



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Oceanografia

Thiago Guimarães Briones

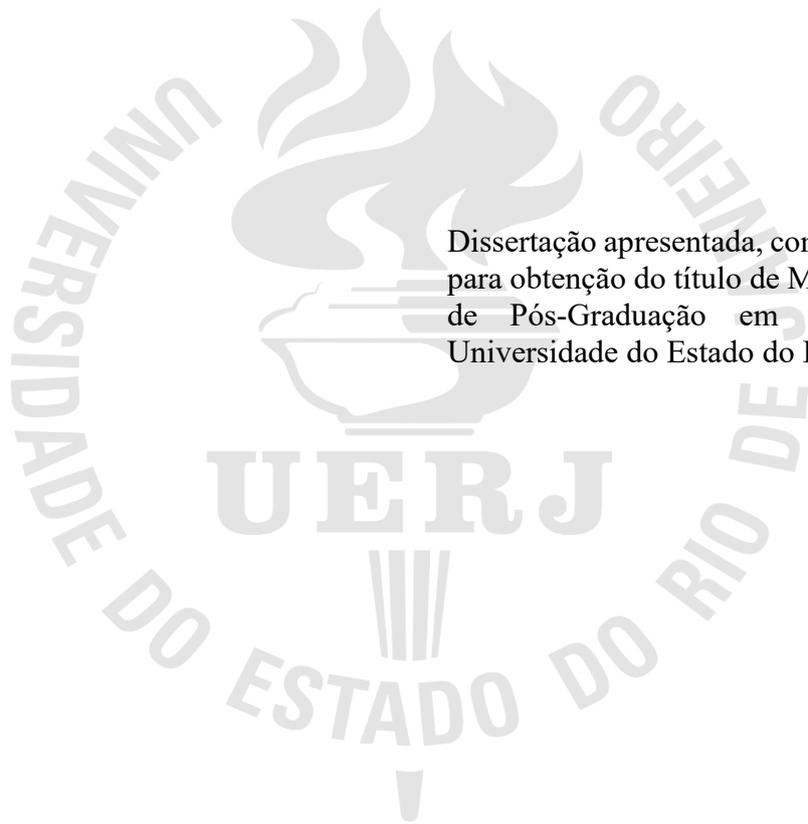
**Modelagem estratigráfico-sedimentológica dos processos sedimentares do
Sistema Turbidítico Almirante Câmara**

Rio de Janeiro

2022

Thiago Guimarães Briones

**Modelagem estratigráfico-sedimentológica dos processos sedimentares do Sistema
Turbidítico Almirante Câmara**



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Tadeu Reis

Rio de Janeiro

2022

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/C

B858 Briones, Thiago Guimarães.
Modelagem estratigráfico-sedimentológica dos processos sedimentares do Sistema Turbidítico Almirante Câmara./ Thiago Guimarães Briones. – 2022.
185 f. : il.

Orientador: Antonio Tadeu Reis.

Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Oceanografia.

1. Oceanografia geológica – Campos, Bacia de (RJ) – Teses. 2. Sedimentação marinha – Teses. 3. Sedimentação e depósitos – Modelos matemáticos – Campos, Bacia de (RJ) – Teses. 4. Fáceis (Geologia) – Teses. 5. Geologia submarina – Teses I. Reis, Antonio Tadeu. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. III. Faculdade de Oceanografia. Título.

CDU 551.46(815.3)

Bibliotecária responsável: Fernanda Lobo CRB7/5265

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Thiago Guimarães Briones

Modelagem estratigráfico-sedimentológica dos processos sedimentares do Sistema Turbidítico Almirante Câmara

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Aprovada em 31 de outubro de 2022

Orientador: Prof. Dr. Antonio Tadeu Reis/ Faculdade de Oceanografia – UERJ

Banca

Examinadora: _____

Antônio Tadeu Reis

Prof Dr. Antonio Tadeu Reis (Orientador)

Josefa Varela guerra

Prof.^a Dr.^a. Josefa Varela guerra/ (UERJ)

Alberto Machado Cruz

Prof. Dr. Cleverson Guizan Silva (UFF)

Cleveson Guizan Silva

Prof. Dr. Alberto Machado Cruz (BEICIP-Franlab)

Alberto Machado Cruz

Prof. Dr. Olinto Gomes de Souza Junior (PETROBRAS)

Rio de Janeiro

2022

DEDICATÓRIA

À Pedro de Oliveira Briones, meu anjo no céu.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente à minha esposa Deise, por todo amor, apoio e sacrifício extra durante todo esse conturbado período, para que eu pudesse concluir minha dissertação. Ao meu filho Fernando que, mesmo inconscientemente, suportou minhas ausências no decorrer dos últimos meses.

Aos meus pais Leila e Alexandre, por todo amor e educação com que me criaram e por toda a melhor formação intelectual possível que me foi dada.

Ao meu orientador Professor Antonio Tadeu Reis, por toda paciência, dedicação e apoio nos momentos em que necessitei.

À Olinto Gomes de Souza Jr pela sugestão e incentivo de realizar o presente trabalho.

Um agradecimento em especial à Luís Cláudio Ribeiro Machado por ter me mostrado toda a visão geral, e as nuances do “Mundo câmara”, e por todo material repassado que abriu os caminhos para a realização do presente trabalho.

À PETROBRAS pela oportunidade de aperfeiçoamento profissional e ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia da UERJ, seus professores e funcionários.

A todos os colegas da PETROBRAS, que contribuíram direta ou indiretamente para o desenvolvimento desta dissertação, Vinicius Armond, Thais Empinotti, Tiago Agne, Cizia Hercos, Adriano Viana e Felipe Tinaglia, disponibilizando seu tempo para ajudar, explicar e propor ideais sobre o presente trabalho. Aos amigos Pedro Pires pelas edições de imagens, e Otavio Leite pelas sugestões. À Henrique Picorelli por todo suporte técnico com o GPM, e Leonardo Barbosa pela ajuda em achar o dado sísmico ideal.

...life it's not about how hard you can hit. It's about how hard you can get hit and keep moving forward. How much you can take and keep moving forward.

Rocky Balboa (2006)

RESUMO

BRIONES, Thiago Guimarães. **Modelagem estratigráfico-sedimentológica dos processos sedimentares do Sistema Turbidítico Almirante Câmara**. 2022. 185 f. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) – Faculdade de Oceanografia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

A modelagem estratigráfico-sedimentológica de sistemas sedimentares, baseada na simulação numérica de variáveis deposicionais e suas interações, tem se mostrado uma técnica bastante promissora aplicável à caracterização de reservatórios. Com o objetivo de esclarecer como a deposição do Sistema Turbidítico Almirante Câmara, bacia de Campos, evoluiu ao longo do Pleistoceno, foram realizadas uma série de modelagens numéricas, utilizando o módulo Geological Modeling Processes (GPM) do software Petrel (versão 2020), a fim de identificar as variáveis deposicionais, e suas interações, capazes de explicar e reproduzir o padrão arquitetônico e a distribuição fácies associada a este sistema turbidítico. O Sistema Turbidítico Almirante Câmara diz respeito a um sistema turbidítico moderno completo do ponto de vista deposicional, sendo composto por diferentes domínios deposicionais tais como: um cânion - o Cânion Almirante Câmara; uma região de canais discretos que evoluiu para uma região de canais amalgamados; e, finalmente, um complexo de lobos terminais que se espalha pelo Platô de São Paulo. A parametrização aplicada à este sistema turbidítico foi baseada principalmente na interpretação de sísmica 3D convencional, informações sedimentológicas e bioestratigráficas de *piston-cores* amostrados na área de estudo e pesquisa bibliográfica. Os principais parâmetros de entrada para simular os depósitos turbidíticos foram: morfologia da paleosuperfície; volume de água (aporte sedimentar); localização da fonte de aporte sedimentar; hidrodinâmica do escoamento simulado; variação da concentração de sedimentos nos fluxos, frequência dos fluxos de influxos turbidíticos; e variações nas taxas de erosão. Os resultados obtidos com os parâmetros simulados mencionados permitiram identificar cenários de simulação que podem ser propostos como um possível modelo deposicional, uma vez que reproduz espessuras sedimentares e padrões de empilhamento observados em cada domínio deposicional do Sistema Turbidítico Almirante Câmara. Dentre esses, o CENÁRIO 6B mostrou-se eficiente em reproduzir as diferentes geometrias deposicionais, empilhamentos estratigráficos, distribuição de fácies sedimentares com boa compatibilidade aos dados observados, o qual permitiu estimar que o sistema turbidítico analisado foi depositado a partir de sucessivos fluxos (360) com um aporte de água em regime variável com os valores de 25.000, 75.000 e 50.000m³ disparados a cada 500 anos, em um período de 20-440ka. Além disso, simulações de parâmetros de transporte de depósitos turbidíticos recentes, como os do Sistema Turbidítico Almirante Câmara, podem ser bastante valiosas para o entendimento de como diferentes parâmetros deposicionais interagem em sistemas turbidíticos, bem como modelos deposicionais aplicáveis a sistemas similares. reservatórios turbidíticos.

Palavras-chave: Modelagem 3D de processos sedimentares. depósitos turbidíticos. Padrão de empilhamento estratigráfico.

ABSTRACT

BRIONES, Thiago Guimarães. **Three-dimensional stratigraphic-sedimentological forward modelling of a Pleistocene turbidite system in the Campos basin, Brazil**. 2022. 185 f. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) – Faculdade de Oceanografia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

Forward stratigraphic-sedimentological modelling of sedimentary systems, based on the simulation of changes of depositional variables and their interactions, has proven to be a quite promising technique applicable to reservoir characterization. In order to shed some light on how the deposition of the Almirante Câmara Turbidite System, Campos basin, evolved through the Pleistocene, a series of forward modelling, using the Geological Modelling Processes (GPM) module of Petrel software (version 2020), in order to identify those depositional variables, and their interactions, capable of explaining and reproducing the architectural pattern and the facies distribution associated with this turbidite system. The Almirante Câmara Turbidite System concerns a complete modern turbidite system from a depositional point of view, being composed of different depositional domains such as: a canyon - the Almirante Câmara Canyon; a discrete channel that evolves downslope into amalgamated channels; and finally, a terminal lobe complex that spreads across the São Paulo Plateau. Parameterization applied to this turbidite system was primarily based on the interpretation of a conventional 3D-seismic grid, sedimentological and biostratigraphic information of piston cores sampled in the study area and bibliographic research. The main parameters selected as input parameters to simulate the related turbidite deposits were: paleosurface morphology; water volume (sedimentary input); location of the sedimentary input source; hydrodynamics of the simulated flow; variation of sediment concentration in flows, flows frequency of turbidite influxes; and variations in erosional rates. Simulation results were then compared to previous studies carried out in the same area. Results obtained from the mentioned simulated parameters allowed us to identify simulation scenarios that can be proposed as a possible depositional model since it reproduces sedimentary thicknesses and stacking patterns as observed in each depositional domain of the Almirante Câmara Turbidite System, according to available geological-geophysical data. Among these, SCENARIO 6B proved to be efficient in reproducing the different depositional geometries, stratal stacking, distribution of sedimentary facies with good compatibility with the observed data, which allowed estimating that the analyzed turbiditic system was deposited from successive flows (360) with a water supply in variable regime with the values of 25,000, 75,000 and 50,000m³ released every 500 years, in a period of 20-440ka. In addition to that, simulations of transport parameters of recent turbidite deposits, such as those of the Almirante Câmara Turbidite System, may be quite valuable to the understanding of how different depositional parameters interact in turbidite systems, as well as to depositional model applicable to similar turbidite reservoirs.

Keywords: 3D forward modelling. Turbidite deposits. Stacking pattern.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Classificação de fluxos densos de sedimentos.....	21
Figura 2 - Classificação de Talling et al. (2012) para fluxos de densidade sedimentar	22
Figura 3 - A sequência de fácies do Bouma (1962).....	23
Figura 4 - Trato de fácies de Mutti (1992) para depósitos em águas profundas e o processo relacionado para cada facies	25
Figura 5 - Modelo de leque submarino de Normark (1970) e de Walker (1978)	27
Figura 6 -Representação esquemática da fisiografia da plataforma e águas profundas	28
Figura 7 - Elementos deposicionais em sistemas sedimentares de águas profundas.....	29
Figura 8 - Proposta da hierarquia para os elementos de canais de Sprague et al (2005).....	30
Figura 9 - Proposta da hierarquia para os elementos lobos frontais.....	31
Figura 10 - Padrões de empilhamento de canais.	31
Figura 11 - Desenvolvimento do complexo de lobos e sua hierarquia interna.....	32
Figura 12 - Localização da área de estudo	34
Figura 13 - Mapa de fácies sedimentares do subfundo marinho da Bacia de Campos	35
Figura 14 - Detalhes dos depósitos de movimento de massa da área de estudo.....	37
Figura 15 - Seções sísmicas A-A' e C-C', evidenciando as sismossequências.....	38
Figura 16 - Seções sísmicas 3D ao longo do do Sistema Turbidítico Alm Câmara	39
Figura 17 - Mapa de disposição e linhas sísmicas 2D dos lobos mapeados por Abreu (2005)	41
Figura 18 - Mapa de disposição dos lobos e mapas de isópacas dos lobos de Abreu (2005)...	42
Figura 19 - Grid e limites (em azul) do volume do sísmico utilizado e área do estudo	44
Figura 20 - Diagrama de Folk (1980) com 15 amostras de areias analisadas do complexo de lobos Alm Câmara estudados por Mauricio (2010).....	47
Figura 21 - Perfis sedimentológicos de alguns testemunhos ao longo do sistema turbidítico Alm. Câmara.....	48
Figura 22 - Seção geológica strike na parte distal do complexo de lobos Almirante Câmara, com informações de piston-cores	51
Figura 23 - Posicionamento da deposição dos lobos 3, 4 e 5 durante as quedas eustáticas do quaternário	52
Figura 24 - Esquema de elementos fluidos representando uma corrente de turbidez no GPM.	54

Figura 25 - Ilustração simples de como ocorre erosão ou deposição de sedimentos conforme a capacidade de transporte do elemento fluido no GPM.....	54
Figura 26 - Posição e dimensão da área-fonte na paleosuperfície usada nos cenários de simulações numéricas.....	59
Figura 27 - Linhas do mapeamento da paleosuperfície em vermelho sob mapa do fundo mar atual, evidenciando a cota batimétrica na qual se encontraria a paleocabeceira do sistema estudado.....	61
Figura 28 - Delimitação dos períodos em que a fonte dos fluxos turbidíticos está ativa	62
Figura 29 - Diferenças no alcance dos fluxos a partir de aportes de águas distintos oriundos da área-fonte	64
Figura 30 - Mapas do mapeamento dos horizontes do fundo do mar e da base dos depósitos pleistocênios	69
Figura 31- Mapa batimétrico da área de estudo	71
Figura 32 - Mapa de atributo sísmico de mínima amplitude evidenciando os depósitos de areias turbidíticas do Sistema Almirante Câmara	72
Figura 33 - Seções da sísmica 3D evidenciando as variações das anomalias de depósitos arenosos do Sistema Turbidítico Alm Câmara.	73
Figura 34 - Mapa de isópaca dos horizontes mapeados e seção sísmica evidenciando as diferentes anomalias e horizontes sísmicos mapeados.....	75
Figura 35 - Mapa de isópaca do fundo do mar com a paleosuperfície e seção sísmica	77
Figura 36 - Mapa da paleosuperfície de deposição dos turbidíticos estudados. A linha tracejada é a projeção da cota da cabeceira do recente.....	78
Figura 37 - À esquerda mapa de espessura total entre todos os elementos mapeados por Abreu (2005) e à direita o mapa de espessura total entre os lobos 1,4 e 5. O retângulo em preto corresponde ao limite da área de estudo de Abreu (2005).....	80
Figura 38 - Etapas de tempos das simulações dos CENÁRIOS DE APORTE CONSTANTE 1A e 2A	87
Figura 39 - Etapas de tempos das simulações dos CENÁRIOS DE APORTE CONSTANTE 3A e 4A	88
Figura 40 - Comparação dos resultados finais das simulações dos CENÁRIOS DE APORTE CONSTANTE 1A, 2A, 3A e 4A.....	89
Figura 41 - Mapas de espessura total das simulações dos CENÁRIOS 1A, 2A, 3A e 4A DE APORTE CONSTANTE com frequência de fluxo a cada 1000 anos.....	90

Figura 42 - Etapas de tempo das simulações que mostram a evolução da distribuição e alcance das fácies sedimentares dos CENÁRIOS DE APORTE CONSTANTE 1B e 2B, com frequência de fluxos a cada 500 anos	94
Figura 43 - Etapas de tempo das simulações que mostram a evolução da distribuição e alcance das fácies sedimentares dos CENÁRIOS DE APORTE CONSTANTE 3B e 4B, com frequência de fluxos a cada 500 anos	95
Figura 44 - Mapas de espessura total das simulações dos CENÁRIOS 1B, 2B, 3B e 4B DE APORTE CONSTANTE, com frequência de fluxo a cada 500 anos	96
Figura 45 - Etapas de tempo final das simulações que mostram a evolução da distribuição e alcance das fácies sedimentares dos CENÁRIOS 1B, 2B, 3B e 4B DE APORTE CONSTANTE com frequência de fluxos a cada 500 anos.....	97
Figura 46 - Etapas de tempo das simulações que mostram a evolução da distribuição e alcance das fácies sedimentares dos CENÁRIOS DE APORTE CONSTANTE 1C e 2C, com frequência de fluxos a cada 100 anos	101
Figura 47 - Etapas de tempo das simulações que mostram a evolução da distribuição e alcance das fácies sedimentares dos CENÁRIOS DE APORTE CONSTANTE 3C e 4C, com frequência de fluxos a cada 100 anos	102
Figura 48 - Mapas de espessura total das simulações dos CENÁRIOS APORTE CONSTANTE 1C, 2C, 3C e 4C, com frequência de fluxo a cada 100 anos	103
Figura 49 - Etapas de tempo final das simulações que mostram a evolução da distribuição e alcance das fácies sedimentares dos CENÁRIOS 1C, 2C, 3C e 4C de aporte constante com frequência de fluxos a cada 100 anos	104
Figura 50 - Etapas de tempo das simulações que mostram a evolução da distribuição e alcance das fácies sedimentares dos CENÁRIOS DE APORTE VARIÁVEL 5A e,6A, com frequência de fluxos a cada 1000 anos	109
Figura 51 - Etapas de tempo das simulações que mostram a evolução da distribuição e alcance das fácies sedimentares do CENÁRIO DE APORTE VARIÁVEL 7A com frequência de fluxos a cada 1000 anos.....	110
Figura 52 - Mapas de espessura total das simulações de aporte variável (CENÁRIOS 5A, 6A e 7A) com frequência de fluxo a cada 1000 anos.....	111
Figura 53 - Distribuição sedimentar final dos cenários de aporte variável (CENÁRIOS 5A, 6A e 7A) com frequência de fluxos a cada 1000 anos	112

Figura 54 - Etapas de tempo das simulações que mostram a evolução da distribuição e alcance das fácies sedimentares dos CENÁRIO DE APORTE VARIÁVEL 5B e 6B com frequência de fluxos a cada 500 anos	116
Figura 55 - Etapas de tempo das simulações que mostram a evolução da distribuição e alcance das fácies sedimentares do CENÁRIO DE APORTE VARIÁVEL 7B com frequência de fluxos a cada 500 anos.....	117
Figura 56 - Mapas de espessura total das simulações de CENÁRIO DE APORTE VARIÁVEL 5B,6B e 7B com frequência de fluxo a cada 500 anos	118
Figura 57 - Distribuição sedimentar final dos CENÁRIOS DE APORTE VARIÁVEL 5B, 6B e 7B, com frequência de fluxos a cada 500 anos.....	119
Figura 58 - Etapas de tempo das simulações que mostram a evolução da distribuição e alcance das fácies sedimentares dos CENÁRIOS DE APORTE VARIÁVEL 5C e 6C com frequência de fluxos a cada 100 anos	122
Figura 59 - Mapas de espessura total das simulações dos CENÁRIOS DE APORTE VARIÁVEL 5C e 6C com frequência de fluxo a cada 100 anos.....	123
Figura 60 - Distribuição sedimentar final dos CENÁRIOS DE APORTE VARIÁVEL 5C e 6C, com frequência de fluxos a cada 100 anos	124
Figura 61 - Etapas de tempo das simulações que mostram a evolução da distribuição e alcance das fácies sedimentares do cenário 8.....	126
Figura 62 - Comparação entre os mapas de espessura total dos CENÁRIOS 6B e 8	127
Figura 63 - Etapas de tempo das simulações que mostram a evolução da distribuição e alcance das fácies sedimentares CENÁRIO 9	130
Figura 64 - Etapas de tempo das simulações que mostram a evolução da distribuição e alcance das fácies sedimentares do CENÁRIO 10.....	131
Figura 65 - Mapas de espessura finais para as simulações com variação gradiente no declive do cânion (CENÁRIOS 9 e 10) comparados ao mapa de espessura do CENÁRIO 6B.....	132
Figura 66 - Atributo sísmico de mínima amplitude destacando as ocorrências de depósitos arenosos ao longo do sistema turbidíticos Almirante Câmara.....	136
Figura 67- Comparação dos elementos deposicionais definidos por Abreu et al (2005) na linha sísmica 2D com uma seção sísmica do volume 3D utilizado no presente trabalho	137
Figura 68 - Comparação isópaca de lobos 1,4 e 5 de Abreu et al. (2005) com isópaca dos horizontes interpretados na sísmica 3D.....	138

Figura 69 - Comparação dos Subcenários de frequência de fluxos para o CENÁRIO 4 DE APORTE CONSTANTE (100mil m ³)	141
Figura 70 - Comparação dos mapas finais de distribuição sedimentar entre os CENÁRIOS 6B e 8	143
Figura 71 - Comparação da distribuição sedimentar final entre os CENÁRIOS 9 e 10	145
Figura 72 - Matriz de possíveis respostas da localização do ponto de transição entre canal-levee e lobo terminal	146
Figura 73 - Comparação dos mapas de isópaca do lobo terminal e atributo sísmico com mapas de espessuras finais dos CENÁRIOS DE APORTE COSNTANTE com fluxos a cada 100 anos	149
Figura 74 - Comparação dos mapas de isópaca do lobo terminal e atributo sísmico com mapas de espessuras finais dos CENÁRIOS DE APORTE COSNTANTE com fluxos a cada 1000 anos	152
Figura 75 - Comparação dos mapas de isópaca do lobo terminal e atributo sísmico com mapas de espessuras finais dos CENÁRIOS DE APORTE COSNTANTE com fluxos a cada 500 anos	155
Figura 76 - (a)Mapa de espessura entre os horizontes mapeados na sísmica 3D; (b) Mapa de mínima amplitude extraído da sísmica; (c e d)mapas de espessura total da região dos lobos distais dos diferentes CENÁRIOS DE APORTE 3B e 6B	157
Figura 77 - Seções transversais ao longo do modelo 3D escolhido (CENÁRIO 6B)	161
Figura 78 - Seção longitudinal no CENÁRIO 6B (com frequência de fluxo de 500anos)	162
Figura 79 - Seção strike na região de complexo de canais do CENÁRIO 6B (com frequência de fluxo de 500anos)	163
Figura 80 - Seção strike na região de compelxo de lobos do CENÁRIO 6B (com frequência de fluxo de 500anos)	164
Figura 81 - (a)Seção sísmica dos lobos definidos por Abreu (2005; (b) seção da sísmica 3D do presente trabalho identificando os elementos deposicionais definidos por Abreu (2005); (c)estratos deposicionais (lobos deposicionais) do CENÁRIO 6B; (d) Isópaca dos horizontes mapeados na sísmica 3D com a localização (linha vermelha) das seções sísmicas apresentadas e área de estudo (retângulo preto) de Abreu (2005).	165
Figura 82 - Na parte superior estão resumidos os principais parâmetros de entrada do CENÁRIO 6B e abaixo seus resultados em relação a dispersão sedimentar final, mapa de espessura	

final, e seções strikes a região de canais e lobos terminais evidenciando os estratos deposicionais formados em cada intervalos de tempo de área-fonte ativa.....	166
Figura 83 - Seção strike na região de compelxo de canais do CENÁRIO 8 evidenciando em: (a) o empilhamento dos diferentes estratos ao longo das etapas de tempo e (b) o empilhamento das subunidades deposicionais dos mesmos.....	168
Figura 84 - Seção strike na região de compelxo de lobos do CENÁRIO 8 evidenciando em (a) o empilhamento dos diferentes estratos ao longo das etapas de tempo e (b) o empilhamento das subunidades deposicionais dos mesmos.....	169

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Variação da lâmina d'água e profundidade atingida pelos furos de testemunho a pistão feitos ao longo do sistema. Retirado de Souza (2014).....	46
Tabela 2 - Biozonas encontradas nos testemunhos da área de estudo. Retirado de Abreu (2005).	49
Tabela 3 - Parâmetros geológicos exigidos pelo software para realização das simulações numéricas.....	55
Tabela 4 - Cenários de modelagem simulados.	81

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	17
1 OBJETIVO.....	19
2 ABORDAGEM SUSCINTA SOBRE FLUXOS TURBIDÍDICOS, FÁCIES E ARQUITETURA DEPOSICIONAL EM AMBIENTE DE ÁGUA PROFUNDA	20
2.1 Fluxos densos de sedimentos e fácies deposicionais.....	20
2.2 Elementos e arquiteturas deposicionais de sistemas turbidíticos	26
3 ÁREA DE ESTUDO	33
3.1 Aspectos geológicos	33
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	43
4.1 Dados Sísmicos	44
4.2 Dados Sedimentológicos e Bioestratigráficos	45
4.3 A Modelagem Numérica Estratigráfico-sedimentológica de processos.....	52
4.4 Parâmetros das Simulações Numéricas	55
4.4.1 Superfície inicial das simulações.....	56
4.4.2 Configuração da fonte sedimentar	57
4.4.3 Intervalos de tempo total das simulações e de acionamento da fonte	60
4.4.4 Aporte sedimentar: volume de água, concentração de corrente de turbidez, proporção de sedimentos e frequência de fluxos turbidíticos.....	63
4.4.5 Parâmetro ‘Erodibilidade’	65
5 RESULTADOS.....	67
5.1 Interpretação Sísmica	67
5.1.1 Mapeamento sísmico e definição da paleosuperfície das simulações	67
5.1.2 Confecção de mapas de isópacas dos lobos turbidíticos conhecidos	79
5.2 Simulações Estratigráfico-sedimentológicas.....	80
5.2.1 Simulações de Diferentes Cenários de Aporte Sedimentar Constante	82
5.2.2 Simulações de diferentes cenários de Aporte variável ao longo do tempo.....	105
5.2.3 Simulações de variação do parâmetro erodibilidade (CENÁRIO 8).....	125
5.2.4 Simulações com variação do gradiente do cânion da paleosuperfície (CENÁRIOS 9 e 10).....	128
6 DISCUSSÕES.....	133

6.1	Comparação da análise da sísmica 3D com os dados levantados	134
6.2	Impacto da variação do volume e frequência dos aportes nos modelos simulados	138
6.2.1	Relação entre volume de aporte sedimentar e frequência de fluxos disparados da área-fonte.....	139
6.2.2	Variação do parâmetro ‘Erodibilidade’	142
6.2.3	Variação da declividade do cânion da paleosuperfície	144
6.3	Modelo conceitual dos depósitos turbidíticos do sistema Almirante Câmara e arquitetura deposicional.....	146
6.3.1	Cenários de volume sedimentar fixo e volume sedimentar variável com fluxos com frequência a cada 100 anos.....	148
6.3.2	Cenários de volume sedimentar fixo e variável, com fluxos de frequência a cada 1000 anos.....	151
6.3.3	Cenários de volume sedimentar fixo e variável, com fluxos de frequência a cada 500 anos.....	153
6.3.4	Elementos arquiteturais do CENÁRIO 6B escolhido como modelo deposicional do sistema turbidítico Almirante Câmara	158
6.3.5	Cenário de variação do parâmetro erodibilidade (Cenário 8).....	167
6.4	- Quantificação do total de sedimentos aportado a cada fluxo	170
7	CONCLUSÕES.....	171
	REFERÊNCIAS	173
	ANEXO 1 – Configuração dos parâmetros internos do GPM.....	176
	ANEXO 2 – Propriedades e proporções dos sedimentos simulados	176
	ANEXO 3 – Diferentes posições de área fonte testadas	177
	ANEXO 4 - Tabela com tempos totais de cada cenário simulado.....	182
	ANEXO 5 – Mapas de isópocas de Abreu 2005, georreferenciados no Petrel	183
	ANEXO 6 – Tabelas com valores de aporte de água nos períodos de área fonte-ativa	184
	ANEXO 7 – Tabelas com valores de aporte concentração e proporção de sedimento durante os períodos de área-fonte ativa.....	185

INTRODUÇÃO

Os sistemas turbidíticos são de grande relevância por serem formadores de importantes reservatórios de petróleo e gás natural em diferentes bacias no Brasil e ao redor do mundo, e potencialmente ainda serão responsáveis por incorporação de novos volumes de reservas em descobertas futuras. Logo, a caracterização geológica desses reservatórios e sua representação em modelos tridimensionais fazem-se cada vez mais sofisticadas, visto que quanto maior for sua capacidade de representação dos diversos eventos geológicos e suas heterogeneidades, melhor será seu potencial de previsibilidade de produção. Assim, a modelagem numérica de processos geológicos tem se mostrado uma técnica promissora na caracterização e construção de modelos de reservatórios (Merriam & Davis 2001).

A modelagem de processos geológicos, também conhecida por modelagem *forward*, baseia-se em princípios físicos e determinísticos quantitativos para reproduzir processos físicos e químicos responsáveis pelo preenchimento de uma bacia sedimentar, como os processos de erosão, transporte, deposição/produção e redistribuição de sedimentos (Tetzlaff e Priddy, 2001). Os resultados das simulações mostram a geometria deposicional e o padrão da sequência estratigráfica como consequência da mudança do nível do mar, paleogeografia, paleoclima, tectônica e variação do aporte sedimentar (Tetzlaff et al, 2014). No caso dos depósitos turbidíticos, as simulações são capazes de reproduzir processos geológicos importantes como a erosão nos cânions da plataforma, corte/preenchimento e avulsão de canais deposicionais, deposição de lobos terminais, e geração de canais de extravasamento (Sun et al, 2010).

O presente estudo tem como objetivo modelar, através das simulações de processos sedimentares, os depósitos turbidíticos da sequência pleistocênica do Sistema Turbidítico Almirante Câmara. Localizado na região do Platô de São Paulo da bacia de Campos, o sistema registra a deposição turbidítica em águas profundas decorrente das variações relativas do nível do mar desde pelo menos o Neomioceno até o recente. Esse sistema apresenta todos os domínios deposicionais de um clássico sistema turbidítico, como: presença de um cânion, canais discretos, canais amalgamados e complexos de lobos terminais. O entendimento e a parametrização das condicionantes de transporte dos depósitos turbidíticos da área de estudo

têm como propósito a proposição de um modelo deposicional para do Sistema Turbidítico Almirante Câmara. Os resultados do presente estudo têm ainda a possibilidade de fornecer uma base de dados de referência para aplicação de modelagens de processos em outros reservatórios turbidíticos na mesma bacia ou mesmo em outras.

1 OBJETIVO

O estudo tem por objetivo a realização de etapas de modelagem numérico-computacional, através da variação e combinação de parâmetros capazes de reproduzir os depósitos da sucessão pleistocênica do Sistema Turbidítico Almirante Câmara. Os principais parâmetros são: diferentes taxas de aporte sedimentar; variações na origem geográfica da fonte do aporte, variações nas taxas de erosão do sistema e variação no gradiente da paleosuperfície. O estudo busca a determinação de variáveis ambientais, via modelagem numérico-computacional, que sejam capazes de explicar e reproduzir o padrão arquitetural dos estratos sedimentares, e a distribuição de fácies associadas aos Sistema Turbidítico Almirante Câmara; e assim propor modelos deposicionais aplicáveis ao observado.

2 ABORDAGEM SUSCINTA SOBRE FLUXOS TURBIDÍDICOS, FÁCIES E ARQUITETURA DEPOSICIONAL EM AMBIENTE DE ÁGUA PROFUNDA

2.1 Fluxos densos de sedimentos e fácies deposicionais

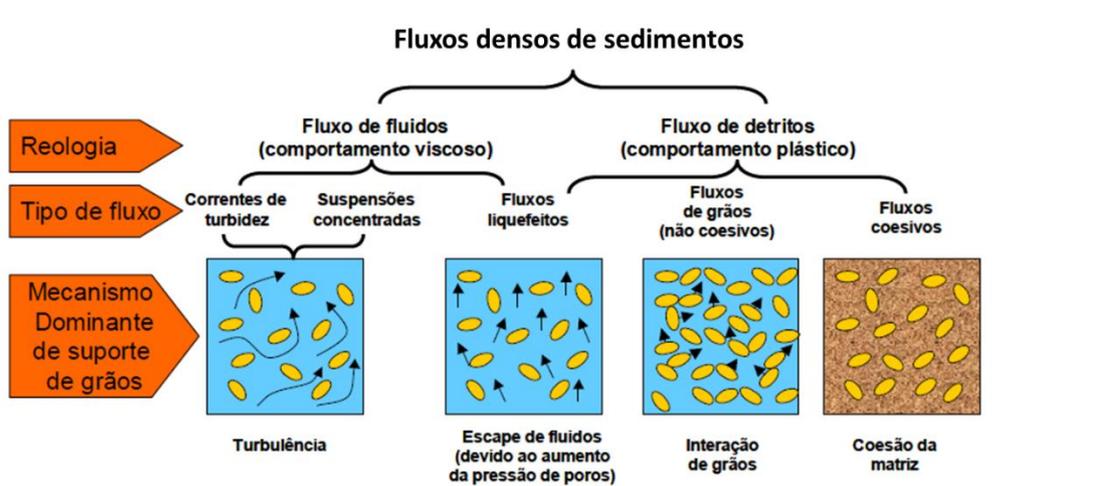
O conceito de transporte sedimentar por correntes de turbidez e os depósitos associados foi pela primeira vez definido no trabalho de Kuenen & Migliorini (1950). O termo turbidito, que está relacionado ao depósito sedimentar oriundo de uma corrente de turbidez, foi mais tarde definido por Kuenen (1957).

Dentro de uma classificação mais ampla (Middleton & Hampton, 1973, Talling et al., 2012) as correntes (ou fluxos) de turbidez são um tipo específico dos chamados fluxos densos de sedimentos (*sediment density flow*). Fluxos densos de sedimentos (Talling et al., 2012) são formados por uma mistura de fluido e sedimentos que se movem por sua maior densidade em relação ao seu fluido ambiente (ar ou água) (Kuenen & Migliorini, 1950, *apud* Empinotti, 2020). Segundo Talling et al. (2012), essa terminologia é apropriada para ser usada ao se descrever um evento de fluxo geral que pode compreender diferentes tipos de fluxos, como fluxos coesivos (fluxos de lama e detritos) e fluxos não coesivos (fluxos hiperconcentrados, fluxos concentrados e correntes de turbidez) uma vez que esses eventos de fluxo geralmente sofrem transformações de comportamento ao longo de seus caminhos.

Middleton e Hampton (1973) dividiram os fluxos densos de sedimentos em quatro categorias de acordo com o mecanismo interno de suporte dos grãos (Figura 1): fluxos de detritos ou fluxos de lama (suportados pela força coesiva e fluidez da matriz de lama); fluxos liquefeitos e fluidizados (suportados pelo fluido ascendente que escapam); fluxos de grãos (suportados pelas interações entre os grãos sem coesão); e; as correntes de turbidez (suportadas por turbulência dos fluidos). Lowe (1979) combinou reologia de fluxo e mecanismos de suporte de grãos em seu esquema de classificação (Figura 1), usando os tipos de reologia de fluxo e os mecanismos de suporte de sedimentos de Middleton e Hampton (1973), subdividindo as

correntes de turbidez em correntes de turbidez de alta e baixa densidade, e os outros mecanismos de suporte de sedimentos como fluxos plásticos.

Figura 1- Classificação de fluxos densos de sedimentos



Legenda: Classificação de fluxos densos de sedimentos mostrando os mecanismos dominantes de suporte grãos (Middleton e Hampton, 1973) e sua reologia (Lowe 1979).

Fonte: Modificado de Empinotti, 2020.

Em um estudo mais recente, Talling et al. (2012) classifica os diferentes tipos de fluxos e correlaciona-os com tipos de depósitos gerados em cada um (Figura 2). No referido trabalho para além da ligação entre processo e produtos, esclarece-se também os termos adotados em estudos anteriores e discute-se também a validade das classes propostas com base em experiências físicas, simulações numéricas e dados de monitoramento de correntes de fundo em ambiente marinho.

Figura 2 – Classificação de Talling et al. (2012) para fluxos de densidade sedimentar

		Flow type terminology		Sediment support mechanism (s)					
		DEBRIS AVALANCHE	Debris avalanche deposit	Particle collisions; Matrix strength					
		SLUMP OR SLIDE	Slump or slide deposit	Matrix strength, Excess pore pressure					
		GRANULAR AVALANCHE	Grain-flow deposit	Particle collisions					
A	SUBAQUEOUS SEDIMENT DENSITY FLOW	DEBRIS FLOW	NON-COHESIVE DEBRIS FLOW <i>(Very clean sand debrite)</i>	DEBRITE	EN-MASSÉ CONSOLIDATION (AND ABRUPT FREEZING)	D_{VCS}	Mainly excess pore pressure such that flow is fully or partly liquefied. No cohesive strength but margins can freeze as pore pressure dissipates	LAMINAR (OR ALMOST LAMINAR)	
			POORLY COHESIVE DEBRIS FLOW <i>(Clean sand debrite)</i>			D_{CS}	Cohesive strength allows sand to partly or fully settle out (sometimes very slowly). Excess pore pressure, buoyancy and grain to grain interaction help to support sand		
			COHESIVE DEBRIS FLOW			HIGH STRENGTH <i>(High strength muddy debrite)</i>	D_{M-2}		Cohesive strength of matrix is enough to prevent sand settling, but support can also occur by excess pore pressure, buoyancy (clast versus matrix density), and grain to grain interactions.
						MODERATE STRENGTH <i>(Moderate strength muddy debrite)</i>			
						LOW STRENGTH <i>(Low strength muddy debrite)</i>			
			TURBIDITY CURRENT			HIGH DENSITY (SANDY) TURBIDITY CURRENT <i>(High density turbidite)</i>	TURBIDITE		SIZE-SEGREGATING SETTLING AND LAYER-BY-LAYER DEPOSITION
		T_A							
		LOW DENSITY (SANDY) TURBIDITY CURRENT <i>(Low density turbidite)</i>		T_{B-2}	Fluid turbulence (with grains reworked as bedload)	TURBULENT			
				T_{B-1}					
		MUD DENSITY FLOW <i>(Densite mud)</i>				T_C	Fluid turbulence		
T_D									
T_{E-1}									
				T_{E-2}	Matrix (gel) strength (and excess pore pressure)				
				T_{E-3}					

Legenda: Classificação de Talling et al. (2012) para fluxos de densidade sedimentar, com uma visão mais completa da fase de transporte de sedimentos, da fase deposicional e do carácter de depósito comumente gerado por cada processo de fluxo.

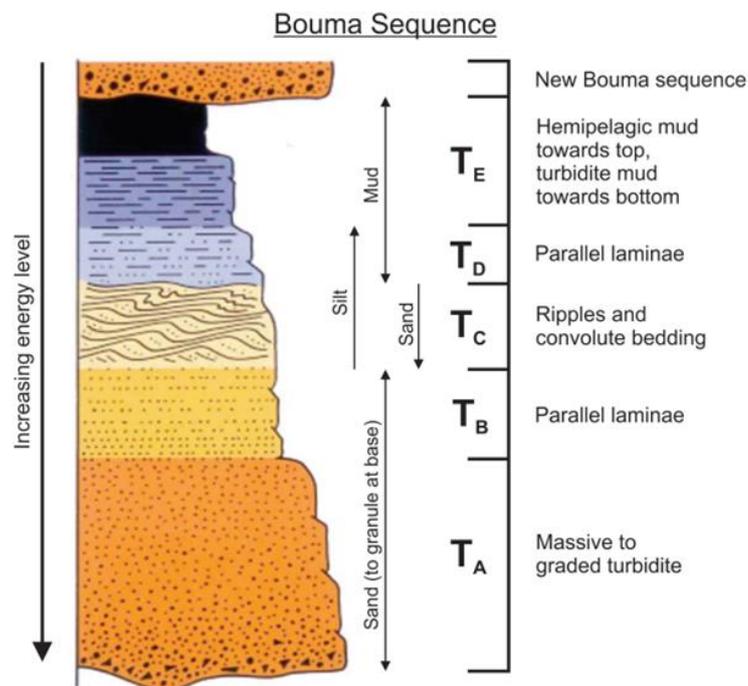
Fonte: Talling et al. (2012).

Em termos sedimentológicos e de sucessão sedimentar, Kuenen & Migliorini (1950) descreveram os depósitos formados por correntes de turbidez como sendo a alternância de extensas camadas gradadas de arenitos e de camadas de folhelhos. A associação desses sedimentos, que apresentavam uma mudança sistemática no tamanho dos grãos da base para o

topo, como consequência da corrente turbidez, influenciou novos estudos, não só em afloramentos, mas em subsuperfície, com dados de geologia marinha.

Após a introdução do conceito de turbiditos, o trabalho que trouxe uma primeira generalização relativa à descrição dos depósitos de turbiditos foi o de Bouma, (1962) (Figura 3). Bouma, a partir da descrição do afloramento do arenito Annot, no sudeste da França, constatou que as camadas apresentavam uma gradação normal e uma sucessão vertical de estruturas sedimentares que, quando completa, mostrava uma sequência granodecrescente, dividida em cinco porções distintas (Ta, Tb, Tc, Td e Te). Da base para o topo, tem-se a porção basal maciça (Ta), que passa a arenitos com laminação paralela (Tb), depois para camada com laminação por ripples (Tc), seguida por sedimentos hemipelágicos (Td) e, por fim, sedimentos pelágicos de bacia (Te), depositados devido à parada das correntes de turbidez. A definição do referido autor teve tamanha relevância na comunidade geológica, que o termo "sequência Bouma" foi adotado para referir-se a sequências de estruturas internas comumente vistas em camadas de turbiditos individuais.

Figura 3 - A sequência de fácies do Bouma (1962)

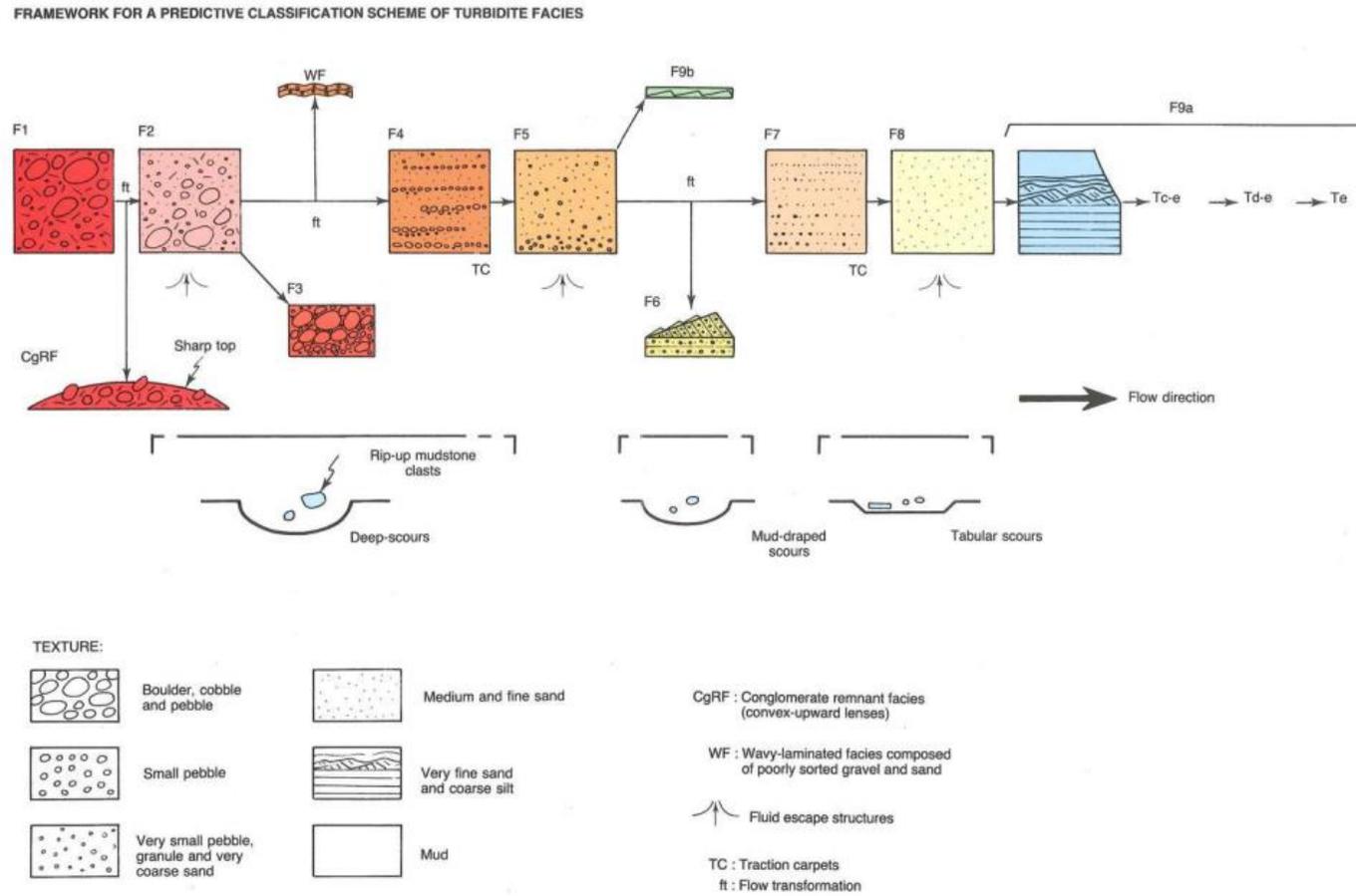


Legenda: Definição das fácies da base para o topo: porção basal maciça (Ta), arenitos com laminação paralela (Tb), laminação por ripples (Tc), sedimentos hemipelágicos (Td) e, por fim, sedimentos pelágicos de bacia (Te).

Fonte: Retirado de Empinotti, 2020.

Já Mutti (1992) criou uma classificação de fácies para depósitos de águas profundas baseada nos diferentes depósitos distribuídos num perfil longitudinal (trato das fácies) e onde as transformações de fluxo podem ocorrer (Figura 4). Na sua classificação: F1 consiste em depósitos de fluxos de detritos (*slumps*, paraconglomerados lamosos); F2 e F3 são conglomerados depositados por fluxos hiper-concentrados; F4 a F8 (areias de granulometria grossas, média, finas a muito finas) são depositados por correntes de turbidez de alta densidade; e F9 (areias de granulometria muito fina, silte e argila) são depósitos de turbidez de baixa densidade que coincidem com as divisões TB para TE da Sequência de Bouma.

Figura 4 – Trato de fácies de Mutti (1992) para depósitos em águas profundas e o processo relacionado para cada fácies



Fonte: Mutti, 1992.

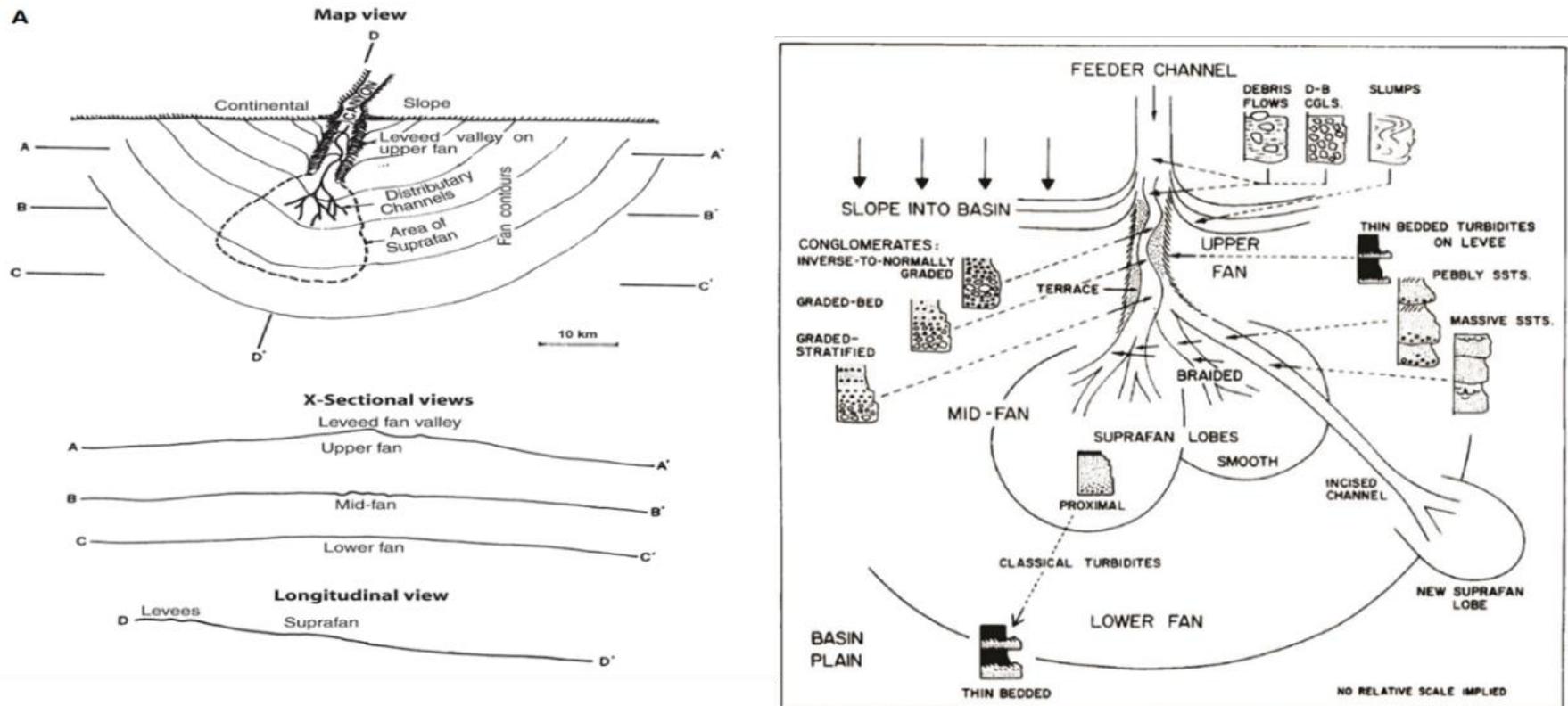
2.2 Elementos e arquiteturas deposicionais de sistemas turbidíticos

Com o aumento do interesse da indústria de óleo e gás pelos reservatórios turbidíticos, na década de 70, os primeiros modelos preditivos conceituais para depósitos em águas profundas foram apresentados (ex Normark, 1970 e Walker, 1978). Nesses, os importantes elementos geométricos de diferentes partes dos sistemas de leques submarinos recentes foram descritos e apresentados em mapas, associados a diferentes domínios de fácies sedimentares. A caracterização destes elementos em termos de forma, tamanho, distribuição de fácies e padrões de empilhamento é o que se chama de arquitetura deposicional (originalmente definida por Miall, 1995, para sistemas fluviais, *apud* Empinotti 2020).

O modelo de Normark (1970) descreveu a morfologia dos depósitos turbidíticos com feições mais canalizadas na porção proximal e mais lobada na porção distal. Chamado de leque de água profunda, esse sistema foi subdividido em três regiões: leque superior, leque intermediário e leque inferior (Figura 5). O leque superior, também denominado de *leveed valley*, foi descrito como a porção mais proximal do sistema, apresentando feições de canais erosivos e de depósitos de *levees*. A região do leque intermediário foi caracterizada pela presença dos canais distributários, de menor porte, que alimentam a porção mais distal dos depósitos de águas profundas. Por sua vez, as porções do leque inferior eram caracterizadas por feições erosivas menos abundantes e pela deposição de sedimentos decorrente da interrupção do confinamento da corrente de turbidez.

O modelo de Walker (1978) associou as fácies sedimentares oriundas das correntes de turbidez com elementos arquiteturais até então descritos na literatura. Com essa associação dos dados de fácies com elementos deposicionais definidos, Walker (1978) elaborou o modelo conceitual em que posicionou associações de fácies mais características nos diferentes elementos deposicionais. De forma geral, as fácies de granulometria mais grossas foram associadas ao canal principal e aos distributários, e os sedimentos de granulometria mais fina foram relacionadas à região do leque inferior (Figura 5).

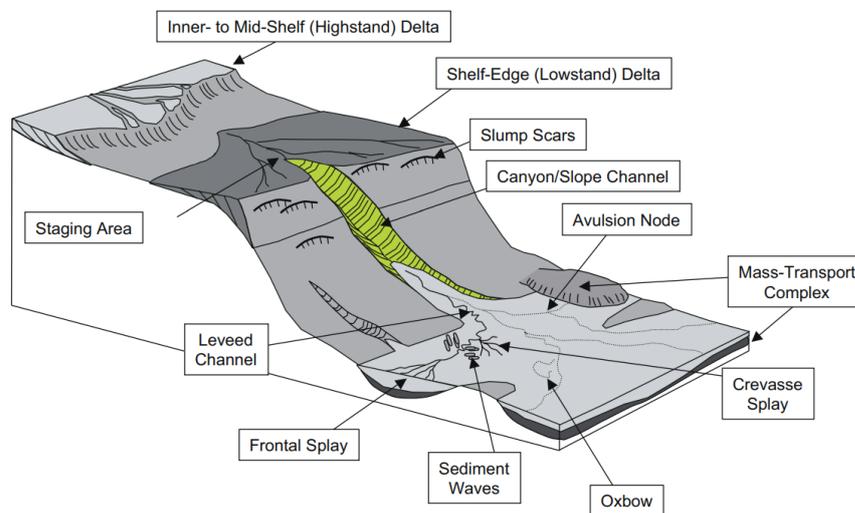
Figura 5 – à esquerda o modelo de leque submarino de Normark (1970) e à direita o modelo de distribuição de fácies ao longo dos elementos arquiteturais de Walker (1978)



Fonte: Normark (1970) e Walker (1978).

Walker e Posamentier (2006) propuseram uma representação tridimensional das ocorrências dos diferentes elementos arquiteturais formados durante a deposição de sedimentos em águas profundas (Figura 6). De forma geral, a região de águas profundas consiste em basicamente dois subambientes: o talude continental e a planície abissal ou assoalho da bacia. Os elementos deposicionais ou arquiteturais mais importantes formados nesses ambientes são: cânion e canais de taludes, canais e diques marginais (*channel-levees*), lobos frontais (*splay*) e depósitos de transporte de massa (MTDs).

Figura 6 -Representação esquemática da fisiografia da plataforma e águas profundas, com os principais elementos deposicionais deste ambiente

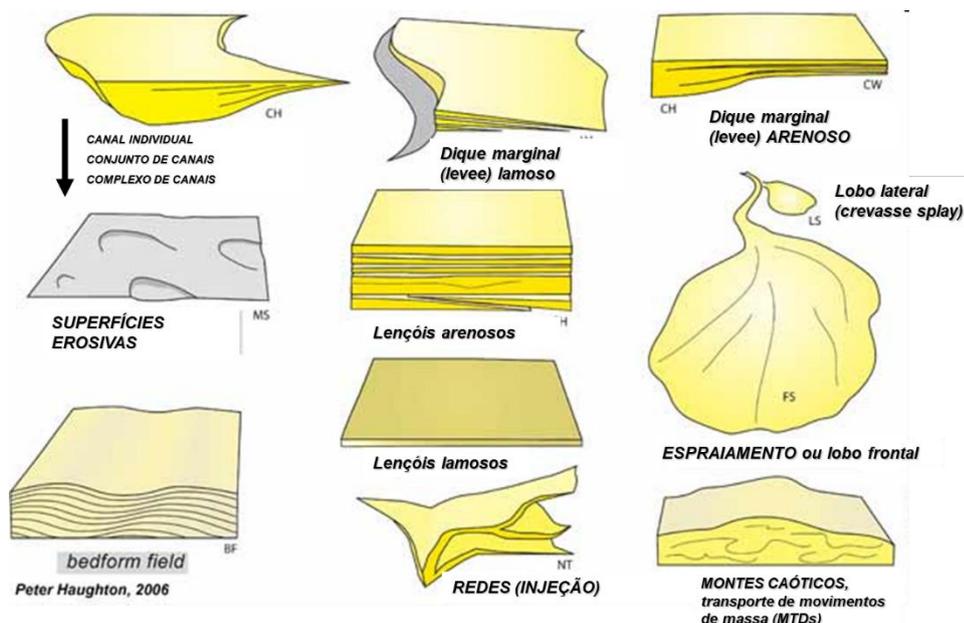


Legenda: A área de preparação (*staging area*) é conectada ao ambiente de água profunda através dos cânions e canais de talude.

Fonte: Walker e Posamentier, 2006.

Haughton (2006) propôs uma representação genérica dos elementos deposicionais observados nos sistemas de depósitos em águas profundas. Segundo ele, nos sistemas marinhos de águas profundas, há um número limitado de elementos geométricos caracterizadas pelas suas superfícies delimitadoras; e fácies internas podem ocorrer em diferentes proporções e distribuições, formando uma vasta gama de possíveis arquiteturas deposicionais (Figura 7).

Figura 7 - Elementos deposicionais observados em sistemas sedimentares de águas profundas



Legenda: Os principais elementos destes sistemas são canais, lóbulos (splays), depósitos de transporte em massa (MTDs), diques e diques marginais (levees).

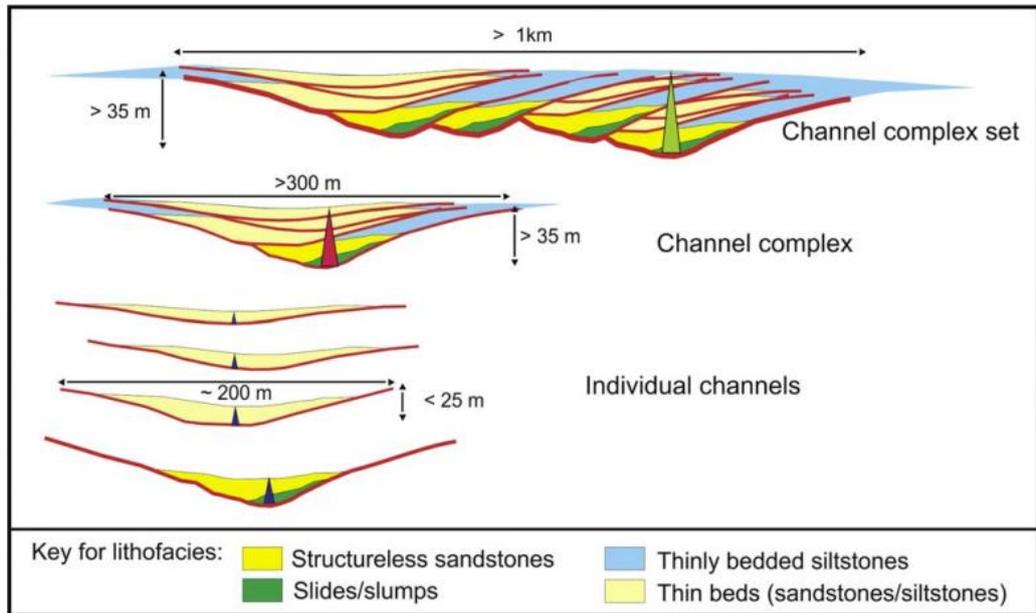
Fonte: modificado de Haughton, 2006; em: <http://www.sepmstrata.org/page.aspx?pageid=39>.

A análise da arquitetura deposicional de um sistema sedimentar é baseada na ideia de que o sistema é uma entidade tridimensional que contém elementos básicos que os formam (Empinotti, 2020). Nesse sentido, os elementos deposicionais podem ocorrer em diversas escalas hierárquicas, dependendo da frequência com que ocorrem e do quanto se empilham, podendo apresentar-se apenas como um elemento individual, um complexo de elementos ou um grupo de complexos de elementos. As figuras abaixo ilustram essas possibilidades de diferentes escalas hierárquicas dos elementos deposicionais, com suas diferentes dimensões, para canais (Figura 8) e lobos frontais (Figura 9).

Os canais podem ocorrer em várias partes do sistema de águas profundas: dentro de cânions, em leques submarinos, e principalmente nas partes proximais e medianas ou em vales com complexos de canais que interligam talude/cânions com lobos (Figura 6). Dependendo de como os canais individuais são empilhados, diferentes tipos de canais internos podem formar um complexo de canais. Em relação ao grau de segregação dos canais individuais empilhados, os complexos de canais podem ser classificados como amalgamados ou discretos (Figura 10). Os complexos de canais discretos apresentam canais individuais que ocorrem segregados

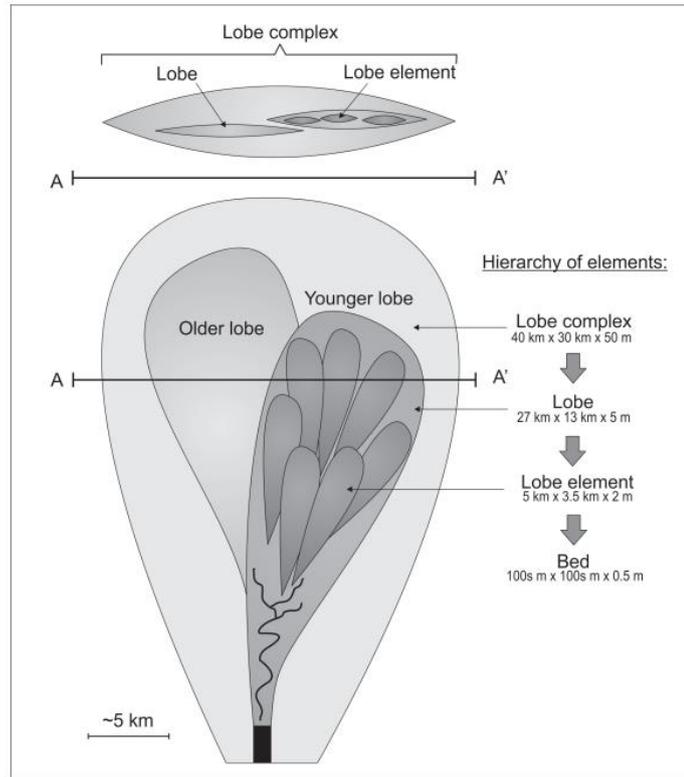
especialmente, com empilhamento muitas vezes numa tendência oblíqua a vertical devido à agradiação vertical (Deptuck et al., 2007).

Figura 8 – Proposta da hierarquia para os elementos de canais de Sprague et al (2005)



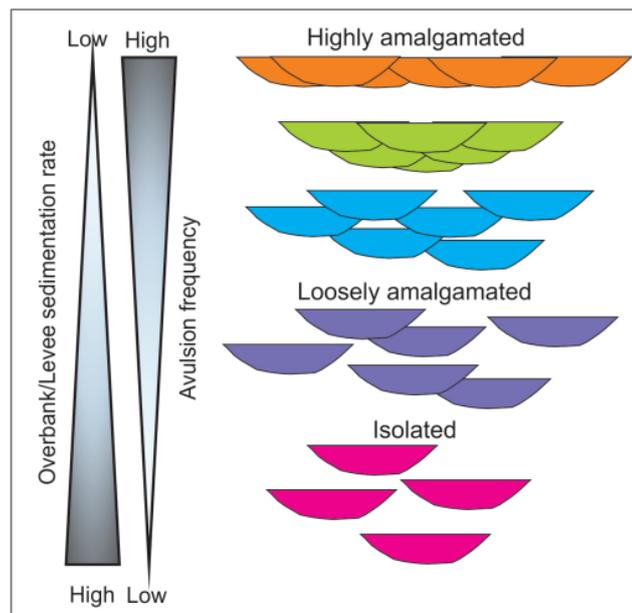
Fonte: Sprague et al (2005).

Figura 9 - Proposta da hierarquia para os elementos lobos frontais



Fonte: Groenenberg et al., 2010, modificado de Prélat et al., 2009.

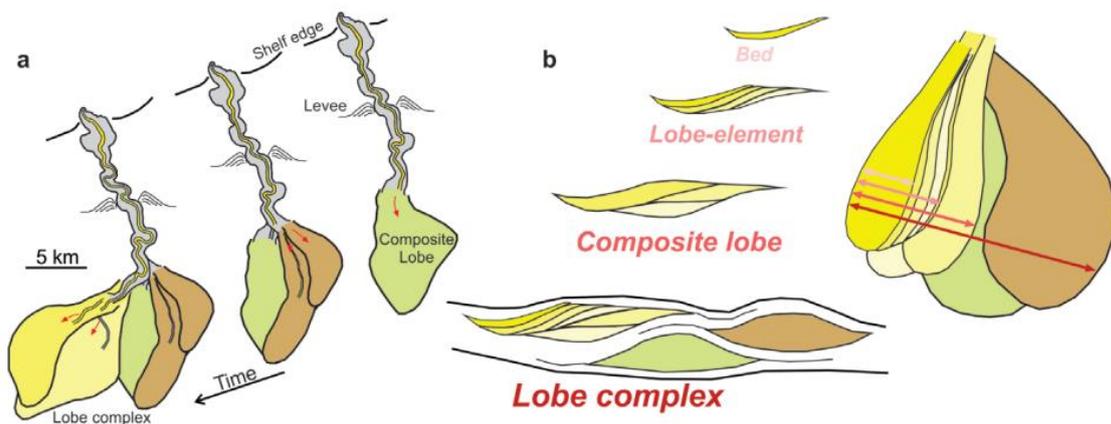
Figura 10 – Padrões de empilhamento de canais.



Fonte: Retirado de Empinotti, 2020.

Os lobos terminais ocorrem principalmente nos sopés de taludes, ou em regiões da bacia onde a topografia tenha menor gradiente e uma área desconfinada. Os lobos podem formar complexo de lobos terminais que, devido à grande continuidade lateral e alto volume de areia, atraíram o interesse da indústria petrolífera, tornando-se alvos promissores para exploração de petróleo e gás, levando diversos pesquisadores a desenvolver trabalhos ao longo dos últimos anos. Deptuck et al. (2017) fizeram uma revisão bibliográfica sobre esse tipo de elemento arquitetural, na qual descreveram as hierarquias estratigráficas nesses depósitos divididas em: camadas, elemento lobo, lobo e complexo de lobos, dependendo, em geral, da espessura e continuidade dos corpos (Figura 11). As diferentes hierarquias estratigráficas podem se empilhar verticalmente ou com deslocamento lateral, podendo haver compensação lateral ou avulsão da direção de deposição.

Figura 11 - Desenvolvimento do complexo de lobos e sua hierarquia interna



Legenda: a -Desenvolvimento do complexo de lobos composto por três lóbulos compostos principais, cada um por sua vez composto por vários elementos de lóbulos de ordem superior. b Diagrama esquemático mostrando a hierarquia geral de empilhamento de compensação lateral em lobos submarinos.

Fonte: Deptuck et al. 2017.

3 **ÁREA DE ESTUDO**

3.1 **Aspectos geológicos**

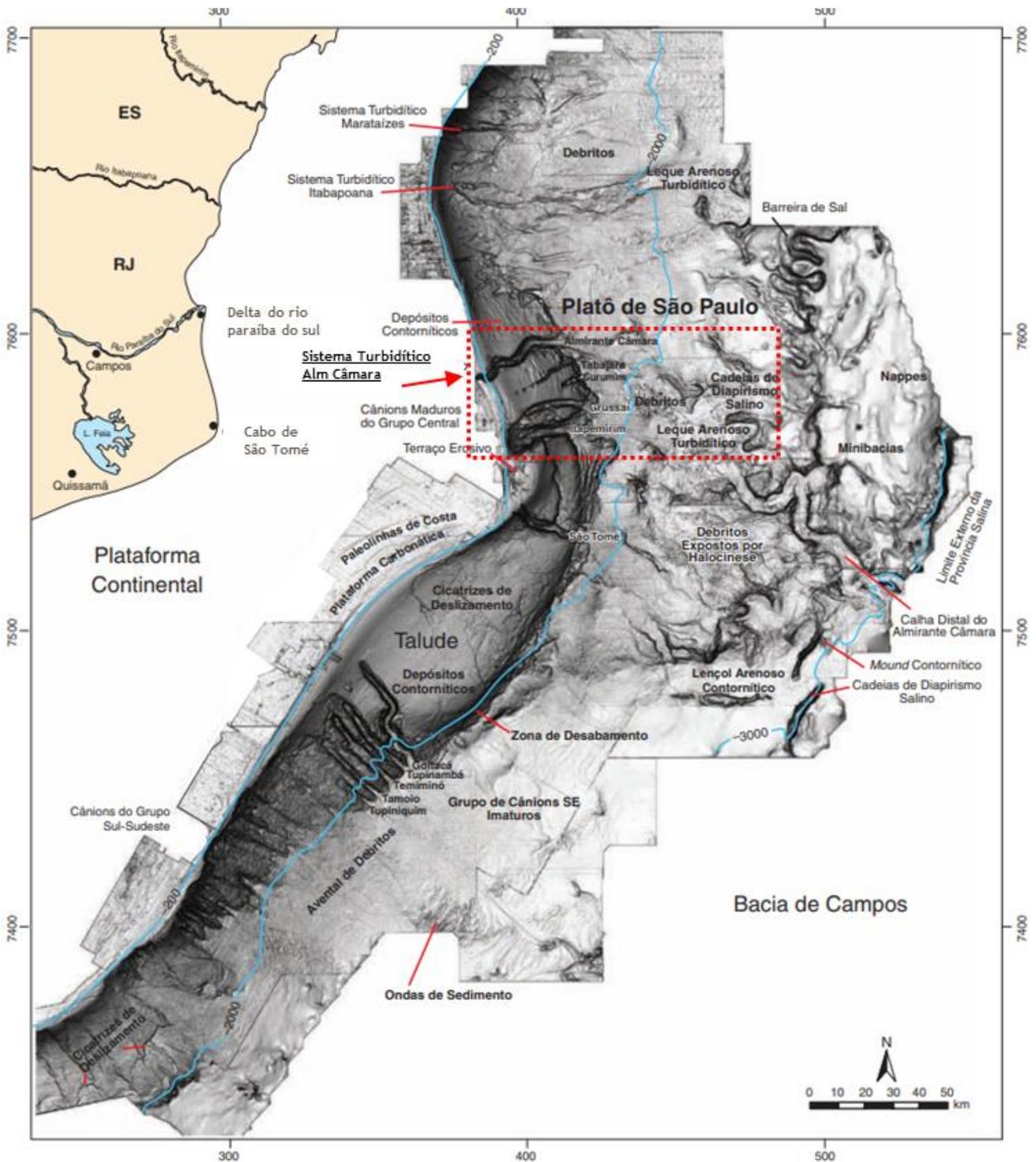
A área de estudo (Figura 12) está inserida na Bacia de Campos, adjacente ao Platô de São Paulo, aproximadamente entre as latitudes do Cabo de São Tomé e do Delta do Rio Paraíba do Sul, cerca de 80km da costa, em lâmina d'água que varia de 100m a 2400m de profundidade. Especificamente, a área de estudo está limitada por um polígono entre as latitudes 21° 41'18"/22° 05'45" e longitudes 40°11'29"/ 39°10'19", ou 7556567/7601271N e 376762/482269 nas coordenadas UTM.

A deposição de sedimentos em águas profundas na evolução da Bacia de Campos é conhecida principalmente pela Formação Carapebus (de idade Eocênica), que são reservatórios turbidíticos portadores de hidrocarbonetos. Uma melhor forma de compreender esses reservatórios pretéritos é analisar as sucessões turbidíticas mais recentemente registradas na bacia. O sistema deposicional Almirante Câmara representa um desses registros no atual fundo marinho da bacia de campos, sendo possível visualizá-lo através de dados sísmicos e dados de sonar multifeixe (Machado et. al, 2004).

O sistema turbidítico Almirante Câmara definido por Machado *et. al* (2004), representa a atual deposição da Fm Carapebus, e é denominado como sendo o conjunto de domínios deposicionais (Figura 13) compostos pelo cânion no talude, que desembocam em complexo de canais proximais, que se interliga a complexo de lobos terminais e mais a frente um complexo de canais mais antigos. Estes elementos são apenas parte de um sistema maior que avança além da borda externa do platô de São Paulo, onde desenvolve uma enorme acumulação mista turbidítica-contornítica (Viana et al., 2003). O presente estudo terá como foco modelar o sistema até os lobos terminais.

Toda a deposição desde o cânion e para além dos canais distais são estruturalmente controlados por uma calha que é formada pelo encadeamento de mini-bacia criadas pela halocinese. A calha é uma depressão estrutural presente no Platô de São Paulo, de 150 km de comprimento, cerca de 3,5 km largura e profundidades que variam entre 80 m a 200 m, prolongando-se para as águas ultra profundas (Machado et al, 2004).

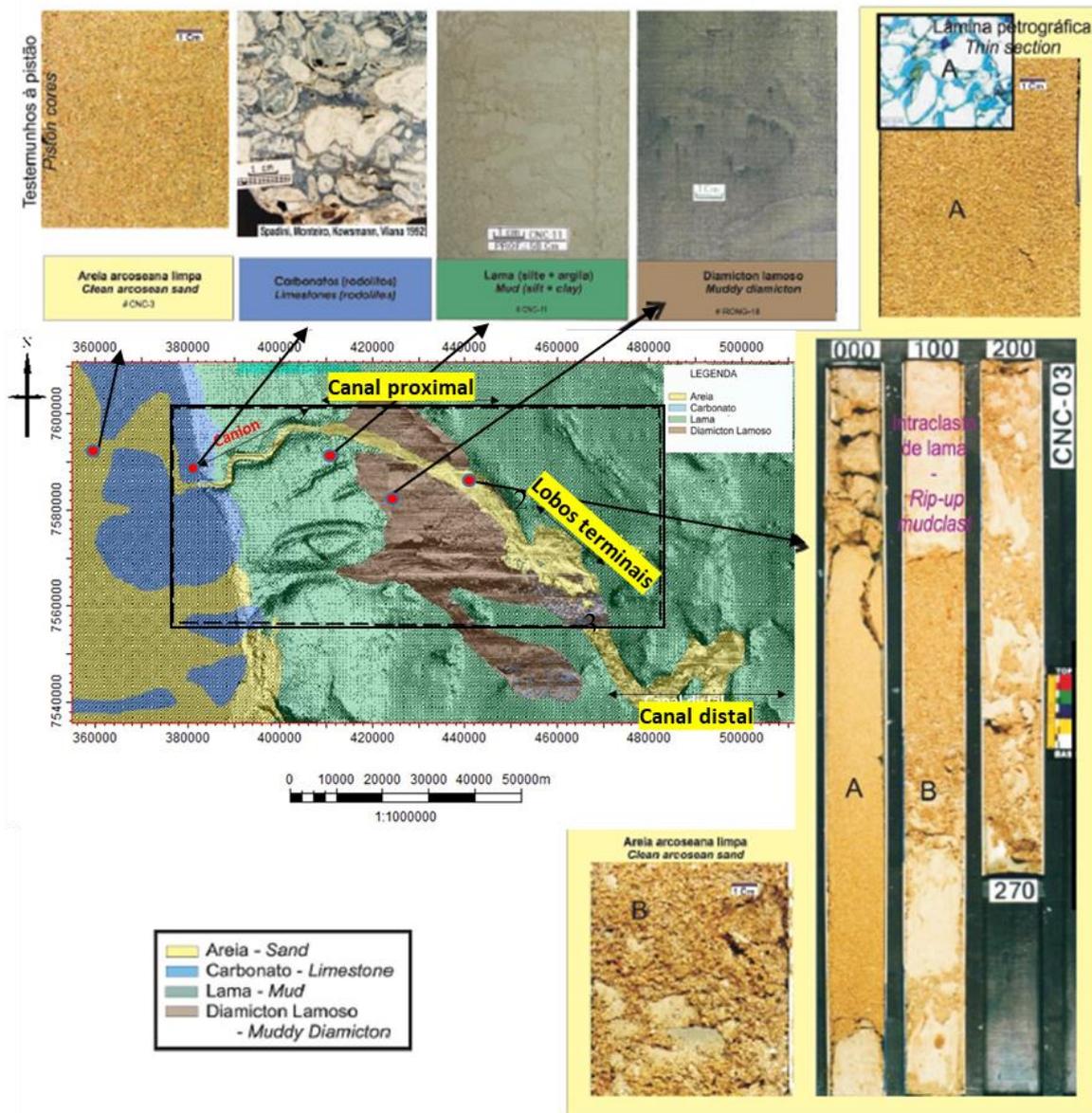
Figura 12 – Localização da área de estudo



Legenda: Modelo digital da geomorfologia indicando as principais feições geomorfológicas do fundo do mar da Bacia de Campos, em destaque a localização da área de estudo (retângulo vermelho pontilhado).

Fonte: Modificado de Schreiner et al., 2007/2008 apud Kowsman et al. 2015).

Figura 13 – Mapa de fácies sedimentares do subfundo marinho da Bacia de Campos, evidenciado o Sistema Turbidítico Almirante Câmara



Legenda: 1- complexo de canais proximais, 2 – Lobos e 3 – complexo de canais distais, com exemplos das amostras de sedimentos de suas regiões.

Nota: O retângulo preto indica a região de foco do estudo.

Fonte: Modificado de Machado et al (2004).

Dada a interação da dinâmica halocinética *versus* sedimentação, sugere-se que a calha é originada em parte pelo próprio peso dos depósitos turbidíticos ao afundarem no sal,

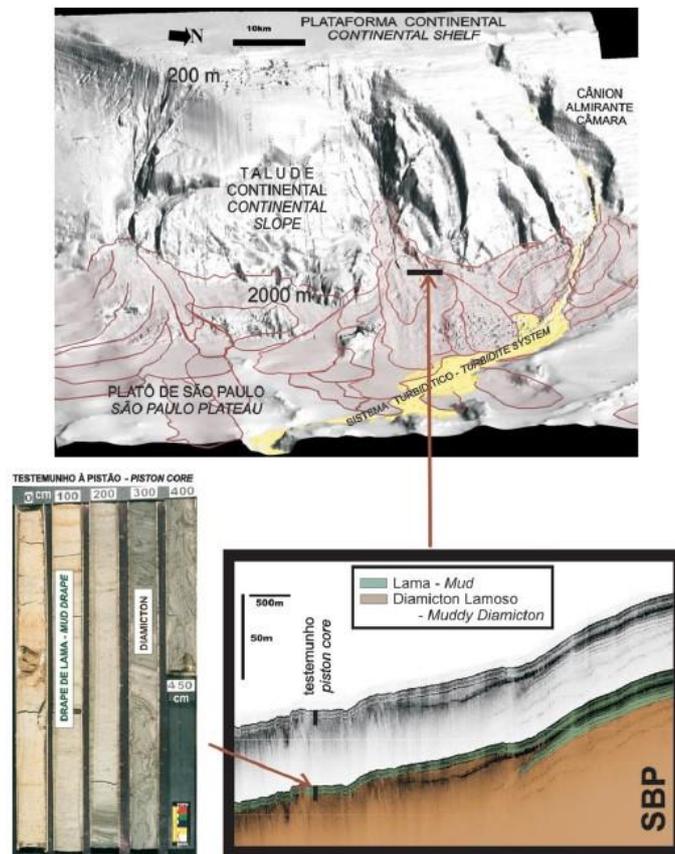
intensificando o efeito da tectônica salífera e criando seu próprio espaço deposicional (Demercian *et al.* 1993 *apud* Machado *et al.*, 2004).

Um importante elemento fisiográfico que compõe o sistema deposicional é a província de depósitos de movimento de massa (representada pela fácies marrom no mapa da Figura 13), que é formada pela amalgamação dos depósitos de diamictons (paraconglomerados lamosos ilustrados no testemunhos da Figura 14), que individualmente têm a geometria de grandes línguas e que foram mapeadas (Figura 14) por Machado *et al.*, (2004). Os depósitos de movimentos de massa possuem centenas de metros de espessura e alguns quilômetros de extensão são consequência do desnível do talude continental e supõe-se que ocorram desde o início do terciário (Machado *et al.*, 2004). Esses depósitos colmataram a deposição mais antiga do sistema turbidítico existente desde o Neomioceno, reconfigurando a fisiografia local, e constituindo-se como parte do substrato sobre o qual depósitos turbidíticos pleistocênicos foram depositados.

Matos (2004), através da interpretação de sismossequências de algumas seções de uma sísmica 3D, evidenciou esse sistema turbidítico mais antigo citado por Machado *et al.* (2004), onde foram mapeados um complexo de canais e de lobos mais antigos, três eventos de transporte de movimentos de massa (em ordem cronológica cáoticos 3, 2 e 1) e o complexo de lobos moderno, que é o foco do presente estudo (Figura 15).

O referido trabalho utilizou um volume de sísmico que cobre parcialmente o sistema turbidítico Alm. Câmara, logo para dar uma visão mais ampla da ocorrência das diferentes unidades estratigráficas já mencionadas, foram feitas quatro seções pela sísmica 3D utilizada no presente trabalho ao longo do sistema. As seções sísmicas ilustram os paleocânions, o movimento de massa e os depósitos mais recentes do sistema Almirante Câmara (Figura 16), que são o foco do presente estudo.

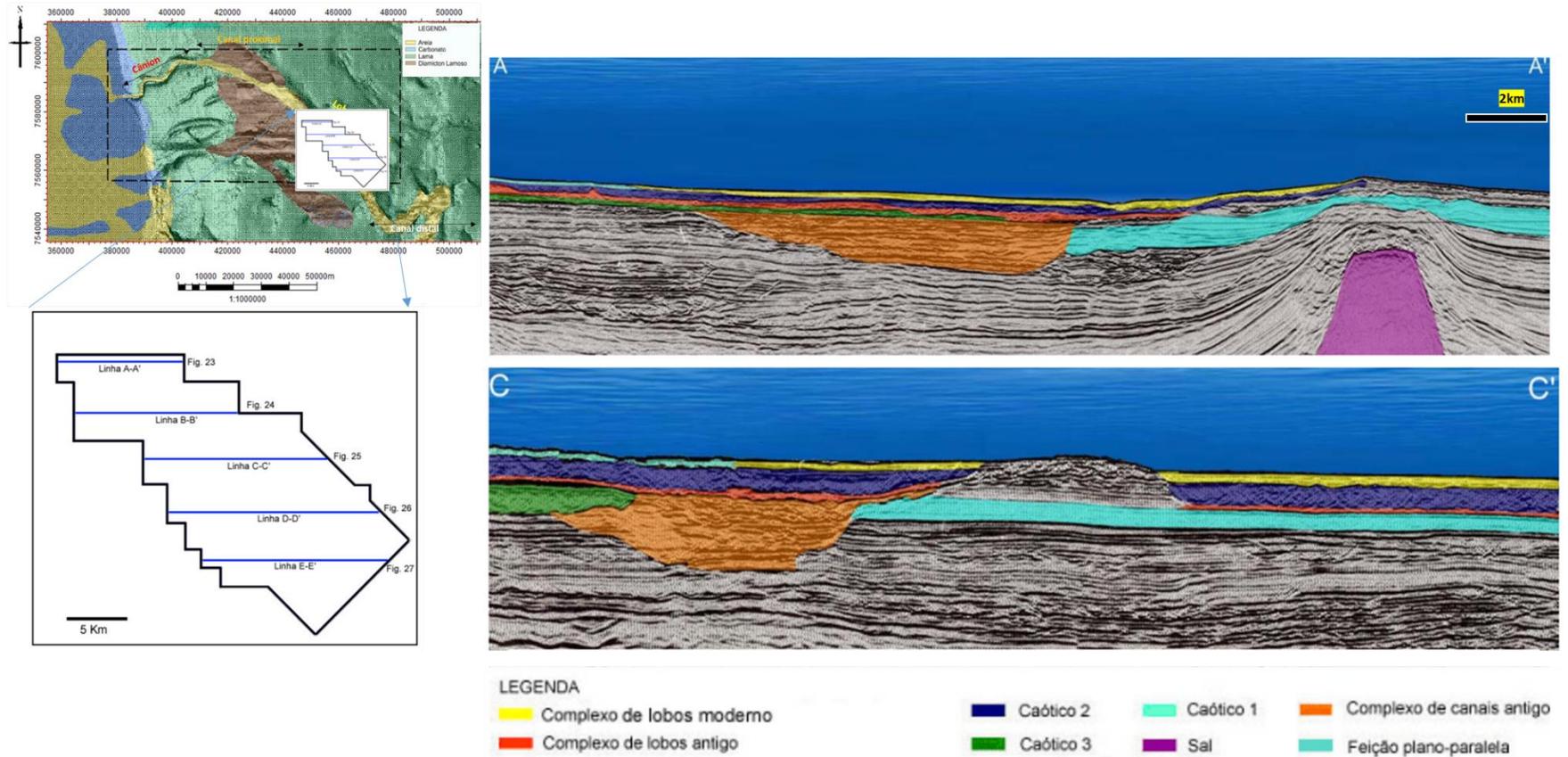
Figura 14 – Detalhes dos depósitos de movimento de massa da área de estudo



Legenda: Imagem 3d de sonar multifeixe do atual fundo marinho da região evidenciando os mapeamentos dos depósitos de movimento de massa (em roxo) e do sistema turbidíticos (em amarelo) feito por Machado et al (2004). Uma amostra de piston-core ilustrando o diamicton e uma seção de sísmica rasa ilustrando a diferença entre lama de decantação dos depósitos de massa.

Fonte: Machado et al (2004).

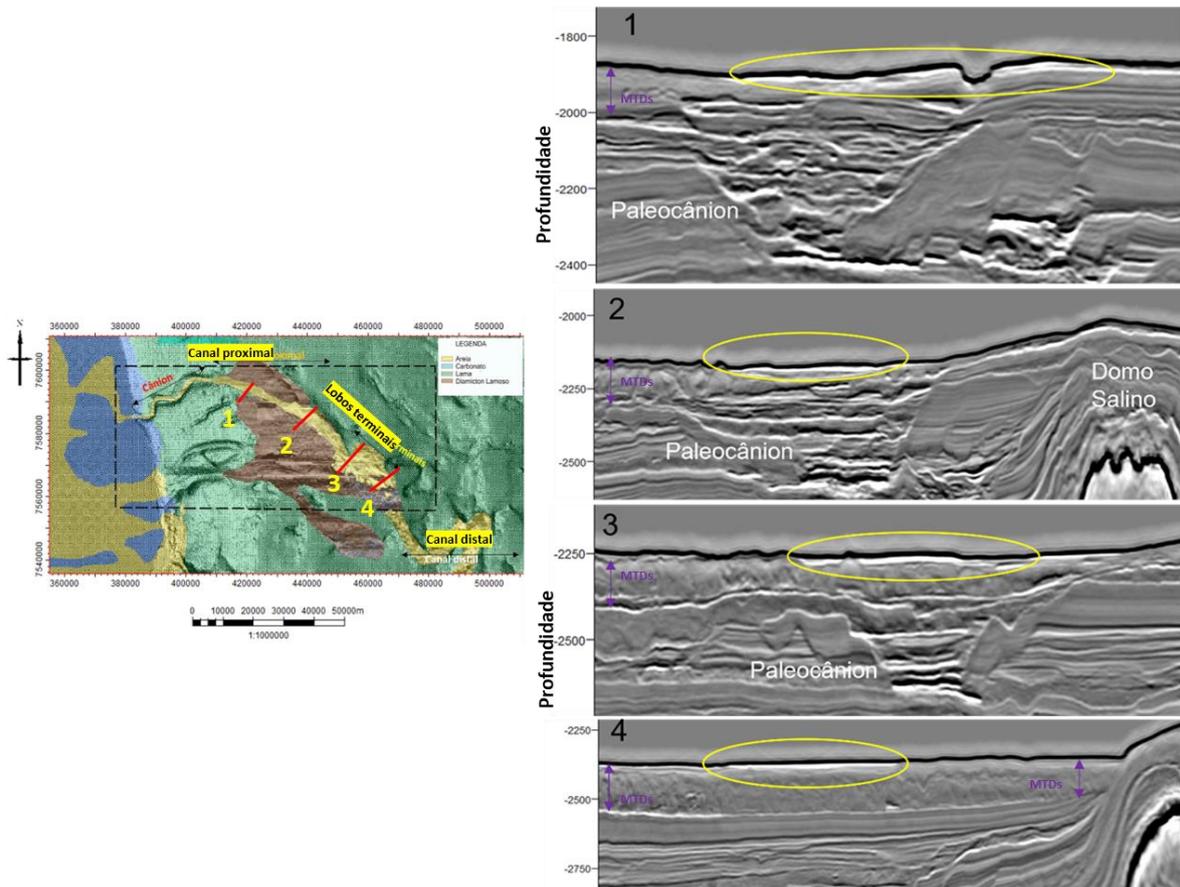
Figura 15 – Seções sísmicas A-A' e C-C', evidenciando as sismossequências mapeadas por Matos (2004)



Legenda: Mapa inferior é o contorno do volume sísmico utilizado por Matos (2004) e as linhas azuis internas são as seções sísmicas que foram mapeadas em seu trabalho. Mapa superior à esquerda localiza os dados sísmicos mencionados na área de estudo do presente trabalho.

Fonte: Matos, 2004.

Figura 16 - Seções da sísmica 3D do presente trabalho ao longo das feições canalizadas do Sistema Turbidítico Almirante Câmara



Legenda: da parte proximal (boca do cânion) até a parte distal (lobos terminais). A elipse amarela destaca os depósitos turbidíticos mais recentes (pleistocênicos) e as setas destacam as espessuras dos movimentos de massa (MTDs) que colmatam os depósitos anteriores do sistema.
 Fonte: O autor, 2022.

Outro importante trabalho que fornece uma grande base de dados na área de estudo é de Abreu (2005). O mesmo se concentrou em mapear através da interpretação de diversas linhas sísmicas 2D de alta resolução (refletores de resolução de cerca de 3m) o complexo de lobos Almirante Câmara, o qual foi definido como o conjunto constituído por cinco lobos individuais que se superpõem (Figura 17). As superfícies que limitam os lobos foram identificadas nas linhas sísmicas 2D de alta-resolução e são representadas por refletores (sismossequências) que individualizam pacotes de refletores (sismofácies) com características similares, isto é, constituem elementos arquiteturais correspondentes a sequências de quinta ordem (Abreu, 2005). Os lobos foram numerados de 1 a 5 (mapa de lobos na Figura 17) do mais velho ao mais

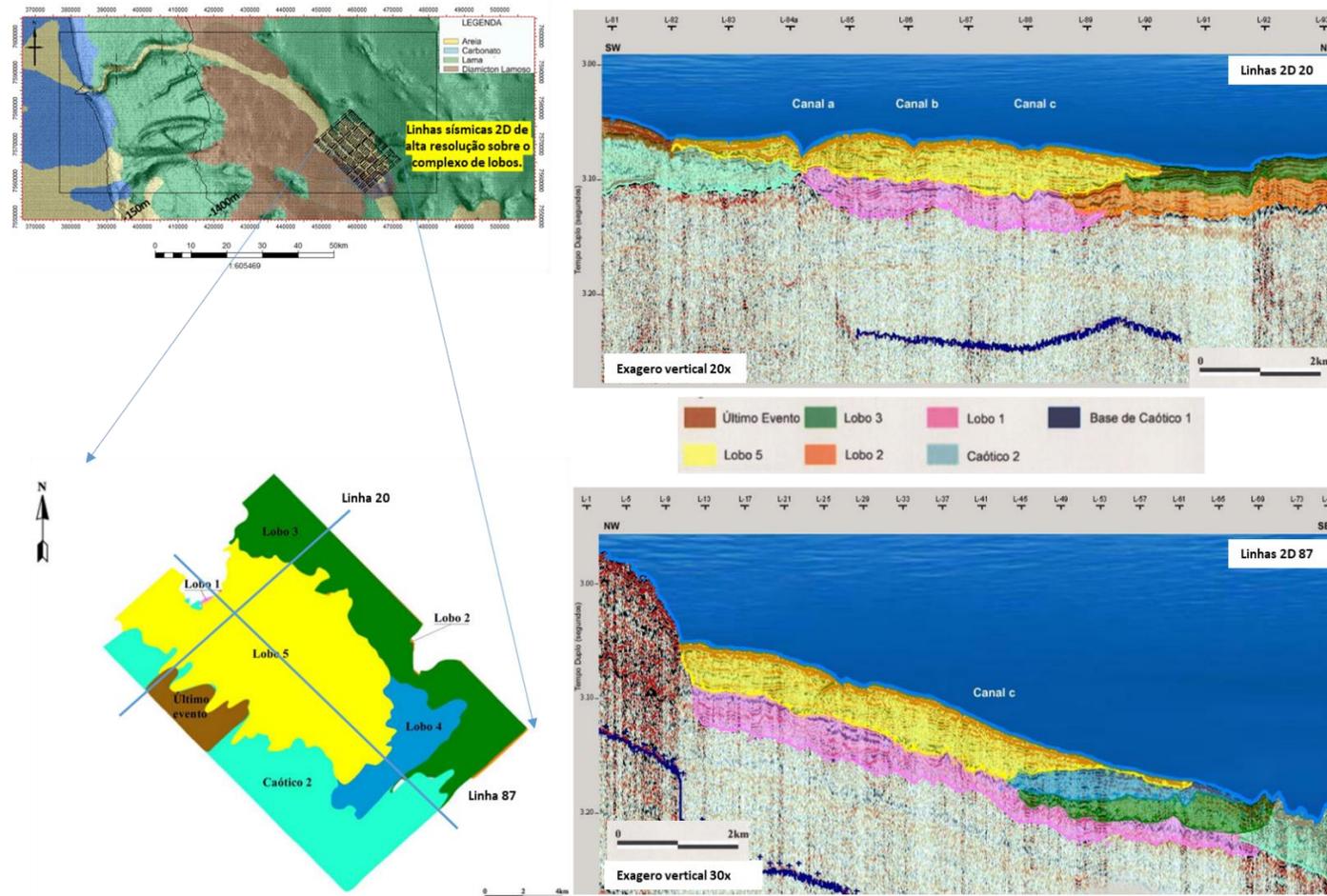
novo sendo que, correspondendo aos lobos 2 e 3, há um elemento não individualizado, caracterizado por sismofácies caóticas (caótico 2) a sudoeste da área investigada. Outro elemento não individualizado, também caracterizado por sismofácies caóticas é o caótico 1, que constitui o substrato onde os lobos se formaram.

Segundo Abreu (2005), os lobos formam um arranjo retrogradante de sudeste para noroeste (Linha 87, na Figura 17) e com justaposição lateral (deslocamento ou compensação lateral). Porém, um último evento registrado é a deposição gravitacional de sedimentos finos oriundos do talude lateral aos lobos, e não propriamente da mesma fonte que forneceu material para os mesmos. O substrato sobre o qual os lobos se depositaram é constituído por depósitos caóticos/diamictitos (sismofácies caótica 1), oriundos do talude/plataforma, e está bordejado por muralhas e domos de sal, o que proporcionou um relevo baixo, praticamente sem obstáculos para a deposição dos lobos. O complexo de lobos e a sismofácies caótica 2 estão sobrepondo uma paleotopografia gerada sobre um pacote sedimentar com refletores também caóticos, constituindo a sismofácies caótica 1 (Figura 17).

O autor, interpretou que o transporte de sedimentos nos lobos foi sendo feito por três canais principais que cortam o lobo 5 longitudinalmente (Figura 17). Estes canais foram denominados de a, b e c, e migraram lateralmente de sudoeste para nordeste, sendo, portanto, a o mais velho e c, o mais novo. Tais canais, cuja origem deve estar associada aos próprios fluxos gravitacionais que transportaram os sedimentos, são os responsáveis pela deposição dos sublobos que compõem o lobo 5.

No referido estudo foram calculadas espessuras (Figura 18) e extensões médias para cada porção de cada lobo, que servem como referência para orientar as dimensões dos depósitos gerados nas simulações.

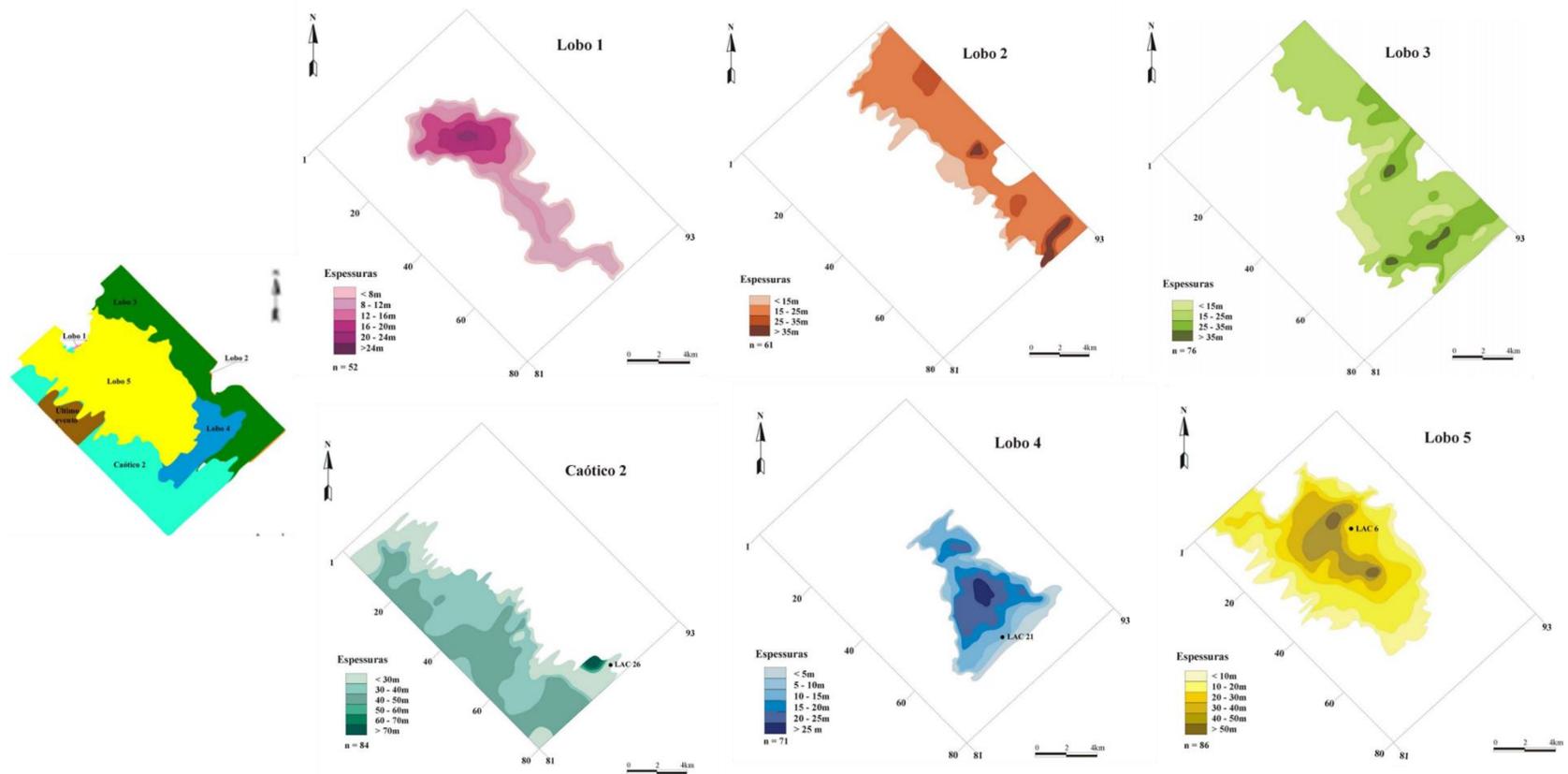
Figura 17 – Mapa de disposição e linhas sísmicas 2D dos lobos mapeados por Abreu (2005)



Legenda: Mapa superior com as linhas sísmicas 2D utilizadas em Abreu (2005), mapa inferior: mapa de lobos mapeados por Abreu (2005). Seção dip (linha 87) e seção strike (Linha 2d 22) através da região do complexo de lobos, interpretada com a individualização de cada sublobo.

Fonte: Modificado de Abreu (2005) e Machado (2004).

Figura 18 – Mapa de disposição dos lobos e mapas de isópacas dos lobos individualizados por Abreu (2005)



Legenda: n representa o número total de pontos utilizados para o cálculo de espessura a partir da sísmica em tempo.

Fonte: Modificado de Abreu, 2005.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

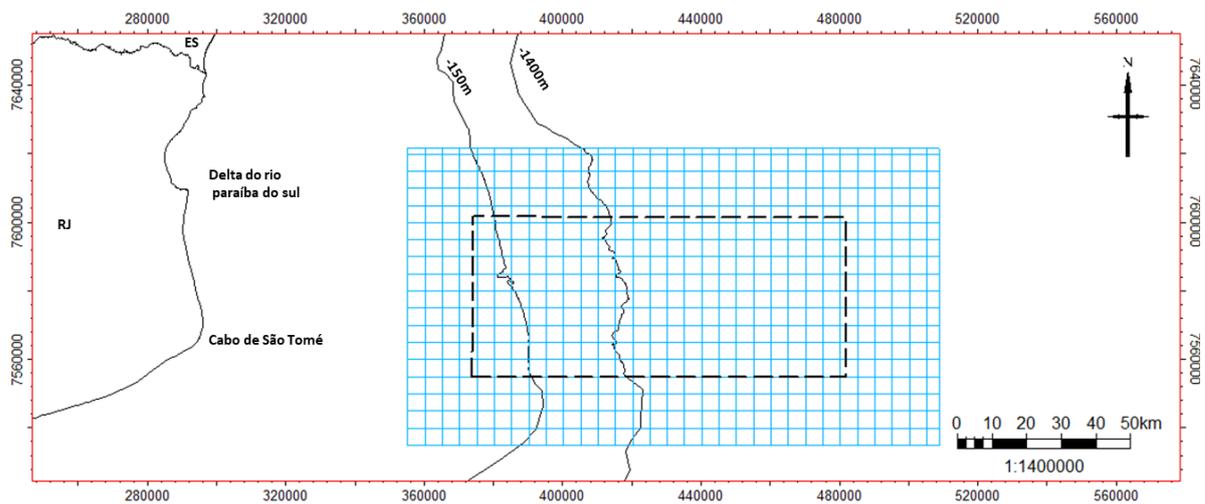
O trabalho consistiu na aplicação das seguintes etapas metodológicas:

- I. Levantamento e estudo bibliográfico de dados geológicos, bioestratigráficos e geofísicos para embasar a parametrização da fase de modelagem numérica (e.g. taxa de aporte, concentração dos fluxos turbidíticos, frequência de ocorrência dos fluxos, idade total dos depósitos etc.);
- II. Realização da etapa de interpretação dos dados sísmicos 3D para o mapeamento/traçado da paleosuperfície à época da deposição dos primeiros sedimentos do complexo turbidítico;
- III. Realização da etapa de testagem inicial das simulações para a compreensão do efeito da modificação dos parâmetros do *software* a fim de se obter uma boa base de calibração de parâmetros;
- IV. Realização de várias etapas de simulação de cenários estratigráficos-sedimentológicos, visando à aplicação de diferentes conjuntos de parâmetros capazes de produzir um modelo deposicional construído a partir de dados litológicos da rocha e da sísmica. Como resultado, espera-se uma representação numérica de parâmetros que expliquem a evolução deposicional do sistema deposicional em estudo, como observado através dos dados bibliográficos e geológico-geofísicos disponíveis. Esta representação numérica visa reproduzir condições que permitam a deposição das fácies encontradas nos dados de poços, e assim propor, e/ou validar, um contexto possível, ou provável, de arquitetura estratigráfica que explique o desenvolvimento e a distribuição das fácies sedimentar do sistema turbidítico Alm Câmara.

4.1 Dados Sísmicos

Para o mapeamento das superfícies a serem utilizadas na modelagem e extração de mapas de atributos sísmicos, o trabalho usa um volume sísmico 3D (Figura 19), processado em profundidade, que contempla uma área de cerca de 13000 km², de espaçamento mínimo entre suas *crosslines* e *inlines* de 25 m. Os mapeamentos realizados são detalhados no item 5.1.

Figura 19 – Grid e limites (em azul) do volume do sísmico utilizado e área do estudo limitada pelo tracejado em preto



Fonte: O autor, 2022.

4.2 Dados Sedimentológicos e Bioestratigráficos

São utilizadas as descrições, análises sedimentológicas e bioestratigráficas de 30 *piston-cores* coletados na região dos lobos distais e na região de canais proximais, disponíveis em Abreu (2005) e alguns testemunhos rasos da base de dados da Petrobras na área. São aproximadamente 50m totais de sedimentos recuperados. Os dados servem como referência para calibrar alguns parâmetros na modelagem de processos, como proporção de fração sedimentológica a ser usada nos fluxos, taxa de sedimentação e idade dos eventos. A Tabela 1 compila, as profundidades e o total de sedimento recuperado em cada furo.

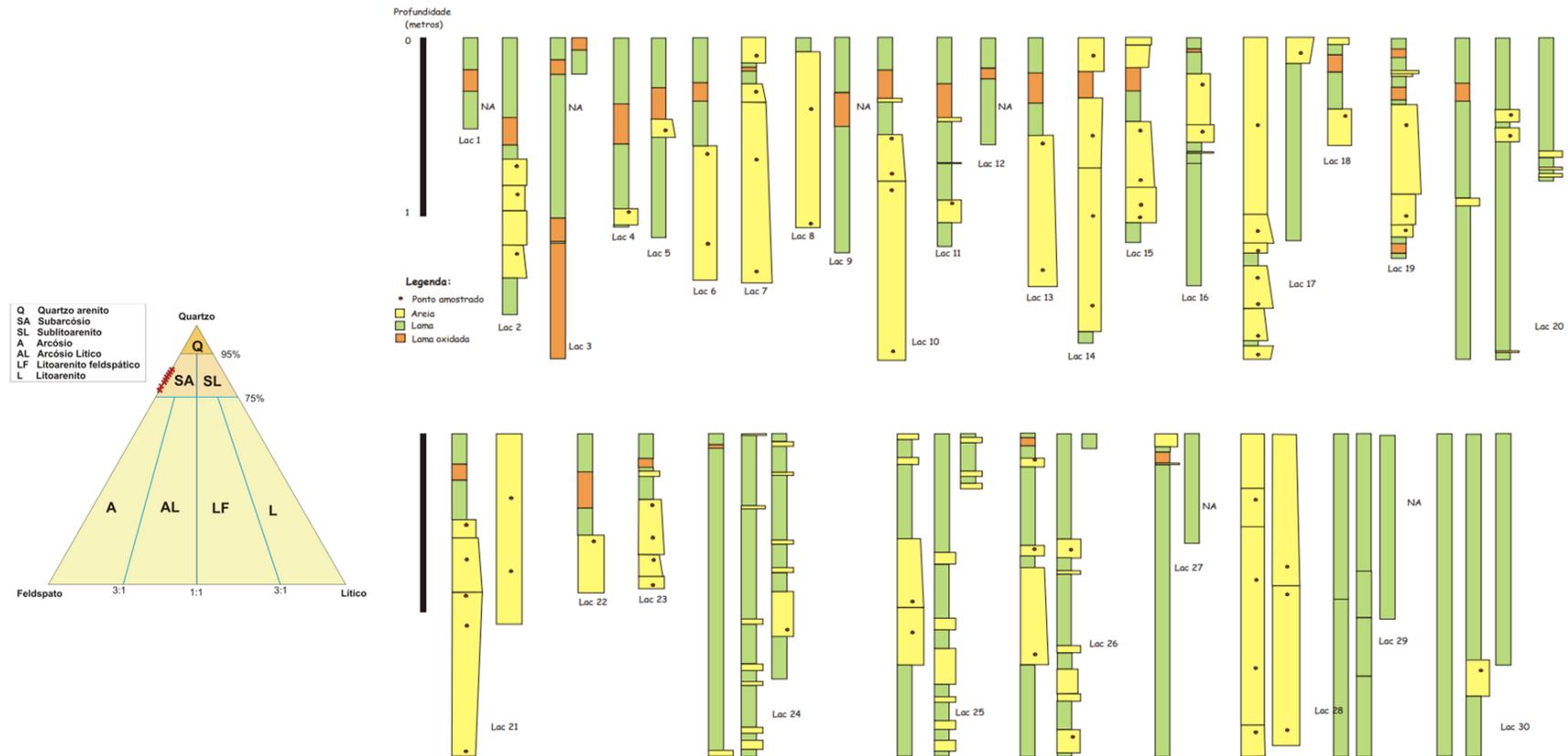
Souza (2014), concentrou-se em caracterizar e classificar sedimentologicamente as amostras (59 amostras de 20 testemunhos, Figura 20) de areia testemunhadas da porção de lobos distais, caracterizando-as como areias de granulometria fina a muito fina, moderadamente bem selecionadas e de composição subarcoseanas (Figura 20). Maurício (2010), também analisou as características de amostras de areias dos testemunhos (15 amostras em 15 testemunhos) classificando-as com uma variação granulométrica de areia muito fina à grossa, de composição subarcoseana (Figura 20). Machado et al, (2004), descreve as amostras dos testemunhos rasos da região de canais como sendo areias limpas arcoseanas, moderadamente selecionadas com granulometria de média a grossa (Testemunhos GL e CNC, na Figura 21).

Tabela 1- Variação da lâmina d'água e profundidade atingida pelos furos de testemunho a pistão feitos ao longo do sistema.

Testemunho	Profundidade(m)	Total recuperado (m)
LAC01	2265	0,51
LAC02	2259	1,55
LAC03	2273	2,18
LAC04	2292	1,05
LAC05	2289	1,27
LAC06	2310	1,35
LAC07	2307	1,37
LAC08	2315	1,06
LAC09	2307	1,18
LAC10	2325	1,81
LAC11	2347	1,4
LAC12	2362	0,6
LAC13	2348	1,35
LAC14	2362	1,74
LAC15	2360	1,15
LAC16	2350	1,33
LAC17	2361	2,97
LAC18	2366	0,6
LAC19	2370	1,23
LAC20	2363	4,62
LAC21	2378	2,95
LAC22	2372	0,88
LAC23	2375	0,88
LAC24	2397	4,93
LAC25	2382	4,01
LAC26	2382	3,73
LAC27	2412	2,56
LAC28	664	0,49
LAC29	1081	4,95
LAC30	1447	4,85

Fonte: Souza (2014).

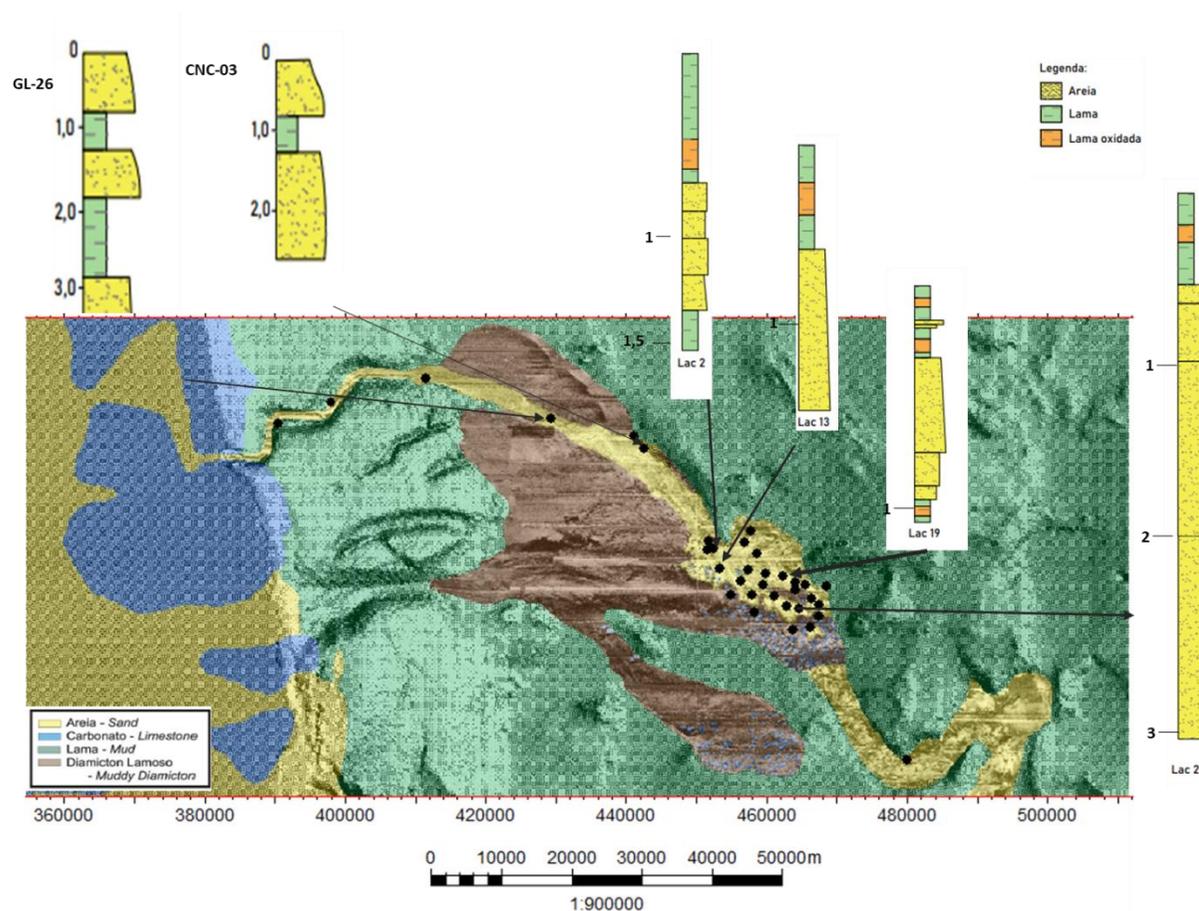
Figura 20 – Diagrama de Folk (1980) com a plotagem das 15 amostras de areias analisadas do complexo de lobos Almirante Câmara estudados por Mauricio (2010).



Nota: Observa-se que todas as amostras estão posicionadas no campo dos subarcósios. Perfis litológicos compilados no estudadas Souza (2004), dos testemunhos levantados em Abreu (2005).

Fonte: Modificado de Souza (2004) e Mauricio (2010).

Figura 21 – Perfis sedimentológicos de alguns testemunhos ao longo do sistema turbidítico Alm. Câmara



Fonte: Modificado de Machado (2004) e Souza (2004).

Outra importante informação advinda dos testemunhos são os resultados das análises bioestratigráficas. Essas são essenciais para guiar as estimativas de tempo de ativação de aporte sedimentar para águas profundas, que ocorrem durante os intervalos de queda e subida relativa do nível do mar. Em Abreu (2005), foram caracterizadas biozonas a partir de foraminíferos planctônicos encontrados nos testemunhos rasos. As biozonas caracterizadas no referido estudo representam somente a parte superior do Pleistoceno e o Holoceno (Tabela 2).

Costa & Toledo (2003) realizaram uma análise bioestratigráfica em 360 amostras dos testemunhos estudados, utilizando-se foraminíferos plantônicos, usando o esquema bioestratigráfico de Ericson & Wollin (1968) e Vicalvi (1997,1999) (*apud* Abreu,2005). Todos os métodos, excetuando pequenos detalhes, baseiam-se no reconhecimento e quantificação de espécies de foraminíferos típicos de águas frias e quentes do Quaternário (Abreu, 2005). As biozonas caracterizadas por este método foram denominadas pelas letras Q (Pleistoceno inferior) a Z (Holoceno), no referido trabalho representam somente a parte superior do Pleistoceno e o Holoceno (Tabela 2).

Tabela 2 – Biozonas encontradas nos testemunhos da área de estudo

Clima	Biozona	Duração	Época	Espécies Características
Interglacial	Z	0-11Ka	Holoceno	<i>Globorotalia truncatulinoides</i>
				<i>Globorotalia menardii</i>
				<i>Globorotalia tumida</i>
Glacial	Y	11-84Ka	Pleistoceno	<i>Globorotalia fimbriata</i>
				<i>Globorotalia inflata</i>
				<i>Globorotalia truncatulinoides</i>
				<i>Globorotalia conglobatus</i>
				<i>Pulleniatina obliquiloculata</i>
Interglacial	X	84-127Ka	Pleistoceno	<i>Globorotalia crassaformis</i>
				<i>Neogloboquadrina dutertrei</i>
				<i>Globorotalia menardii</i>
				<i>Globorotalia flexuosa</i>
Glacial I	W	127-165Ka	Pleistoceno	<i>Pulleniatina obliquiloculata</i>
				<i>Globorotalia truncatulinoides</i>
				<i>Globorotalia inflata</i>

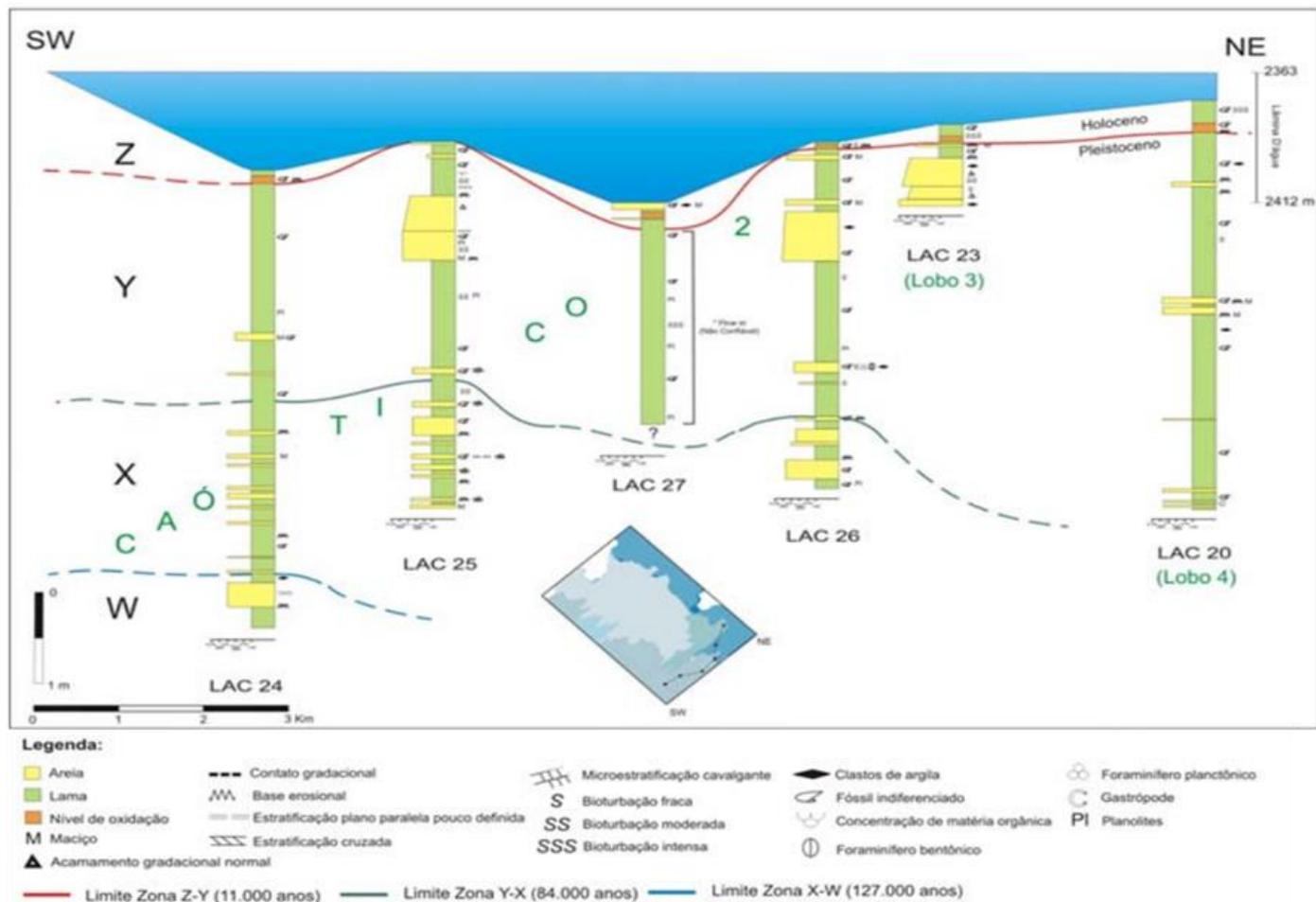
Fonte: Abreu (2005).

Abreu (2005) fez correlações dos perfis sedimentológicos com as biozonas de foraminíferos planctônicos encontrados nos testemunhos rasos (Figura 22). O LAC-24, o que mais recuperou

sedimentos (~5m) na região dos lobos, atingiu o limite entre as biozonas X-W de cerca de 127k anos. Essa é uma idade que será utilizada como partida para a discussão do tempo total das simulações, melhor discutido no item 4.4.3.

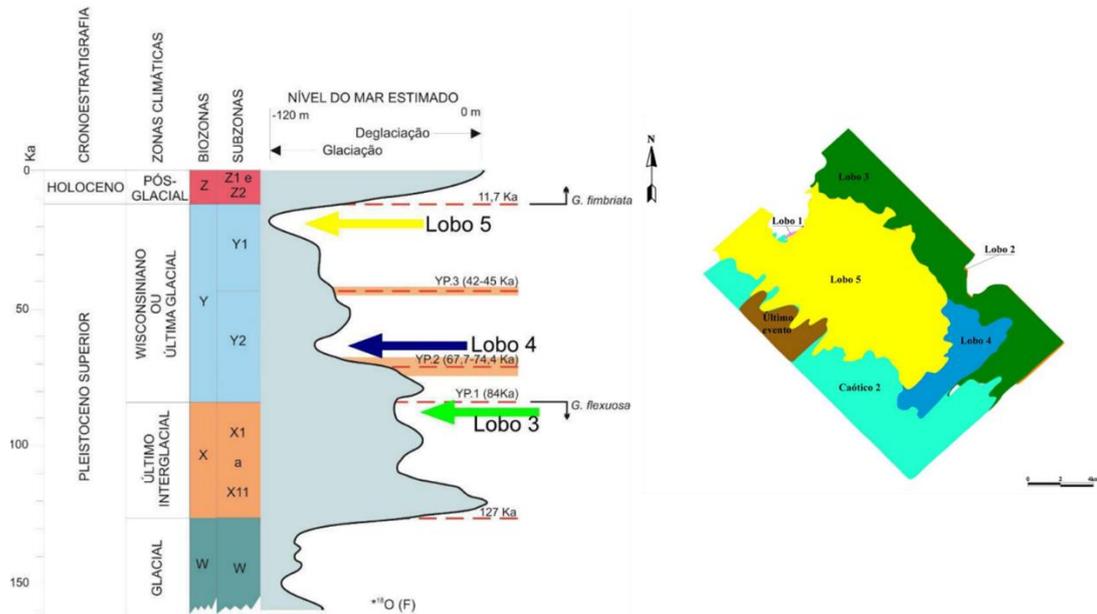
O trabalho de Alves (2013), através da correlação dos perfis e levantamentos bioestratigráficos buscou posicionar a deposição dos lobos 3, 4 e 5 de Abreu (2005) em determinadas idades nas quedas eustáticas (Figura 23).

Figura 22 - Seção geológica strike na parte distal do complexo de lobos Almirante Câmara, com informações de piston-cores



Fonte: Abreu (2005).

Figura 23 – Posicionamento da deposição dos lobos 3, 4 e 5 durante as quedas eustáticas do quaternário



Fonte: Modificado de Alves (2003) e Abreu (2005).

4.3 A Modelagem Numérica Estratigráfico-sedimentológica de processos

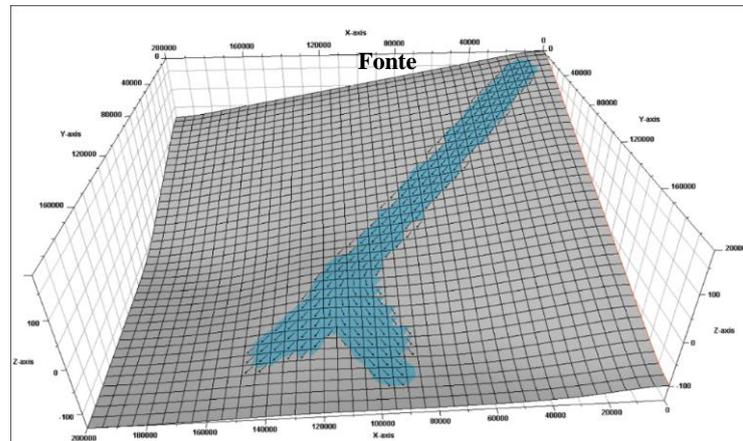
Um dos métodos de estudos geológicos para se entender as interações entre processos de fluxo sedimentar, topografia do fundo do mar e depósitos em uma escala de sistema natural de águas profundas é reproduzindo-se numericamente os processos físicos envolvidos no transporte, erosão, avulsão e deposição dos sedimentos (Empinotti, 2020). Um dos estudos pioneiros sobre o tema (Cross & Harbaugh 1989) oferece a seguinte definição para esse tipo de modelagem: “*the stratigraphic forward model is defined as the simulation of product from the known response of a process to given set of initial conditions and other parameters*”.

De forma geral, a modelagem de processos deposicionais, ou modelagem *forward*, busca reproduzir numericamente três fatores: 1- geração/diminuição de espaço de acomodação (resultante da relação entre eustasia e subsidência); 2 – aporte e proveniência sedimentar; e 3- o mecanismo de transporte dos sedimentos.

No presente trabalho, as simulações foram realizadas com auxílio do programa Petrel versão 2019, utilizando o módulo chamado *Geological Processes Modeling* (GPM). Dentro do módulo GPM é possível escolher o tipo de processo geológico a ser modelado, que no caso presente foi a opção ‘*Unsteady flow*’, capaz de modelar fluxos que variam de velocidade e profundidade rapidamente, como é o caso de fluxos turbidíticos. O modelo de fluxo de fluido que rege o GPM é baseado no princípio da conservação de massa da hidrodinâmica e faz aproximações das equações de Navier-Stokes, que calculam balanços diferenciais de quantidade de movimento em cada ponto do escoamento (Tetzlaff e Harbaugh, 1989). Esta abordagem fornece a representação mais precisa dos processos físicos, alcançando arquiteturas sedimentares mais realísticas. Apesar de fazer uso de simplificações matemáticas para conseguir simular os processos físicos, e ainda não ser capaz de reproduzir as informações sedimentológicas na escala de dados de poços (alta frequência), esse tipo de modelagem é capaz de reproduzir as geometrias e arquiteturas deposicionais e sua distribuição faciológica na escala da sucessão estratigráfica de depósitos turbidíticos.

O algoritmo por de trás do processo ‘*unsteady flow*’ simula numericamente várias partículas ou elementos fluidos disparados a partir de uma fonte definida em mapa. Cada um desses elementos representa um volume finito de fluido que é afetado pela gravidade, pela fricção contra o fundo e contra outros elementos fluidos (que seria o efeito da viscosidade dinâmica) (*Petrel user assistance*; Figura 24). Em um modelo típico, existem centenas ou milhares de elementos fluidos. O método simula o fluxo em duas dimensões, mas mantém o controle da profundidade e de velocidade do fluxo em cada ponto do *grid*, a fim de alcançar um equilíbrio razoável entre a precisão e a flexibilidade necessária para modelar um fluxo sedimentar em configurações geológicas (Tetzlaff et al. 2014).

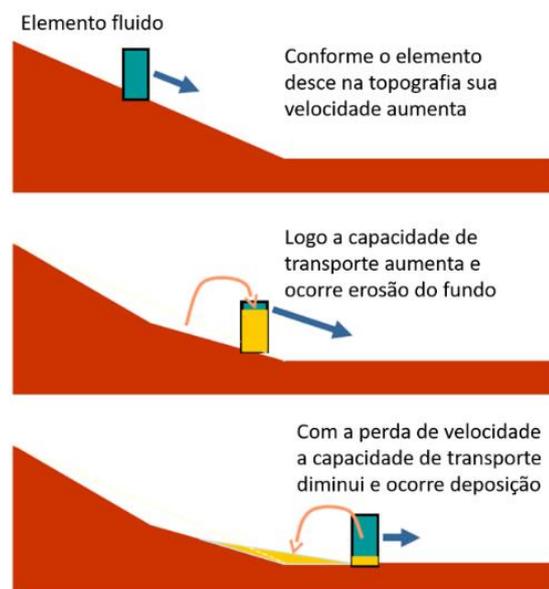
Figura 24 - Esquema de elementos fluidos representando uma corrente de turbidez no GPM.



Fonte: Petrel user assistance

Os algoritmos do módulo GPM simulam a erosão, o transporte e a deposição de sedimentos para cada elemento fluido a partir de uma capacidade de transporte, calculada em cada ponto do fluxo, que dependerá da velocidade e da profundidade do fluxo. O fluxo irá erodir os sedimentos até que sua capacidade de transporte seja preenchida, e irá transportá-los até que a capacidade de transporte diminua a ponto de não poder mais transportar sua carga (Figura 25).

Figura 25 -- Ilustração simples de como ocorre erosão ou deposição de sedimentos conforme a capacidade de transporte do elemento fluido no GPM



Fonte: Modificado de Tetzlaff e Harbaugh (1989).

4.4 Parâmetros das Simulações Numéricas

A operacionalidade desse programa de simulação numérica estratigráfico-sedimentológica exigiu uma longa curva de aprendizagem, devido a sua complexa parametrização de variáveis, necessária para gerar as simulações de fluxos turbidíticos. O programa exige a definição de 17 parâmetros distintos, e de valores específicos, entre os quais parâmetros diretamente ligados aos processos geológicos, como por exemplo: aporte sedimentar, concentração de sedimentos, frequência de fluxos, etc. Há também a necessidade de definição de outros parâmetros internos do algoritmo do programa que impactam a eficiência das simulações. Logo, a primeira etapa, e que tomou mais tempo de máquina no presente estudo, tratou da realização de dezenas de baterias de simulações de calibragem desses parâmetros. Como produto de longa etapa inicial da pesquisa, a tabela abaixo resume os parâmetros de processos geológicos utilizados para a realização das simulações numéricas do presente estudo, bem como os valores utilizados para tais simulações. Os valores utilizados para os parâmetros internos do algoritmo do programa podem ser vistos no ANEXO 1 – Configuração dos parâmetros internos do GPM

Tabela 3 - Parâmetros geológicos exigidos pelo software para realização das simulações numéricas

Parâmetros de processos geológicos	Valor utilizado
Topografia das simulações de fluxo	Paleosuperfície mapeada do dado sísmico
Posição Área-fonte sedimentar	Ao longo da feição de cânion na paleosuperfície
Sedimentos e Proporção do substrato	60% Argila 20% Silte 10% Areia Fina 10% Areia média
Taxa de erosão	Cenários com 0 e 1
Tempo total da simulação	440-20ka
Frequência dos fluxos	Cenários de 100, 500 e 1000 anos
Volume de água dos fluxos	Cenários considerando valores fixos e valores variáveis
Sedimentos e Proporção contidos nos fluxos	40% Areia média/40% Areia fina/10% silte/10% argila

Fonte: O autor, 2022.

Para os parâmetros ligados aos processos geológicos, buscou-se referência nos dados disponíveis da área de estudo e na bibliografia específica de depósitos turbidíticos, tendo sido, contudo ainda necessária para definição de algumas variáveis uma abordagem empírica. Cerca de 180 simulações diferentes foram realizadas, entre testes de calibragem e análises de incertezas. Os diferentes cenários de simulação aqui apresentados estão resumidos na Tabela 4 (item 5) e são explicitados nos itens abaixo.

4.4.1 Superfície inicial das simulações

Um dos parâmetros de entrada primordial para as simulações é a superfície inicial ao longo da qual os fluxos turbidíticos serão transportados. Idealmente, a superfície a ser utilizada nas simulações seria uma paleosuperfície que representasse a morfologia marinha anterior à chegada dos fluxos turbidíticos em questão. No presente trabalho, essa superfície foi mapeada diretamente na base de dados sísmicos. No item 5.1 são apresentados os detalhes de como se chegou à essa paleosuperfície, que foi utilizada como dado de entrada em todos os cenários simulados. Essa paleosuperfície utilizada nas simulações tem resolução de tamanho de célula de 400x40m, dimensão que foi necessária para otimizar o tempo das simulações. Paleosuperfícies com tamanhos de células menores foram testadas, mas acabaram por tornar as simulações impraticáveis em termos de tempo de simulação e de estabilidade dos fluxos no *software*.

Como se trata de uma região de estudos afetada por tectônica de sal, a reconstrução da paleosuperfície deveria exigir uma análise estrutural que considerasse as movimentações dos domos de sal dessa região. A quantificação da movimentação do sal durante o período de deposição do sistema turbidítico (Pleistoceno Superior) seria de difícil quantificação. Contudo, como base em análise de arquitetura deposicional efetuada diretamente nos dados sísmicos disponíveis, consideramos a movimentação do sal relativamente pequena, de tal forma que nesse trabalho optou-se pela não realização de qualquer tentativa de reconstrução estrutural. Além disso, em baterias de simulações iniciais verificou-se que por uma limitação atual do

software utilizado seria necessário que a superfície inicial contivesse claros desníveis topográficos que representem o espaço de acomodação a ser preenchido, caso contrário os fluxos simulados não são capazes de reproduzir erosões significativas e transportar os sedimentos para a região dos lobos terminais. Para contornar essa limitação, os limites geográficos da paleosuperfície deposicional da área de estudos (Figura 36) foram suavemente demarcados na etapa de interpretação da sísmica 3D (Figura 30), de tal forma a “confinar” os fluxos simulados.

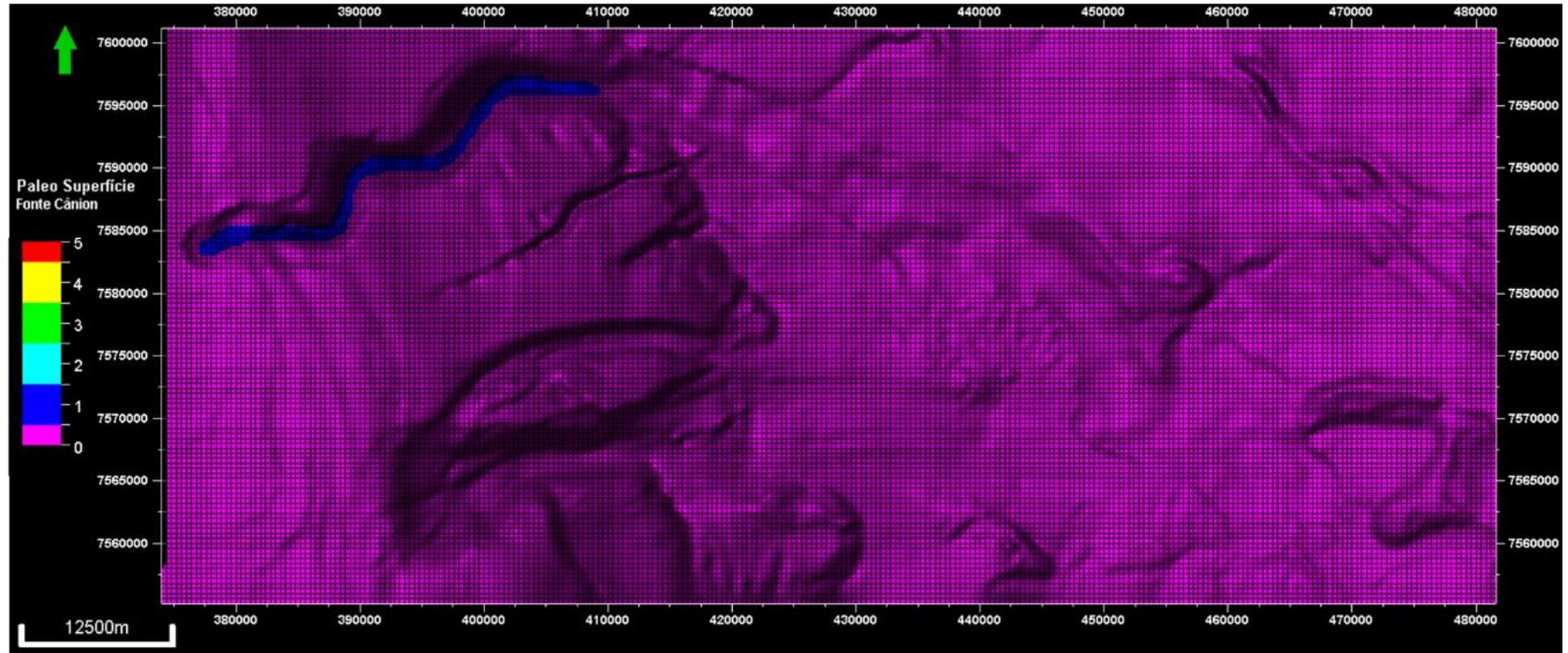
4.4.2 Configuração da fonte sedimentar

A partir da paleosuperfície definida é necessário criar, na mesma, uma propriedade que represente a posição e dimensão da área-fonte dos fluxos a serem simulados. Essa propriedade é feita através do traçado de um polígono, sobre o mapa de paleosuperfície, delineando-se uma região e atribuindo-se a ela um valor de referência. Essa delimitação é importante pois toda célula do mapa de paleosuperfície que estiver com valor correspondente de fonte, será ponto de partida de volumes de fluxos a serem simulados.

Conceitualmente a área-fonte dos fluxos turbidíticos que alimentam o sistema analisado estaria na cabeceira do cânion Almirante Câmara. Assim, durante os períodos de quedas eustáticas os sistemas fluviais adentram a plataforma e comunicam-se com os cânions endentados na região de quebra da mesma, transportando dessa forma fluxos turbidíticos para as águas profundas. Por consequência, delimitar em mapa a dimensão da área-fonte que fosse suficientemente eficaz para carregar os fluxos simulados foi uma das incertezas analisadas nas etapas de simulação. Os mapas com as diferentes posições de área-fontes testados e suas simulações de deposição finais estão no ANEXO 3 – Diferentes posições de área fonte testadas. Verificou-se que o cenário mais eficiente para as simulações foi o que posiciona a fonte entre a cabeceira e a desembocadura da feição morfológica de cânion, como mostra a figura 9. O total de células definidas no referido mapa como “célula de área-fonte” totaliza 281. Essa configuração de área-fonte, de forma linear e contínua dentro da feição de cânion, foi eficiente em gerar volume

de aporte sedimentar capazes de alcançar e preencher a região de lobos distais do sistema turbidítico Alm Câmara.

Figura 26 - Posição e dimensão da área-fonte na paleosuperfície usada nos cenários de simulações numéricas.



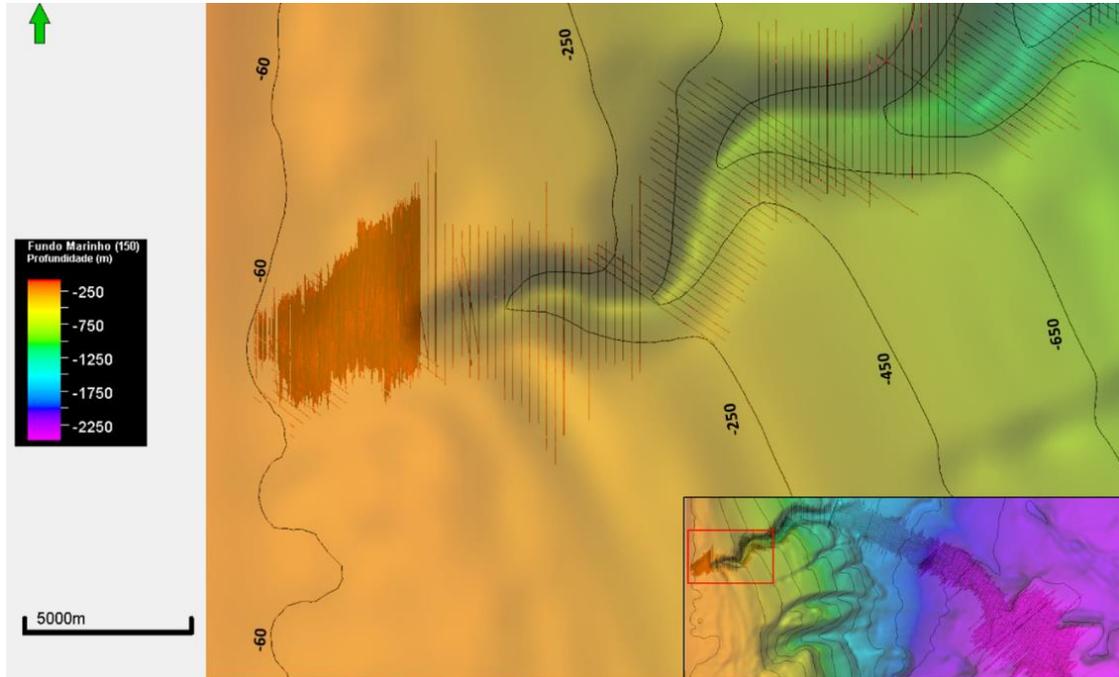
Fonte: O autor, 2022.

4.4.3 Intervalos de tempo total das simulações e de acionamento da fonte

O *software* nos permite definir o intervalo temporal, em escala de tempo geológico, de início e fim em que as simulações irão ocorrer, sendo possível controlar especificamente os intervalos temporais dentro dos quais os fluxos turbidíticos vão se iniciar a partir da área-fonte. Os dados bioestratigráficos disponíveis (item 4.2) mostram que há registro da última glaciação em 18ka e também da biozona W com limite superior em 127ka. Esse limite de 127ka foi alcançado em um testemunho com 4,97m. Visto que os depósitos de lobos têm uma variação de espessura de cerca de 20-50m, conclui-se que parte substancial do registro estratigráfico das variações eustáticas não foi amostrada.

Buscou se delimitar os intervalos de tempo no qual o nível relativo do mar, ou seja, o nível Zero, estivesse o mais próximo possível da paleocabeceira da paleosuperfície mapeada. Desta forma, foi possível estimar (com base em dados de curvas eustáticas globais compiladas por Rabineau et al, 2006), os intervalos temporais nos quais os sistemas fluviais estariam francamente comunicados com o cânion Almirante Câmara. Para que fosse estimado em qual cota batimétrica estaria a paleocabeceira, em relação ao nível do mar atual, projetou se as linhas de interpretação da paleosuperfície sob o mapa do fundo marinho atual (Figura 27). É possível observar que a paleocabeceira da paleosuperfície estaria na cota batimétrica de cerca de 60m do fundo mar atual.

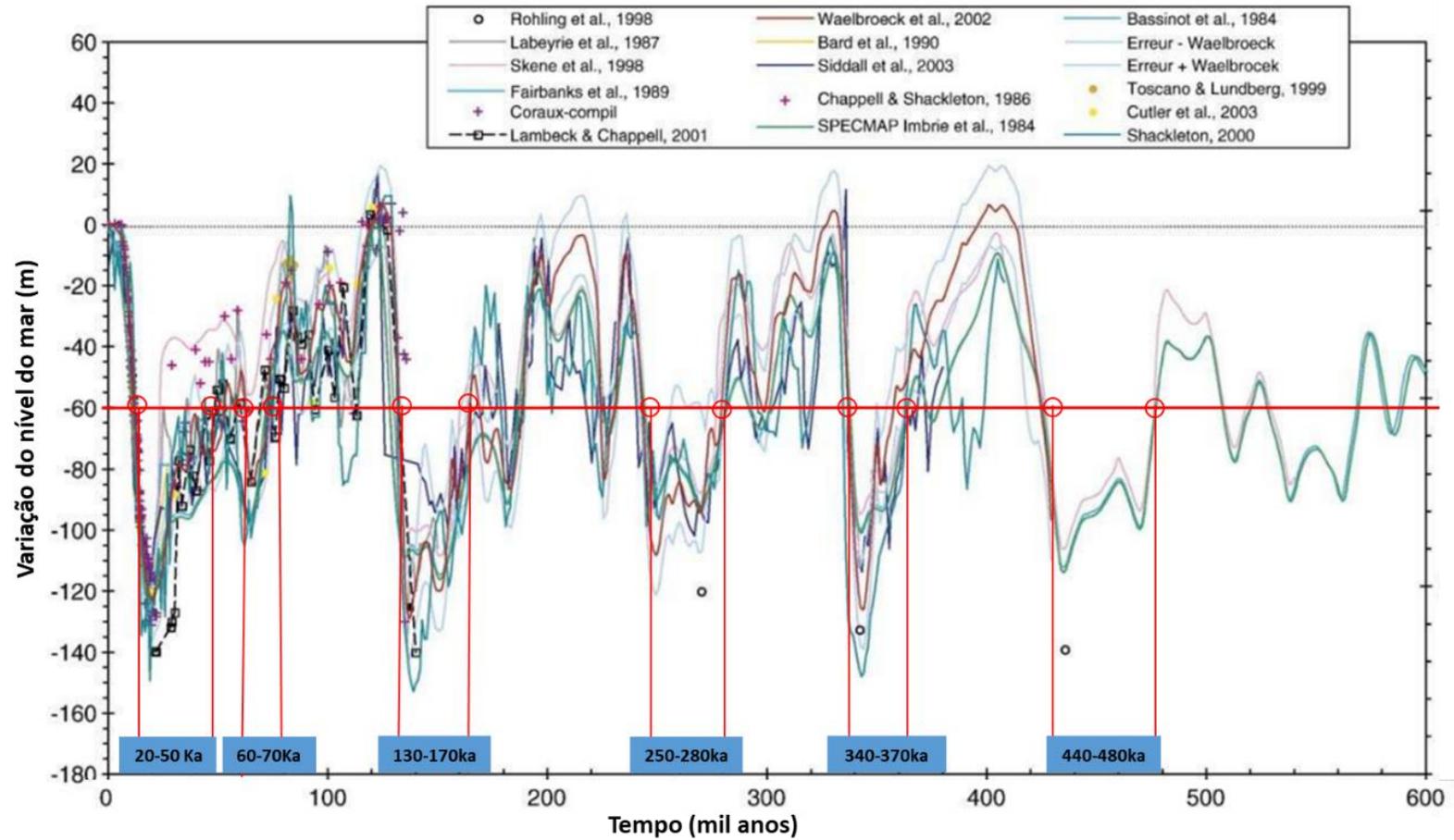
Figura 27 - Linhas do mapeamento da paleosuperfície em vermelho sob mapa do fundo mar atual, evidenciando a cota batimétrica na qual se encontraria a paleocabeceira do sistema estudado



Fonte: O autor, 2022.

Deste modo, os intervalos temporais de atuação da fonte foram delimitados com base nas curvas eustáticas globais dos últimos 600 ka, compiladas por Rabinau *et al* (2006) (Figura 28). Para tanto, buscou se delimitar o tempo correspondente às quedas eustáticas a partir de uma variação de nível do mar que de -60m (linha vermelha na Figura 28). Dessa forma, seis intervalos temporais foram definidos para os períodos de atuação da área fonte: 480-440 Ka, 370-340ka, 280-250 ka, 170-130 ka, 70-60ka e 50-20 ka, totalizando 180 mil anos de período em que área-fonte teria capacidade de aportar sedimentos e de alimentar o desenvolvimento do sistema turbidítico durante as simulações.

Figura 28 - Delimitação dos períodos em que a fonte dos fluxos turbidíticos está ativa



Legenda: Gráfico de variação do nível do mar ao longo dos últimos 600 mil anos, com delimitação dos períodos em que a fonte dos fluxos turbidíticos está ativa, aportando sedimentos.

Fonte: Modificado de Rabineau et al (2006).

4.4.4 Aporte sedimentar: volume de água, concentração de corrente de turbidez, proporção de sedimentos e frequência de fluxos turbidíticos

Para as simulações, o aporte sedimentar é a resultante da combinação dos parâmetros dos fluxos como: o volume de água, concentração de sedimentos incorporados à água, proporção entre frações de partículas sedimentares e a frequência com que ocorrem. A parametrização de tais características dos fluxos simulados considerou estimativas baseadas nos dados geológicos disponíveis (testemunhos) e na literatura de referência.

A primeira variável desse conjunto de parâmetros que precisa ser definido é o volume de água mínimo. O volume de água que partirá da área-fonte tem que ser capaz de fazer com que os fluxos alcancem a área desejada, no caso a região de lobos terminais. A figura abaixo mostra dois exemplos de cenário de volumes de aporte de água (1000m³ e 10.000m³), em um único fluxo, a partir da área fonte e seus respectivos alcances. As pequenas setas em azul claro representam o caminho percorrido e o alcance atingido pelos fluxos que se iniciaram na área-fonte. O volume de água disparado em cada fluxo foi a principal incerteza abordada nos cenários simulados no presente trabalho, sendo que foram testados cenários com valores de aporte em regime fixo, ou seja, sempre o mesmo valor de volume de água disponível durante os períodos de área-fonte ativa, e cenários com valores de aporte em regime variável, onde o volume de aporte varia durante os períodos de área-fonte ativa. Os valores dos cenários de volumes aqui mostrados estão compilados na Tabela 4 e são explicitados ao longo dos Resultados (item 5). O ANEXO 6 contém as tabelas que configuram a variação de volume de água aportada longo do período total de simulação.

Figura 29 - Diferenças no alcance dos fluxos a partir de aportes de águas distintos oriundos da área-fonte



Legenda: Dois exemplos de diferenças no alcance dos fluxos a partir de aportes de águas distintos oriundos da área-fonte. Figura acima representa o alcance do fluxo de 1000m³ e a de baixo representa alcance do fluxo de 10.000m³.

Fonte: O autor, 2022.

Com o volume de água mínimo definido, é necessário adicionar informações sobre concentração, quantidade e granulometria de sedimentos que serão simulados. A definição da granulometria se baseou nas amostras de rocha disponíveis em testemunhos da região (item 4.2). Para efeitos das simulações foram consideradas as quatro granulometrias principais dos sedimentos contidos nos testemunhos: areia média, areia fina, silte e argila. As propriedades de cada sedimento utilizadas pelo *software* estão tabeladas no ANEXO 2.

Com a definição dos tipos de sedimentos feita é necessário definir a concentração de sedimentos presentes nos fluxos. Como o *software* não recomenda nenhum valor de referência para tal parâmetro, e essa informação não é possível de ser aferida pelos dados da área, buscou se referências no estudo de *Talling et al* (2012). O estudo faz uma abordagem qualitativa e citações de estudos quantitativos das concentrações dos fluxos gravitacionais. Segundo os autores, fluxos com concentrações de sedimentos maiores que 9% começam a apresentar características de mecanismo de transporte mais relacionados a fluxos de detritos e não a mecanismos de transporte por turbidez. Assim, esse foi o valor de concentração adotado para os cenários de simulações realizados.

Após definir valores de concentração de sedimentos dos fluxos simulados é ainda necessário definir uma razão de proporção entre cada granulometria. Para esse parâmetro foi utilizada uma abordagem empírica, onde adotou-se um cenário em que a proporção areia/lama fosse constante na proporção de 80:20, desses 40% areia média, 40% areia fina, 10% silte 10% argila. O ANEXO 7 contém as tabelas que configuram essa proporção de sedimentos ao longo do período total de simulação.

O último parâmetro a ser definido nas simulações é a frequência com que os fluxos acontecem a partir da área-fonte. O estudo de *Jobe et al* (2018) serviu como base para a definição dos valores utilizados. Os autores estimaram recorrência dos fluxos turbidíticos de quatro leques-submarinos quaternários, a partir da análise de dados de volume de sedimentos, número de camadas de turbidíticos e idade dos depósitos registrados nos testemunhos. Segundo os autores, foi estimado que os depósitos de leques-submarinos são construídos por fluxos turbidítico com recorrência entre 50 e 650 anos. Partindo-se dessa estimativa foram utilizados os valores de 100, 500 e 1000 anos nas simulações.

4.4.5 Parâmetro ‘Erodibilidade’

O *software* possuiu uma variável denominada de ‘erodibilidade’, que diz respeito ao quanto os fluxos serão capazes de retrabalhar e erodir os sedimentos do substrato, ou seja, da paleosuperfície de deposição. Essa taxa de erosão é definida no *software* por valores entre 0 e 1, onde mesmo com valor mínimo há alguma taxa de erosão. De todos os casos simulados no

presente trabalho, apenas um teve o parâmetro com valor igual a 1, sendo todos os demais com valor igual a 0. Esse caso serviu para demonstrar a sensibilidade das simulações com a variação máxima do parâmetro.

5 RESULTADOS

Os resultados abaixo são apresentados relacionados às duas etapas principais de trabalho: **(6.1)**. Interpretação Sísmica e **(6.2)** Simulações Estratigráfico-sedimentológicas, que são por sua vez apresentadas em sub-itens.

5.1 Interpretação Sísmica

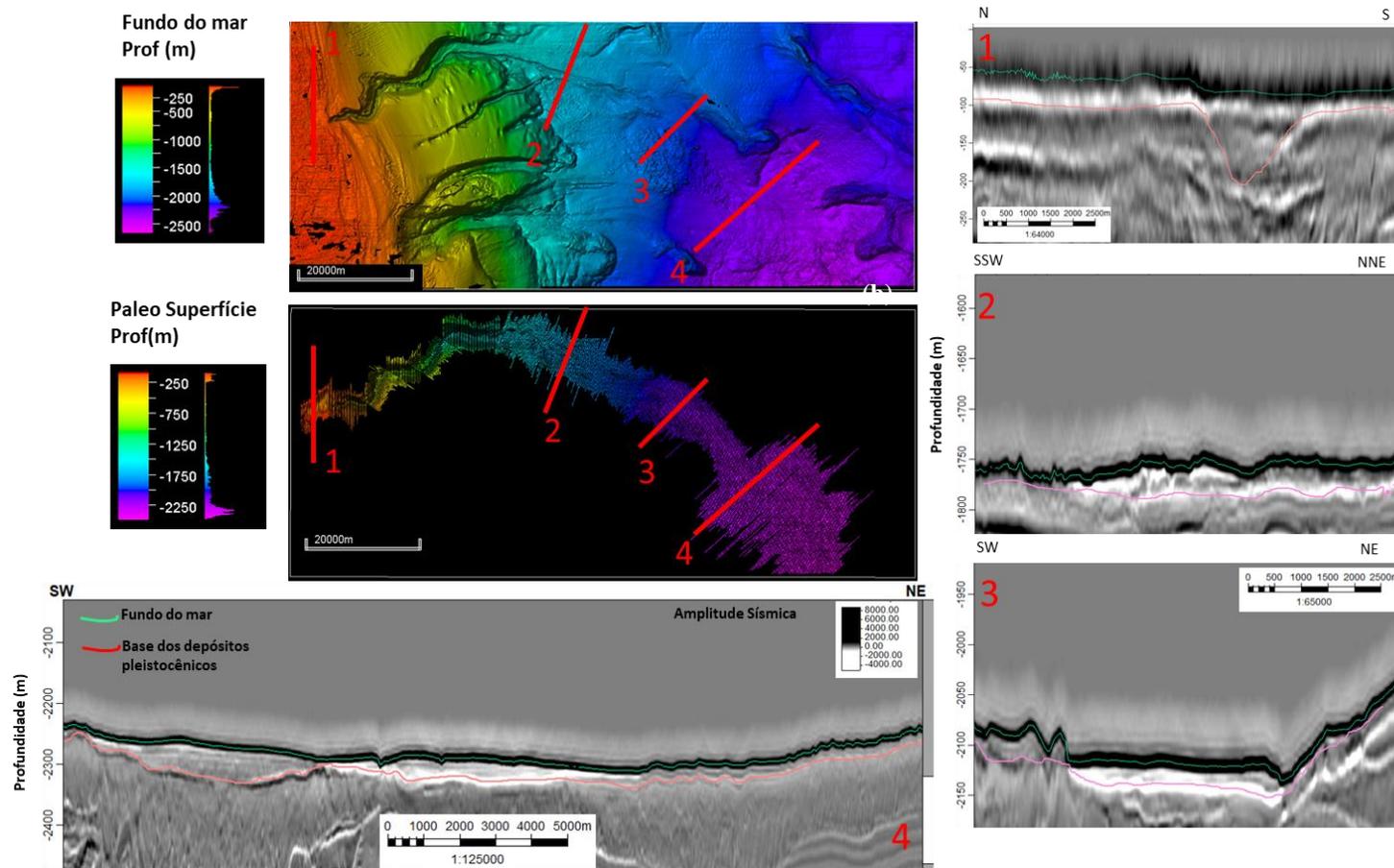
5.1.1 Mapeamento sísmico e definição da paleosuperfície das simulações

A interpretação dos horizontes sísmicos teve o objetivo de mapear os intervalos de topo e base, que envelopam a ocorrência dos depósitos turbidíticos foco do estudo, para a confecção de mapas paleomorfológicos serem utilizadas nas simulações da modelagem *forward*. A Figura 30 ilustra o mapeamento de cada horizonte em planta e em algumas seções da sísmica 3D.

Primeiramente foi mapeado o topo dos depósitos, representado pelo horizonte sísmico do fundo do mar, refletor sísmico de amplitude sísmica positiva (pico preto) que limita a transição da lâmina d'água para os sedimentos. A detecção e traçado do refletor fundo submarino permitiu a geração de um mapa morfológico (Figura 31) com resolução horizontal de 50 m, o que permite a visualização dos principais aspectos fisiográficos atuais do fundo marinho, como as protuberâncias morfológicas do fundo submarino devido à movimentação salífera (muralha e domos); os depósitos de movimento de transporte de massa (Mtds); detalhes da morfologia do cânion Almirante Câmara e do seguimento do

canal proximal, sendo possível inclusive visualizar a incisão axial atual desde o início do cânion até o meio do canal proximal, por volta de 2000m de profundidade.

Figura 30 – Mapas do mapeamento dos horizontes do fundo do mar e da base dos depósitos pleistocênicos



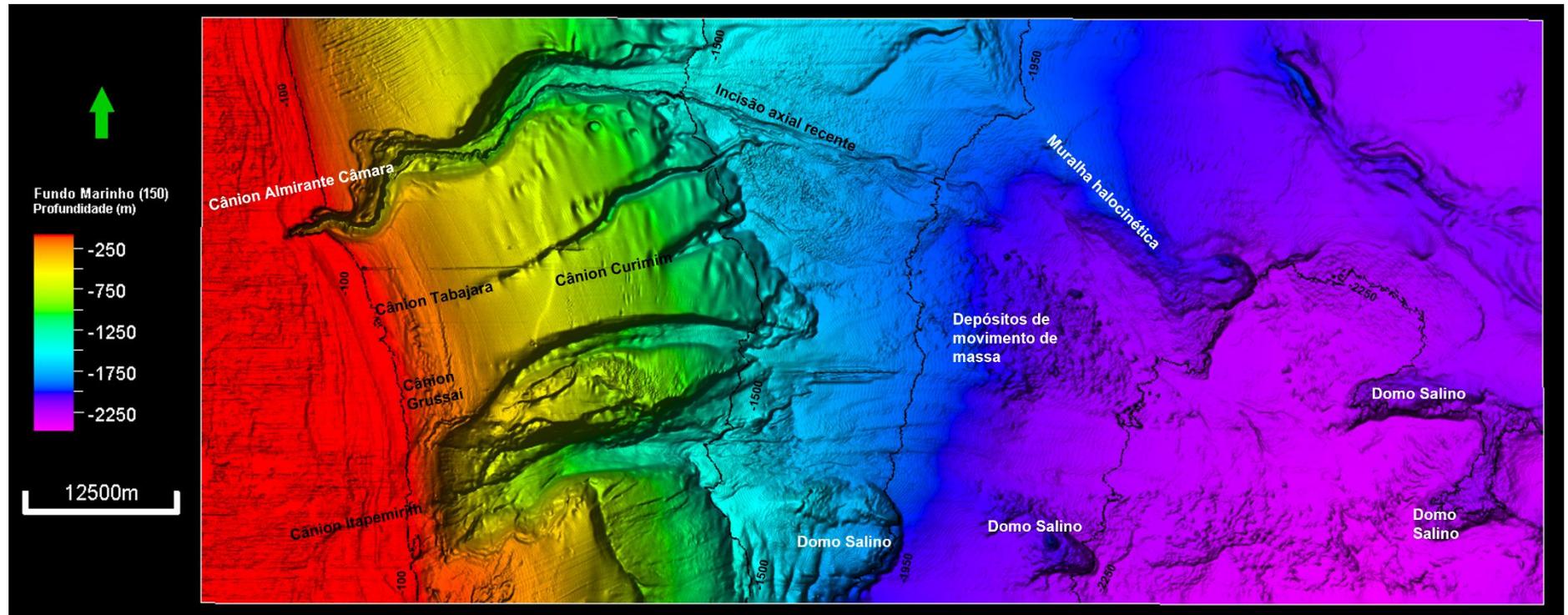
Legenda: A) mapeamento do horizonte do fundo do mar. B) linhas mapeadas da Paleosuperfície de deposição do sistema turbidítico. Os extratos de seções de sísmica 3D mostram características dos sinais sísmicos dos horizontes mapeados que envelopam os depósitos. Na base à direita, seção sísmica ilustrando o fundo do mar (verde claro) e a base dos depósitos turbidíticos pleistocênicos (vermelho).

Fonte: O autor, 2022.

De posse da superfície do fundo do mar foi possível, através de atributos sísmicos, gerar mapas que representem os limites de diferentes depósitos arenosos quanto à sedimentologia dominante, presentes no sistema turbidítico mais superficial. Camadas de areia apresentam menores valores de amplitudes no volume sísmico, sendo possível identificá-los pelo pico branco abaixo do pico preto interpretado como fundo do mar. Um atributo sísmico que revela e destaca as dimensões dos corpos arenosos é o de mínima amplitude, que mede a refletividade sísmica destacando os menores valores de amplitude dentro de um intervalo definido. A Figura 32 é o mapa de atributo de mínima amplitude extraído, que leva em consideração uma profundidade de 100m a partir da superfície do fundo do mar. Essa janela de profundidade foi baseada nas espessuras médias de preenchimento do sistema dos trabalhos de Machado *et al.* (2004) e Abreu (2005). Com ela é possível visualizar a continuidade, os limites, a dimensão dos depósitos em diferentes porções ao longo do sistema, além de poder observar outras anomalias de areias oriundas de outros cânions e aprisionadas na borda da plataforma. De forma geral, se observa nesse mapa de atributos que há três regiões com diferentes características de geometrias deposicionais e diferentes intensidades de anomalias (Figura 32): A região 1 apresenta anomalias menos intensas e mais estreitas (3,5km), que se estende por cerca de 20km da desembocadura da feição de cânion; já na região 2 observam-se anomalias mais intensas por cerca de 26km em uma área menos confinada inicialmente (6km) sendo mais confinada ao final (3km); e por último a região 3 que apresenta anomalias moderadas de forma mais desconfinada, cobrindo uma área de largura de 8km e extensão 16km. O mapa de atributo serviu como guia na delimitação do mapeamento da paleosuperfície, base dos depósitos estudados.

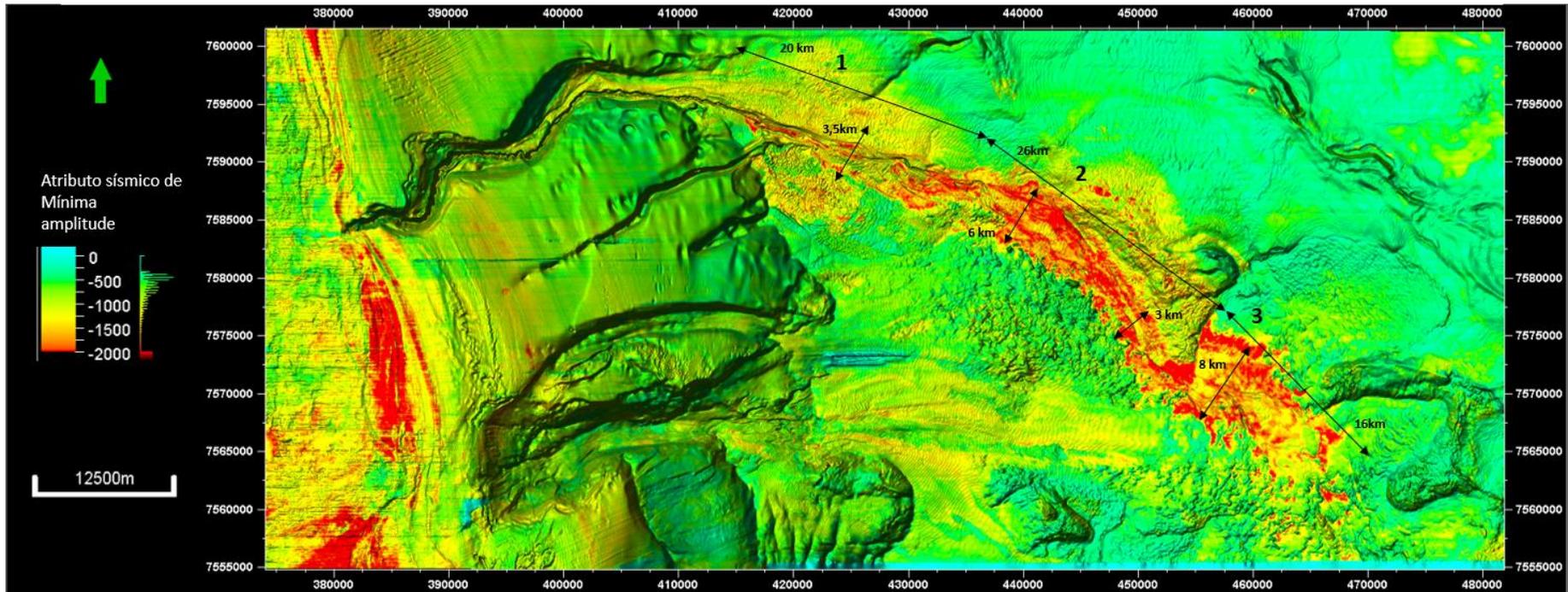
Ao observamos seções da sísmica 3D (Figura 33) em cada uma das três regiões é possível observar as diferentes características das anomalias de amplitude (linhas laranjas tracejadas): (i) na região 1 (seção B-B', Figura 33) temos anomalias relativamente isoladas, que variam de 300-500m de largura; (ii) na região 2 (seção C-C', Figura 33) observam-se anomalias de amplitude mais amalgamadas numa área com larguras de 500m a 1km; (iii) na região 3 (seção D-D', Figura 33) vemos anomalias mais alongadas de 1km até 5km de largura. Ao observarmos a distribuição das anomalias em uma seção longitudinal (seção A-A', Figura 33) percebe-se um padrão de empilhamento das anomalias em *backstepping*.

Figura 31- Mapa batimétrico da área de estudo



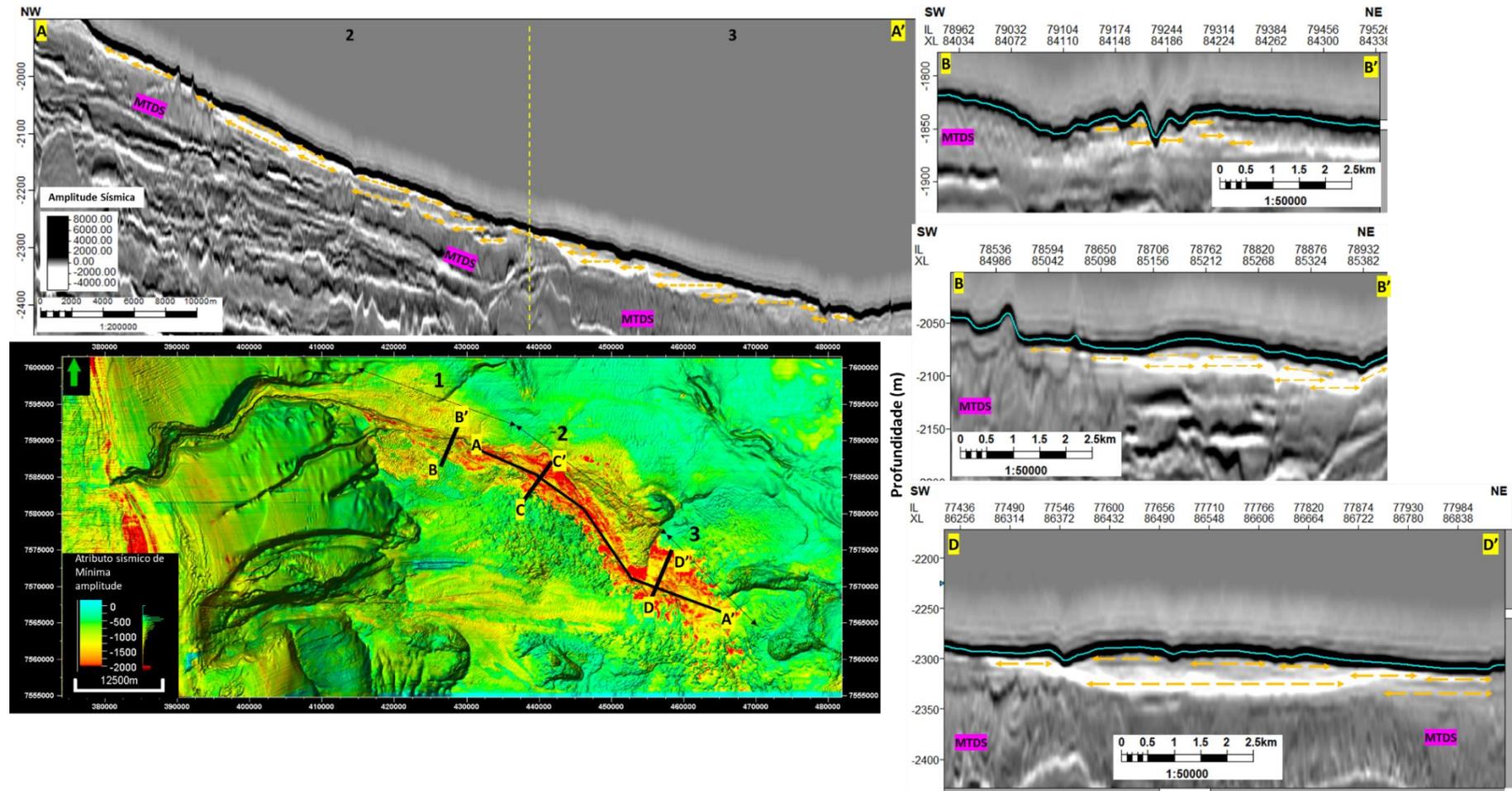
Legenda: Mapa batimétrico da área de estudos, confeccionado a partir do volume sísmico 3D (tamanho de célula de 50mx50m), com identificação das principais feições geomorfológicas da área.

Figura 32 - Mapa de atributo sísmico de mínima amplitude evidenciando os depósitos de areias turbidíticas do Sistema Almirante Câmara



Legenda: Mapa de atributo sísmico de mínima amplitude das reflexões correspondentes a uma janela de até 100m de profundidade da abaixo da superfície do fundo do mar.

Figura 33 - Seções da sísmica 3D evidenciando as variações das anomalias de depósitos arenosos do Sistema Turbidítico Alm Câmara.

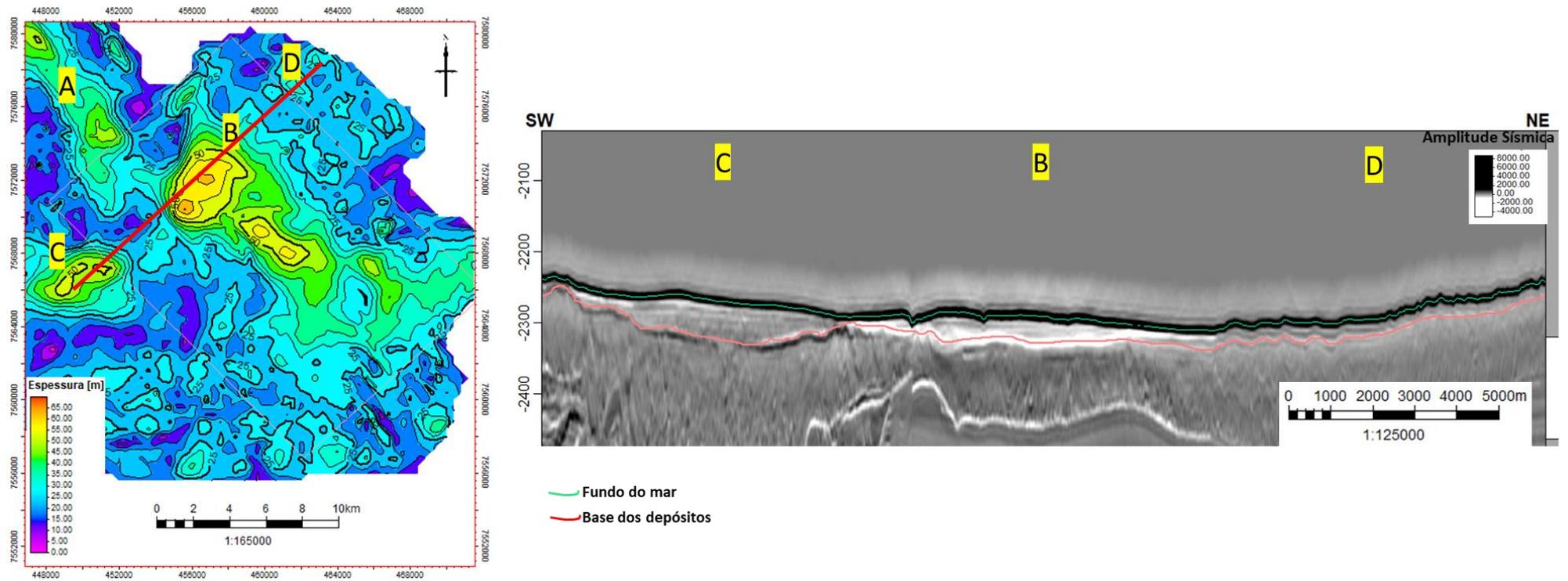


A base dos depósitos estudados é o intervalo sísmico entre o horizonte que marca fundo do mar e o horizonte que define o topo das sismofácies indicativas dos depósitos de movimento de massa, representado por um sinal de amplitude negativa (pico branco na sísmica, Seção sísmica 4; Figura 30). As anomalias de amplitudes negativas são evidências de rastros e acumulação dos depósitos arenosos do sistema, logo, estão concentradas nos domínios de complexo de canais e de lobos terminais. Em regiões como a do cânion e sua cabeceira há pouco acúmulo de areias por se tratar de uma porção de distribuição de energia dentro do sistema de transportes de depósitos gravitacionais. Apesar disso, buscou-se mapear a feição do paleocânion e da paleocabeceira (Seção sísmica 1 na Figura 30), contemporâneas à paleosuperfície de deposição.

Para o mapeamento da base do sistema turbidítico na região de lobos terminais, inicialmente buscou-se representar toda a sucessão sedimentar que estava sotoposta aos depósitos de movimento de massa, para assim ter-se uma visão ampla dos depósitos. Pois, como visto nos mapas de espessuras de Abreu (2005), há unidades deposicionais com diferentes direções preferenciais de deposição. A Figura 34 representa o mapa de espessura entre topo e base dos depósitos turbidíticos mapeados, e uma seção sísmica que destaca os diferentes depocentros, distribuição dos depósitos e padrão sísmico na região de lobos terminais.

O mapa de isópacas da Figura 34 coloca em destaque quatro principais zonas deposicionais ou depocentros, designados pelas letras A, B, C e D. O depocentro A corresponde ao fim do domínio de complexos de canais e as demais regiões correspondem ao domínio dos lobos terminais. Os depocentros B, C e D, tanto em mapa de espessura como em seção sísmica, apresentam diferenças significativas: (1) o depocentro B destaca-se sísmicamente por concentrar as maiores anomalias negativas de amplitudes, e em mapa apresenta principal eixo de direção de deposição NW-SE, correspondendo ao essencial da deposição sedimentar carregada pelo Cânion Almirante Câmara; (2) já o depocentro C, de direção NE-SW, está relacionado à deposição carregada pelo Cânion Itapemirim; (3) finalmente, o depocentro D não apresenta eixo preferencial claro de deposição e tampouco relaciona-se à deposição dos sedimentos carregados pelo Cânion Almirante Câmara. Desse modo, o depocentro B correspondente efetivamente aos depósitos turbidíticos com origem no cânion Almirante Câmara que serão considerados nas simulações deste trabalho.

Figura 34 – Mapa de isópaca dos horizontes mapeados e seção sísmica evidenciando as diferentes anomalias e horizontes sísmicos mapeados.



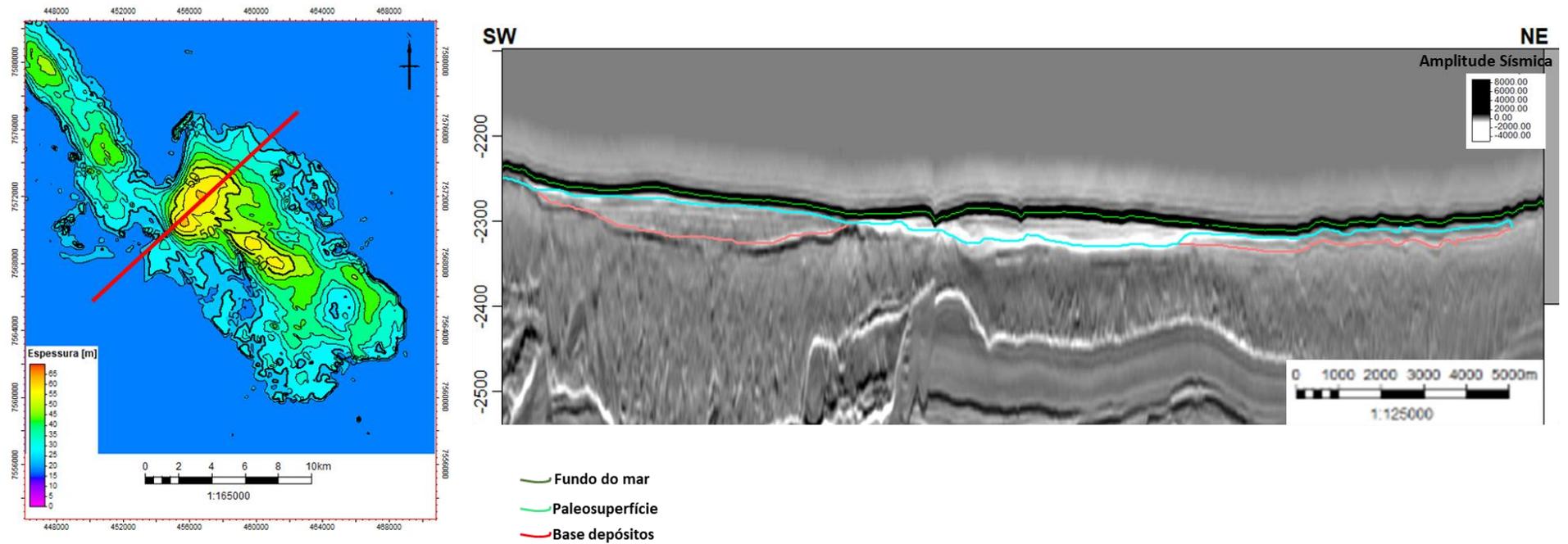
Legenda: À esquerda: mapa de espessura entra a superfície do fundo do mar e base dos depósitos mapeados. À direita: seção sísmica (linha vermelha no mapa) com o mapeamento de do horizonte sísmico do fundo do mar e da base dos depósitos pleistocênicos.

A partir dessa visão geral buscou se mapear, na região dos lobos terminais, um horizonte sísmico que delimitasse apenas a base os depósitos com características da região B. Ou seja, mapear o que seria a paleosuperfície dos depósitos turbidíticos com origem dos fluxos a partir do cânion Almirante Câmara, de direção NW-SE. A

Figura 35 abaixo mostra a seção sísmica ilustrando a diferença no traçado de mapeamento da superfície basal inicial, a paleosuperfície e o mapa de espessura de topo e base dos depósitos considerando a paleosuperfície.

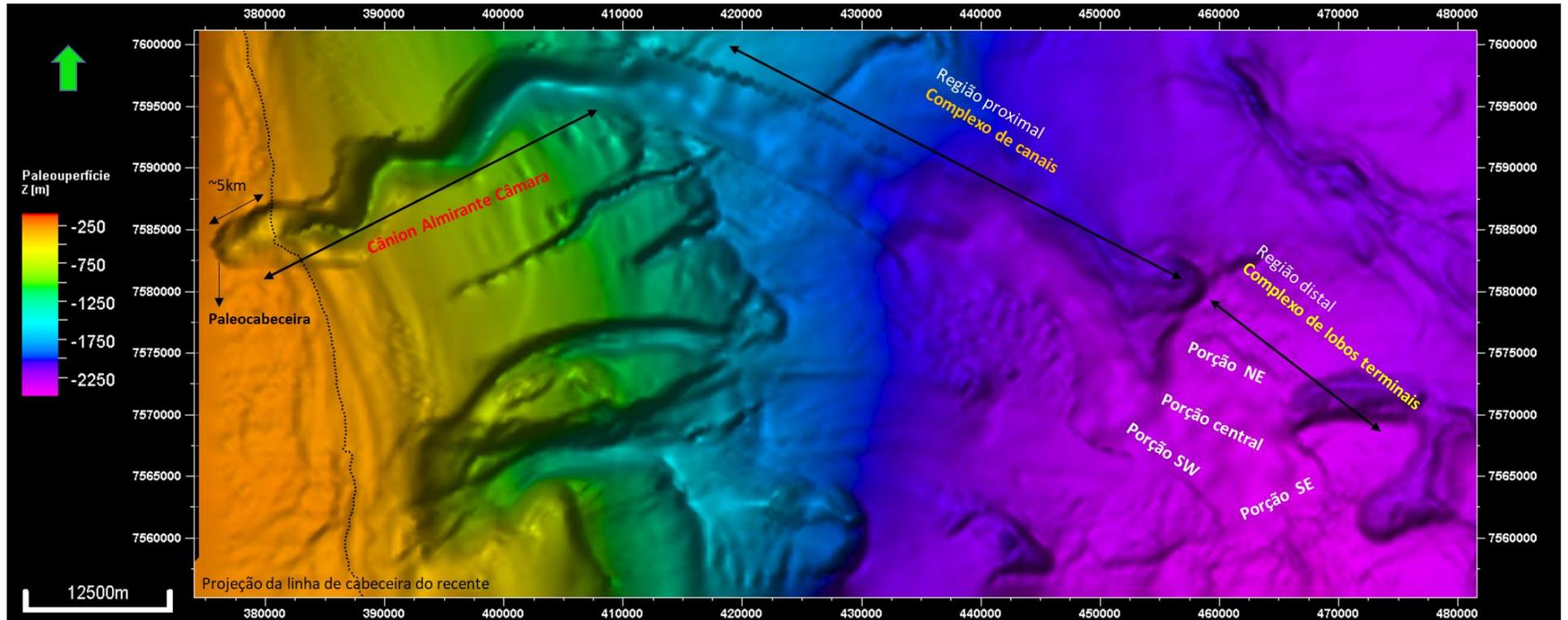
A partir dessa nova interpretação e com algumas edições necessárias para se obter melhores simulações, foi criada a paleosuperfície a ser utilizada nas etapas de modelagem de processos (Figura 36), na qual é possível observar as diferentes feições fisiográficas que irão controlar a distribuição dos fluxos turbidíticos simulados. Note que na região de lobos terminais é feita uma distinção de suas porções, as quais serão referenciadas durante as descrições dos resultados das simulações a partir do **item 5.2**.

Figura 35 – Mapa de isópaca do fundo do mar com a paleosuperfície e seção sísmica



Legenda: À esquerda mapa de atributo de mínima amplitude destacando a ocorrência dos depósitos arenosos (cores mais quentes). À esquerda seção sísmica (linha vermelha no mapa) com interpretação dos horizontes mapeados.

Figura 36 -Mapa da paleosuperfície de deposição dos turbidíticos estudados. A linha tracejada é a projeção da cota da cabeceira do recente.

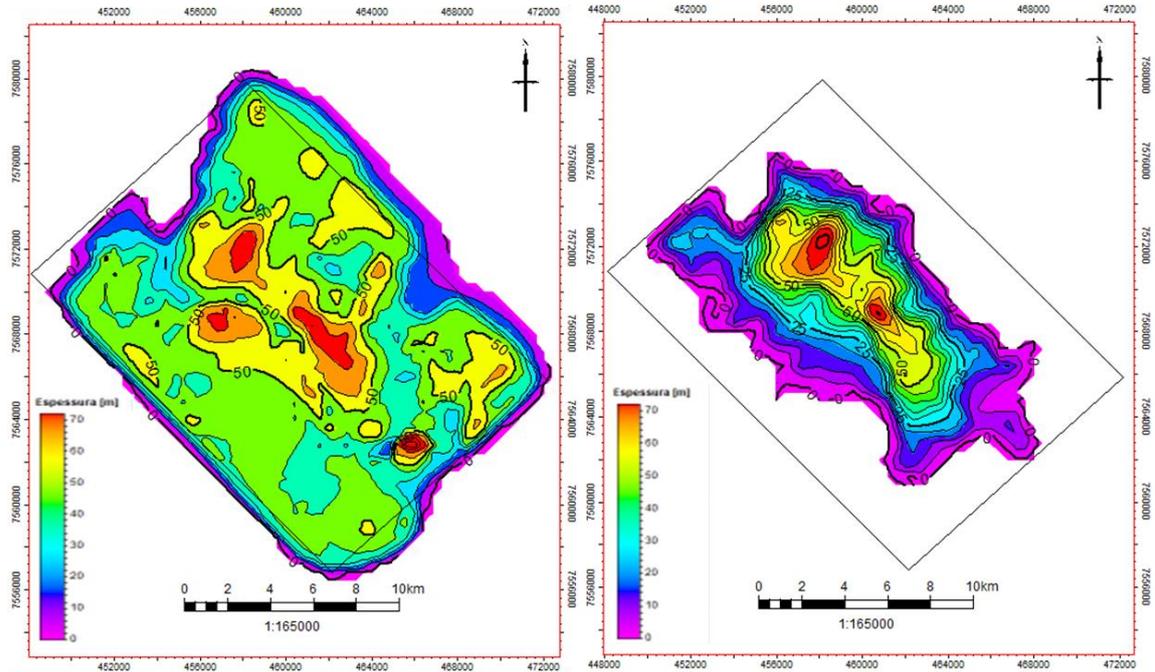


5.1.2 Confecção de mapas de isópacas dos lobos turbidíticos conhecidos

No trabalho de Abreu et al (2005) foram estimados mapas de espessuras para cada lobo individualizado (Figura 18), porém não foi confeccionado um mapa que considerasse a espessura total dos depósitos estudados. Para o presente trabalho, todos os mapas de espessuras dos lobos de Abreu et al (2005) foram georreferenciados no *software Petrel*, e transformados em superfícies com propriedades de isópacas (ANEXO 5 – Mapas de isópocas de Abreu 2005, georreferenciados no Petrel), a fim de se obter a espessura total dos turbiditos. Dessa forma, foram criados mapas de espessuras que serviram de base comparativa para o mapeamento sísmico realizado e para os resultados das simulações numéricas, que será apresentado no item 6.1.

A Figura 37 abaixo ilustra os mapas de espessura total de todos os lobos delimitados por Abreu (2005) e o mapa de espessura que corresponderia a soma apenas dos lobos (1,4 e 5), que estariam associados a fluxos turbidíticos advindos do cânion Almirante Câmara.

Figura 37 - À esquerda mapa de espessura total entre todos os elementos mapeados por Abreu (2005) e à direita o mapa de espessura total entre os lobos 1,4 e 5. O retângulo em preto corresponde ao limite da área de estudo de Abreu (2005).



Fonte: O autor, 2022.

O mapa de espessura total compila todos as diferentes unidades mapeadas por Abreu, (2005) (vistos na Figura 18), apresentando um depocentro principal de direção NW-SE, que seriam os lobos 1,4 e 5, com cerca de 70 m de espessura e para nas bordas da área, observa-se os depocentros de direção NE-SW, com espessuras de cerca de 50m, associados ao as unidades lobos 2, 3 e caótico 2.

5.2 Simulações Estratigráfico-sedimentológicas

Após realização de várias baterias de testes de sensibilidade dos parâmetros de entrada da modelagem numérica do *software Petrel*, foi definida a necessidade de se manter fixos alguns

dos parâmetros, enquanto as simulações se concentraram na variação de outros parâmetros específicos.

Os **parâmetros fixos** em todos os cenários de simulações são aqueles baseados em dados de entrada retirados diretamente dos dados geológicos disponíveis, em dados de oscilações eustáticas globais fornecidos pela literatura; em informações conceituais de processos de turbiditos canalizados, e em alguns parâmetros internos ao algoritmo. São esses: os intervalos de tempo de acionamento da área-fonte (**Item 4.4.3**), os tipos e proporção de sedimentos presentes nos fluxos e do substrato (**Item 4.4.4**).

Já como **parâmetros variáveis** que foram simulados são: o volume e regime de aporte de água; a frequência de disparo dos fluxos dentro de cada período de área-fonte ativa (que corresponde a diferentes etapas nas simulações); a capacidade de erosão dos fluxos; e, o gradiente da paleosuperfície inicial das simulações. O tempo total para a simulação de cada cenários está tabelado no **ANEXO 4**.

A Tabela 4 resume os 23 diferentes cenários simulados e seus conjuntos de variáveis.

Tabela 4- Cenários de modelagem simulados

Cenário	Aporte d'água(m ³)	Frequência dos fluxos(anos)	Erodibilidade	Gradiente do talude
1	10.000	Subcenário A:1000 Subcenário B: 500 Subcenário C:100	0	Original da paleosuperfície mapeada
2	20.000			
3	50.000			
4	100.000			
5	10-50-25mil			
6	25-75-50mil			
7	60-160-80mil	1000 e 500		
8	25-75-50 mil	500	1	
9	25-75-50 mil	500	0	Paleosuperfície + 0,25°
10	25-75-50 mil	500	0	Paleosuperfície -0,25°

Fonte: O autor, 2022.

5.2.1 Simulações de Diferentes Cenários de Aporte Sedimentar Constante

As simulações foram conduzidas em dois cenários principais no tocante ao **volume de aporte sedimentar**: regime de aporte constante e regime de aporte variável. Como exposto no item 4.4 (Parâmetros das Simulações Numéricas), a estimativa de volume de aporte sedimentar que entra no sistema a ser modelado é parametrizado através da atribuição de valores de volume d'água (que contém uma concentração fixa de sedimentos incorporados) por elemento fluido do modelo. Deste modo, as variações de volume de aporte sedimentar durante as simulações se efetivam em termos de modelagem através da variação do volume d'água por elemento fluido, ou seja, em cada ponto ou célula do fluxo: aumentando-se o volume d'água, aumenta-se por consequência o volume de aporte sedimentar a ser carregado talude abaixo considerando as diferentes frequências de fluxos simulados. Vale assim, lembrar, que o valor de volume d'água usado em cada cenário simulado não representa o total do volume d'água, tampouco o volume total de aporte sedimentar, que entra no sistema a cada fluxo, e sim o volume finito d'água por unidade ou célula de fluxo. No item 6.4(Quantificação do total de sedimentos aportado a cada fluxo) é apresentada uma tentativa de quantificação de volume sedimentar total de sedimentos capaz de resultar na deposição da sucessão sedimentar em um dos cenários de simulação analisados.

No caso das simulações com aporte constante foram simulados diferentes cenários de volumes de constante d'água de 10.000 m³ (CENÁRIO 1), 20.000 m³ (CENÁRIO 2), 50.000 m³ (CENÁRIO 3) e 100.000 m³ (CENÁRIO 4). Cada um desses cenários foi simulado também com variação de frequência de fluxos, considerando fluxos ocorrendo a cada 1000, 500 e 100 anos, que constituem respectivamente, os sub cenários A, B e C.

Os resultados das simulações são apresentados em mapas que representam o alcance e distribuição sedimentar acumulada dos fluxos por períodos de tempo sucessivos de atividade da fonte sedimentar. Cada etapa da simulação (intervalos temporais de área-fonte definidos no item 4.4.3) reproduz experimentalmente o desenvolvimento temporal da deposição turbidítica. Ao término de todas as simulações, o mapa final mostra a distribuição sedimentar dos sucessivos fluxos gerados. Os mapas observados nos permitem avaliar a eficiência dos diferentes cenários de aportes testados com relação à capacidade de alcance e preenchimento

da paleosuperfície. A coloração de cada célula é resultante da combinação da proporção de sedimentos nela depositado, onde as cores mais quentes representam as fácies areias médias (vermelho) e areia fina (verde), e as cores mais frias representam as fácies silte (azul) e argila (preto). Além disso, os resultados também são descritos com relação aos mapas de espessuras totais de depósitos, que evidenciam as diferentes dimensões e acumulações de espessuras de sedimentos entre os cenários de aporte.

5.2.1.1 Simulações de aporte de volume constante (cenários 1,2,3 e 4) com frequência de fluxo de 1000 anos (sub-cenário A)

Nessa bateria de simulações, os fluxos foram mantidos constante em intervalos de 1000 anos, enquanto o parâmetro aporte constante teve 4 cenários distintos (Tabela 4): cenários 1, 2, 3 e 4.

De forma geral, em todos os cenários, como será observado, os fluxos disparados da área-fonte saem da feição de cânion, formando canalizações que se desenvolvem e alcançam a região de lobos terminais, onde se espraiam (Figuras 38, 39 e 40). Ao observarmos a evolução das etapas das simulações (períodos de tempo de 440ka, 340ka, 240ka, 130ka, 60ka e 20ka), veremos que os sucessivos fluxos alcançam posições crescentemente mais distais e posteriormente ampliando-se lateralmente onde ainda há espaço disponível, e finalmente se espessando, preenchendo dessa forma todo o espaço disponível da paleosuperfície de deposição. As dimensões, tanto da região de complexo de canais quanto de lobos terminais, vão tornando-se maiores concomitantemente com os sucessivos fluxos deposicionais em cada etapa de tempo. As particularidades de cada cenário serão descritas abaixo.

CENÁRIO 1A - Aporte constante de 10.000 m³ com fluxos em intervalos de 1000 anos

Observando-se as sucessivas etapas de tempo da simulação do CENÁRIO 1A (Figura 38), percebe-se que o preenchimento da paleosuperfície na região de lobos distais inicia-se pela parte central já ao fim da etapa de 440ka. Posteriormente, ao fim da etapa 340ka, há uma

discreta migração da área dos depósitos para sudoeste. Mas, até o fim da simulação em 20ka, se observa apenas um aumento de espessura dos depósitos na mesma região de deposição, sem que o alcance dos fluxos sedimentares aumente em direção à porção mais distal dos lobos terminais (Figura 38). O aporte constante de 10.000 m^3 não se mostra, portanto, suficiente para preencher todo o espaço disponível da paleosuperfície que hoje é ocupada pelo complexo turbidítico.

A região de complexo de canais apresenta maiores dimensões a cada etapa de tempo, mostrando que seu preenchimento cresce sutilmente para sudoeste com os sucessivos fluxos (Figura 38).

Em termos de fácies sedimentares é possível notar que nessa simulação com volume de aporte constante de 10.000 m^3 , apesar de discreta, há uma maior concentração das areias médias (cores vermelhas) na região de complexo de canais e uma maior concentração de areias finas na região de complexo de canais. O mapa de espessuras totais gerado para esse cenário (Figura 41) mostra as dimensões de regiões deposicionais com depocentros não superiores a $\sim 30\text{m}$ de espessura na porção final de complexo de canais e espessuras de $\sim 15\text{m}$ de sedimentos acumulados na região de lobos terminais.

CENÁRIO 2A- Aporte constante de 20.000 m^3 com fluxos em intervalos de 1000 anos

Com o aumento do volume de aporte sedimentar constante para 20.000 m^3 aplicado à simulação do CENÁRIO 2A, observa-se que já ao fim da primeira etapa temporal da simulação (440ka; Figura 38) ocorre um maior alcance dos fluxos até a região de lobos terminais comparado com CENÁRIO 1A anterior. Ocorre inclusive um pequeno seguimento de fluxos de forma canalizado, se estendendo no extremo sudeste da área

Ao final da etapa de 440ka, o preenchimento do espaço disponível na região dos lobos terminais é mais efetivo que no cenário 1, e também se inicia numa região central mais estreita (Figura 38). Posteriormente, já a partir da etapa de 340ka, se observa uma expansão lateral pouco expressiva da área de deposição dos lobos. Esse aumento discreto de largura da área dos lobos terminais é também acompanhado de aumento de espessura dos depósitos. Em termos de fácies observa-se o mesmo padrão de concentração de areias médias na região de canais e areia finas na região de lobos.

O mapa de espessuras totais (Figura 41) do CENÁRIO 2A ilustra a formação de depocentros na região de canais com valores de espessura de ~40m, e maior distribuição de espessuras na região de lobos, sendo possível distinguir pelo menos dois depocentros, de distribuição restrita e com cerca de ~30m de espessura. Observa-se assim que o cenário de aporte constante de 20.000 m³ foi capaz de preencher uma maior área da região de lobos terminais, porém não foi capaz de formar uma região de lobos terminais com o mesmo alcance distal, nem a largura como observado na sísmica e nos dados de poços

CENÁRIO 3A- Aporte constante de 50.000 m³ com fluxos em intervalos de 1000 anos

Nas sucessivas etapas de simulação do CENÁRIO 3A (Figura 39), observa-se já na etapa inicial (440ka), que o aumento de aporte constante para 50.000 m³ é capaz de promover um maior alcance distal dos fluxos e uma maior distribuição lateral dos depósitos na região de lobos terminais, em comparação com o CENÁRIO 2A anterior.

Com o avanço das etapas temporais da simulação, observa-se um padrão semelhante de preenchimento da paleosuperfície na região de lobos terminais (Figura 39): em 440ka; os fluxos inicialmente preenchem uma porção central mais estreita; em 340ka, há significativo aumento de largura da área de deposição dos lobos distais com aparente migração de fluxo para sudoeste; ao fim da etapa de 240ka é também possível observar uma expansão da área de depósitos, e de direção dos fluxos, para uma porção nordeste dos lobos distais (indicado pela seta vermelha no mapa de 240ka, Figura 39). A área de deposição dos lobos distais se expande e se espessa ao longo das demais etapas de tempo pós-240ka, resultando no quase total preenchendo da área do complexo turbidítico objeto do estudo.

A região de complexo de canais desse CENÁRIO 3A apresenta o mesmo padrão de preenchimento do CENÁRIO 2A anterior, ou seja, a ocorrência de aumento de sua largura a cada etapa de tempo (Figura 39). O padrão de distribuição de fácies também se mantém como no CENÁRIO 2A anterior, com areias médias preponderando na região de canais e as areias finas dominando a região de lobos. Porém, é possível observar que nesse cenário há maior concentração das areias médias ao longo da região de canais (Figura 39).

Em termos de espessuras alcançadas nesse modelo (Figura 41), observamos depocentros na região de canais com espessuras próximas a 50m e uma maior distribuição de espessuras na região de lobos, com depocentros mais largos e de espessuras de cerca de 40m.

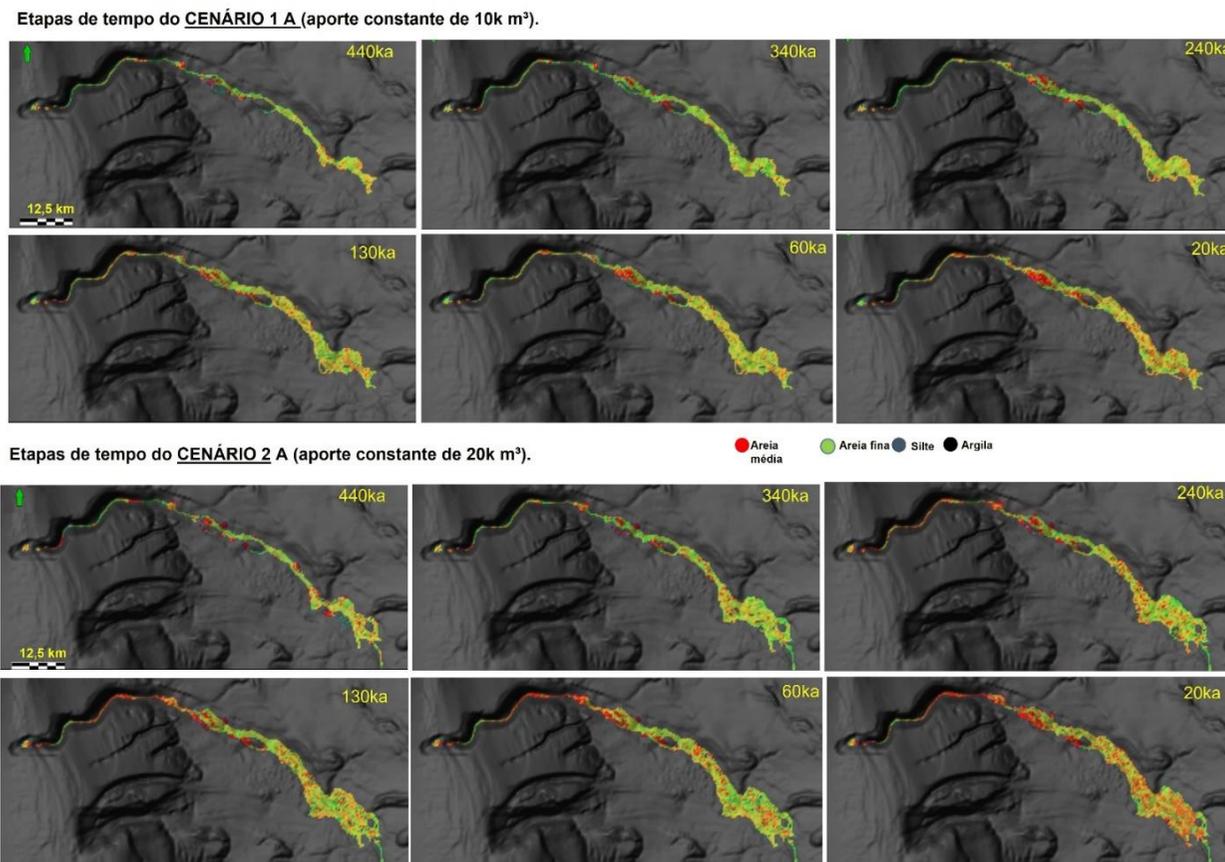
CENÁRIO 4A- Aporte constante de 100.000 m³ com fluxos em intervalos de 1000 anos

Os resultados do CENÁRIO 4A, simulado com aumento do aporte constante de volume sedimentar para 100.000 m³, mostram-se semelhantes aos do cenário 3 em termos de aumento gradativo de área e espessura dos depósitos. Porém a simulação com esse aumento do volume do fluxo sedimentar promove o preenchimento mais rápido dos espaços disponível da paleosuperfície e da espessura dos depósitos (Figura 39): ao fim da etapa de tempo 440ka, os depósitos já preenchem a porção central e sudoeste da região de lobos terminais; ao final da etapa de 340ka, já ocorre uma expansão dos depósitos dos lobos terminais, e a migração de fluxo, para a porção nordeste dos lobos; já ao final da etapa de 130ka se observa o completo preenchimento dessa região nordeste dos lobos terminais. Na etapa seguinte de 60ka, os fluxos retomam a direção mais distal dos lobos pra sudeste, e distribuem-se pela região de lobos, com aumento de espessura dos depósitos.

A região de complexo de canais apresenta o mesmo padrão de preenchimento anterior, com o aumento de sua largura a cada etapa de tempo para a direção sudoeste. Em termos de distribuição de fácies observa-se o mesmo padrão do modelo anterior, porém com mais concentrações das areias médias ao longo do complexo de canais e com maior alcance na região de lobos terminais.

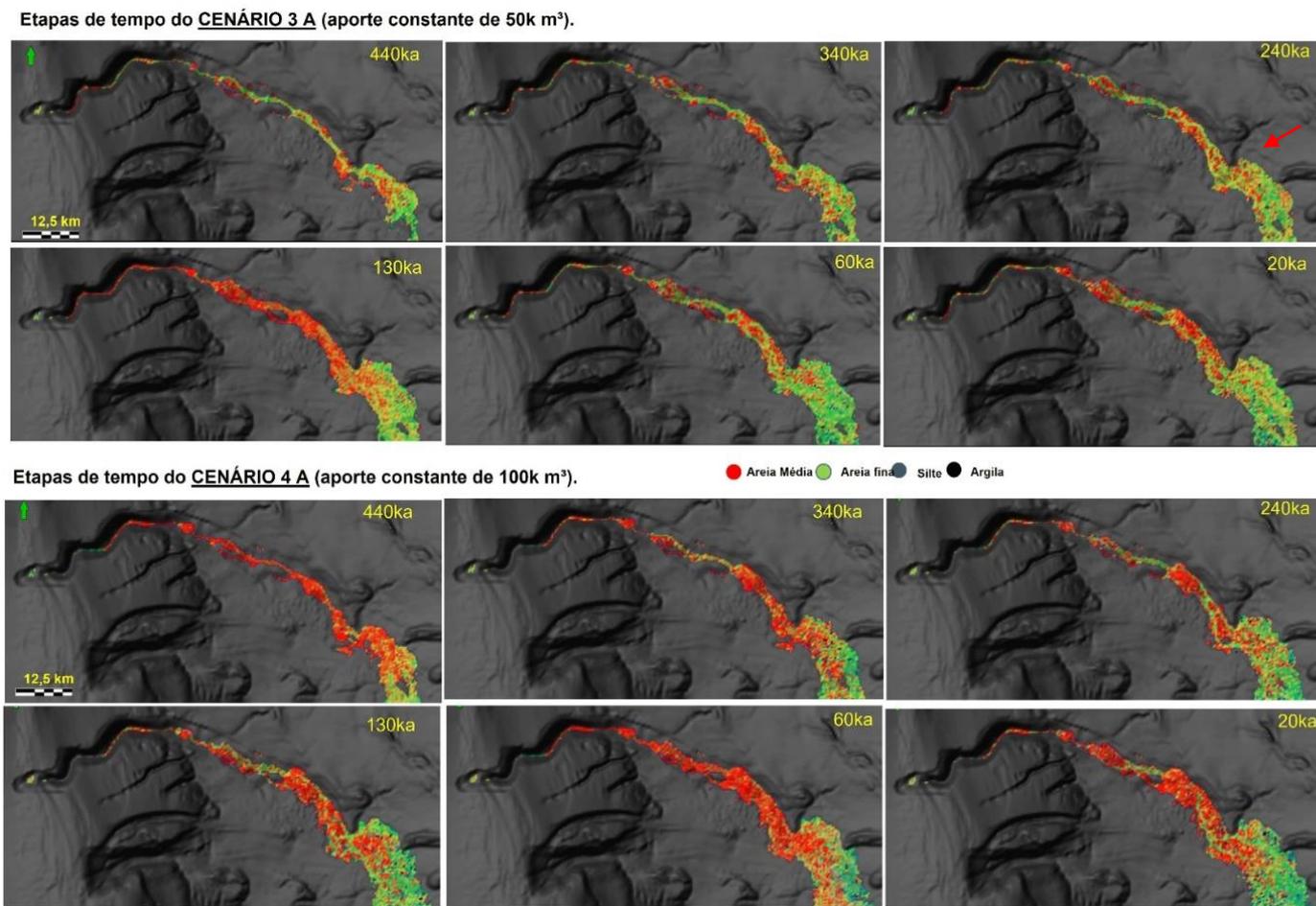
O mapa de espessura do CENÁRIO 4A (Figura 41) revela as maiores espessuras e dimensões alcançadas para toda a região de deposição do complexo turbidítico de todas as baterias de simulações até aqui apresentadas: resulta numa maior continuidade dos depocentros, com valores de espessuras de cerca de 70m na região de canais e valores de espessuras de 50-60m na região de lobos terminais. A Figura 40 compila os mapas de deposição dos fluxos em sua etapa de simulação final dos quatros cenário descritos acima, onde é possível melhor observar as diferenças de alcance e preenchimento dos depósitos entre cada modelo.

Figura 38 – Etapas de tempos das simulações dos CENÁRIOS DE APORTE CONSTANTE 1A e 2A



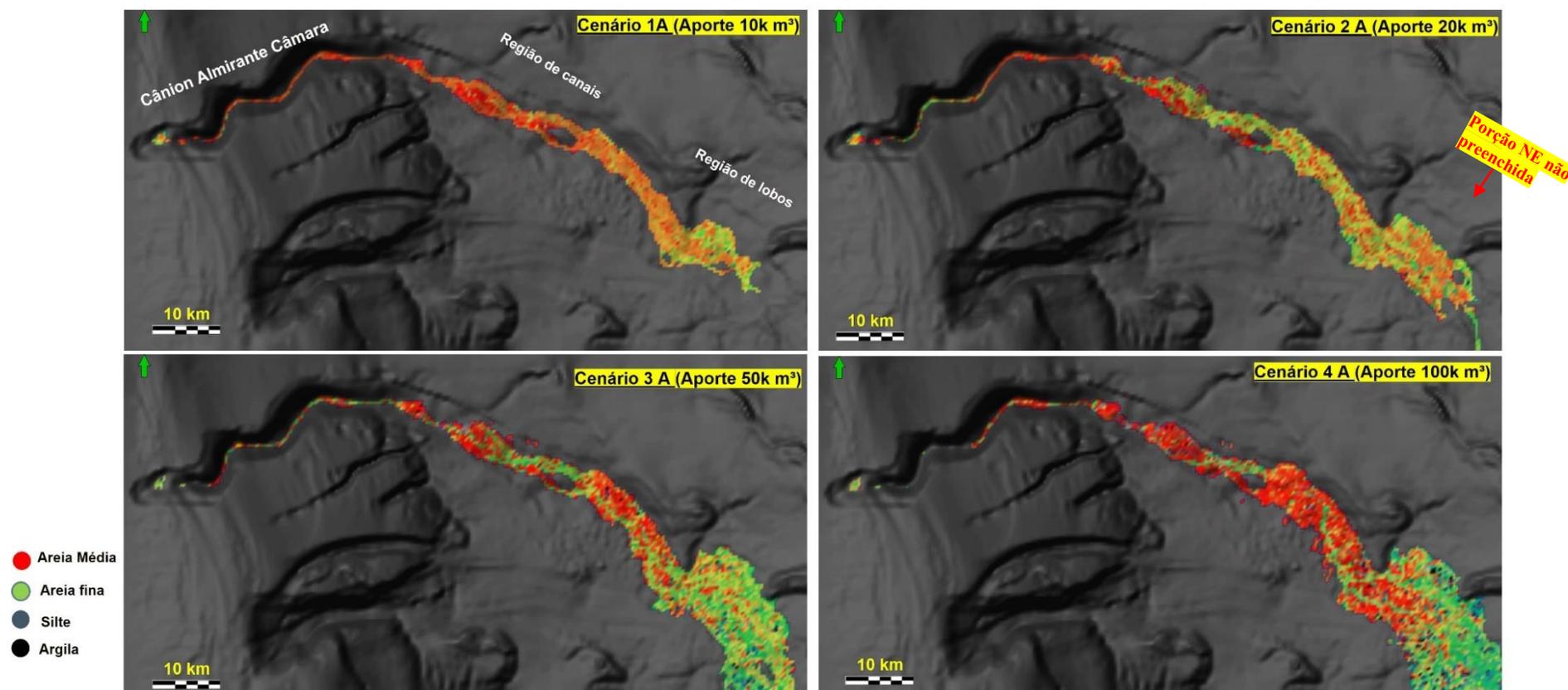
Legenda: Etapas de tempo das simulações que mostram a evolução da distribuição e alcance das fácies sedimentares dos CENÁRIOS DE APORTE CONSTANTE 1A e 2A com frequência de fluxos a cada 1000 anos.

Figura 39 - Etapas de tempos das simulações dos CENÁRIOS DE APOORTE CONSTANTE 3A e 4A



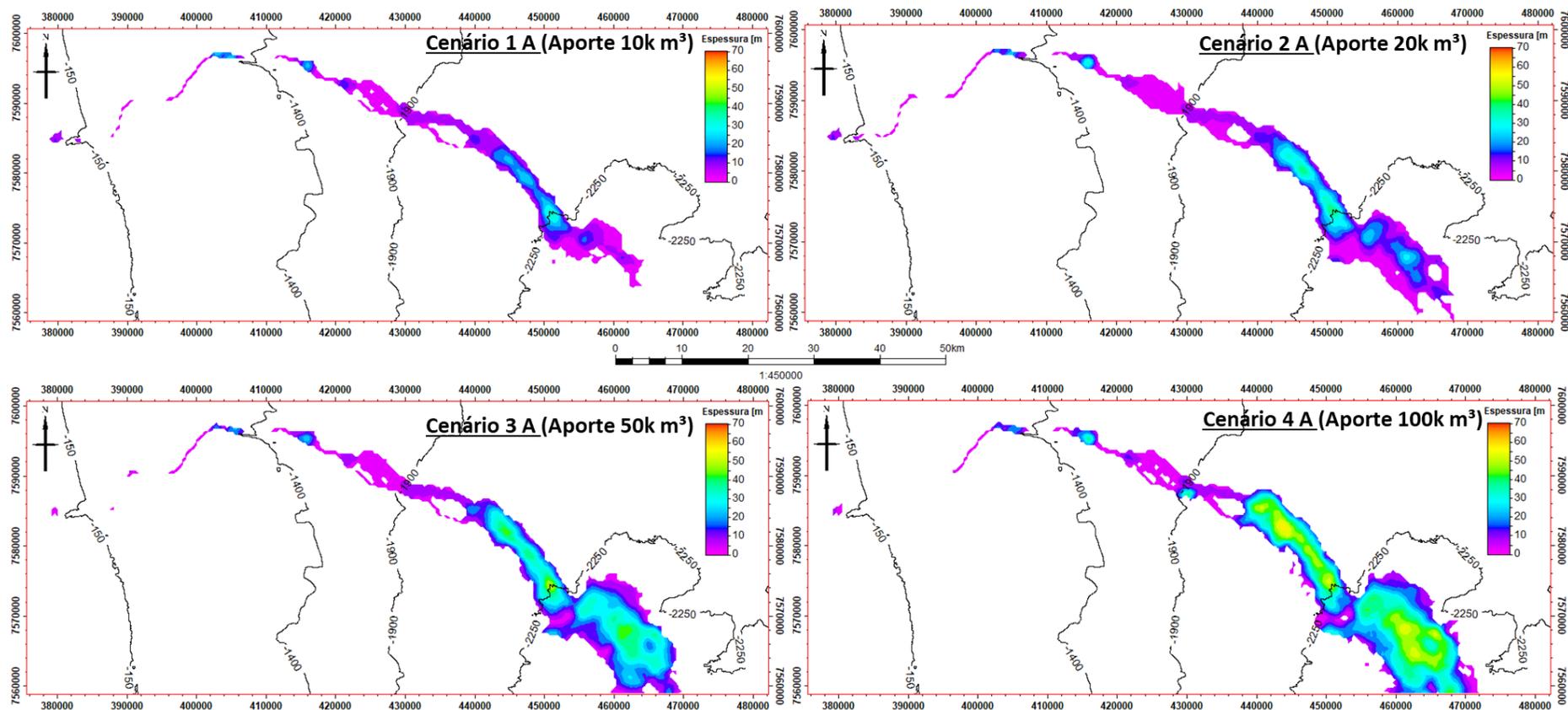
Legenda: Etapas de tempo das simulações que mostram a evolução da distribuição e alcance das fácies sedimentares dos CENÁRIOS DE APOORTE CONSTANTE 3A e 4A, com frequência de fluxos a cada 1000 anos.

Figura 40 – Comparação dos resultados finais das simulações dos CENÁRIOS DE APORTE CONSTANTE 1A, 2A, 3A e A4



Legenda: Cenário de comparação dos resultados finais das simulações dos CENÁRIOS de APORTE CONSTANTE 1A, 2A, 3A e A4 e com frequência de fluxos a cada 1ka.
 Nota: A figura ressalta as diferenças em termos de dimensões laterais, alcance distal e espessura dos depósitos, assim com a distribuição de fácies sedimentológicas, do complexo turbidítico modelado com a mudança dos valores de volume de aporte constante de cada cenário.

Figura 41 - Mapas de espessura total das simulações dos CENÁRIOS 1A, 2A, 3A e 4A DE APORTE CONSTANTE com frequência de fluxo a cada 1000 anos.



5.2.1.2 Simulações de aporte constante (cenários 1,2,3 e 4) com frequência de fluxo de 500 anos. (sub-cenário B)

Nessa bateria de simulações os fluxos foram mantidos constantes (um fluxo a cada 500 anos), enquanto o parâmetro volume de aporte constante repete os 4 CENÁRIOS A anteriores (volumes de aporte constante de 10.000 m³, 20.000 m³, 50.000 m³, e 100.000 m³).

De forma geral, o padrão em termos de alcance dos fluxos e distribuição sedimentar se repete com relação às simulações do item anterior, porém há um maior preenchimento da paleosuperfície ao fim de cada etapa de tempo, visto que há o dobro de aporte nos atuais cenários comparados aos anteriores, o que acarreta também em maiores diferenças nas dimensões e espessuras totais depositadas nos domínios deposicionais. Essas e demais particularidades de cada cenário são descritas abaixo.

CENÁRIO 1B - Aporte constante de 10.000 m³ com fluxos em intervalos de 500 anos

A simulação desse CENÁRIO 1B, com o aumento da frequência de fluxos para cada 500 anos, não foi capaz de atingir a espessura sedimentar conhecida na região de lobos terminais, mesmo ao longo das sucessivas etapas de tempo (Figura 42). O alcance e distribuição dos depósitos na região de lobos são discretamente maiores que aqueles do CENÁRIO 1A, e em termos de distribuição sedimentar percebe-se maior proporções de areias médias ao longo da região de canais. Mas apesar dessa simulação resultar em espessuras maiores que as do CENÁRIO 1A na região de canais com depocentros de 40-50m não resultou em aumentos significativos de espessura sedimentar total na região de lobos terminais, sendo mantidos depocentros com cerca de 20m (Figura 44).

CENÁRIO 2B- Aporte constante de 20.000 m³ com fluxos em intervalos de 500 anos

A simulação desse CENÁRIO 2B, com a mesma frequência de fluxo mas com o aumento do aporte para 20.000 m³, resultou em áreas de deposição ligeiramente mais largas na região de canais e na região dos lobos terminais; também resultou manutenção do mesmo padrão de preenchimento sedimentar do espaço disponível na paleosuperfície ao longo das etapas de tempo (Figura 42).

Com essa simulação com aumento do volume de aporte sedimentar constante para 20.000 m³, observam-se maiores espessuras de depósitos do sistema turbidítico: ~60 metros na região de canais; e ~40m nos depocentros dos lobos terminais (Figura 44). Além de resultar em espessura dos lobos terminais menores do que o caso de estudos, o volume de aporte considerado também não mostrou-se eficiente para expandir lateralmente a zona de deposição turbidítica dos lobos terminais, a ponto de preencher a sua porção nordeste (Figura 44).

CENÁRIO 3B- Aporte constante de 50.000 m³ com fluxos em intervalos de 500 anos

A simulação do CENÁRIO 3B com a mesma frequência de fluxos, mais que dobra o volume de aporte sedimentar (50.000 m³). A evolução dessa bateria de simulação já resulta em diferenças mais marcantes na evolução dos sistema sedimentar em questão, tendo ocorrido um preenchimento mais rápido dos espaços disponíveis da paleosuperfície de deposição turbidítica (Figura 43): já ao final da etapa de 240ka a região dos lobos terminais mostra-se praticamente toda preenchida; e que há uma expansão da área de depósitos para sudoeste; a partir da etapa subsequente de 130 ka, toda a região onde a deposição na região de canais e dos lobos terminais já adquire sua configuração final, a partir da qual observa-se apenas leve expansão da área de lobo distal para nordeste, configurando uma maior area deposicional dos lobos terminais em relação ao CENÁRIO 2B anterior (Figura 44). Observa-se também que parte dos depósitos continuam após a região de lobos terminais, no extremo sudeste da área (indicados com uma seta vermelha na Figura 43)

O mapa de espessura da Figura 44 gerado nessa simulação também evidencia depocentros na região de canais com cerca de 70 metros e dois depocentros principais na região de lobos terminais na ordem de 50 metros. Comparativamente ao CENÁRIO 2B anterior, observa-se também um avanço mais distal da fácies areia média (vermelho na Figura 45) que também ultrapassam o limite distal considerado para o sistema turbidítico Almirante Câmara, como base em dados sísmicos e de testemunhos (Figura 32).

CENÁRIO 4B- Aporte constante de 100.000 m³ com fluxos em intervalos de 500 anos

Nesse CENÁRIO 4B foi simulado a entrada do maior volume sedimentar no sistema deposicional, no valor de 100.000 m³, dentre todas as baterias de testes de volume sedimentar constante, ou seja, o dobro do volume sedimentar simulado no CENÁRIO 3B anterior. Nesse cenário, o preenchimento dos espaços disponíveis da paleosuperfície de deposição turbidítica ocorreu mais rapidamente que no caso do volume de 50.000 m³ mas com alcances diferentes

de áreas de deposição nas mesmas etapas tempotais (Figura 43): (i) ao término das etapas de 340ka e de 240ka, a configuração espacial do sistema deposicional é bastante semelhante à configuração do cenário anterior; observa-se apenas ter havido pequena expansão lateral tanto da área deposicional da região dos canais como da região dos lobos terminais; (ii) contudo a partir de 130 ka, há notável e contínua expansão lateral de todos os domínios deposicionais do sistema turbidítico. Além disso, há grande avanço da área de deposição em direção do extremo sudeste da área, ou seja, para além da área limite conhecida do sistema turbidítico Almirante Câmara; (iii) observa-se também maior distribuição e alcance distal das areias médias ao longo do sistema (fácies em vermelho no mapa da Figura 43).

A Figura 44 e a Figura 45 ilustram as configurações espaciais do sistema turbidítico, assim como a distribuição de fácies sedimentológicas, de cada cenário ao final de todas as etapas de tempotais simulação, onde é possível melhor observar as diferenças de alcance e de padrão de preenchimento faciológicos dos depósitos de cada setor do sistema turbidítico ao final da simulação de cada cenário considerado.

Figura 42 - Etapas de tempo das simulações que mostram a evolução da distribuição e alcance das fácies sedimentares dos CENÁRIOS DE APOORTE CONSTANTE 1B e 2B, com frequência de fluxos a cada 500 anos

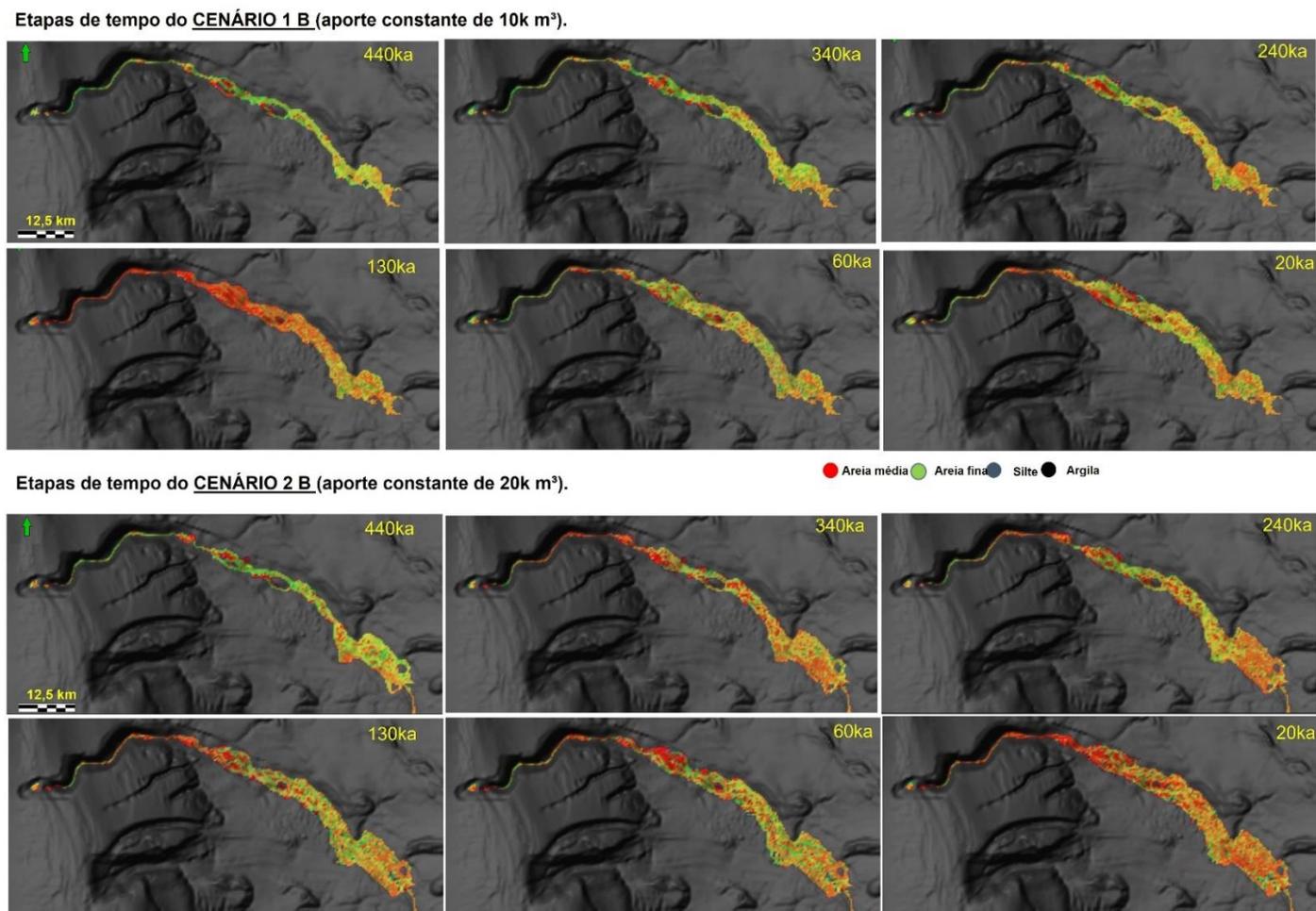


Figura 43 - Etapas de tempo das simulações que mostram a evolução da distribuição e alcance das fácies sedimentares dos CENÁRIOS DE APORTE CONSTANTE 3B e 4B, com frequência de fluxos a cada 500 anos

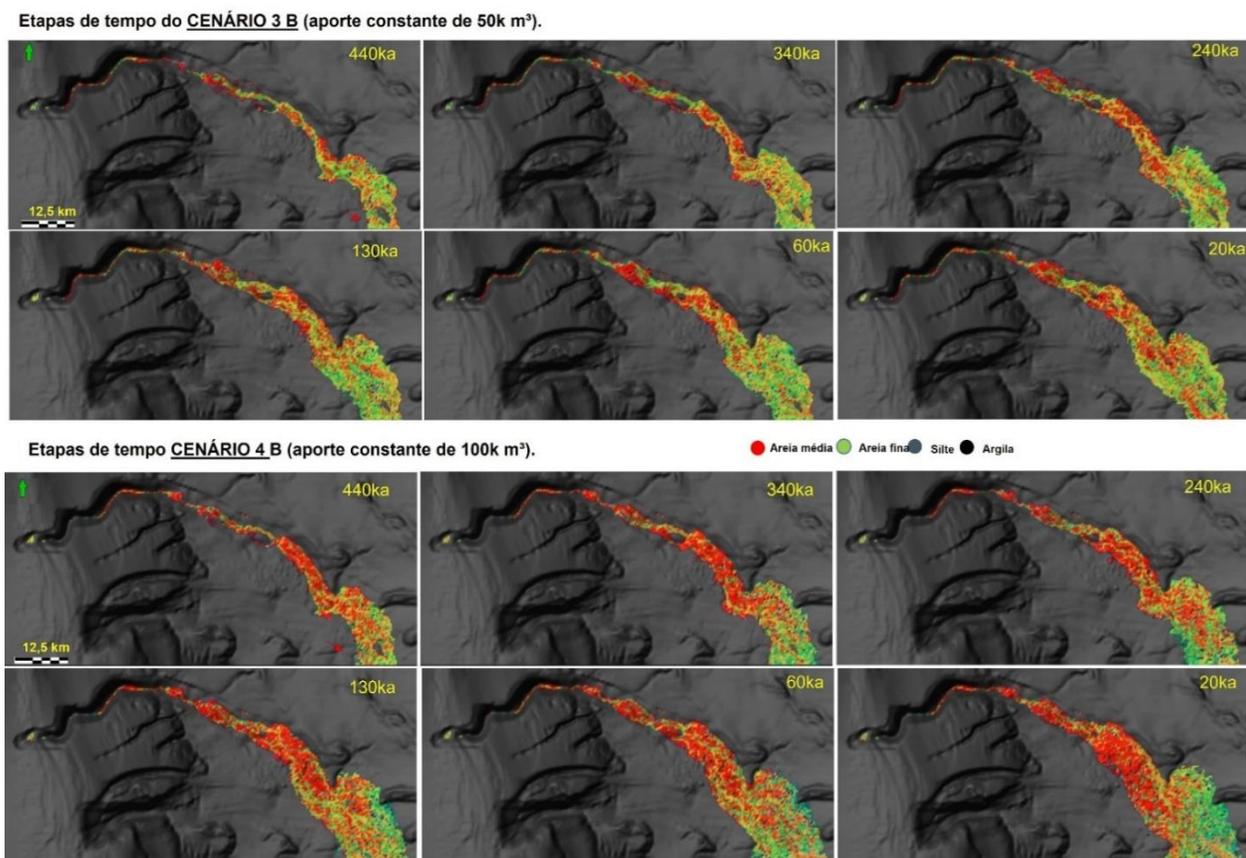


Figura 44 - Mapas de espessura total das simulações dos CENÁRIOS 1B, 2B, 3B e 4B DE APOORTE CONSTANTE, com frequência de fluxo a cada 500 anos

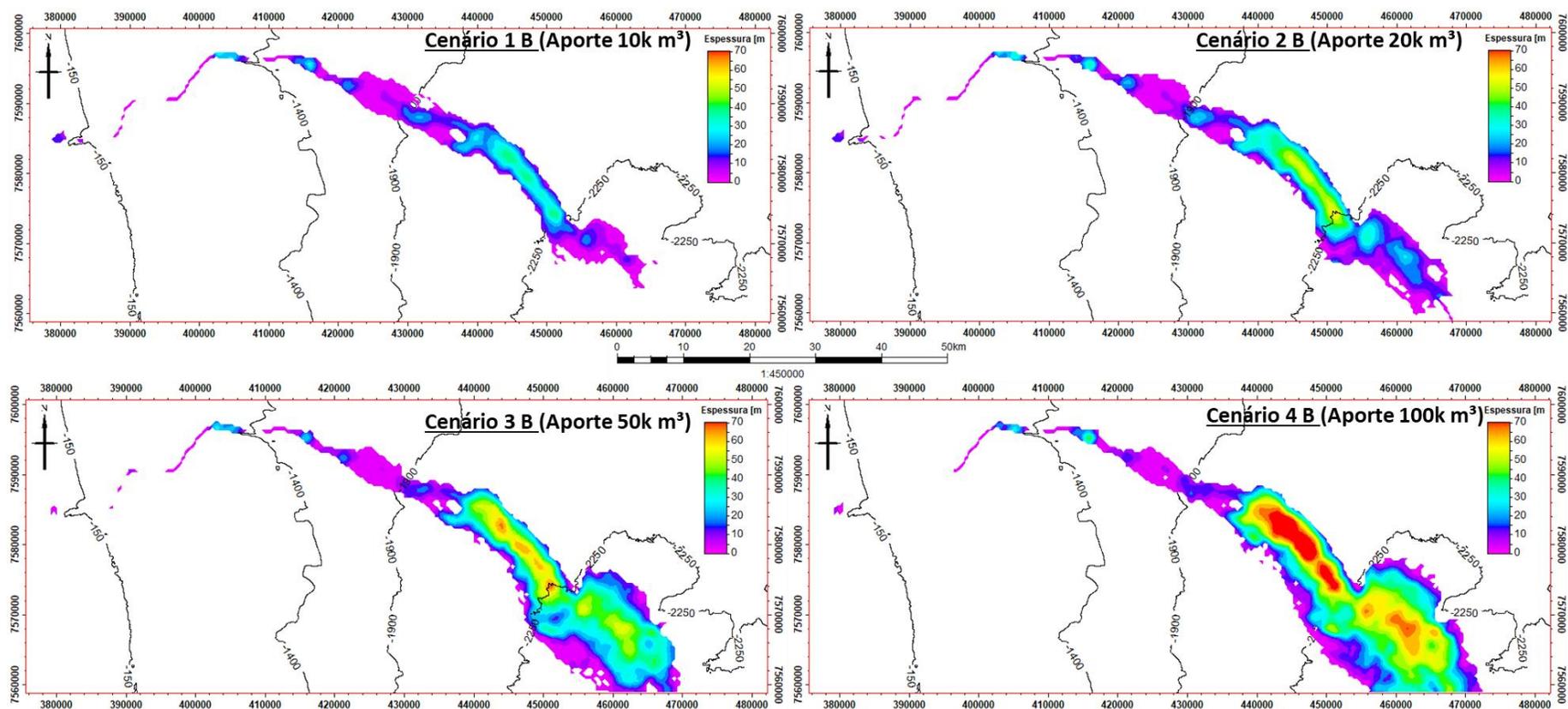
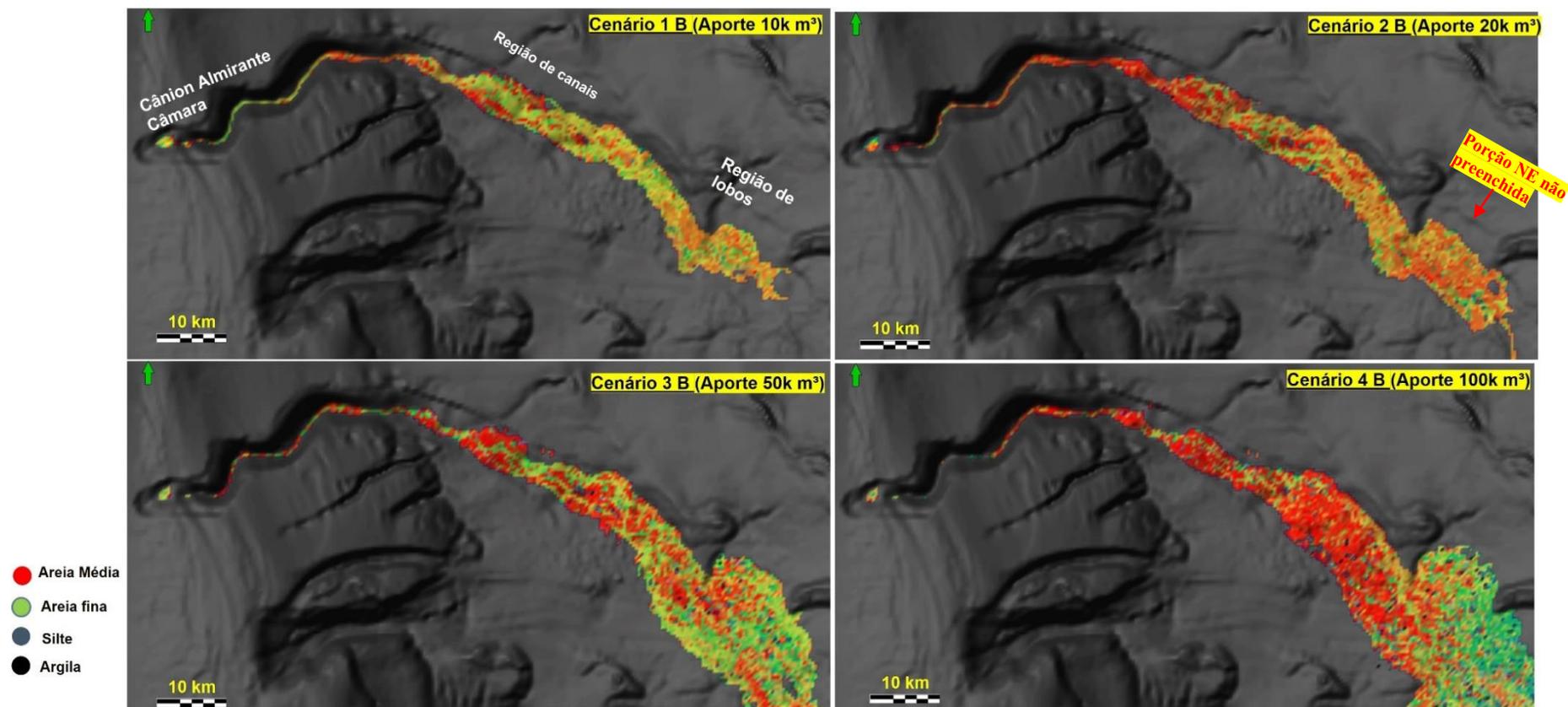


Figura 45 - Etapas de tempo final das simulações que mostram a evolução da distribuição e alcance das fácies sedimentares dos CENÁRIOS 1B, 2B, 3B e 4B DE APORTE CONSTANTE com frequência de fluxos a cada 500 anos



5.2.1.3 Simulações de aporte constante (cenários 1, 2, 3 e 4) com frequência de fluxos a cada 100 anos (sub-cenário C)

Nessa bateria de simulações, a ocorrência de fluxos turbidíticos foi elevada a mais alta frequência, ou seja, ocorrência de fluxos a cada 100 anos, enquanto o parâmetro volume de aporte constante repetiu os 4 CENÁRIOS A e B anteriores (volumes de aporte constante de 10.000 m³, 20.000 m³, 50.000 m³, e 100.000 m³). Devido às características similares em termos de resultados, os CENÁRIOS 1C 2C, 3C e 4C podem ser abordados em conjunto.

Esses cenários de simulação com mais alta frequência de fluxos geraram depósitos turbidíticos com diferenças significativas ao final da simulação dos 4 cenários de volume de aporte constante (10.000 m³, 20.000 m³, 50.000 m³ e 100.000 m³; Figura 46, Figura 47 e Figura 48).

CENÁRIOS 1C (Aporte constante de 10.000 m³ com) e CENÁRIO 2C (Aporte constante de 20.000 m³)

Nesses dois cenários ocorrem (Figura 46 e Figura 48): **(i)** desde as etapas iniciais de simulação dos dois cenários em 440 ka, os fluxos já alcançam e preenchem a parte distal do sistema turbidítico; **(ii)** ao longo de todas as etapas seguintes das simulações do cenários (340ka, 240ka, 130ka, 60ka e 20ka) a zona deposição parece configura-se como um único e contínuo depocentro alongado, de direção geral NW-SE; **(iii)** a evolução das etapas temporais da simulação não promove nem modificação da configuração geométrica do depocentro, que permanece com a mesma configuração alongada, nem aumento perceptível de alcance dos fluxos; **(iv)** a evolução temporal das simulações resulta em depocentros de mesma localização que apenas se expandem lateralmente, se alargam; **(v)** nos 2 cenários, a configuração alongada dos depocentros e sua distribuição homogênea de fácies de areais médias ao longo de toda a área deposicional revela depocentros de características geométricas e faciológicas compatíveis com deposição de fluxos predominantemente canalizados (Figura 46 e Figura 48); **(vi)** entre os CENÁRIOS 1C e 2C, a região dos canais apresenta espessura total ao final das simulações de cerca de 90m de espessura, enquanto a região equivalente à posição dos lobos terminais apresenta espessura máxima de 20m (CENÁRIO 1C) e 30 m (CENÁRIOS 1C; Figura 48).

Ressalta-se que esses CENÁRIOS 1C e 2C resultaram em configurações espaciais e de espessura do sistema turbidítico que podem ser considerados bastante anômalos e irreais, quando comparados às características conhecidas do Sistema Turbidítico Almirante Câmara, foco do estudo (Figura 46 e Figura 48).

CENÁRIOS 3C (Aporte constante de 50.000 m³ com) e CENÁRIO 4C (Aporte constante de 100.000 m³)

Nesses dois cenários ocorrem (Figura 47 e Figura 48): **(i)** desde as etapas iniciais de simulação dos dois cenários em 440 ka, os fluxos já alcançam e ultrapassam em muito a parte distal do sistema turbidítico, como também preenchem toda a área de espaço disponível da paleosuperfície deposicional; **(ii)** nos dois cenários, as porções distais dos sistemas deposicionais se alargam significativamente ao final de cada etapa sucessiva; **(iii)** em ambos os cenários, ocorre também significativa dispersão sedimentar em direção NE, se configurando em geometrias crescentemente mais complexas e irregulares das áreas deposicionais ao final de cada etapa. As configurações mais complexas e de áreas deposicionais mais amplas são observados de forma mais dramática nas etapas finais de simulação do CENÁRIO 3C (20 ka). No caso da simulação do CENÁRIO 4C (volume de aporte de 100.000 m³) são observadas grande modificações de direção de dispersão sedimentar para NE já a partir de 240ka, intensificando nas etapas temporais subsequentes; **(iii)** em termos de distribuição de fácies, o CENÁRIO 3C revela uma distribuição mais homogênea e predominante de areia média ao longo de toda a região deposicional (vermelho na Figura 47). Já no CENÁRIO 4C, há predominância de areias médias na porção proximal e média do sistema e de granulometrias mais finas nas porções mais distais; **(iv)** em termos de espessuras totais da sucessão deposicional há diferentes marcantes entre os dois cenários. No CENÁRIO 3C foi gerado um depocentro contínuo com espessuras acima de 100m na região de canais, e espessura distal de cerca 80m na na região que seria ocupada pelos lobos (Figura 48). No CENÁRIO 4C também foi gerado um depocentro principal com espessuras superiores a 140m na região de canais. Distalmente, na região equivalente aos lobos terminais, a espessura total dos depósitos chega a atingir 120m, e 30m na região de avulsão dos depósitos (Figura 48).

Como nos casos dos CENÁRIOS 1C e 2C acima, as simulações dos CENÁRIOS 1C e 2C resultaram em configurações espaciais e de espessura do sistema turbidítico que podem ser considerados bastante anômalos e irreais, quando comparados às características conhecidas do Sistema Turbidítico Almirante Câmara, foco do estudo (Figura 47 e Figura 48).

A Figura 49 compila os mapas de deposição dos fluxos em suas etapas de simulação finais dos quatro cenários (CENÁRIOS 1C, 2C, 3C e 4C) descritos acima, onde é possível melhor observar as diferenças de alcance e preenchimento dos depósitos entre cada modelo.

Figura 46 - Etapas de tempo das simulações que mostram a evolução da distribuição e alcance das fácies sedimentares dos CENÁRIOS DE APORTE CONSTANTE 1C e 2C, com frequência de fluxos a cada 100 anos

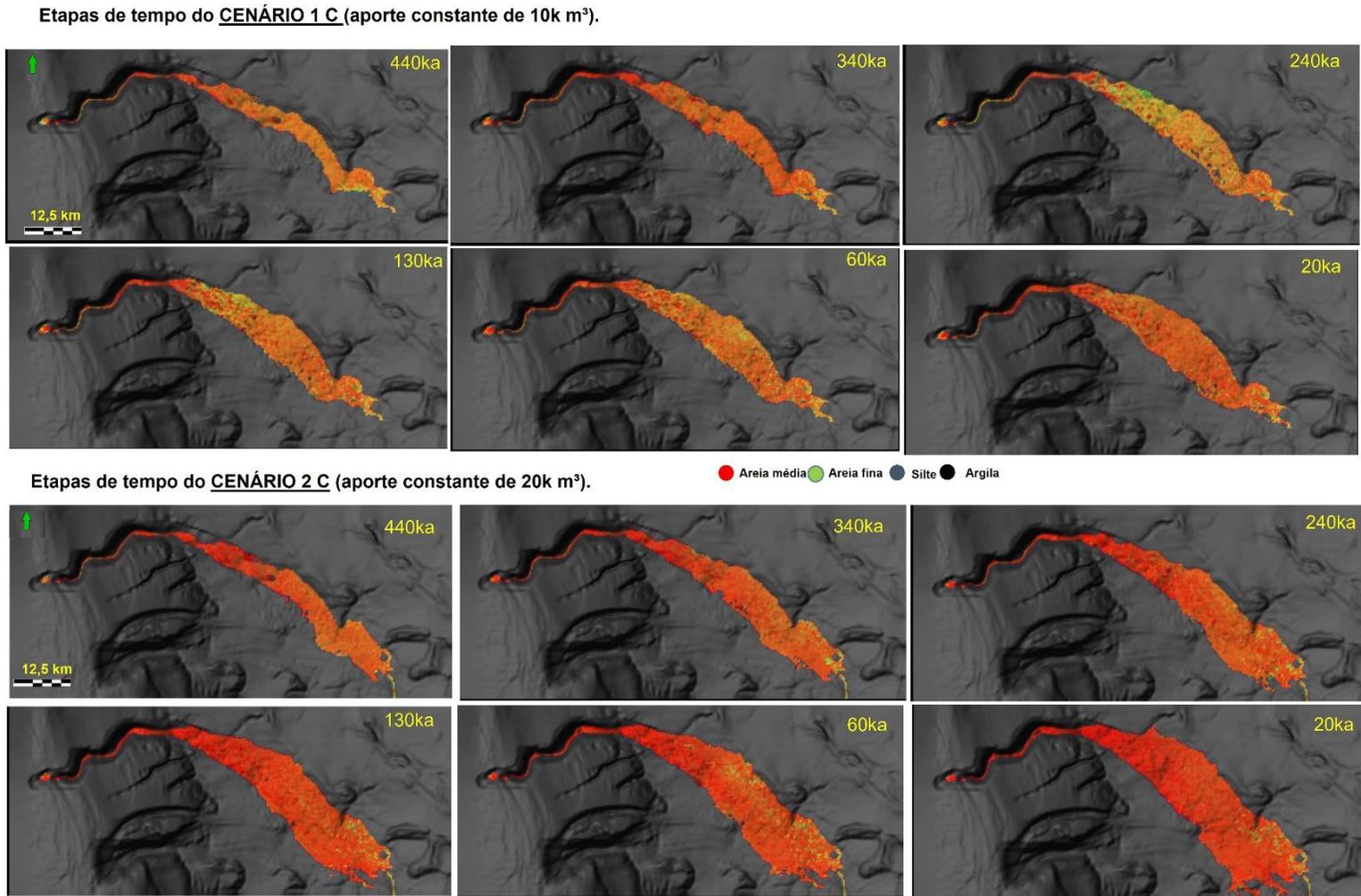


Figura 47 - Etapas de tempo das simulações que mostram a evolução da distribuição e alcance das fácies sedimentares dos CENÁRIOS DE APORTE CONSTANTE 3C e 4C, com frequência de fluxos a cada 100 anos

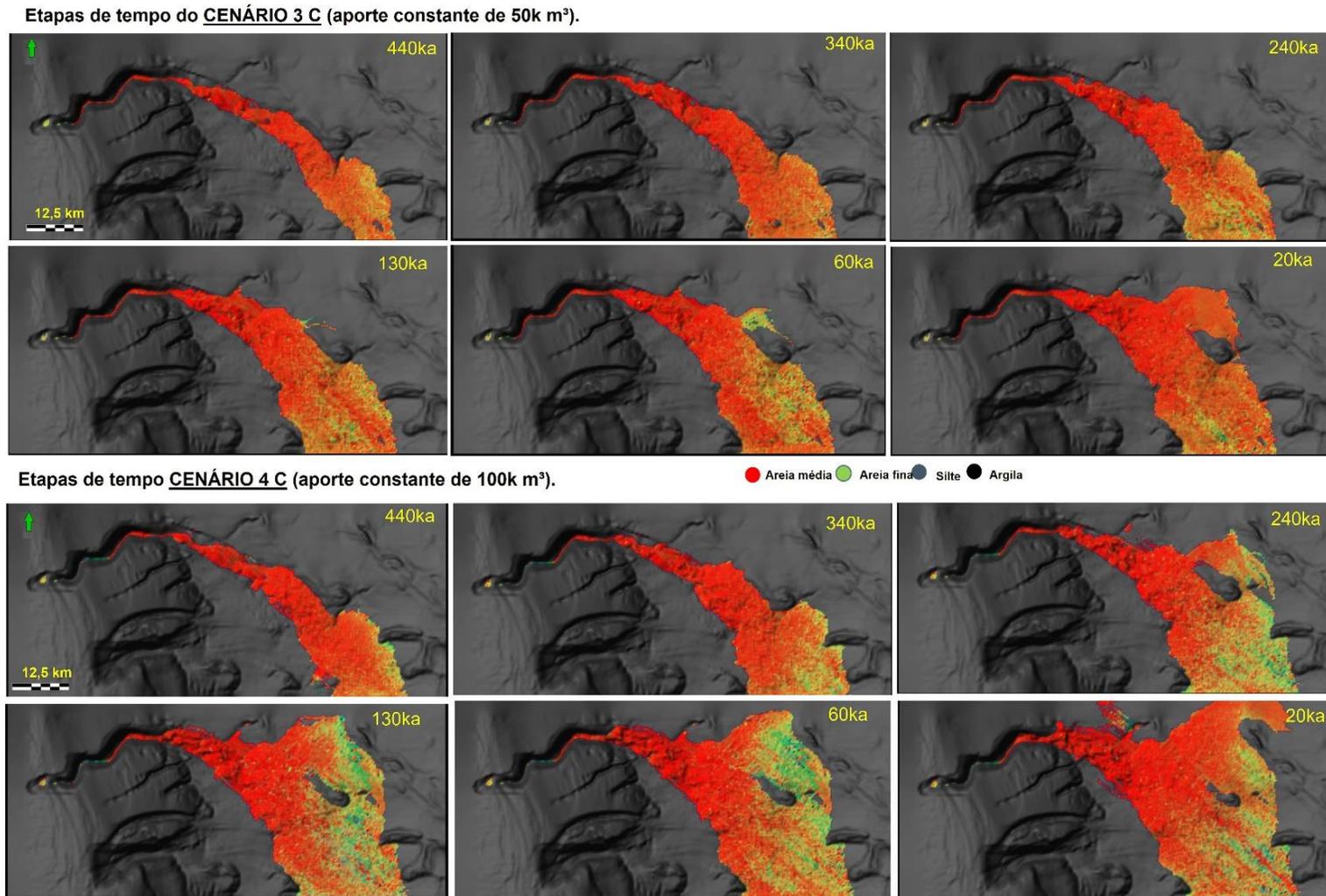


Figura 48 - Mapas de espessura total das simulações dos CENÁRIOS APORTE CONSTANTE 1C, 2C, 3C e 4C, com frequência de fluxo a cada 100 anos

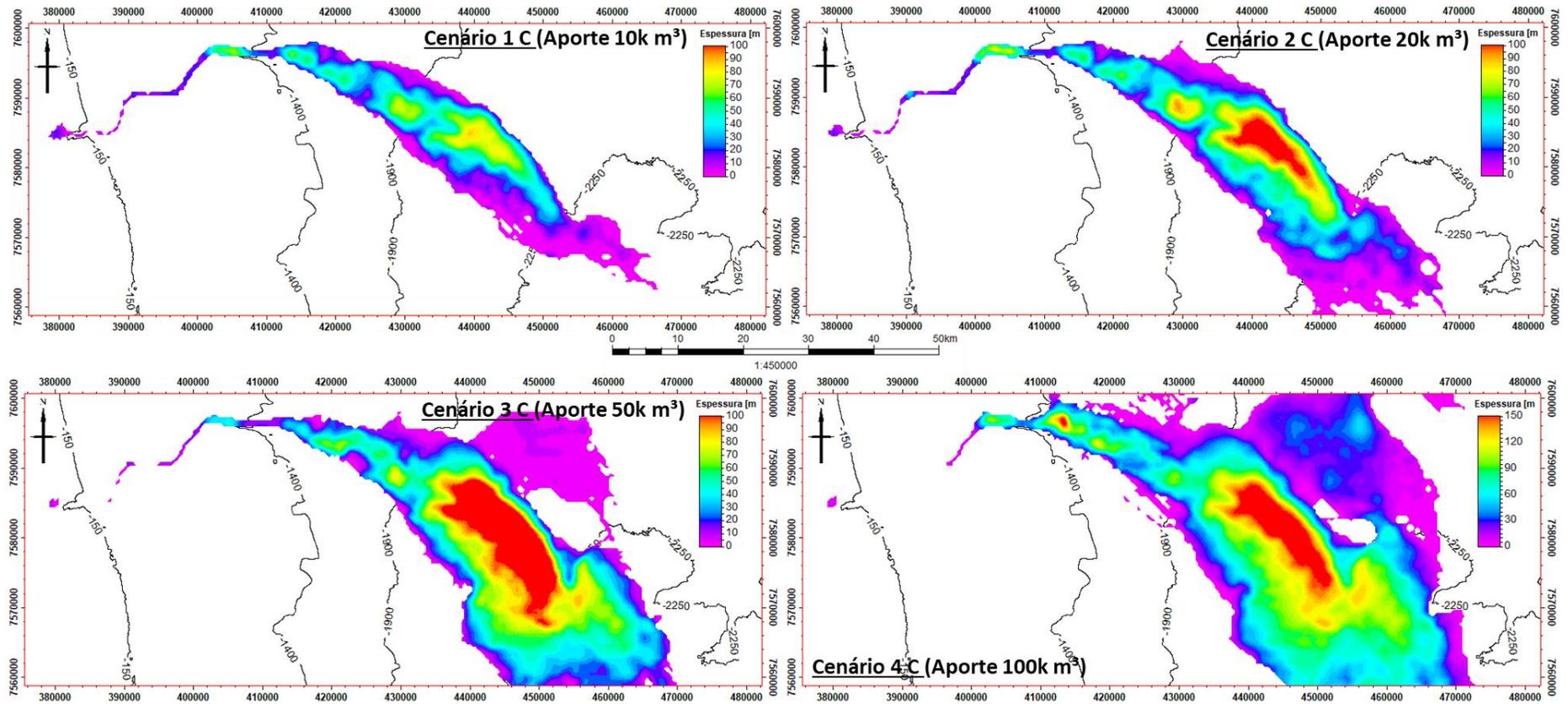
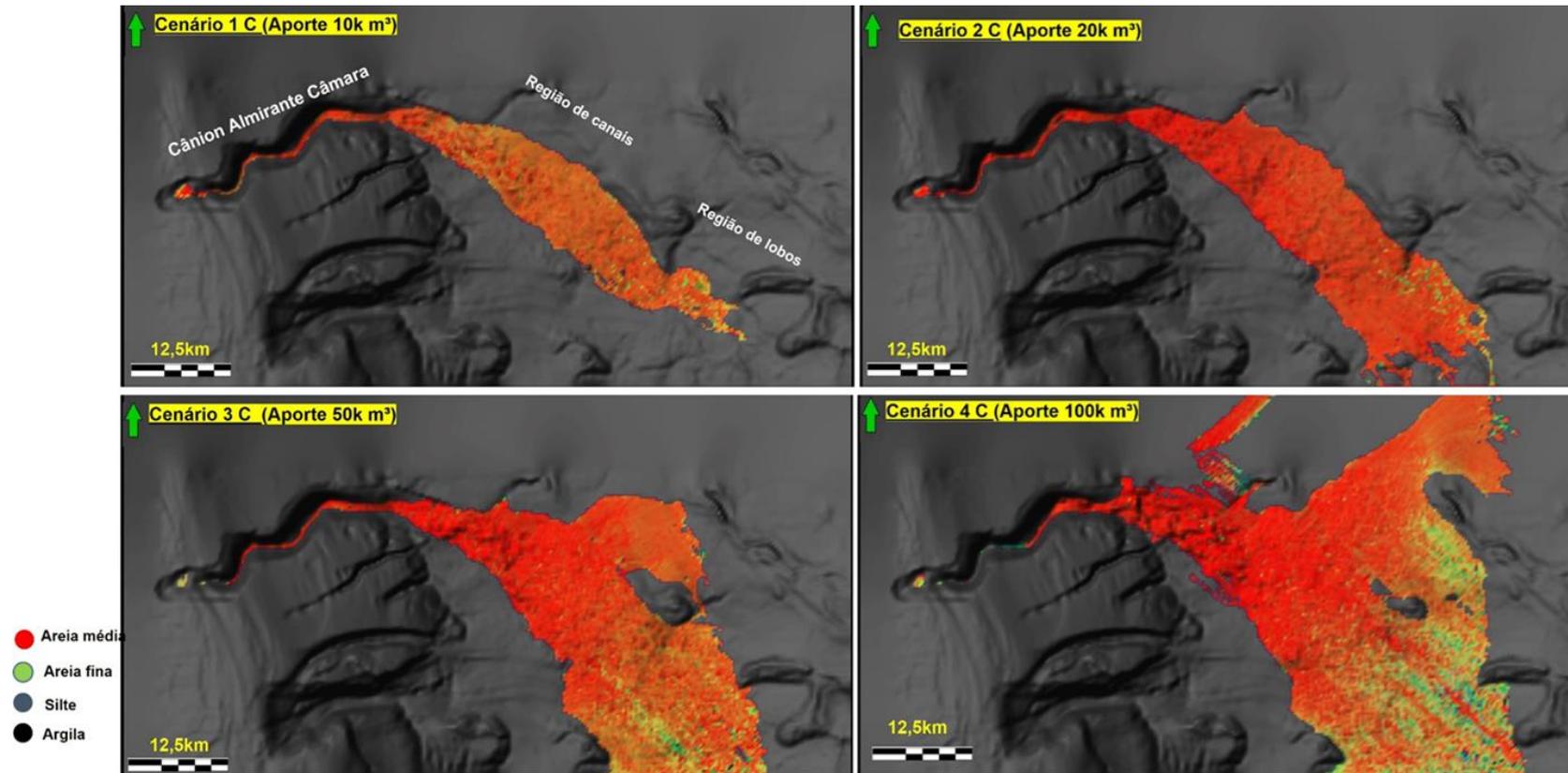


Figura 49 Etapas de tempo final das simulações que mostram a evolução da distribuição e alcance das fácies sedimentares dos CENÁRIOS 1C, 2C, 3C e 4C de aporte constante com frequência de fluxos a cada 100 anos



5.2.2 Simulações de diferentes cenários de Aporte variável ao longo do tempo

Conceitualmente, os depósitos turbidíticos originados a partir de fluxos hiperpicnais possuem uma variação de energia e de volume de aporte sedimentar ao longo do tempo, ou seja, entre o início e final de uma fase de construção do sistema deposicional quando uma queda de nível de base permite a alimentação sedimentar da bacia profunda (Gardner et al., 2008; McHargue et al., 2010). De forma geral, durante cada fase de deposição em águas profundas há uma fase inicial de energia mais branda, que passa para uma fase de aumento de energia/volume de aporte sedimentar e conseqüente um aumento de alcance do fluxo, e por fim, há uma fase de diminuição da energia e uma retração do alcance dos fluxos que carregam os depósitos arenosos (Gardner et al., 2008; McHargue et al., 2010). Buscando-se representar esse conceito nas simulações, foram realizados três cenários **com regime de aporte variável**, onde em cada intervalo de tempo em que a fonte está ativa, os aportes iniciam-se com um valor de volume definido, que posteriormente aumenta linearmente para um valor máximo, e por último decresce a um valor intermediário. Vale ressaltar que, como já apontado no item 5.2.1 (Simulações de Diferentes Cenários de Aporte Sedimentar Constante), ao se referir ao parâmetro volume de aporte sedimentar, entende-se em termos de simulação a valores de volume d'água por elemento fluido do modelo. Desse modo, como um volume d'água específico contém uma concentração fixa de sedimentos incorporados, ao se alterar o parâmetro volume d'água durante as simulações, altera-se por conseqüência o volume de aporte sedimentar ofertado ao sistema deposicional simulado.

Assim, nas baterias de simulações de diferentes cenários de aporte sedimentar variável ao longo do tempo durante os ciclos deposicionais do sistema turbidítico, foram simulados 3 diferentes cenários de aporte variável, ou seja, de regime sedimentar variável ao longo do tempo: CENÁRIO 5: volumes d'água variando entre início e fim da simulação entre 10.000-50.000-25.000 m³; CENÁRIO 6: volumes d'água variando entre início e fim da simulação entre 25.000-75.000-50.000m³; e CENÁRIO 7: volumes d'água variando entre início e fim da simulação entre 60.000-180.000-100.000m³. Para a definição desses valores de volumes, os cenários de volumes variáveis tiveram como referência os valores testados nos cenários de aporte sedimentar fixo (volume d'água fixo), apresentados no item anterior 5.2.1. Além disso,

para cada cenário de volume de aporte variável (CENÁRIOS 5, 6 e 7) foram testados 3 sub-cenários, nos quais foram aplicadas variações nas frequências de fluxos: 1 fluxo a cada 1000 anos; 1 fluxo a cada 500anos, e, finalmente, 1 fluxo a cada 100 anos, aqui nomeados respectivamente sub-cenários A, B e C. As tabelas no ANEXO 4 mostram como essa variação de fluxo é configurada para cada intervalo de tempo.

5.2.2.1 Simulações com aporte variável (CENÁRIOS 5, 6 e 7) com frequência de fluxos de 1000 anos (sub-cenário A)

De forma geral, assim como nos cenários do **item 5.2.1.1** (Simulações de aporte de volume constante com frequência de fluxo de 1000 anos), onde as simulações consideraram frequências de fluxo a cada 1000 anos, os CENÁRIOS 5A, 5B e 5C descritos abaixo, se provaram eficientes em carrear fluxos sedimentares para além do cânion, atravessando a região dos complexos de canais e espalhando-se distalmente na região de lobos terminais (Figura 50, Figura 51 e Figura 52).

No entanto, em cada cenário há diferenças entre na capacidade em preencher os espaços disponíveis ao longo da paleosuperfície de deposição, na dispersão das diferentes granulometrias, assim como nas dimensões e nas espessuras totais das sucessões deposicionais em cada porção do sistema deposicional.

CENÁRIO 5A - Aporte variável entre 10.000 - 50.000- 75.000 m³ com fluxos em intervalos de 1000 anos

Nesse CENÁRIO 5A, observa-se evolução do preenchimento dos espaços disponíveis da paleosuperfície semelhantes aos dos cenários de item 5.2.1.1. Desde a etapa inicial em 440ka, há deposição sedimentar em todas as porções do sistema turbidítico (cânion, região de canais e região lobos terminais (Figura 50).

Desde a primeira etapa da simulação (440ka), observa-se a canalização dos fluxos que já alcançam o extremo sudeste da região de lobos terminais. Posteriormente, a partir da etapa de

340ka, observa-se uma migração continuada dos depósitos para sudoeste, uma expansão lateral (alargamento) progressiva da região dos lobos terminais e também o aumento progressivo da espessura dos depósitos em todas as porções do sistema turbidítico. Contudo, observa-se que mesmo após todas as etapas da simulação, o CENÁRIO 5A não foi capaz de preencher efetivamente toda a paleosuperfície a ponto de reproduzir a configuração e dimensão da região dos lobos terminais como conhecemos, havendo por exemplo ausência de sedimentação na porção nordeste conhecida da região de lobos terminais (Figura 50 e Figura 52).

Em termos de distribuição de fácies, vemos novamente (como visto nas simulações do **item 5.2.1.1**) que há uma tendência das areias médias se concentrarem na região de complexo de canais e das areias finas de concentrarem-se na região dos lobos terminais.

O CENÁRIO 5A apresenta as menores espessuras sedimentares totais dentre os depósitos de todos os cenários simulados com fluxos a cada 1000 anos, com depocentros com cerca de 40m em seu complexo de canais e cerca de 30m nos depocentros da região de lobos terminais. (Figura 52).

CENÁRIO 6A - Aporte variável entre 25.000-75.000-50.000 m³ com fluxos em intervalos de 1000 anos

No CENÁRIO 6A, mesmo com variações de dos volumes de aporte ao longo das simulações, o padrão de preenchimento continua semelhante ao do CENÁRIO 5A anterior (Figura 50). Como no cenário anterior, observa-se novamente que parte dos depósitos, desde a primeira etapa de tempo (440ka), são canalizados e alcançam o extremo sudeste da região de lobos terminais, com o aumento progressivo da espessura desses depósitos ao longo das etapas seguintes da simulação.

Observa-se que inicialmente os depósitos preenchem a porção central da região de lobos logo ao término da etapa de 440ka (Figura 50). Ao final da etapa de 340ka, observa-se uma migração dos depósitos para sudoeste. Já a partir da etapa de 130ka, há uma expansão da área de deposição para porção nordeste dos lobos terminais – expansão que continua a ocorrer, mesmo que sutilmente, ao longo das etapas temporais restantes, finalizando por preencher quase que por inteiro o espaço disponível da paleosuperfície na região dos lobos terminais (Figura 50).

Em termos de distribuição de fácies, repete-se o padrão do CENÁRIO 5A, porém há maiores concentrações de areias médias nas regiões de canais, mas também um maior alcance das mesmas areias médias até a na região de lobos terminais.

Em termos de espessuras totais, o CENÁRIO 6A resulta na construção de depocentros com cerca de 50m na sua região canalizada e depocentros de 40m na região de lobos terminais (Figura 52).

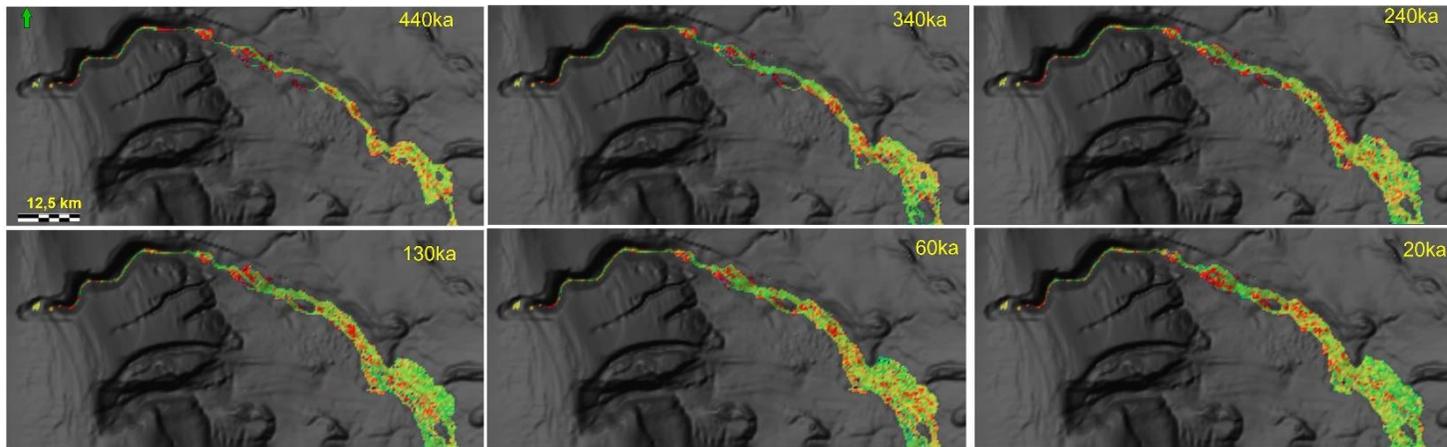
CENÁRIO 7A - Aporte variável entre 60.000-180.000-100.000 m³ com fluxos em intervalos de 1000 anos

O CENÁRIO 7A foi simulado com os maiores valores de aporte sedimentar variável ao longo do tempo de simulação. O resultado final da simulação revela uma evolução dos depósitos semelhante à evolução dos CENÁRIOS 5A e 6A. Uma diferença notável, no entanto, é que no CENÁRIO 7A as áreas de deposição ao longo de todo o sistema turbidítico simulado são visivelmente mais amplas lateralmente (maiores largura de zonas de deposição) e ocorre também maior distribuição das areias médias ao longo de todas as porções do sistema deposicional (Figura 51). Em termos de espessura, a simulação do CENÁRIO 7A também resulta na deposição de um sistema turbidítico que apresenta as maiores espessuras todas geradas nessa bateria de simulações, com depocentros na região canalizada acima de 70m e espessuras máximas na região de lobos próximas a 60 m.

A Figura 53 compila os mapas de espessura total dos CENÁRIOS 5A, 6A e 7A, simulados com diferentes variações de volume de aporte ao longo do tempo, mas todos evoluindo com fluxos a frequência contínua de 1 fluxo a cada 1000 anos, e onde é possível melhor observar as diferenças de alcance dos fluxos, de configuração espacial dos depósitos e da distribuição das espessuras totais.

Figura 50 - Etapas de tempo das simulações que mostram a evolução da distribuição e alcance das fácies sedimentares dos CENÁRIOS DE APORTE VARIÁVEL 5A e,6A, com frequência de fluxos a cada 1000 anos

Etapas de tempo do **CENÁRIO 5 A** (aporte variável de 10-50-25 k m³).



Etapas de tempo do **CENÁRIO 6 A** (aporte variável de 25-75-50 k m³).

● Areia Média ● Areia fina ● Silte ● Argila

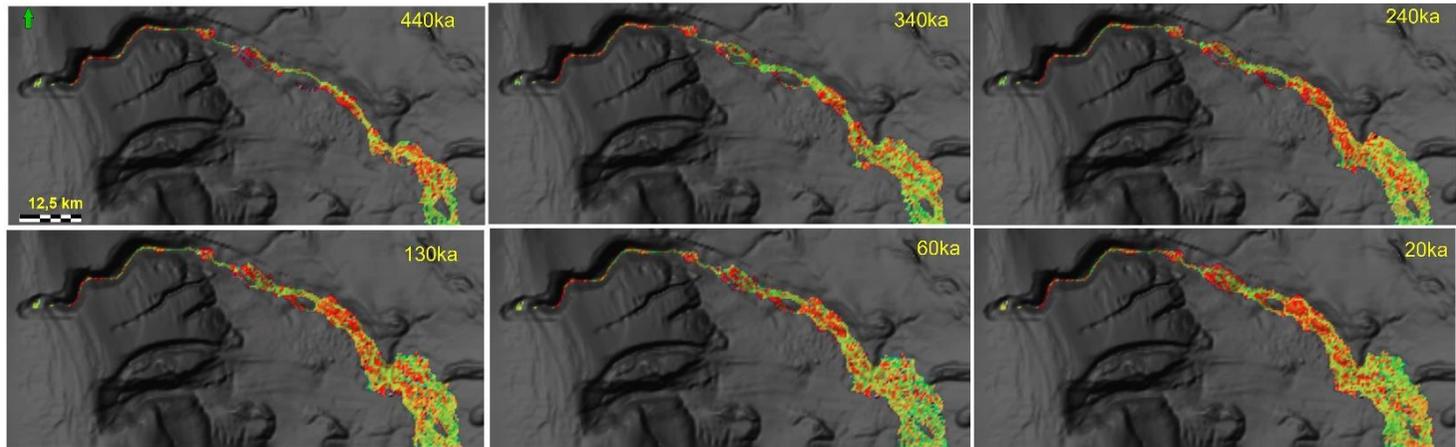


Figura 51 - Etapas de tempo das simulações que mostram a evolução da distribuição e alcance das fácies sedimentares do CENÁRIO DE APORTE VARIÁVEL 7A com frequência de fluxos a cada 1000 anos

Etapas de tempo do **CENÁRIO 7 A** (aporte variável de 60-160-80k m³).

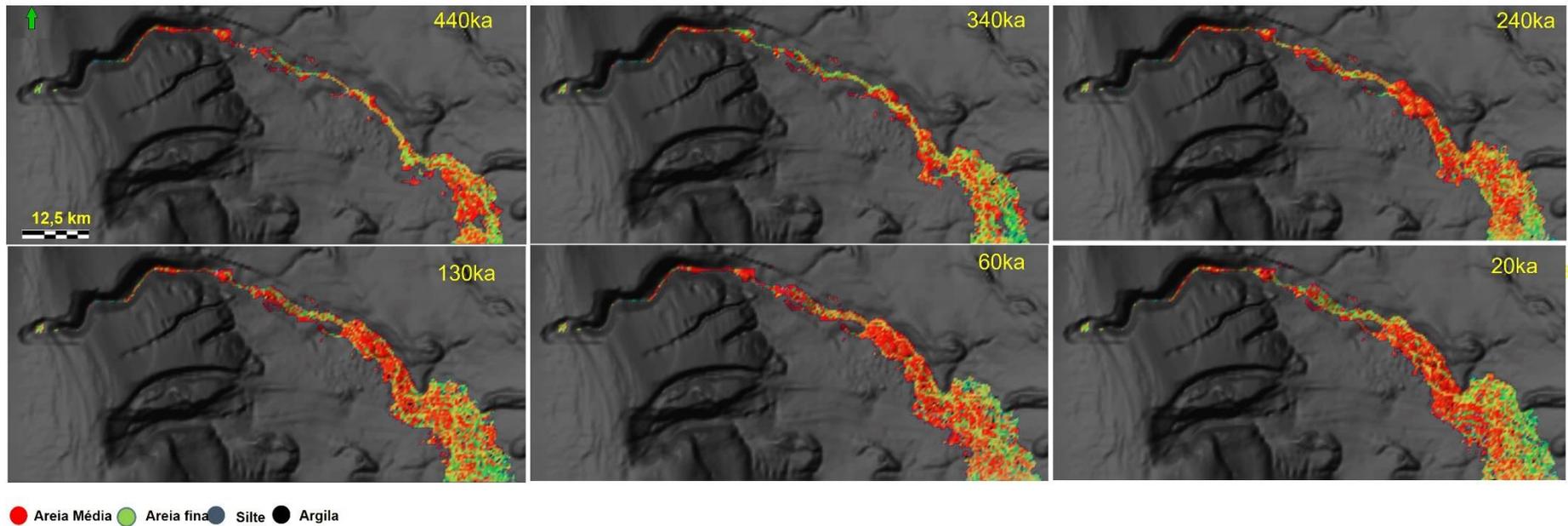


Figura 52 – Mapas de espessura total das simulações de aporte variável (CENÁRIOS 5A, 6A e 7A) com frequência de fluxo a cada 1000 anos

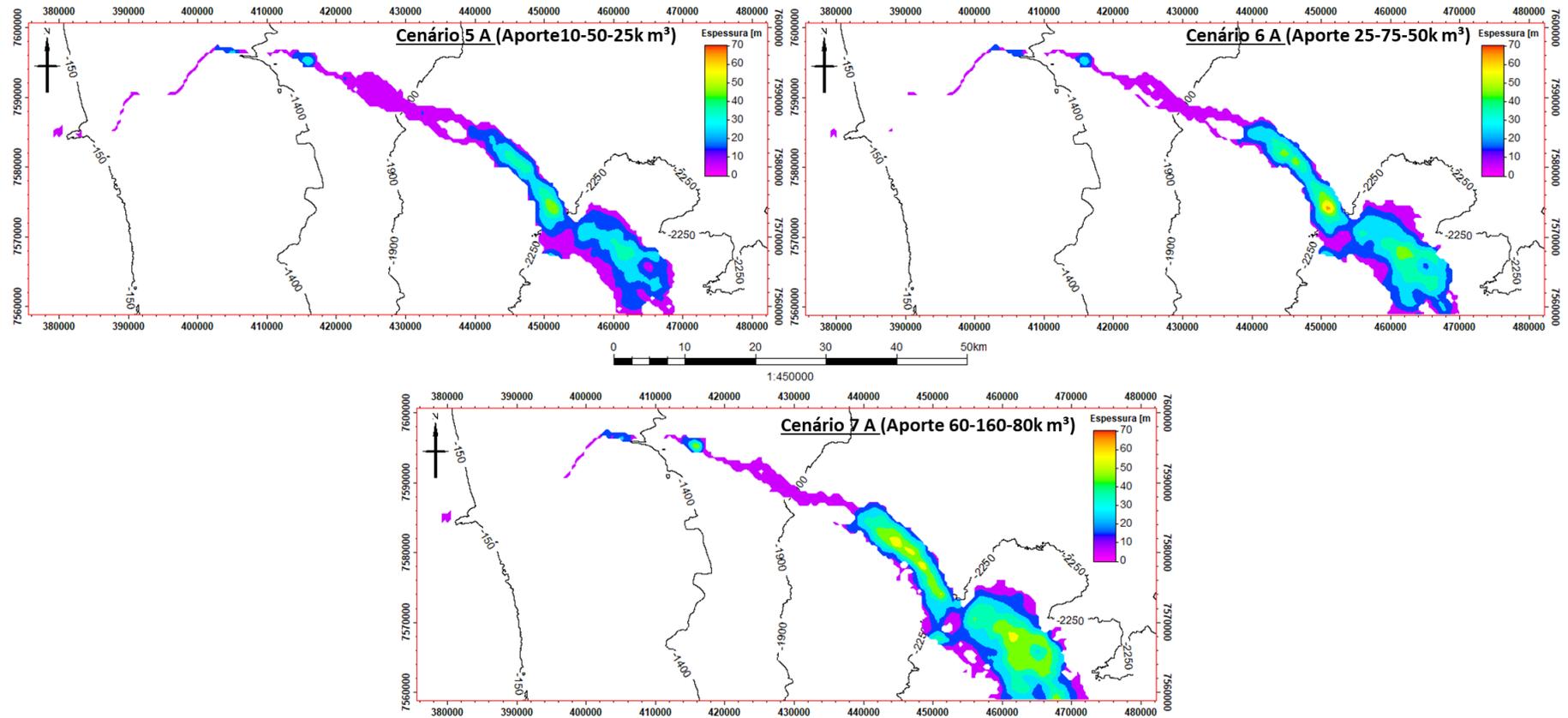
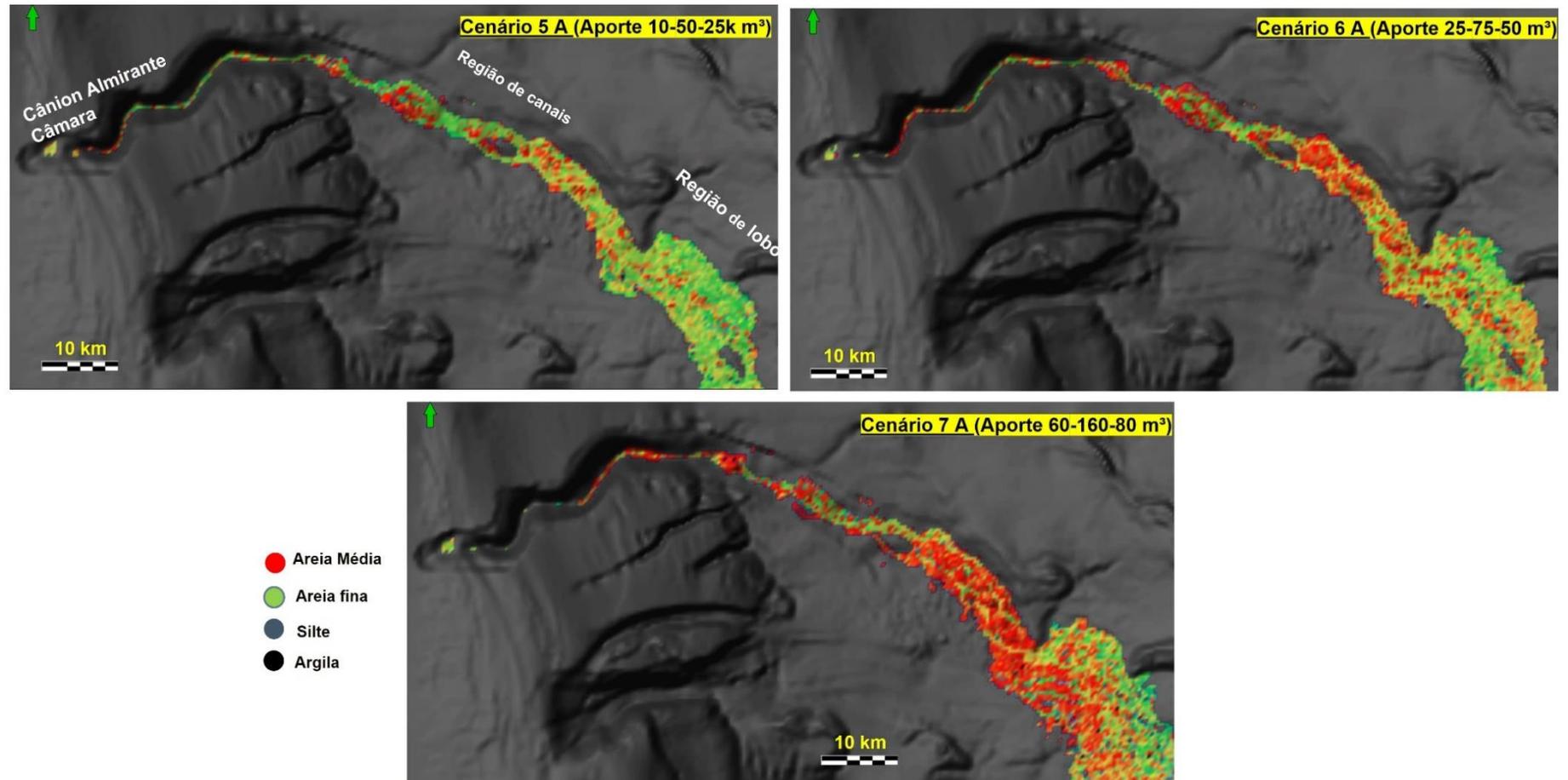


Figura 53 - Distribuição sedimentar final dos cenários de aporte variável (CENÁRIOS 5A, 6A e 7A) com frequência de fluxos a cada 1000 anos



5.2.2.2 Simulações de aporte variável (CENÁRIOS 5,6 e7) e frequência de fluxos de 500 anos (sub-cenário B)

Como na bateria de simulações anterior A, essa bateria de simulações dos CENÁRIOS 5B, 6B e 7B retoma simulações com os mesmos padrões de aporte variável ao longo do tempo, mas aumenta a frequência de fluxos para intervalos de 500 anos, (Tabela 4).

De forma geral, nas simulações dos CENÁRIOS 5B, 6B e 7B repetem o mesmo o padrão em termos de alcance dos fluxos e de distribuição sedimentar dos subcenários A anteriores. Porém, nos CENÁRIOS 5B, 6B e 7B observa-se um maior preenchimento dos espaços disponíveis ao longo da paleosuperfície, ao fim de cada etapa de tempo, visto que há o dobro de aporte nos atuais cenários comparados aos anteriores. Obviamente, esses cenários com maior frequência de fluxos turbidíticos resultam em sistemas deposicionais com maiores dimensões e maiores espessuras totais depositadas em todos os domínios deposicionais dos sistemas turbidíticos simulados.

CENÁRIO 5B - Aporte variável entre 10.000-50.000-75.000 m³ com fluxos em intervalos de 500 anos

Mesmo com aumento da frequência de fluxos turbidíticos do CENÁRIO 5B para 1 fluxo a cada 500 anos, o resultado final da simulação apresenta os mesmos padrões distribuição sedimentar e configuração dos limites do sistema deposicional observados no CENÁRIO 5A (simulado com 1 fluxo a cada 1000 anos; Figura 54 e Figura 50). Porém nessa simulação do CENÁRIO 5B há maior dispersão lateral (expansão em área) e maior preenchimento da porção nordeste da região dos lobos terminais ao fim das sucessivas etapas de simulação (Figura 54). Observa-se também que no CENÁRIO 5B há um leve aumento da presença de areias médias ao longo da região de canais e dos lobos terminais (Figura 50 e Figura 54).

O CENÁRIO 5B resulta, contudo, em espessuras dos depocentros um pouco maiores na região de canais (cerca de 50-60m) e na região de lobos terminais (cerca de 30-40m), comparado ao CENÁRIO 5A simulado com menor frequência de fluxos (Figura 52 e Figura 56).

Cenário 6B - Aporte variável entre 25.000-75.000-50.000 m³ com fluxos em intervalos de 500 anos

O diferente regime de aporte sedimentar variável (25.000-75.000-50.000 m³) aplicado ao CENÁRIO 6B com a mesma frequência de fluxos (1 a cada 500 anos) resultou num preenchimento total do espaço disponível ao longo da paleosuperfície numa etapa evolutiva mais precoce que durante a simulação do CENÁRIO 6A anterior: o preenchimento total do espaço disponível que só ocorreu na etapa de 20ka no CENÁRIO 5B, já ocorre na etapa de 130ka durante a simulação do CENÁRIO 6B (Figura 54).

Outra diferença se dá também na observação da maior migração dos depósitos no sentido sudoeste tanto na região de canais quanto na região de lobos distais. Em termos de espessura total CENÁRIO 6B apresenta depocentros na região de canais com 60-70m e de 50-60 na região de lobos terminais (Figura 56).

CENÁRIO 7B - Aporte variável entre 60.000-180.000-100.000 m³ com fluxos em intervalos de 500 anos

O CENÁRIO 7B foi simulado com os maiores valores de aporte sedimentar variável ao longo do tempo de simulação com fluxos na frequência de 1 a cada 500 anos. Esse cenário resulta num preenchimento mais rápido dos espaços disponíveis da paleosuperfície que no CENÁRIO 7a anterior (Figura 55). Já ao final da etapa de simulação de 340ka, todo o espaço disponível da paleosuperfície para a deposição de um sistema turbidítico compatível com o Sistema Almirante Câmara já se encontra totalmente desenvolvido. Após essa etapa, observa-se a migração dos depósitos para sudoeste tanto na região de canais quanto na região de lobos terminais. Observa-se também, em relação ao CENÁRIO 7A, maior distribuição e alcance das areias médias ao longo de todo as porções do sistema turbidítico simulado.

O CENÁRIO 7B gerou as maiores espessuras totais dessa bateria de simulação de volumes de aporte variáveis com frequência de 1 fluxo a cada 500 anos, resultando em depocentros na região de canais acima de 70m e depocentros região de lobos terminais de 60-70m na (Figura 56). Com relação às espessuras geradas, observam-se depocentros maiores e mais contínuos com relação ao mesmo cenário de aporte mas com frequência de 1 fluxo a cada 1000 anos (CENÁRIO 6B).

A Figura 57 compila os mapas de espessura total dos CENÁRIOS 5B, 6B e 7B, simulados com diferentes variações de volume de aporte ao longo do tempo, mas todos evoluindo com fluxos a frequência contínua de 1 fluxo a cada 500 anos, e onde é possível melhor observar as diferenças de alcance dos fluxos, de configuração espacial dos depósitos e da distribuição das espessuras totais.

Figura 54 - Etapas de tempo das simulações que mostram a evolução da distribuição e alcance das fácies sedimentares dos CENÁRIO DE APORTE VARIÁVEL 5B e 6B com frequência de fluxos a cada 500 anos

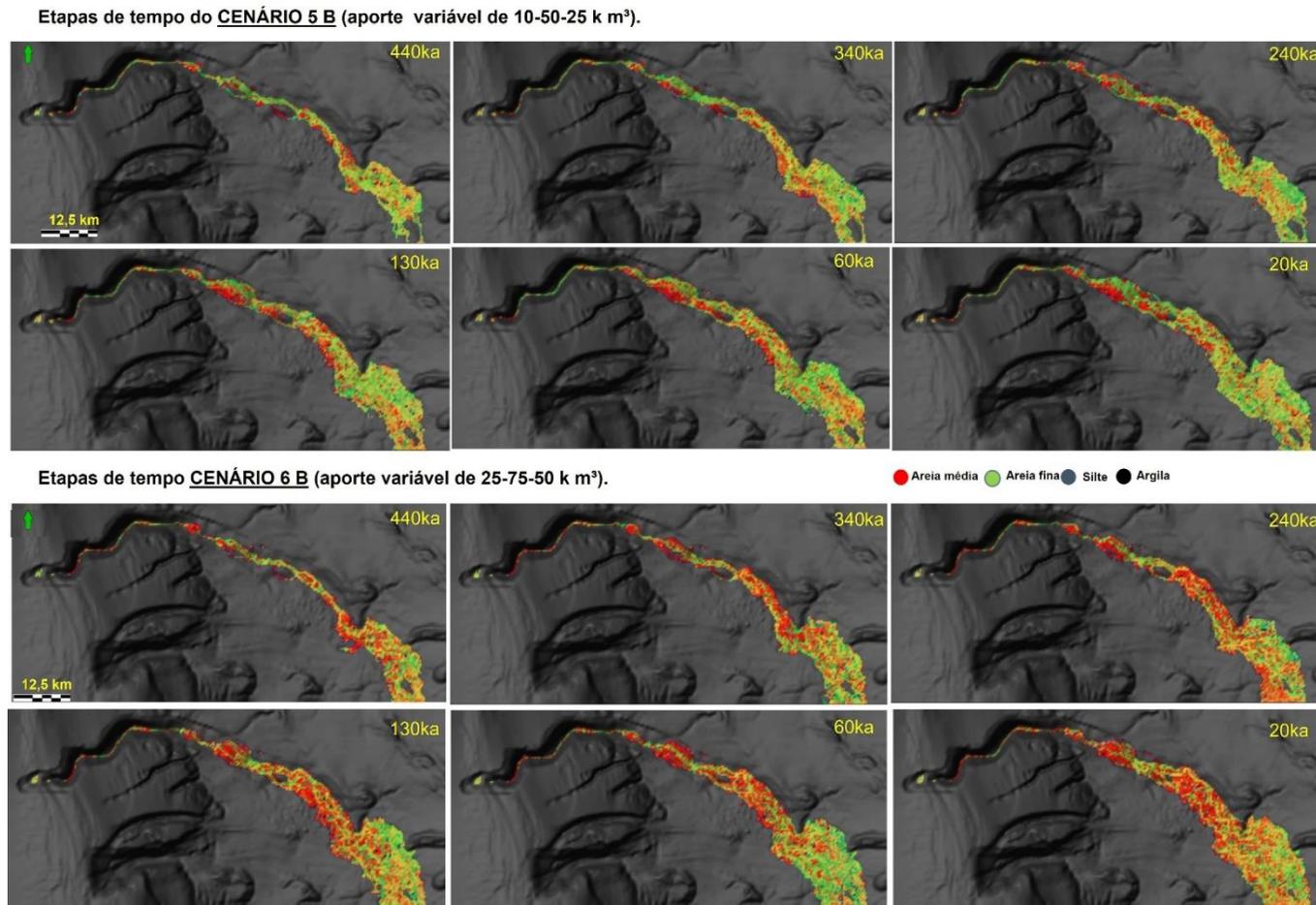


Figura 55 - Etapas de tempo das simulações que mostram a evolução da distribuição e alcance das fácies sedimentares do CENÁRIO DE APORTE VARIÁVEL 7B com frequência de fluxos a cada 500 anos

Etapas de tempo do CENÁRIO 7 B (aporte variável de 60-160-80k m³).

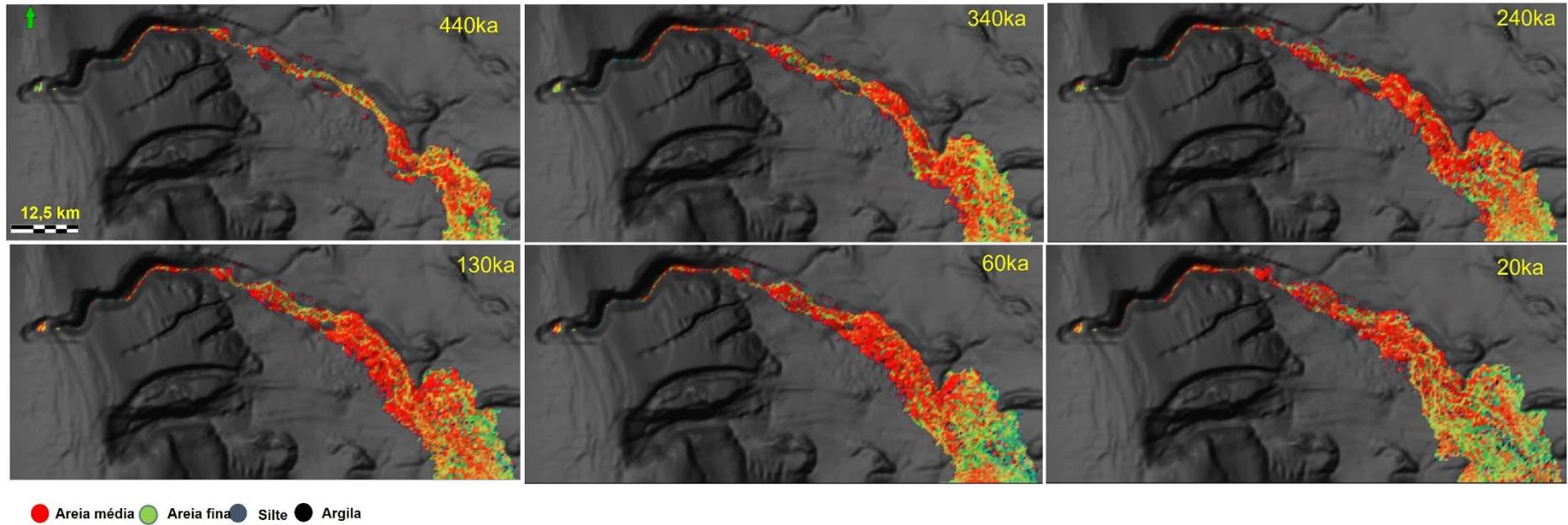


Figura 56 - Mapas de espessura total das simulações de CENÁRIO DE APORTE VARIÁVEL 5B,6B e 7B com frequência de fluxo a cada 500 anos

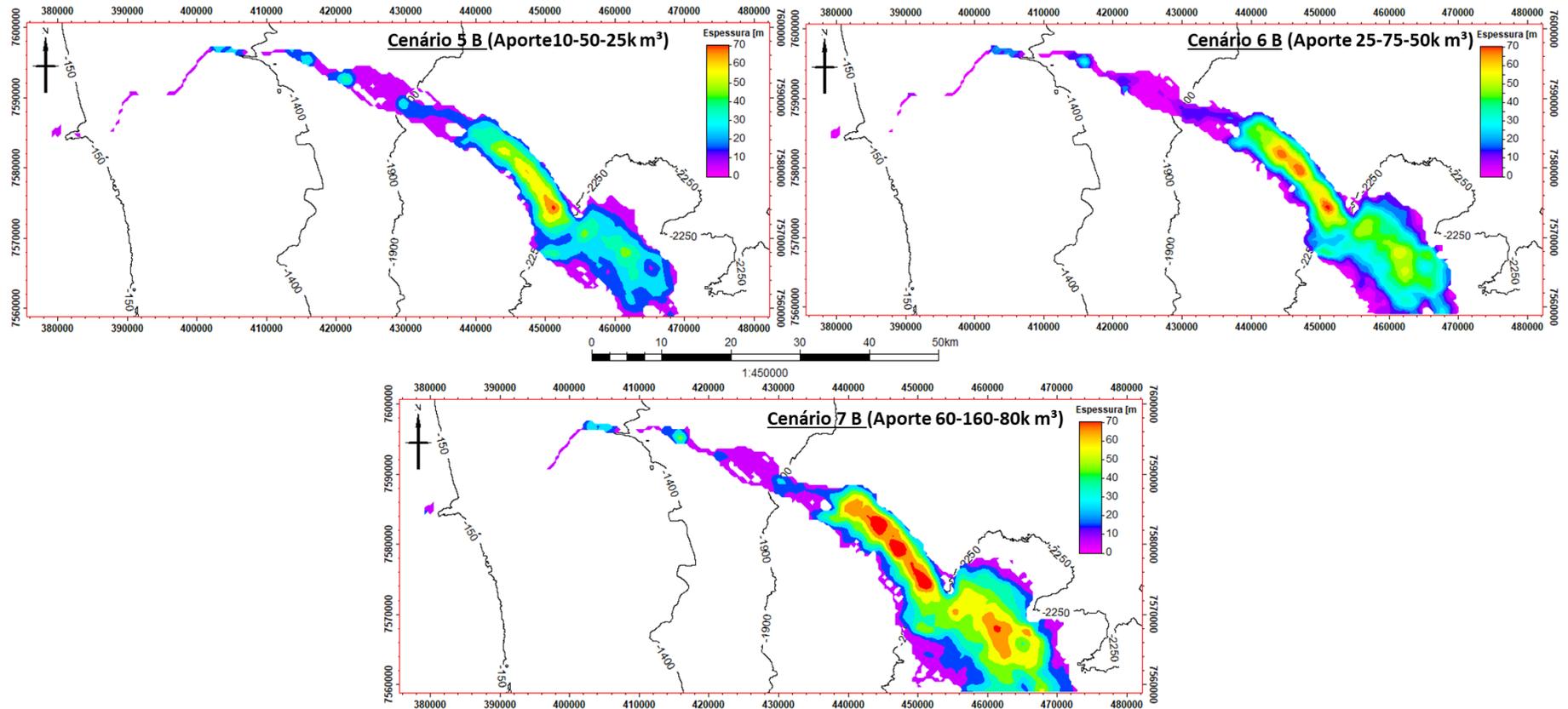
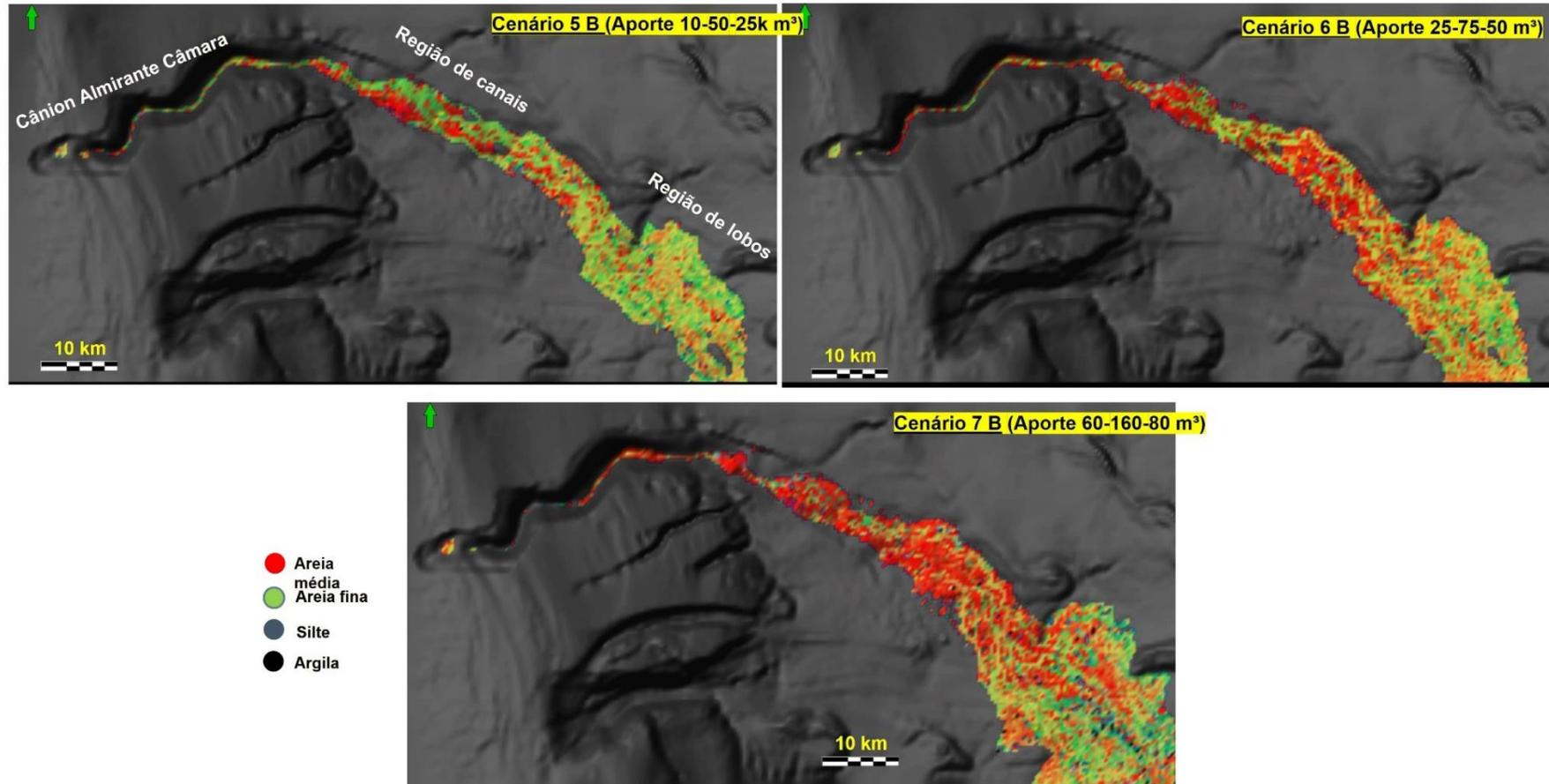


Figura 57 - Distribuição sedimentar final dos CENÁRIOS DE APORTE VARIÁVEL 5B, 6B e 7B, com frequência de fluxos a cada 500 anos



5.2.2.3 Simulações de aporte variável (CENÁRIOS 5 e 6) com frequência de 100 anos (sub-cenário C)

Nessa bateria de simulações, foram simulados somente dois cenários volume de aporte variável, desta vez com frequência de fluxo ainda maior de 1 fluxo a cada 100 anos (Tabela 4): regime de aporte variável de 10.000-50.000-75.000 m³ (CENÁRIO 5C) e regime de aporte variável 25.000-75.000-50.000 m³ (CENÁRIO 6C). O cenário de aporte variável 7 (que possui maior aporte) não foi simulado nessa frequência de fluxos, pois como será visto, os cenários de aporte variável 5 e 6 (que possuem menores valores de aporte) já resultaram em depósitos com dimensões muito discrepantes aos dados observados.

As simulações dessa bateria de testes com aplicação da mais alta frequência de fluxos resultaram em sistemas deposicionais com diferenças significativas em relação às simulações anteriores realizadas com menores frequência de fluxos (sub-cenários A e B), no que concerne a: o padrão de dispersão sedimentar, o nível de alcance de fluxos, a configuração final e a espessuras totais dos sistemas deposicionais. Devido às características bastante similares em termos de resultados, os CENÁRIOS 5C e 6C podem ser abordados em conjunto.

CENÁRIO 5C - (Aporte variável entre 10.000-50.000-75.000 m³) e CENÁRIO 6C (Aporte variável entre 25.000-75.000-50.000 m³) com fluxos em intervalos de 100 anos

Nesses dois cenários ocorrem (Figura 58 e Figura 59): **(i)** desde a etapa iniciais de simulação dos dois cenários em 440 ka, os fluxos já alcançam e preenchem a parte distal dos sistemas turbidíticos; **(ii)** nos 2 cenários, as zonas de deposição alcançam a mesma dimensão em área e a mesma configuração geométrica até o final da etapa de 240ka. Mas vale a pena notar variações na distribuição das fácies sedimentares. Nesse do CENÁRIO 6C, há distribuição mais homogênea e de maior alcance distal de areias médias (em vermelho na Figura 58); **(iii)** ao final da etapa de 130ka, os dois cenários apresentam uma diferença no tocante às direções de dispersão dos fluxos, que continuam a predominar em direção sudeste no CENÁRIO 5C, enquanto no CENÁRIO 6C começa-se a observar desenvolvimento de uma direção secundária de fluxo para leste, podendo se tratar de processo semelhante à avulsão, alterando a configuração até então homogênea nos 2 cenários; **(iii)** ao longo da simulação da etapa 60ka, um eixo secundário semelhante de dispersão sedimentar em direção leste se implanta no sistema

deposicional simulado no CENÁRIO 5C, enquanto no CENÁRIO 6C, o eixo secundário de dispersão sedimentar para leste passa a desempenhar importância crescente, apto de promover o desenvolvimento final de uma ampla zona deposicional, de contornos complexos. Durante o desenvolvimento dessas etapas, observa-se variações na distribuição das fácies sedimentares, com tendência de haver distribuição mais homogênea e de maior alcance distal de areias médias no caso do CENÁRIO 6C (em vermelho na Figura 58);

Ao final das simulações, os CENÁRIOS 5C e 6C resultaram em sistemas deposicionais de contornos externos bastante semelhantes, porém de dimensões e de espessura total distintas (Figura 58): no CENÁRIO 5C a região de canais superiores apresenta espessura de 130m, região de lobos distais distam 80m na distal e espessuras, e a região originada pelos fluxos para leste resulta numa espessura total de 10m; no CENÁRIOS 6C, a região de canais apresenta espessuras superiores a 150m, a região de lobos distais apresenta espessura de 100m, enquanto a região originada pelos fluxos para leste resulta numa espessura total maior, de cerca de 20m.

Vale finalmente ressaltar que as simulações dos CENÁRIOS 5C e 6C resultaram em configurações espaciais e de espessura dos sistemas turbidíticos modelados que podem ser considerados bastante anômalos e irrealistas, quando comparados às características conhecidas do Sistema Turbidítico Almirante Câmara, foco do estudo (Figura 59 e Figura 60).

Figura 58 - Etapas de tempo das simulações que mostram a evolução da distribuição e alcance das fácies sedimentares dos CENÁRIOS DE APORTE VARIÁVEL 5C e 6C com frequência de fluxos a cada 100 anos

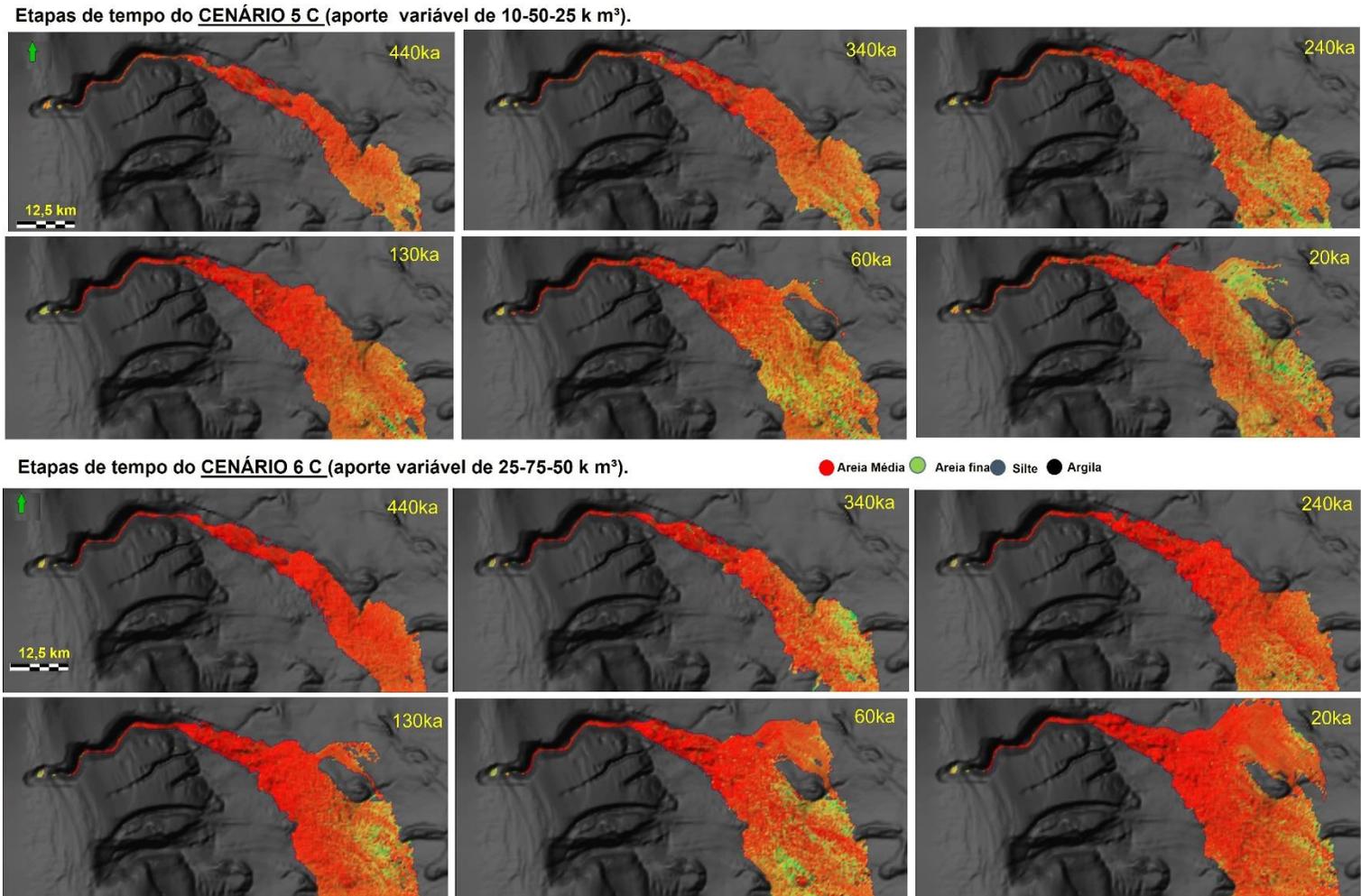


Figura 59 - Mapas de espessura total das simulações dos CENÁRIOS DE APOORTE VARIÁVEL 5C e 6C com frequência de fluxo a cada 100 anos

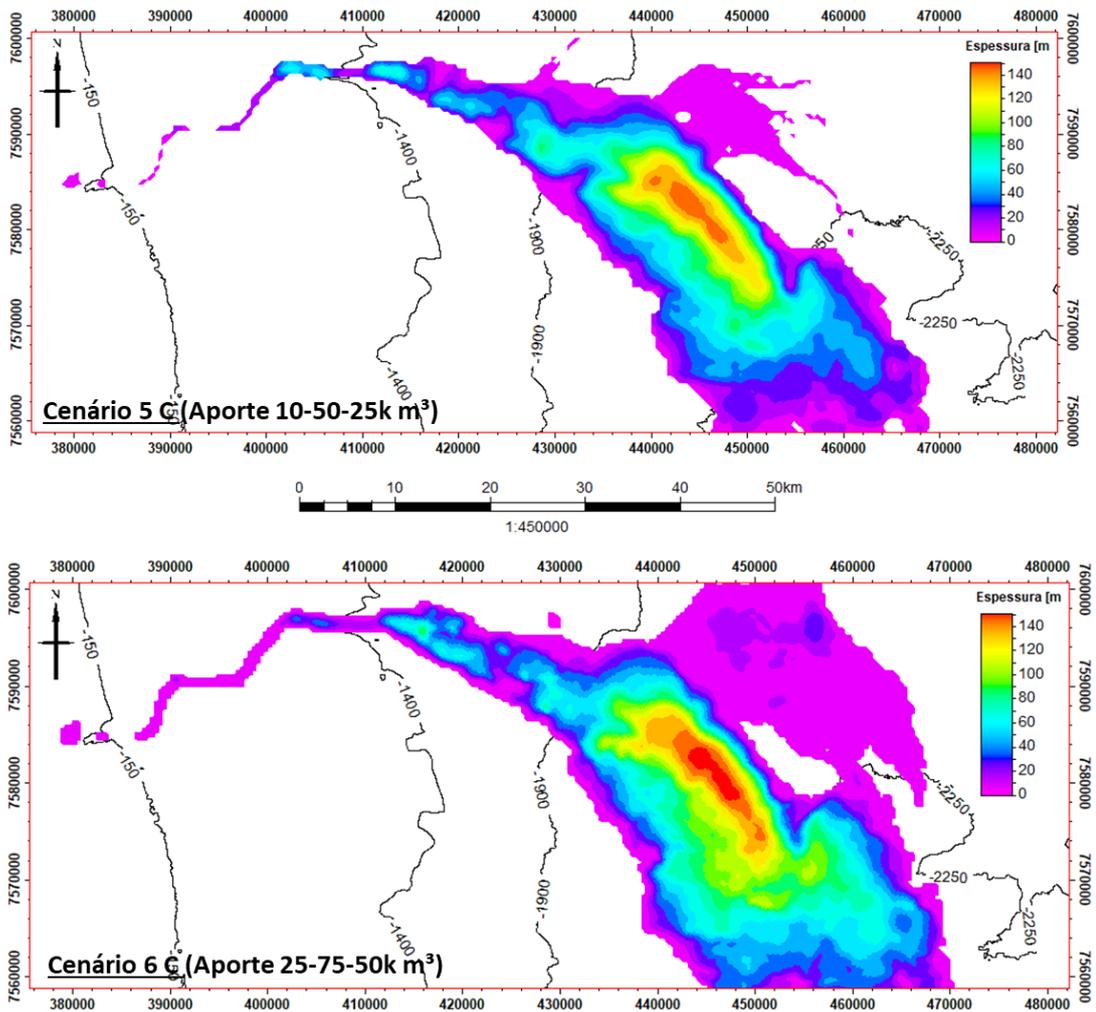
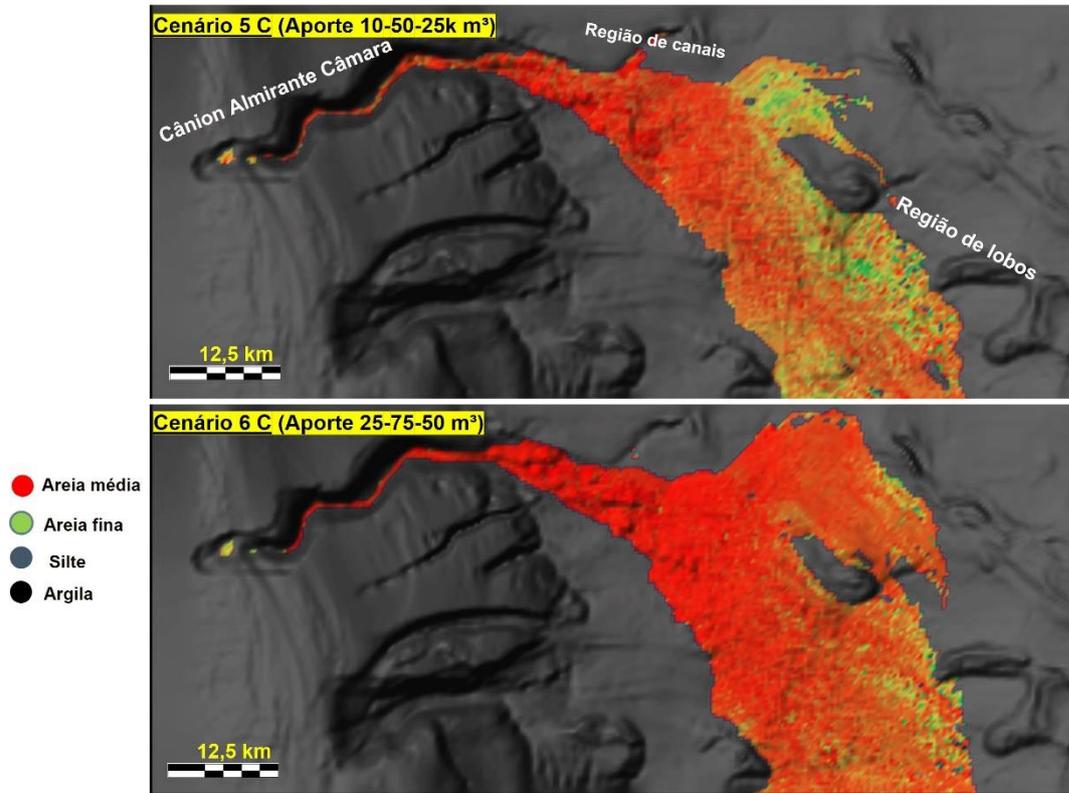


Figura 60 - Distribuição sedimentar final dos CENÁRIOS DE APORTE VARIÁVEL 5C e 6C, com frequência de fluxos a cada 100 anos



5.2.3 Simulações de variação do parâmetro erodibilidade (CENÁRIO 8)

O CENÁRIO 8 testou a sensibilidade da simulação utilizando o parâmetro *erodibilidade*=1. Os demais parâmetros são mantidos idênticos aos do CENÁRIO 6B de aporte variável (com frequência de 1 fluxo a cada 500 anos, **item 5.2.2.2**) como base para uma nova simulação.

Observando-se a evolução da simulação ao longo das etapas de tempo, é possível notar algumas diferenças em termos de distribuição de fácies e dimensões dos depósitos (Figura 61), ao compararmos os resultados do CENÁRIO 8 ao CENÁRIO 6B. Em termos de alcance dos fluxos, não se nota grandes diferenças, visto que os sucessivos fluxos vão preenchendo as regiões de canais e de lobos terminais, com o mesmo padrão de migração lateral para sudoeste anteriormente vista na simulação do CENÁRIO 6B (Figura 57), apesar de observar-se uma maior dimensão na largura da região de lobos terminais. Em termos de espessuras finais geradas, observa-se maiores dimensões dos depocentros ao longo do sistema (Figura 62): (i) a região do cânion apresenta acumulações esparsas, com espessura de até 70m; (ii) a região de canais resulta numa deposição mais contínua, com espessuras superiores a 70m; e (iii) a região de lobos apresenta espessura total de cerca de 60m. Além disso, observou-se que ocorre deposições em determinadas regiões no caso do CENÁRIOS 8 que não foram verificadas no caso CENÁRIOS 6B, como por exemplo dentro da feição de cânion (Figura 62). Essas diferenças são explicadas justamente pelo fato de que os fluxos simulados no CENÁRIOS 8 possuem maior capacidade de erodir o substrato e de dispersar sedimentos ao longo da paleosuperfície deposicional.

Observa-se também em toda as etapas da simulação, maiores proporções de sedimentos mais finos (tons mais escuros; Figura 61) depositados ao longo de todo o sistema deposicional, evidenciando uma maior heterogeneidade faciológica.

Figura 61 - Etapas de tempo das simulações que mostram a evolução da distribuição e alcance das fácies sedimentares do cenário 8

Etapas de tempo do **CENÁRIO 8** - (Parâmetros do CENÁRIO 6 B com Erodibilidade=1)

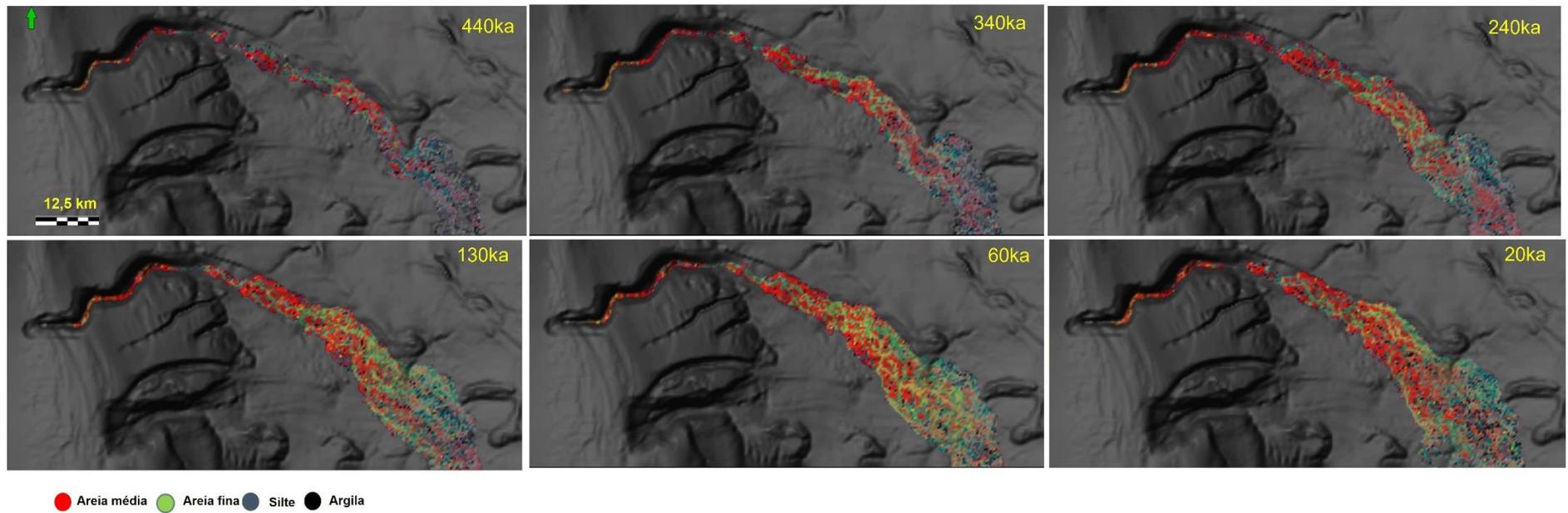
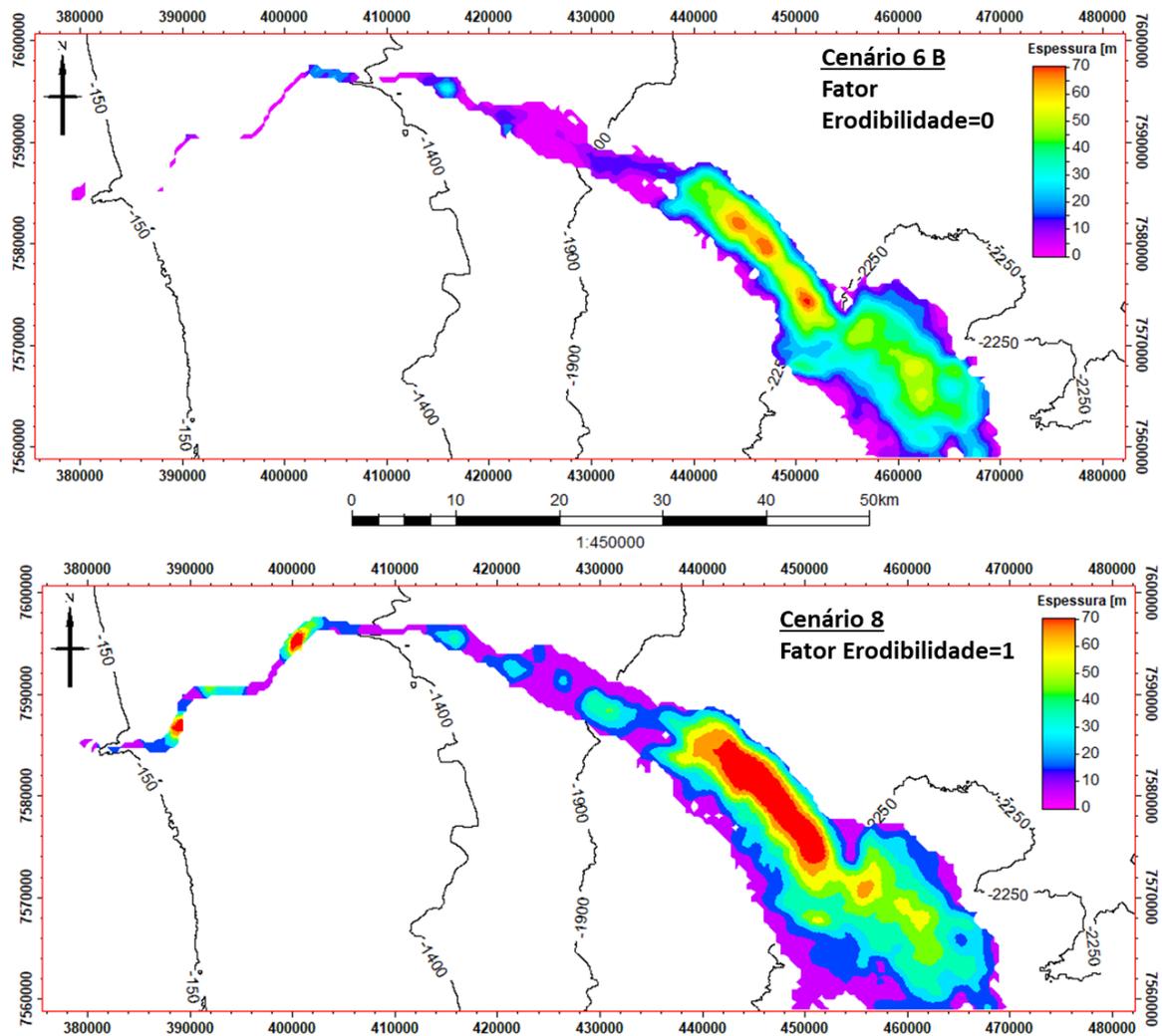


Figura 62 - Comparação entre os mapas de espessura total dos CENÁRIOS 6B e 8



5.2.4 Simulações com variação do gradiente do cânion da paleosuperfície (CENÁRIOS 9 e 10).

As simulações anteriores trataram de mostrar os diferentes depósitos gerados através da variação de volume de água (leia-se *volume de aporte sedimentar* para fins de simulações) e a variação da frequência com que os fluxos turbidíticos eram disparados da área-fonte, mantendo-se todas as demais variáveis fixas. A fim de testar-se a sensibilidade das simulações com uma variação de gradiente da paleosuperfície original, foram confeccionadas duas novas paleosuperfícies: uma com incremento na declividade do talude de $0,25^\circ$ (CENÁRIO 9) e outra com o decréscimo de $0,25^\circ$ (CENÁRIO 10). Essas 2 simulações foram realizadas mantendo-se os mesmos valores de parâmetros do CENÁRIO 6B (Aporte variável 25.000-75.000-50.000 m³ com fluxos em intervalos de 500 anos; item 5.2.2.2)

5.2.4.1 CENÁRIO 9 – Cânion da paleosuperfície com incremento de $0,25^\circ$

Na simulação do CENÁRIO 9, com a aplicação de uma maior declividade ao cânion da paleosuperfície observam-se (Figura 63): (i) o mesmo padrão de deposição se repete ao longo de todas as etapas da simulação, havendo preenchimento sedimentar em todas as porções do sistema turbidítico (cânion, região de canais e região de lobos terminais), ao mesmo tempo que as áreas de deposição se expandem para sudoeste. Além disso, os depósitos na região de lobos não extrapolam essa paleosuperfície incremento de $0,25^\circ$ no extremo sudeste, como ocorreu na simulação com a paleosuperfície original do CENÁRIO 6B; (ii) ao longo de todas as etapas da simulação, há maior concentração de areias médias sempre nas porções mais proximais do sistema turbidítico (em vermelho na Figura 63).

Em termos de espessura total, o principal depocentro se localiza na região dos canais (espessuras > 70), enquanto a região de lobos terminais apresenta menores espessuras de ~50m (Figura 65(a)). Ao se comparar os mapas de espessura total do CENÁRIO 6B (mesmos parâmetros de simulação e com a declividade do paleocânion original; Figura 65(b)) com os resultados do CENÁRIO 9 (simulado com incremento de $0,25^\circ$ de declividade ao paleocânion original; Figura 65(a)), observa-se que o aumento da declividade do cânion da paleosuperfície resultou em depocentros mais amplos e mais proximais em sua localização. Em termos de distribuição de fácies, a simulação CENÁRIO 9 (Figura 63e Figura 56) mostra uma maior concentração maior das areias médias nas porções mais proximais do sistema turbidítico que

no caso do modelo CENÁRIO 6B simulado com a declividade original da paleosuperfície (Figura 54 e Figura 56).

5.2.4.2 CENÁRIO 10 – Cânion da paleosuperfície com decréscimo de $0,25^\circ$

Na simulação do CENÁRIO 10, com a aplicação de uma menor declividade ao cânion da paleosuperfície observam-se (Figura 64): (i) novamente o mesmo padrão de deposição ao longo de todas as etapas da simulação, havendo preenchimento sedimentar em todas as porções do sistema turbidítico (cânion, região de canais e região de lobos terminais), ao mesmo tempo que as áreas de deposição se expandem para sudoeste. Porém, nesse cenário, mesmo ao fim da simulação (mapa de 20ka, Figura 64) os fluxos não preencheram uma pequena porção nordeste da região de lobos terminais (indicada pela seta no mesmo mapa). Além disso, nesse cenário os depósitos extrapolam, no extremo sudeste na região de lobos, os limites da paleosuperfície (indicado pela seta no mapa de 440ka, Figura 64), como ocorreu na simulação com a paleosuperfície original do CENÁRIO 6B; (ii) ao longo de todas as etapas da simulação, as areias médias (em vermelho na Figura 63) que tendiam a se concentrar mais na região de canais (no CENÁRIO 6B), aparecem em maior concentração também na região de lobos, sugerindo que com a paleotopografia do CENÁRIO 10 tenha-se promovido maior alcance dos fluxos. Em termos de espessura total, o principal depocentro se localiza na região dos lobos (espessuras $\sim 60\text{m}$), enquanto a região de canais apresenta menores espessuras de $\sim 50\text{m}$ (Figura 65(c)). Ao se comparar os mapas de espessura total do CENÁRIO 6B (mesmos parâmetros de simulação e com a declividade do paleocânion original; Figura 65(b)) com os resultados do CENÁRIO 10 (simulado com decréscimo de $0,25^\circ$ de declividade ao paleocânion original; Figura 65(c)), observa-se que a diminuição da declividade do cânion da paleosuperfície resultou em depocentros mais alongados e mais distais em sua localização, e também em menores espessuras depositadas na região de canais.

Figura 63 -- Etapas de tempo das simulações que mostram a evolução da distribuição e alcance das fácies sedimentares CENÁRIO 9

Etapas de tempo do **CENÁRIO 9** (Parâmetros do cenário 6B considerando uma declividade de mais 0.25° no cânion da paleosuperfície).

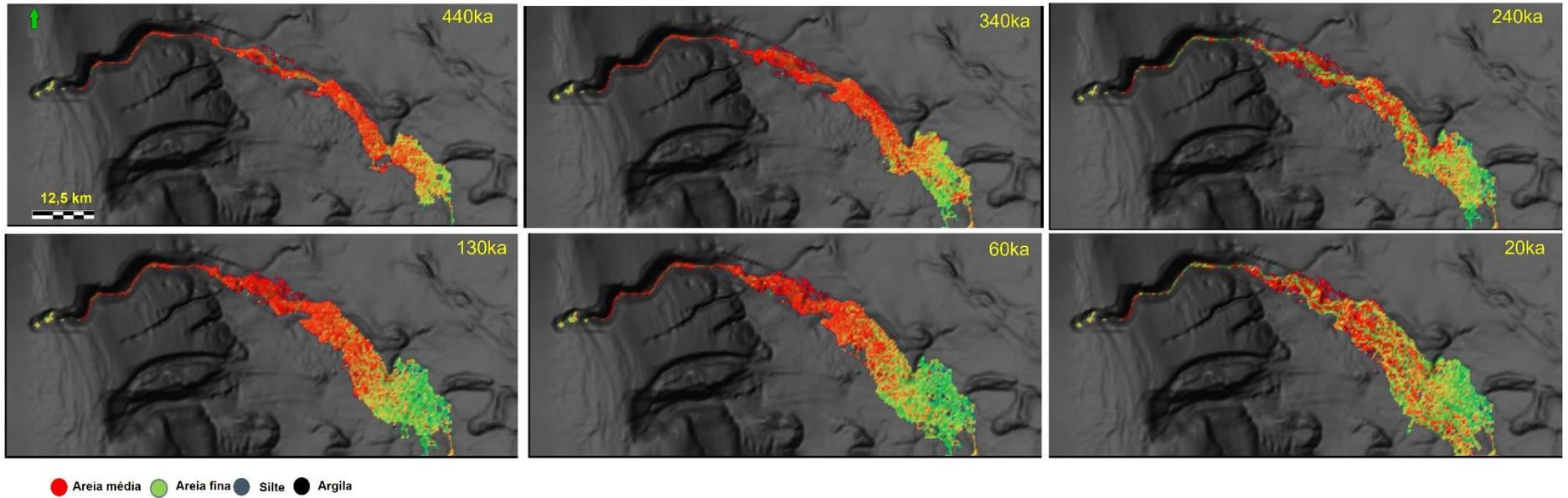


Figura 64 - Etapas de tempo das simulações que mostram a evolução da distribuição e alcance das fácies sedimentares do CENÁRIO 10

Etapas de tempo do **CENÁRIO 10** (Parâmetros do cenário 6B considerando uma declividade de menos 0.25° no cânion da paleosuperfície).

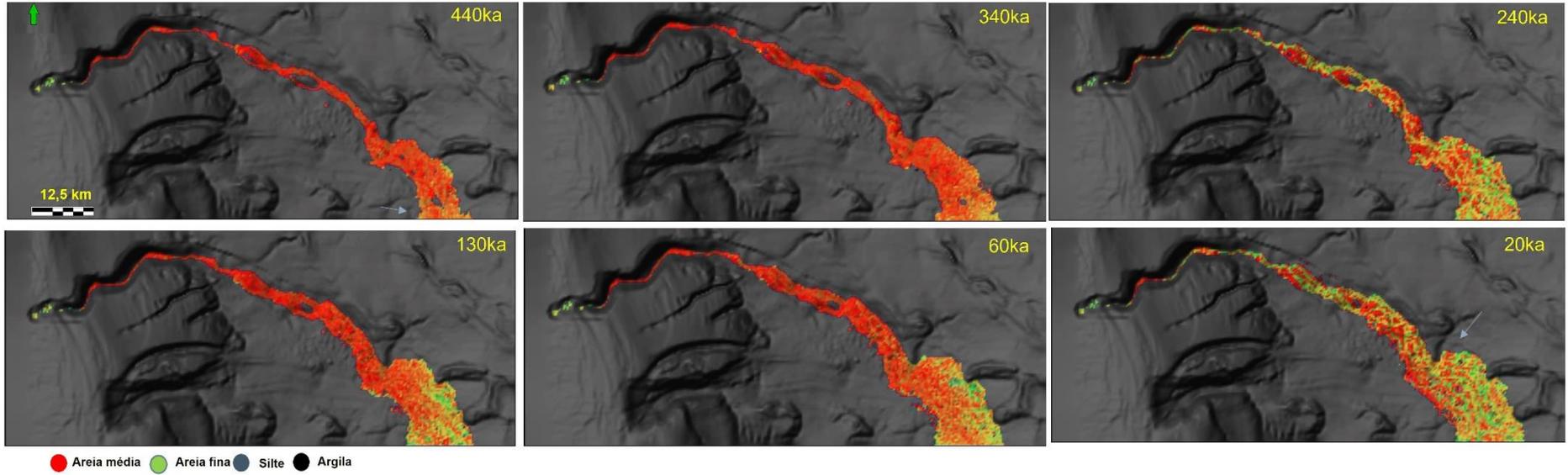
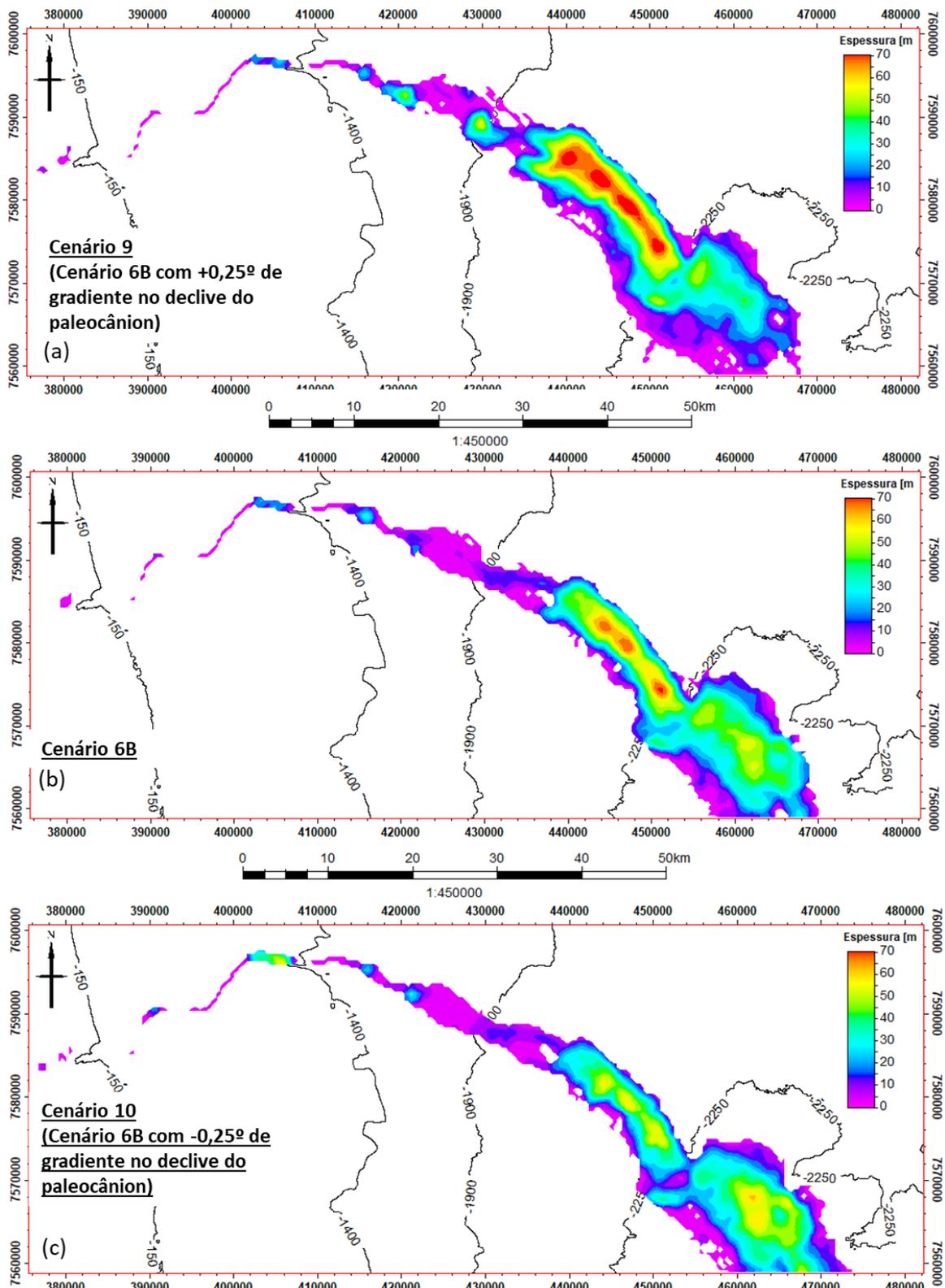


Figura 65 – Mapas de espessura finais para as simulações com variação gradiente no declive do cânion (CENÁRIOS 9 e 10) comparados ao mapa de espessura do CENÁRIO 6B



6 DISCUSSÕES

Numerosas baterias de simulações estratigráfico-sedimentológicas foram conduzidas no presente estudo com base: (i) os aspectos estratigráficos, arquiteturais, sedimentológicos, e de idades conhecidos do Sistema Turbidítico Almirante Câmara conhecidos; e (ii) a inserção de distintos cenários-teste através da variações de valores de uma série de outros parâmetros desconhecidos da área de estudo em questão como, por exemplo, taxas variáveis de aporte sedimentar – tanto constantes quanto variáveis, distintas frequências de fluxos turbidíticos de entrada no sistema, etc. Os resultados dessas baterias de simulações nos oferecem um vasto panorama para discussão sobre a interação de vários parâmetros deposicionais e de seus efeitos finais sobre a evolução de um sistema turbidítico canalizado, como é o caso do Sistema Turbidítico Almirante Câmara.

Os resultados finais das baterias de simulação revelam sistemas deposicionais com características finais bastante distintas em termos de: padrão de distribuição/dispersão sedimentar; alcance dos fluxos confinados ou espalhados; configuração externa e dimensões da área total de deposição; configuração e localização dos principais depocentros, espessura total da deposição ao longo das diferentes porções do sistema turbidítico simulado (cânion, região de canais; região de lobos terminais).

Finalmente, a comparação entre resultados dos vários cenários simulados com os dados da sísmica 3D, com os dados sedimentológicos-estratigráficos dos testemunhos e com os dados da bibliografia, permite a proposição de um modelo conceitual possível que explique as condições de deposição e evolução arquitetural do Sistema Turbidítico Almirante Câmara. Para a condução da DISCUSSÃO, a apreciação das implicações dos diferentes resultados das simulações foi dividida em três grandes subitens: (6.1) Comparação da análise da sísmica 3D com os dados levantados; (6.2) Impacto da variação do volume e frequência dos aportes nos modelos simulados; (6.3) Proposição de Modelo conceitual para a deposição do Sistema Turbidítico Almirante Câmara e para a arquitetura deposicional. Em todos, os subitens a discussão dos resultados das simulações e a comparação com dados geológicos disponíveis será

mais focada na região de lobos terminais, por essa concentrar mais informações de trabalho anteriores.

6.1 Comparação da análise da sísmica 3D com os dados levantados

Os resultados da análise e mapeamento dos dados sísmicos (item 5.1) permitiu: o imageamento da distribuição dos diferentes domínios deposicionais sedimentológicos das diferentes granulometrias das areias de todo o sistema turbidítico Alm. Câmara (Figura 32); a identificação do topo e base dos depósitos estudados (Figura 34); e, o mapeamento sísmico para definição da paleosuperfície deposicional que foi utilizada nas simulações numéricas (Figura 36).

A partir do mapa de atributo de mínima amplitude (Figura 32) confeccionado e identificação dos diferentes padrões de empilhamento das anomalias de amplitude (Figura 33) é possível classificar de forma geral diferentes domínios deposicionais ao longo do sistema estudado (Figura 66):

- (1) O cânion Almirante Câmara, por apresentar baixas assinaturas de anomalias de amplitude indicativas da presença de deposição de areias, e por estar em um em região de mais alto gradiente, corresponde à zona de transferência sedimentar, passagem de fluxos e a uma região de alta taxa de erosão;
- (2) O padrão de distribuição das granulometrias de areias nas regiões 1 e 2 trata-se da zona distributária do sistema turbidítico. A diferença entra a zona 1 (canais discretos) e a zona 2 (canais amalgamados) deve-se a ocorrência de gradiente mais alto na zona 1 (e maior confinamento) e gradiente mais moderado na zona 2 (maior migração lateral dos canais);
- (3) A zona 3, que se distribui ao longo da área dos mais baixos gradientes, se caracteriza pela zona de desconfinamento dos fluxos e logo pela deposição dos lobos terminais.

Essa distribuição dos depósitos de areia nas zonas 1, 2 e 3 do sistema turbidítico serviu como referência para a escolha das simulações numéricas que melhor reproduziram os dados observados.

Foi possível também a identificação e correlação dos elementos deposicionais definidos nas linhas sísmicas de alta resolução em Abreu, et al (2005) nas seções sísmica do volume 3D utilizado no presente trabalho, como mostra a Figura 67. Essa identificação dos elementos deposicionais do trabalho anterior contribuiu para a melhor delimitação da paleosuperfície (item 5.1) a ser utilizada nas simulações numéricas.

O mapa de espessura total entre os dois horizontes (fundo do mar e paleosuperfície) sísmicos interpretados na sísmica 3D (item 5.1) apresenta, de maneira geral, geometria, espessura e depocentros compatíveis (Figura 68) com o mapa de espessura total (Figura 37) dos lobos 1,4 e 5 de Abreu et al. (2005). Apesar disso, é possível notar que o mapa de espessura do presente trabalho apresenta depocentros com cerca de 15m menores que o mapa dos lobos de Abreu, et al (2005). Outra diferença que pode ser notada, é a maior extensão da geometria do lobo na porção nordeste do mapa do presente trabalho, comparado ao trabalho anterior. Essas pequenas diferenças entre os mapas são esperadas e são explicadas pelo fato de serem resultados de interpretações diferentes sobre dados sísmicos distintos. O presente trabalho utilizou uma sísmica 3D convencional, que possui menor resolução vertical e lateral comparada ao trabalho de Abreu et al. (2005), que utilizou como base linhas sísmicas 2D de alta resolução (com refletores com resolução de 3m), onde foi possível a distinção e individualização dos lobos. O mapa de espessura do presente trabalho também serve como referência para escolha das simulações numéricas mais próximas aos dados observados.

Figura 66 – Atributo sísmico de mínima amplitude destacando as ocorrências de depósitos arenosos ao longo do sistema turbidítico Almirante Câmara

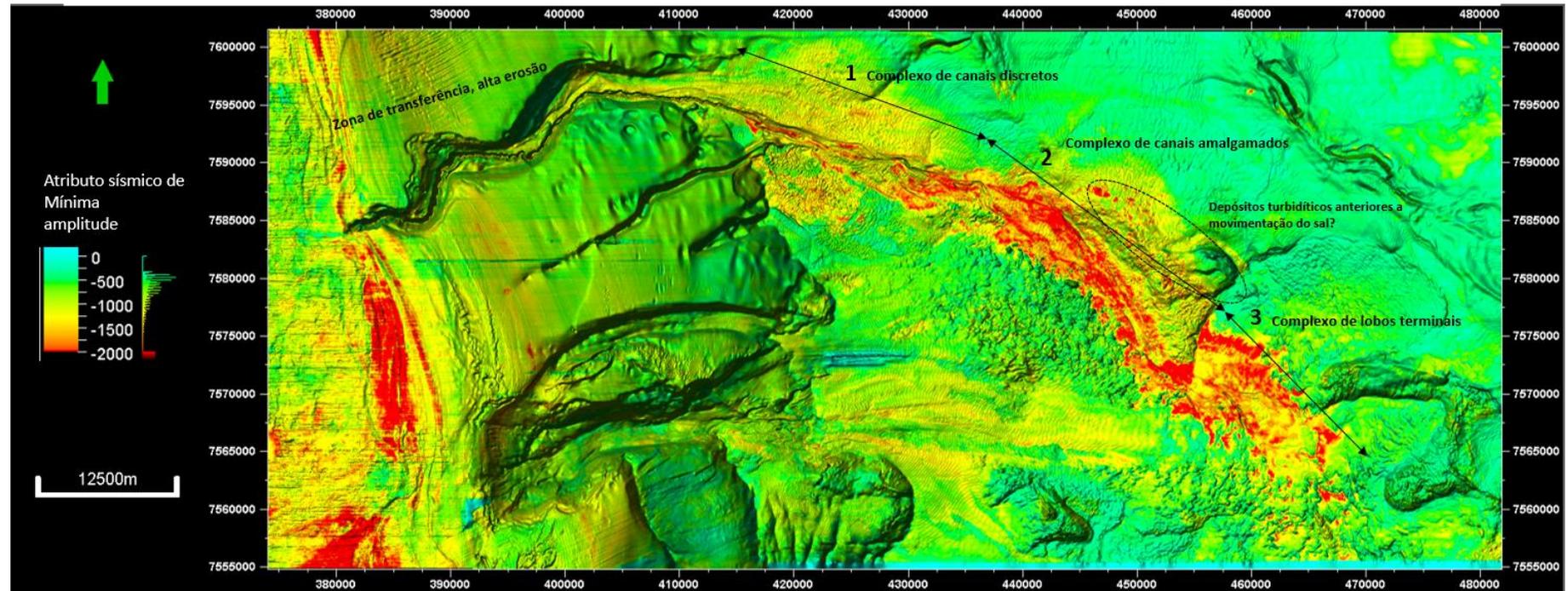


Figura 67- Comparação dos elementos deposicionais definidos por Abreu et al (2005) na linha sísmica 2D com uma seção sísmica do volume 3D utilizado no presente trabalho

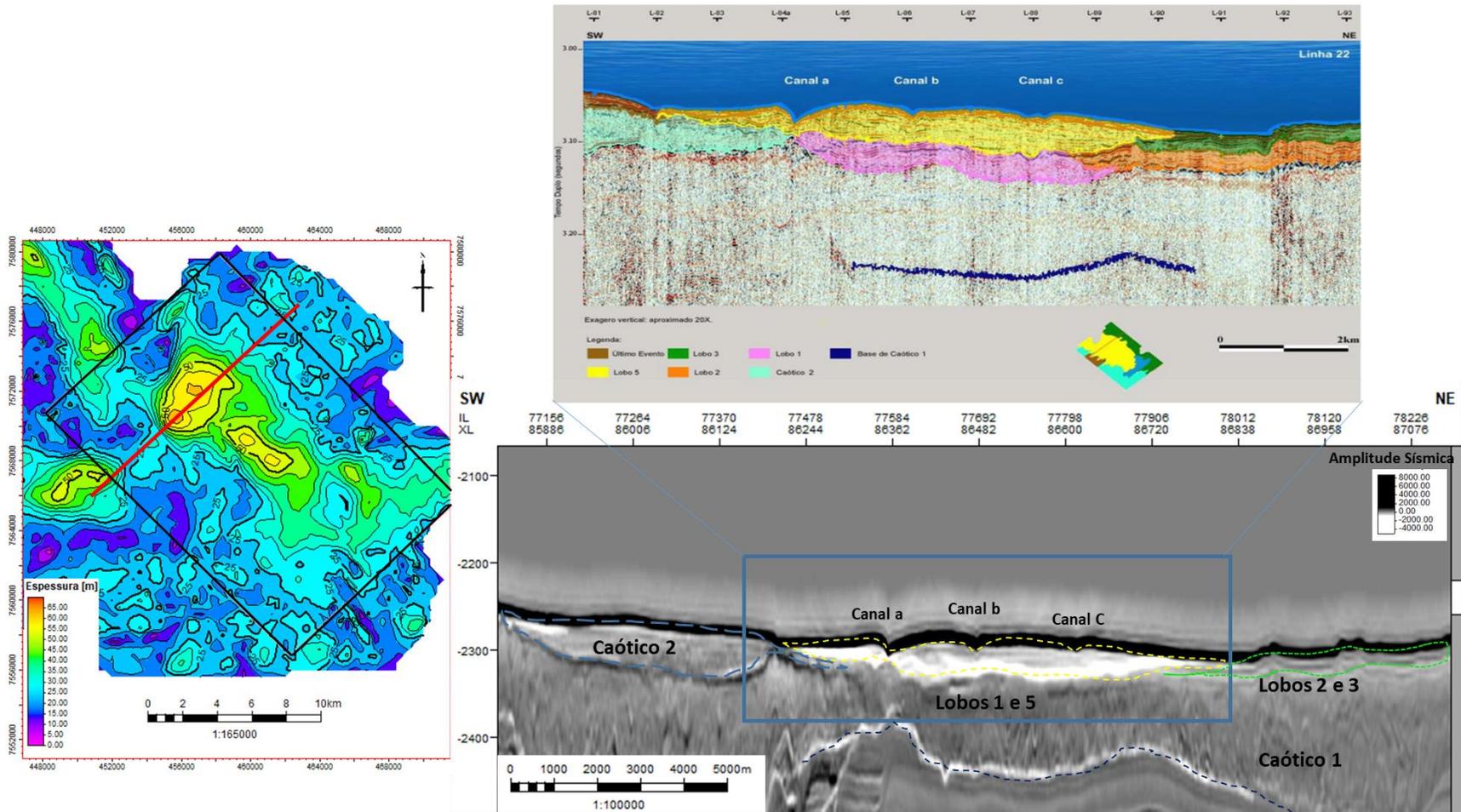
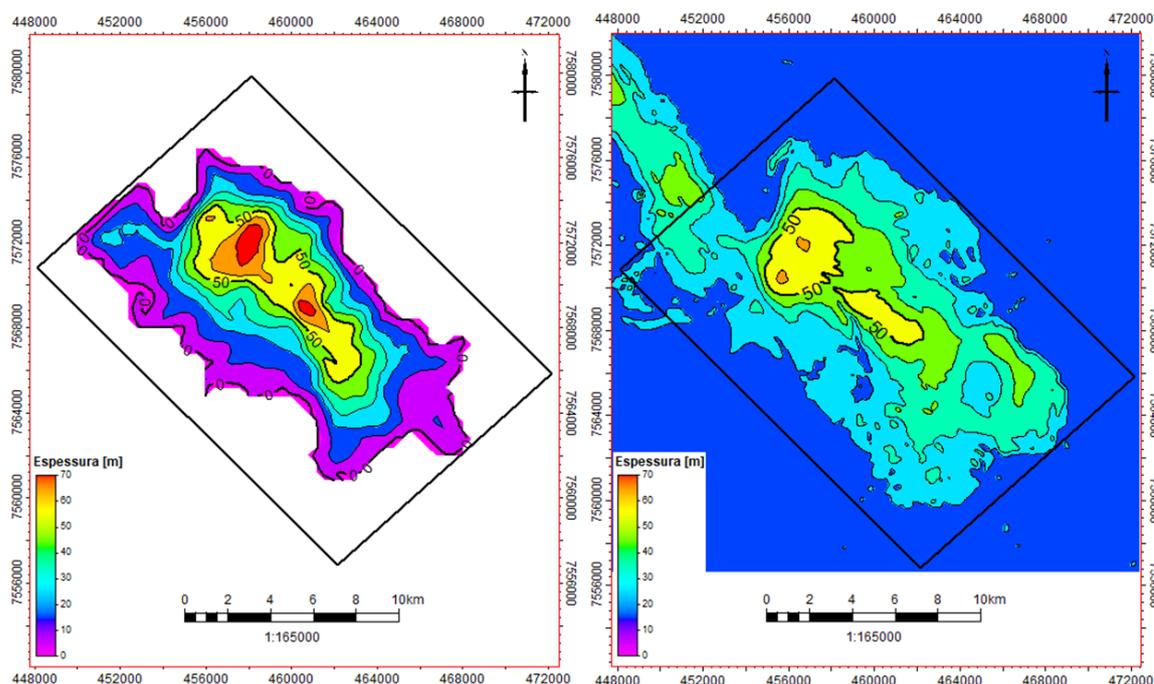


Figura 68 – Comparação isópaca de lobos 1,4 e 5 de Abreu et al. (2005) com isópaca dos horizontes interpretados na sísmica 3D



Legenda: À esquerda o mapa de espessura dos lobos 1,4 e 5 de Abreu et al. (2005) e à direita o mapa de espessura total entre os horizontes sísmicos interpretados na sísmica 3D neste trabalho. O polígono em preto representa a área de estudo de Abreu et al. (2005).

6.2 Impacto da variação do volume e frequência dos aportes nos modelos simulados

A integração dos resultados apresentados das diversas baterias de simulação (itens 5.2.1 a 5.2.4) permite uma melhor compreensão do impacto das principais variáveis, quando atuantes isoladamente ou acopladas, nos processos de deposição de fluxos turbidíticos, tais como o efeito de: (1) diferentes volumes de aporte de água (que define o volume de aporte sedimentar); (2) variação da frequência dos fluxos disparados a partir da área-fonte; (3) variação da capacidade de erosão dos fluxos e (4) variação na declividade da paleosuperfície de deposição dos sistemas turbidíticos simulados.

A compreensão da eficiência de transporte de sedimentos, do alcance e da geometria deposicional dos fluxos turbidíticos é essencial para o modelador, assim como quais variáveis fazem-se necessárias a ser ajustadas para disparar fluxos turbidíticos a partir da área-fonte, que sejam capazes de reproduzir as características deposicionais dos depósitos analisados. Portanto, para a confecção de modelos numéricos satisfatórios, exigem-se diversos ajustes de calibração das variáveis abordadas, como também a compreensão de da interação entre elas.

6.2.1 Relação entre volume de aporte sedimentar e frequência de fluxos disparados da área-fonte

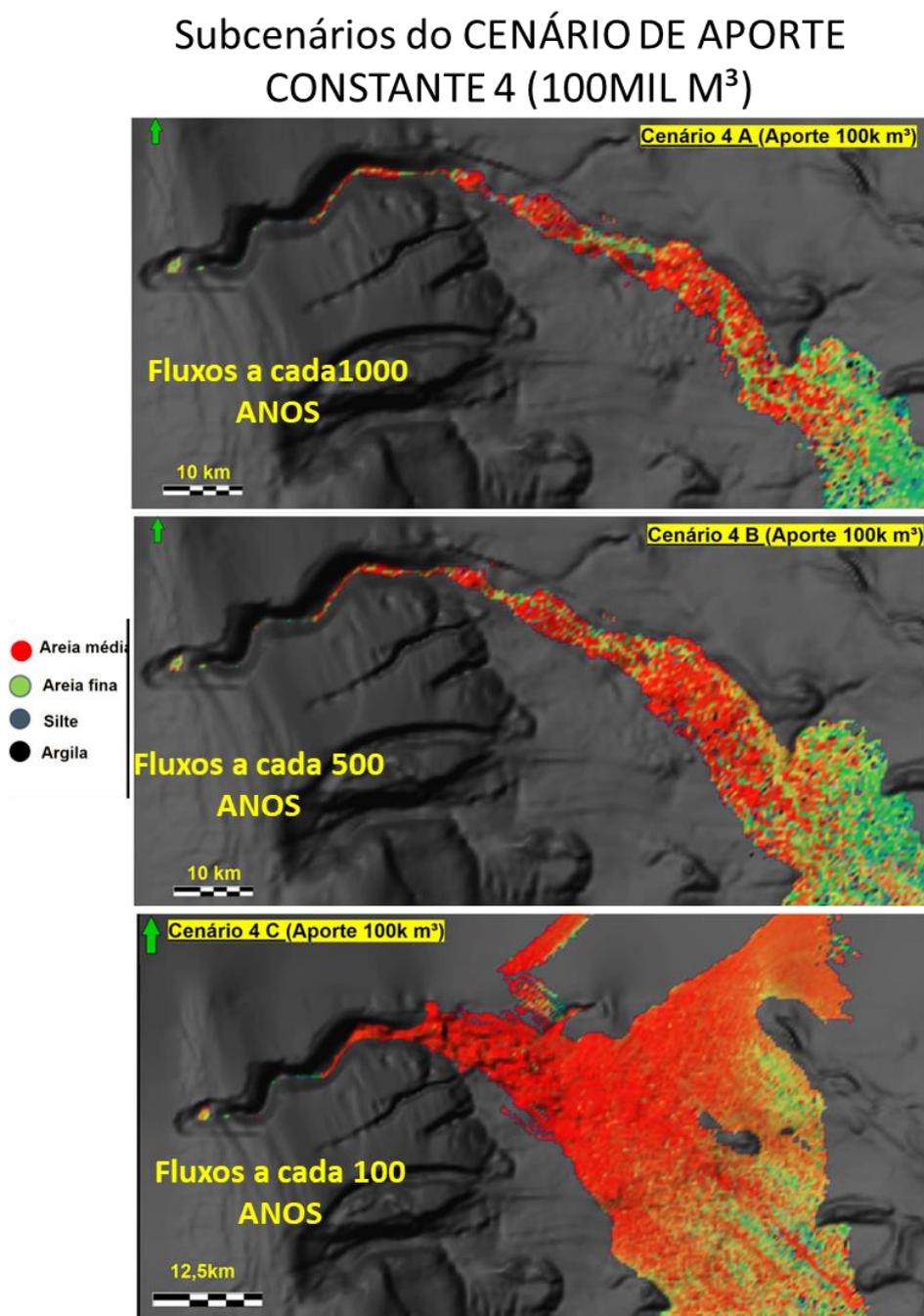
Analisando os resultados das simulações em termos de alcance dos fluxos, da distribuição dos sedimentos e das espessuras finais de todos os cenários simulados, observa-se que é necessário um ajuste fino entre os valores do *volume de aporte sedimentar* e a *frequência de fluxos*, a fim de se gerar simulações compatíveis com os dados geológicos observados no caso real do sistema Turbidítico Almirante Câmara. Pois, como foi visto, ambas variáveis são responsáveis pelo acréscimo de sedimentos a serem depositados durante os períodos de atividade da área-fonte.

Ao isolarmos uma das variáveis, temos que a variação de *volume de aporte d'água* (logo de *aporte sedimentar*) para uma mesma frequência de disparados dos fluxos, resulta em modelos deposicionais distintos em termos de alcances dos fluxos, arquitetura deposicional, distribuição dos sedimentos e espessuras finais dos depósitos. Tal resultado observado faz naturalmente sentido, visto que quanto maior o volume de água (mantendo todas as demais variáveis constantes) maior será a capacidade dos fluxos alcançarem maiores distâncias, e lodo de carrearem mais sedimentos para as regiões mais distais lobos terminais, e assim irem colmatando todo o espaço disponível ao longo da paleosuperfície durante as sucessivas estadas das simulações.

Da mesma forma, ao variarmos as *frequências de fluxos* do disparo para um mesmo valor de aporte sedimentar, temos modelos resultantes com diferenças em termos de padrão de

empilhamento, dimensões e espessuras dos elementos deposicionais. Nos casos de volumes de aporte mais altos com frequência de fluxos de 100 anos (CENARIOS 3C e 4C; **item 5.2.1.3** e CENARIOS 6C e 7C; **item 5.2.2.3**) foi possível observar implantações de eixos de dispersão sedimentar/direção de fluxo completamente diferentes (avulsões ?) a partir de determinado período (por exemplo o CENÁRIO 4 e seus subcenários, Figura 69). Isso se deve ao fato de que quanto maior a *frequência de fluxos* ocorrendo em determinado período de fonte ativa, maior é a quantidade de sedimentos carregados pelos sucessivos fluxos, fazendo com que haja um preenchimento mais rápido dos espaços disponíveis ao longo da paleosuperfície deposicional, o que resultará em padrões de empilhamento sedimentar distintos comparado aos padrões de empilhamento sedimentar resultantes de fluxo sedimentares que entram com menor frequência no sistema deposicional simulado.

Figura 69 – Comparação dos Subcenários de frequência de fluxos para o CENÁRIO 4 DE APORTE CONSTANTE (100mil m³)



Desse modo, ao analisarmos isoladamente o impacto da variável *volume de aporte d'água* e da variável *frequência de fluxo* pode-se propor que para a replicação de modelos compatíveis deposicional e arquiteturalmente com os depósitos turbidíticos do Sistema Almirante Câmara, é necessário uma adequada combinação entre: (1) *volume de água mínimo* que seja capaz de

criar fluxos que alcancem a área distal dos lobos terminais, capaz também de carrear sedimentos e reproduzir o mesmo padrão de distribuição de fácies sedimentares observados pelos mapas de anomalia de frequência; (2) uma *frequência de fluxos* que possibilite o preenchimento dos espaços disponíveis da paleosuperfície deposicional, e seja capaz de reproduzir o mesmo padrão de empilhamento das unidades sedimentares dos sistema turbidítico..

6.2.2 Variação do parâmetro ‘Erodibilidade’

O parâmetro *erodibilidade* por definição do *software* é uma taxa que multiplica a capacidade dos fluxos de erodir e transportar os sedimentos do substrato da paleosuperfície. O CENÁRIO 8 (que retoma todas as variáveis do CENÁRIO 6B mas mudando o parâmetro *erodibilidade*=1) mostrou que a variação parâmetro *erodibilidade* é sensível para a simulação dos depósitos turbidíticos.

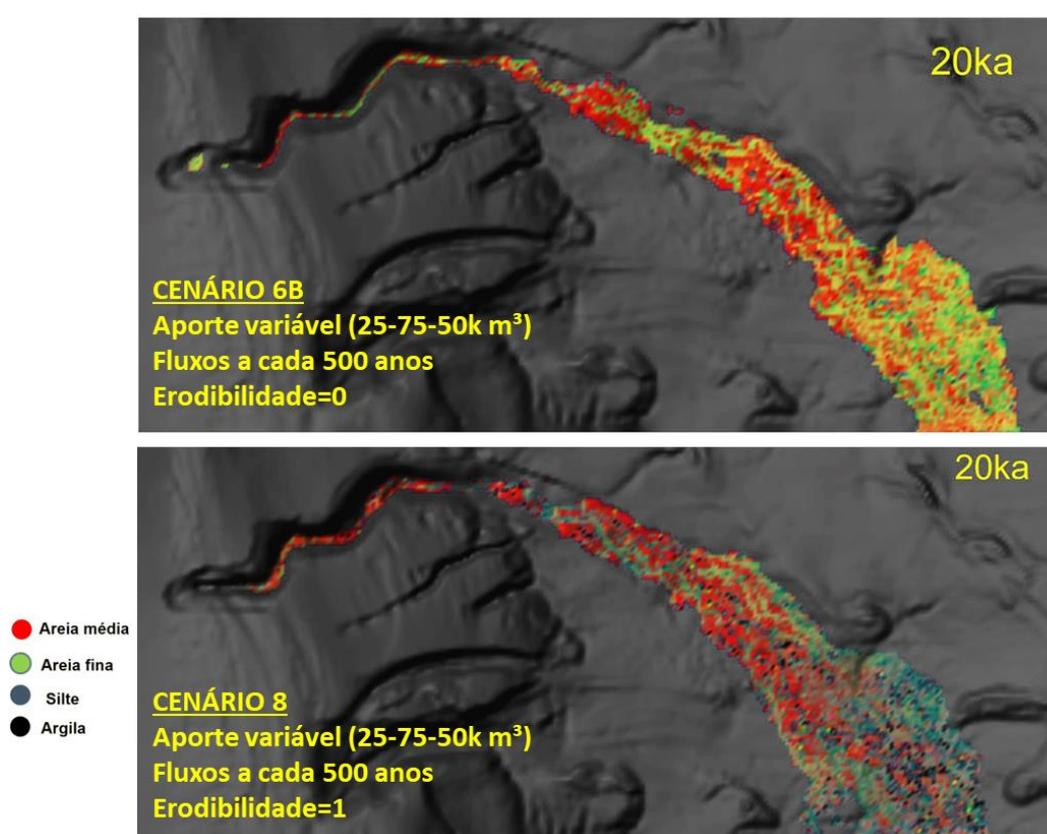
A comparação entre os resultados desses dois cenários evidenciou que o CENÁRIO 8 resultou em depósitos turbidíticos com distribuições sedimentares mais heterogêneas e com maiores espessuras de depósitos aos longos dos domínios deposicionais do sistema (Figura 62). O impacto da maior taxa de erosão dos fluxos no empilhamento estratigráfico reproduzido no modelo será melhor ilustrado no **item 6.3.5**.

O parâmetro *erodibilidade* por definição do *software* é uma taxa que multiplica a capacidade dos fluxos de erodir e transportar os sedimentos do substrato da paleosuperfície. O cenário 8 (CENÁRIO 6B com *erodibilidade*=1) mostrou que a variação desse parâmetro é sensível para a simulação dos depósitos.

Além disso, os sedimentos remobilizados do substrato da paleosuperfície (composto por 80% de Lama, Tabela 3) são incorporados e transportados pelos fluxos, fazendo com que a proporção de sedimentos na deposição final apresente-se menos rica em areia. Esse fato é interessante pelo ponto de vista de ser possível simular um processo sedimentar que ocorre na natureza (interação dos fluxos turbidíticos com o substrato). Por outro lado, do ponto de vista

da técnica de modelagem, a *erodibilidade* revela-se uma variável com efeito moderadamente imprevisível, pois ao passo que a valor de *erodibilidade*=1 claramente gera maiores espessuras dos depósitos, o maior valor de *erodibilidade*=1 também acaba, no entanto, por tornar a proporção final das fácies sedimentares um tanto quanto aleatória (Figura 70). Entende-se, que seria necessário ser feita uma análise quantitativa entre os cenários para se tentar mensurar a porcentagem de sedimentos do substrato a ser efetivamente incorporada aos fluxos, o que não foi objeto desse trabalho. Ou então serem realizadas novas simulações alterando a concentração de sedimentos iniciais para se obter depósitos finais menos misturados com os sedimentos lamosos.

Figura 70 – Comparação dos mapas finais de distribuição sedimentar entre os CENÁRIOS 6B e 8

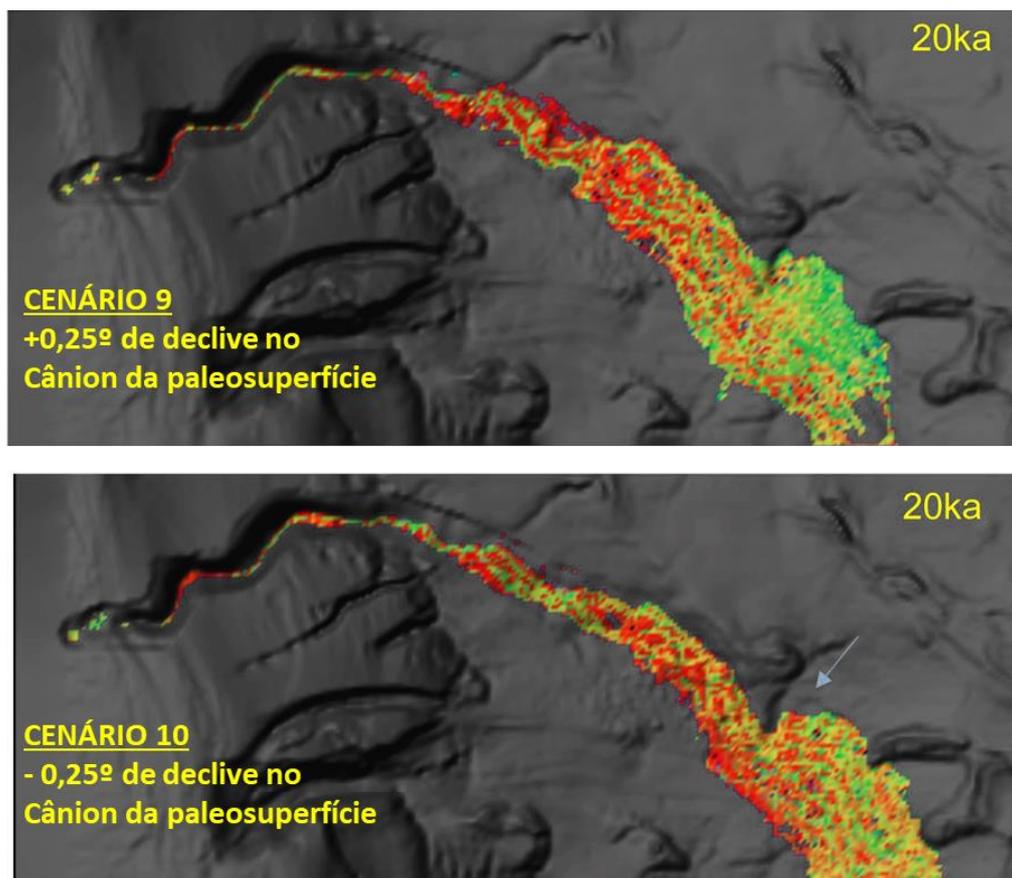


6.2.3 Variação da declividade do cânion da paleosuperfície

A simulação dos CENÁRIOS 9 e 10 testou a sensibilidade do transporte dos fluxos ao variarmos o declive do cânion da paleosuperfície em $+0,25^\circ$ e $-0,25^\circ$, ou seja, mudança na declividade do talvegue do Cânion Almirante Câmara, porém mantendo os demais parâmetros fixos usados na simulação do CENÁRIO 6B (com aporte variável 25.000-75.000-50.000 m³ e frequência de fluxos a cada 500 anos; **item 5.2.2.2**). Abordar variações com relação a declividade de paleosuperfície, leia-se declividade do cânion, é de grande importância para se testar cenários de como os sistemas deposicionais possam ter evoluído. Pois, por mais que tenhamos um excelente dado sísmico que nos permita mapear uma paleosuperfície, sempre haverá incertezas de como de fato era a configuração da mesma.

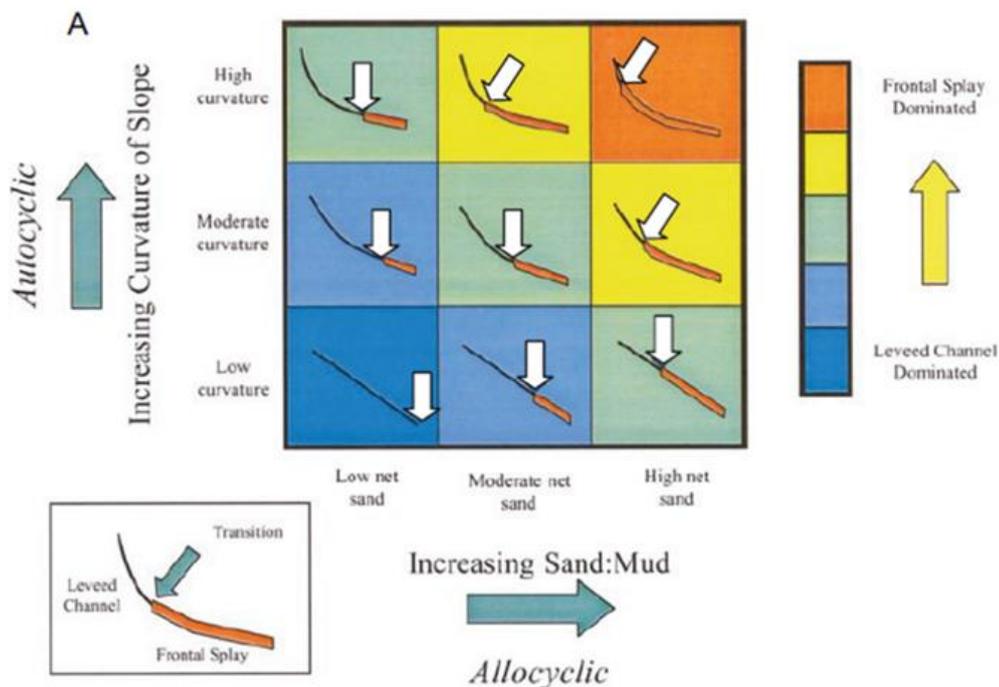
Os CENÁRIOS 9 e 10 simulados mostraram que para uma paleosuperfície com maior declive em seu talude há um menor alcance dos fluxos, resultando em depocentros da região de lobos mais recuados comparados ao CENÁRIO 6B, com espessuras maiores nos depocentros da região de complexo de canais, ao passo que para um menor declive da mesma, ocorrem maiores alcances dos fluxos, levando os depocentros mais a sudeste, com maiores espessuras na região de lobos terminais e menores da região de complexo de canais, quando comparamos com o resultado do CENÁRIO 6B (como visto na Figura 65). Outra diferença entre os CENÁRIOS 9 e 10 quando comparados ao CENÁRIO 6B é a maior continuidade da predominância das areias médias no caso do cenário de menor declive (CENÁRIO 10), aparentemente mostrando que os fluxos carregaram os mesmos por maiores distâncias comparados aos cenários de maior declive.

Figura 71 – Comparação da distribuição sedimentar final entre os CENÁRIOS 9 e 10



Essas diferenças podem ser explicadas, ao menos em parte, pelo fato de as variações testadas estarem gerando diferentes curvaturas dos taludes simulados. Segundo Walker e Posamentier (2006), diferentes curvaturas de talude terão impacto na posição de transição entre os domínios deposicionais de canais-*levees* para lobos terminais (Figura 72). Segundo o modelo proposto, uma maior curvatura no talude implica em um ponto de transição mais recuado comparado a um talude de menor curvatura. Nos CENÁRIOS 9 e 10 foi observado justamente essa diferença entre os depósitos.

Figura 72 - Matriz de possíveis respostas da localização do ponto de transição entre canal-levee e lobo terminal



6.3 Modelo conceitual dos depósitos turbidíticos do sistema Almirante Câmara e arquitetura deposicional

Os depósitos de sistemas turbidíticos têm sido amplamente estudados, mas ainda assim muitos dos dados quantitativos sobre o sistema deposicional ainda permanecem pouco definidos. Assim, a simulação dos modelos de processos sedimentológico-estratigráficos com o intuito de se compreender sob que possíveis variáveis o sistema turbidíticos Almirante Câmara pode ter evoluído, permite a aplicação experimental de diferentes cenários de dos

parâmetros variáveis desconhecidos do sistema, no sentido de se apontar cenários de modelos deposicionais possíveis. Cabe ressaltar que esse tipo de abordagem metodológica se baseia em simplificações matemáticas para simular processos físicos extremamente complexos, logo os depósitos gerados nas simulações sempre apresentarão algumas diferenças com relação aos dados geológicos observados, em de espessuras finais e de distribuição de fácies sedimentares, e mesmo de arquitetura deposicional. Além disso, para o presente trabalho focou-se em apenas simular os processos associados ao acúmulo de sucessivos fluxos turbidíticos a partir do Cânion Almirante Câmara, quando na realidade, a formação do sistema estudado é resultado da interação dinâmica de diversos outros processos geológicos não contemplados nas simulações, como por exemplo, a taxa de subsidência da bacia, o transporte sedimentar talude abaixo via movimentos de massa, os movimentos verticais gerados pela tectônica salífera presente na área, assim como a contribuição de demais fluxos turbidíticos advindos de outros cânions da região, além contribuição da sedimentação pelágica nos períodos de subida eustática.

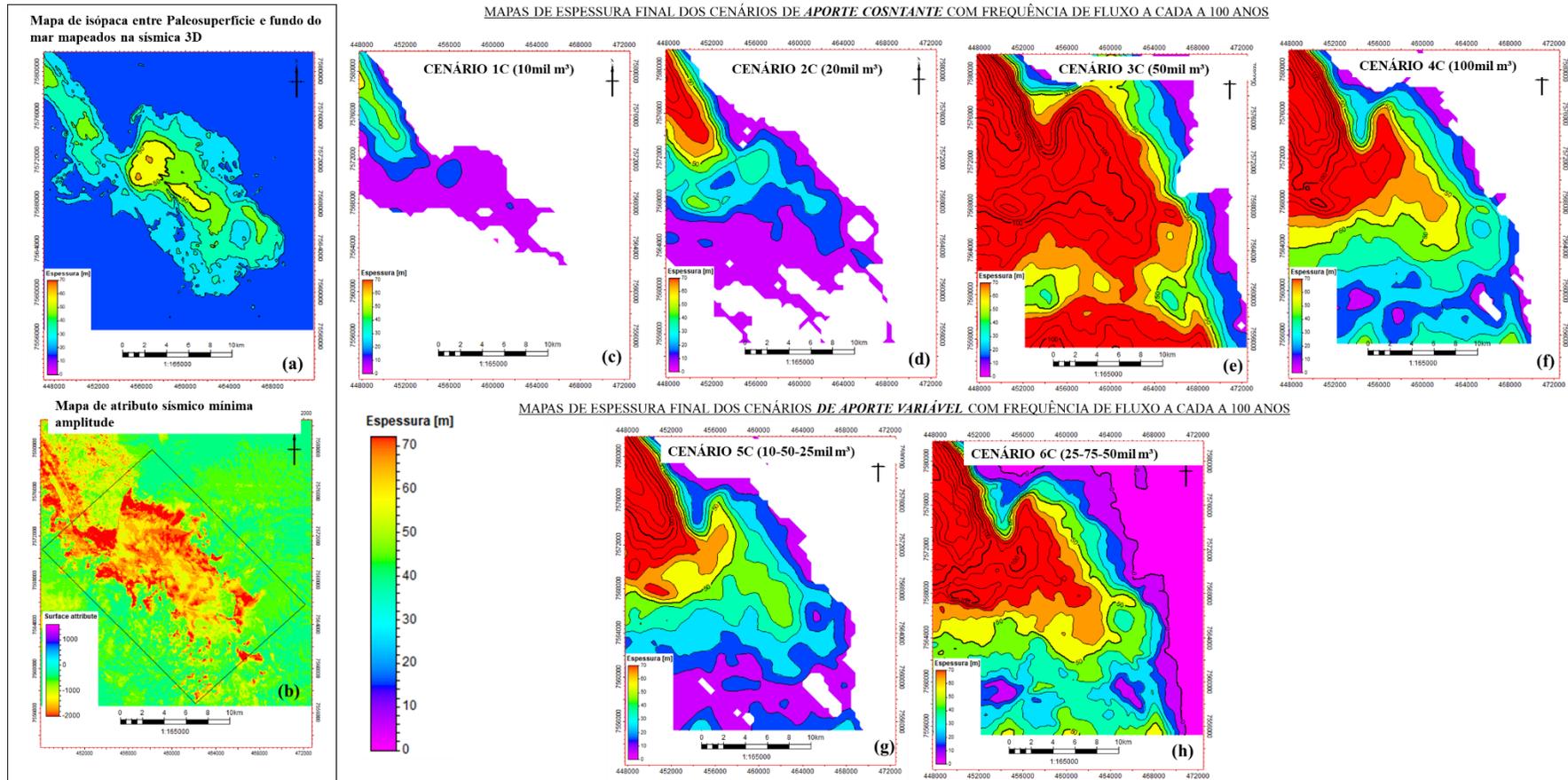
Os modelos aqui simulados objetivaram alcançar principalmente as geometrias deposicionais observadas no mapa de atributos sísmicos, a distribuição de fácies sedimentológicas baseadas nas informações de testemunhos disponíveis e as espessuras sedimentares da região dos complexos de canais e da região dos lobos terminais. Além disso, como somente a porção deposicional mais superior do complexo foi datado, as simulações de etapas de construção a partir de 440ka também buscou apontar possíveis cenários temporais para o início da deposição do sistema Turbidítico Almirante Câmara.

Abaixo são apresentadas algumas discussões sobre as simulações que apresentaram resultados incompatíveis com os dados observados e a proposição dos modelos que melhor reproduziram as características gerais do Sistema Turbidítico Almirante Câmara. Nos modelos avaliados como mais compatíveis com o caso real, foi ainda realizada uma análise do padrão de empilhamento estratigráfico, comparando-a com dados geológico-geofísicos de anteriores e aos dados bibliográficos.

6.3.1 Cenários de volume sedimentar fixo e volume sedimentar variável com fluxos com frequência a cada 100 anos

Os cenários simulados com frequência de fluxos a cada 100 anos, tanto nas simulações de *aporte sedimentar constante* (CENÁRIOS 1C, 2C, 3C e 4C, **item 5.2.1.3**) como em regimes de *aporte sedimentar variável* (CENÁRIOS 5C e 6C, **item 5.2.2.3**), apresentaram maiores discrepâncias em termos de distribuição sedimentar e espessuras em relação aos dados geológicos-geofísicos disponíveis como, por exemplo, mapa de atributo de mínima amplitude e mapas de isópacas (Figura 73). Nos casos dos CENÁRIOS 1C e 2C, simulados com menores volumes constantes de aporte sedimentar, a mais alta frequência de fluxos (1 fluxo a cada 100 anos) resultaram em acumulação sedimentares depositadas na região mais próximas dos complexos de canais, gerando espessuras e larguras muito superior ao observado, no Sistema Almirante Câmara. Além disso, esses cenários não se mostraram eficientes em depositar e distribuir quantidade suficiente de sedimentos na região de lobos terminais (Figura 7(c-d)).

Figura 73- Comparação dos mapas de isópaca do lobo terminal e atributo sísmico com mapas de espessuras finais dos CENÁRIOS DE APORTE COSNTANTE com fluxos a cada 100 anos



Legenda: (a) Mapa de espessura entre os horizontes mapeados na sísmica 3D; (b) Mapa de mínima amplitude extraído da sísmica; (c-h) mapas de espessura total da região de lobos distais dos diferentes CENÁRIOS aporte CONSTANTE E VARIÁVEL com fluxos a cada 100anos

Já para os demais cenários também simulados com fluxos a cada 100 anos mas de maior *aporte sedimentar constante* (CENÁRIOS 3C e 4C; (Figura 7(e-f)) ou *aporte sedimentar variável* (CENÁRIOS 5C e 6C; (Figura 7(g-h)) a aplicação da frequência de fluxos a cada 100 anos se mostrou eficiente em transportar sedimentos ao longo do complexo de canais até a região de lobos terminais, porém a alta frequência de fluxos disparados resulta em depósitos anormalmente mais espessos e de distribuição distintas aos dados observados (Figura 7(e, f,g e h)). Esses cenários de frequência de fluxos a cada 100 anos são considerados, portanto, modelos que não explicam a evolução dos depósitos turbidíticos analisados. Especula-se, porém, que essa alta frequência possa reproduzir os depósitos observados em cenário que considerasse um tempo total de área-fonte ativa menor do que fora testado no presente trabalho, visto que o tempo total de todo depósito é uma incerteza. Ou seja, como o aporte nessa alta frequência acaba sendo muito maior, talvez em um cenário de menor tempo total de área-fonte ativa, as simulações finais sejam mais compatíveis aos dados observados.

6.3.2 Cenários de volume sedimentar fixo e variável, com fluxos de frequência a cada 1000 anos

Os diferentes cenários de *aporte sedimentar constante* e *aporte sedimentar variável* simulados com frequência de aporte de 1 fluxo a cada 1000 anos (item 5.2.1.1 e 5.2.2.1), apesar de apresentarem geometrias deposicionais compatíveis ao observados no atributo sísmico, mostraram espessuras finais dos depósitos inferiores aos dados observados. Todos os cenários (CENÁRIOS 1B, 2B, 3B, 4B, 5B, 6B e 7B) foram eficazes em conduzir os fluxos turbidíticos através da feição de cânion e da região de complexo de canais até a área deposicional mais distais dos lobos terminais. Contudo, a espessura total na região de lobos terminais do sistema turbidítico simulado são menores que as do caso real do Sistema Turbidítico Almirante Câmara (Figura 76) mesmo para os CENÁRIO 4B e 7B simulado com o mais alto volume de aporte sedimentar (Figura 76 (f) e (i)). Portanto, a aplicação da frequência mais baixa de ocorrência fluxos turbidíticos (de 1 fluxo a cada 1000 anos) também não é capaz de replicar a evolução dos depósitos do Sistema Turbidítico Almirante Câmara. Poderia, novamente, especular-se que para que essa frequência de ocorrência fluxos ser capaz de formar os depósitos analisados seria necessário testar um cenário com um maior tempo total de área-fonte ativa, ou então um cenário que levasse em consideração maiores concentrações de sedimentos nos fluxos disparados.

6.3.3 Cenários de volume sedimentar fixo e variável, com fluxos de frequência a cada 500 anos

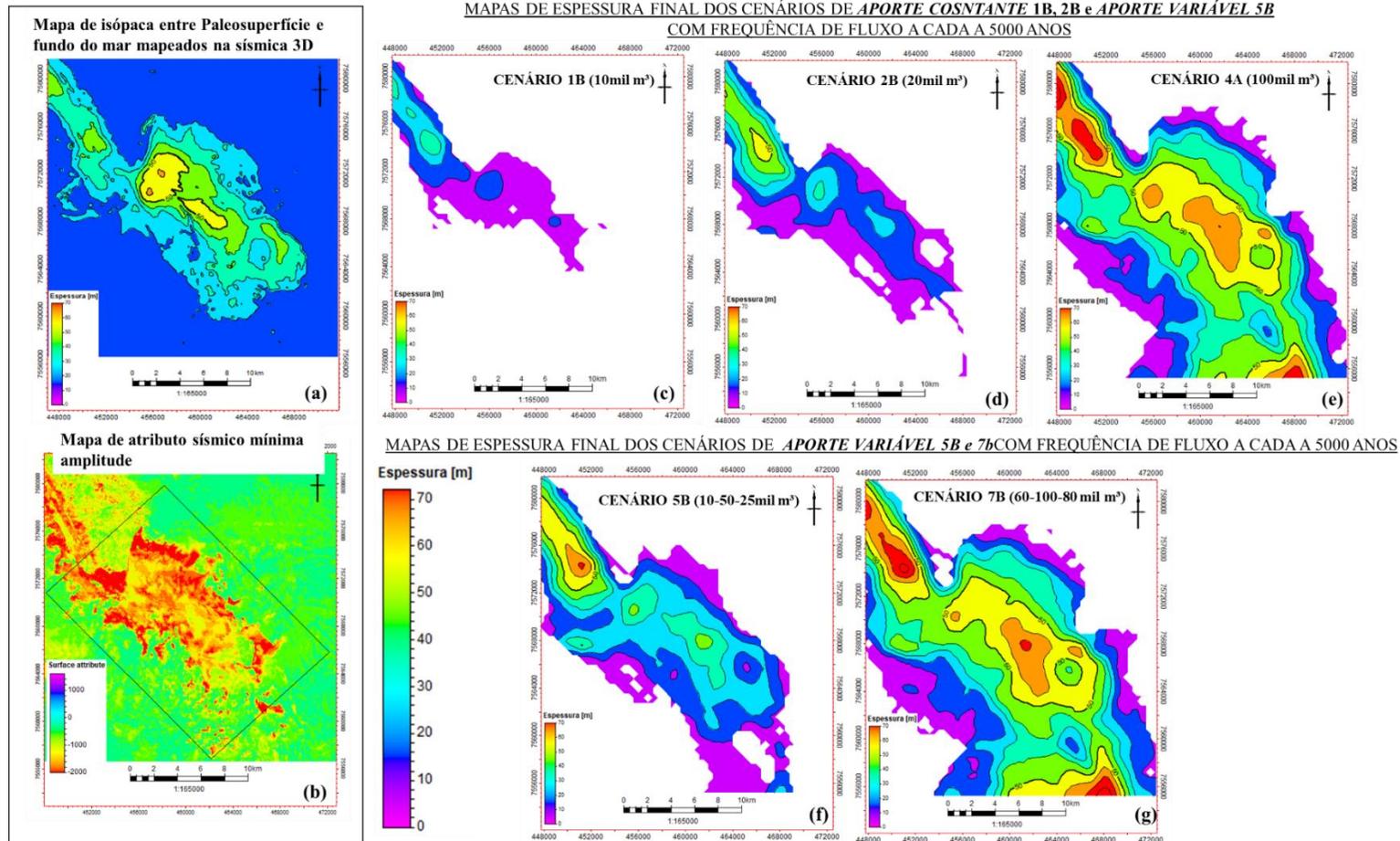
Dentro do conjunto de cenários testados com frequência de fluxos a cada 500 anos (cenários de *aporte constante* no item 5.2.1.2 e cenários de *aporte variável* no item 5.2.2.2), os cenários de aporte de menor volume sedimentar (CENÁRIOS 1B, 2B e 5B), não reproduziram as espessuras (Figura 75(c,d,f)) e geometrias deposicionais observadas nos depósitos do caso real do Sistema Turbidítico Almirante Câmara (Figura 75(a)).

Já os CENÁRIOS 4B e 7B, simulados com maiores volumes de aporte sedimentar, resultaram em depósitos com uma representação das geometrias deposicionais mais fidedigna ao caso real do Sistema Turbidítico Almirante Câmara ao longo de todas as porções do sistema turbidítico simulado com espessuras finais (Figura 75(e, g)) de depocentros com cerca de 10m mais espessos com relação ao observado no caso real do sistema Turbidítico Alm. Câmara (Figura 75(a)). As simulações dos CENÁRIOS 4B e 7B também resultaram numa notável expansão da área deposicional do sistema para extremo sudeste da área, ou seja, a criação de um domínio deposicional inexistente no caso real do Sistema Turbidítico Almirante Câmara (mapa de atributo sísmico de mínima amplitude; Figura 66).

Apesar dos resultados das simulações dos CENÁRIOS 4B e 7B, apresentarem boa compatibilidade com os dados geológicos-geofísicos observados no Sistema Turbidítico Almirante Câmara. Contudo, deve-se ter em mente que a espessura total dos depósitos ao longo de todas as porções do Sistema Turbidítico Almirante Câmara é constituída de sucessões deposicionais turbidíticas, entremeados com deposição de unidades pelágicas que ocorre durante as subidas eustáticas. Assim, como os parâmetros aplicados às simulações dos CENÁRIOS 4B e 7B reproduzem apenas a deposição turbidítica, mas foram capazes de replicar espessuras compatíveis com o caso real de estudo, devemos assim considerar que as variáveis aplicadas apresentem algum grau de superestimação, visto que os processos deposicionais pelágicos que também contribuem para a formação da espessura total dos depósitos não foram contempladas nas simulações do presente trabalho. Levando em conta essa consideração, entende-se que os cenários que melhor expliquem os depósitos estudados sejam aqueles que

apresentaram depocentros um pouco abaixo dos dados observados, o que seria o caso dos CENÁRIOS 3B e 6B.

Figura 75 - Comparação dos mapas de isópaca do lobo terminal e atributo sísmico com mapas de espessuras finais dos CENÁRIOS DE APORTE COSNTANTE com fluxos a cada 500 anos



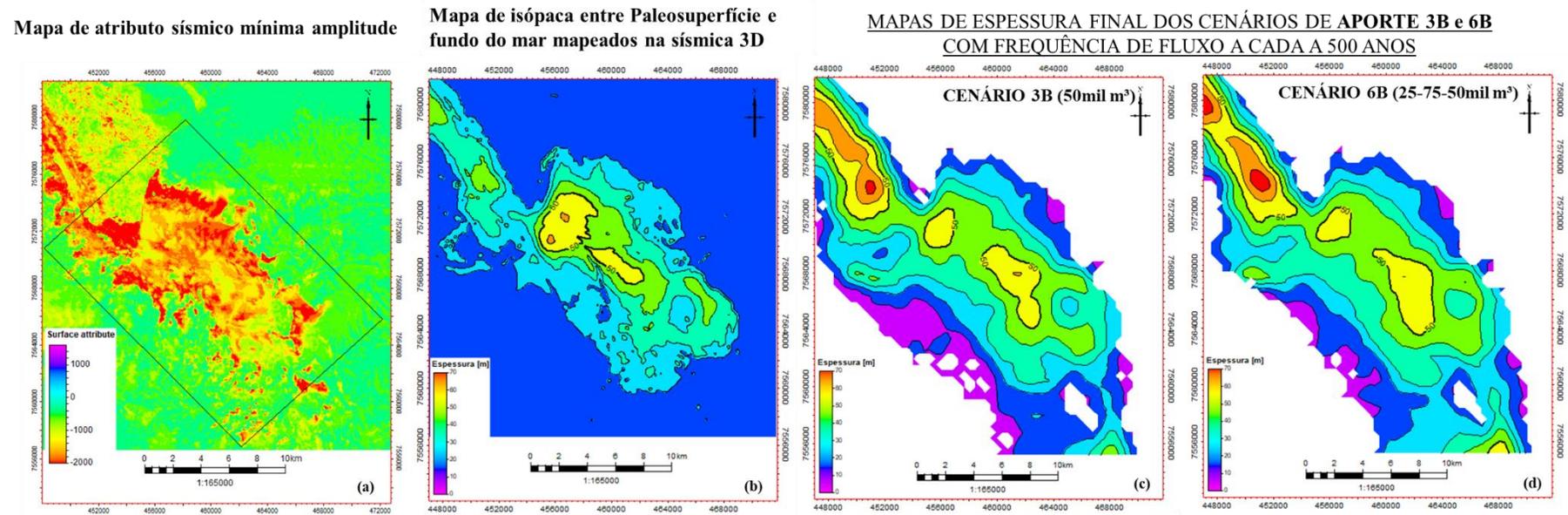
Legenda: (a) Mapa de espessura entre os horizontes mapeados na sísmica 3D; (b) Mapa de mínima amplitude extraído da sísmica; (c-g) mapas de espessura total da região de lobos distais dos diferentes CENÁRIOS aporte CONSTANTE E VARIÁVEL com fluxos a cada 500anos

Os CENÁRIOS 3B e 6B, apesar de terem sido simulados com regimes de aporte sedimentar distintos, resultaram em depósitos semelhantes em termos de distribuição e espessuras aos depocentros na região de lobos (Figura 76 (c) e (d)). Tanto o CENÁRIO 3B quanto o CENÁRIO 6B, resultaram na formação de dois depocentros principais na região de lobos terminais com espessuras na ordem de 50 m (Figura 76 (c) e (d)) compatíveis em configuração geométrica e espessuras ao depocentros da região dos lobos terminais do Sistema Turbidítico Almirante Câmara (Figura 76(b)). Contudo algumas considerações adicionais podem ser feitas:

- (i) o CENÁRIO 3B (**item 5.2.1.2**) simulou um regime de aporte constante de 50km^3 durante os períodos de área-fonte ativa. Já o CENÁRIO 6B (**Item 5.2.2.2**) simulou um cenário com alternância de valores de aporte (25k, 75k e 50k m^3) durante os períodos de área-fonte ativa;
- (ii) apesar da diferença no regime de aporte sedimentar **constante** (CENÁRIO 3B) *versus* **Variável** (CENÁRIO 6B), o volume sedimentar médio do aporte variável do CENÁRIO 6B ao final de cada etapa da simulação (etapas temporais de regressão marinha em 440ka, 340ka, 240ka, 130ka, 60ka e 20ka) acaba resultando no mesmo volume total de aporte constante de 50km^3 que atua no CENÁRIO 3B), o que poderia explicar a semelhança de espessura entre os cenários.

Assim, optou-se pela escolha do CENÁRIO 6B como um modelo conceitual mais representativo capaz de replicar as condições de deposição que deram origem ao Sistema Turbidítico Almirante Câmara como conhecemos hoje, pelo fato do CENÁRIO 6B trazer consigo uma alternância de energia e de volume dos fluxos turbidíticos dentro de um mesmo ciclo eustático de regressão-transgressão marinha, ou seja, um regime de aporte sedimentar variável que é mais próximo conceitualmente ao que se conhece sobre a dinâmica de fluxos turbidíticos (Gardner et al, 2018).

Figura 76 - (a) Mapa de espessura entre os horizontes mapeados na sísmica 3D; (b) Mapa de mínima amplitude extraído da sísmica; (c e d) mapas de espessura total da região dos lobos distais dos diferentes CENÁRIOS DE APORTE 3B e 6B



6.3.4 Elementos arquiteturais do CENÁRIO 6B escolhido como modelo deposicional do sistema turbidítico Almirante Câmara

A partir da escolha do CENÁRIO 6B como proposta de modelo deposicional aplicável ao Sistema Turbidítico Almirante Câmara, pode-se analisar em detalhe o padrão de empilhamento dos estratos deposicionais em seções 3D no modelo, desenvolvido ao longo das sucessivas etapas de tempo consideradas na simulação do CENÁRIO 6B (Figura 77(a)), assim como uma análise e melhor visualização das distribuição das proporção de areia médias depositadas em cada porção dos sistema turbidítico simulado (Figura 77(b)):

- A- Cada cor na Figura 77(a) representa o estrato deposicional formado em cada período de área-fonte ativa e assim podemos observar ao longo das seções, o padrão de empilhamento, a relação de contato entre os estratos e suas geometrias deposicionais. Nota-se que o modelo é capaz de construir e empilhar diferentes geometrias deposicionais nos diferentes domínios deposicionais de complexo de canais e complexo de lobos terminais. Nas porções proximais do sistema turbidítico simulado, as geometrias deposicionais são mais canalizadas, confinadas e com truncamentos entre os estratos; ao passo que na região de lobos terminais observam-se geometrias lenticulares, ora empilhadas verticalmente, ora deslocadas lateralmente, em decorrência do desconfinamento dos fluxos e das migrações laterais dos lobos terminais;

- B- Na Figura 77(b) podemos observar a distribuição da proporção de areias médias depositadas ao longo das diferentes porções do sistema turbidítico simulado. Note que nessa ilustração há somente a proporção de areia média contida em cada célula do modelo, o que é uma forma diferente de apresentar a distribuição de fácies ao longo do modelo com relação ao que foi apresentado nos mapas de etapas de tempo das simulações (item 5.2). Observa-se que as proporções de areia média são maiores na região de complexo de canais em relação a região de lobos terminais. Isso denota a capacidade da simulação em reproduzir a predominância da distribuição

granulométrica pelos diferentes domínios deposicionais observados nos dados de testemunhos (item 4.2) e bibliográficos.

Para melhor analisar e compreender a evolução deposicional dos estratos ocorrida ao longo das sucessivas etapas de tempo, três seções foram traçadas ao longo do modelo (Figura 78, Figura 79, Figura 80): uma de direção *dip*, e duas de direção *strike* (uma na região de complexo de canais e outra na região dos lobos terminais). As seções ilustram o empilhamento dos estratos deposicionais em duas escalas temporais: 1- o estrato total formado em cada período de área-fonte ativa (6 períodos); e 2- os estratos internos que representam o acúmulo deposicional relativo a 10 mil anos de fluxos. Essa frequência de junção de fluxos em 10 mil anos, foi escolhida para simplificar a visualização de como ocorre o empilhamento interno dos estratos em cada período de área-fonte ativa.

A primeira seção (Legenda:) é transversal ao modelo e ilustra a evolução dos estratos ao longo dos complexos de canais e lobos terminais. Podemos observar que os estratos se sobrepõem em um padrão de empilhamento retrogradacional (*backstepping*), com o aumento das espessuras dos estratos na direção NW. Também se observa o truncamento entre os estratos, que representa a erosão/remobilização dos estratos mais novos sobre os mais antigos, sendo mais visíveis na região de complexo de canais. Essas relações de truncamentos entre os estratos são melhor observadas na seção ortogonal na região de complexo de canais (Legenda:). Nela também é possível observar que os estratos empilham-se, em espaço confinado, em um padrão agradacional com amalgamação e migração lateral, apresentando espessamentos dos depósitos inicialmente na direção NE (estratos de T1 a T3), posteriormente um espessamento à SW (estratos T4, T5 e T6). Já na seção ortogonal à região de lobos do sistema (Figura 80), observa-se a distribuição mais alongada dos estratos devido ao desconfinamento do sistema, com o empilhamento dos mesmos em compensação lateral, sendo possível observar também a variação de direção de deposição dos estratos internos ora para NW ora para SW.

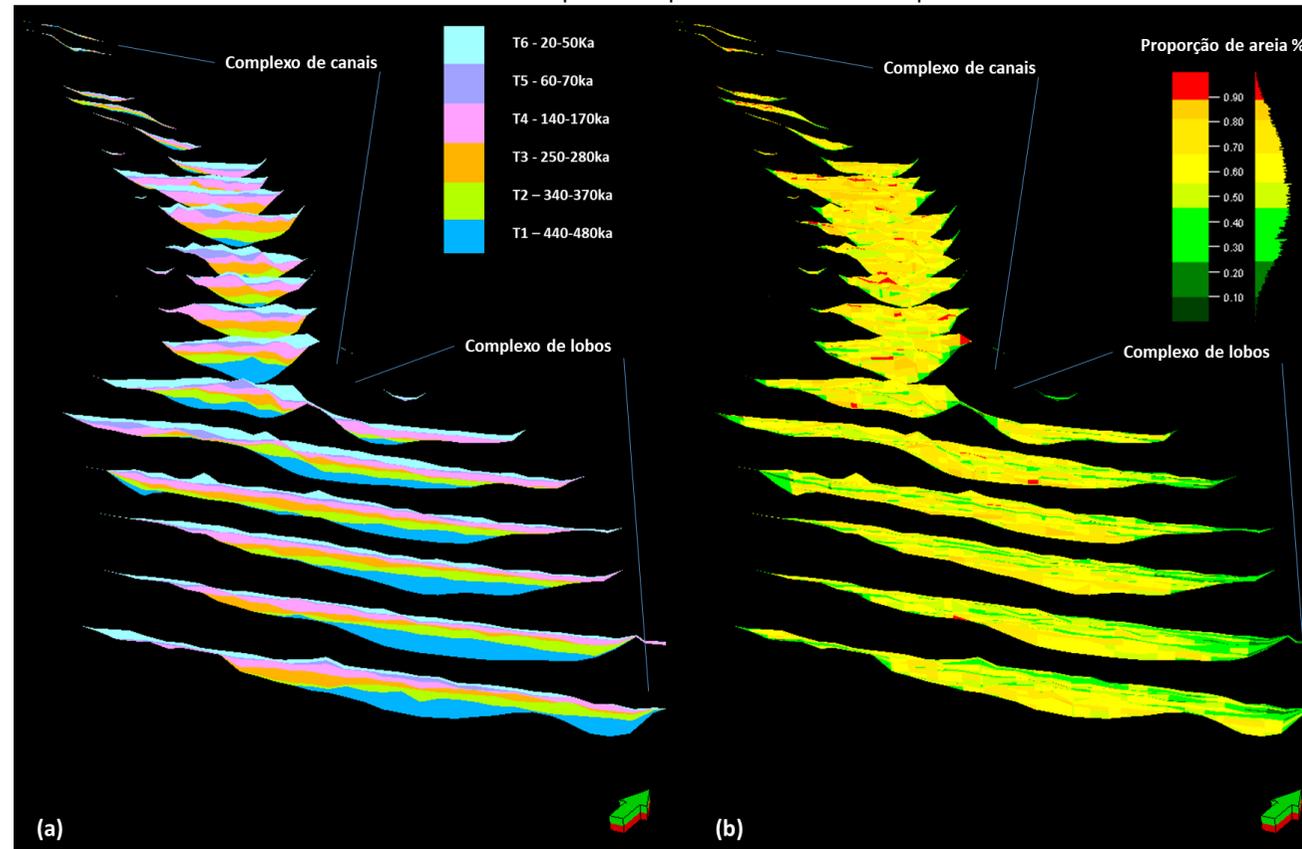
As diferentes seções ao longo do modelo 3D evidenciam a capacidade desse tipo de modelagem em reproduzir distintas arquiteturas e empilhamento estratais ao longo dos diferentes domínios deposicionais de um sistema turbidítico. De forma geral, as feições e empilhamento deposicionais dos estratos reproduzidas no modelo retratam o padrão de retrogradacional do sistema turbidítico observados nos dados bibliográficos (item 3.1), e assemelham-se aos padrões de empilhamentos observados nos diferentes domínios deposicionais vistos no dado sísmico 3D (itens 5.1.1 e 6.1). Apesar disso, é possível notar que

os lobos deposicionais construídos no modelo apresentam diferenças em termos de espessuras e disposição espacial comparados aos lobos mapeados em Abreu (2005) (Figura 81). Essas diferenças são esperadas, uma vez que o foco do presente trabalho fora reproduzir de maneira geral a distribuição e geometrias dos depósitos de todo sistema turbidítico Almirante Câmara, a partir da simulação numérica dos processos deposicionais que os formam. Possivelmente, entende-se que para a reprodução mais acurada das características específicas dos lobos deposicionais seria necessário testar diferentes volumes de aporte de água em cada período de área-fonte ativa, o que reproduziria períodos de maior e menor acumulações sedimentares, gerando assim lobos com diferentes espessuras. Ou então, realizar novos cenários de simulação que incluam outros processos geológicos como a decantação de sedimentos pelágicos, a atuação da tectônica salífera modificando a paleosuperfície e o transporte dos movimentos de massa.

O resumo dos principais parâmetros de entrada do CENÁRIO 6B e seus resultados estão ilustrados na Figura 82.

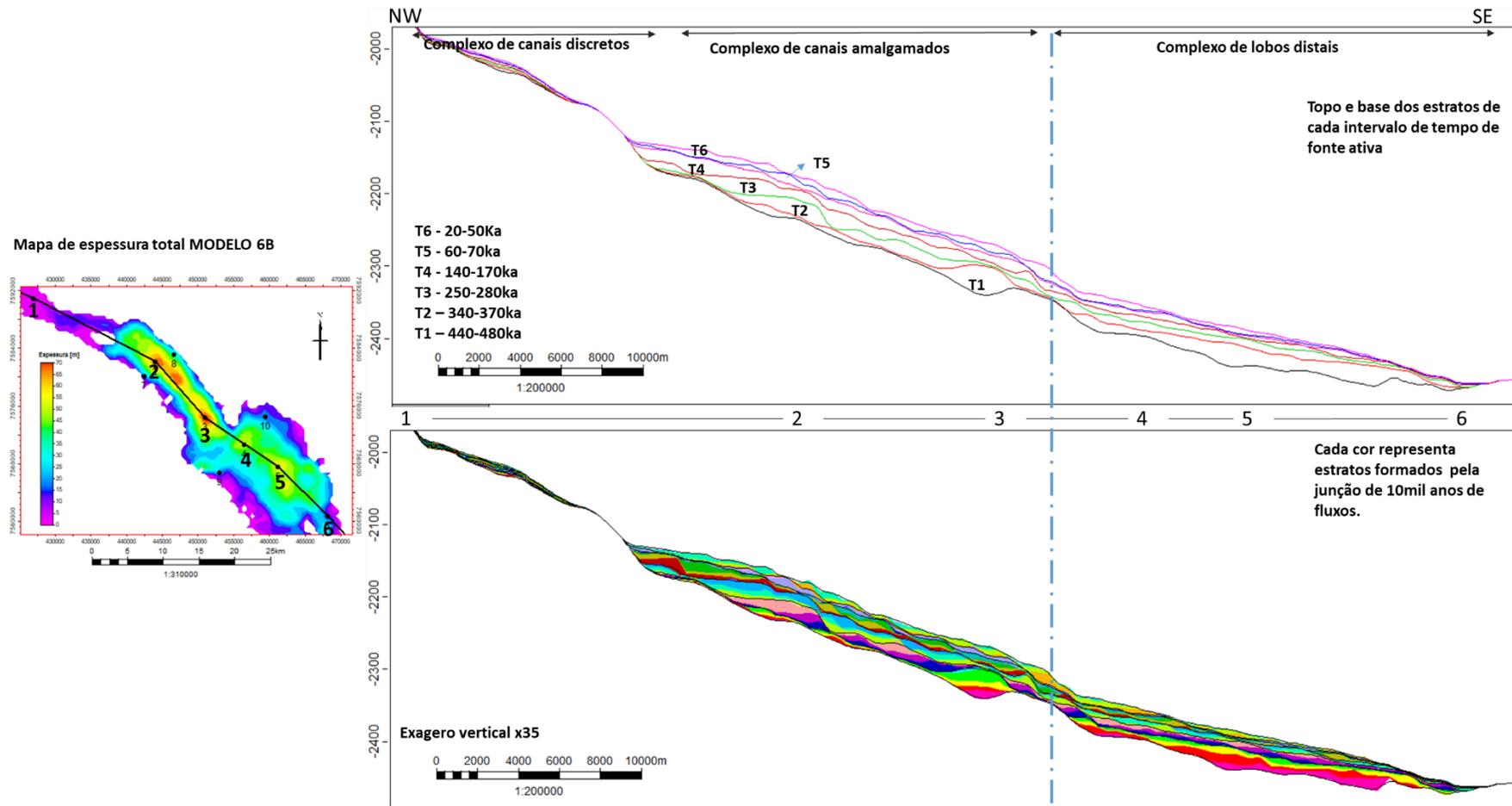
Figura 77 - Seções transversais ao longo do modelo 3D escolhido (CENÁRIO 6B)

Seções 3D ao longo do modelo do CENÁRIO 6B, evidenciando o empilhamento estratal e a proporção de areias médias distribuídas pelo complexo de canais e complexo de lobos



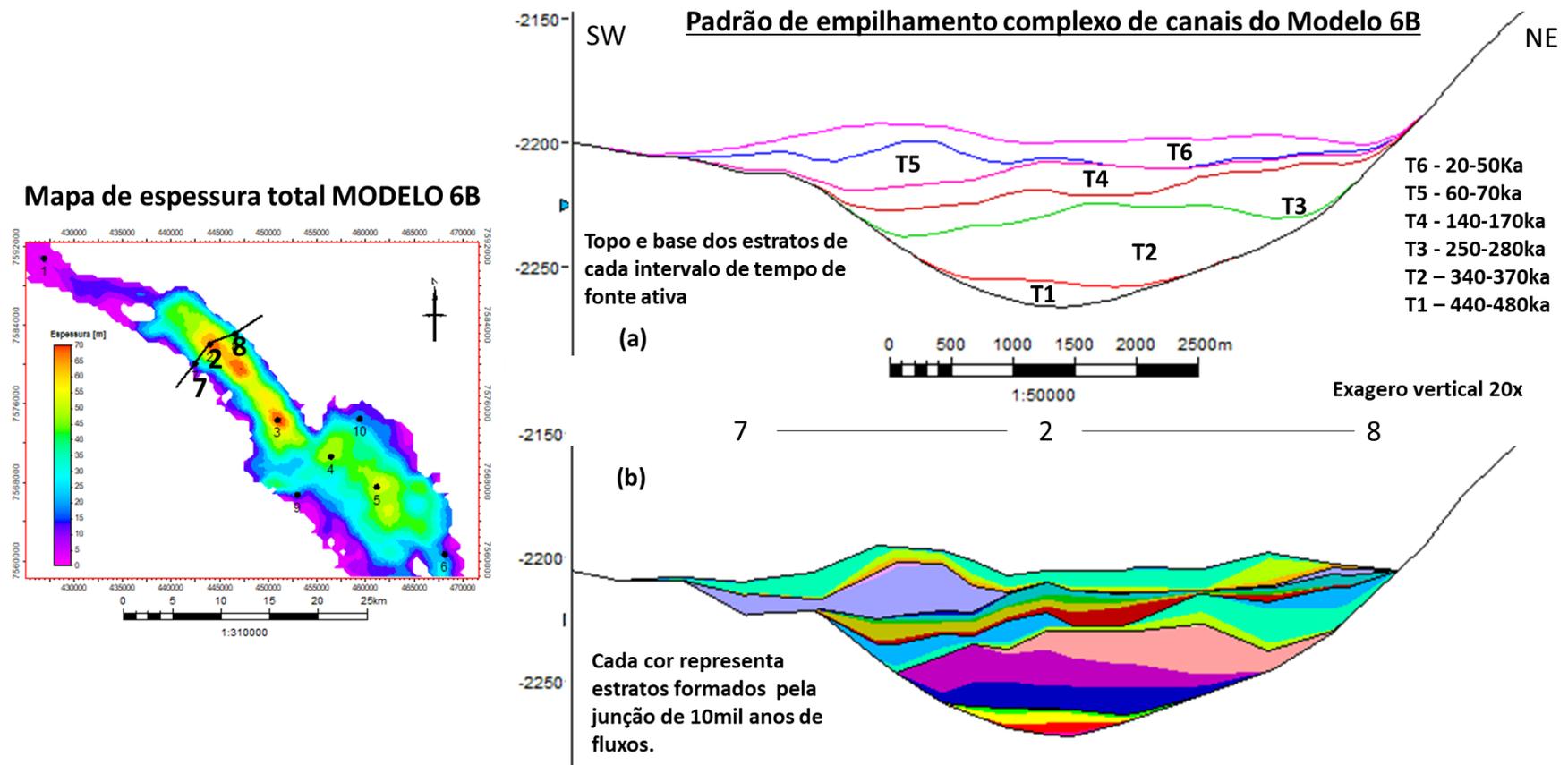
Legenda: Seções transversais ao longo do modelo 3D escolhido (CENÁRIO 6B) como o melhor aplicável a evolução arquitetônica e sedimentológica do Sistema Turbidítico Alm. Câmara; evidenciando em: (a) os estratos deposicionais em cada etapa de tempo de fonte área-fonte ativa; e em (b) a proporção de areia acumulada nos mesmos.

Figura 78 - Seção longitudinal no CENÁRIO 6B (com frequência de fluxo de 500anos)



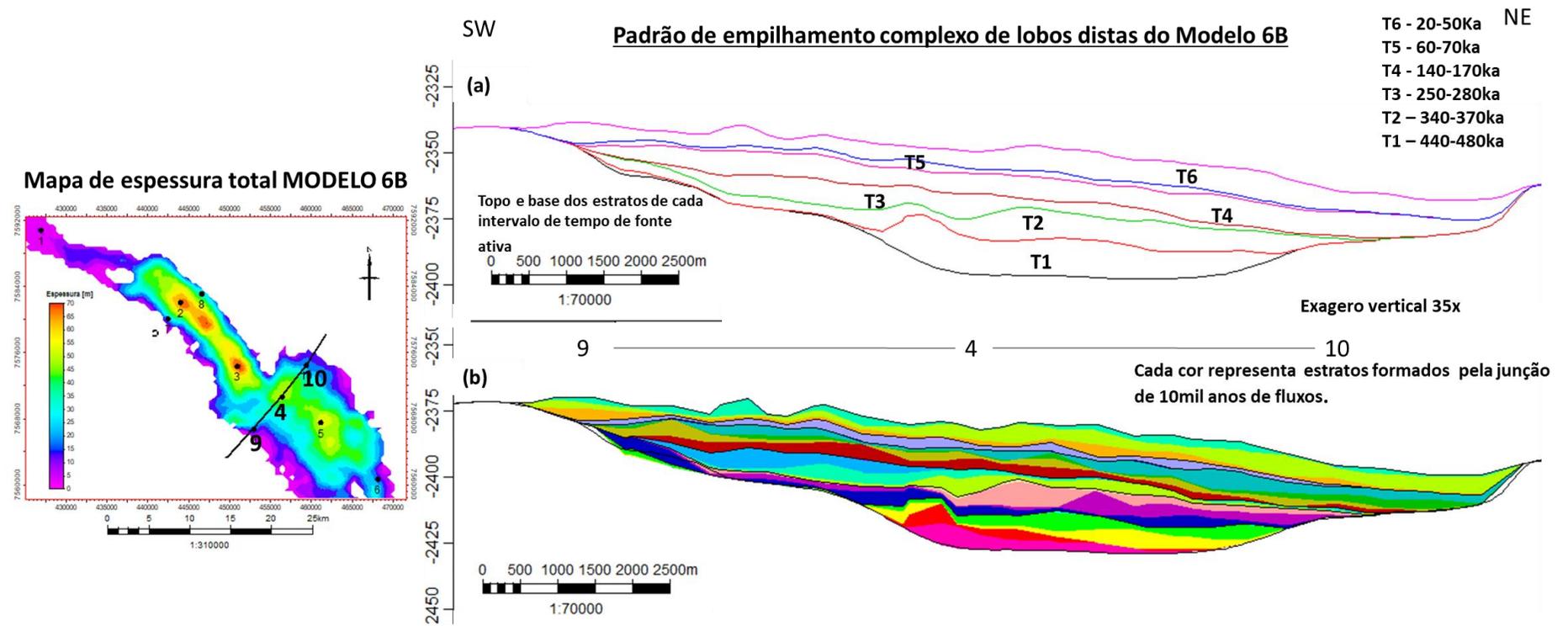
Legenda: Seção longitudinal no CENÁRIO 6B (com frequência de fluxo de 500anos) evidenciando nos diferentes domínios deposicionais: (a) o empilhamento dos diferentes estratos ao longo das etapas de tempo e (b) o empilhamento das subunidades deposicionais dos mesmos.

Figura 79 - Seção strike na região de complexo de canais do CENÁRIO 6B (com frequência de fluxo de 500anos)



Legenda: Seção strike na região de complexo de canais do CENÁRIO 6B (com frequência de fluxo de 500anos) evidenciando em (a) o empilhamento dos diferentes estratos ao longo das etapas de tempo e (b) o empilhamento das subunidades deposicionais dos mesmos.

Figura 80 - Seção strike na região de compelxo de lobos do CENÁRIO 6B (com frequência de fluxo de 500anos)



Legenda: Seção strike na região de compelxo de lobos do CENÁRIO 6B (com frequência de fluxo de 500anos) evidenciando em (a) o empilhamento dos diferentes estratos ao longo das etapas de tempo e (b) o empilhamento das subunidades deposicionais dos mesmos.

Figura 81- (a) Seção sísmica dos lobos definidos por Abreu (2005); (b) seção da sísmica 3D do presente trabalho identificando os elementos deposicionais definidos por Abreu (2005); (c) estratos deposicionais (lobos deposicionais) do CENÁRIO 6B; (d) Isópaca dos horizontes mapeados na sísmica 3D com a localização (linha vermelha) das seções sísmicas apresentadas e área de estudo (retângulo preto) de Abreu (2005).

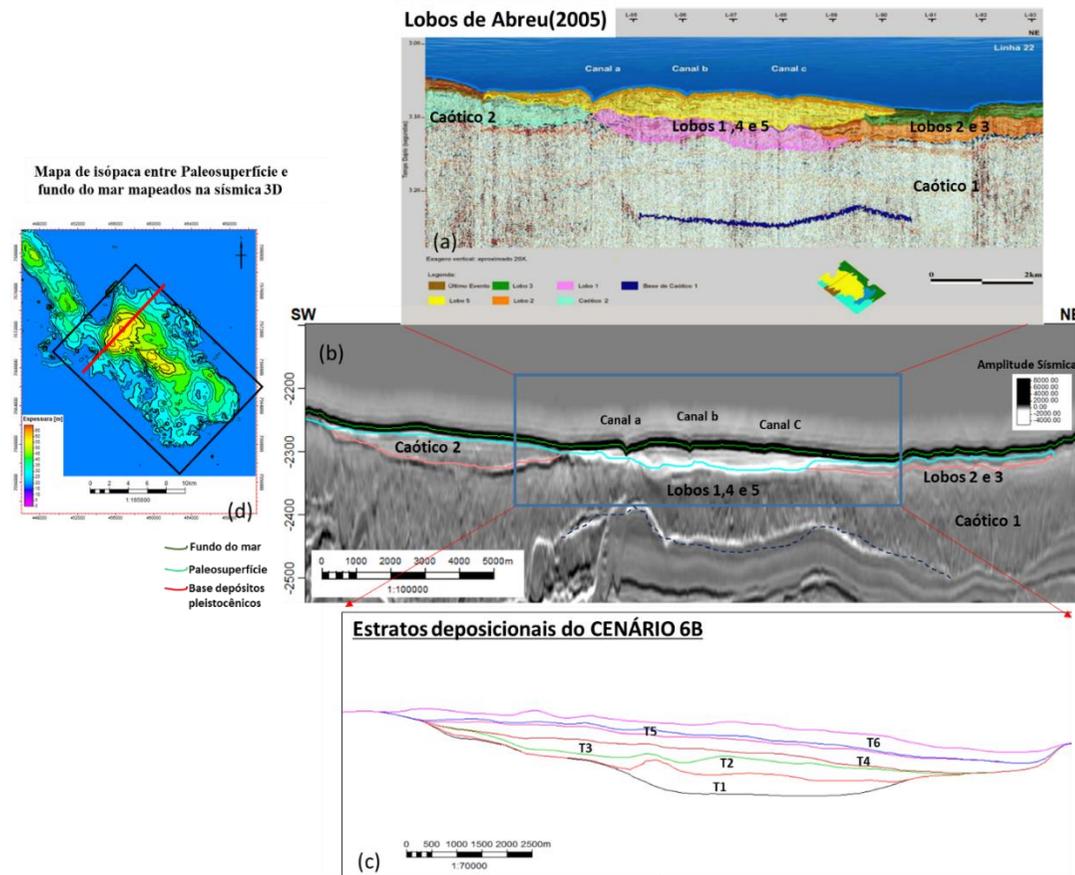
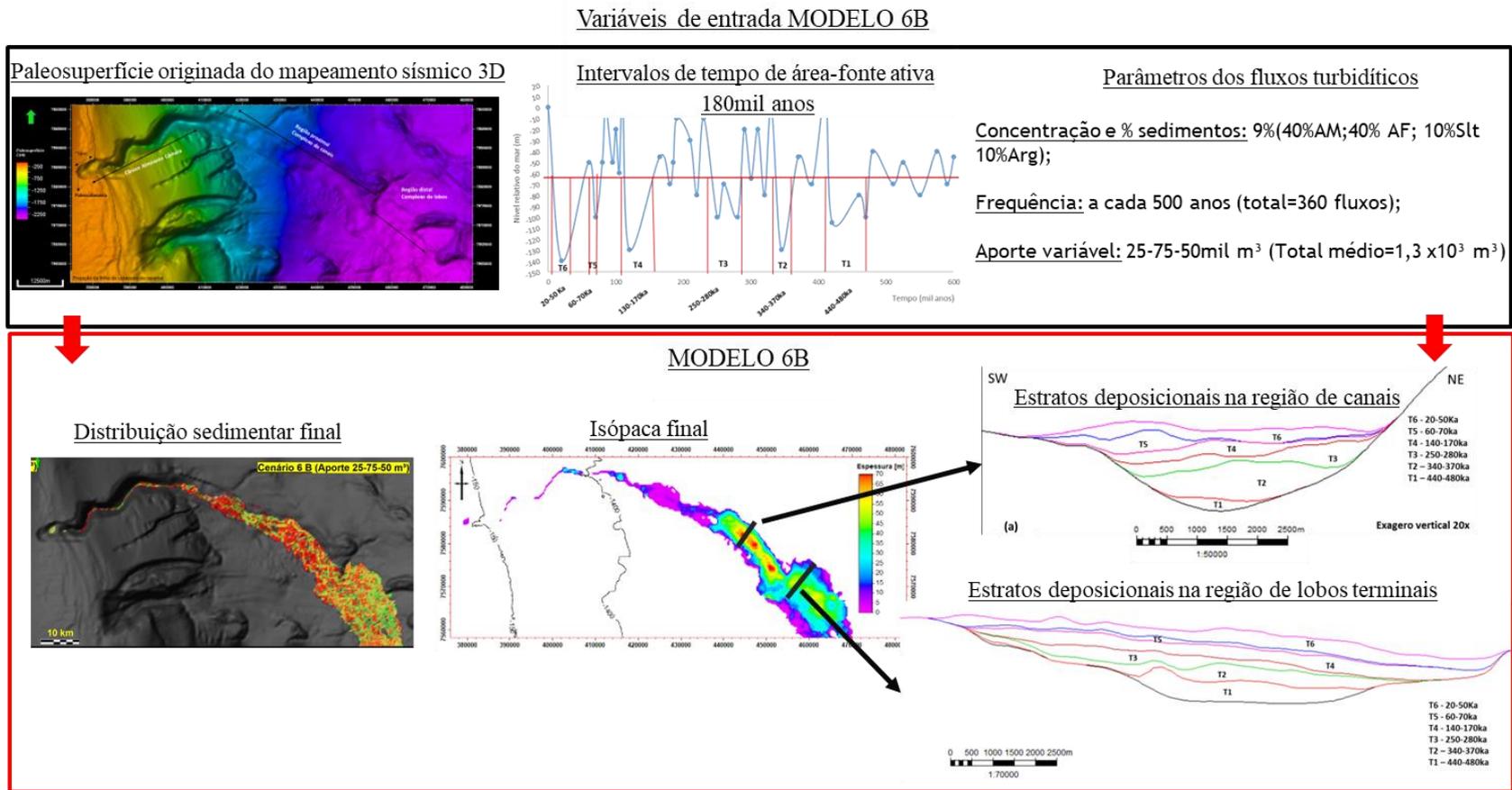


Figura 82 – Na parte superior estão resumidos os principais parâmetros de entrada do CENÁRIO 6B e abaixo seus resultados em relação a dispersão sedimentar final, mapa de espessura final, e seções strikes a região de canais e lobos terminais evidenciando os estratos deposicionais formados em cada intervalos de tempo de área-fonte ativa



6.3.5 Cenário de variação do parâmetro erodibilidade (Cenário 8)

O CENÁRIO 8 testou a sensibilidade dos depósitos simulados utilizando o valor máximo no parâmetro “erodibilidade”, tendo como caso base o CENÁRIO 6B (item 5.2.2.2). Os resultados (item 5.2.3) mostraram que os depósitos gerados a partir dessa variação tornam-se mais lamosos (Figura 61) e formam maiores espessuras totais (Figura 62). Porém outro aspecto interessante a ser analisado com essa variação do parâmetro é o impacto no padrão de empilhamento e relação de contato dos estratos deposicionais. Ao traçar-se as mesmas seções transversais, na região de canais e lobos, feitas no item anterior sobre o CENÁRIO 8 podemos observar as diferentes as diferentes geometrias estratais geradas (Figuras Figura 83 e Figura 84).

Na seção sobre a região de canais (Figura 83) podemos observar que nessa simulação há maiores truncamentos entre os estratos que correspondem a feições erosivas que posteriormente foram preenchidas, por exemplo no contato entre a base dos depósitos formados em T6 com o topo dos depósitos de T2 e nos estratos internos de T1. Na seção sobre a região de lobos (Figura 84) também podemos observar um truncamento da base dos depósitos de T3 sobre o topo dos depósitos de T2.

Essa sensibilidade do parâmetro “erodibilidade” mostrou que seu impacto no padrão de empilhamento estratal simulado é relevante, permitindo ao modelador impor nas simulações maiores feições erosivas ao longo dos diferentes domínios deposicionais. Contudo, como visto nos resultados, quanto maior a taxa de “Erodibilidade” dos fluxos maiores será a incorporação dos sedimentos do substrato nos mesmos, o que altera a proporção de fácies do depósito final formado.

Figura 83 - - Seção strike na região de compelho de canais do CENÁRIO 8 evidenciando em: (a) o empilhamento dos diferentes estratos ao longo das etapas de tempo e (b) o empilhamento das subunidades deposicionais dos mesmos

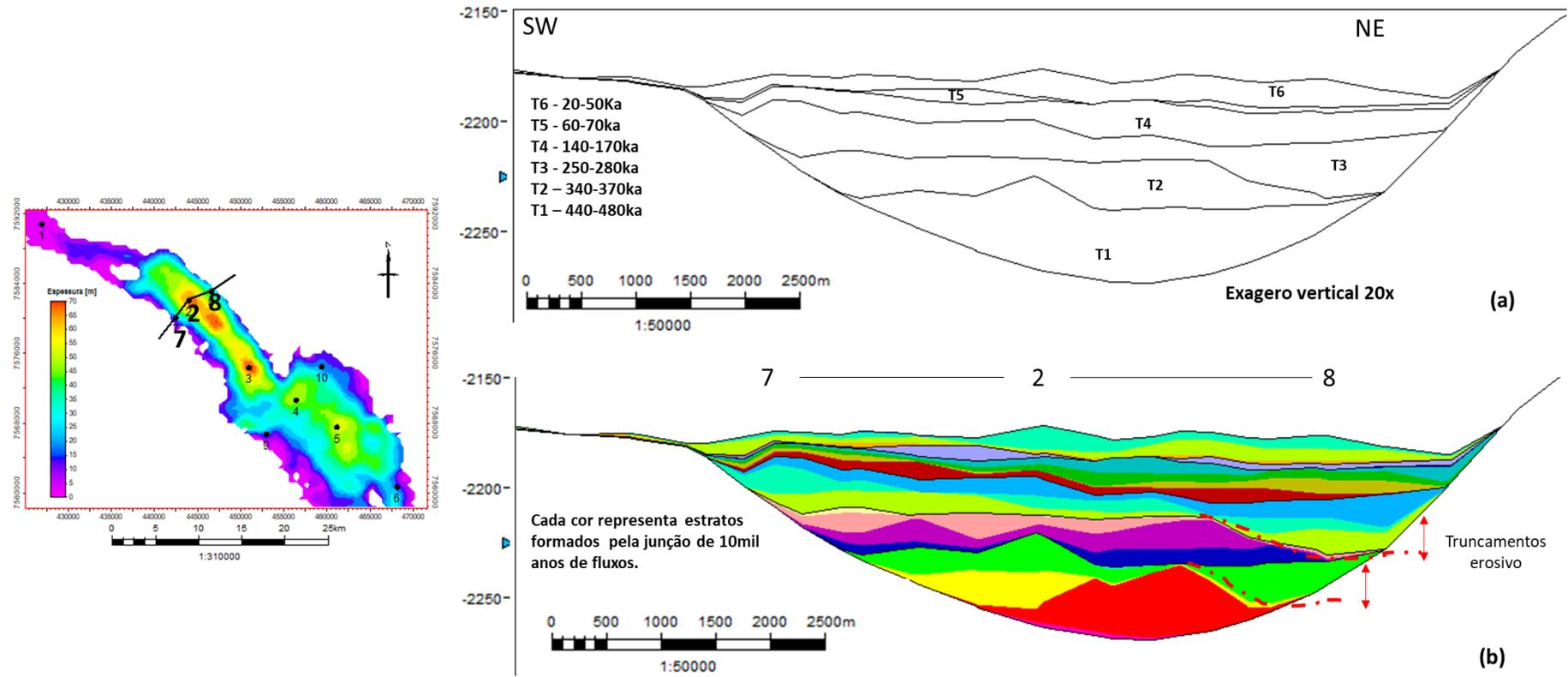
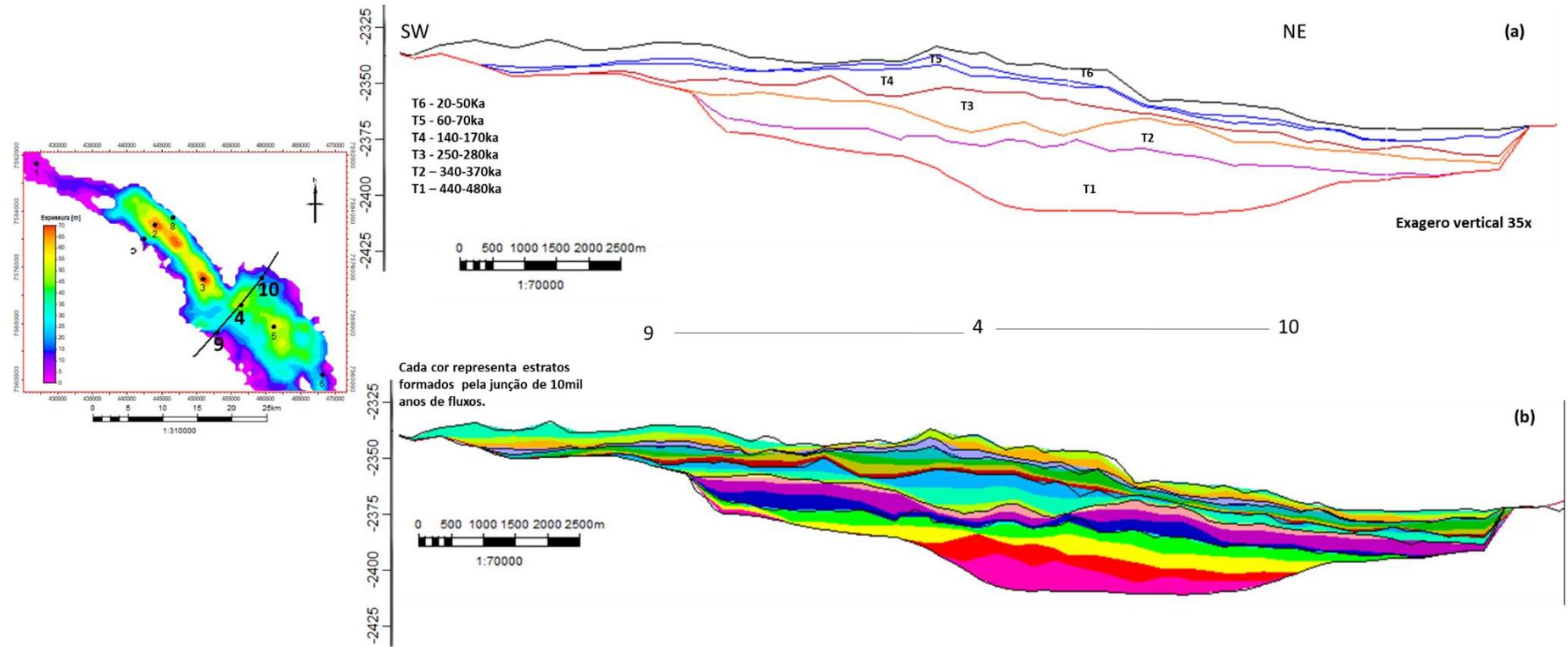


Figura 84 - - Seção strike na região de compelho de lobos do CENÁRIO 8 evidenciando em (a) o empilhamento dos diferentes estratos ao longo das etapas de tempo e (b) o empilhamento das subunidades deposicionais dos mesmos



6.4 - Quantificação do total de sedimentos aportado a cada fluxo

Dentre todos os cenários de aporte água simulados, o CENÁRIO de aporte variável 6B (com frequência de fluxos a cada 500 anos) mostrou-se eficiente em reproduzir as diferentes geometrias deposicionais, empilhamentos estratais, distribuição de fácies sedimentares com boa compatibilidade aos dados observados. Porém, para uma melhor validação dos volumes de água utilizados faz-se necessária uma análise comparativa que que confronte o volume de sedimentos gerados a cada fluxos no modelo com os dados da bibliografia. Jobe et al, (2018), estimaram que os fluxos turbidíticos formadores de lobos deposicionais transportam um volume de sedimentos na ordem de 10^5 a 10^9 m³.

Para comparar-se com os dados acima é necessário fazer uma simples conta do volume de sedimentos que é carreado junto dos fluxos disparados da área-fonte, que corresponde a concentração de 9% (definido no item 4.4.4) do volume total de água, que por sua vez corresponde ao valor de aporte do cenário multiplicado pelo o número total de ‘‘células de área-fonte’’ (281 células, **item 4.4.2**). O CENÁRIO 6B de aporte variável foi configurado com três valores de aporte de água ao longo dos períodos de fonte ativa, sendo eles 25.000, 75.000 e 50.000m³. Para facilitar os cálculos utiliza-se a média desses valores (50.000m³) para prosseguir-se com a totalização de volumes de sedimento. Então, calcula-se, na média, para cada fluxo disparado no CENÁRIO 6B um volume total de água de $14,05 \times 10^6$ m³ (281 células de área fonte x 50.000m³). Logo, aplicando a concentração de 9% nesse total de água chega-se a um total de volume de sedimentos disparados a cada fluxo de $1,3 \times 10^6$ m³. Esse valor encontra-se dentro da variação de 10^5 a 10^9 m³ obtida em Jobe et al, (2018).

7 CONCLUSÕES

A integração dos resultados entre interpretação de dados sísmicos com simulações numéricas de uma série de modelos estratigráfico-sedimentológicos traz novas contribuições à avaliação do impacto de parâmetros de processos deposicionais na geometria final e na distribuição de fácies sedimentares do sistema turbidítico Almirante Câmara.

Os resultados das interpretações do dado sísmico 3D trouxeram um imageamento mais completo dos depósitos pleistocênicos do sistema turbidítico Almirante Câmara, comparado aos estudos anteriores da área, onde foi possível visualizá-lo desde sua feição de cânion até seus três domínios deposicionais principais: complexo de canais discretos, complexo de canais amalgamados e complexo de lobos terminais.

A simulação de modelos estratigráficos-sedimentológicos permitiu a avaliação de diversos parâmetros testados que controlam a deposição turbidítica. No entanto, os principais parâmetros abordados da deposição do sistema turbidítico estudado são a frequência de disparados dos fluxos turbidíticos e o volume de água aportados nos mesmos. Com base no CENÁRIO de *aporte variável* 6B, que foi escolhido como o modelo simulado com melhor compatibilidade aos dados observados, constatou-se que é necessário encontrar uma resultante ótima na combinação entre volume aportado de água e frequência de disparos dos fluxos. Nesse sentido, o estudo possibilitou estimar que o sistema turbidítico analisado fora depositado a partir de sucessivos fluxos com um aporte de água em regime variável com os valores de 25.000, 75.000 e 50.000m³ (totalizando 14,05x10⁶m³ na média) disparados a cada 500 anos.

A observação de seções 3D ao longo do modelo escolhido demonstrou que a modelagem de processos foi capaz de reproduzir os diferentes domínios deposicionais observados nos dados sísmico, formadas por distintas arquiteturas deposicionais, padrões de empilhamento e distribuição de fácies. Ao observa-se o sucessivo empilhamento dos estratos simulados percebe-se que evolução do preenchimento da paleosuperfície dá-se em consequência da capacidade de erosão e preenchimento dos fluxos disparados, que se empilham em estratos menores, formando arquiteturas deposicionais que apresentam padrões de empilhamento ora mais amalgamados com migrações laterais como na região de complexo de canais, ora mais desconfinados com

compensação laterais como na região de lobos terminais. Apesar disso, o resultado do empilhamento dos diferentes estratos deposicionais na região de lobos mostraram uma justaposição distinta comparados aos estratos deposicionais dos lobos mapeados por Abreu et al (2005), o que enseja ao aprimorando das simulações, para trabalhos futuros, com a possibilidade de incluir outros processos geológicos, a fim ter-se resultados deposicionais mais realístico aos dados observados.

A variação do parâmetro Erodibilidade no modelo 8 evidenciou a grande sensibilidade gerada nas simulações em termos de maior carreamento de sedimentos para regiões mais distais, aumento da proporção de lama ao longo dos sistemas deposicionais e geração de maiores feições erosivas na região de complexo de canais e região de lobos terminais.

A variação da declividade do talude da paleosuperfície (modelos 9 e 10) também evidenciou forte sensibilidade nos depósitos gerados, onde em cenário de maior declividade do talude há um recuo dos depocentros formados, e no cenário de menor declividade há um avanço dos depocentros em direção à bacia.

Os resultados do presente estudo poderão ainda servir de base para testes de diversos outros modelos conceituais deste sistema turbidítico, como também de outros sistemas inseridos em contexto deposicional semelhante.

REFERÊNCIAS

- Abreu, C. J. 2005. Complexo de Lobos do Sistema Depositional Moderno de Águas Profundas Almirante Câmara Imageado por Sísmica de Alta-Resolução, Bacia de Campos. 130 p. Tese (Doutorado em Geologia) – Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.
- Almeida, A.G., Kowsmann, R.O. 2014. Geomorfologia do talude continental e do Platô de São Paulo. In: Kowsmann, R.O., editor Geologia e Geomorfologia. Rio de Janeiro: Elsevier. Habitats, v. 1.
- Alves, T.D. 2013. A Porção Distal do Complexo de Lobos Almirante Câmara, Bacia de Campos: Bioestratigrafia e Evolução no Final do Quaternário, com Base em Foraminíferos Plantônicos, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Trabalho de Conclusão de Curso 30 p.
- Bouma, A.H., 1962. Sedimentology of some flysch deposits. A graphic approach to facies interpretation. Elsevier, Amsterdam, 168 pp.
- Costa K.B. & Toledo F.A.L. 2003. Zoneamento bioestratigráfico do Quaternário superior com base em foraminíferos plantônicos. Parte V. Relatório Interno, inédito. Universidade federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 114 p.
- Cross, T.A. and Harbaugh, J.W., 1989, Quantitative dynamic stratigraphy: a workshop, a philosophy, a methodology, in Quantitative Dynamic Stratigraphy, Cross, T. A., ed.: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 625 p.
- Desiree Liechoscki de Paula Faria, Antonio Tadeu dos Reis, Olinto Gomes de Souza, Three-dimensional stratigraphic-sedimentological forward modeling of an Aptian carbonate reservoir deposited during the sag stage in the Santos basin, Brazil, Marine and Petroleum Geology, Volume 88, 2017.
- Empinotti, T.C.A. 2020. Geological Controls on Depositional Architecture of Turbiditic Deposits from Stepped Slope-to-Basin Profiles. 308 p. Doctoral thesis (Delft University of Technology).
- GARDNER, M.H., Borer, J.M., Romans, B.W., Baptista, N., Kling, E.K., Hanggoro, D., Melick, J.J., Wagerle, R.M., Dechesne, M., Carr, M.M., Amerman, R., Atan, S. (2008) Stratigraphic Models for Deep-Water Sedimentary Systems. 28th Annual Gulf Coast Section SEPM. Huston, Texas.
- Groenenberg, R., Hodgson, D., Prélat, A., Luthi, S., Flint, S., 2010. Flow–Deposit Interaction in Submarine Lobes: Insights from Outcrop Observations and Realizations of a Process-Based Numerical Model. J. Sediment. Res. 80, 252–267.
- Jobe ZR, Howes N, Romans BW, Covault JA. Volume and recurrence of submarine-fan-building turbidity currents. Depositional Rec. 2018;00:1–17. <https://doi.org/10.1002/dep2.42>
- KOWSMANN, R.O.; LIMA, A.C. & VICALVI, M.A. 2015. Feições Indicadoras de instabilidade geológica no talude continental e no platô de São Paulo. In: Kowsmann, R.O., editor, Geologia e Geomorfologia, Rio de Janeiro: Elsevier, Habitats, v.1, p. 71-98

Kuenen, P.H. & Migliorini, C., 1950. Turbidity current as a cause of graded bedding. *Journal of Geology* 58, 91-127.

Kuenen, P.H., 1957a. Sole markings of graded greywacke beds. *Journal of Geology* 65, 231–258

Lowe, D.R., 1979. Sediment Gravity Flows: their classification and some problems of application to natural flow deposits. *SEPM Spec. Publ.* 27, 75–82. <https://doi.org/10.1016/j.eoenv.2017.06.045>

Mauricio, Julio. Caracterização Petrográfica das areias do complexo de lobos Almirante Câmara, Bacia de Campos, 2010. Trabalho Final de Curso (Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 39p.

Matos R. S. 2004. Análise do Sistema Turbidítico Almirante Câmara, Neogeno Superior da Bacia de Campos. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 87 p.

M.A. Martins-Neto, O. Catuneanu, Rift sequence stratigraphy, *Marine and Petroleum Geology*, Volume 27.

McHargue, T., Pyrcz, M.J., Sullivan, M.D., Clark, J.D., Fildani, A., Romans, B.W., Covault J.A., Levy, M., Posamentier, H.W., Drinkwater, N.J., 2010. Architecture of turbidite channel systems on the continental slope: Patterns and predictions. *Marine and Petroleum Geology* 28, 728-743.

Middleton, G. V, Hampton, M.A., 1973. Part I. Sediment gravity flows: mechanics of flow and deposition. *Turbid. Deep Water Sediment.* 1–38.

Sousa J.B. 2004. Caracterização sedimentológica das areias de um complexo de lobos turbidíticos modernos da bacia de Campos. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 153p.

MACHADO, L.C.R., KOWSMANN, R.O., ALMEIDA Jr, W., MURAKAMI, C.Y.,

SCHREINER, S., MILLER, D.J., PIAUILINO, V. Geometria da porção proximal do sistema deposicional turbidítico moderno da Formação Carapebus, Bacia de Campos; Modelo de heterogeneidades de reservatório. *Boletim de Geociências Petrobrás*, Rio de Janeiro, v.12, n.2,p. 287-315, maio/nov 2004.

Merriam, D.F. & J.C. Davis, 2001, *Geologic modeling and simulation, sedimentary systems*, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 352 p.

Normark, W.R., 1970. Growth patterns of deep-sea fans. *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.* 54, 2170–2195.

Petrel user assistance, 2019 Copyright Schlumberger.

Posamentier, H.W., Kolla, V., 2003. Seismic geomorphology and stratigraphy of depositional elements in deep water settings. *Journal of Sedimentary Research* 73.

Sun, T., Ghayour, K., Hall, B., Miller, J., 2010, December. Process-based modeling of deep water depositional systems. In: *Seismic Imaging of Depositional and Geomorphic*

Systems: Gulf Coast Section SEPM Foundation 30th Annual Bob F. Perkins Research Conference, pp. 88–112.

Sprague, A.R., Garfield, T.R., Goulding, F.J., Beaubouef, R.T., Sullivan, M.D., Rossen, C., Champion, K.M., Sickafosse, D.K., Abreu, V., Schellpeper, M.E., Jensen, G.N., Jennette, D.C., Pirmez, C., Dixon, B.T., Ying, D., Ardill, J., Mohrig, D.C., Porter, M.L., Farrell, M.E., Mellere, D., 2005. Integrated slope channel depositional models: 282 References the key to successful prediction of reservoir presence and quality in offshore West Africa. CIPM, cuarto E-Exitep 1–13.

Talling et al., 2012a P.J. Talling, D.G. Masson, E.J. Sumner, G. Malgesini Subaqueous sediment density flows: depositional processes and deposit types *Sedimentology* (2012), 10.1111/j.1365-3091.2012.01353.x

Tetzlaff, D.M., 1987, A simulation model of clastic sedimentary processes: Palo Alto, California, Stanford University, Ph.D. dissertation, 345 p.

Tetzlaff, D.M. and Harbaugh J.W., *Simulating Clastic Sedimentation*, Van Nostrand-Reinhold series in Mathematical Geology, New York (1989), 202 pp.

Tetzlaff, D.M. & G. Priddy, 2001, *Sedimentary Process Modeling: From Academia to Industry*. In: *Geologic Modeling and Simulation, Sedimentary Systems* (Ed. by D.F. Merriam & J.C. Davis), Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 352 pp.

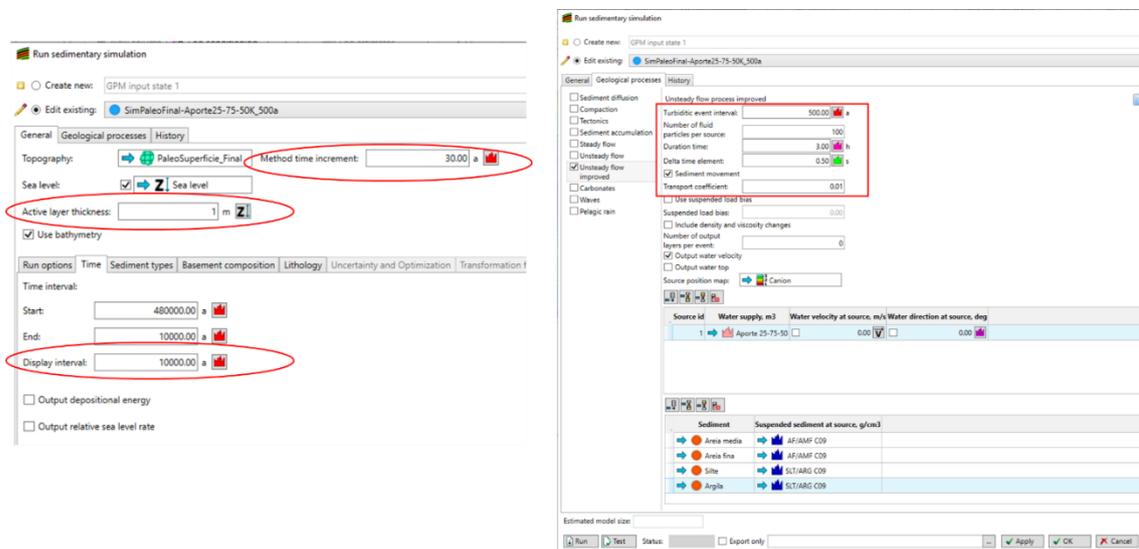
Tetzlaff, D.M., Jan Tveiten, Per Salomonsen, Alina Christ, Wiebke Athmer, Hilde G. Borgos, Lars Sonneland, Claudia Martinez & M. Fernanda Raggio, 2014, “Geologic Process Modeling”, *IX Conference of Hydrocarbon Exploration and Development*, Mendoza, Argentina, November 2014.

Vicalvi, M.A., 1997. Zoneamento bioestratigráfico e paleoclimático dos sedimentos do Quaternário Superior do talude da Bacia de Campos, RJ- Brasil. *B. Geoci. Petrobras*, 11 (1/2): 132 - 165.

Vicalvi, M.A., 1999. Zoneamento Bioestratigráfico e Paleoclimático do Quaternário Superior do Talude da Bacia de Campos e Platô de São Paulo Adjacente, com Base em Foraminíferos Planctônicos. Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Tese de Doutorado, 183p.

Walker, R.G., 1978. Deep-water sandstone facies and ancient submarine fans: models for exploration for stratigraphic traps. *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.* 62, 932–966.

ANEXO 1 – Configuração dos parâmetros internos do GPM



ANEXO 2 – Propriedades e proporções dos sedimentos simulados

Sedimento/Propriedade	Proporção nos fluxos	Diâmetro do grão (mm)	Densidade (g/cm ³)	Capacidade de transporte
Areia média	40%	0,3	2,7	1,2
Areia fina	40%	0,2		1,6
Silte	10%	0,06		3,2
Argila	10%	0,01		6,4

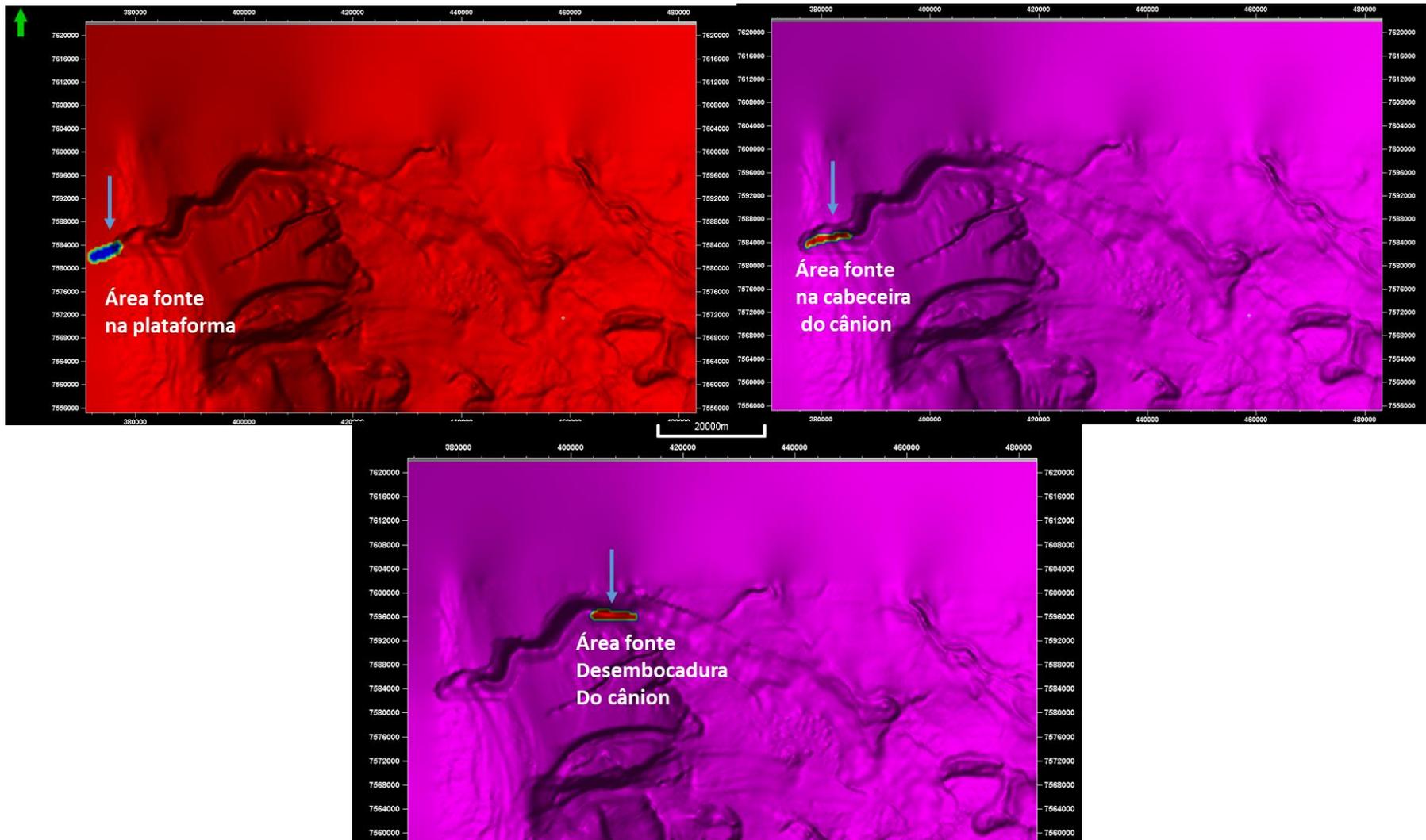
ANEXO 3 – Diferentes posições de área fonte testadas

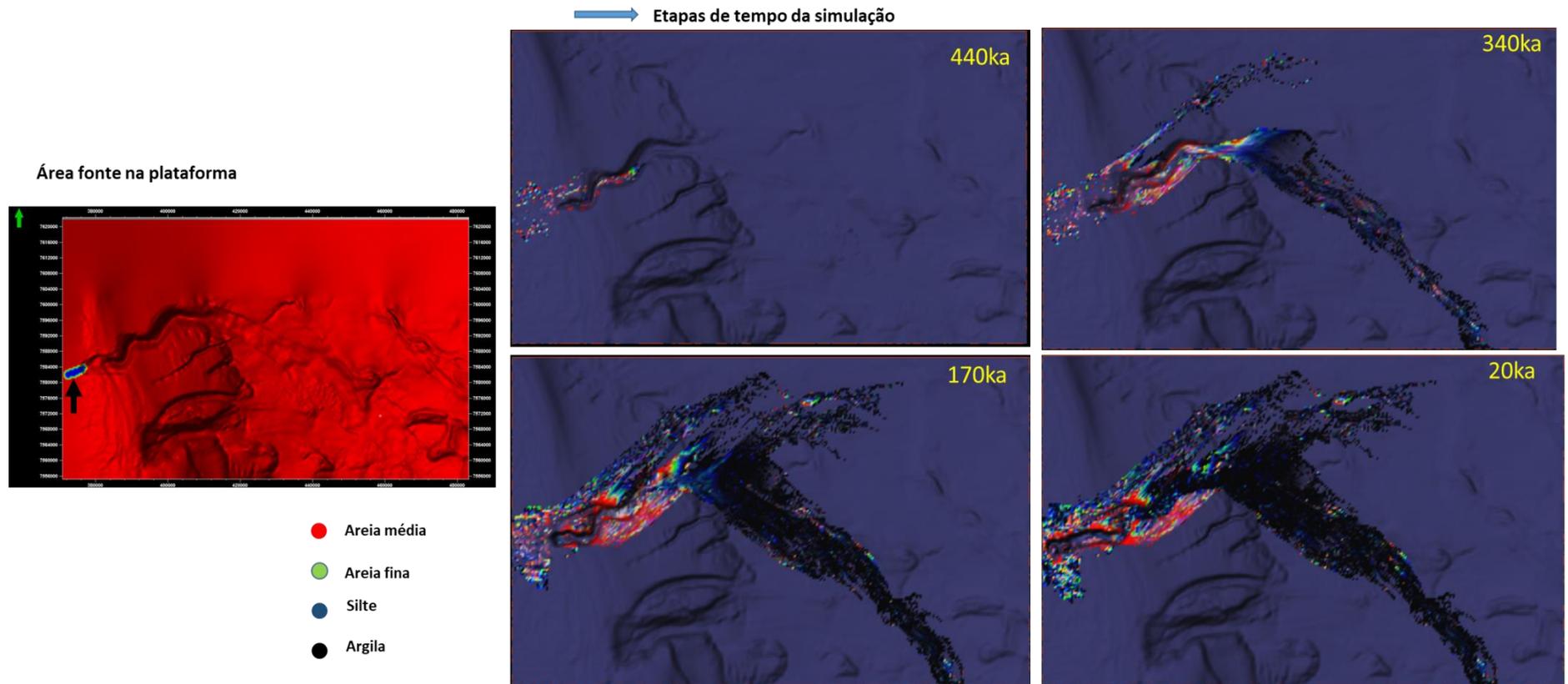
Algumas posições e dimensões de fonte sedimentaram foram testadas ao longo da fase de calibragem das simulações. Aqui são exibidas que resultam em simulações deposicionais inconsistentes, que não foram efetivas em transportar sedimentos até a região de lobos ou formar as feições deposicionais nos dados observados. Aqui são exibidos três cenários dessas possíveis posições testadas de área-fonte que resultaram em simulações deposicionais incompatíveis com os dados observados no sistema turbidítico Almirante Câmara. As figuras abaixo ilustram as diferentes posições de área-fonte testadas e suas respectivas etapas de tempo de simulação. No primeiro cenário, a área-fonte foi posicionada na plataforma continental, logo acima da cabeceira do cânion; no segundo cenário, área-fonte foi posicionada dentro do cânion, precisamente na sua cabeceira; e no terceiro cenário, a área-fonte porção final da feição morfológica do cânion até desembocadura.

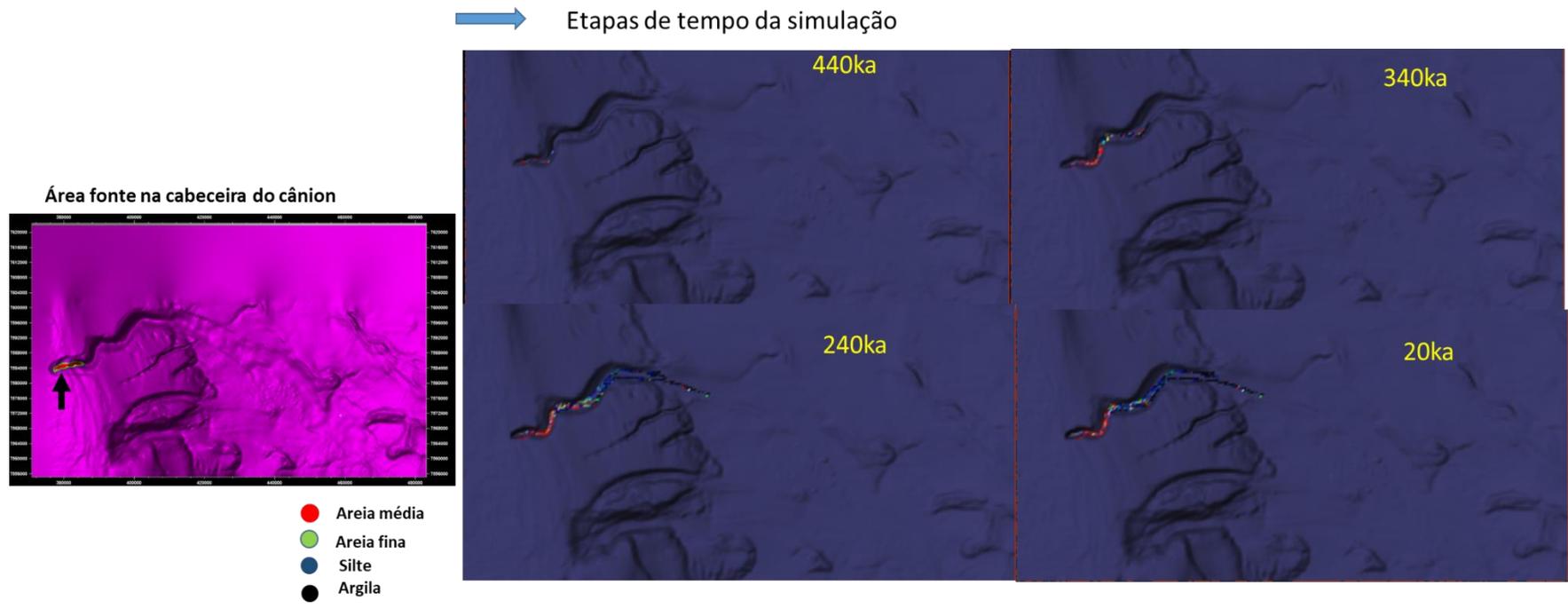
No primeiro cenário, a área-fonte foi posicionada na plataforma continental, verifica se que nas primeiras etapas de tempo o fluxo da plataforma é capturado pelo cânion e consegue carrear sedimentos até a atual a região conhecida de lobos existentes na área, mas apenas proporções maiores de argila e silte atingem a região conhecida dos lobos distais. Porém, logo nas etapas de modelagem seguinte (tempo decrescente), os fluxos começam a apresentar inconsistência e a deposição passa a ocorrer preferencialmente na plataforma, fora da própria feição do cânion.

O segundo cenário, com fonte posicionada na cabeceira do cânion, mostrou-se menos efetivo para as simulações, pois os fluxos ficam restritos ao cânion e não foram capazes de avançar muito além de sua desembocadura.

No terceiro cenário, com fonte posicionada na desembocadura do cânion, as primeiras etapas de tempo de simulação resultam no acúmulo da deposição dos fluxos na saída do cânion, formando um leque submarino de forma de eixo alongado. Percebe-se que uma pequena parte dos fluxos alcançam a região de lobos distais. Nas etapas de tempo de simulação subsequentes o padrão mantém-se o mesmo e os fluxos sucessivos não são efetivos em construir a região canalizada e transportar sedimentos até a região de lobos distais.







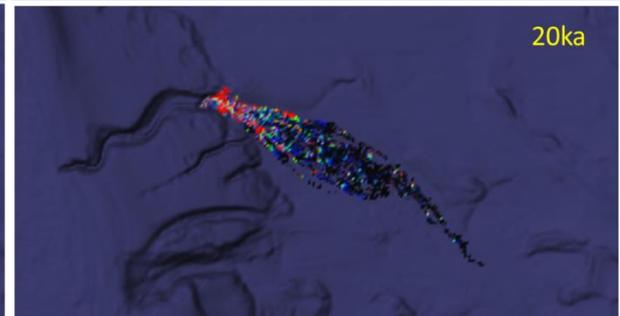
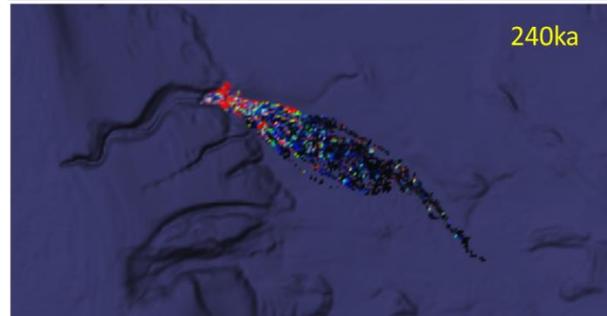
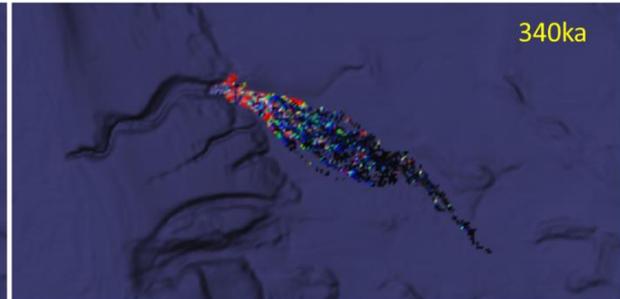
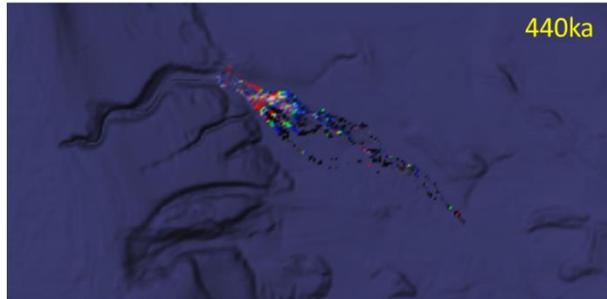


Etapas de tempo da simulação

Área fonte na desembocadura do cânion



- Areia média
- Areia fina
- Silte
- Argila

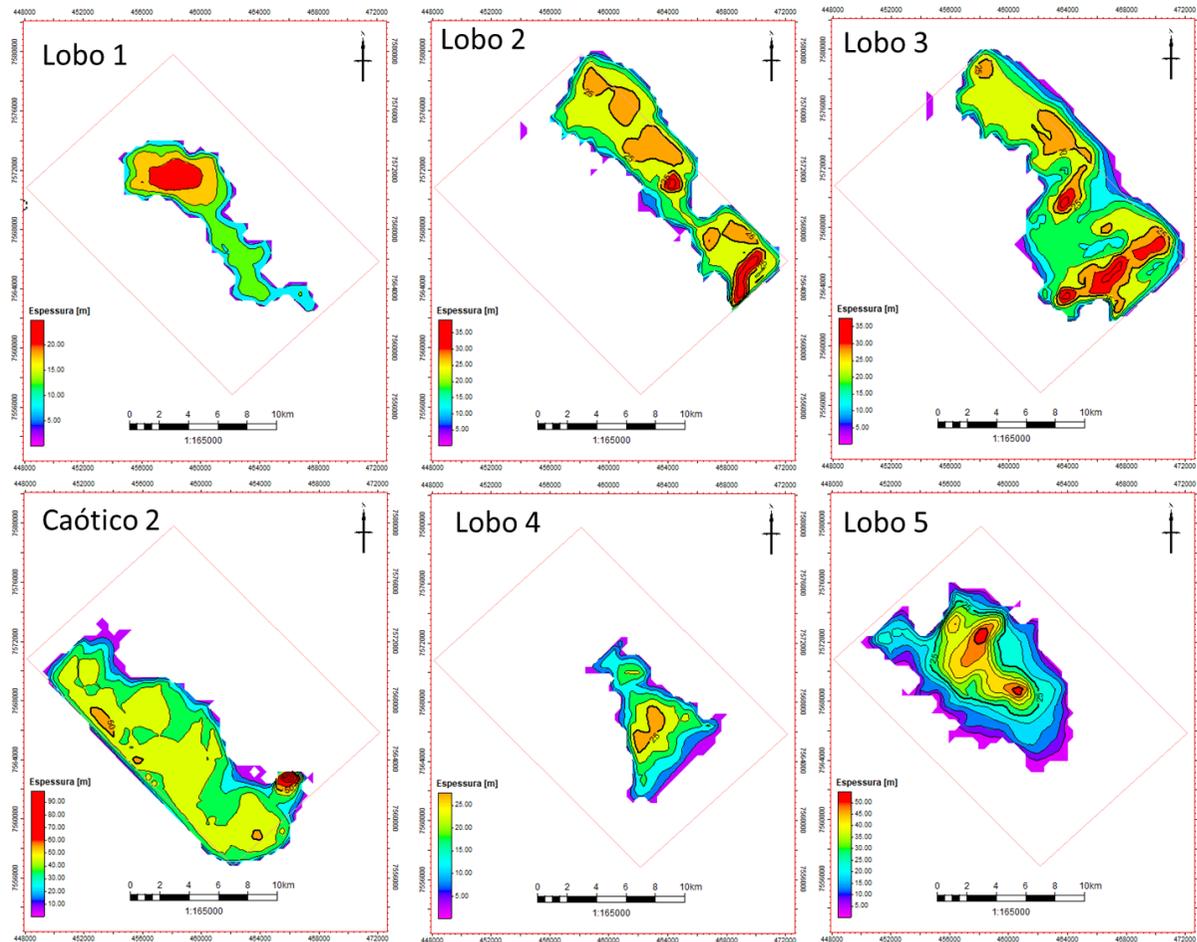
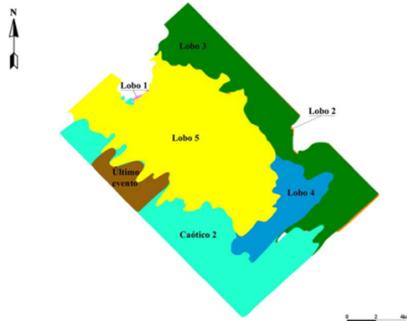


ANEXO 4 - Tabela com tempos totais de cada cenário simulado

Cenário	Aporte (m³)	Frequência dos fluxos(anos)	Razão A:L(%)	Erodibilidade	Tempo total de simulação (h)
1	10.000	1000, 500, e 100	80:20	0	15,98 / 32,28/ 95
2	20.000				15,5 / 31,35/ 98
3	50.000				14,5 / 28,1/ 121
4	100.000				12,02 / 25,02/ 130
5	10-50-25mil				14,65 / 29,53/136
6	25-75-50mil				13,51/27,29/ 140
7	60-160-80mil				11,89 /23,4
8	25-75-50 mil	500	Início 80:20 /fim 20:80		25,8
9	25-75-50 mil	500	80:20	1	22,91

ANEXO 5 – Mapas de isópodas de Abreu 2005, georreferenciados no Petrel

Espessuras dos lobos
Abreu (2005)



ANEXO 6 – Tabelas com valores de aporte de água nos períodos de área fonte-ativa

Tabelas com valores de aporte fixo em cada etapa de área-fonte ativa

Geological age	Water volume m3	Geological age	Water volume m3
0	0.0199	0	0.0199
1	0.0200	1	0.0200
2	0.0500	2	0.0500
3	0.0501	3	0.0501
4	0.0599	4	0.0599
5	0.0600	5	0.0600
6	0.0700	6	0.0700
7	0.0701	7	0.0701
8	0.1299	8	0.1299
9	0.1300	9	0.1300
10	0.1700	10	0.1700
11	0.1701	11	0.1701
12	0.2499	12	0.2499
13	0.2500	13	0.2500
14	0.2800	14	0.2800
15	0.2801	15	0.2801
16	0.3399	16	0.3399
17	0.3400	17	0.3400
18	0.3700	18	0.3700
19	0.3701	19	0.3701
20	0.4399	20	0.4399
21	0.4400	21	0.4400
22	0.4800	22	0.4800

Geological age	Water volume m3	Geological age	Water volume m3
0	0.0199	0	0.0199
1	0.0200	1	0.0200
2	0.0500	2	0.0500
3	0.0501	3	0.0501
4	0.0599	4	0.0599
5	0.0600	5	0.0600
6	0.0700	6	0.0700
7	0.0701	7	0.0701
8	0.1299	8	0.1299
9	0.1300	9	0.1300
10	0.1700	10	0.1700
11	0.1701	11	0.1701
12	0.2499	12	0.2499
13	0.2500	13	0.2500
14	0.2800	14	0.2800
15	0.2801	15	0.2801
16	0.3399	16	0.3399
17	0.3400	17	0.3400
18	0.3700	18	0.3700
19	0.3701	19	0.3701
20	0.4399	20	0.4399
21	0.4400	21	0.4400
22	0.4800	22	0.4800

Tabelas com valores de aporte variável em cada etapa de área-fonte ativa

Geological age	Water volume m3	Geological age	Water volume m3	Geological age	Water volume m3
0	0.0199	0	0.0199	0	0.0199
1	0.0200	1	0.0200	1	0.0200
2	0.0400	2	0.0400	2	0.0400
3	0.0500	3	0.0500	3	0.0500
4	0.0501	4	0.0501	4	0.0501
5	0.0599	5	0.0599	5	0.0599
6	0.0600	6	0.0600	6	0.0600
7	0.0650	7	0.0650	7	0.0650
8	0.0700	8	0.0700	8	0.0700
9	0.0701	9	0.0701	9	0.0701
10	0.1299	10	0.1299	10	0.1299
11	0.1300	11	0.1300	11	0.1300
12	0.1500	12	0.1500	12	0.1500
13	0.1700	13	0.1700	13	0.1700
14	0.1701	14	0.1701	14	0.1701
15	0.2499	15	0.2499	15	0.2499
16	0.2500	16	0.2500	16	0.2500
17	0.2600	17	0.2600	17	0.2600
18	0.2800	18	0.2800	18	0.2800
19	0.2801	19	0.2801	19	0.2801
20	0.3399	20	0.3399	20	0.3399
21	0.3400	21	0.3400	21	0.3400
22	0.3600	22	0.3600	22	0.3600
23	0.3700	23	0.3700	23	0.3700
24	0.3701	24	0.3701	24	0.3701
25	0.4399	25	0.4399	25	0.4399
26	0.4400	26	0.4400	26	0.4400
27	0.4600	27	0.4600	27	0.4600
28	0.4800	28	0.4800	28	0.4800

Geological age	Water volume m3	Geological age	Water volume m3	Geological age	Water volume m3
0	0.0199	0	0.0199	0	0.0199
1	0.0200	1	0.0200	1	0.0200
2	0.0500	2	0.0500	2	0.0500
3	0.0501	3	0.0501	3	0.0501
4	0.0599	4	0.0599	4	0.0599
5	0.0600	5	0.0600	5	0.0600
6	0.0700	6	0.0700	6	0.0700
7	0.0701	7	0.0701	7	0.0701
8	0.1299	8	0.1299	8	0.1299
9	0.1300	9	0.1300	9	0.1300
10	0.1700	10	0.1700	10	0.1700
11	0.1701	11	0.1701	11	0.1701
12	0.2499	12	0.2499	12	0.2499
13	0.2500	13	0.2500	13	0.2500
14	0.2800	14	0.2800	14	0.2800
15	0.2801	15	0.2801	15	0.2801
16	0.3399	16	0.3399	16	0.3399
17	0.3400	17	0.3400	17	0.3400
18	0.3700	18	0.3700	18	0.3700
19	0.3701	19	0.3701	19	0.3701
20	0.4399	20	0.4399	20	0.4399
21	0.4400	21	0.4400	21	0.4400
22	0.4800	22	0.4800	22	0.4800

ANEXO 7 – Tabelas com valores de aporte concentração e proporção de sedimento durante os períodos de área-fonte ativa

Proporção constante entre A:L em 80:20

Valores para as areias M/F

Geological age	Sediment concentration g/cm ³
0	0.0199
1	0.0200
2	0.0500
3	0.0501
4	0.0599
5	0.0600
6	0.0700
7	0.0701
8	0.1299
9	0.1300
10	0.1700
11	0.1701
12	0.2499
13	0.2500
14	0.2800
15	0.2801
16	0.3399
17	0.3400
18	0.3700
19	0.3701
20	0.4399
21	0.4400
22	0.4800

Valores para as areias Slt/Arg

Geological age	Sediment concentration g/cm ³
0	0.0199
1	0.0200
2	0.0500
3	0.0501
4	0.0599
5	0.0600
6	0.0700
7	0.0701
8	0.1299
9	0.1300
10	0.1700
11	0.1701
12	0.2499
13	0.2500
14	0.2800
15	0.2801
16	0.3399
17	0.3400
18	0.3700
19	0.3701
20	0.4399
21	0.4400
22	0.4800