superior (5,4 Ma), Pleistoceno Inferior (1,8 Ma) e Pleistoceno Médio (~0,8 Ma), enquanto o intervalo em laranja corresponde ao pacote de folhelhos móveis do topo da Formação Limoeiro.

A partir da interpretação dos horizontes descritos anteriormente, foi possível analisar a evolução das superfícies estruturais que controlam a organização estratigráfica da área de estudo. O intervalo mais basal analisado, correspondente ao marcador do Mioceno Superior (~5,4 Ma), apresenta forte controle estrutural associado à mobilidade dos folhelhos sobrepressurizados que compõem o principal nível de descolamento do sistema. Nesse estágio inicial, as superfícies estratigráficas acompanham de forma mais pronunciada a geometria imposta pela tectônica gravitacional, refletindo a compartimentalização estrutural do prisma sedimentar. Como observado na Figura 12-a, as superfícies exibem curvaturas e variações estruturais associadas à formação de minibacias e altos estruturais, estes últimos vinculados a anticlinais desenvolvidos no domínio compressivo do sistema.

A partir do Pleistoceno Inferior (~1,8 Ma), observa-se uma reorganização progressiva da geometria dessas superfícies. Os horizontes passam a apresentar maior continuidade lateral e menor influência direta da deformação associada aos folhelhos móveis, sugerindo um estágio de preenchimento sedimentar mais avançado das estruturas previamente formadas. Esse comportamento é compatível com o aumento do aporte sedimentar registrado no sistema amazônico durante o Quaternário, frequentemente associado a intensificação de ciclos glacioeustáticos e a maior eficiência de transporte sedimentar para o ambiente profundo (Maslin et al., 2006; Tortarolo et al., 2024).

As superfícies correspondentes aos intervalos mais jovens (Figuras 12-b, 12-c e 12-d) indicam ainda que a compartimentalização estrutural permanece atuando como um elemento controlador da organização deposicional. Nesse contexto, os domínios extensionais mais proximais tendem a acomodar preferencialmente os fluxos sedimentares, enquanto o cinturão compressivo mais distal atua como limite estrutural que condiciona o roteamento e a distribuição lateral dos sistemas turbidíticos.

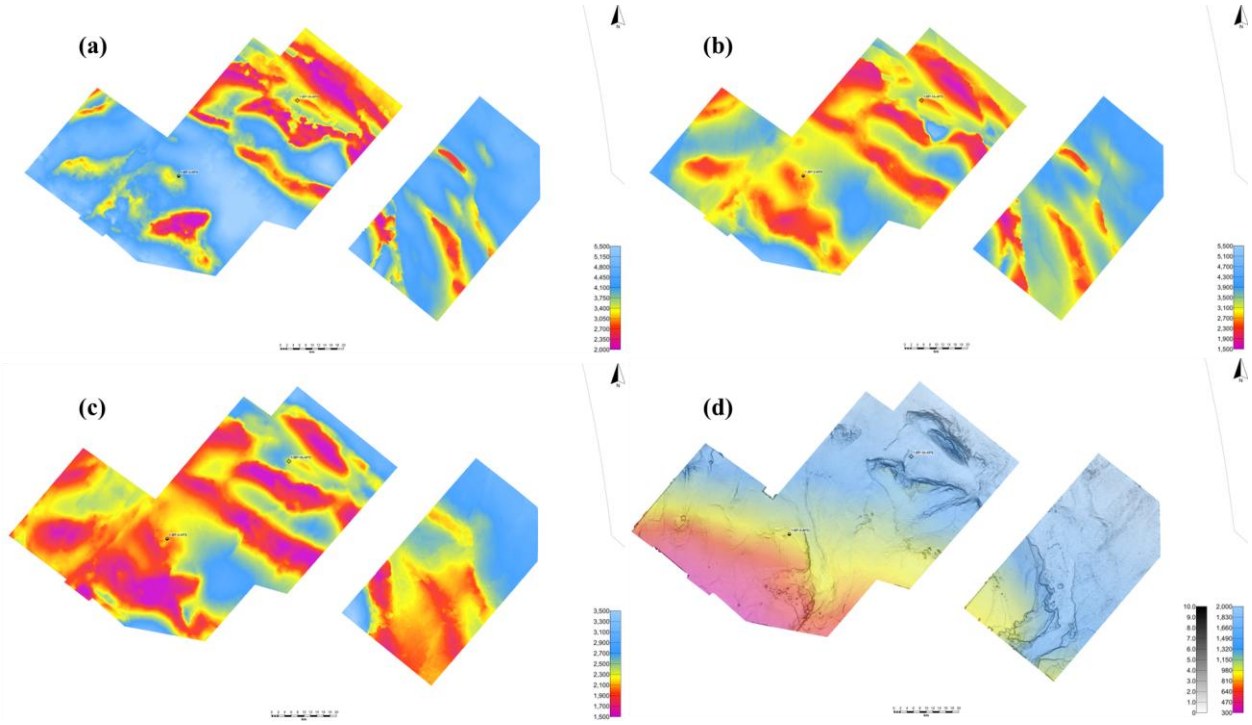



**Figura 12:** Mapas estruturais dos horizontes interpretados. Em (a) – Mioceno Superior (5,4 Ma), observa-se forte controle dos folhelhos móveis na estruturação do intervalo, com minibacias ainda pouco preenchidas (cores frias representam maiores profundidades e cores quentes, áreas mais rasas). Nos mapas (b) – Pleistoceno Inferior (1,8 Ma) e (c) – Pleistoceno Médio (~0,8 Ma), o controle exercido pelos anticlinais e pelo prisma compressivo permanece evidente, embora seja acompanhado pelo progressivo preenchimento das minibacias por fluxos sedimentares. Em (d) – Fundo do Mar, as porções proximais apresentam menor influência estrutural e maior predominância de feições associadas à instabilidade sedimentar, como escarpas e depósitos de transporte de massa, enquanto nas porções distais os anticlinais ainda condicionam a batimetria atual.

A análise dos mapas de espessura permitiu avaliar a evolução do preenchimento sedimentar nas minibacias estruturais ao longo do intervalo Mioceno Superior–Recente. No intervalo compreendido entre o topo do Mioceno Superior (~5,4 Ma) e o Pleistoceno Inferior (~1,8 Ma), observa-se um padrão de deposição fortemente controlado pela compartimentalização estrutural associada à tectônica gravitacional. Nesse estágio inicial, as maiores espessuras concentram-se nas minibacias mais proximais, localizadas no domínio extensional do sistema, indicando elevadas taxas de preenchimento nesses depocentros (Figura 13 – a). Em contraste, o prisma compressivo mais distal apresenta preenchimento relativamente limitado, sugerindo que os altos estruturais associados ao cinturão compressivo ainda atuavam como barreiras topográficas que restringiam o avanço dos fluxos turbidíticos para porções mais profundas do sistema.

No intervalo subsequente, entre o Pleistoceno Inferior (~1,8 Ma) e o Pleistoceno Médio (~0,8 Ma), o padrão geral de preenchimento das minibacias proximais permanece ativo, embora com taxas aparentemente menos expressivas em comparação ao intervalo superior. Essa redução relativa pode estar associada ao evento erosivo regional do Pleistoceno Médio (~0,8 Ma), amplamente

reconhecido na área de estudo, que possivelmente removeu parte da sedimentação previamente acumulada nesse intervalo (Figura 13 – b).

A partir do Pleistoceno Médio até o Recente, os mapas de espessura indicam uma mudança importante na distribuição do preenchimento sedimentar. Diferentemente do estágio mais basal, observa-se que as minibacias localizadas no prisma compressivo mais distal passam a registrar maior participação no acúmulo sedimentar. Esse padrão sugere que, nesse período, o aumento do aporte sedimentar passou a superar a taxa de criação de espaço de acomodação controlada pela tectônica gravitacional, permitindo que fluxos turbidíticos alcançassem porções progressivamente mais distais do sistema. Como resultado, sistemas turbidíticos passam a preencher não apenas as minibacias proximais do domínio extensional, mas também compartimentos estruturais mais profundos do prisma compressivo, indicando uma reorganização do sistema deposicional e maior eficiência do transporte sedimentar em direção às áreas mais distais do Cone Submarino do Amazonas.

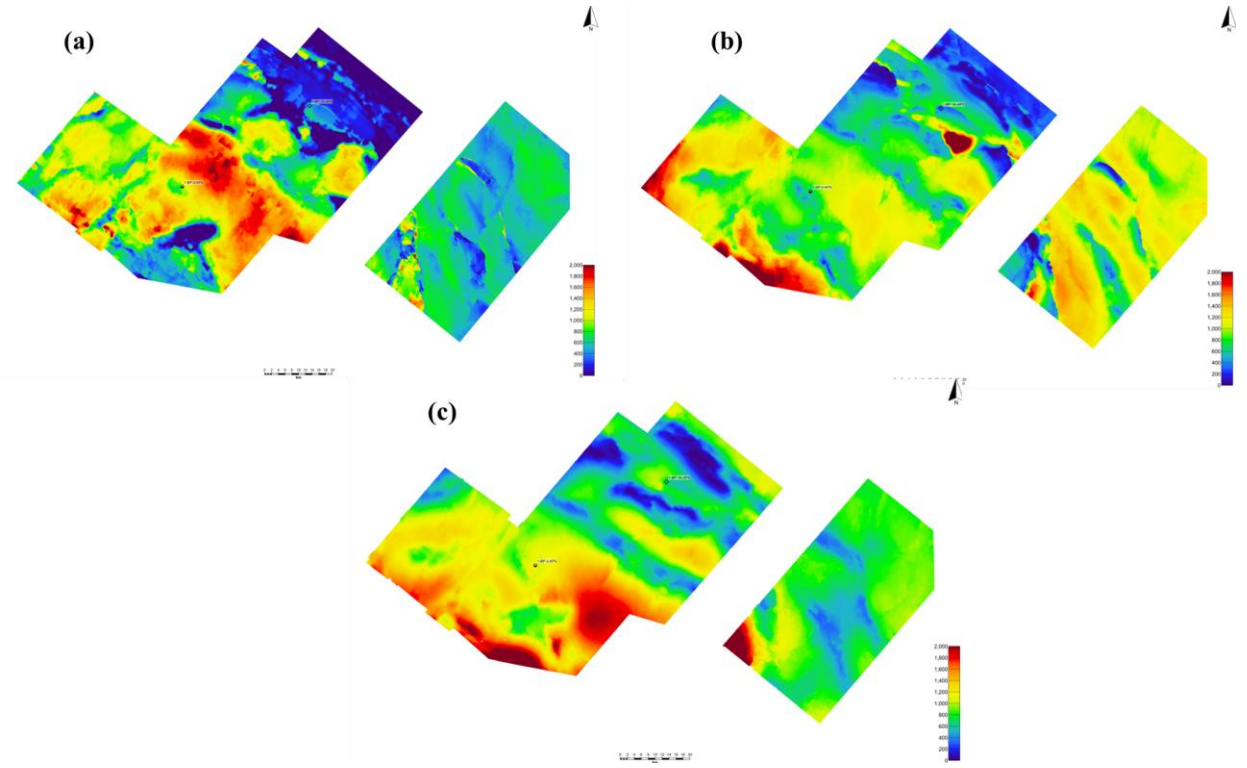



**Figura 13:** Mapas de espessura dos principais intervalos estratigráficos do Leque Submarino do Amazonas. Em (a), intervalo entre o Mioceno Superior (5,4 Ma) e o Pleistoceno Inferior (1,8 Ma), evidenciando maior espessura nas minibacias proximais do domínio extensional e preenchimento limitado no prisma compressivo distal. Em (b), intervalo entre o Pleistoceno Inferior (1,8 Ma) e o Pleistoceno Médio (~0,8 Ma), observa-se manutenção desse padrão, porém com espessuras menos expressivas, possivelmente relacionadas a um evento erosivo regional. Em (c), intervalo entre o Pleistoceno Médio (~0,8 Ma) e o Recente, destaca-se o aumento do preenchimento sedimentar nas minibacias do prisma compressivo distal, indicando maior eficiência do transporte sedimentar e avanço dos fluxos turbidíticos para porções mais profundas do sistema.

## *5.3. Caraterização Sísmicas e Geomorfologias no Intervalo de Estudo*

Com o objetivo de tornar a análise dos resultados mais clara, as interpretações sísmicas foram organizadas de forma integrada em dois níveis complementares: (i) análise regional dos padrões deposicionais por meio de atributos de amplitude mínima (5.4.1 e 5.5.1) e (ii) caracterização detalhada das geometrias sísmicas e elementos arquiteturais através da decomposição espectral (5.4.2 e 5.5.2).

Inicialmente, os atributos de amplitude mínima foram utilizados para mapear os principais trends sedimentares e a distribuição espacial dos sistemas turbidíticos ao longo dos diferentes intervalos estratigráficos. Esse atributo permitiu identificar, em escala regional, os principais eixos de transporte sedimentar, bem como avaliar o grau de confinamento dos fluxos em função da compartimentalização estrutural imposta pelas minibacias e anticlinais associados à tectônica de folhelhos móveis.

Em um segundo nível de análise, a decomposição espectral foi aplicada sobre os mesmos intervalos, permitindo refinar a interpretação das geometrias sísmicas e discriminar elementos deposicionais específicos, como canais, complexos canal–levee, lobos turbidíticos e depósitos de transporte de massa. A integração de diferentes bandas de frequência, posteriormente combinadas em visualização RGB, possibilitou realçar variações sutis na morfologia e na organização interna dos depósitos, contribuindo para a interpretação da evolução dos sistemas deposicionais ao longo do tempo geológico.

Para facilitar a comparação entre os diferentes estágios evolutivos do sistema, os resultados foram agrupados em dois grandes intervalos: (i) pré-Pleistoceno Médio (5,4–0,8 Ma) e (ii) pós-Pleistoceno Médio (0,8–0 Ma). Essa divisão reflete uma mudança significativa na dinâmica deposicional do Cone Submarino do Amazonas, associada ao aumento do aporte sedimentar e à maior eficiência dos processos de *bypass* no Quaternário.

As principais características de cada intervalo, incluindo distribuição dos atributos, geometrias sísmicas, tipos de depósitos e elementos estruturais associados, são sintetizadas na Tabela 2. A partir dessa síntese, as figuras são apresentadas em pares comparativos entre os dois intervalos, permitindo evidenciar de forma direta as mudanças na arquitetura deposicional e no grau de confinamento dos sistemas turbidíticos ao longo do tempo.

| | Intervalos | |
|---|---|---|
| Caracterização Sísmica | Pré-Pleistoceno Médio | Pós-Pleistoceno Médio |
| Idade | 5.4 – 0.8 Ma | 0.8 Ma – 0 Ma |
| **Amplitude Mínima** | Mínimas amplitudes extraídas entre o intervalo do Mioceno Superior (5.4 Ma) e o Pleistoceno Médio (0.8 Ma). | Mínimas amplitudes extraídas entre o intervalo do Pleistoceno Médio (0.8 Ma) e o Fundo do Mar (recente). |
| Distribuição | Trends deposicionais com direção preferencial SE-NO, respeitando majoritariamente a distribuição das mini-bacias. | Trends deposicionais com direção preferencial SO-NE (da costa em direção a águas profundas), com redução considerável do confinamento exercido pelas mini-bacias. |
| Geometrias Sísmicas | Sistemas canalizadas em porções mais proximais com *splays* de amplitude nas porções mais distais. | Sistemas canalizados com fortes valores de amplitude em toda a superfície e extrema tendência erosiva. |
| Figuras | 14 (amplitude minima exibindo os trends principais). | Figuras 18 (amplitude minima exibindo os trends principais). |
| **Decomposição Espectral** | RGB com os espectros de frequência extraídos a partir da análise spectral em cada superfície avaliada. | RGB com os espectros de frequência extraídos a partir da análise spectral em cada superfície avaliada. |
| Geometrias Sísmicas | Feições canalizadas confinadas nas mini-bacias em porções proximais e distais com altos conteúdos de frequência ao redor dos canais e *splays* em regiões mais distais. | Feições canalizadas não confinadas e de padrão altamente erosivo, com alto conteúdo de frequência e feições caóticas com baixo conteúdo de frequência. |
| Depósitos e Estruturas | Sistemas de complexos de canais e canal-levee com direção SE-NO confinados nas mini-bacias e leques turbidíticos sin-deposicionais ao crescimento dos anticlinais em porções mais distais. | Sistema de canais altamente erosivos e progradacionais em direção as porções mais distais do leque, com transportes de massa (MTDs) associados a instabilidades sedimentares no sistema de talude. |
| Figuras | 15, 16 e 17 (decomposição espectral exibindo as principais geometrias e morfologias sísmicas). | 19, 20 e 21 (decomposição espectral exibindo as principais geometrias e morfologias sísmicas). |
| **Arquiteturas Deposicionais** | Complexos e sistemas de canais com depósitos de levee e leques turbidíticos associados, confinados e controlados por mini-bacias, com preenchimento majoritariamente sin-deposicional a criação de espaço de acomodação. | Sistema extremamente erosivo, associado ao aumento do aporte sedimentar durante o Pleistoceno Médio e a grande instabilidade de talude, com inúmeros canais de tendência *bypass* e transportes de massa. |

**Tabela 2:** Síntese integrada dos principais atributos sísmicos e elementos deposicionais identificados nos intervalos pré- e pós-Pleistoceno Médio no Cone Submarino do Amazonas. A tabela reúne a caracterização dos padrões de amplitude mínima (trends deposicionais regionais) e da decomposição espectral (geometrias sísmicas e elementos arquiteturais), incluindo distribuição espacial, tipos de depósitos e relação com o controle estrutural. Essa síntese serve como base para a organização e comparação dos resultados apresentados nas figuras subsequentes.

## *5.4. Caracterização Sísmica do Intervalo Pré-Pleistoceno Médio – Plioceno e Pleistoceno Inferior*

### *5.4.1. Mapa de Amplitude*

No mapa de amplitude, o principal destaque está relacionado ao trend deposicional condicionado pela compartimentalização estrutural das minibacias. A primeira extração de atributos foi realizada no intervalo compreendido entre o horizonte do Mioceno Superior (~5,4 Ma) e o Pleistoceno Inferior (~1,8 Ma). Na Figura 14, as cores variando de azul a vermelho representam o mapa estrutural do intervalo, no qual os tons mais frios correspondem às porções estruturalmente mais

profundas (minibacias), enquanto as cores mais quentes indicam os altos estruturais associados ao prisma compressivo. Sobre esse mapa estrutural, as tonalidades em roxo correspondem às anomalias de mínima amplitude extraídas dentro desse intervalo estratigráfico.

A distribuição dessas anomalias indica que, nas porções mais proximais da área de estudo, os canais turbidíticos tendem a seguir preferencialmente o eixo estrutural das minibacias, com direção predominante SE–NO. Esse padrão sugere que o roteamento dos fluxos sedimentares foi fortemente condicionado pela topografia estrutural gerada pela mobilidade dos folhelhos sobrepressurizados, resultando em preenchimento sin-sedimentar dessas estruturas durante a evolução do sistema gravitacional.

Quando os fluxos encontravam zonas estruturalmente mais baixas ou corredores topográficos mais favoráveis, os sistemas canalizados conseguiam ultrapassar os altos estruturais e migrar em direção a setores mais distais do sistema. Nessas regiões, é possível identificar geometrias compatíveis com leques turbidíticos desenvolvidos de forma estaqueada e com feições de *onlap* em direção aos anticlinais compressivos, indicando novamente que tais depósitos são possivelmente sinsedimentares a estruturação ocasionada pelos folhelhos móveis.

Nas porções mais distais do Bloco 2, localizadas na área sudeste do volume sísmico, também é possível identificar diversas feições canalizadas que se estendem a partir de regiões ainda mais a leste da área de estudo. Essas feições provavelmente representam a continuidade de fluxos sedimentares provenientes dos principais sistemas de cânions do Cone Submarino do Amazonas, sugerindo que parte do aporte sedimentar que alimenta os sistemas turbidíticos analisados pode ter origem em corredores de transporte sedimentar situados a montante do volume sísmico interpretado.

De forma geral, esse mapa evidencia que a arquitetura deposicional do intervalo Mioceno Superior–Pleistoceno Inferior foi fortemente controlada pela relação entre criação de espaço de acomodação e taxa de sedimentação. Nesse estágio evolutivo, a maioria dos fluxos turbidíticos permanece confinada dentro das minibacias estruturais, com apenas alguns eventos de transposição estrutural permitindo o transporte sedimentar em direção às águas mais profundas do Cone Submarino do Amazonas.

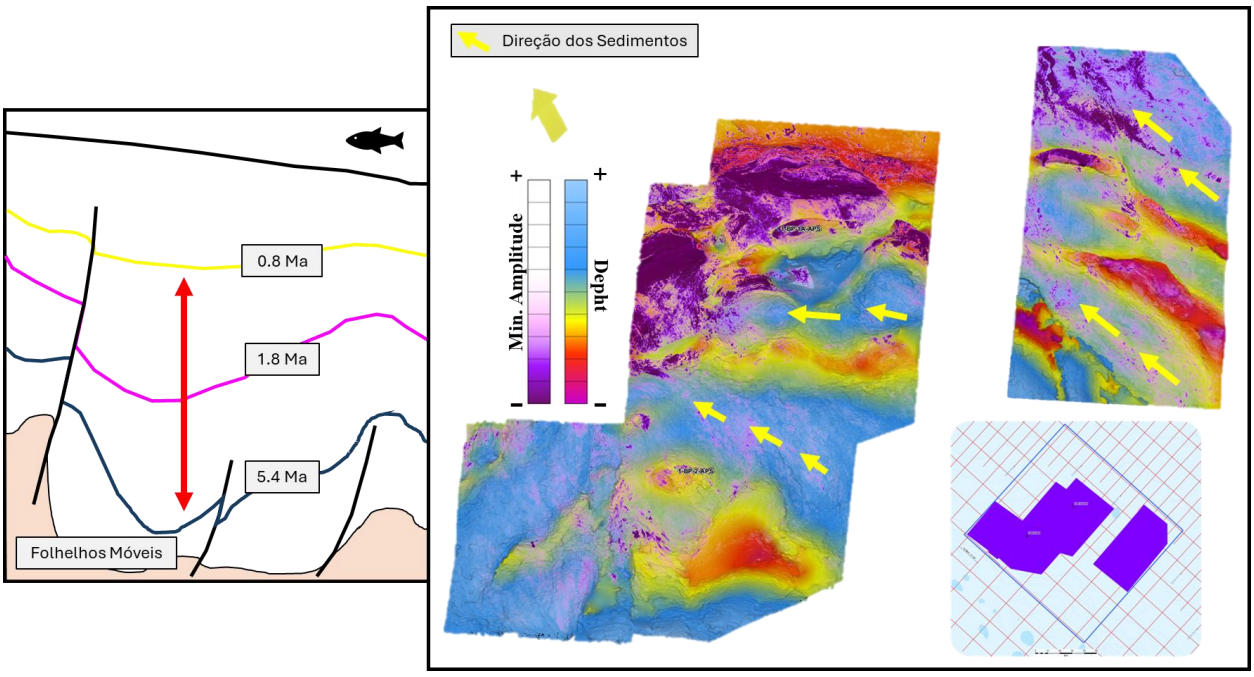



**Figura 14:** Mapa de amplitude mínima sobreposto ao mapa estrutural do intervalo entre o Mioceno Superior (~5,4 Ma) e o Pleistoceno Inferior (~1,8 Ma). As cores de azul a vermelho representam a configuração estrutural do intervalo, enquanto as tonalidades em roxo correspondem às anomalias de mínima amplitude, interpretadas como depósitos turbidíticos arenosos. Observam-se sistemas canalizados orientados preferencialmente segundo o eixo das minibacias (SE–NO), além de feições que ultrapassam os altos estruturais e desenvolvem geometrias compatíveis com lobos turbidíticos nas porções mais distais. No setor sudeste do Bloco 2, feições canalizadas sugerem contribuição de fluxos provenientes de regiões situadas a montante da área de estudo.

### *5.4.2. Identificação de Morfologias Sísmicas*

A aplicação da decomposição espectral nos *horizon slices* permitiu refinar a identificação dos principais elementos deposicionais ao longo dos intervalos analisados. No pacote pré-Pleistoceno Médio, predominam sistemas de canais turbidíticos confinados, cujo desenvolvimento é fortemente controlado pela paleotopografia associada aos anticlinais do prisma compressivo.

A Figura 15 exemplifica esse comportamento em um intervalo do Plioceno no Bloco Sísmico 1. A integração entre a seção sísmica e a decomposição espectral evidencia um sistema de canais turbidíticos orientados preferencialmente segundo o trend das minibacias (SE–NO), refletindo forte confinamento estrutural e controle do roteamento sedimentar pelos altos estruturais. A seção sísmica também registra superfícies sin-deposicionais e relações de *onlap* contra os anticlinais (2), indicando sedimentação contemporânea ao crescimento dessas estruturas. Nas porções mais distais, observa-se uma feição interpretada como lobo turbidítico (preenchimento amarelo – 1),

caracterizada por resposta espectral dominada por baixas frequências e associada à expansão dos fluxos em uma região de menor confinamento relativo.

A análise integrada reforça que a compartimentalização estrutural exerceu papel fundamental na organização do sistema deposicional durante esse intervalo. Enquanto os canais permaneceram confinados ao interior das minibacias, o desenvolvimento localizado de lobos indica episódios pontuais de extravasamento dos fluxos em setores onde a influência dos altos estruturais foi reduzida, evidenciando a estreita relação entre a tectônica gravitacional e a evolução dos sistemas turbidíticos.

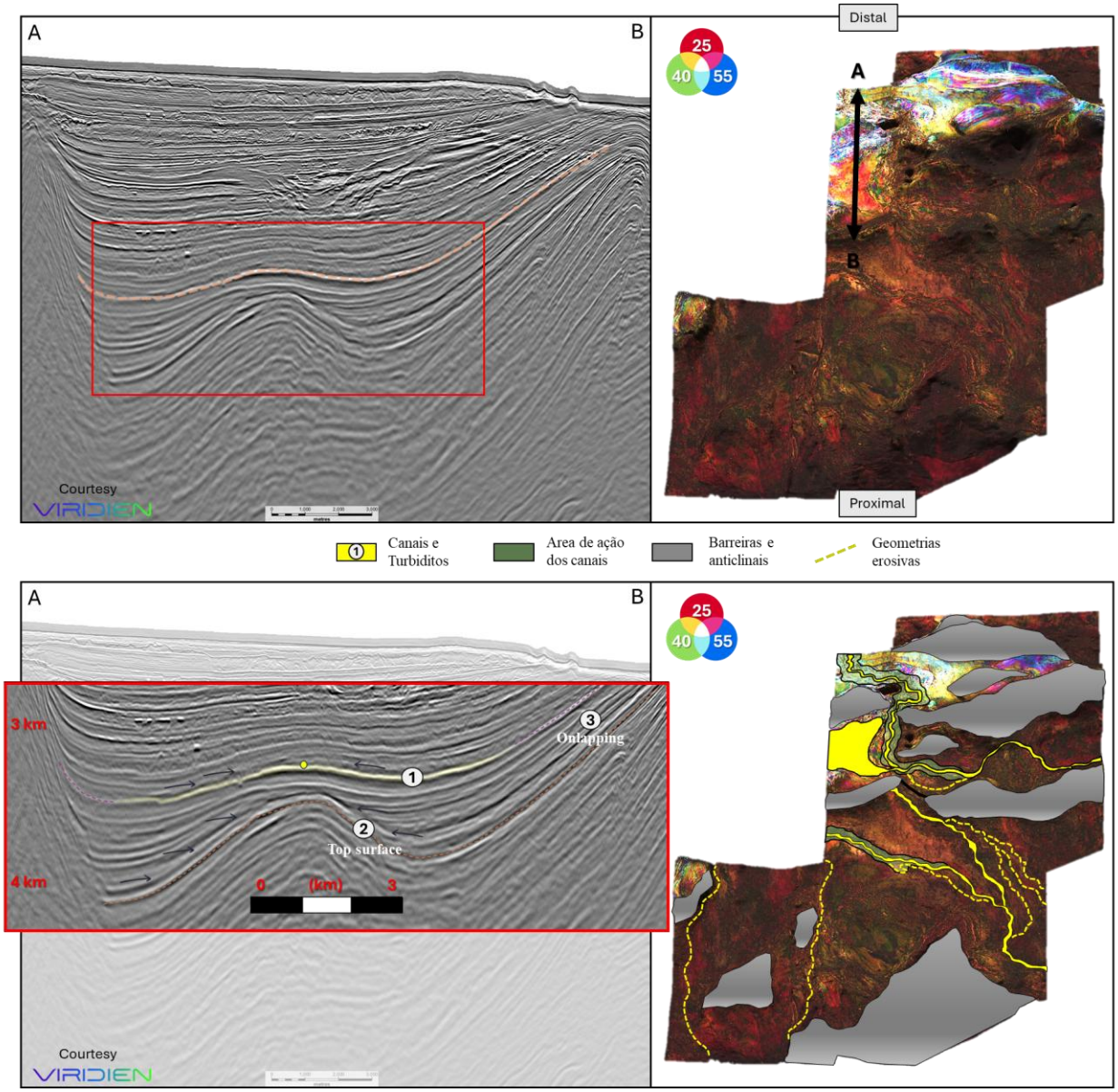


**Figura 15:** Integração entre seção sísmica e mapas de decomposição espectral (RGB – 25, 40 e 55 Hz) para um horizonte do Plioceno no Bloco Sísmico 1 (cortesia Viridien). No conjunto superior, são apresentados a seção sísmica e o respectivo mapa de decomposição espectral sem interpretação, evidenciando as principais anomalias sísmicas e geometrias associadas a sistemas de canais turbidíticos. O retângulo vermelho destaca a área selecionada para a interpretação detalhada. No conjunto inferior, apresentam-se a seção sísmica interpretada e o respectivo mapa de decomposição espectral, destacando as principais geometrias sísmicas identificadas no intervalo, incluindo canais turbidíticos, um lobo deposicional e os anticlinais que controlam a compartimentalização estrutural do sistema deposicional.

No intervalo correspondente ao Pleistoceno Inferior, observa-se uma mudança no comportamento dos sistemas deposicionais em relação ao intervalo mais basal, marcada por maior capacidade dos fluxos em interagir com e, localmente, transpor as barreiras estruturais associadas aos anticlinais do prisma compressivo.

A Figura 16 exemplifica esse comportamento no Bloco Sísmico 1, onde a integração entre a seção sísmica e a decomposição espectral evidencia a coexistência de diferentes elementos deposicionais, incluindo depósitos de transporte de massa (MTDs, em azul - 1), depósitos de levee/overbank (em verde - 2) e superfícies erosivas associadas à base de canais turbidíticos (tracejadas em amarelo). A ocorrência simultânea dessas feições indica um sistema deposicional mais dinâmico, no qual processos gravitacionais e fluxos canalizados atuam de forma integrada, resultando em maior complexidade arquitetural.

A decomposição espectral evidencia com maior clareza a relação entre a compartimentalização estrutural e a distribuição das feições canalizadas, ressaltando o papel dos altos estruturais no direcionamento dos fluxos. Entretanto, em comparação ao intervalo mais antigo, observa-se maior continuidade lateral dos canais, desenvolvimento de superfícies mais erosivas e redução local do confinamento estrutural, sugerindo aumento da energia dos fluxos e maior eficiência do transporte sedimentar.

Na porção noroeste da área, os sistemas canalizados tornam-se mais expressivos e apresentam menor restrição imposta pelos altos estruturais, permitindo maior propagação dos fluxos em direção às porções mais distais do sistema. Alguns desses complexos atingem espessuras de até aproximadamente 500 m, reforçando a interpretação de fluxos de elevada energia e maior capacidade de erosão e transporte durante esse intervalo.

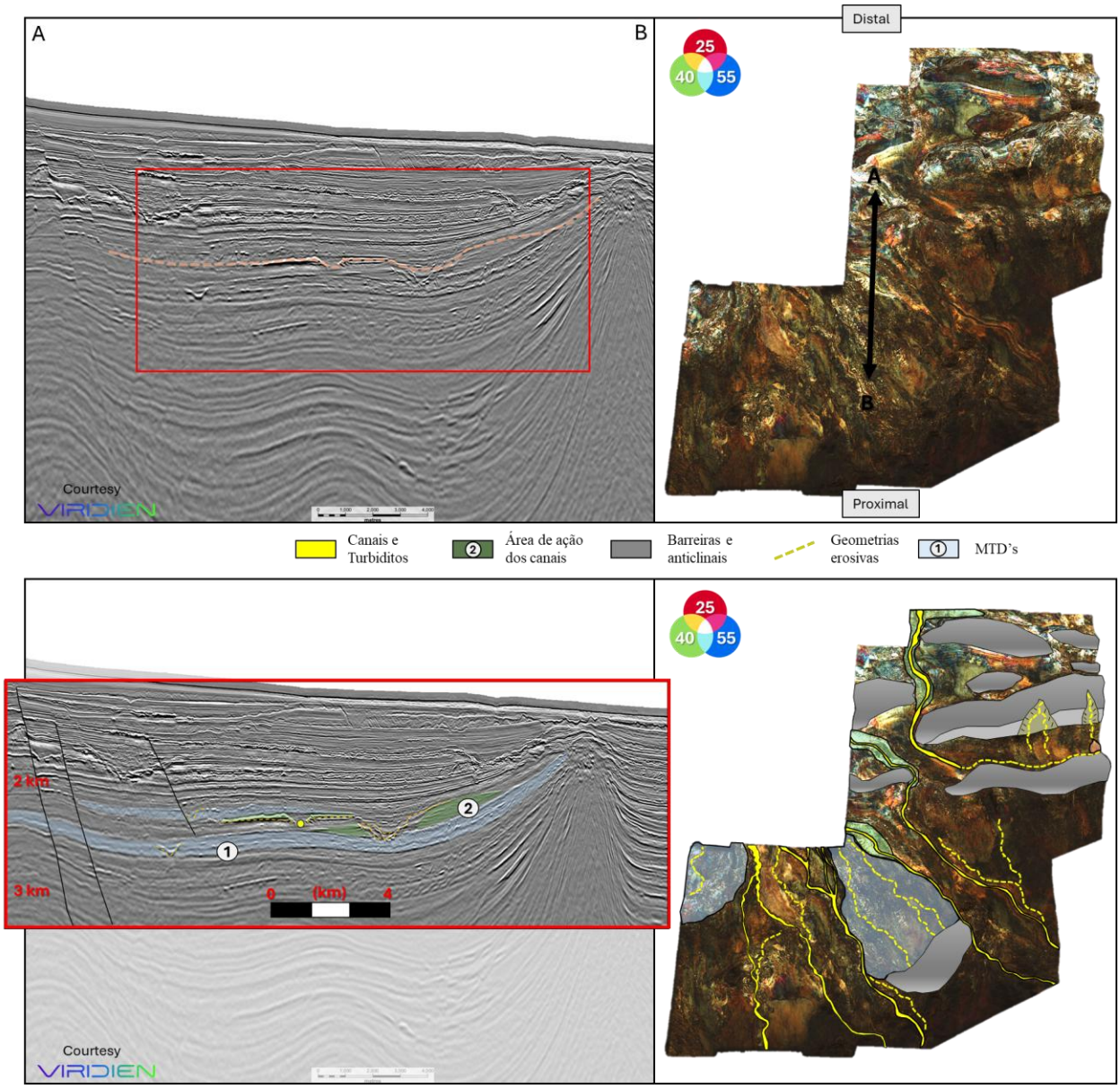



**Figura 16:** Integração entre seção sísmica e mapas de decomposição espectral (RGB – 25, 40 e 55 Hz) para um horizonte do Pleistoceno Inferior no Bloco Sísmico 1 (cortesia Viridien). No conjunto superior, apresentam-se a seção sísmica e o respectivo mapa de decomposição espectral sem interpretação, evidenciando as principais anomalias sísmicas e geometrias associadas aos sistemas deposicionais do intervalo. O retângulo vermelho destaca a área selecionada para a interpretação detalhada. No conjunto inferior, são apresentados a seção sísmica interpretada e o respectivo mapa de decomposição espectral, destacando as principais geometrias sísmicas identificadas, incluindo depósitos de transporte de massa (MTDs), depósitos de levee/overbank, superfícies erosivas associadas à base de canais turbidíticos, canais e anticlinais.

No intervalo correspondente ao Pleistoceno Inferior, a Figura 17 evidencia a organização dos sistemas deposicionais no Bloco Sísmico 2, caracterizada pelo desenvolvimento de complexos de canais meandrantes com caráter predominantemente erosivo, inseridos nas minibacias controladas pelos anticlinais. A integração entre a seção sísmica e a decomposição espectral evidencia a associação desses canais (feições pontilhadas e polígonos amarelos - 2) com depósitos de levee/overbank (em verde - 1) e intervalos de sedimentação de baixa energia (em rosa na seção sísmica interpretada - 3), indicando alternância entre processos de erosão, transporte e deposição ao longo da evolução do sistema.

A análise espectral evidencia que, embora o grau de confinamento comece a ser reduzido, o controle estrutural ainda exerce influência significativa sobre a organização deposicional. Os canais mantêm direção preferencial acompanhando o eixo das minibacias e o *trend* imposto pelos anticlinais, indicando que o roteamento sedimentar continua condicionado pela paleotopografia estrutural. Entretanto, em comparação aos intervalos mais antigos, observa-se maior continuidade lateral, melhor definição geométrica e desenvolvimento de feições mais erosivas, refletindo aumento da energia dos fluxos e maior eficiência do transporte sedimentar. Em alguns setores, esses sistemas ainda permanecem parcialmente confinados nas minibacias, enquanto, em outras áreas, passam a estabelecer conexões entre diferentes depocentros, evidenciando uma transição gradual para um regime deposicional menos confinado.

Adicionalmente, são identificadas feições canalizadas provenientes de setores localizados a sudeste da área de estudo (porção nordeste dos mapas de decomposição espectral da Figura 17), indicando contribuição de fluxos externos ao volume sísmico analisado e sugerindo integração com sistemas de alimentação regionais do Cone Submarino do Amazonas. De forma geral, esse intervalo registra um sistema deposicional mais dinâmico, marcado pelo aumento da frequência e da expressividade dos complexos canalizados, refletindo mudanças progressivas no balanço entre aporte sedimentar e controle estrutural ao longo do tempo.

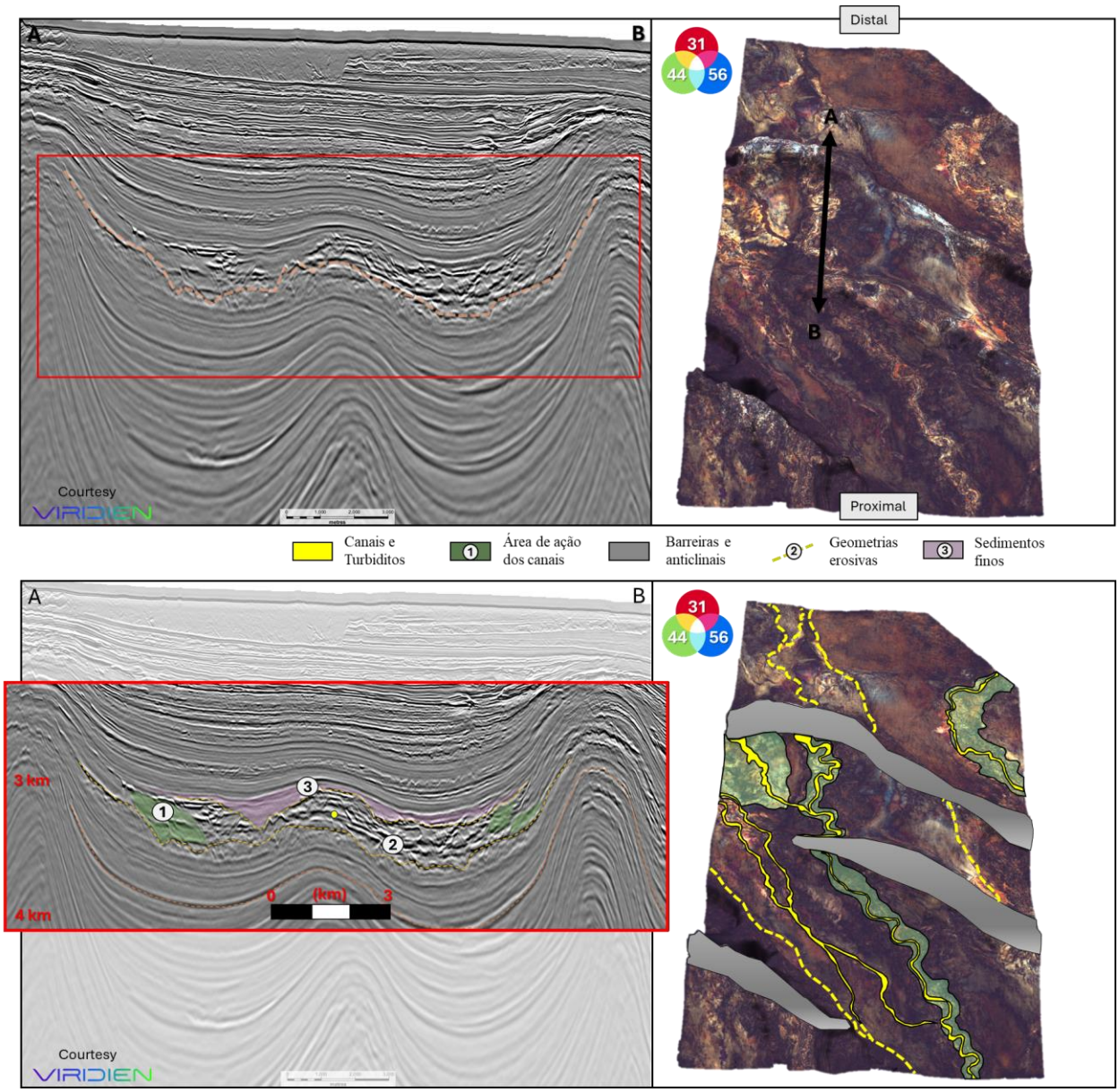



**Figura 17:** Integração entre seção sísmica e mapas de decomposição espectral (RGB – 31, 44 e 56 Hz) para um horizonte do Pleistoceno Inferior no Bloco Sísmico 2 (cortesia Viridien). No conjunto superior, apresentam-se a seção sísmica e o respectivo mapa de decomposição espectral sem interpretação, evidenciando as principais anomalias sísmicas e geometrias deposicionais do intervalo. O retângulo vermelho destaca a área selecionada para a interpretação detalhada. No conjunto inferior, são apresentados a seção sísmica interpretada e o respectivo mapa de decomposição espectral, destacando complexos de canais meandrantes (polígonos e tracejados em amarelo), depósitos de levee/overbank (em verde) e os anticlinais (em cinza).

## *5.5. Caracterização Sísmica do Intervalo Pós-Pleistoceno Médio – Pleistoceno Superior*

### *5.5.1. Mapa de Amplitude*

O mapa de amplitude apresentado na Figura 18 corresponde à extração do intervalo entre o horizonte do Pleistoceno Médio (~0,8 Ma) e o fundo do mar. Neste mapa, o arcabouço estrutural é representado pela escala de cores variando de azul a vermelho, onde os tons mais quentes indicam áreas estruturalmente mais rasas e os tons mais frios correspondem a porções mais profundas do sistema. As anomalias em tons de roxo representam as mínimas amplitudes extraídas dentro desse intervalo estratigráfico.

A interpretação desse atributo indica que, nesse estágio evolutivo, as minibacias mais proximais, desenvolvidas no domínio extensional do sistema gravitacional, já se encontram amplamente preenchidas. Como resultado, observa-se que os fluxos sedimentares passam a transpor parcialmente as barreiras estruturais associadas ao prisma compressivo, permitindo que os sistemas turbidíticos alcancem setores mais distais do Cone Submarino do Amazonas. Nesse intervalo, os canais apresentam geometrias mais contínuas e caráter mais erosivo, sugerindo maior energia dos fluxos e maior eficiência no transporte sedimentar, com os leques turbidíticos estando, possivelmente, sendo deposicionados em porções ainda mais distais.

Esse padrão deposicional indica que, durante o Pleistoceno Médio–Recente, o aporte sedimentar passou a superar a taxa de criação de espaço de acomodação controlada pela tectônica gravitacional. Tal reorganização do sistema pode estar relacionada ao aumento do fornecimento sedimentar associado à intensificação da erosão continental vinculada à evolução andina (Hoorn et al., 2017), bem como a oscilações glacioeustáticas quaternárias. Em particular, o evento glacial associado ao Marine Isotope Stage 16 (MIS-16), ocorrido por volta de ~0,8 Ma, é reconhecido como um dos máximos glaciais mais intensos do Quaternário, marcado por regressões marinhas significativas que favoreceram o aumento da transferência sedimentar para ambientes profundos (Maslin et al., 2006; Tortarolo et al., 2024). Esses fatores podem ter contribuído para o desenvolvimento de sistemas turbidíticos mais extensivos e menos confinados no intervalo superior do Cone Submarino do Amazonas.

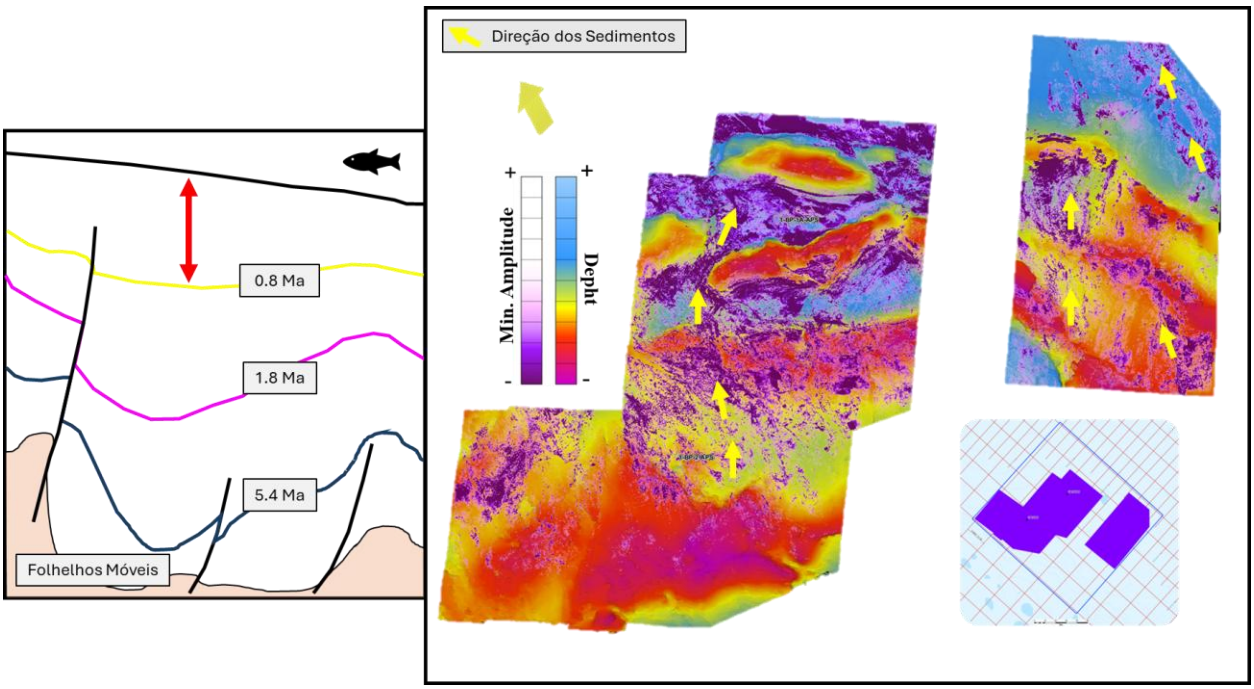



**Figura 18:** Mapa de amplitude mínima sobreposto ao mapa estrutural do intervalo entre o Pleistoceno Médio (~0,8 Ma) e o fundo do mar. As cores de azul a vermelho representam a configuração estrutural do intervalo, enquanto as tonalidades em roxo correspondem às anomalias de mínima amplitude, interpretadas como depósitos turbidíticos arenosos. Observa-se que as minibacias proximais se encontram amplamente preenchidas, permitindo maior propagação dos sistemas canalizados para setores mais distais. Os canais apresentam geometrias mais contínuas e caráter mais erosivo, refletindo a redução do confinamento estrutural e o desenvolvimento de sistemas turbidíticos mais extensivos no intervalo Pleistoceno Médio–Recente.

### *5.5.2 Identificação de Morfologias Sísmicas*

No intervalo correspondente ao Pleistoceno Médio (~0,8 Ma), a Figura 19 registra uma mudança marcante na dinâmica deposicional do sistema. Esse período é caracterizado por aumento expressivo do aporte sedimentar e pela influência de oscilações glacioeustáticas, associadas ao evento MIS-16, que favoreceram a intensificação da transferência sedimentar para ambientes profundos (Maslin et al., 2006; Tortarolo et al., 2024). Nesse contexto, o sistema passa a apresentar caráter mais erosivo e maior capacidade de redistribuição sedimentar.

A integração entre a seção sísmica e a decomposição espectral evidencia o desenvolvimento de uma superfície erosiva regional (tracejada amarelo em seção e mapa), associada a episódios de incisão e *bypass*, sobre a qual se organizam depósitos arenosos relacionados à base de canais (em roxo em seção – 2 e polígonos amarelos em mapa), depósitos de transporte de massa (MTDs, em azul - 1) e intervalos finos relacionados à sedimentação pós-erosiva (feições preenchidas em verde

em seção). Esse arranjo reflete a atuação combinada de processos erosivos e deposicionais em um sistema de alta energia e elevada mobilidade sedimentar.

A decomposição espectral evidencia uma reorganização no padrão deposicional, destacando feições com maior conteúdo de frequência que passam a ultrapassar os limites das minibacias e dos altos estruturais. Esse comportamento indica aumento da energia dos fluxos e maior capacidade de transposição das barreiras previamente impostas pela compartimentalização estrutural. Nesse estágio, observa-se também que as minibacias proximais se encontram amplamente preenchidas, favorecendo a propagação dos fluxos para setores mais distais e reduzindo progressivamente a influência do controle estrutural sobre o roteamento sedimentar.

Do ponto de vista geomorfológico, os sistemas canalizados tornam-se mais contínuos e apresentam caráter mais erosivo, assumindo direção preferencial SW–NE em relação aos intervalos mais antigos. Paralelamente, os altos estruturais proximais tornam-se progressivamente menos evidentes devido ao seu soterramento e à erosão parcial, enquanto os fluxos passam a transpor antigas barreiras estruturais e alcançar porções cada vez mais distais do sistema. Em conjunto, essas evidências caracterizam uma importante reorganização da arquitetura deposicional, marcando a transição para um sistema turbidítico menos confinado e mais eficiente no transporte sedimentar.

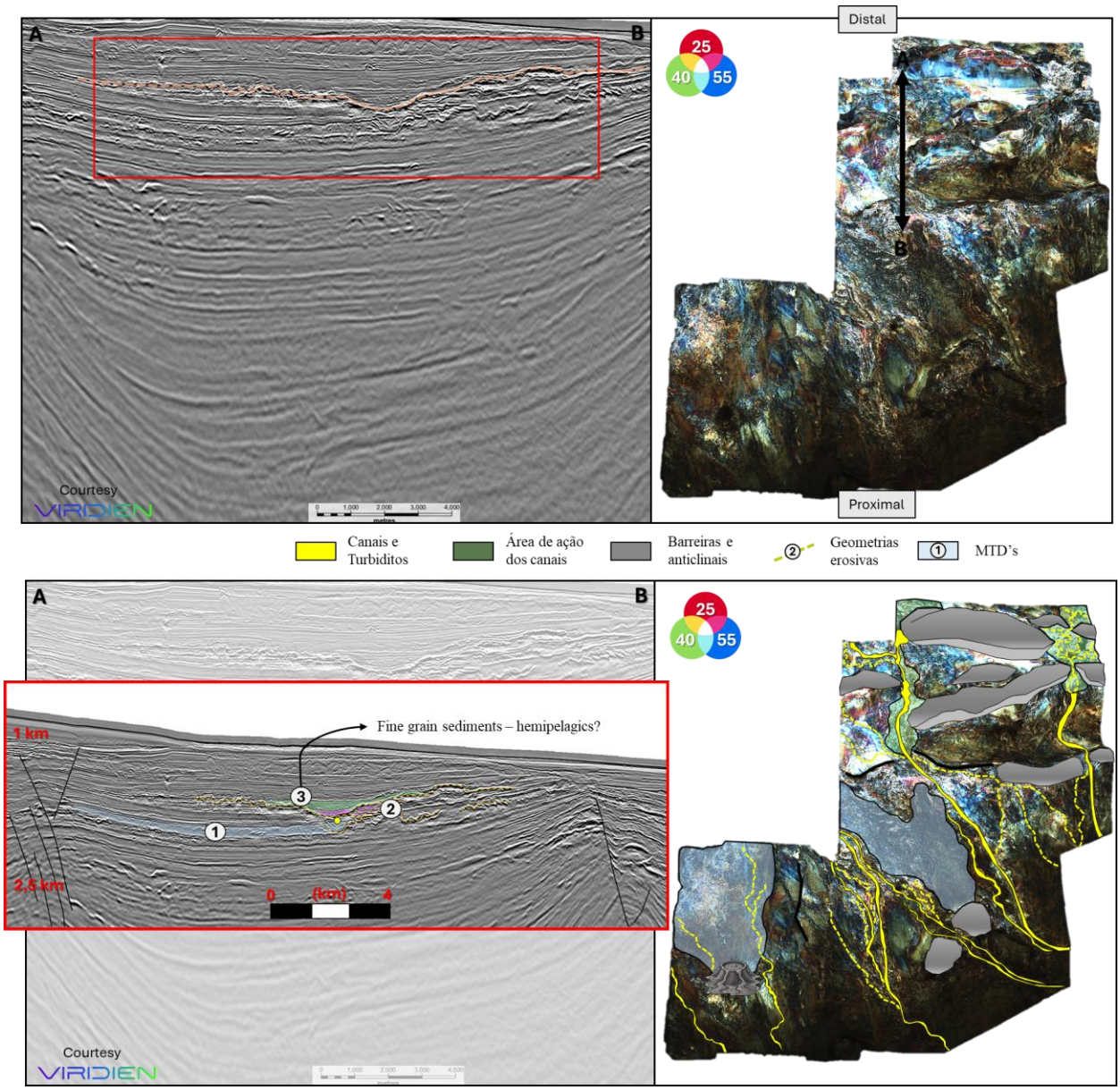



**Figura 19:** Integração entre seção sísmica e mapas de decomposição espectral (RGB – 25, 40 e 55 Hz) para um horizonte do Pleistoceno Médio (~0,8 Ma) no Bloco Sísmico 1 (cortesia Viridien). No conjunto superior, apresentam-se a seção sísmica e o respectivo mapa de decomposição espectral sem interpretação, evidenciando as principais anomalias sísmicas e geometrias deposicionais do intervalo. O retângulo vermelho destaca a área selecionada para a interpretação detalhada. No conjunto inferior, são apresentados a seção sísmica interpretada e o respectivo mapa de decomposição espectral, destacando a superfície erosiva regional (tracejada amarelo em seção e mapa), depósitos arenosos associados à base de canais (em roxo em seção - 2 e polígonos amarelos em mapa), depósitos de transporte de massa (MTDs, em azul - 1), intervalos finos pós-erosivos (em verde) e os anticlinais (em cinza).

A Figura 20, referente ao Bloco Sísmico 1, representa um intervalo próximo à configuração batimétrica atual, com o círculo amarelo indicando o nível dos horizontes interpretados. Nesse

estágio, observa-se um sistema caracterizado por elevada instabilidade sedimentar, com presença expressiva de depósitos de transporte de massa (MTDs), cujas espessuras podem atingir aproximadamente 200 m.

A integração entre a seção sísmica e a decomposição espectral evidencia múltiplas gerações de MTDs (em rosa, azul, verde e laranja em seção – 1 e preenchimentos cinzas em mapa), refletindo episódios sucessivos de remobilização do talude. Associados a esses depósitos, observam-se a superfície erosiva regional (tracejado amarelo em seção - 2), herdada de fases anteriores, e escarpas (3) relacionadas aos próprios eventos de remobilização, configurando um sistema altamente dinâmico e com intensa reorganização interna. A ocorrência de diferentes gerações de MTDs indica um regime deposicional dominado por processos gravitacionais recorrentes ao longo da evolução recente do sistema.

A decomposição espectral reforça essa interpretação ao evidenciar contrastes entre depósitos caóticos, caracterizados por baixo conteúdo de frequência, e feições mais contínuas relacionadas aos altos estruturais ainda preservados. Enquanto nas porções distais os anticlinais continuam exercendo influência sobre a organização deposicional, nas áreas mais proximais predominam feições associadas à instabilidade do talude, incluindo escarpas de MTDs e estruturas relacionadas à migração de fluidos. Essas últimas incluem formas circulares de baixa resposta espectral, interpretadas como possíveis *pockmarks* e/ou estruturas de escape de fluidos, sugerindo a atuação de processos de sobrepressão e descompressão em níveis próximos ao fundo marinho.

Adicionalmente, observa-se que parte dos depósitos de transporte de massa é posteriormente retrabalhada por sistemas canalizados (tracejados e polígonos amarelos em mapa), evidenciando a interação entre fluxos turbidíticos e depósitos previamente remobilizados. A presença de blocos preservados (polígonos azuis em mapa) inseridos em domínios caóticos reforça a heterogeneidade do sistema e diferentes graus de deformação interna dos MTDs.

Em conjunto, essas evidências indicam que, no estágio mais recente de evolução do Cone Submarino do Amazonas, os processos de remobilização gravitacional passam a desempenhar papel dominante na reorganização da topografia do fundo marinho, controlando tanto a distribuição dos depósitos quanto o roteamento dos fluxos sedimentares subsequentes.

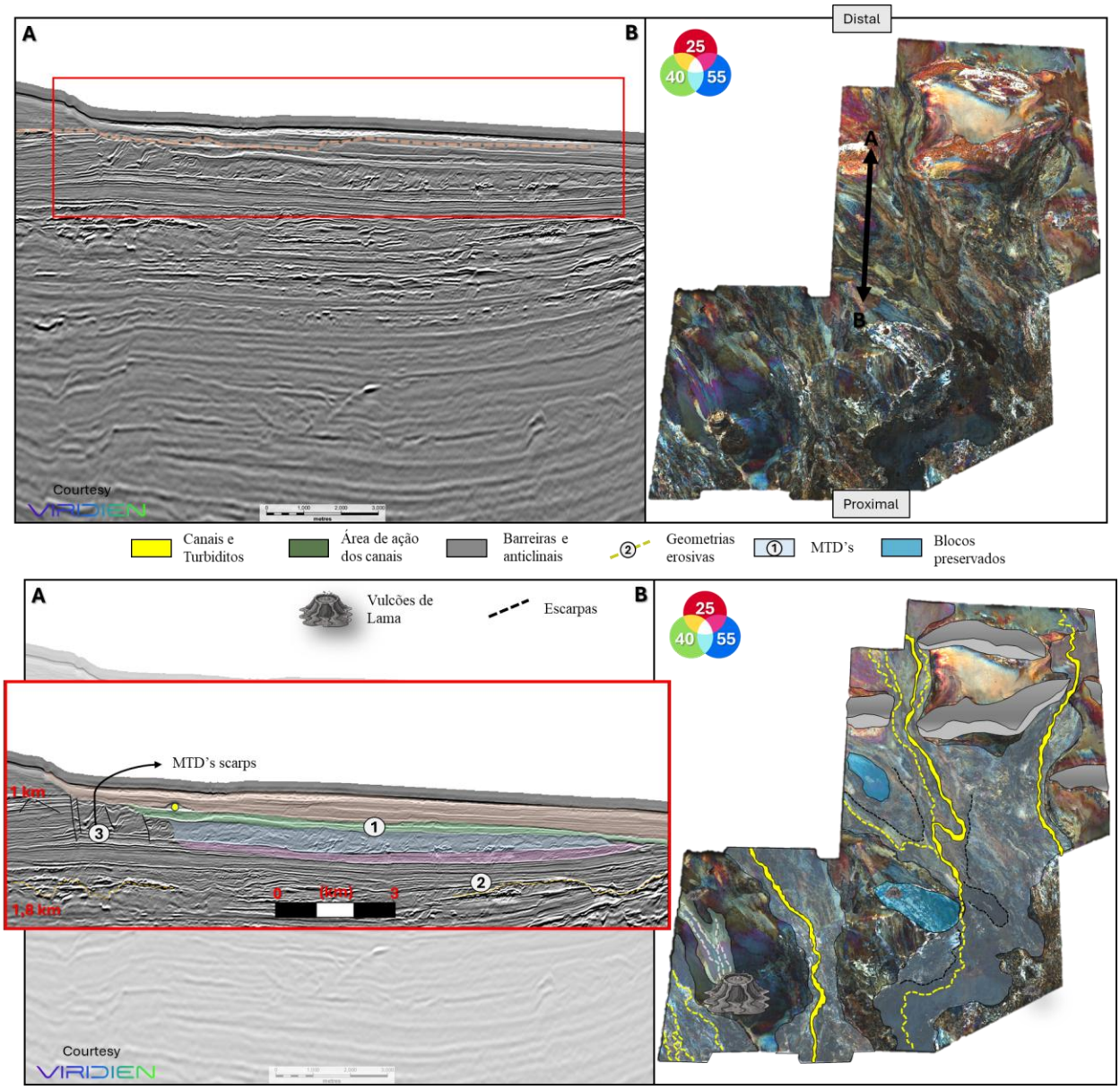



**Figura 20:** Integração entre seção sísmica e mapas de decomposição espectral (RGB – 25, 40 e 55 Hz) para um intervalo próximo ao fundo do mar no Bloco Sísmico 1 (cortesia Viridien). No conjunto superior, apresentam-se a seção sísmica e o respectivo mapa de decomposição espectral sem interpretação, evidenciando as principais anomalias sísmicas e geometrias deposicionais do intervalo. O retângulo vermelho destaca a área selecionada para a interpretação detalhada. No conjunto inferior, são apresentados a seção sísmica interpretada e o respectivo mapa de decomposição espectral, destacando diferentes gerações de depósitos de transporte de massa (MTDs, em rosa, azul, verde e laranja), a superfície erosiva regional (tracejada), escarpas associadas aos MTDs, feições canalizadas (tracejadas em amarelo), um bloco preservado (em verde) e os anticlinais (em cinza).

No intervalo correspondente ao Pleistoceno Superior–Recente, a Figura 21 evidencia a continuidade da evolução deposicional observada anteriormente, com predominância de complexos de depósitos de transporte de massa (MTDs), refletindo um ambiente de elevada instabilidade sedimentar também na área correspondente ao Bloco Sísmico 2.

A integração entre a seção sísmica e a decomposição espectral evidencia diferentes gerações de MTDs, com os eventos mais antigos representados em rosa e verde (em seção – 2) e verde claro em mapa, e um evento mais recente em azul (em seção - 1), que retrabalha parcialmente os depósitos previamente acumulados. Esse padrão reflete episódios sucessivos de remobilização do talude, nos quais processos gravitacionais recorrentes promovem a reconfiguração contínua da arquitetura sedimentar. A presença de blocos preservados (em roza em mapa) inseridos nos MTDs reforça a heterogeneidade desses depósitos e evidencia diferentes graus de deformação interna.

Também são observados refletores interpretados como BSRs (Bottom Simulator Reflectors) em níveis próximos ao fundo do mar (tracejado em rosa na seção sísmica). Essas feições concentram-se principalmente nas proximidades do ápice dos anticlinais e em setores interpretados como zonas de escape de fluidos e alívio de pressão dos folhelhos móveis, sendo consistentes com a ocorrência de migração de fluidos em níveis rasos do sistema.

Associados aos MTDs, observam-se sistemas canalizados (tracejados em amarelo – 3 e polígonos e tracejados amarelos em mapa) com extensão lateral superior a 3 km, que incidem sobre os depósitos remobilizados, indicando a atuação de fluxos turbidíticos capazes de retrabalhar esses materiais. A coexistência de canais ativos e depósitos de transporte de massa evidencia a forte interação entre processos gravitacionais e fluxos canalizados durante a evolução mais recente do sistema.

A decomposição espectral permite discriminar as diferentes gerações de MTDs, destacando contrastes entre eventos mais recentes, caracterizados por menor conteúdo de frequência e resposta sísmica mais caótica, e depósitos mais antigos, que apresentam maior conteúdo espectral e preservação interna.

Do ponto de vista espacial, observa-se que os sistemas canalizados mantêm elevada conectividade ao longo do domínio distal, com feições que sugerem integração com rotas sedimentares regionais. Destaca-se, em particular, um complexo canalizado na porção distal, cuja geometria e orientação predominante SE–NO são compatíveis com uma possível ramificação do sistema de cânions ativo do Cone Submarino do Amazonas, indicando que os fluxos recentes permanecem fortemente integrados ao sistema de transporte sedimentar regional.

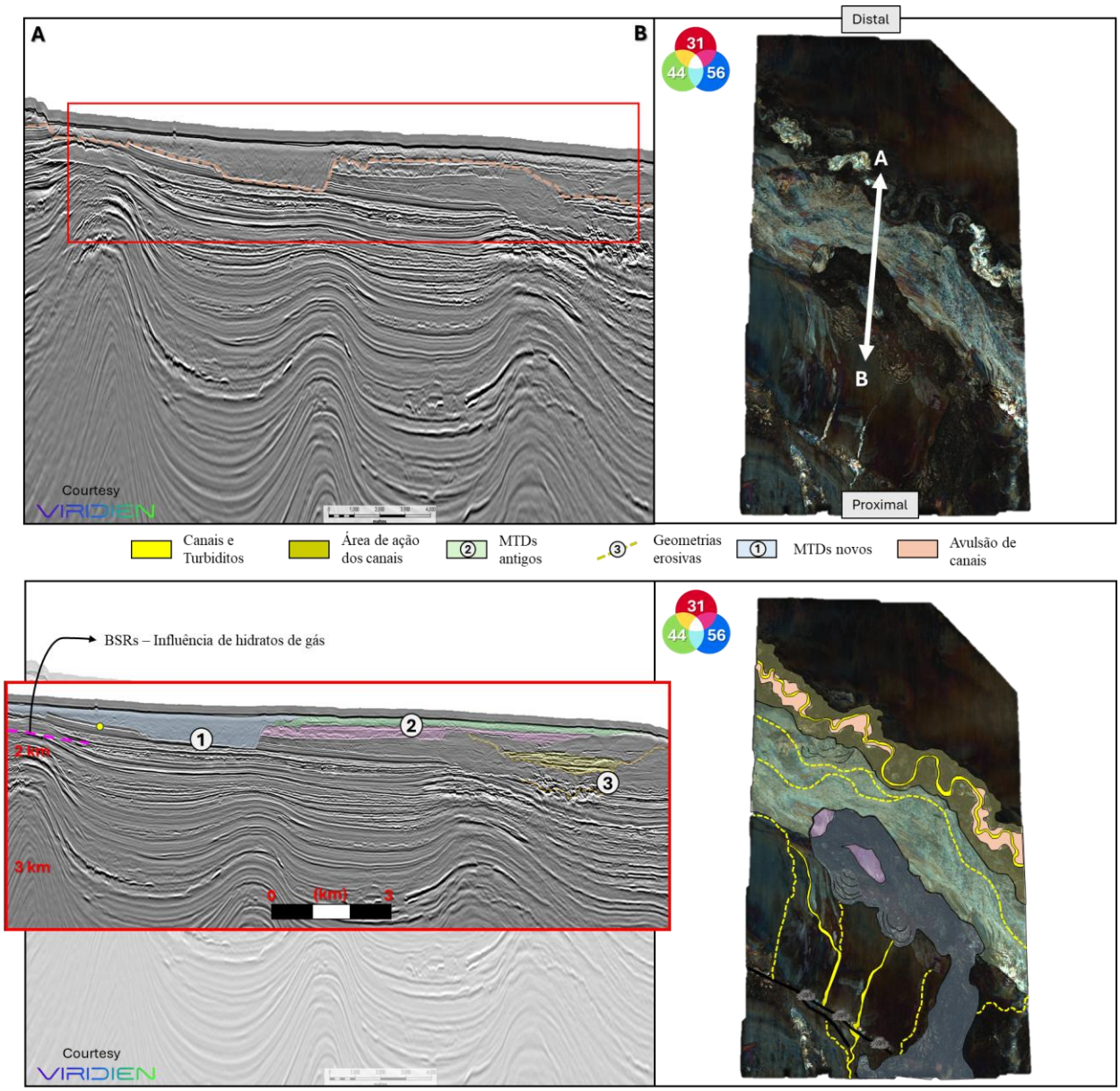



**Figura 21:** Integração entre seção sísmica e mapas de decomposição espectral (RGB – 31, 44 e 56 Hz) para um intervalo do Pleistoceno Superior–Recente no Bloco Sísmico 2 (cortesia Viridien). No conjunto superior, apresentam-se a seção sísmica e o respectivo mapa de decomposição espectral sem interpretação, evidenciando as principais anomalias sísmicas e geometrias deposicionais do intervalo. O retângulo vermelho destaca a área selecionada para a interpretação detalhada. No conjunto inferior, são apresentados a seção sísmica interpretada e o respectivo mapa de decomposição espectral, destacando diferentes gerações de depósitos de transporte de massa (MTDs, em rosa, verde e azul em seção – 1 e 2 e em azul e verde claro em mapa), feições canalizadas (tracejadas e polígonos em amarelo), blocos preservados (em rosa) e o complexo canalizado meandrante (3 em seção e polígonos amarelos e laranja em mapa).

# 6. Discussão

Os resultados obtidos a partir da integração de dados sísmicos 3D, interpretação estratigráfica e análise de atributos (mínima amplitude e decomposição espectral) evidenciam uma forte relação entre tectônica gravitacional, aporte sedimentar e arquitetura deposicional no setor noroeste do Cone Submarino do Amazonas. A evolução do sistema pode ser compreendida a partir de uma mudança fundamental no balanço entre criação de espaço de acomodação e taxa de sedimentação, particularmente marcada no intervalo do Pleistoceno Médio (~0,8 Ma).

## 6.1. Arquiteturas Deposicionais do Intervalo Pré-Pleistoceno Médio

No intervalo compreendido entre o Mioceno Superior e o Pleistoceno Médio, a arquitetura deposicional do Cone Submarino do Amazonas é dominada por sistemas turbidíticos fortemente confinados, cuja organização é diretamente controlada pela compartimentalização estrutural associada à tectônica de folhelhos móveis. Nesse contexto, o descolamento regional no topo da Formação Limoeiro atua como principal superfície de desacoplamento, condicionando a formação de minibacias no domínio extensional e anticlinais no domínio compressivo, que passam a controlar o roteamento sedimentar em escala regional (Reis et al., 2010; Souza et al., 2025).

A análise integrada dos atributos sísmicos, com ênfase na decomposição espectral em visualização 3D (Fig. 22-A), reforça esse modelo ao evidenciar, de forma contínua em ambos os blocos sísmicos, a organização espacial dos sistemas deposicionais. As feições canalizadas, os depósitos de transporte de massa e as zonas de interação canal–levee mostram forte correspondência com a geometria das minibacias, indicando que os fluxos turbidíticos estavam amplamente condicionados pela paleotopografia imposta pelos altos estruturais. Na interpretação integrada (Fig. 22-B), observa-se que os canais seguem preferencialmente o eixo das minibacias (trend SE–NO), com desenvolvimento de sistemas confinados, limitada migração lateral e distribuição restrita dos depósitos associados.

Entretanto, esse confinamento não é uniforme ao longo de todo o sistema. Em setores onde os anticlinais apresentam menor amplitude estrutural ou menor expressão topográfica, observa-se que parte dos sistemas canalizados consegue transpor essas barreiras, estabelecendo conexões locais com áreas mais distais. Esse comportamento indica que o controle estrutural atua de forma heterogênea, permitindo episódios pontuais de *bypass* sedimentar mesmo em um sistema predominantemente confinado.

Esse padrão deposicional sugere um sistema no qual a criação de espaço de acomodação, controlada pela tectônica gravitacional, supera a taxa de preenchimento sedimentar, favorecendo o aprisionamento dos fluxos e o desenvolvimento de depocentros compartimentalizados. A ocorrência de depósitos de transporte de massa intercalados e sua relação com os sistemas canalizados reforçam a ideia de uma paleotopografia dinâmica, na qual a reorganização estrutural influencia continuamente a distribuição dos tratos deposicionais.

Os resultados obtidos são consistentes com modelos de sistemas turbidíticos confinados descritos em margens passivas sob influência de tectônica gravitacional, nos quais o crescimento estrutural controla o roteamento sedimentar, promove *ponding* e reduz a eficiência de *bypass* (Howlett et al., 2020). No contexto do Cone do Amazonas, esse comportamento também corrobora interpretações prévias que indicam forte controle da sobrepressão e da mobilidade de folhelhos na organização do sistema deposicional, especialmente na porção noroeste do leque (Souza et al., 2025). Adicionalmente, a predominância de fluxos confinados, ainda que com episódios localizados de transposição estrutural, é compatível com períodos de elevado aporte sedimentar associados à intensificação da erosão continental, mas subordinados à geração de acomodação controlada estruturalmente (Maslin et al., 2006; Tortarolo et al., 2024).

Em conjunto, a integração entre atributos espectrais e arcabouço estrutural evidencia que, no intervalo pré-Pleistoceno Médio, o sistema deposicional operava sob forte controle tectono-sedimentar, com canais, lobos e MTDs organizados em função da compartimentalização imposta pelos folhelhos móveis, mas com variações locais no grau de confinamento que permitiam conectividade limitada entre depocentros.

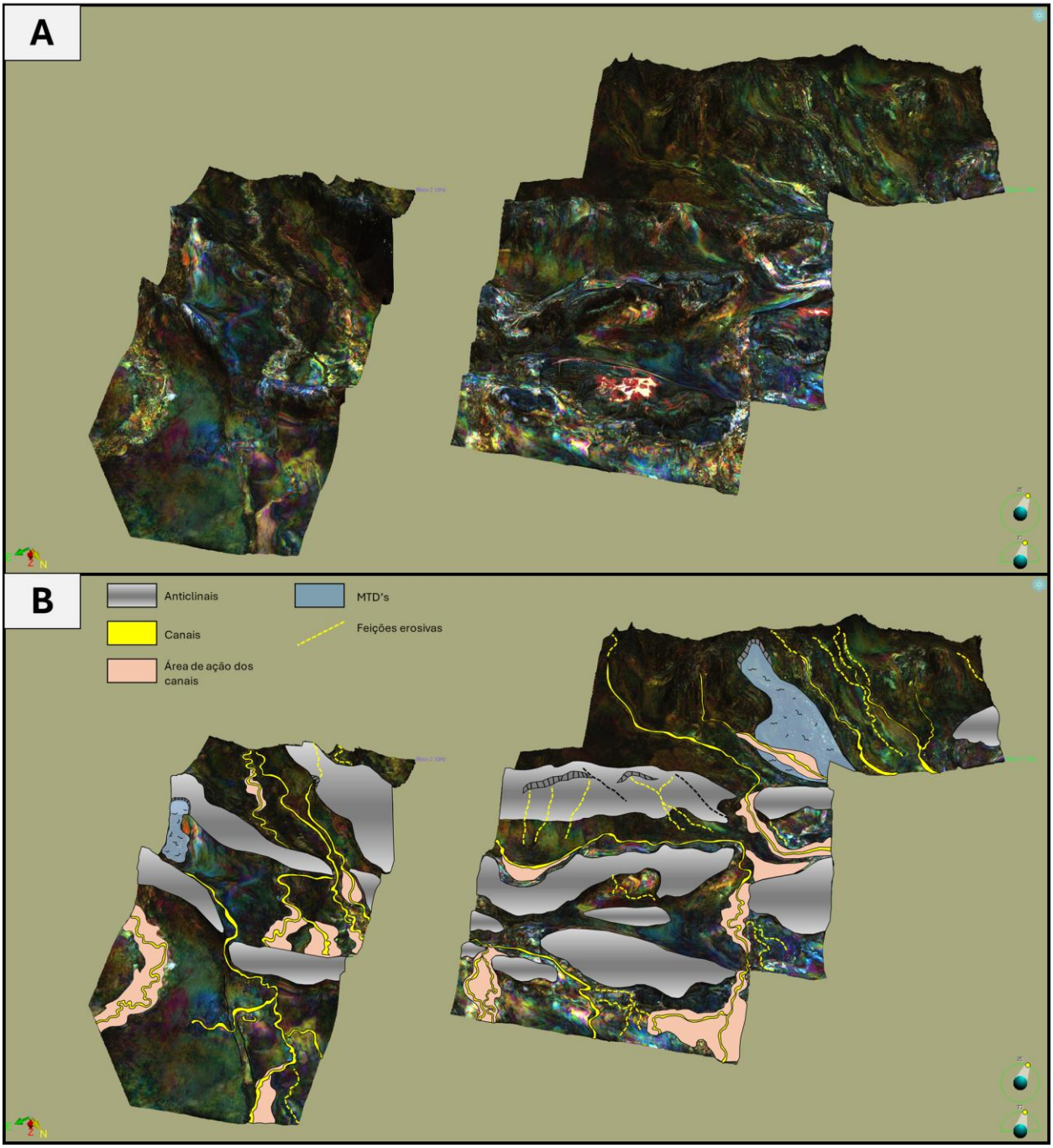



**Figura 22:** Mapas de decomposição espectral (RGB – 10, 20 e 30 Hz) em visualização 3D para um intervalo estratigráfico entre o Mioceno Superior (5,4 Ma) e o Pleistoceno Médio (~0,8 Ma), abrangendo os Blocos 1 e 2. Em (A), apresenta-se o atributo sem interpretação, evidenciando os altos estruturais (anticlinais) e as principais geometrias deposicionais associadas às minibacias. Em (B), modelo geológico 3D interpretado, destacando canais (em amarelo), superfícies erosivas (tracejadas em amarelo), anticlinais (em cinza), zonas de interação canal–levee, *overbanks* e migração lateral (em rosa) e depósitos de transporte de massa (MTDs, em azul).

## *6.2. Arquiteturas Deposicionais do Invervalo Pós-Pleistoceno Médio*

A partir do Pleistoceno Médio (~0,8 Ma), observa-se uma mudança significativa na dinâmica deposicional do Cone Submarino do Amazonas, marcada por aumento do aporte sedimentar e intensificação dos processos erosivos. Essa transição é interpretada como resultado combinado de variações glacioeustáticas quaternárias, incluindo eventos regressivos associados aos estágios isotópicos marinhos (MIS), e aumento da eficiência do transporte sedimentar para ambientes profundos (Maslin et al., 2006; Tortarolo et al., 2024).

A análise integrada dos atributos sísmicos, com destaque para a decomposição espectral em visualização 3D (Fig. 23-A), evidencia uma reorganização expressiva do sistema deposicional em ambos os blocos sísmicos. Diferentemente do intervalo mais basal, observa-se que os fluxos turbidíticos passam a ultrapassar de forma recorrente as barreiras estruturais impostas pelos anticlinais, indicando redução do grau de confinamento e maior conectividade entre os depocentros. Na interpretação integrada (Fig. 23-B), os sistemas canalizados apresentam maior continuidade lateral, caráter mais erosivo e menor dependência da orientação das minibacias.

Esse comportamento está diretamente relacionado ao preenchimento quase completo das minibacias proximais, o que reduz a eficiência do aprisionamento sedimentar e favorece a propagação dos fluxos para setores mais distais do sistema. Adicionalmente, episódios regressivos associados a quedas abruptas do nível do mar podem ter intensificado a incisão e o *bypass* sedimentar, contribuindo para o desenvolvimento de canais mais energéticos e capazes de erodir e transpor barreiras estruturais previamente atuantes.

Embora os anticlinais ainda exerçam influência sobre a organização deposicional, especialmente nas porções mais distais do prisma compressivo, seu papel passa a ser secundário no controle do roteamento sedimentar. Esse enfraquecimento do controle estrutural é refletido na maior dispersão espacial das feições canalizadas e na perda do alinhamento preferencial anteriormente condicionado pelas minibacias.

Nesse intervalo, observa-se também a presença de extensos depósitos de transporte de massa, frequentemente associados a blocos preservados em meio a domínios caóticos. Esses elementos indicam elevada instabilidade do talude e reforçam a atuação de processos gravitacionais recorrentes, que coexistem com sistemas turbidíticos ativos e contribuem para a complexidade da arquitetura deposicional.

Os resultados obtidos são consistentes com modelos de sistemas turbidíticos menos confinados, nos quais o aumento do aporte sedimentar passa a superar a taxa de criação de espaço de acomodação, promovendo maior eficiência de *bypass* e redistribuição sedimentar ao longo do sistema (Howlett et al., 2020). No contexto do Cone do Amazonas, esse comportamento também

está alinhado com interpretações que associam a evolução quaternária a pulsos sedimentares intensificados e reorganização do sistema deposicional em resposta a controles climáticos e eustáticos (Maslin et al., 2006; Tortarolo et al., 2024).

Em conjunto, a integração entre atributos espectrais e arcabouço estrutural indica que, no intervalo pós-Pleistoceno Médio, o sistema deposicional evolui para um estágio menos confinado e mais conectado, no qual fluxos turbidíticos passam a se propagar de forma mais eficiente para porções distais, superando parcialmente os controles estruturais previamente dominantes.

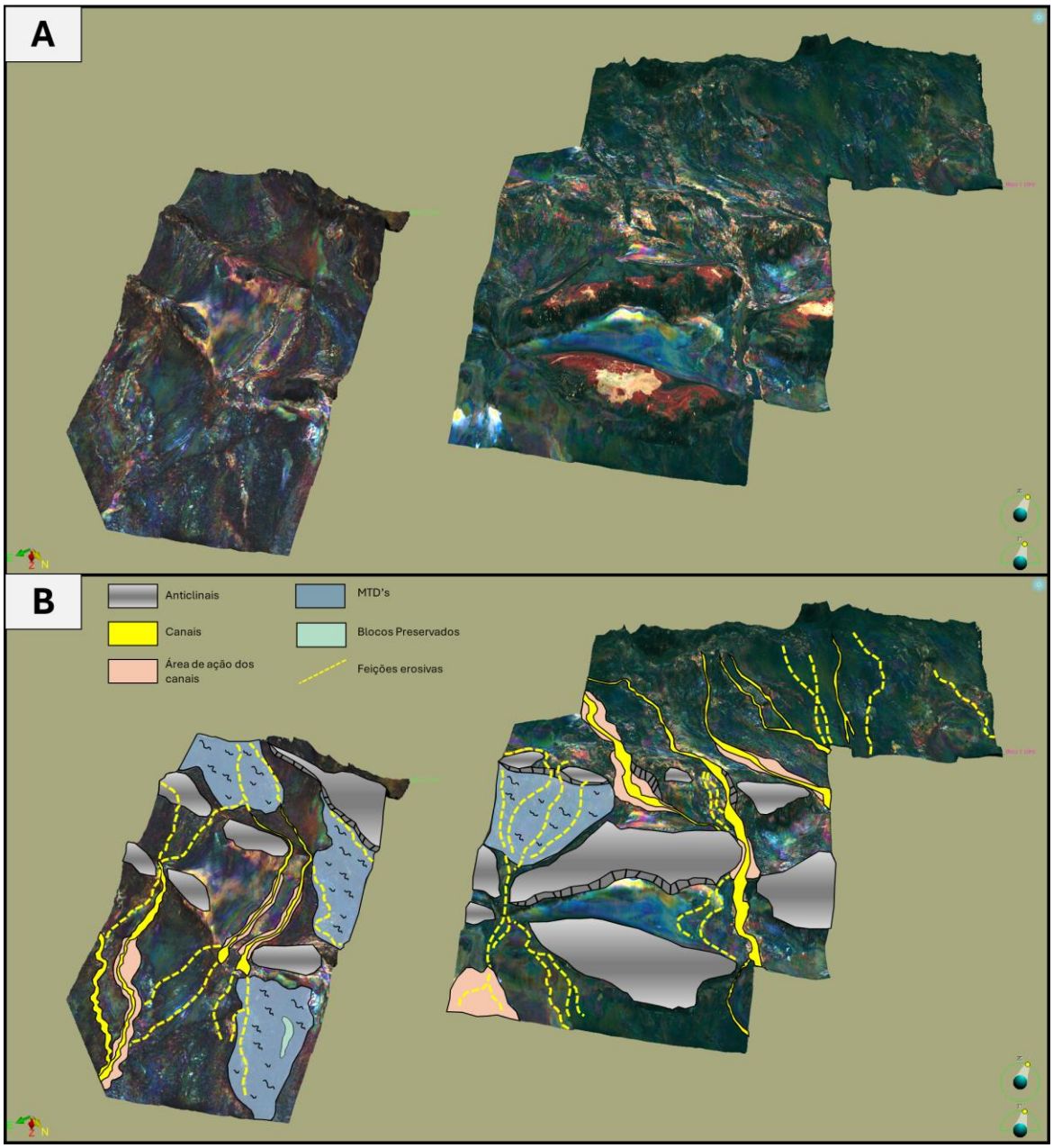


**Figura 23:** Mapas de decomposição espectral (RGB – 10, 20 e 30 Hz) em visualização 3D para um intervalo estratigráfico entre o Pleistoceno Médio (~0,8 Ma) e a base dos MTDs mais recentes, abrangendo os Blocos 1 e 2. Em **(A)**, apresenta-se o atributo sem interpretação, evidenciando os altos estruturais (anticlinais), as geometrias canalizadas e os depósitos de transporte de massa (MTDs), caracterizados por respostas espectrais contrastantes. Em **(B)**, modelo geológico 3D interpretado, destacando canais (**em amarelo**), superfícies erosivas (**tracejadas em amarelo**), anticlinais (**em cinza**), zonas de interação canal–levee, *overbanks* e migração lateral (**em rosa**), depósitos de transporte de massa (MTDs, **em azul**) e blocos preservados (**em verde**).

Em níveis próximos ao fundo do mar, a análise da decomposição espectral em visualização 3D (Fig. 24-A) evidencia um sistema deposicional marcado por elevada instabilidade do talude, no qual processos gravitacionais passam a exercer controle dominante sobre a organização das geometrias sedimentares. Nesse estágio, observa-se aumento significativo na ocorrência de depósitos de transporte de massa (MTDs) de grande porte, que passam a atuar como elementos primários de controle topográfico, influenciando diretamente o roteamento dos fluxos sedimentares.

A interpretação integrada (Fig. 24-B) mostra que esses MTDs, distribuídos em diferentes gerações, criam uma paleotopografia altamente irregular, com relevo positivo e negativo capaz de confinar, redirecionar ou bloquear fluxos turbidíticos subsequentes. Esse comportamento está de acordo com modelos que indicam que MTDs podem atuar como barreiras dinâmicas e superfícies de acomodação temporárias, promovendo confinamento local e reorganização do sistema deposicional (Kneller et al., 2016).

Ainda, a intensificação dos depósitos de transporte de massa (MTDs) nesse intervalo pode estar relacionada à instabilidade do talude associada aos sistemas de hidratos de gás. Embora os *Bottom Simulating Reflectors* (BSRs) representem apenas um indicador sísmico da presença de hidratos e gás livre, a dissociação desses hidratos pode elevar a pressão de poros e reduzir a resistência ao cisalhamento dos sedimentos, favorecendo movimentos de massa (Mosher et al., 2022). Conforme observado na Figura 21, extensos BSRs ocorrem principalmente nas proximidades dos anticlinais compressivos, onde falhas e fraturas podem atuar como condutos para a migração de fluidos e favorecer a formação desses sistemas. Assim, em conjunto com a elevada taxa de sedimentação e a sobrepressão já existente, os hidratos de gás podem ter contribuído para aumentar a instabilidade do talude e a recorrência de MTDs durante esse período.

Apesar do predomínio desses processos, observa-se que anticlinais de maior amplitude ainda exercem influência nas porções mais distais, contribuindo para o controle regional do sistema. No entanto, em comparação aos intervalos mais antigos, o controle estrutural torna-se subordinado à dinâmica associada à instabilidade do talude e à recorrência de eventos de remobilização sedimentar.

Outro aspecto relevante é a interação entre MTDs e sistemas turbidíticos ativos. Observa-se que diversos depósitos de transporte de massa são posteriormente retrabalhados por fluxos canalizados, evidenciando que essas superfícies não atuam apenas como barreiras, mas também como

substratos sobre os quais novos sistemas deposicionais se reorganizam. Esse tipo de interação é amplamente documentado em sistemas de águas profundas, nos quais a topografia gerada por MTDs condiciona o desenvolvimento de canais, promove avulsões e influencia a distribuição de lobos turbidíticos (Kneller et al., 2016).

Adicionalmente, são identificadas feições associadas a fluxos lamosos e estruturas de escape de fluidos, como pockmarks e mud volcanoes, que apresentam distribuição espacial alinhada aos trends de anticlinais soterrados. Essa relação sugere que tais feições estão associadas a episódios de alívio de pressão em sistemas sobrepressurizados, possivelmente ligados à mobilidade de folhelhos e à reativação de descontinuidades estruturais. A ocorrência de hidratos de gás ao longo desses mesmos trends reforça essa interpretação, indicando que a rápida sedimentação recente favorece a geração e preservação de condições propícias à acumulação e migração de fluidos nesses setores.

Em conjunto, esses resultados indicam que, próximo ao fundo do mar, o sistema deposicional do Cone Submarino do Amazonas é dominado por uma interação complexa entre processos gravitacionais, fluxos turbidíticos e migração de fluidos, nos quais os MTDs desempenham papel central na modificação da topografia e no controle do comportamento dos fluxos sedimentares.

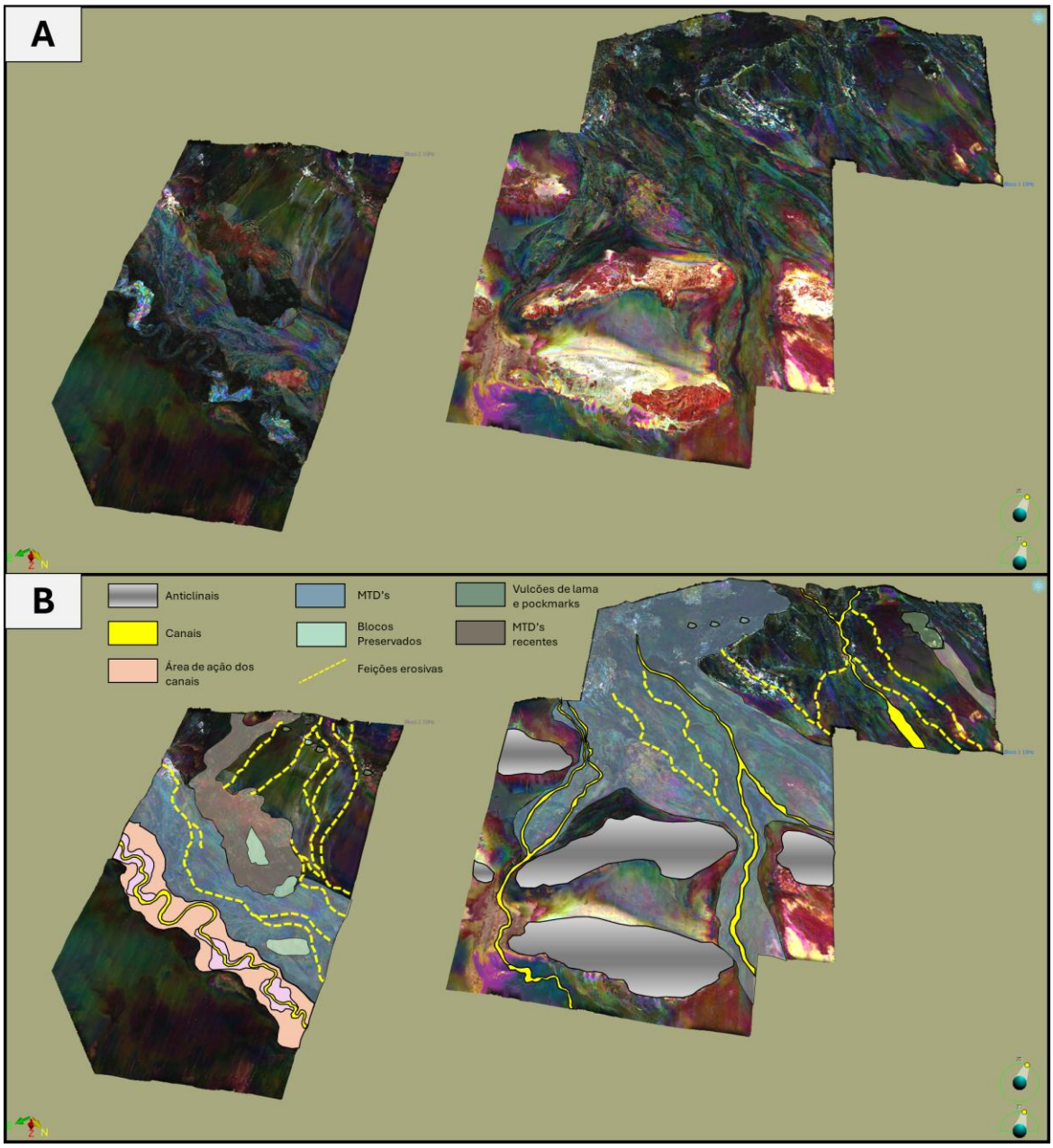



**Figura 24:** Mapas de decomposição espectral (RGB – 10, 20 e 30 Hz) em visualização 3D para um intervalo estratigráfico entre a base dos MTDs mais recentes e o fundo do mar, abrangendo os Blocos 1 e 2. Em **(A)**, apresenta-se o atributo sem interpretação, evidenciando os altos estruturais (anticlinais), as geometrias canalizadas e os depósitos de transporte de massa (MTDs), caracterizados por respostas espectrais heterogêneas. Em **(B)**, modelo geológico 3D interpretado, destacando canais (**em amarelo**), superfícies erosivas (**tracejadas em amarelo**), anticlinais (**em cinza**), zonas de interação canal–levee, *overbanks* e migração lateral (**em rosa**), depósitos de transporte de massa mais antigos (MTDs, **em azul**), blocos preservados (**em verde**), *pockmarks* e vulcões de lama, além dos MTDs mais recentes e fluxos lamosos associados (**em laranja**).

# 7. Conclusões

A integração de dados sísmicos 3D, informações de poços e atributos sísmicos, com destaque para mínima amplitude e decomposição espectral, permitiu caracterizar de forma robusta a evolução estratigráfica e deposicional da porção noroeste do Cone Submarino do Amazonas do Mioceno Superior ao Recente. Os resultados evidenciam o papel central da interação entre tectônica gravitacional, sobrepressão associada a folhelhos móveis e variações no aporte sedimentar na organização dos sistemas turbidíticos em águas profundas.

No intervalo pré-Pleistoceno Médio, a arquitetura deposicional é dominada por sistemas turbidíticos fortemente confinados, controlados pela compartimentalização estrutural imposta pelos níveis de descolamento associados à Formação Limoeiro. Nesse estágio, o roteamento sedimentar é condicionado pela paleotopografia estrutural, com canais e lobos organizados ao longo das minibacias e limitada conectividade lateral. Episódios pontuais de transposição estrutural indicam, entretanto, que o confinamento atua de forma heterogênea, permitindo *bypass* localizado em setores onde o relevo estrutural é menos pronunciado.

A partir do Pleistoceno Médio (~0,8 Ma), observa-se uma mudança fundamental no comportamento do sistema, marcada por aumento do aporte sedimentar e intensificação dos processos erosivos, possivelmente associados a variações glacioeustáticas quaternárias. Esse novo regime promove maior eficiência de transporte sedimentar e favorece o desenvolvimento de superfícies erosivas regionais, ampliando a conectividade entre depocentros e permitindo a transposição mais frequente das barreiras estruturais.

No intervalo pós-Pleistoceno Médio, o sistema evolui para um regime menos confinado e mais conectado, caracterizado por canais mais contínuos e erosivos, maior ocorrência de *bypass* sedimentar e redução do controle direto exercido pelos anticlinais, especialmente nas porções proximais. Nesse estágio, o preenchimento progressivo das minibacias e o aumento da energia dos fluxos passam a dominar a organização deposicional, enquanto o controle estrutural permanece mais evidente apenas nas porções distais do prisma.

Adicionalmente, observa-se aumento expressivo na ocorrência de depósitos de transporte de massa nos intervalos mais recentes, refletindo maior instabilidade do talude. Esses depósitos passam a desempenhar papel fundamental na modificação da topografia do fundo marinho, atuando tanto como barreiras quanto como superfícies de reorganização para fluxos subsequentes, além de estarem associados a processos de escape de fluidos e alívio de pressão em sistemas sobrepressurizados.

A aplicação integrada de atributos sísmicos mostrou-se essencial para a identificação das geometrias deposicionais e sua evolução temporal, permitindo não apenas a caracterização dos diferentes elementos do sistema turbidítico, mas também a distinção entre estágios de confinamento e reorganização deposicional ao longo do tempo geológico.

Dessa forma, o Cone Submarino do Amazonas, particularmente em sua porção noroeste, configura-se como um sistema de referência para o entendimento da evolução de sistemas turbidíticos em margens passivas submetidas à tectônica gravitacional ativa, no qual a interação entre controle estrutural, dinâmica sedimentar e processos de instabilidade governa a transição entre sistemas confinados e menos confinados em escala de bacia.

Por fim, os resultados apresentados abrem perspectivas relevantes para investigações futuras, especialmente no refinamento da caracterização geomorfológica de sistemas turbidíticos a partir de atributos sísmicos, com ênfase na integração entre decomposição espectral e outros atributos sensíveis à geometria deposicional. A ampliação da análise para volumes sísmicos adicionais e diferentes setores do Cone Submarino do Amazonas pode contribuir para testar a continuidade espacial dos padrões identificados, bem como avaliar variações laterais no grau de confinamento dos sistemas. Além disso, a integração com novos dados de poços e calibrações estratigráficas mais detalhadas pode permitir melhor *constrain* das interpretações sísmicas, especialmente na distinção entre diferentes elementos deposicionais e sua evolução temporal.

## *8. Referências*


BAILLEUL, J.; ROBIN, C.; CHANIER, F. et al. Turbidite systems in the inner forearc domain of the Hikurangi convergent margin (New Zealand). *Journal of Sedimentary Research*, v. 77, p. 263–283, 2007.

BRANDÃO, J. A. S. L.; FEIJÓ, F. J. Bacia da Foz do Amazonas. *Boletim de Geociências da Petrobras*, v. 8, n. 1, p. 91–99, 1994.

BROWN, K. M. The nature and hydrogeologic significance of mud diapirs and diatremes for accretionary systems. *Journal of Geophysical Research*, v. 95, p. 8969–8982, 1990.

BRUN, J.-P.; FORT, X. Salt tectonics at passive margins. *Marine and Petroleum Geology*, v. 28, p. 1123–1145, 2011.

BUSTIN, R. M. Sedimentology of dispersed organic matter in the Niger Delta. *AAPG Bulletin*, v. 72, p. 277–298, 1988.

BUTLER, R. W. H.; PATON, D. A. Evaluating lateral compaction in deep-water fold belts. *GSA Today*, v. 20, p. 4–10, 2010.

COBBOLD, P. R.; MEISLING, K. E.; MOUNT, V. S. Gravity-driven deformation of passive margins. In: McCLAY, K. R. (ed.). *Thrust tectonics and hydrocarbon systems*. Geological Society Special Publication, v. 236, p. 169–190, 2004.

COBBOLD, P. R.; SZATMARI, P. Radial gravitational gliding. *Tectonophysics*, v. 188, p. 249–289, 1991.

COHEN, H. A.; MCCLAY, K. R. Shale tectonics in the Niger Delta. *Marine and Petroleum Geology*, v. 13, p. 313–328, 1996.

CORREDOR, F.; SHAW, J. H.; BILOTTI, F. Structural styles in the Niger Delta. *AAPG Bulletin*, v. 89, p. 753–780, 2005.

CRUZ, A. M.; REIS, A. T.; GORINI, C.; et al. Neogene evolution and demise of the Amapá carbonate platform (Foz do Amazonas Basin, Brazil). *Marine and Petroleum Geology*, v. 104, p. 1–15, 2019.

CURRAY, J. R.; EMMEL, F. J. The Bengal Fan: morphology, geometry, stratigraphy, history and processes. *Marine and Petroleum Geology*, v. 19, n. 10, p. 1191–1223, 2002.

DAMUTH, J. E.; KUMAR, N. Amazon Cone: morphology, sediments, age, and growth pattern. *Geological Society of America Bulletin*, Boulder, v. 86, n. 6, p. 863–878, 1975. DOI: 10.1130/0016-7606(1975)86<863: ACMSAA>2.0.CO;2.

DAMUTH, J. E.; FLOOD, R. D.; KOWSMANN, R. O.; BELDERSON, R. H.; GORINI, M. A. Anatomy and growth pattern of Amazon deep-sea fan as revealed by long-range side-scan sonar (GLORIA) and high-resolution seismic studies. *AAPG Bulletin*, v. 72, n. 8, p. 885–911, 1988.

DAMUTH, J. E. Neogene gravity tectonics and depositional processes on the deep Niger Delta continental margin. *Marine and Petroleum Geology*, v. 11, n. 3, p. 320–346, 1994. DOI: 10.1016/0264-8172(94)90053-1.

DOUST, H.; OMATSOLA, E. Niger Delta. In: EDWARDS, J. D.; SANTOGROSSI, P. A. (orgs.). *Divergent/Passive Margin Basins*. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1990. p. 239–248. (AAPG Memoir, 48).

FIGUEIREDO, J. J. P.; ZALÁN, P. V.; SOARES, E. F. Bacia da Foz do Amazonas. In: MILANI, E. J. et al. *Bacias sedimentares brasileiras*. Rio de Janeiro: Petrobras, 2007.

FIGUEIREDO, J. J. P. et al. Burial of the Amapá platform. *Marine and Petroleum Geology*, v. 26, p. 1688–1704, 2009.

FLOOD, R. D. et al. Amazon Fan seismic facies. *Proceedings of the Ocean Drilling Program*, v. 155, p. 415–433, 1991.

FLOOD, R. D.; PIPER, D. J. W. Amazon fan record. *Proceedings of the Ocean Drilling Program*, v. 155, p. 393–417, 1997.

HAQ, B. U.; HARDENBOL, J.; VAIL, P. R. Mesozoic and Cenozoic chronostratigraphy and cycles of sea-level change. In: WILGUS, C. K. et al. (eds.). *Sea-level changes: an integrated approach*. SEPM Special Publication, v. 42, p. 71–108, 1988.

HOORN, C. et al. Andean tectonics as a cause for changing drainage patterns in Miocene northern South America. *Science*, v. 275, n. 5306, p. 1238–1241, 1997.

HOORN, C. et al. Amazonia through time: Andean uplift, climate change, landscape evolution, and biodiversity. *Earth-Science Reviews*, v. 166, p. 1–27, 2017.

HOWLETT, D. M.; GAWTHORPE, R. L.; GE, Z.; ROTEVATN, A.; JACKSON, C. A. L. Turbidites, topography and tectonics: evolution of submarine channel-lobe systems in the salt-influenced Kwanza Basin, offshore Angola. *Basin Research*, v. 33, n. 2, p. 1076–1110, 2021. DOI: 10.1111/bre.12506

KNELLER, B.; DYKSTRA, M.; FAIRWEATHER, L.; MILANA, J. P. Mass-transport and slope accommodation: implications for turbidite stratigraphy. *AAPG Bulletin*, v. 100, n. 9, p. 1363–1388, 2016.

MANLEY, P. L.; FLOOD, R. D. Cyclic sediment deposition within Amazon deep-sea fan. *AAPG Bulletin*, v. 72, p. 912–925, 1988.

MASLIN, M. A.; KNUTZ, P. C.; RAMSAY, T. Millennial-scale sea-level control on avulsion events on the Amazon Fan. *Quaternary Science Reviews*, v. 25, p. 3338–3345, 2006. DOI: 10.1016/j.quascirev.2006.10.012

MITCHUM, R. M.; VAIL, P. R.; SANGREE, J. B. Seismic stratigraphy and global changes of sea level. In: PAYTON, C. E. (ed.). Seismic stratigraphy—applications to hydrocarbon exploration. Tulsa: AAPG, 1977. (AAPG Memoir, 26).

MOSHER, D. C.; HAWKEN, J. E.; CAMPBELL, D. C. Gas hydrates and submarine sediment mass failure: a case study from Sackville Spur, offshore Newfoundland. In: World Atlas of Submarine Gas Hydrates in Continental Margins. Cham: Springer, 2022. p. 303–314. DOI: 10.1007/978-3-030-81186-0_25.

PEROVANO, R.; REIS, A. T.; SILVA, C. G.; GORINI, C.; VENDEVILLE, B. C. O processo de colapso gravitacional da seção marinha da Bacia da Foz do Amazonas, margem equatorial brasileira. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 27, n. 3, p. 451–470, 2009. DOI: 10.1590/S0102-261X2009000300012

PICKERING, K. T.; CORREGIDOR, J. Mass-transport complexes (MTCs) and tectonic controls on basin-floor fan deposition, Middle Eocene Ainsa Basin, Spanish Pyrenees. *Journal of Sedimentary Research*, v. 75, n. 5, p. 761–783, 2005.

PIRMEZ, Carlos; FLOOD, Roger D. Morphology and structure of Amazon Channel. In: FLOOD, R. D.; PIPER, D. J. W.; KLAUS, A. *et al.* (ed.). Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports. College Station, TX: Ocean Drilling Program, 1995. v. 155, cap. 3, p. 23–45. DOI: 10.2973/odp.proc.ir.155.103.1995.

POSAMENTIER, H. W.; KOLLA, V. Seismic geomorphology and stratigraphy of depositional elements in deep-water settings. In: POSAMENTIER, H. W.; WALKER, R. G. (eds.). *Facies models revisited*. Tulsa: SEPM (Society for Sedimentary Geology), 2003. p. 1–21.

PRATHER, B. E.; BOOTH, J. R.; STEFFENS, G. S.; CRAIG, P. A.
Hierarchy of deep-water architectural elements with reference to seismic resolution: implications for reservoir prediction and modeling.
*Marine and Petroleum Geology*, v. 15, n. 4, p. 363–377, 1998.

REIS, A. T.; GORINI, C.; MAIA, M.; et al. Two-scale gravitational collapse in the Amazon Fan: a coupled system of gravity tectonics and mass-transport processes. *Journal of the Geological Society*, v. 167, n. 3, p. 593–604, 2010. DOI: 10.1144/0016-76492009-035.

ROSSETTI, D. F. Late Cenozoic sedimentary evolution in northeastern Pará, Brazil, within the context of sea level changes. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 14, n. 1, p. 77–89, 2001.

ROWAN, M. G.; PEEL, F. J.; VENDEVILLE, B. C. Gravity-driven fold belts on passive margins. In: McCLAY, K. R. (ed.). *Thrust tectonics and hydrocarbon systems*. London: Geological Society, 2004. p. 157–182. (Geological Society Special Publication, 236).

SOUZA, Juliana Maria Gonçalves de; CRUZ, Alberto Machado; CUBAS, N.; et al. New insights into gravitational tectonics of the Amazon deep-sea fan: a comparative study of overpressure mechanisms in the northwest and southeast compartments. SSRN, 2025. DOI: 10.2139/ssrn.5099585.

SOTO, J. I.; HUDEC, M. R.; HEIDARI, M. Seismic expression and kinematics of mobile shale systems. *Tectonics*, v. 40, 2021.

SPINA, V.; et al. Shale tectonics in the hyperextended continental margin of the Niger Delta. *Tectonics*, 2025.

TORTAROLO, L.; et al. Orbital control of relative sea-level changes in the Plio-Pleistocene of the north-western Brazilian equatorial margin. SSRN, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.2139/ssrn.4837310. Acesso em: 26 abr. 2026.

WEIMER, P.; POSAMENTIER, H. W. (eds.). *Deep-water reservoirs of the world*. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2007. (AAPG Memoir, 97).

ZHANG, W.; LIU, J.; XU, S.; et al. Seismic geomorphology and sedimentary architecture of deep-water systems: a case study from offshore West Africa. *Marine and Petroleum Geology*, v. 107, p. 1–20, 2019.