



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS FÍSICAS E MATEMÁTICAS
BACHARELADO EM OCEANOGRAFIA

PEDRO ALÍPIO NETO

**INTERPRETAÇÃO DE REGISTROS SÍSMICOS (500 Hz – 12 kHz) DE SUB-
SUPERFÍCIE DA PLATAFORMA CONTINENTAL INTERNA DA ENSEADA DE
PORTO BELO, SANTA CATARINA.**

Florianópolis – SC

2024

PEDRO ALÍPIO NETO

INTERPRETAÇÃO DE REGISTROS SÍSMICOS (500 HZ – 12 KHZ) DE SUB-SUPERFÍCIE DA PLATAFORMA CONTINENTAL INTERNA DA ENSEADA DE PORTO BELO, SANTA CATARINA.

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de oceanografia da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em oceanografia

Orientador (a): Prof.Dr. Antonio Henrique da Fontoura Klein

Coorientador: Prof.Dr. Francisco Carlos Lajus Junior

Florianópolis – SC

2024

Alípio Neto, Pedro

INTERPRETAÇÃO DE REGISTROS SÍSMICOS (500 Hz - 12 kHz)
DE SUB-SUPERFÍCIE DA PLATAFORMA CONTINENTAL INTERNA DA
ENSEADA DE PORTO BELO, SANTA CATARINA. /Pedro Alípio
Neto orientador, Antonio Henrique da Fontoura Klein ,
coorientador, Francisco Carlos Lajus Junior, 2024.

88 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências
Físicas e Matemáticas, Graduação em Oceanografia,
Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Oceanografia. 2. barreira arenosa. 3. Itapema. 4.
sísmica. 5. holoceno. I. Klein , Antonio Henrique da
Fontoura . II. Junior, Francisco Carlos Lajus . III.
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Oceanografia. IV. Título.

Pedro Alípio Neto

INTERPRETAÇÃO DE REGISTROS SÍSMICOS (500 Hz – 12 kHz) DE SUB-SUPERFÍCIE DA PLATAFORMA CONTINENTAL INTERNA DA ENSEADA DE PORTO BELO, SANTA CATARINA.

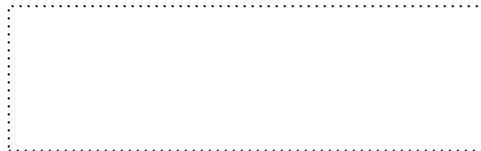
Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de “bacharel em Oceanografia” pela Universidade Federal de Santa Catarina e aprovado em sua forma final.

Florianópolis, 14 de junho de 2024.

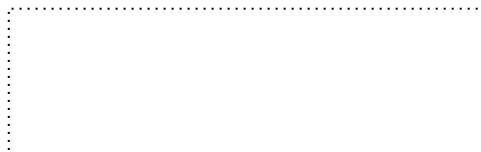


Prof^a.Dr^a. Regina Rodrigues Rodrigues

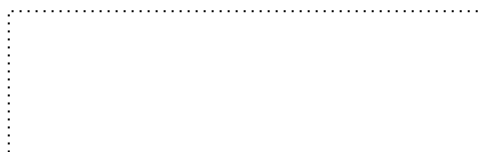
Banca examinadora



Prof.Dr. Antonio Henrique da Fontoura Klein
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof.Dr. Jarbas Bonetti Filho
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof.Dr. Jorge Antonio Guimarães Souza
JS Marine Geophysics & Hydrography

Florianópolis, 2024.

Dedico este trabalho a minha família e amigos próximos que estiveram comigo durante toda essa jornada e contribuíram de alguma forma.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer aos meus pais, não só pelo apoio durante a graduação, mas também por acreditarem em mim e no meu sonho na oceanografia, quando tudo isso ainda era uma grande dúvida e um medo do desconhecido. Vocês foram as primeiras pessoas a quem tive que responder à famosa pergunta: “Oceano o quê?”. Muito obrigado por confiarem em mim. Aqui está o resultado de toda essa confiança e apoio.

Sou extremamente grato às pessoas que me receberam muito bem na universidade e que foram grandes companheiros de risadas e conversas. Aos membros do *LabEcotox* e aos grandes amigos da turma 17.1: Lucas Pires, Antônio Mesquita, Felipe Ribeiro, Rivaldo Júnior, Isabel Rios, Larissa Sitowski e agregados, Luciana Amorim e Andressa Velozo. Hoje, alguns de vocês são oceanógrafos, outros não, mas jamais esquecerei os momentos que passamos juntos.

Agradeço a toda minha turma de 19.1 da UFSC, por todos os momentos estudando juntos para as provas, festas e bares, e reuniões para reclamar de professores e trabalhos em grupo que faziam a gente discutir e ficar sem nos falarmos. Os semestres foram nos separando, mas cada um teve sua importância em algum momento. Um obrigado a: Andressa, Bárbara Marafon, Giu Pardini, Hilário Junior, Letícia Cascaes, Leticia Dierschnabel, Mariana Zorzo, Roberta, Samuel, Victoria Raucci, Yasmin Bauer, Yasmin Rodrigues, e Ysa.

Agradeço a todas as pessoas do projeto Baleia Franca que foram essenciais principalmente para o meu crescimento pessoal. Foram muitas risadas, choros, troca de conhecimentos e experiências. Um grande abraço: Dezo, Caliel, Giu, Jeh, Kah, Larissão, Bi, Ale, Elias, Lara e Letícia Pitanga. Sou muito grato ao Fábio Pereira, Hellen Leite, Dudu, Sarah e Carol, que sempre me receberam de braços abertos e estavam dispostos a me ajudar em momentos bons e ruins.

Não poderia deixar de mencionar a Bárbara, que foi quem me apresentou ao cheer e me recebeu na oceanografia da UFSC. Ela também me apresentou a pessoas incríveis dentro deste esporte: Luiza, Igor, Beltim, Nery, Gu, Lu, Rodrigo. E aos agregados posteriores: Bea, Greta, Lu Bertoldo, André, Força, Day, Duda, Leo, Tiago, Julia, Poposki.

Às grandes amigas que fiz durante a graduação e que amam uma festa do pinhão, muito obrigado Milena, Sthe e Julia por todos os momentos juntos para conversas sérias ou não. Obrigado Milena por toda ajuda na reta final do curso e parceria para estudo para as provas finais. A Sarah, que tanto me ajudou não só na disciplina de botânica, mas também em muitos momentos da vida, sou extremamente grato. Muito obrigado a Alice por ser minha parceira de treino às 6 da manhã.

Agradeço ao professor Klein por toda oportunidade e orientação, não só durante o TCC, mas também nas disciplinas da graduação. Também gostaria de agradecer ao professor Pedro Pereira, uma pessoa que tenho como inspiração, e que tanto me ajudou durante minha jornada na graduação, com muitos trabalhos, campos no dia 31 de dezembro e muitas conversas.

Aos membros do LOC que estiveram comigo durante toda a jornada da graduação: Gabi, Luana, Malu, Larissa, Mariane, Bruna, Cícero, Henrique, Eulália, Mateus, Rafa, Tainá. Em especial, às pessoas com quem tive um convívio maior e aprendi a admirar e me inspirar, não só no ambiente acadêmico, mas na vida: Mario e Laís, muito obrigado por todo apoio em todos os momentos e todos os ensinamentos passados, agradeço demais pela companhia até de madrugada no laboratório. Sou extremamente grato à Luiza, que com certeza foi a pessoa que mais riu comigo durante todo esse tempo. Mesmo em dias mais sérios, ela sempre estava feliz e disposta a ajudar qualquer um e a dar pitaco no meu trabalho.

Também não poderia deixar de citar ex membros do LOC que tanto me ajudaram com este trabalho e com experiências da vida, muito obrigado Wilson, Bianca e Franco por todas as conversas e ensinamentos. Diretamente para a USP, muito obrigado Letícia pelo apoio na reta final do tcc e pelos inúmeros memes de qualidade duvidosa trocados pelo instagram e também Bianca por todas as conversas e histórias compartilhadas do cheer e da vida.

Agradeço à toda equipe da secretaria do curso, Núbia, Josy, Ângelo que sempre melhoravam meu dia com uma boa conversa e me ajudavam com a parte burocrática do curso.

Aos meninos do Armário, muito obrigado João e Filipe por todas as conversas, piadas pesadas e fofocas da vida alheia, e à Fernanda que tem o sonho de fazer parte desse grupo. Sou grato também à Vivi por todos os convites de café com cuscuz acompanhados de conversas sobre a vida.

Também sou extremamente grato à Olga e a Cíntia, amizades incríveis que a oceanografia me proporcionou ao longo dessa jornada, muito obrigado por todas as viagens, conversas e quedas compartilhadas ao longo desses anos.

Não poderia deixar de agradecer aqueles que me ajudaram a não surtar com tudo, muito obrigado Arthur e Richard pelos treinos e também à toda velha guarda do muay thai, Richard, Arthur, Carol, Aline, Bike e João.

Por último e mais importante, gostaria de agradecer à minha irmã Laura Lis, que é a pessoa que eu mais amo no mundo. É incrível como, mesmo com 11 anos de diferença, a gente ainda teve briga de irmãos por besteira. Indiretamente, você me ajudou a amadurecer e ser uma pessoa melhor. Tenho muito orgulho de você e você sabe que pode sempre contar comigo.

“Ou escreves algo que valha a pena ler, ou fazes algo acerca do qual valha a pena
escrever”

Benjamin Franklin

RESUMO

O presente trabalho apresenta uma análise de registros sísmicos (500 Hz – 12 kHz) realizada na enseada de Porto localizada na região centro norte do Estado de Santa Catarina. A partir de perfis de sísmica rasa, adquiridos utilizando uma fonte do tipo ressonante de baixa potência do tipo SBP (*subbottom profiler*) que produz um sinal acústico com forma conhecida, altamente repetitiva. Refletores sísmicos foram identificados, analisados e mapeados em perfis sísmicos de alta resolução. A interpretação da estratigrafia dos registros sísmicos foi realizada através de uma abordagem geofísica, utilizando o conceito de variação da impedância acústica para detectar as diferentes camadas presentes no sedimento, e assim ser capaz de identificar dos refletores para mapeamento das regiões de possíveis locais de barreiras arenosas. O *software* SonarWiz foi usado para analisar esses registros sísmicos, aplicando técnicas de filtragem de dados, como identificação do fundo e filtros de passagem de banda. Os registros mostraram presença de barreiras arenosas em todas as linhas que foram observadas com espessuras variando de 4 a 15 m e comprimentos de 50 a 800 m, localizadas a pelo menos 2 m abaixo do fundo do mar. Os refletores foram observados e com base neles foi possível a identificação de truncamentos erosivos, paleocanais, refletores internos, sismofáceis, SBA, e estruturas que representam eventos sísmicos. Com essas informações em toda a área de estudo foi possível comparar com trabalhos anteriores realizados nas regiões próximas como: Tijucas, São Francisco do Sul, Balneário, e Pinheira. Essas estruturas foram relacionadas à elevação do mar nos últimos 10.000 anos.

Palavras-chave: barreira arenosa; Porto Belo; sísmica; holoceno; nível do mar.

ABSTRACT

This study presents an analysis of seismic records (500 Hz – 12 kHz) conducted in Porto Bay, located in the central-northern region of the State of Santa Catarina. The data were acquired using shallow seismic profiles with a low-power resonant source, an SBP (*subbottom profiler*), which produces a highly repetitive acoustic signal of known shape. Seismic reflectors were identified, analyzed, and mapped in high-resolution seismic profiles. The stratigraphic interpretation of the seismic records was carried out through a geophysical approach, utilizing the concept of acoustic impedance variation to detect the different layers present in the sediment, thereby enabling the identification of reflectors for mapping potential sandy barrier locations. The SonarWiz software was used to analyze these seismic records, applying data filtering techniques such as bottom identification and band-pass filters. The records showed the presence of sandy barriers in all observed lines, with thicknesses ranging from 4 to 15 meters and lengths from 50 to 800 meters, located at least 2 meters below the seabed. Based on the reflectors, it was possible to identify erosional truncations, paleochannels, internal reflectors, seismic facies, SBA, and structures representing seismic events. With this information, it was possible to compare the findings across the study area with previous studies conducted in nearby regions such as Tijucas, São Francisco do Sul, Balneário Camboriú, and Pinheira. These structures were related to sea level rise over the last 10,000 years.

Keywords: sandy barrier; Porto Belo; seismic; Holocene; sea level.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização da área de estudo.	23
Figura 2 – Representação esquemática de transgressão e regressão da linha de costa.....	25
Figura 3 – Ilustração a respeito dos métodos de investigação e seus objetivos.	27
Figura 4 – (a) Sinal acústico sem nenhum tipo de tratamento. (b) Sinal acústico modificado com filtro ADC aplicado.....	28
Figura 5 – Padrões de terminações de reflexões em sequência que podem ser encontrados em perfis sísmicos.	30
Figura 6 – Padrões de reflexos sísmicas. (A) Paralelas e Subparalelas; (B) Divergentes; (C) Progradantes; (D) Caótico; (E) Transparente; (F) Hummocky, lenticular, segmentada e contorcida.....	31
Figura 7 – Eustasia por Posamentier & Vail (1987) <i>apud</i> Fávera (2001).	32
Figura 8 – Ambientes de sedimentação em costas temperadas, latitudes onde a área de estudo se insere.	34
Figura 9 – Exemplo de uma estrutura onde mostra os principais ambientes de sedimentação.	35
Figura 10 – Fluxograma esquemático do desenvolvimento da pesquisa e metodologia utilizada para desenvolvimento deste trabalho.....	36
Figura 11 – Linha de costa de Santa Catarina com destaque para a região da enseada de Porto Belo.....	37
Figura 12 – <i>Chirp</i> 0512i, fonte acústica do tipo ressonante.	37
Figura 13 – Velocidade do som no sedimento.	39
Figura 14 – Exemplo de um perfil sísmico sem processamento.	40
Figura 15 – Exemplo do mesmo perfil sísmico, com os filtros AGC, TVG e parâmetros de <i>blanking</i> , <i>duration</i> e <i>threshold</i>	40
Figura 16 – Exemplos de superfícies marcadas no perfil A-A'. As superfícies foram separadas por cores e mapeadas como mostra o mapa ao lado indicando o trecho a qual se refere a unidade demarcada.	47
Figura 17 – Refletor 1, identificada em vermelho da linha sísmica C-C'.	48
Figura 18 – Refletor 2, identificada em amarelo da linha sísmica A-A'.	48
Figura 19 – Refletor 3, identificada em azul da linha sísmica C-C'.	49
Figura 20 – Refletor 4, identificada em verde da linha sísmica E-E'.	50

Figura 21 – Refletor 5, identificado em branco na linha sísmica A-A'	50
Figura 22 – Profundidade das superfícies sísmicas identificadas.	51
Figura 23 – Perfil A-A' sem interpretação.....	52
Figura 24 – Perfil A-A' com interpretação.....	52
Figura 25 – Perfil B-B' sem interpretação.....	53
Figura 26 – Perfil B-B' com interpretação.....	53
Figura 27 – Perfil C-C' sem interpretação.	54
Figura 28 – Perfil C-C' com interpretação.	54
Figura 29 – Perfil D-D' sem interpretação.	54
Figura 30 – Perfil D-D' com interpretação.	55
Figura 31 – Perfil E-E' sem interpretação.....	55
Figura 32 – Perfil E-E' com interpretação.....	56
Figura 33 – Mapa da área de estudo com marcações indicando 2 pontos onde foram realizadas coletas de testemunhos. Ponto T3 mostrado a esquerda e T1 a direita. .	58
Figura 34 – Perfil B-B' mostrando feições retrogradacionais.....	59
Figura 35 – Perfil C-C' indicando retrogradação de unidade.....	59
Figura 36 – Linhas sísmicas indicando a presença de paleocanais, identificados como um sistema laguna-barreira. Em preto estão as linhas sísmicas, em azul estão localizados os paleocanais e em vermelho as barreiras arenosas.....	60
Figura 37 – Perfil C-C' usado para exemplificar um sistema laguna-barreira, com a presença de um paleocanal de maré.	61
Figura 38 – Feição de preenchimento de canal mostrando uma barreira formada por dunas costeiras.	61
Figura 39 – Curva de variação do nível do mar do Holoceno para o Sul do Brasil, levando em conta pulsos globais de água de degelo, marcado pelas colunas cinzas. O último evento de máximo glacial ocorreu a cerca de 8 mil anos atrás.....	64
Figura 40 – Barreiras arenosas apontadas nas setas em vermelho, sobrepostas pela unidade que foi discutida contendo estruturas de areia e lama.....	64
Figura 41 – Feição de preenchimento de canais. A) figura gerada por Cooper <i>et al.</i> (2016) na região da Baía de Tijucas, onde afirmou ter uma intercalação entre sedimentos arenosos e lama. B) figura gerada pelo autor comparando o registro da região de Porto Belo com o mesmo formato de paleocanal.....	65

Figura 42 – Perfil C-C' com maior interpretação de unidades apresentando evento de agradacão de unidade.....	66
Figura 43 – Perfil C-C' indicando agradacão de unidade.	66
Figura 44 – Feiçoes de preenchimento de canal identificadas em amarelo. A) paleocanais identificados por Galvão (2018) na regiao da Pinheira. B) feiçoes identificadoras em Porto Belo. Ambos os locais possuem registros de ambientes retrogradantes.....	67
Figura 45 – Mapa de isopacas de barreiras arenosas identificadas em Tijucas A) por Cooper <i>et al.</i> (2016) e B) pelo autor.	69
Figura 46 – Distribuicão de barreiras arenosas identificadas pelos autores que já estudaram a regiao costeira do Sul do Brasil. São Francisco do Sul, Baía de Tijucas, Balneário Camboriú e Baía da Pinheira.	70

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Quadro de descrição das sismofáceis observadas com seus respectivos padrões de preenchimentos durante o processamento sísmico. Essas imagens foram obtidas através de processamento via Matlab®, onde gerou-se os resultados de volume para melhor visualização.43

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

AGC	<i>Automatic Gain Control</i> (Controle de Ganho Automático)
LOC	Laboratório de Oceanografia Costeira
NM	Nível do Mar
NMM	Nível Médio do Mar
QGIS	QuantumGIS
SBA	Sistemas de Barreiras Arenosas
SIG	Sistema de Informações Geográficas
TVG	<i>Time Varied Gain</i> (Ganho Variado de Tempo)
UMG	Último Máximo Glacial

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	17
2.	OBJETIVOS	20
2.1	GERAL.....	20
2.2	ESPECÍFICO.....	20
3.	ÁREA DE ESTUDO	21
4.	REFERENCIAL TEÓRICO	24
4.1	NÍVEIS DE BASE.....	24
4.1.1	Transgressão marinha	24
4.1.2	Regressão marinha	25
4.2	INVESTIGAÇÃO GEOFÍSICA.....	25
4.2.1	Método sísmica de reflexão	26
4.2.2	Filtros e ganhos	27
4.3	ESTRATIGRAFIA DE SEQUÊNCIAS.....	28
4.3.1	Sismoestratigrafia	29
4.4	EUSTASIA.....	32
4.5	BARREIRAS ARENOSAS.....	33
5.	METODOLOGIA	36
5.1	PROCESSAMENTO.....	38
5.1.1	Sísmica	38
5.1.2	Sistema de Informações Geográficas	41
5.1.3	Resultados em forma de desenhos esquemáticos	41
6.	RESULTADOS	42
6.1	DESCRIÇÃO DOS PERFIS.....	51
7.	DISCUSSÃO	62
8.	CONCLUSÃO	71
9.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	72
	REFERÊNCIAS	73
	ANEXO A	78

1. INTRODUÇÃO

O planeta Terra vem aquecendo há bastante tempo como mostram diversos registros (MENDONÇA, 2003; RIGOZO; NORDEMANN, 1998), sofrendo recentemente uma aceleração deste aquecimento devido as emissões de CO₂ (VITAL,2018). O que resulta num problema global premente, que tem recebido grande atenção nos últimos anos devido às suas consequências abrangentes que afetam diretamente regiões costeiras. Com esse aumento da temperatura, ocorrem processos de degelos nos polos e isso conseqüentemente acarreta a elevação do nível do mar (NM). A tendência é que esse aumento continue acontecendo cada vez mais. Além do derretimento das calotas, o aumento do NM é impulsionado por outro fator sendo ele a expansão térmica da água do mar. As mudanças climáticas globais, alimentadas por atividades humanas como a queima de combustíveis fósseis, têm acelerado esses processos (VITAL, 2018).

Mudanças do nível absoluto do mar afetam os processos costeiros e tendem a mudar a forma da zona costeira e a localização da linha de costa. Os efeitos das mudanças do nível absoluto do mar podem ser considerados em várias escalas de tempo, indo de alguns minutos a dias (ondas de gravidade, marés, tempestades), de semanas a anos (os ciclos *spring neap tides*, ciclos sazonais) e de períodos geológicos de milhares a centenas de milhares de anos (SOUZA, 2007). Porém a mudança em escala geológica com a qual será abordada neste trabalho, é a elevação do nível do mar pós a última glaciação, descrita como pulsos de degelo por Liu & Milliman (2004). Como resultado desse degelo o nível do mar no Holoceno está geralmente definido de que seu término se deu a mais de 4000 anos antes do atual e o nível eustático do mar aparenta estar em elevação em muitas áreas, em uma razão de 1-2 mm/ano, durante o século passado e atual (GORNITZ, 1995). Mudanças climáticas, como o rápido aumento do nível do mar, têm contribuído para a preservação dessas barreiras arenosas no substrato (p.ex., HEIN *et al.*, 2012; COOPER *et al.*, 2016; COOPER *et al.*, 2018; MENDONÇA, 2003). Como resultado, a taxa e a magnitude do aumento do NM aumentaram ao longo do último século, representando ameaças significativas para as regiões costeiras em todo o mundo. Assim, percebe-se que as zonas costeiras estão sujeitas a variações que podem vir a gerar implicações econômicas e sociais. O estudo de ambientes costeiros antigos se

faz necessário para amenizar, ou evitar problemas futuros, pois o que ocorreu no passado pode vir a ocorrer novamente.

Os ambientes costeiros são resultantes do espaço de acomodação, do suprimento sedimentar, das variações do nível médio do mar (NMM) e das condições ambientais dominadas por ondas ou marés (ROY *et al.*, 1994) e a compreensão da relação entre a elevação do NM e em como essas regiões responderão a esse aumento acelerado é importante, pois esses sistemas fornecem serviços ecossistêmicos significativos, incluindo atenuação de ressacas e intrusão de água salgada no habitat de espécies ameaçadas e em perigo de extinção, além das atividades pesqueiras recreativas e comerciais e paisagens estéticas que apoiam o ecoturismo e a qualidade de vida dos residentes (PARKINSON *et al.*, 2023).

No período do Quaternário tardio (Holoceno), o NM chegou a valores em torno de 120 m abaixo do atual (CORRÊA, 1996), durante o Último Máximo Glacial (UMG) (CORRÊA, 1996; MIX; BARD; SCHNEIDER, 2001). Neste período, várias oscilações do NMM produziram diversas sucessões sedimentares que variam desde ambientes submersos à eólicos, indicando diferentes fases de transgressão e regressão da linha de costa. A esses diferentes cenários do NM, estão relacionados os sistemas de barreiras arenosas (p.ex. RODRIGUEZ; ANDERSON; SIMMS, 2005; HEIN *et al.*, 2012; ZECCHIN *et al.*, 2014; COOPER *et al.*, 2016; DE LECEA *et al.*, 2017) e os paleocanais (p.ex. WESCHENFELDER *et al.*, 2008, WESCHENFELDER *et al.*, 2014, BORTOLIN; WESCHENFELDER; COOPER *et al.*, 2018), que eventualmente corriam pela Plataforma Continental exposta até encontrarem o nível de base, ligando as bacias de drenagem costeiras aos sistemas deposicionais marinhos (*offshore*) (GALVÃO, 2018).

Com base na erosão de terraços e depósitos de conchas, Corrêa (1996) identificou vários potenciais períodos de aumento lento e rápido do nível do mar durante o período marinho pós-glacial de transgressão na plataforma brasileira que foram provisoriamente correlacionadas com pulsos de água derretida e paradas intermediárias por Cooper *et al.* (2016).

O Holoceno é considerado um período de abundância de sedimentos durante o qual extensos depósitos litorâneos se acumularam. O papel da plataforma continental como área fonte de sedimentos e como registro da evolução costeira durante o último ciclo glacial permaneceu em grande parte desconhecido, exceto por

um estudo *offshore* da Baía de Tijucas (COOPER *et al.*, 2016), norte de Santa Catarina.

Estudos como o de Cooper *et al.* (2016), focados na estratigrafia de sistemas barreiras arenosas, podem revelar as condições ambientais que levaram à atual configuração de camadas. Eles também podem fornecer informações sobre os processos que ocorrem ao longo do tempo e do espaço, incluindo variações anteriores do nível do mar e espaço de acomodação.

Barreiras arenosas são sistemas que geram corpos estreitos de sedimentos alongados que se estendem de forma paralela à deposição dos oceanos, resultantes do espaço de acomodação, suprimento sedimentar, variações do NM e condições ambientais dominadas por ondas ou marés (ROY *et al.*, 1994). Os sistemas barreira ocupam uma proporção significativa do litoral mundial. São compostos principalmente de areia, com uma minoria significativa dominada por cascalho, concentradas em áreas submetidas anteriormente a glaciais-geleiras (ORFORD, CARTER, JENNINGS, 1991). Em termos morfodinâmicos, as barreiras são sistemas sedimentares dinâmicos e não consolidados, respondendo a vários fatores, por exemplo, processos dinâmicos, como ondas, transporte de sedimento, marés, ventos, vegetação, e também fatores de longo prazo, incluindo mudanças no nível do mar ou padrões de tempestades (COOPER *et al.*, 2018, *apud* STONE *et al.*, 2004; HOUSER; HAPKE; HAMILTON, 2008). Apresentando formas de relevo como dunas arenosas.

Tendo a compreensão da importância da ciência sobre o desenvolvimento e evolução dos ambientes costeiros (sistemas de barreiras arenosas e paleocanais), este trabalho apresenta avanços nas informações desses sistemas e auxilia na compreensão das respostas frente às mudanças climáticas, em especial à variação do nível do mar, a partir de dados de sub-superfície em águas rasas para o Holoceno.

2. OBJETIVOS

2.1 GERAL

- Investigar a região da antepraia da enseada de Porto Belo através de análise de dados de sub-superfície (sísmica rasa) afim de interpretar a presença e preservação de barreiras arenosas.

2.2 ESPECÍFICO

- Relacionar o processo de formação das barreiras arenosas com a última elevação do nível do mar datada do período do Holoceno;
- Identificar feições nos registros sísmicos e relacioná-las ao pulso de inundação;
- Fornecer registros da localização das barreiras arenosas;
- Comparar os resultados com trabalhos anteriores já descritos em outras regiões para litoral de SC.

3. ÁREA DE ESTUDO

A costa catarinense do sudeste do Brasil pode ser dividida em quatro segmentos costeiros com base em sua morfologia bruta. Uma característica comum a todos os compartimentos é que porções da costa dentro de cada segmento sofreram uma extensa sedimentação, resultando na progradação e no endireitamento da linha costeira. Estas regiões de deposição representam períodos de abundante abastecimento de sedimentos e/ou queda do nível do mar.

Dentre estas, a costa Centro-norte de Santa Catarina é predominantemente montanhosa, delimitada por grandes promontórios de granito, contribuindo para o desenvolvimento de sistemas de praias arenosas costeiras e dunas eólicas. Almeida (1952) setorizou a geomorfologia continental em duas grandes unidades morfoestruturais que se sucedem da região central do Estado, até as proximidades do litoral. O autor definiu e denominou essas duas unidades de: (1) o Planalto Central e (2) Serras Litorâneas, denominação que deu ao conjunto de serras litorâneas, de orientação aproximadamente SW-NE e que se destacam na porção N-NE do estado. Situada entre estes terrenos elevados e o mar se estende uma planície costeira, de largura variável, que Almeida (1952) considera a unidade geomorfológica que completa a paisagem continental no Estado de Santa Catarina. A região, assim como o centro do estado e Florianópolis, apresenta afloramentos cristalinos pré-Cenozóicos, que ao longo da costa secciona e separa diversos embaiamentos e estuários (KLEIN; SHORT; BONETTI, 2016).

A costa do estado é considerada tectonicamente inativa, embora deformações sísmicas tenham sido relatadas nos sedimentos marinhos da baía de Tijucas, que foram relacionadas a atividades sísmicas no leste do Brasil (COOPER *et al.*, 2016).

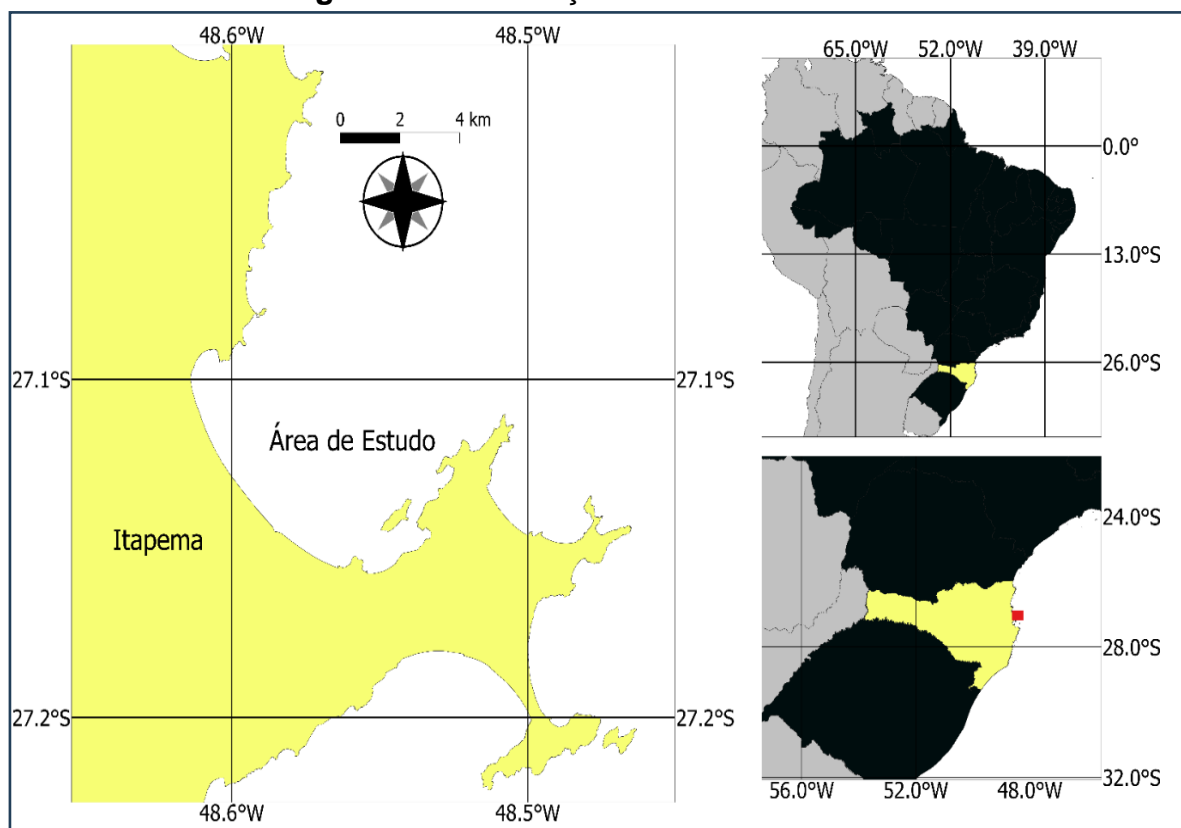
Os depósitos da planície costeira são agrupados em dois sistemas deposicionais. O primeiro sistema refere-se aos depósitos continentais, de idade tércio-quadernária, constituídos por depósitos colúvio-aluvionares e aluviais, os quais foram acumulados como resultado da ação de processos de fluxos gravitacionais e aluviais de transporte de material, constituído de material heterogêneo, mal selecionado, tendo litologias resultantes de cascalhos, areias e lamas (CARUSO JR., 1993; HORN FILHO; FELIX; DE CAMARGO, 2020). O segundo é o sistema deposicional transicional marinho ou litorâneo, cujos depósitos são constituídos por

sedimentos quaternários, de idade pleistocênica e holocênica, que se encontram dispostos em áreas mais próximas à linha de costa atual ou a paleolinhas de costa (HORN FILHO, 2003). Na enseada de Porto Belo, foram identificados depósitos marinhos praias e eólico (pleistocênico) essencialmente arenosos, como também paludiais e lagunares, nos quais predominam sedimentos siltsos e argilosos, contendo teores variados de matéria orgânica. Os depósitos ocorrem nas formas de cordões litorâneos regressivos, terraços, paleodunas, entre outras.

Os depósitos eólicos pleistocênicos ocorrem em extensas áreas na forma de paleodunas e antigos cordões regressivos, que sucedem os depósitos marinhos praias para o interior do continente e geralmente confinam um sistema lagunar na retaguarda. São constituídos por areias quartzosas com granulometria fina a muito finas. Esse depósito representa, em parte, a antiga planície costeira, anterior à formação do ambiente praias holocênico. Sua gênese está associada aos eventos trans regressivos do nível relativo do mar ocorridos durante o Pleistoceno superior, associados ao máximo transgressivo ocorrido durante o período interglacial *Riss-Würm* (± 120.000 anos AP), o qual retrabalhou a porção distal dos leques deltaicos e formou os depósitos arenosos praias marinhos, ancorados em reentrâncias do embasamento (CARUSO JR., 1993; HORN FILHO, 1997; SUGUIO, 1998).

Para a região Sul do Brasil não existem tantos estudos que relacionam as diversas variações do nível do mar, o que o torna pouco conhecido antes do Holoceno médio. Alguns dados disponíveis indicam que o NM teve uma variação de 120m no UMG (CORRÊA, 1996), para um nível de aproximadamente +3m há pelo menos 5000 anos cal BP, caindo posteriormente para o nível atual (ANGULO; LESSA, 1997).

A enseada de Porto Belo está localizada na região centro norte do Estado de Santa Catarina, delimitado pelas coordenadas geográficas 27°08'24,14"S; 48°32'54,78"O e 27°02'33,64"S; 48°31'41,71"O. A região costeira da área de estudo é caracterizada pela presença de areia fina e lama em grande parte da sua formação, que é de origem sedimentar. Esses depósitos foram trazidos pelo mar a longo de milhares de anos. A distribuição litoestratigráfica de Itapema apresenta os depósitos de praias atuais, com a presença de areias quartzosas finas a médias, e bem selecionadas, possuindo sedimentos de cores claras e também depósitos de planície lagunar, caracterizado por areias siltico-argilosas, mal selecionadas, laminação planoparalelo incipiente (WILDNER *et al.*, 2014).

Figura 1 – Localização da área de estudo.

4. REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 NÍVEIS DE BASE

O nível de base, ocorre quando fenômenos fluviais de erosão e transporte dão origem aos deposicionais. Para o melhor entendimento do conceito de nível de base é necessário entender o que seria o perfil de equilíbrio. Em geral o nível de base está relacionado com o nível do mar, porém nos rios esse conceito pode ser expandido. O perfil de equilíbrio está relacionado à declividade existente entre a montante de um rio e sua jusante, de forma que à medida que a água flui em direção ao mar, esta por sua vez cria uma trajetória parabólica, saindo do ponto mais alto ao ponto mais baixo. Com esse conceito pode-se aplicar o nível de base, que corresponde ao nível mais baixo ao qual a erosão da superfície da Terra busca atingir ou o nível mais baixo que os rios não conseguem erodir seus depósitos. O nível de base é a superfície acima do qual prevalecem os processos erosivos e abaixo do qual prevalece a deposição sedimentar (CATUNEANU, 2006). Por se tratar de uma superfície dinâmica, movimentos de subida e descida com velocidades diferentes acarretam em taxas de acomodação diferentes. Qualquer alteração em qualquer um dos fatores controladores no perfil de equilíbrio causará um deslocamento do equilíbrio na direção necessária para absorver os efeitos causados pela mudança. Uma falha geológica pode causar uma modificação do nível de base e conseqüentemente o perfil de equilíbrio. A erosão conduz o transporte do material em direção ao nível do lago. Os sedimentos que antes iriam para o delta são depositados no lago. E por fim originalmente é restaurado e os sedimentos são novamente depositados no delta.

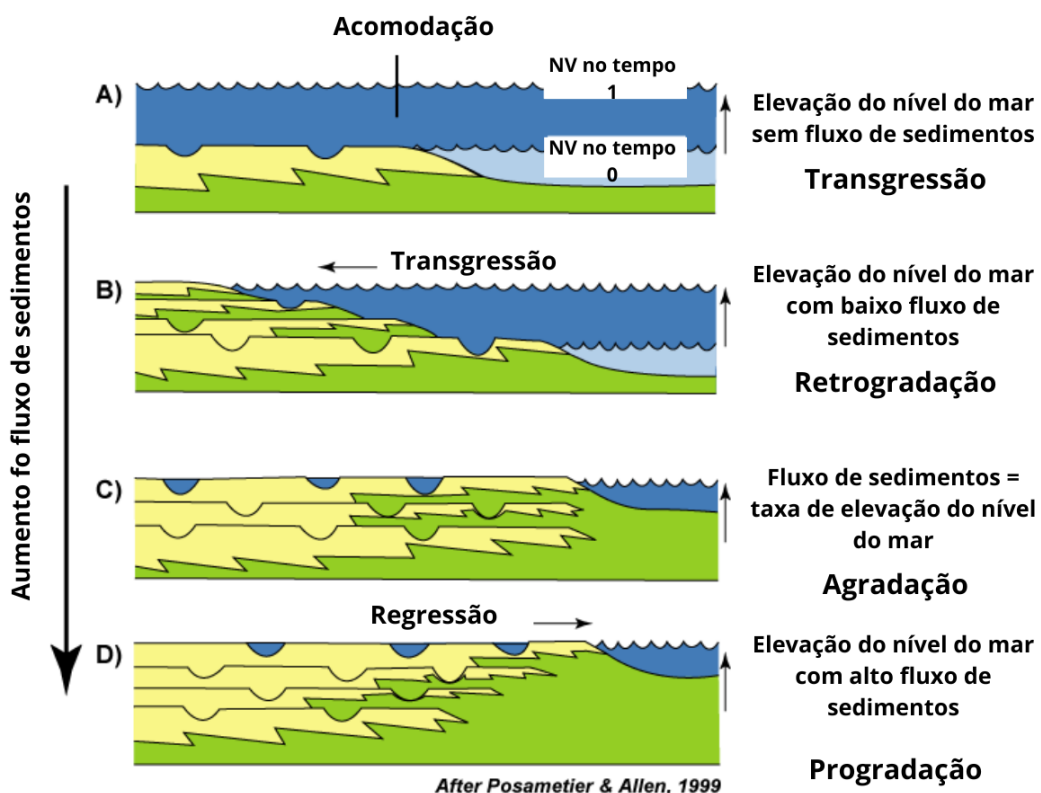
4.1.1 Transgressão marinha

Entende-se por transgressão marinha o processo de migração da linha de costa em direção ao continente Catuneanu (2006). É associada ao aumento do nível do mar que causa erosões costeiras. Este recuo resulta no deslocamento de fácies no mesmo sentido, onde depósitos marinhos passam a sobrepor as deposições litorâneas e continentais, gerando um padrão de empilhamento retrogradacional. À medida que o mar avança para o continente, o tamanho do grão diminui da base para o topo.

4.1.2 Regressão marinha

A regressão marinha pode ser explicada como sendo a regressão normal e a forçada. À medida que o nível do mar decai, a regressão da linha de praia continua se realizando, independentemente do aporte sedimentar. Este processo é conhecido como regressão forçada (POSAMENTIER *et al.*, 1992) diferindo da regressão “normal” porque esta consiste na migração da linha de praia, simplesmente pelo aumento do aporte sedimentar, que excede a taxa de acomodação.

Figura 2 – Representação esquemática de transgressão e regressão da linha de costa.



Fonte: Adaptado de Posamentier & Allen (1999).

4.2 INVESTIGAÇÃO GEOFÍSICA

A geofísica marinha rasa tem por finalidade o uso de métodos acústicos para investigação da superfície e sub superfícies marinhas. Para cada objetivo é utilizado um equipamento diferente que irá possuir uma frequência diferente programada. O conjunto de métodos sísmicos que utilizam fontes acústicas, que emitem espectros contendo baixas frequências (<20 kHz) é o empregado na perfilagem de subsuperfície (SOUZA, 2007).

4.2.1 Método sísmica de reflexão

O método sísmico de reflexão emprega os princípios da óptica, geométrica que regem a reflexão de ondas planas incidentes numa superfície refletora (MARTINS, 2001). O princípio físico que define se haverá, ou não, tais reflexões é o contraste de impedância entre dois meios. Impedância acústica

Os métodos sísmicos estão baseados no princípio de propagação das ondas acústicas, afim de investigar as regiões de áreas submersas e identificar as feições presentes dentro do sedimento. A sísmica de reflexão trata-se do retorno do som nas interfaces entre os meios com propriedades físicas distintas, que possuem diferentes níveis de impedância acústica (I). A I está relacionada diretamente com a investigação sísmica, e pode ser representada de forma matemática pelo produto da velocidade de propagação do som num meio (v1) pela densidade (d1), ou seja, a impedância (i) de um meio 1 é igual a: $i_1 = (v_1) \times (d_1)$. O fenômeno físico da reflexão das ondas acústicas só ocorre quando existem contrastes representativos entre os meios atravessados pelo sinal acústico emitido. (SOUZA, 2007). Outro importante conceito na investigação sísmica é o coeficiente de reflexão (R), dado pelo quociente entre a diferença de impedância acústica de dois meios (meio 1 e meio 2), pela soma, ou seja, $R = (v_2 \times d_2 - v_1 \times d_1) / (v_2 \times d_2 + v_1 \times d_1)$. A impedância, neste contexto denominada impedância acústica, é dada pelo produto entre densidade e a velocidade da onda no meio:

$$I = \rho V \quad (1)$$

Onde, I é a impedância acústica, ρ é a densidade do meio e V é a velocidade do som no meio.

A escala dos objetos analisados é importante na definição da resolução a ser usada, assim como o tipo de equipamento durante o mapeamento sísmico de uma região, afirma Morang *et al.* (1997).

Nesse contexto, Souza (2007) atribui para cada método de investigação um objetivo específico ([Figura 3](#)), onde determinados equipamentos devem ser utilizados para diferentes tipos de investigação (GALVÃO, 2018).

Figura 3 – Ilustração a respeito dos métodos de investigação e seus objetivos.



Fonte: SOUZA (2007).

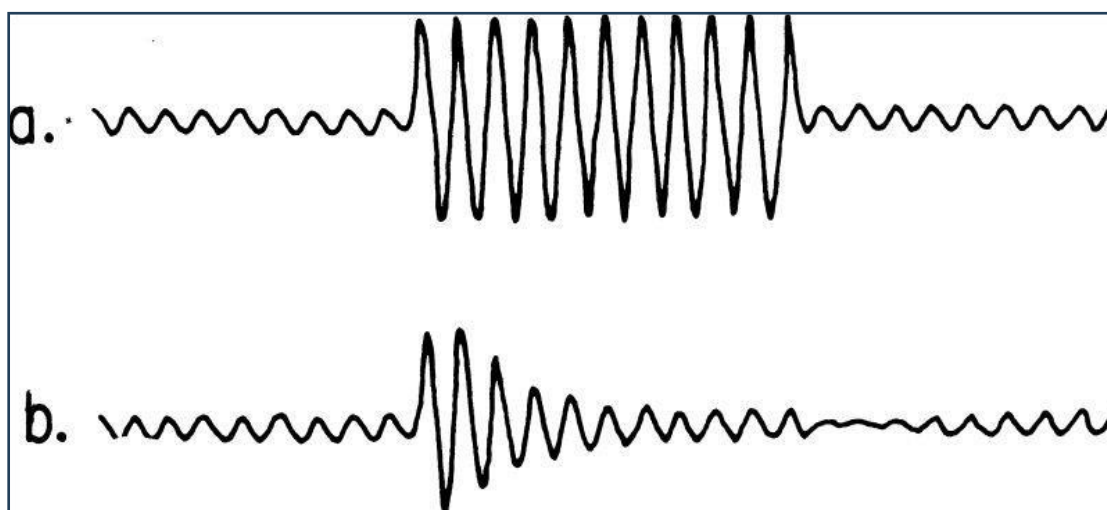
4.2.2 Filtros e ganhos

Como os hidrofones não possuem uma seleção ao sinal sonoro coletado, os filtros devem ser aplicados para melhoria do sinal acústico, afim de remover ruídos, que são sinais que estão fora da área de interesse e muitas vezes acabam por atrapalhar a informação desejada.

Dentre esses está o *swell*. Este é um filtro de ondulação, para que exista uma referência. O período do *swell* é estimado, em segundos, e é utilizado para ajustar os pulsos do sonar a cada disparo, comparando a altitude filtrada de passagem baixa com a altitude bruta original. Esse processo causa a movimentação de cada *ping* para cima ou para baixo variando em relação à superfície filtrada com a não corrigida.

Um outro filtro utilizado é o AGC (*Automatic Gain Control*), esse controle de ganho automático controla a equalização da janela kernel em milissegundos com uma porcentagem de intervalo do *ping* e a intensidade do alvo. Quanto menor for esse intervalo, mais intenso será o efeito do ganho desse filtro.

Figura 4 – (a) Sinal acústico sem nenhum tipo de tratamento. (b) Sinal acústico modificado com filtro ADC aplicado.



Fonte: <https://wiki.seg.org>

Por último existe o filtro TVG (*Time Varied Gain*). Este alterna a caixa de seleção para habilitar o processamento do ganho de variável de tempo automático. Ele amplifica os sinais mais distantes no tempo e controla a intensidade do alvo como uma porcentagem da intensidade máxima do arquivo.

4.3 ESTRATIGRAFIA DE SEQUÊNCIAS

O estudo de interações de rochas sedimentares dentro de um arcabouço cronoestratigráfico de camadas de mesma gênese, limitadas por superfícies erosivas ou de não-deposição, ou ainda, por suas correlações relativas se dá pela Estratigrafia de Sequências (FÁVERA, 2001).

Algumas interpretações dos padrões de refletividade são delineadas por Mitchun *et al.* (1977), citados por Severiano Ribeiro *et al.* (2001) ([Figura 6](#)).

Quando há uma taxa uniforme de deposição dos sedimentos sobre uma superfície estável ou minimamente uniforme, os sedimentos se aglomeram em disposições paralelas e subparalelas;

As disposições progradantes ocorrem em locais em que os estratos são sobrepostos de forma lateral, apresentando superfícies paralelas e tangenciais, sigmoidais e sobrepostas. Podendo variar de acordo com mudanças na taxa de deposição e na profundidade da coluna d'água.

Quando há variação na taxa de deposição ou inclinação gradual, têm-se uma disposição divergente.

As disposições do tipo caótica possuem reflexões discordantes, sugerindo ambiente deposicional de alta energia, apresentando feições como dobramentos, estruturas de escorregamento ou convoluções.

Disposições transparentes, onde não há reflexões, indicam pacotes sedimentares altamente dobrados ou litologias homogêneas (por exemplo, arenitos espessos);

Disposições Hummocky apresentam segmentos de reflexões subparalelas, irregulares e descontínuas. Podem gerar um padrão aleatório marcados pela terminação das reflexões desordenadas.

4.3.1 Sismoestratigrafia~

A sismoestratigrafia pode ser definida como uma abordagem geológica para a interpretação estratigráfica de dados sísmicos”, visto que “as propriedades singulares das reflexões sísmicas permitem a aplicação direta de conceitos geológicos baseados em uma estratigrafia física (KUCHLE; SCHERER 2010).

O reconhecimento de que refletores sísmicos apresentam natureza cronoestratigráfica e que podem ser tratados como linhas de tempo, é o alicerce da sismoestratigrafia. Segundo Ayres & Neto (2004), o mapeamento da morfologia do assoalho oceânico e a exploração da espessura, natureza e estruturas da coluna sedimentar, podem ser feitos através do método sísmico de reflexão.

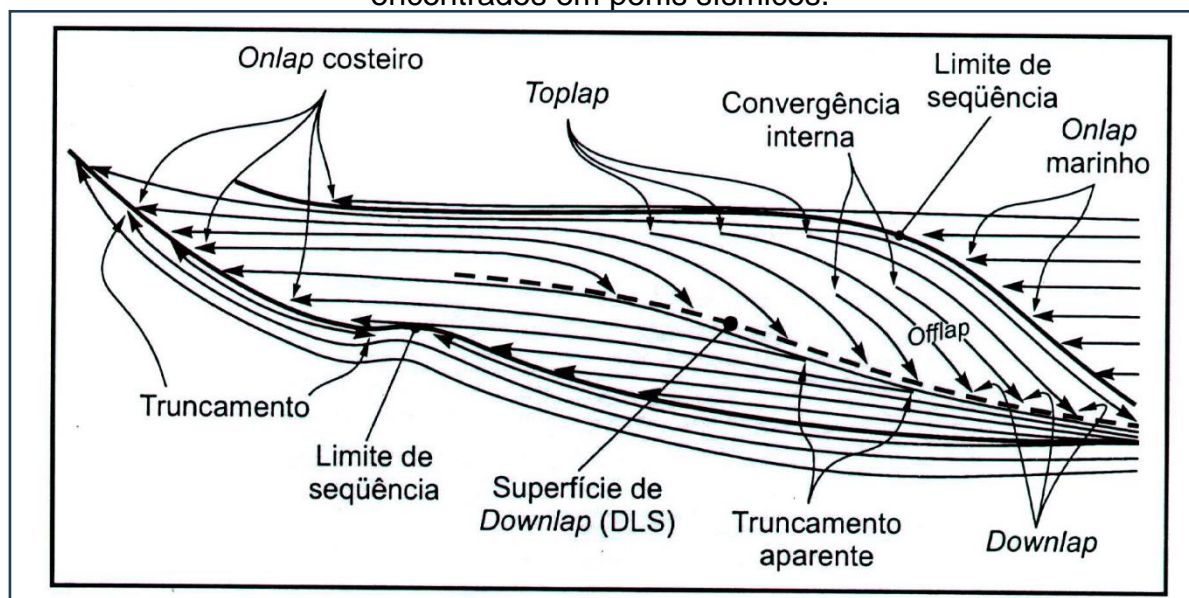
As sequências deposicionais correlacionam-se ao longo das bacias sedimentares e provavelmente correlacionam-se globalmente. Conjuntos de processos deposicionais e litofáceis estão associados a tratos de sistemas específicos. Uma identificação de setores de sistemas em dados sísmicos fornece uma estrutura para uma previsão mais precisa de ambientes deposicionais. O controle fundamental das sequências deposicionais consiste em relacionar mudanças eustáticas de curto prazo no nível do mar, sobrepostas a mudanças tectônicas de longo prazo.

Da Estratigrafia de Sequências, Vail (1987) define os procedimentos para se efetuar interpretações sismoestratigráficas na análise de uma bacia sedimentar.

As unidades sismoestratigráficas são reconhecidas, e então, a análise sismofasciológica é realizada. Esse processo é feito a partir das sequências sísmicas, descontinuidades dos padrões de terminações são identificados, unidades

Na análise de sismofáceis são definidos os pacotes de reflexão genética referidos como sequências sísmicas e tratos de sistemas sísmicos, identificando descontinuidades com base na terminação da reflexão.

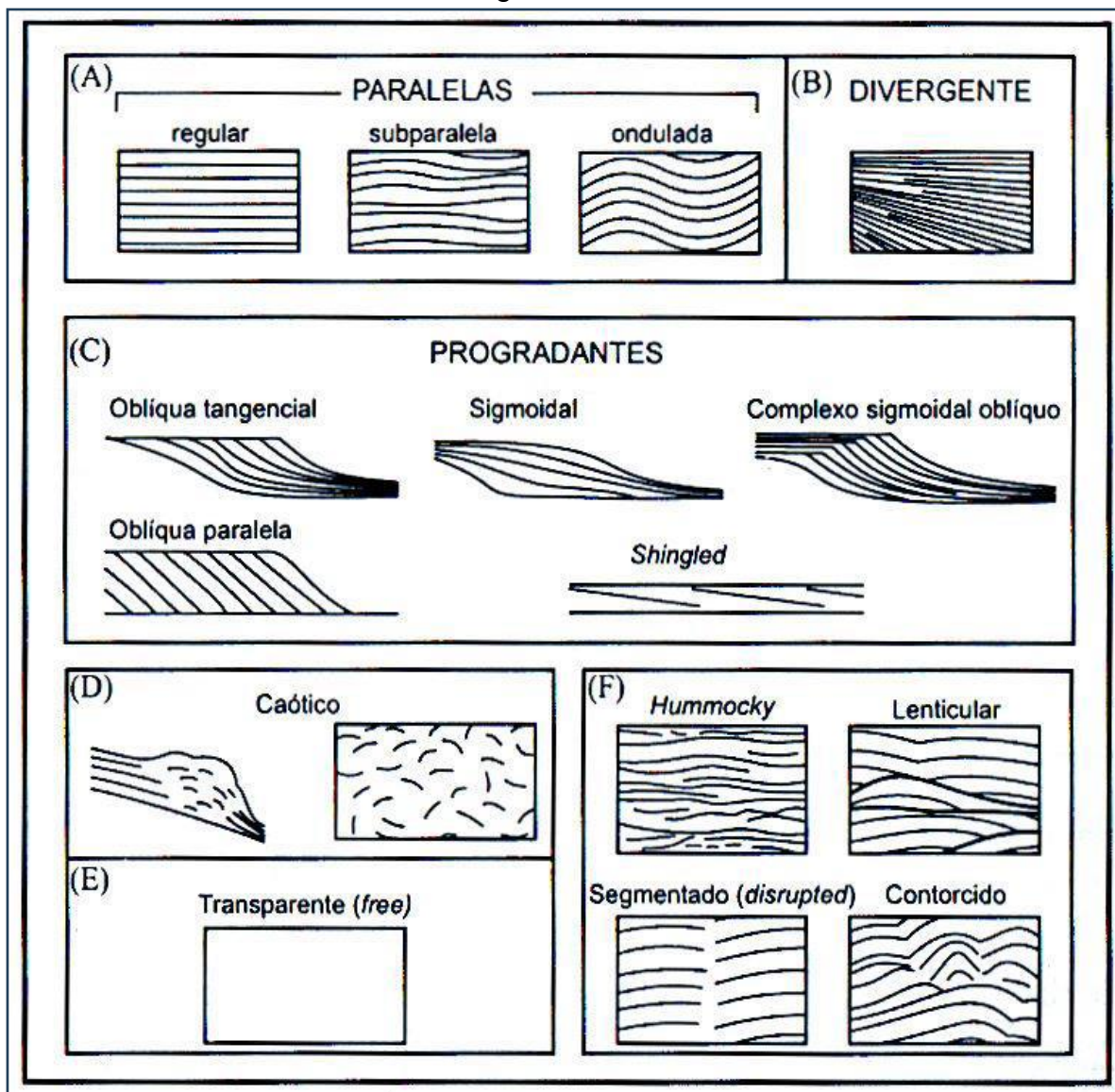
Figura 5 – Padrões de terminações de reflexões em sequência que podem ser encontrados em perfis sísmicos.



Fonte: Vail (1987) *apud* Severiano Ribeiro *et al* (2001).

Para análise das sismofáceis é muito importante o fato de se obter o máximo de informações possíveis sobre as configurações internas das reflexões. São atributos valiosos para a interpretação do ambiente deposicional discutido (GALVÃO, 2018). Os padrões de disposição dos refletores foram descritos por Mitchun *et al.* (1977), *apud* Severiano Ribeiro *et al.* (2001). ([Figura 6](#)).

Figura 6 – Padrões de reflexos sísmicas. **(A)** Paralelas e Subparalelas; **(B)** Divergentes; **(C)** Progradantes; **(D)** Caótico; **(E)** Transparente; **(F)** Hummocky, lenticular, segmentada e contorcida



Fonte: Mitchum *et al.* (1977) *apud* Severiano Ribeiro *et al.* (2001).

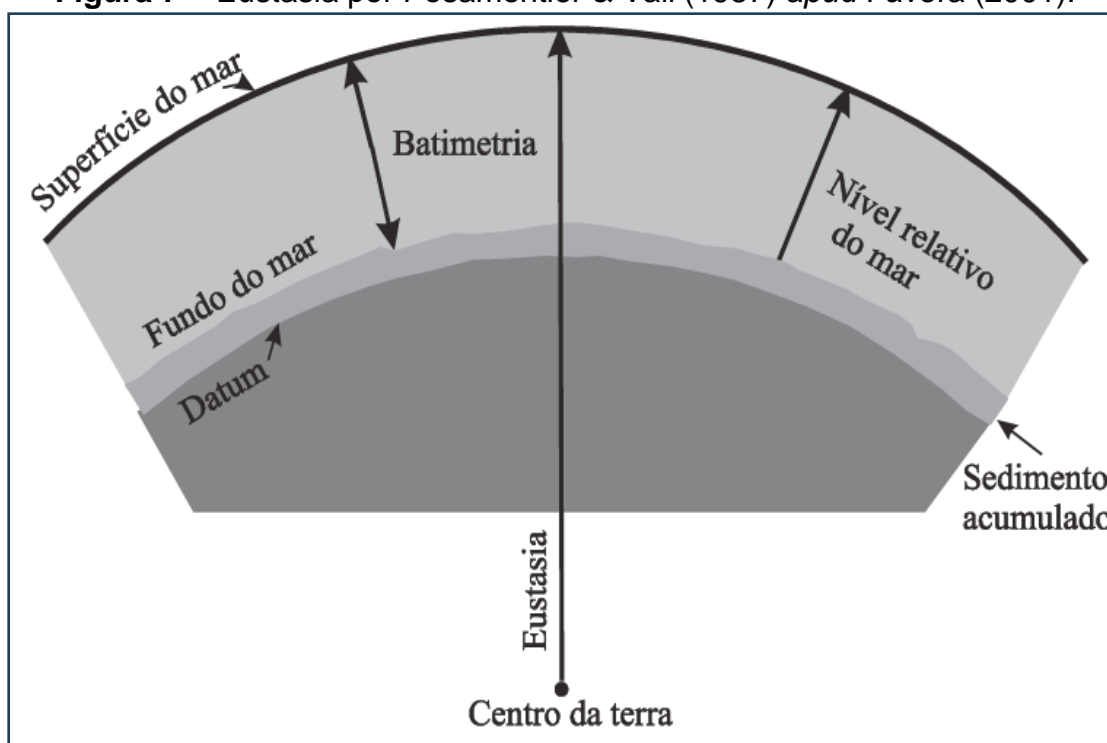
4.4 EUSTASIA

As sequências e as componentes internas de um registro são relacionadas com as taxas de eustasia, subsidência e aporte sedimentar. De acordo com Fávera (2001), Eustasia é o movimento de elevação ou queda global das águas oceânicas (Figura 7).

Durante a formação dos oceanos houveram vários processos eustáticos que provocaram as variações do nível do mar. Kendall & Lerche (1988) discute uma série de técnicas que permitem determinar a grandeza relativa da variação eustática, que são:

1. a extensão do *onlap* sedimentar sobre as margens continentais;
2. a espessura dos ciclos sedimentares marinhos e a elevação ou distância entre indicadores de linhas de praia antigas;
3. perturbações em curvas individuais de subsidência tectônica ou curvas empilhadas de subsidência da crosta;
4. a variação isotópica em sedimentos marinhos profundos;
5. o porte de variáveis, tais como taxas de movimento tectônico, acumulação de sedimentos e variações eustáticas.

Figura 7 – Eustasia por Posamentier & Vail (1987) *apud* Fávera (2001).



4.5 BARREIRAS ARENOSAS

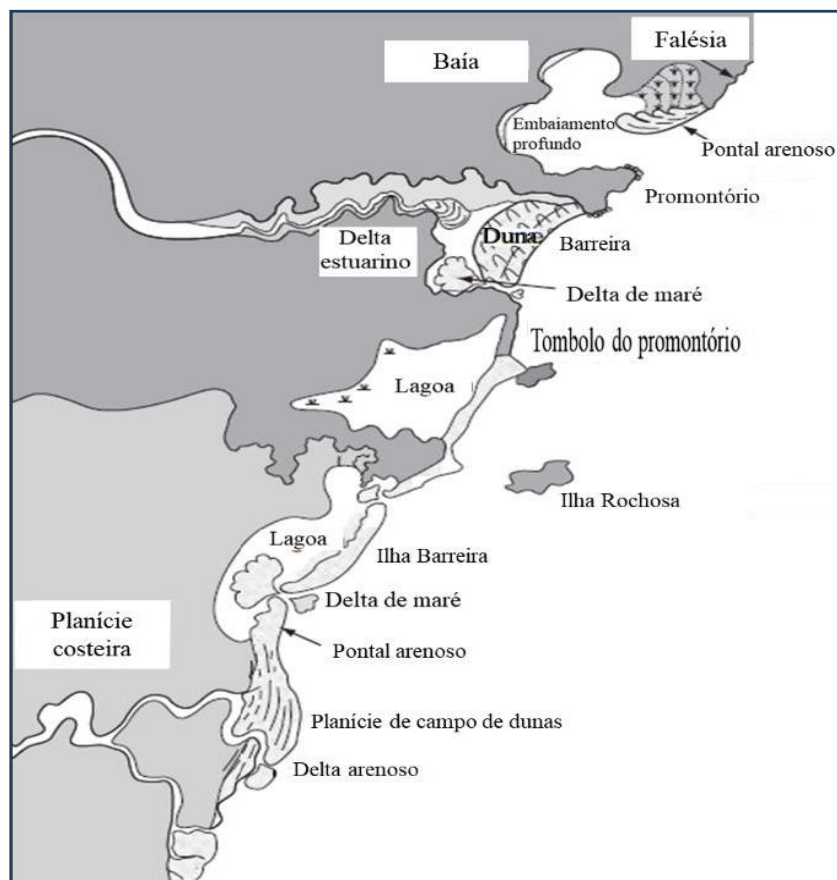
As áreas de interface terra-mar nos ambientes costeiros podem conter alguns setores, que são definidos pela herança geológica e pela dinâmica física do meio. Dentre eles, encontra-se, ilhas, estuários, planícies costeiras, tómbolos, barreiras arenosas, etc (GALVÃO, 2018). Os requisitos primários para formação de barreiras são os processos de suprimento de sedimentos. Maneiras que vão desenvolver e participar da manutenção da barreira. Esses processos são descritos por Roy *et al.*, (1994) como sendo flutuações do nível do mar, que em conjunto com fatores como espaço de acomodação, disponibilidade e transporte predominante de sedimentos e sedimentação da zona submarina e influência da fluvial, orientação da linha de costa, clima de ondas, variações maregráficas e condições meteorológicas, dinâmica sedimentar na zona de surfe e ante praia, podendo talvez incorporar eventos neotectônicos, determinam a morfologia destes ambientes. Utilizando estes ou parte destes parâmetros, se torna possível de terminar que a morfologia das barreiras arenosas costeiras seja resultante da evolução pretérita e atual destas feições.

De acordo com Cooper *et al.* (2018) o comportamento em mesoescala desse sistema também depende do cenário geológico que abriga tal sistema e deve ser levado em consideração ao se estabelecer premissas para criação de um modelo evolutivo de barreiras.

As lagunas formadas entre as barreiras e o continente variam consideravelmente em largura (POPP, 1987). Esse sistema cerca a barreira, tirando a parte que é junta ao continente em ambientes submersos, como: lagos ou estuários. A água entre a laguna e o oceano pode ou não contar uma abertura presente. Em algumas situações caracterizam-se como um fluxo sazonal de água doce (COOPER, 2001).

Os depósitos de leques de sobrelavagem (*washover*) ocorrem quando durante um evento de tempestade os sedimentos ultrapassam e erodem as barreiras, depositando lóbulos de sedimentos na lagoa. Esses sedimentos são realocados em vários sub-ambientes em direção ao continente. Os sedimentos de leques de sobrelavagem consistem em sua maioria de grãos de areia fina a média que exhibe laminações planares sub-horizontais de estratificação em direção ao continente (GALVÃO, 2018).

Figura 8 – Ambientes de sedimentação em costas temperadas, latitudes onde a área de estudo se insere.

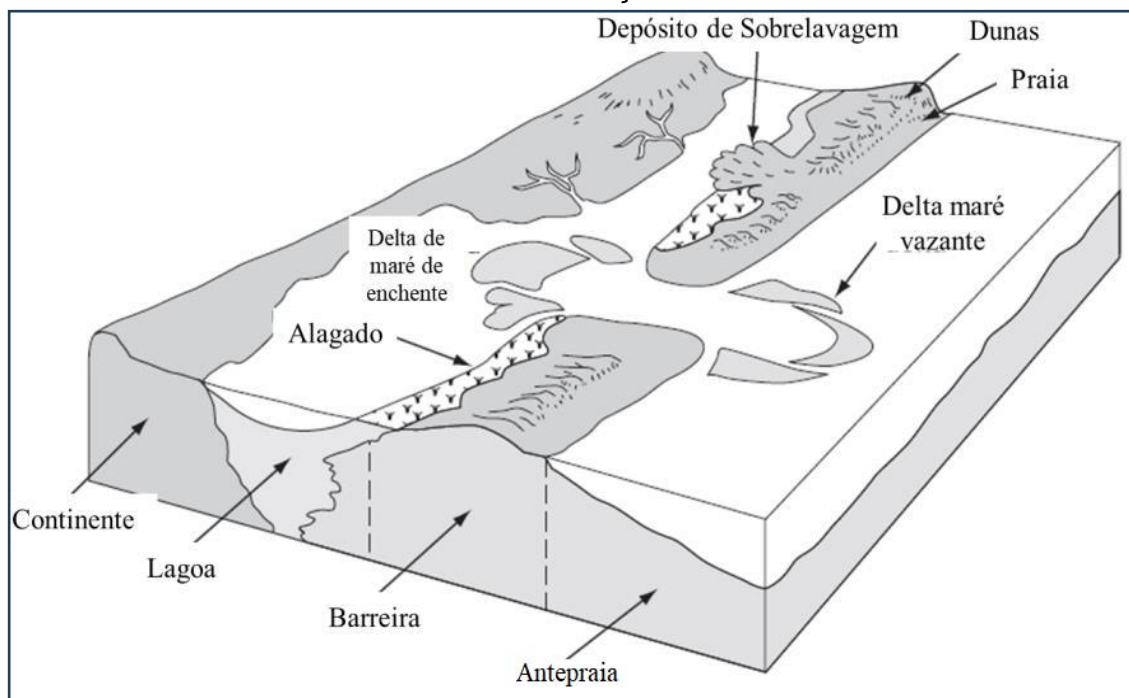


Fonte: Modificado de Cooper (2007).

Em geral, ondas e marés são os processos costeiros com o fator mais importante na formação de barreiras, sendo o vento o fator substancial em alguns ambientes. Os processos de ondas são explicados como o impacto das mesmas na costa, correntes produzidas pela refração das ondas. Processos de marés incluem as correntes de maré com efeito direto no transporte de sedimentos e conseqüentemente na formação de barreiras.

As aberturas em ambos os sistemas de barreiras podem ou não conter deltas de enchente e vazante. A presença e a morfologia desses deltas são controladas pelas forças relativas das ondas e correntes de marés, juntamente com a exigência de um espaço de acomodação adequado para se formarem (OERTEL, 1985).

Figura 9 – Exemplo de uma estrutura onde mostra os principais ambientes de sedimentação.



Fonte: Modificado de Cooper (2007).

5. METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste trabalho está apresentada na [Figura 10](#). Dividida em aquisição dos dados e processamento dos mesmos para análise dos dados geofísicos de alta resolução.

Os dados foram aquisitados utilizando uma fonte do tipo ressonante de baixa potência do tipo SBP (*subbottom profiler*) que produz um sinal acústico com forma conhecida, altamente repetitiva e origina-se a partir da frequência de ressonância de pastilhas. A fonte utilizada foi uma do tipo *chirp* (*Edgetech 512i* do *pool* de equipamentos do LOC), que se baseia no princípio de que um campo elétrico aplicado sobre transdutores piezolétrico, e possui uma faixa de frequência de 500 Hz a 12 kHz.

Figura 10 – Fluxograma esquemático do desenvolvimento da pesquisa e metodologia utilizada para desenvolvimento deste trabalho.

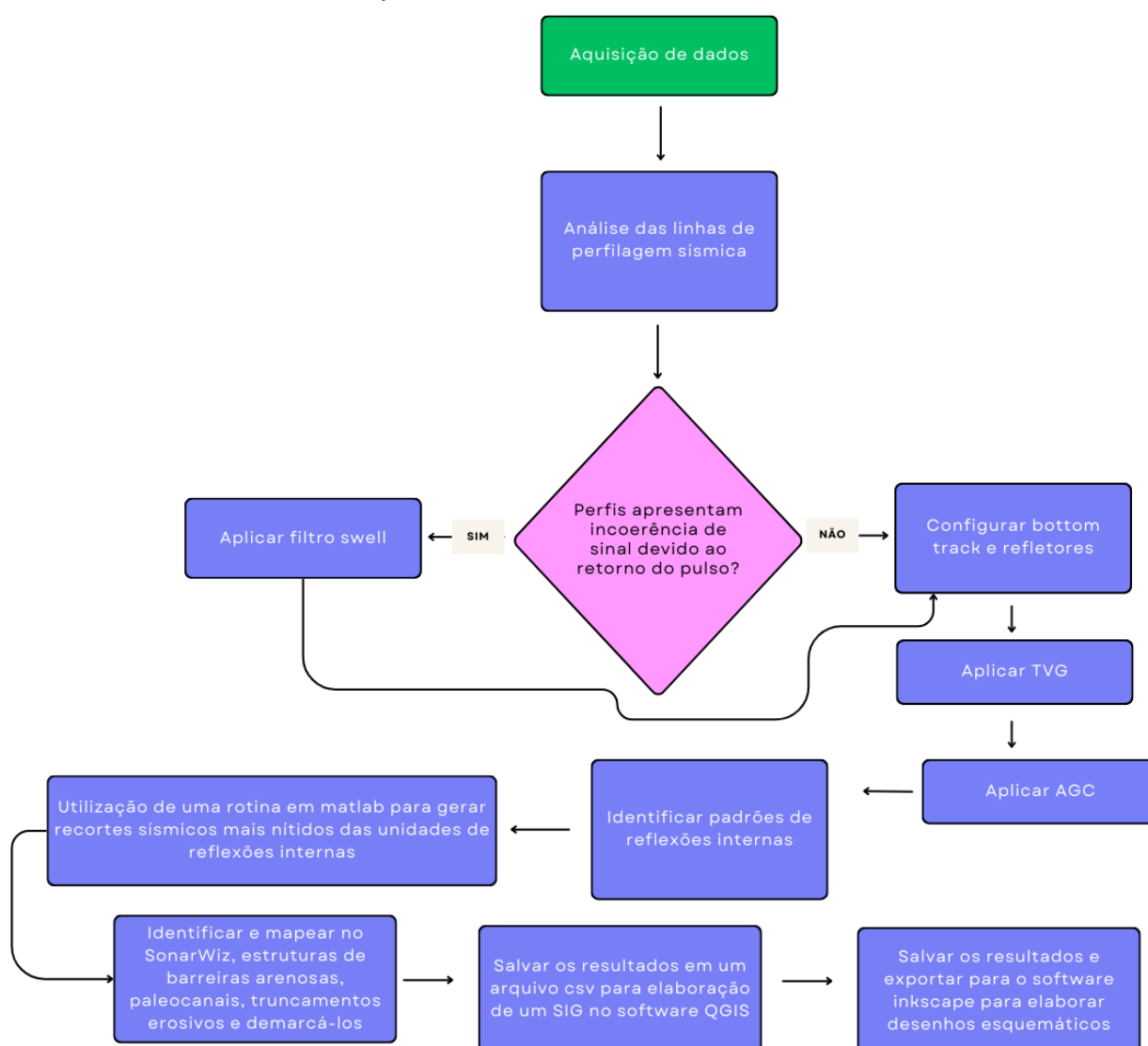


Figura 11 – Linha de costa de Santa Catarina com destaque para a região da enseada de Porto Belo.

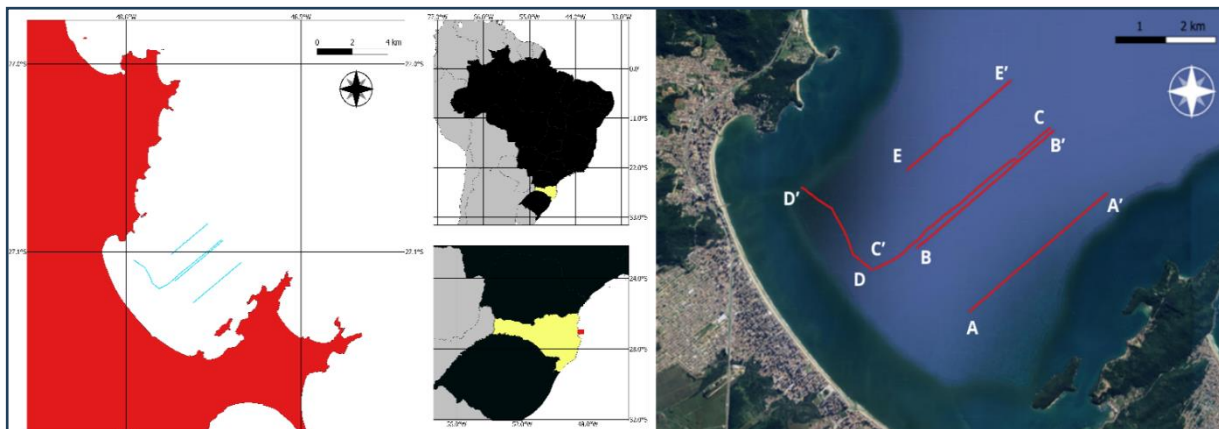


Figura 12 – Chirp 0512i, fonte acústica do tipo ressonante.



Fonte: Pool equipamentos do LOC.

As linhas de operações dos equipamentos possuem espaçamentos que variam de 100 m até aproximadamente 1600 m, dependendo da região onde foi realizado o levantamento.

A coleta de dados compreende a região da enseada de Porto Belo, onde possui uma área de aproximadamente 23 km², iniciando a uma distância de 1 km da praia.

As superfícies S1 a S5 foram identificadas em diferentes profundidades a depender da linha sísmica que estava sendo trabalhada. A unidade 1 foi mapeada mais ao fundo enquanto a unidade 5 mais à superfície.

A análise de cada unidade ocorreu da seguinte forma:

1. Identificação dos refletores;
2. Análise de feições como paleocanais e truncamentos erosivos;
3. Observação das barreiras arenosas;
4. Discussão das unidades e análise das feições de SBA (Sistemas de Barreiras Arenosas).

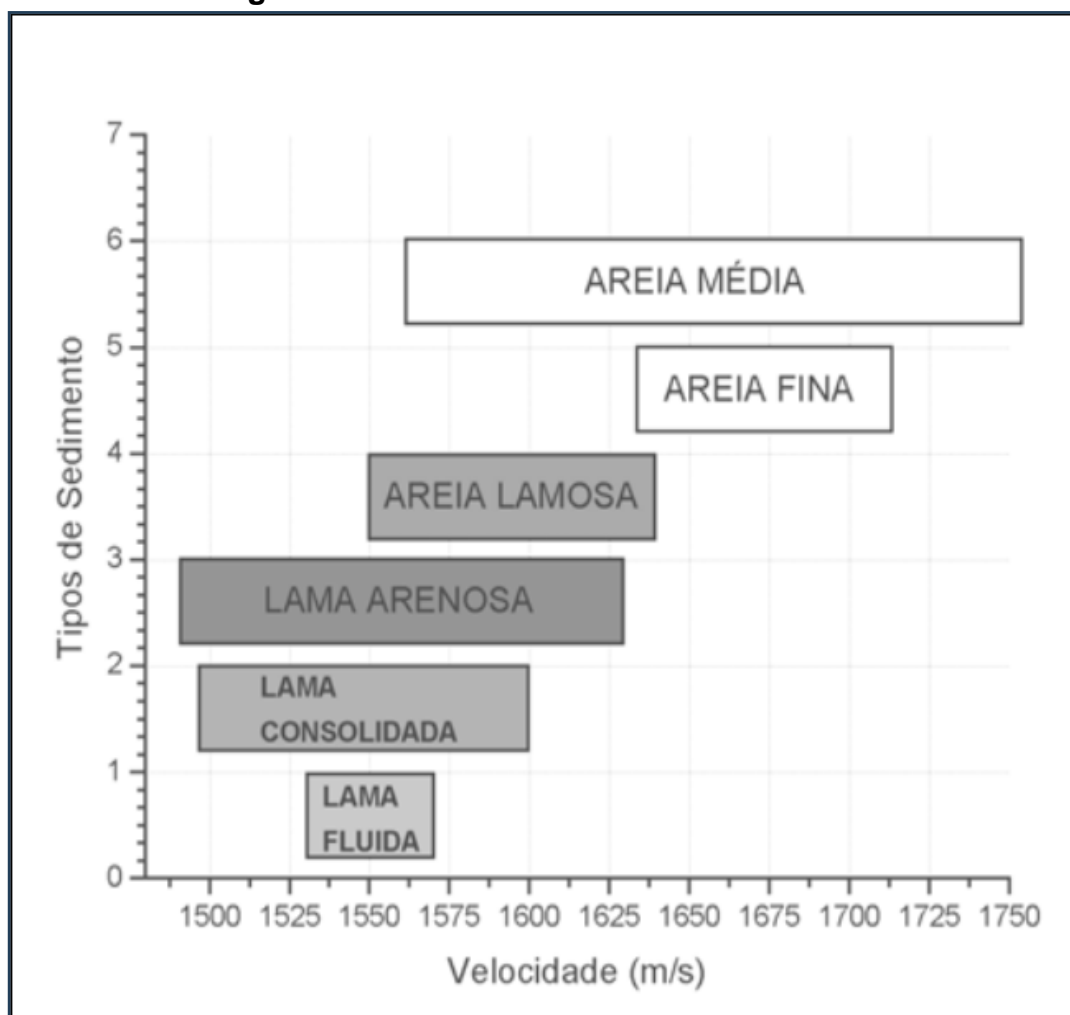
5.1 PROCESSAMENTO

Os dados sísmicos foram trabalhados utilizando o *software* SonarWiz™ onde foram exportados os dados em formato *shapefile* para confecção dos mapas, assim como dados X, Y e Z para interpolação dos resultados.

5.1.1 Sísmica

Para a parte da sísmica foi utilizada a aplicação de ganhos e filtros para melhor visualização e interpretação. A velocidade de propagação do som na coluna d'água adotada foi de 1600 m/s, velocidade sugerida pelo próprio *software* e que Macedo *et al.* (2009) apresentaram ser um valor que abrange areia e lama. Primeiramente foi visto se o perfil sísmico apresentava algum tipo de incoerência de sinal devido ao retorno do pulso. Nesse caso foi aplicado o filtro *swell*, aplicando o filtro passa banda em uma janela de 2 a 24 kHz. Após isso partiu-se para o passo de configuração do *bottom track*. Foram aplicados os filtros *Automatic Gain Control* (AGC) e *Time Varied Gain* (TVG), para intensificar os sinais que retornam em tempos mais curtos e longo, respectivamente.

Figura 13 – Velocidade do som no sedimento.



Fonte: Macedo *et al.* (2009)

Com os filtros aplicados para melhor visualização dos dados foram identificados os refletores e estruturas na linha sísmica. Foram ajustados os parâmetros de “*blanking*”, “*duration*” e “*threshold*”.

A marcação das feições de paleocanais, múltiplas, truncamentos erosivos e barreiras arenosas, foram feitas no próprio *software* do SonarWiztm, onde para cada um vai ser atribuída uma cor e posteriormente medido na ferramenta de régua para saber suas espessuras/comprimentos. Com isso identificou-se, localizou-se e mediuiu-se as feições presentes nos dados como foi o caso dos truncamentos erosivos e SBA.

Figura 14 – Exemplo de um perfil sísmico sem processamento.

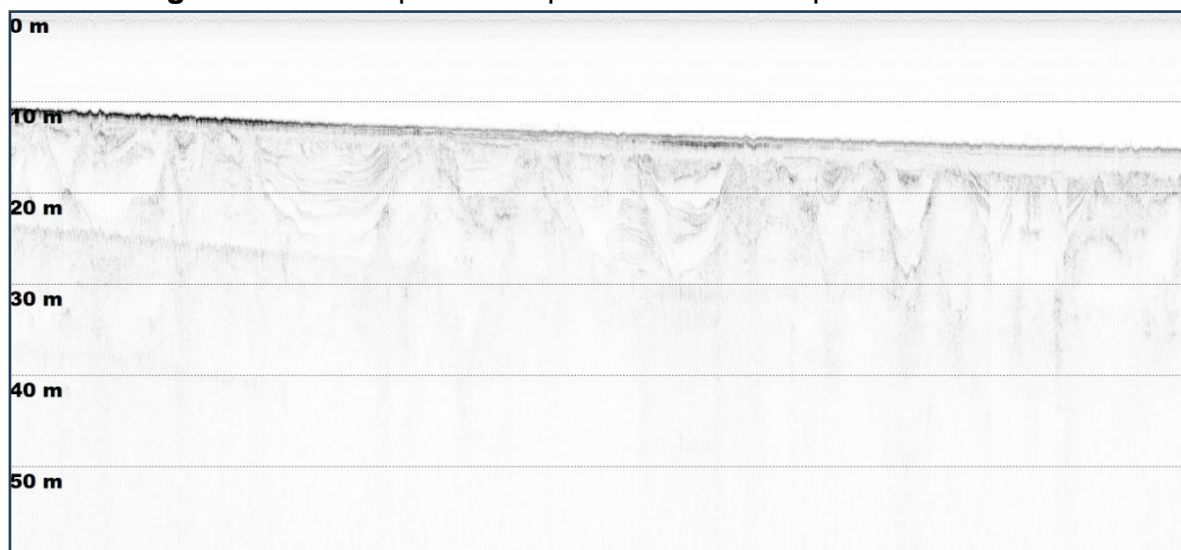
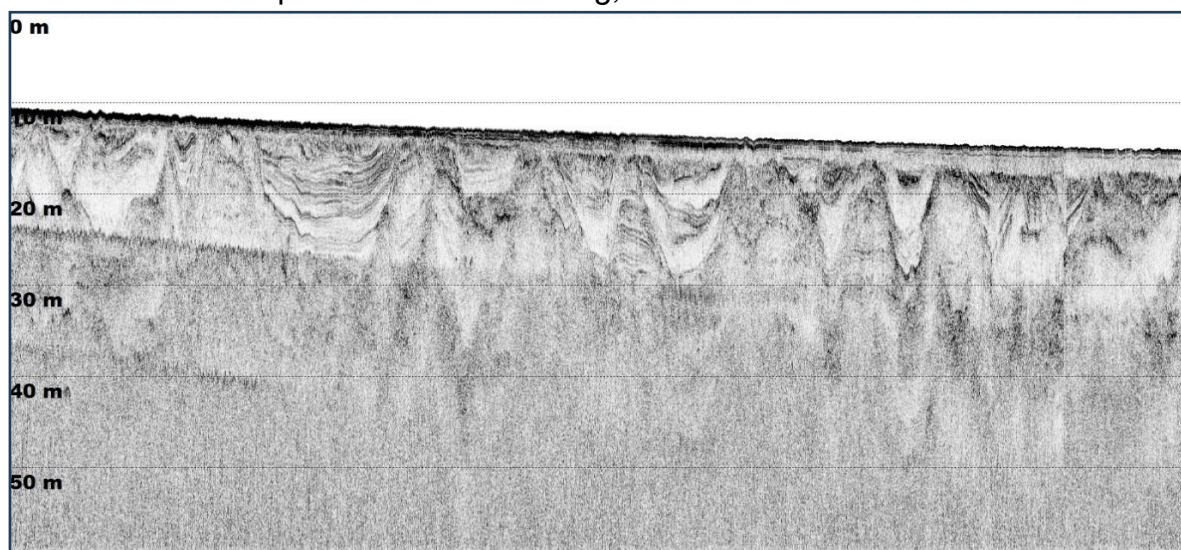


Figura 15 – Exemplo do mesmo perfil sísmico, com os filtros AGC, TVG e parâmetros de *blanking*, *duration* e *threshold*.



As diferentes camadas são definidas devido à variação de impedância acústica que é classificada como sendo o produto entre a velocidade do pulso e a densidade do meio que ela interage (SANCEVERO *et al.*, 2006), o que possibilita analisar as estruturas internas. Ao analisar esses registros, foi possível inferir informações sobre as estruturas subsuperficiais, incluindo a presença de truncamentos erosivos e a formação e preservação de sistemas de barreiras arenosas.

5.1.2 Sistema de Informações Geográficas

Os Sistemas de Informações Geográficas (SIG), foram feitos no *software* livre QuantumGIS (QGIS). O arquivo com os refletores foi exportado em formato csv para depois ser adicionado ao QGIS para a criação dos mapas em ambiente SIG. Foi realizada a identificação dos SBA quanto a sua extensão, comprimento e profundidade. Essas feições foram colocadas em um mapa de localização onde foram apresentadas e divulgadas a sua exata posição. Além disso, verificou-se as medidas de espessuras de cada uma delas e posteriormente foram mostradas em forma de dados interpolados de isópacas. Também foi elaborado um mapa apenas da distribuição superficial das unidades encontradas em todos os registros.

5.1.3 Resultados em forma de desenhos esquemáticos

Após todos os resultados serem salvos e trabalhados tanto em formato CSV como em *shapefile*, as imagens geradas foram adicionadas ao *software Inkscape* para elaboração de um desenho esquemático para gerar uma nova forma de visualização do ambiente de um jeito mais direto e intuitivo. Separando as feições por cores e traços diretamente ligados às *features* identificadas inicialmente no processamento sísmico.

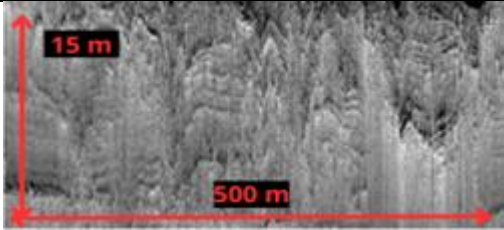
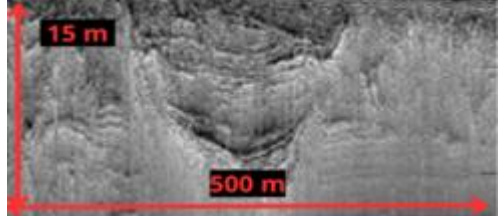
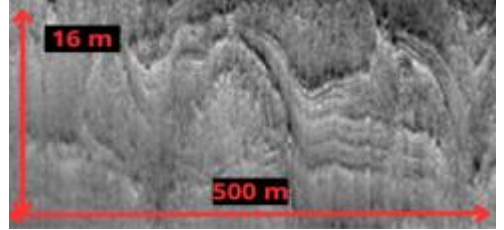
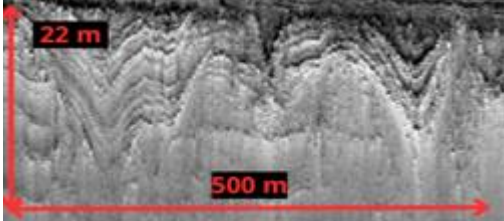
6. RESULTADOS

Os resultados apresentados referem-se à investigação sísmica da região da enseada de Porto Belo onde foram identificadas 5 unidades estratigráficas e 15 sismofáceis, mostradas no quadro 1. Esses registros foram adquiridos em uma profundidade média de 15 m na coluna d'água e uma penetração de até 60 m no sedimento. A análise das unidades após o tratamento dos dados foi realizada na seguinte sequência:

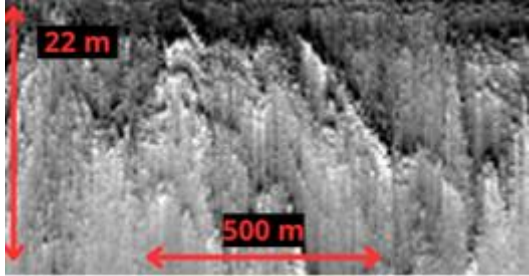
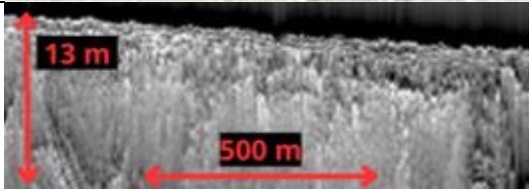
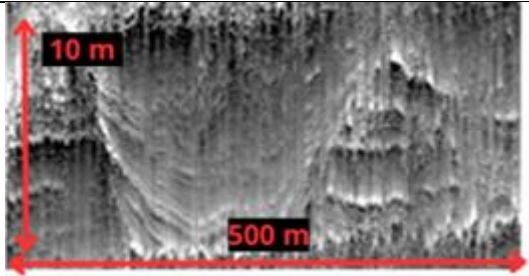
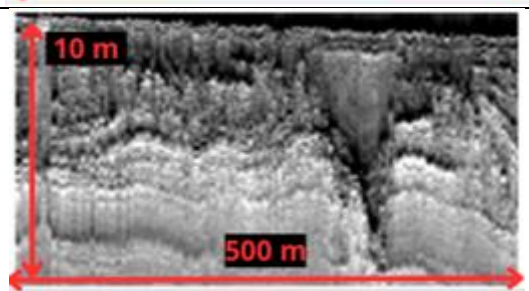
As barreiras arenosas foram identificadas pela característica dos refletores contínuos e paralelos, enquanto os paleocanais apresentaram padrões mais difusos, acanalados. As interfaces entre a barreira e a laguna apresentaram descontinuidades e truncamentos nos refletores, indicando a transição entre diferentes ambientes sedimentares.

A seguir são apresentadas feições mais comuns identificadas durante o processamento das linhas sísmicas.

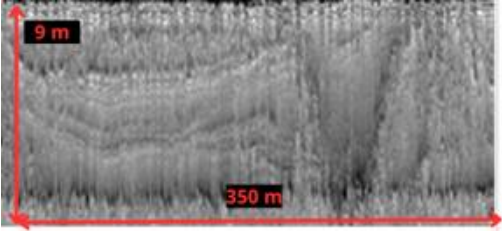
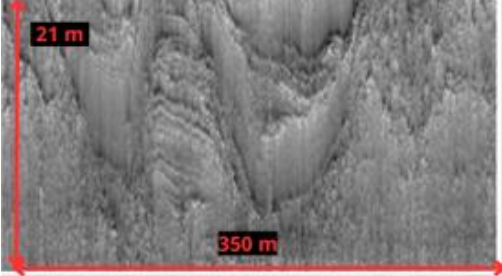
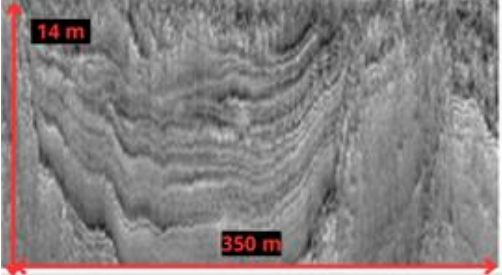
Quadro 1 - Quadro de descrição das sismofáceis observadas com seus respectivos padrões de preenchimentos durante o processamento sísmico. Essas imagens foram obtidas através de processamento via Matlab®, onde gerou-se os resultados de volume para melhor visualização.

Perfil	Unidade Sismoestratigráfica	Sismofáceis	Profundidade de Ocorrência	Padrão de Reflexão Interna	Recorte sísmico
A	U4	Subparalela	20 m	Baixa amplitude	
A	U4	Preenchimento de canal fluvio-estuarino	20 m	Média amplitude	
A	U3	Agradação de depósito	15 m	Planoparalelo agradacional. Média amplitude	
B	U3	Preenchimento de Canal de Maré	25 m	Estratificação Distorcida. Média amplitude	

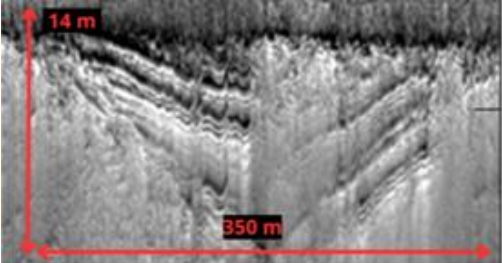
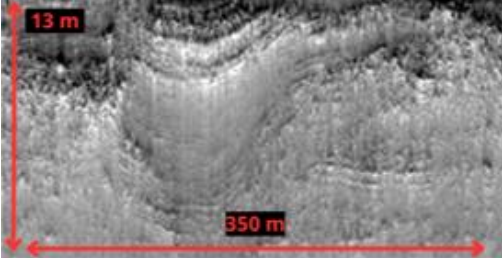
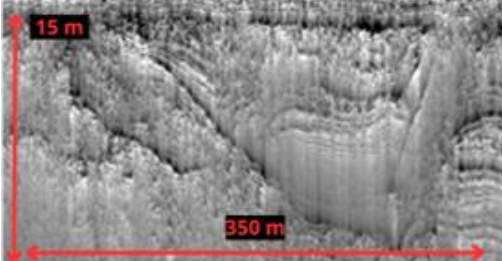
[Continuação quadro 1]

Perfil	Unidade Sismoestratigráfica	Sismofáceis	Profundidade de Ocorrência	Padrão de Reflexão Interna	Recorte sísmico
B	U4	Preenchimento Assimétrico	20 m	Refletores de média amplitude	
B	U5	Preenchimento Assimétrico	20 m	Migração lateral. Agradacional. Refletores de média amplitude	
C	U4	Canal divergente em forma de U	11 m	Média amplitude	
C	U3	Planoparalelo	15 m	Moderadamente contínuo, mergulho em direção ao oceano	

[Continuação quadro 1]

Perfil	Unidade Sismoestratigráfica	Sismofáceis	Profundidade de Ocorrência	Padrão de Reflexão Interna	Recorte sísmico
D	U4	Planoparalelo	10 m	Planoparalelo. Agradacional. Média amplitude	
E	U3	<i>Washover</i> de sistema	20 m	Estratificação Distorcida. Média amplitude	
E	U4	Preenchimento plano paralelo	15 m	Planoparalelo. Média amplitude	

[Continuação quadro 1]

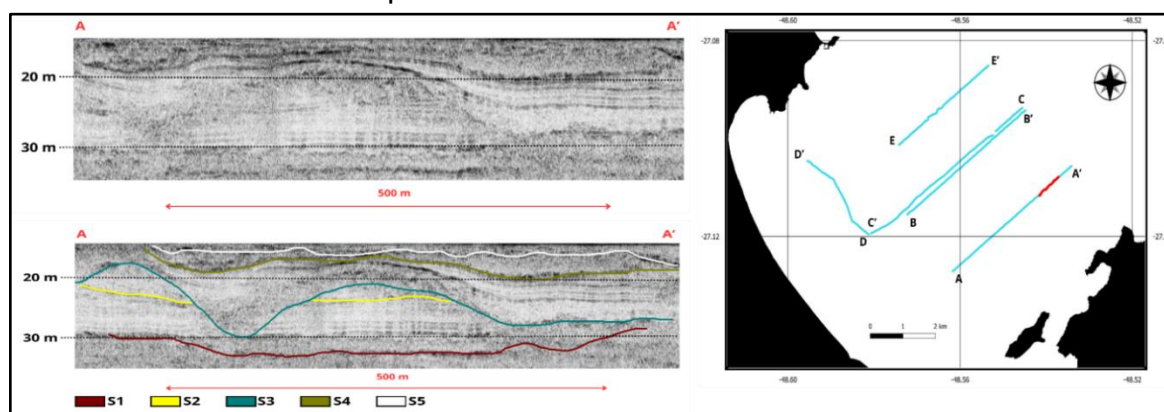
Perfil	Unidade Sismoestratigráfica	Sismofáceis	Profundidade de Ocorrência	Padrão de Reflexão Interna	Recorte sísmico
E	U4	Canal divergente em forma de V	20 m	Estrutura de escape de água	
E	U4	<i>Washover</i> de sistema	20 m	Estrutura de estratificação distorcida	
E	U4	Canal divergente em forma de U	15 m	Canal vertical estratificado. Média amplitude	

As feições de padrões de reflexões internas apresentaram características acústicas específicas de algumas sequências. As unidades U4 consistem em um corpo sedimentar de reflexões acústicas do tipo caóticas com refletores mais perturbados. Essa unidade em sua maioria apresenta padrões de reflexões internas paralelas e subparalelas contínuas com uma alta amplitude. As unidades de 1 e 2 não tiveram padrões de reflexões suficientes para detalhamento. Apresentaram refletores pequenos e zonas acusticamente transparentes.

Os registros mostraram presença de barreiras arenosas em todas as linhas e em profundidades bem rasas. Os refletores foram identificados e com base neles foi possível a observação de SBA, paleocanais e estruturas que representavam eventos sísmicos. Foi possível observar modificações feitas por ondas, marés e eventos extremos.

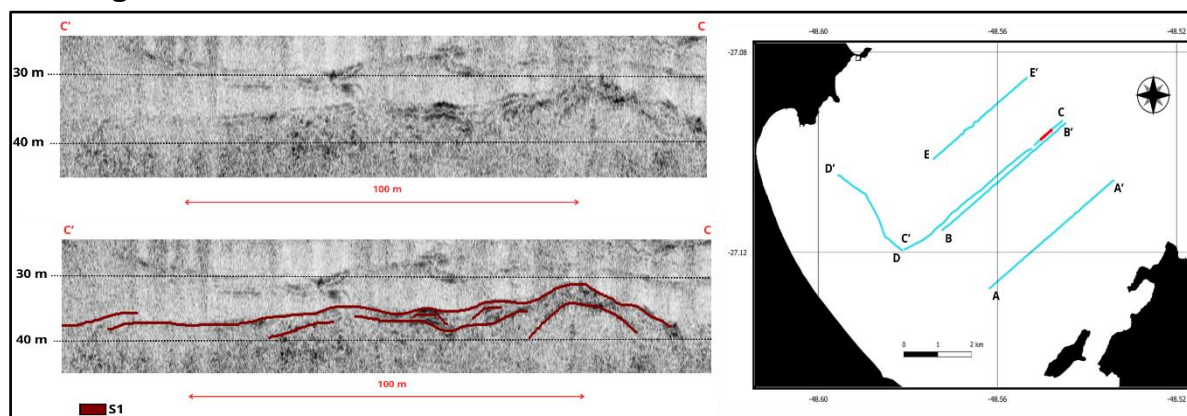
Para identificação dos refletores o primeiro passo após o tratamento foi a identificação das superfícies de cada unidade. Estas foram enumeradas de 1 a 5, (Figura 16).

Figura 16 – Exemplos de superfícies marcadas no perfil A-A'. As superfícies foram separadas por cores e mapeadas como mostra o mapa ao lado indicando o trecho a qual se refere a unidade demarcada.



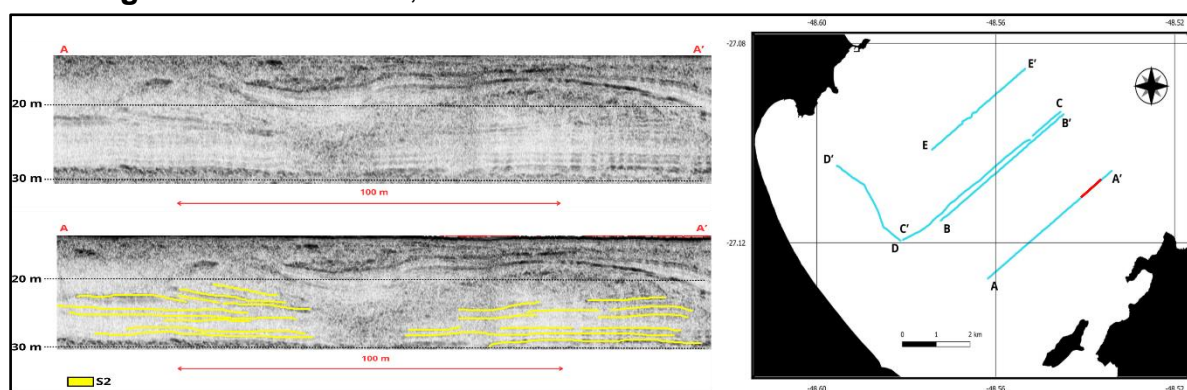
A Superfície 1 é bem caracterizada por uma mudança marcante de impedância. Essa unidade está relacionada a materiais de natureza consolidada e/ou compactada. Pode ser classificada como embasamento acústico, podendo ser um arcabouço rochoso. Podem apresentar camadas da classe cascalho e sedimentos biodetríticos, ocorrendo em toda área de estudo. Possui seu limite marcado pelo refletor (U1) o embasamento acústico, é definida por apresentar algumas reflexões sem estrutura em profundidades que variaram entre 25 e 60 m da coluna d'água (Figura 17).

Figura 17 – Refletor 1, identificada em vermelho da linha sísmica C-C'.



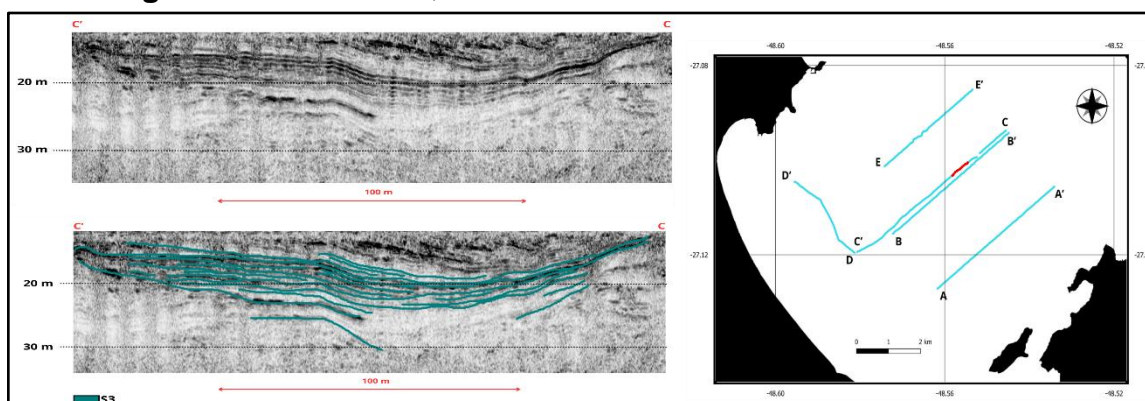
A Superfície 2 é delimitada na base pela S1 e no topo pela S2 e também apresenta poucos refletores internos que podem ser observados com baixa amplitude e retorno acústico escasso, ocorrendo nas profundidades no interior do sedimento entre 25 e 30 m, e por isso não oferece uma quantidade muito grande de dados na maioria dos registros. Porém, ainda foi possível enxergar linhas de múltiplas reflexões e também feições características que mostravam a presença de lama devido à baixa reflexão, deixando a imagem do registro mais clara devido a diferença de impedância. Essa unidade apresenta uma superfície com ondulações suaves, e um conjunto de reflexões internas com configurações de preenchimento de canais fluviais caracterizado por fases de cortes de preenchimento de um ambiente com elevada dinâmica, além de apresentar caráter erosivo em alguns perfis. O retorno acústico interno é escasso e de baixa continuidade e amplitude. Este por sua vez se mostra descontínuo em todos nos registros os observados. Em alguns casos, seu limite inferior é dado pela ausência de retorno acústico, impossibilitando a identificação de seu limite inferior nesses casos ([Figura 18](#)).

Figura 18 – Refletor 2, identificada em amarelo da linha sísmica A-A'.



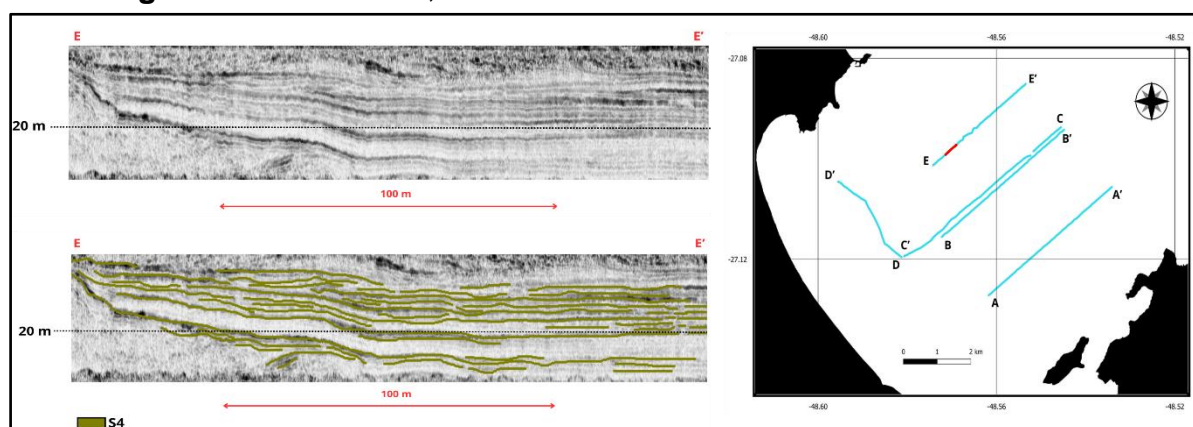
A Superfície 3, delimitada pela base em S2, já mostra o padrão de refletores internos planoparalelos de média amplitude de forma mais contínua e evidente. Essa unidade é marcada pela presença de preenchimentos assimétricos, que podem ter sido causados por variações no suprimento de sedimentos, enquanto iam sendo acumulados. Também possui truncamentos erosivos e paleocanais. O perfil apresenta feições que podem indicar corpos sedimentares progradantes. A estrutura interna varia em sua composição, ora por refletores paralelos, ora por oblíquos, que progradam em direção da terra para o mar. A unidade do perfil B-B' apresenta barreiras arenosas e preenchimentos de canais assimétricos com refletores de média amplitude. Essas feições continuam a aparecer na unidade 4, com presença de preenchimentos divergentes de canal assimétrico com refletores de média amplitude. A superfície 3 apresenta em sua maioria caráter erosivo e pequenas canalizações (Figura 19).

Figura 19 – Refletor 3, identificada em azul da linha sísmica C-C'.



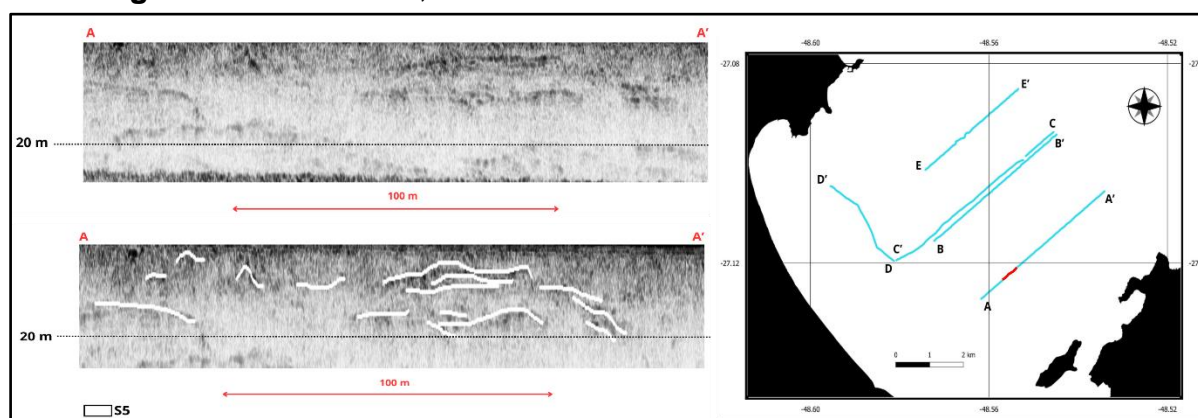
A Superfície 4 é delimitada na base pela S3 e no topo pela S4, é marcada por refletores de alta amplitude e é caracterizada pela presença de truncamentos erosivos, barreiras arenosas e feições de preenchimento de canal complexa. São representadas internamente por fases de corte e preenchimento, com refletores planoparalelos indicando o preenchimento de pequenos canais, seguidos por refletores subparalelos a ondulados, indicando a transição de um preenchimento em um ambiente de fluxo regular para um ambiente mais turbulento. São marcadas pelos sedimentos contorcidos de areias e lamas (Figura 20).

Figura 20 – Refletor 4, identificada em verde da linha sísmica E-E'.



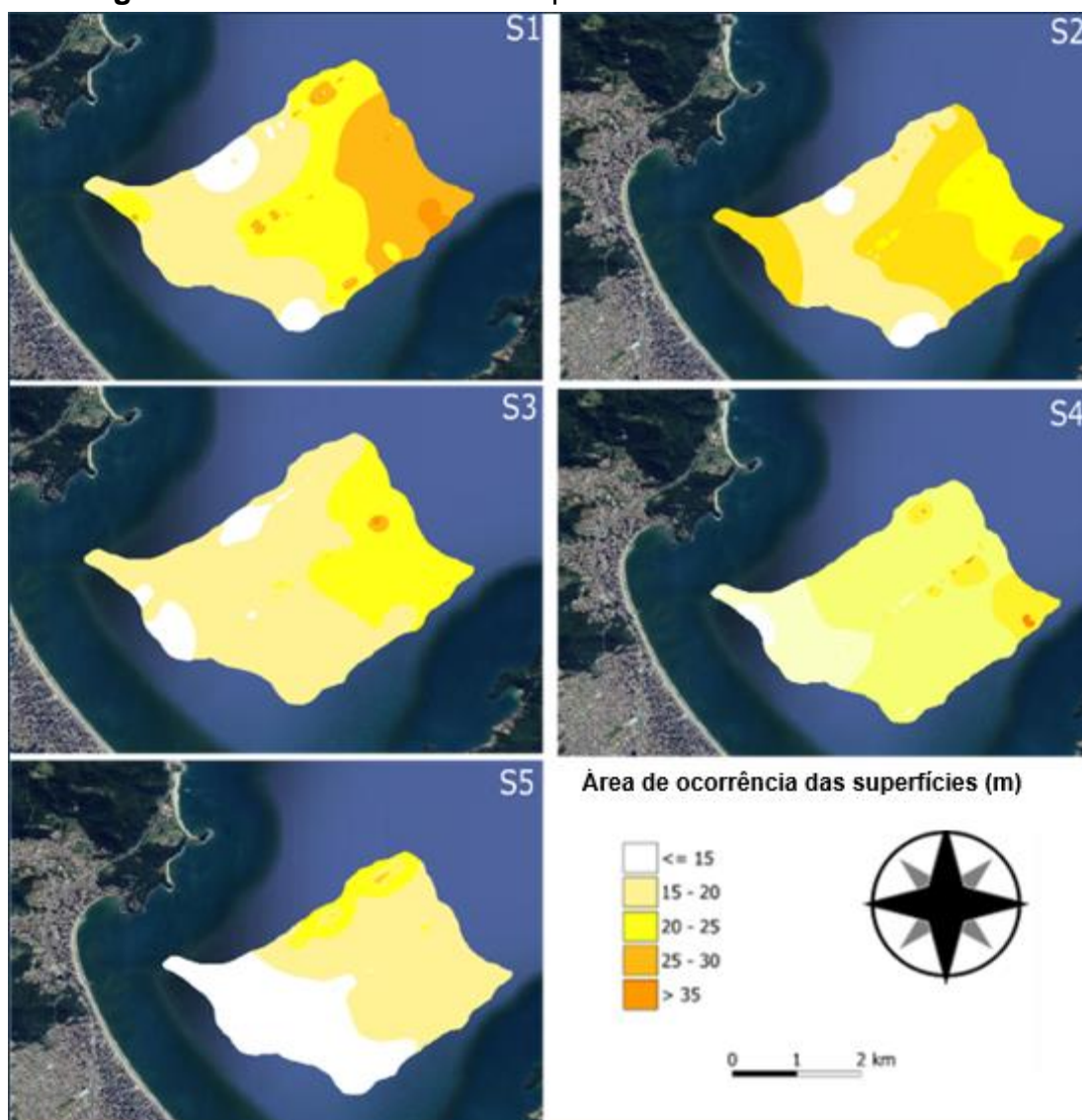
Por último a unidade 5 contém refletores paralelos de amplitude moderada a elevada, com alta continuidade, cujo topo forma o leito marinho moderno e é aparentemente composta por grande quantidade de lentes biodetríticas e possíveis sedimentos de retrolavagem e fluxo terrestre. Essa unidade apresenta os sedimentos não consolidados. As superfícies internas e as unidades que se sobrepõem sugerem acreção vertical desse perfil. Os registros mostram que essa unidade apresenta geometria externa característica de barreiras arenosas ([Figura 21](#)).

Figura 21 – Refletor 5, identificado em branco na linha sísmica A-A'.



A seguir a imagem mostra uma interpolação descrevendo em quais profundidades as unidades apareceram ao longo das linhas de sísmica. A unidade S1 apareceu em regiões mais profundas enquanto a unidade S5 em regiões mais rasas.

Figura 22 – Profundidade das superfícies sísmicas identificadas.



6.1 DESCRIÇÃO DOS PERFIS

No perfil (A-A') foi possível identificar as linhas de múltiplas reflexões, presença de truncamentos erosivos e possíveis *washover* de sistema, provavelmente ligados à ocorrência de eventos extremos na região. Refletores crescendo na vertical indicando uma agradação de depósito. Como é possível observar nas linhas 3 e 4 e a presença de estratificações distorcidas.

Figura 23 – Perfil A-A' sem interpretação.

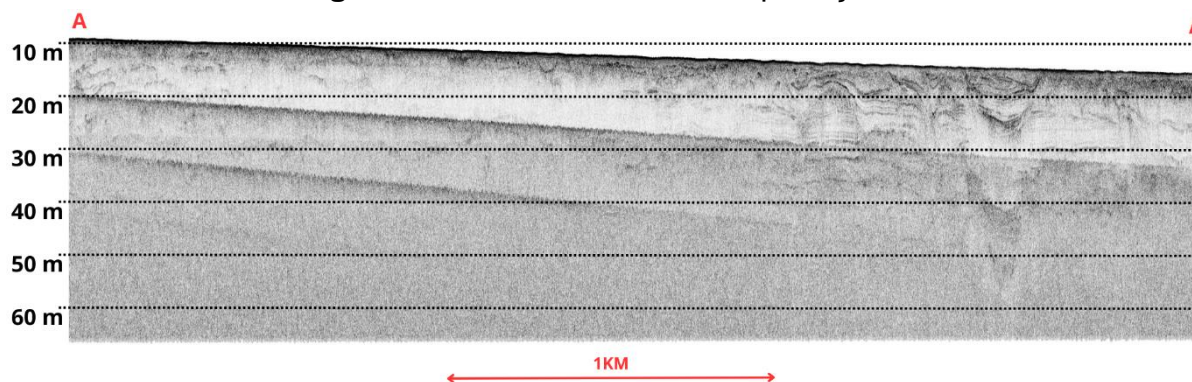
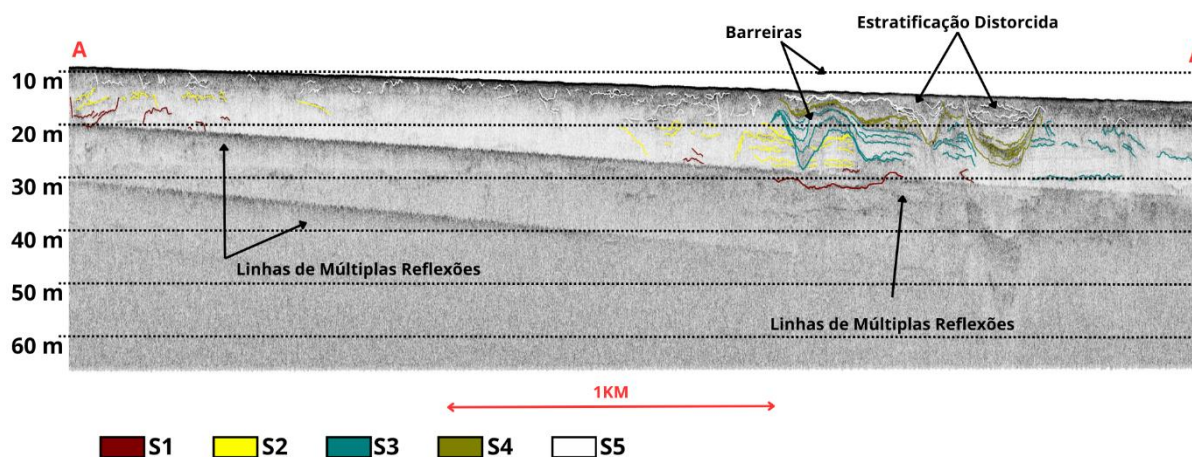


Figura 24 – Perfil A-A' com interpretação.



U1 - A unidade 1 apresenta linhas de múltiplas reflexões bem definidas e refletores transparentes em profundidade variando entre 20-25 m.

U2 - Essa unidade sobrepõe a unidade 1 e está acima da múltipla mais forte e apresenta refletores planoparalelos que se intensificam à medida que o perfil se distancia da praia.

U3 - A unidade 3 apresenta preenchimento divergente que se configura como um dobramento das camadas.

U4 - Região que sobrepõe a unidade 3 onde foram identificadas as barreiras arenosas que apresentam sedimentos conservados desde a última glaciação. Essa linha possui refletores subparalelos e um padrão de truncamentos erosivos, possivelmente gerados por eventos de tempestade onde houve um elevado *wave run-up* e consequentemente um *washover* do sistema.

U5 – A unidade 5 possui presença de *toplaps* e dobramentos que podem ter sido causados por eventos sísmicos anteriores na costa Leste do Brasil, como citado por

Cooper, et.al (2016). A unidade 5 superficial apresenta características de sedimentos biodetríticos, que podem ser ditos como organismos carbonáticos no sedimento.

Figura 25 – Perfil B-B' sem interpretação.

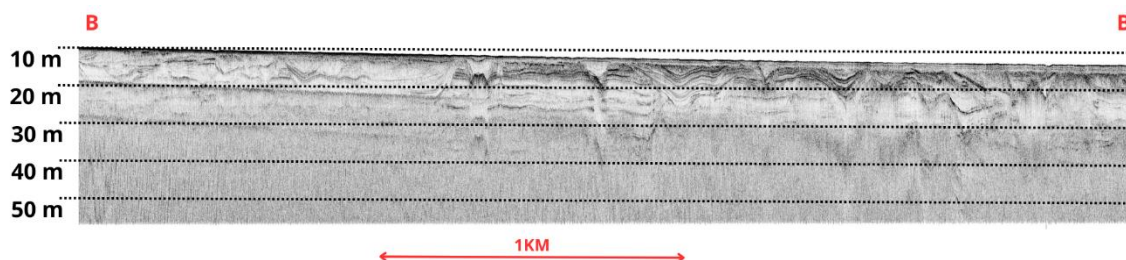
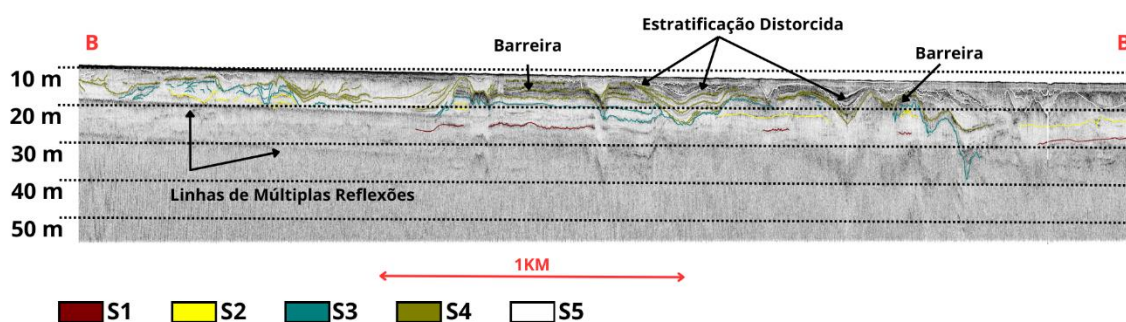


Figura 26 – Perfil B-B' com interpretação.



A linha B-B' apresenta semelhança com a linha anterior, porém com nível de detalhes mais expressivos. Onde foi possível melhor demarcação dos SBA, e presença mais marcada de estratificação distorcida.

U1 - A unidade 1 tem seu limite superior marcado pelo refletor 1, de alta amplitude, na região de 25 m.

U2 - A unidade 2 apresenta poucos refletores internos nesse perfil.

U3 - A unidade 3 apresenta também barreiras arenosas e preenchimentos de canais assimétricos com refletores de média amplitude.

U4 – É interpretada como uma sequência de lagunas barreiras, relacionada à baixa energia do ambiente onde a ação de ondas e correntes é reduzida. Possui presença de gases que são explicadas devido à elevada concentração de teor orgânico no sedimento. Apresenta refletores com preenchimentos divergentes de canal assimétrico com refletores de média amplitude.

U5 – Assim como a unidade anterior, essa é caracterizada pela presença de sedimentos biodetríticos e truncamentos erosivos recentes em comparação aos da unidade 4.

Figura 27 – Perfil C-C' sem interpretação.

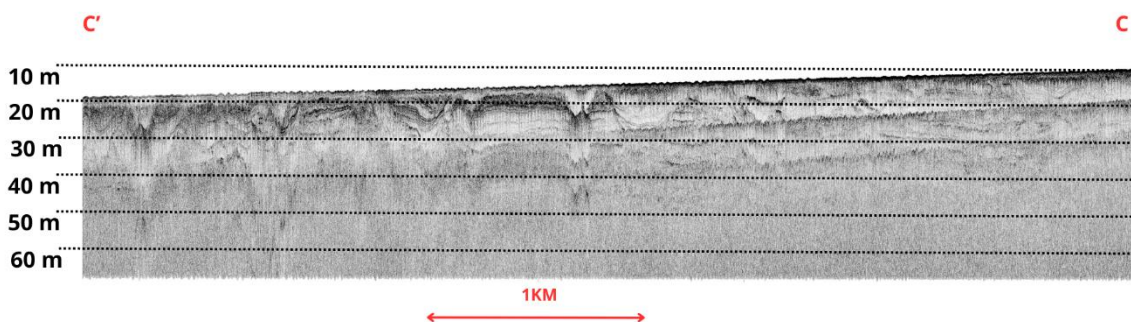
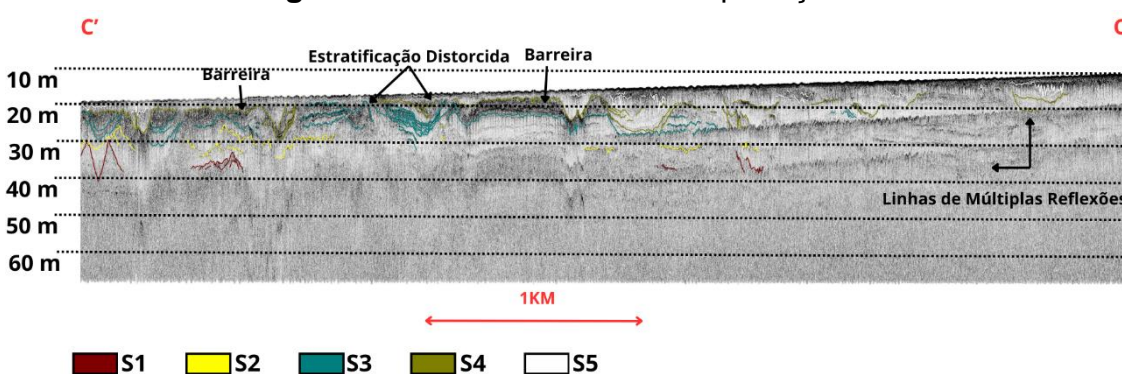


Figura 28 – Perfil C-C' com interpretação.



A linha C-C' é muito similar a anterior, com algumas pequenas diferenças como na estratificação distorcida menos acentuada que na B-B'. Apresenta estruturas que sobrepõem unidades e preenchimentos de canais assimétricos.

Figura 29 – Perfil D-D' sem interpretação.

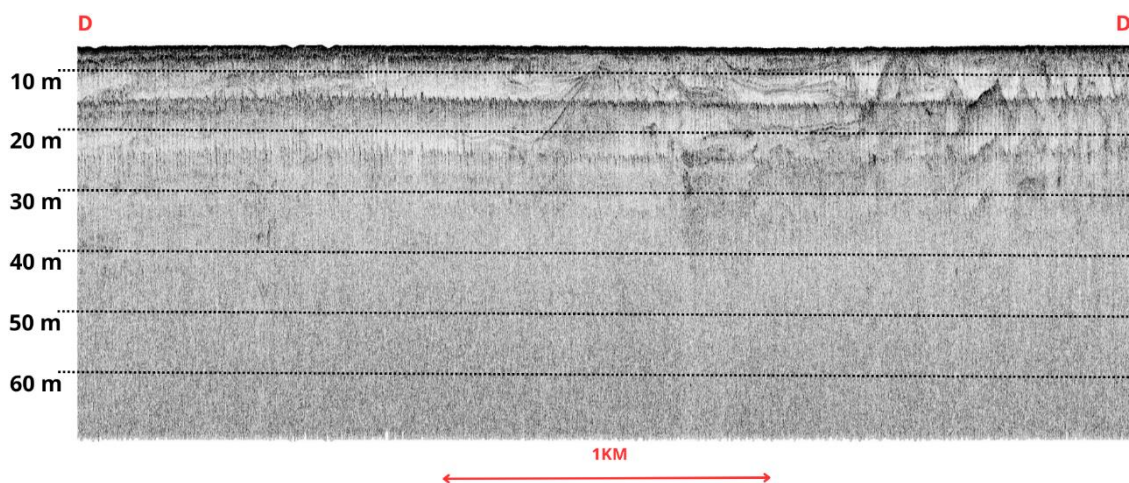
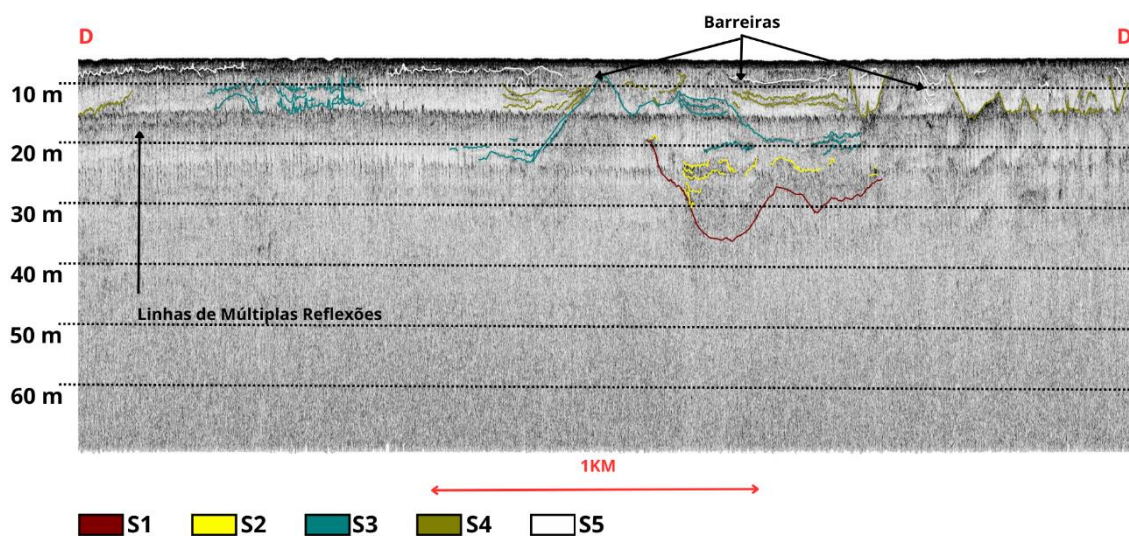


Figura 30 – Perfil D-D' com interpretação.



A linha D-D' está na isóbata de 10 m aproximadamente. Como são descritos na unidade 3.

U1 - Essa linha sísmica está paralela à praia então todo o perfil está na mesma isóbata, diferentes dos registros anteriores que apresentam uma declividade à medida que a linha é observada. A região da unidade 1 apresenta sinais de alta amplitude e altamente irregular.

U2 - A unidade 2 sobrepõe a unidade 1. Formam a base da unidade 3.

U3 - Essa unidade apresenta refletores de média amplitude.

U4 - Apresenta múltiplos truncamentos erosivos. Presença de lama na região e preenchimentos divergentes.

U5 - Essa unidade possui grande quantidade de sedimentos biodetríticos em subsuperfície e truncamentos erosivos também.

Figura 31 – Perfil E-E' sem interpretação.

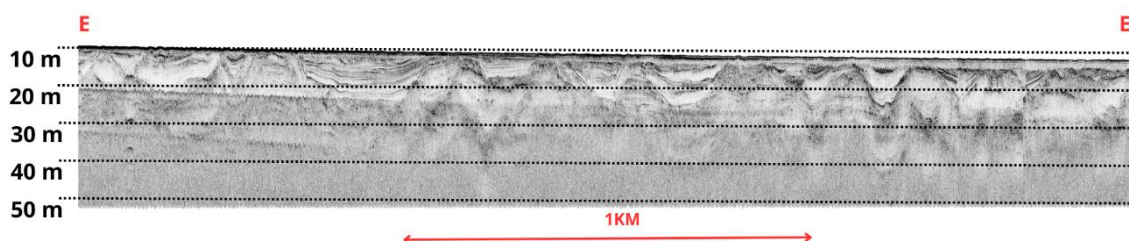
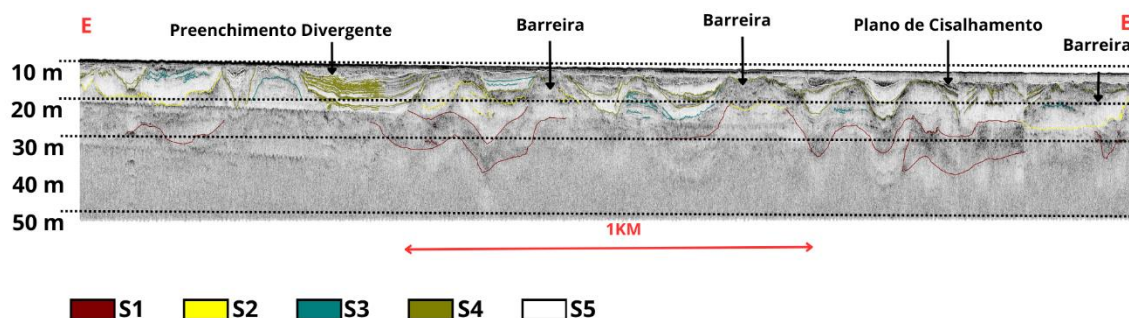


Figura 32 – Perfil E-E' com interpretação.



U1 - A unidade 1 é o embasamento acústico. Refletores com feições planoparalelas agradacionais. Migração lateral. Face marinha de um sistema barreira. Refletores de média amplitude.

U2 - A unidade 2 é interpretada como areia fina e lamas. A presença desses sedimentos mais finos em contraste com os sedimentos da região U3 pode estar ligada à presença do estuário da região que os transporta para lá. É classificada como sendo um ambiente deposicional, face lagunar de uma barreira. Caracterizada por refletores oblíquos retrogradacionais preenchidos por lama e presença de paleocanais. Além disso, é necessário que a taxa de suprimento de lama à região litorânea sobrepuje a dos sedimentos mais grossos.

U3 - Foi identificada como uma região com presença de truncamentos erosivos e lamas também em seu interior. Preenchimentos divergentes nos paleocanais identificados nos registros.

U4 - Região que sobrepõe a unidade 3 que apresenta sedimentos conservados desde a última glaciação, barreiras arenosas. É possível observar a presença das barreiras identificando os truncamentos erosivos, possivelmente gerados por eventos de tempestade onde houve um elevado *wave run-up* e conseqüentemente um *washover* do sistema

U5 – A unidade 5 possui presença de *toplaps* e dobramentos que podem ter sido causados por eventos sísmicos anteriores na costa Leste do Brasil. A unidade 5 superficial apresenta características de sedimentos biodetríticos, que podem ser ditos como organismos carbonáticos no sedimento. Ambiente deposicional fluvial: preenchimento de canal assimétrico agradacional.

Analisando ainda os padrões de reflexões internas foi possível observar feições em cada linha sísmica. O perfil B-B' apresentou registros agradacionais que indicam um processo de acúmulo sedimentar, relacionadas à ambientes de baixa energia. Os refletores paralelos inclinados para cima, em direção a superfície são uma indicação desse evento. Um outro fato que pode ser observado é o fato do aumento gradual da espessura da camada em direção ao topo. Essas informações são de extrema importância para reconstruir a história deposicional dessa área e assim fornecer informações relevantes sobre a evolução do ambiente sedimentar.

Além das informações geofísicas, informações sedimentares por métodos diretos de aquisição foram obtidas através de dados fornecidos pelo professor José Gustavo Natorf de Abreu responsável pelo Laboratório de Oceanografia Geológica da Universidade do Vale do Itajaí (Univali), foi possível obter mais informações pelos dados de testemunhos realizados por *vibracore* na mesma região para validação dos refletores sísmicos. Em sua maioria o sedimento da região é composto por areia fina. O testemunho T1 penetrou 3,48 metros e apresentou sedimentos compostos de areia e lama. O T3 amostrou lama plástica e com biodetritos e areia com lama até 1,0 de profundidade variando para areia com lama à areia muito fina até a base na base à 2,56 m.

Figura 33 – Mapa da área de estudo com marcações indicando 2 pontos onde foram realizadas coletas de testemunhos. Ponto T3 mostrado a esquerda e T1 a direita.

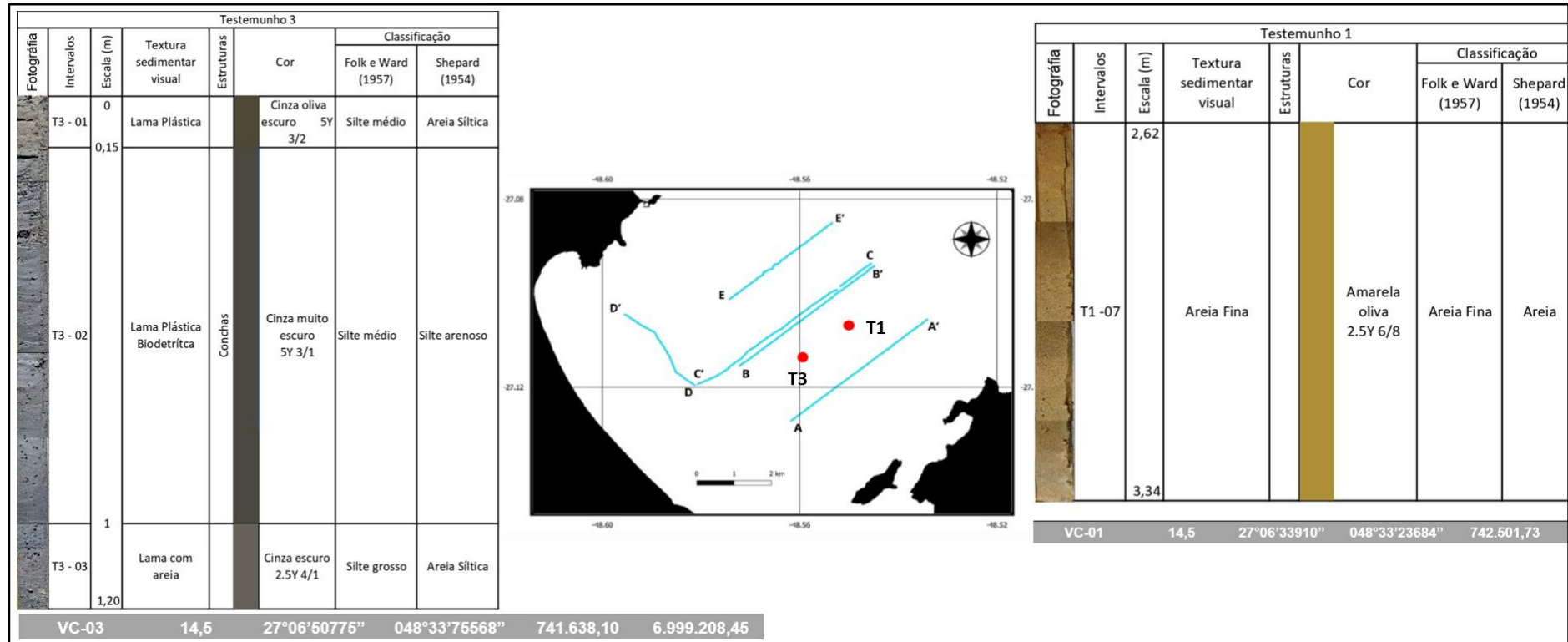
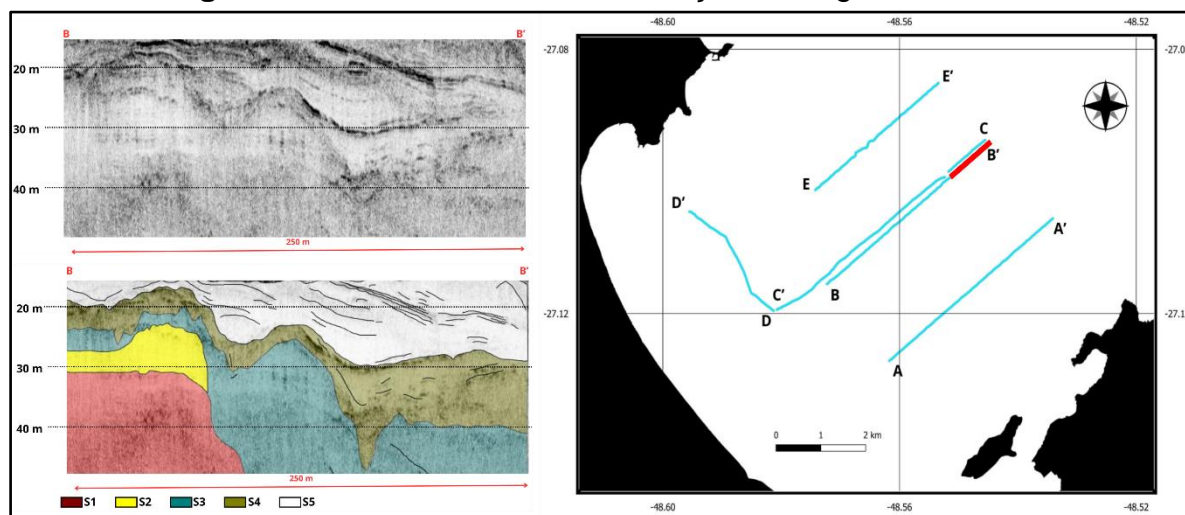
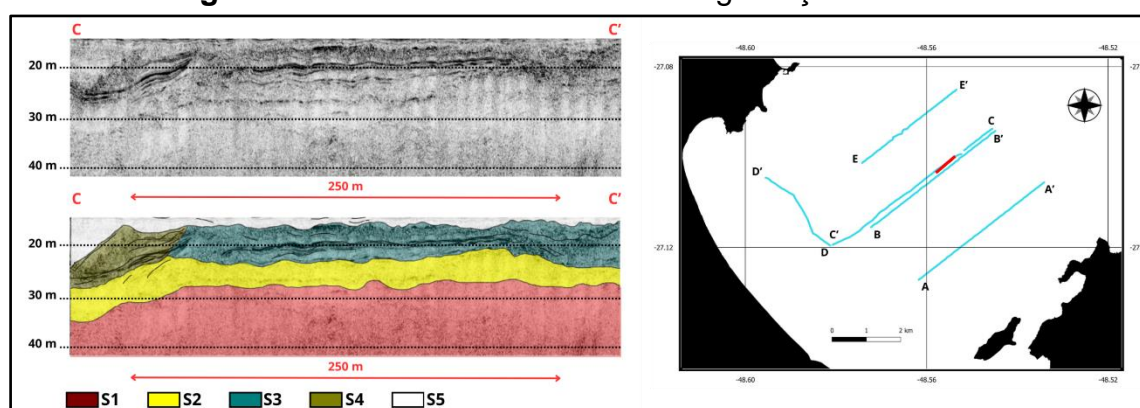


Figura 34 – Perfil B-B' mostrando feições retrogradacionais.



Ainda na mesma região, os refletores ascendem em direção à linha de costa, indicando processo de retrogradação típica de ambientes de lagunas protegidas por barreiras. Esse padrão de preenchimento é característico como sistema do tipo laguna-barreira, onde apresenta truncamentos erosivos e são formados durante eventos de tempestade, onde ocorre um elevado *wave run-up* sobre a barreira a erodem ao transpassá-la, formando registros de leques de sobrelavagem, e acabam por depositar o sedimento remobilizado na laguna.

Figura 35 – Perfil C-C' indicando retrogradação de unidade.



Uma das principais características de sistemas laguna-barreira é o fato de estarem presentes em ambientes protegidos e de baixa energia. Como as barreiras arenosas são moldadas pela ação de ondas e correntes litorâneas, o ambiente irá influenciar diretamente na sua formação. Nesse sentido, geralmente são depositadas

em sedimentos de forma paralela à praia. A região da enseada de Porto Belo sendo um local classificado como lugar de baixa energia, é favorável à deposição de sedimentos finos como silte e lama, que foram encontradas nos registros sísmicos.

Figura 36 – Linhas sísmicas indicando a presença de paleocanais, identificados como um sistema laguna-barreira. Em preto estão as linhas sísmicas, em azul estão localizados os paleocanais e em vermelho as barreiras arenosas.

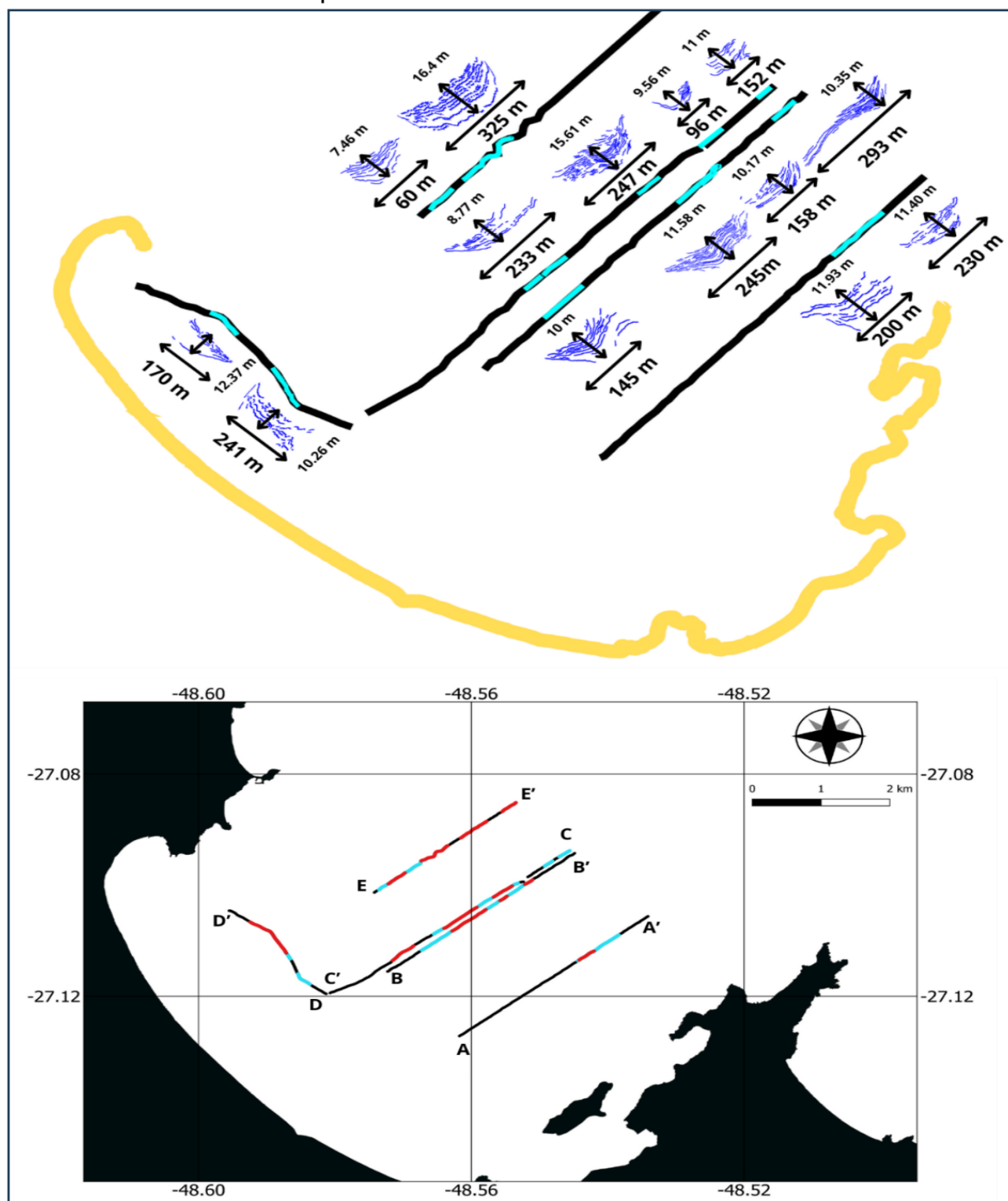
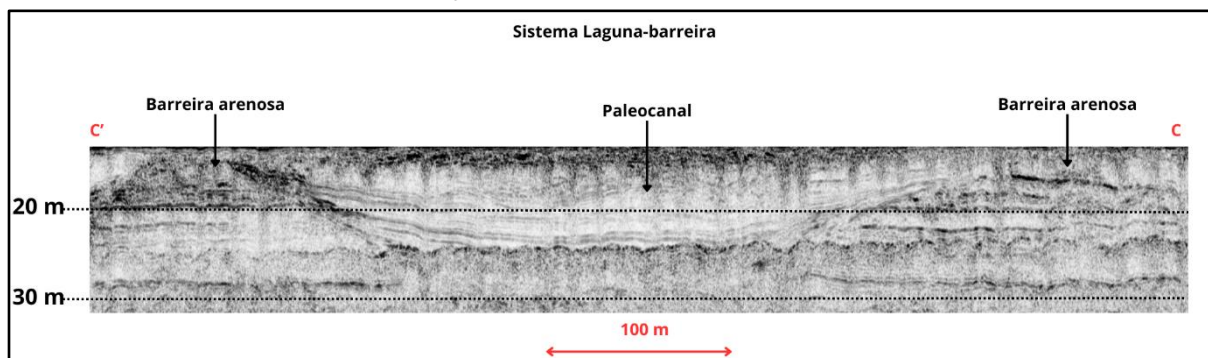
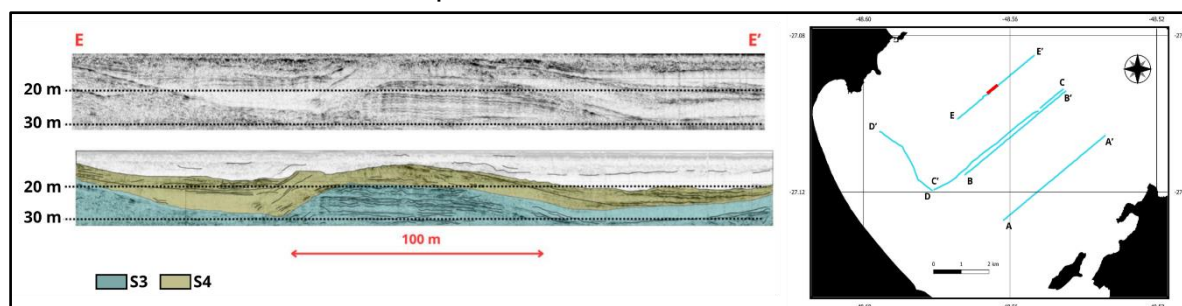


Figura 37 – Perfil C-C' usado para exemplificar um sistema laguna-barreira, com a presença de um paleocanal de maré.



Os sistemas de paleocanais lagunares identificados, em sua maioria, podem ser explicados como sendo canais de maré, por apresentarem a característica da geometria dos refletores com suas formações em forma de V ou U, indicando um leito antigo preenchido por sedimento. No perfil C-C' é possível aferir a descontinuidade nas barreiras causada pela inserção do paleocanal.

Figura 38 – Feição de preenchimento de canal mostrando uma barreira formada por dunas costeiras.



Outro perfil que apresenta estrutura de barra arenosa é o E-E'. Este possui o registro relacionado a unidade U3 marcada em azul na figura. Nessa situação também há a presença de lama, marcada em verde e identificada por ser mais claro que um sedimento arenoso como na barreira. Há um possível caso de um leque de sobrelavagem passando pela barreira e causando um truncamento erosivo na parte posterior. Provavelmente acontecimento pode estar relacionado à eventos extremos onde nessa situação houve um elevado *wave run-up*.

7. DISCUSSÃO

Como mostrado no trabalho existem diversas informações que podem ser relacionadas às mudanças de nível do mar e com os processos costeiros. As barreiras arenosas identificadas estão relacionadas com as últimas elevações do NM, cerca de 12 mil anos atrás e 8 mil anos atrás, que coincidem com os eventos de pulsos de inundação ([Figura 35](#)). Como citado anteriormente as feições identificadas registraram os momentos de pulsos de elevação, os paleocanais exibiram as direções que ocorreram esses eventos (COOPER *et al.*, 2016). Processos de progradação e regressão estão registrados nos sedimentos.

Foi possível observar também a modificação que ondas, marés e eventos extremos causaram às estruturas ao longo dos anos, e em como elas foram conservadas com a rápida elevação do nível do mar datadas do período do Holoceno, quando ocorreu um pulso de elevação do NM devido ao derretimento de geleiras, como mostra Corrêa (1996) e Angulo & Lessa (1997).

Essas mudanças climáticas alteraram o nível de base geral, durante o último máximo glacial, gerando um processo de regressão forçada do nível do mar causando eventos de truncamentos erosivos e cenários de tempestade, ocasionando *washover* de sistema.

Covello (2011) afirmou que o sistema litorâneo da região de Itapema é formado por unidades estratigráficas de depósitos marinhos praias, lagunares e eólicos. Datadas do período do quaternário na época do Holoceno.

A costa contemporânea possui sedimentos abundantes em planícies de praia do Holoceno, que são preservadas em diversos locais do litoral catarinense. A Baía da Pinheira e a Baía de Tijucas (COOPER *et al.*, 2018), respectivamente, ao sul e ao norte da Ilha de Santa Catarina, contêm planícies costeiras que se formaram durante a queda do nível do mar após meados de 20 mil anos atrás ([Figura 35](#)).

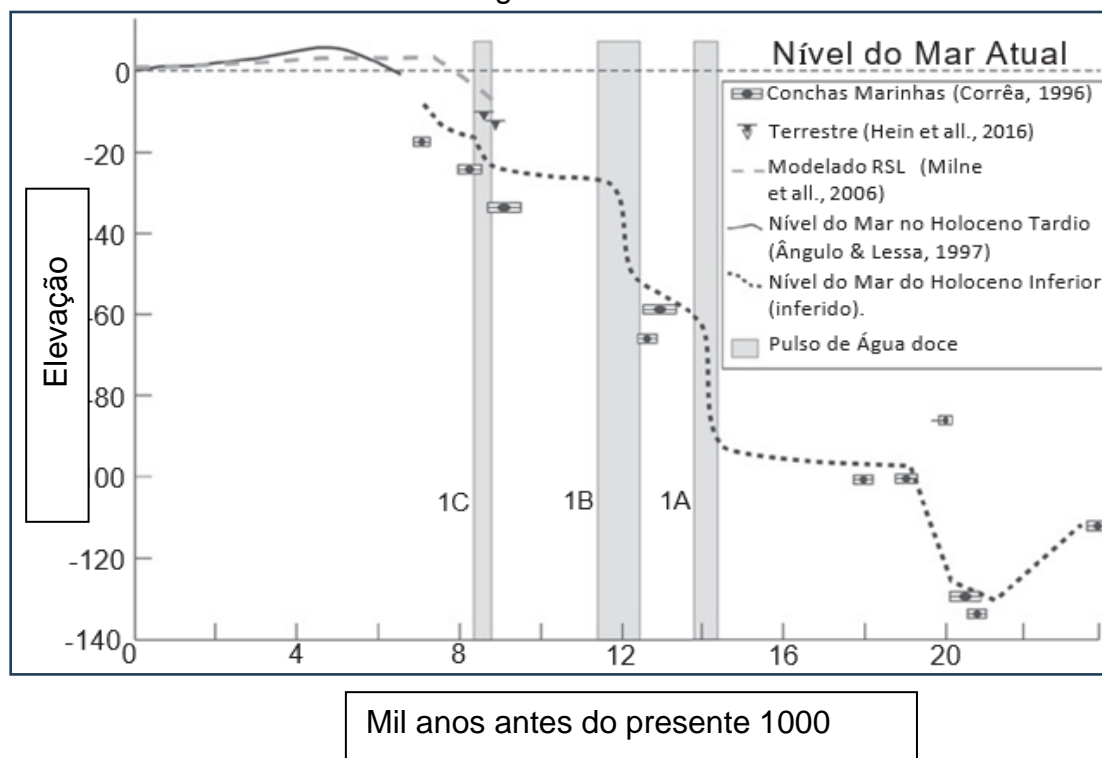
É necessário considerar fatores climáticos atuais e fenômenos que estão acontecendo ou já ocorreram para entender os processos de sedimentação marinha e costeira, em uma escala de tempo de centenas de milhares de anos. O intemperismo sobre terrenos continentais que disponibiliza sedimentos para a região costeira, as oscilações do nível do mar ao longo do Quaternário e as ondas e as correntes marinhas que atuando e interagindo entre si, são responsáveis por determinadas

características sedimentares da planície costeira e da plataforma continental.

Cooper *et al.* (2016) encontrou sistemas de barreiras arenosas na região da Baía de Tijucas, com profundidades de ocorrência e espessuras similares às identificadas na região da enseada de Porto Belo, acompanhada também das mesmas feições apresentadas nos registros sísmicos. As feições de preenchimento de canais foram muito parecidas ([Figura 35](#)). Essa unidade pode ser classificada contendo a presença intercalada de areia e lama e sobrepõe a unidade 4 onde estão presentes as barreiras arenosas. De acordo com Cooper, essas áreas são interpretadas como estruturas de escape de gás, embora raramente seja relatado par ambientes costeiros.

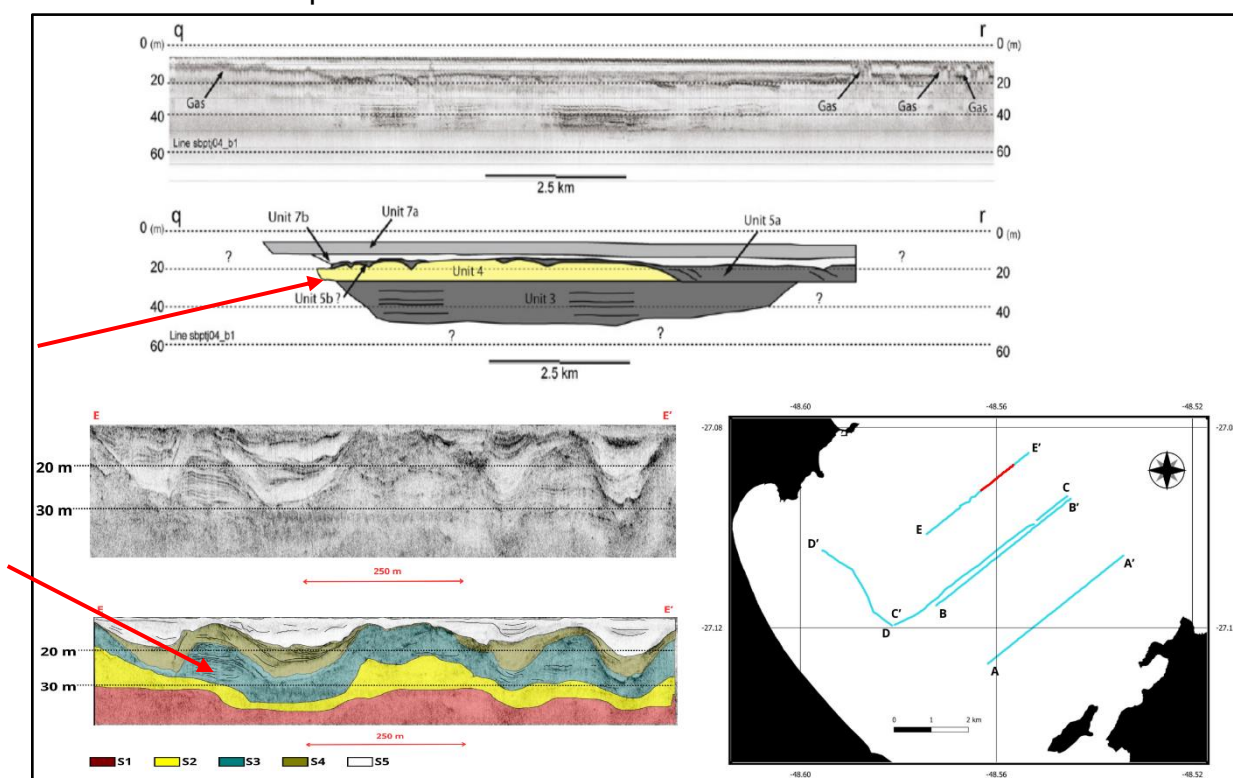
Embora a geração de estruturas de escape de gás seja comumente atribuída à compactação diferencial, a extensão da desorganização e do cisalhamento se assemelha a estruturas de deformação induzidas por atividade sísmica relatadas em sedimentos de plataforma (LI *et al.*, 2008). Em seu trabalho Cooper *et al.* (2016) atribuiu o modo de compactação do sedimento a atividades sísmicas que podem ter ocorrido para eles se arranjamem daquele jeito. Na unidade 5a que sobrepões as barreiras, é dito que é uma camada desorganizada com a presença de areia e lama ([Figura 36](#)). Esse tipo de estrutura também foi encontrada na região da área de estudo, identificada na unidade 4.

Figura 39 – Curva de variação do nível do mar do Holoceno para o Sul do Brasil, levando em conta pulsos globais de água de degelo, marcado pelas colunas cinzas. O último evento de máximo glacial ocorreu a cerca de 8 mil anos atrás.



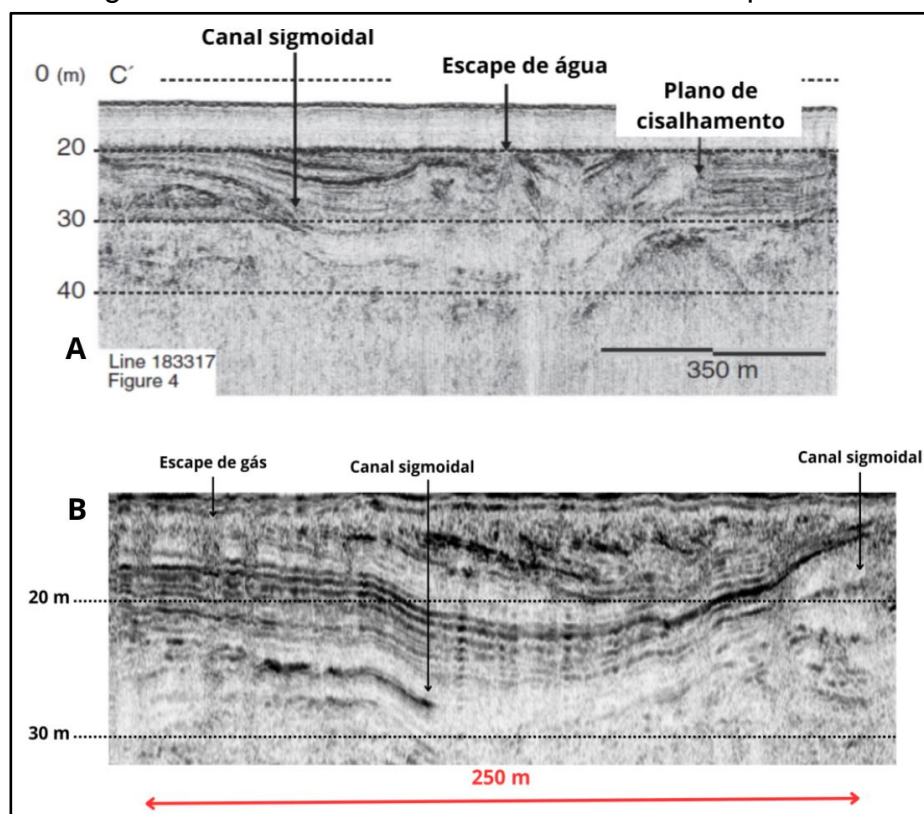
Fonte: Modificado de Cooper *et al.* (2016).

Figura 40 – Barreiras arenosas apontadas nas setas em vermelho, sobrepostas pela unidade que foi discutida contendo estruturas de areia e lama.



Fonte: Modificado de Cooper *et al.* (2016).

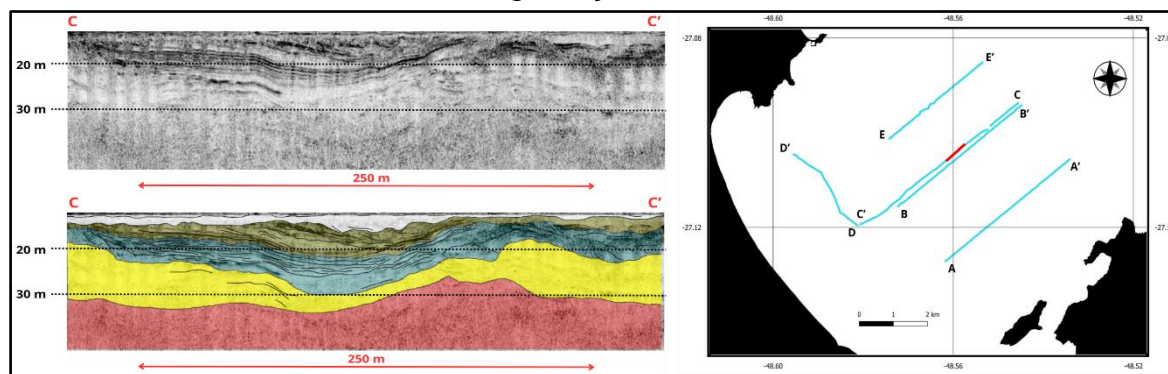
Figura 41 – Feição de preenchimento de canais. **A)** figura gerada por Cooper *et al.* (2016) na região da Baía de Tijucas, onde afirmou ter uma intercalação entre sedimentos arenosos e lama. **B)** figura gerada pelo autor comparando o registro da região de Porto Belo com o mesmo formato de paleocanal.



A interpretação dos registros sísmicos mostrou que os sistemas de paleodrenagens são marcados por uma superfície de descontinuidade sísmica, podendo apresentar uma continuidade lateral bem visível. Os refletores aparecem truncados pelas feições sotopostas. De acordo com Weschenfelder *et al.* (2008) quando os canais costeiros foram progressivamente afogados, preencheram-se por sedimentos fluviais, estuarinos e marinhos. Portanto a sua formação pode ser atribuída ao evento de regressão datada do final do Pleistoceno e início do Holoceno, aproximadamente 20 mil anos atrás.

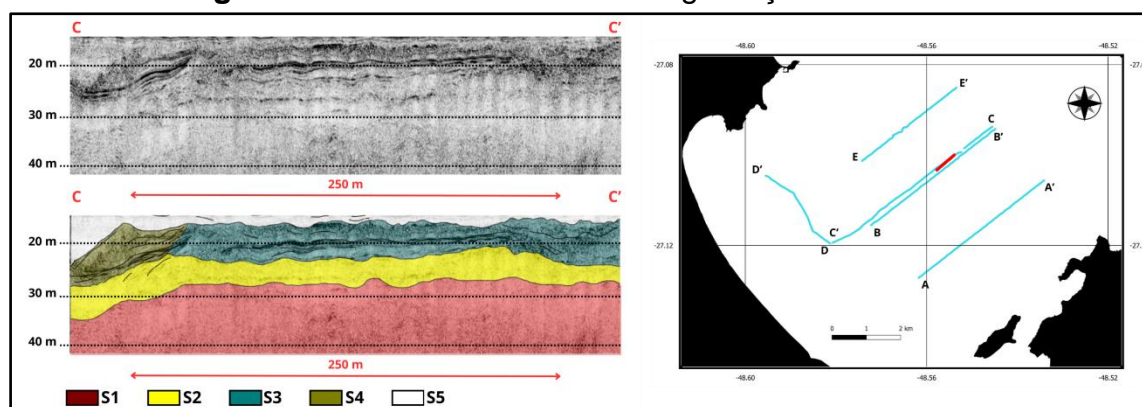
Nas linhas sísmicas também foram mapeados os paleocanais e o formato em que eles apareciam ao longo do levantamento sísmico. Os canais puderam ser vistos em formato de V e de U, e podem estar relacionados a lagunas que anteriormente puderam existir naquele local. Eles muitas vezes estavam associados às barreiras arenosas na forma de sistemas de lagunas-barreira. O registro sísmico C-C' apresenta barreiras arenosas truncadas por um canal de maré.

Figura 42 – Perfil C-C' com maior interpretação de unidades apresentando evento de agadação de unidade.



A unidade C.1 representa um canal de maré com aproximadamente 25 m de profundidade, composta por camadas de sedimentos grossos, inclinados em direção ao mar. Esse processo deposicional ocorre por uma unidade de afinamento. Essa unidade pode ser interpretada como uma sequência de sobrecarga depositada em mar aberto. São cobertos por depósitos de lagoa finos e ricos em sedimentos biodetríticos.

Figura 43 – Perfil C-C' indicando agadação de unidade.



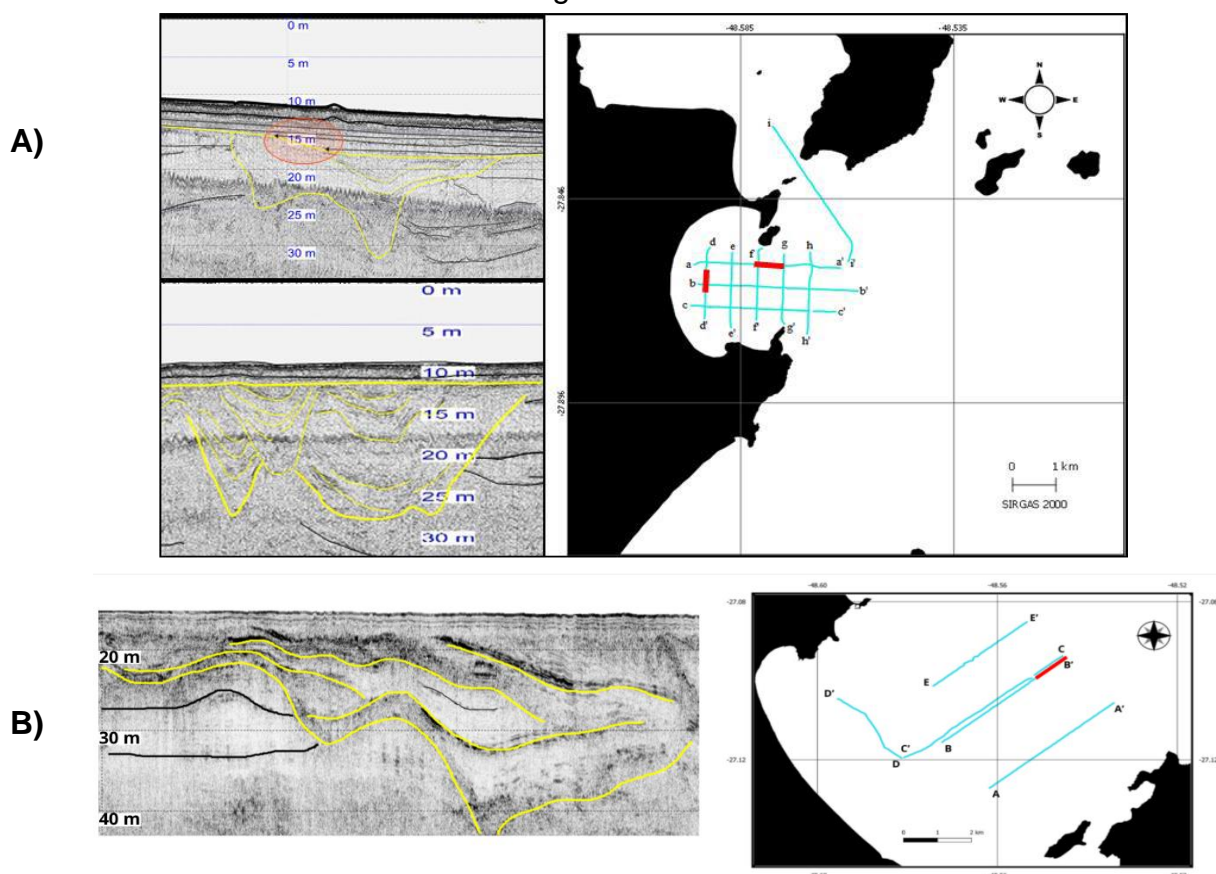
Ainda na região de Tijucas, em seus trabalhos anteriores Cooper *et al.* (2016) apresenta sedimentos marinhos rasos e sismicamente deformados e vinculou a atividade sísmica na região. A área de estudo está inserida em uma zona sismicamente ativa que se estende do Rio Grande do Sul ao Espírito Santo. A atividade sísmica ao longo do talude continental sugere uma estreita relação com tensões de flexão causadas pelo peso dos sedimentos e terremotos com magnitudes superiores a 5 mb ocorrem a cada 20-25 anos (ASSUMPCÃO *et al.*, 2011).

Afloramentos proeminentes de rocha ocorrem sob os principais locais da barreira submersa. Estes devem ter ajudado na estabilização da barreira antes do início da degradação. Eles, somados ao grande volume de sedimentos acumulados (Cooper *et al.*, 2016).

Galvão (2018) identificou também sistemas laguna-barreira na Enseada da Pinheira e relacionou os padrões de preenchimento e reflexão interna à retrogradação de unidade característica de ambientes de lagunas protegidas por barreiras ([Figura 43](#)).

Esses padrões de preenchimento são característicos desse tipo de sistema, e apresenta depósitos provenientes de leques de sobrelavagem que são depositados na parte posterior da barreira arenosa. Durante os eventos extremos, quando esse processo ocorre e a barreiras é transpassada, o sedimento é depositado e remobilizado na laguna.

Figura 44 – Feições de preenchimento de canal identificadas em amarelo. **A)** paleocanais identificados por Galvão (2018) na região da Pinheira. **B)** feições identificadas em Porto Belo. Ambos os locais possuem registros de ambientes retrogradantes.



Alves (2023) encontrou barreiras arenosas na região de Balneário Camboriú, cerca de 15 quilômetros da costa onde foi definida a região para alargamento da faixa de areia da praia. Os registros sísmicos mostraram feições de truncamentos erosivos e paleocanais similares assim como os presentes na enseada de Porto Belo. Na mesma região também foi possível obter informações do tipo de sedimento devido aos testemunhos realizados. Balneário Camboriú, assim como a região estudada, apresentou em sua maior composição areias finas e areias com fragmentos de conchas.

Galvão *et al.* (2023) relacionou o último pulso de degelo de 8 mil anos atrás à sobreposição parcial de sistemas laguna-barreira em frente à Ilha de São Francisco do Sul. A elevação do nível do mar fez com que as ondas transbordassem as barreiras. A sua sobreposição pode ter reduzido o sedimento disponível para o desenvolvimento da planície costeira.

Galvão (2018) associou também presença de barreiras arenosas ancoradas em promontórios. Essa feição também foi identificada por Cooper *et al.* (2016) na região de Tijucas.

Cooper *et al.* (2016) afirmou que na região de Tijucas as barreiras arenosas chegaram a 500 metros de largura e até 20 m de espessura se estendendo por toda a baía. Na enseada de Porto Belo o valor dos pacotes sedimentares variou de 4 a 15 metros e o comprimento de 500 metros também. A barreira costeira tanto de Tijucas quanto de Porto Belo é cercada por sedimentos lagunares e flanqueadas em direção ao mar pela face costeira.

Figura 45 – Mapa de isópacas de barreiras arenosas identificadas em Tijucas **A)** por Cooper *et al.* (2016) e **B)** pelo autor.

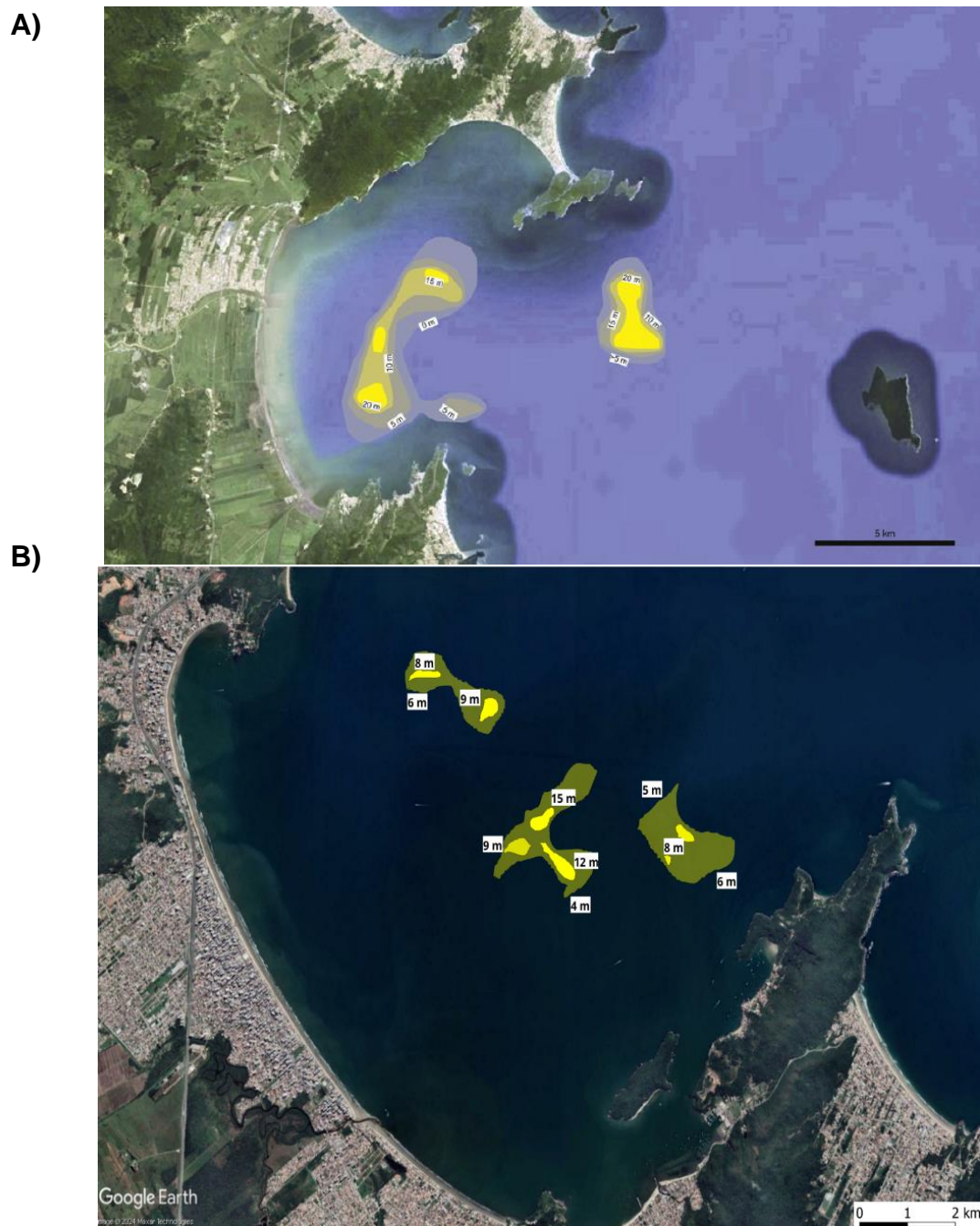
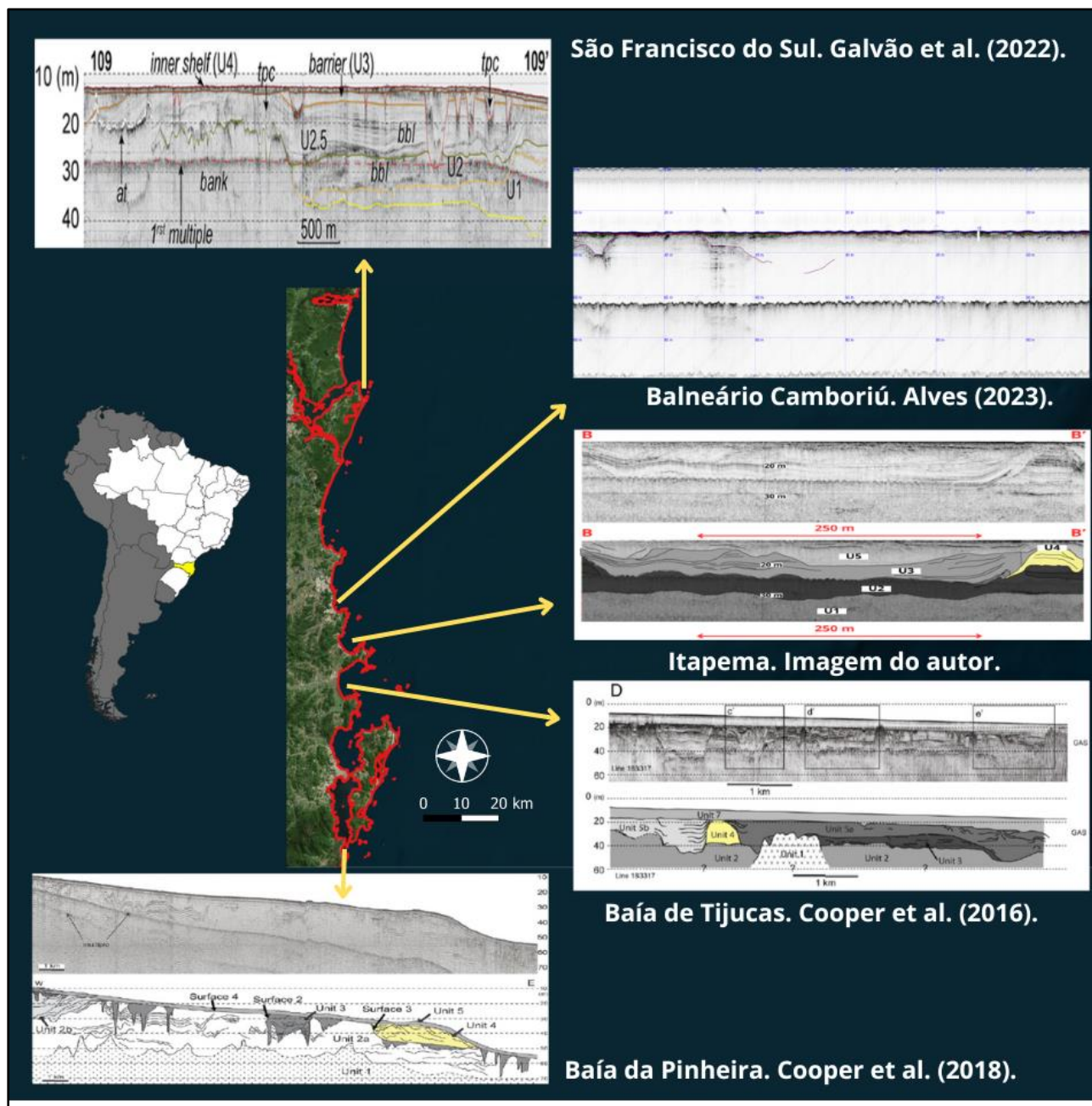


Figura 46 – Distribuição de barreiras arenosas identificadas pelos autores que já estudaram a região costeira do Sul do Brasil. São Francisco do Sul, Baía de Tijucas, Balneário Camboriú e Baía da Pinheira.



Fonte: Galvão *et al.* (2023); Cooper *et al.* (2016); Alves (2023); Cooper *et al.* (2018).

8. CONCLUSÃO

O uso de dados de sísmica rasa como investigação da antepraia na enseada de Porto Belo trouxe informações sobre a última elevação do nível do mar e a sua relação com a preservação de barreiras arenosas devido à última glaciação. Essa pesquisa trouxe conhecimentos relacionados aos trabalhos do Cooper *et al.* (2016) na planície costeira de Tijucas, do Galvão (2018) e Cooper *et al.* (2018) na planície da Pinheira, Galvão *et al.* (2023) em São Francisco do Sul e Abreu *et al.* (2003) e Alves (2023) em Balneário Camboriú.

A análise dos dados também permitiu relacionar as feições preservadas nos sedimentos e assim poder explicar os eventos que ocorreram nos processos de elevação do nível do mar, como eventos de tempestade, agradação de sistemas e formação de paleocanais. Em alguns casos os canais são preenchidos e apresentam progradação em direção ao mar. Quando ocorre a estabilização do nível do mar os canais são preenchidos após o equilíbrio entre a taxa de aporte sedimentar e a taxa de criação do espaço de acomodação, quando a deposição fluvial se tornará efetiva. Os canais mais profundos por sua vez podem ter ocorrido em níveis mais baixos de NM.

Com todas as informações dos registros sísmicos e também de alguns dados de testemunho têm-se a exata localização de barreiras arenosas, preservadas através da última elevação do NM de 8 mil anos atrás. Com essa informação foi possível fazer uma comparação direta às barreiras arenosas encontradas em todas as regiões costeiras de Santa Catarina citadas anteriormente.

Ao final pode-se dizer que os SBA estão presentes em todas as regiões, variando em profundidades entre 20 e 30 metros, e espessuras que variam de 4 a 15 metros.

Por fim é possível afirmar que a última rápida elevação do nível do mar, causada por degelos levando a pulsos de água doce, teve impacto direto na preservação dos sistemas de barreiras arenosas. E isso abre margem a novos estudos e entendimento dos eventos do passado e o que pode ser feito para o futuro.

9. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os registros sísmicos conseguem mostrar com grande precisão as informações necessárias para avaliar o tipo de sedimento e a extensão desses corpos sedimentares. Porém são necessários mais estudos de forma direta para que esses dados possam ser utilizados de forma mais confiável na prática.

Além disso é importante que as informações sejam disponíveis de forma mais acessível para elaboração de trabalhos futuros e que esses dados possam ser compartilhados de forma mais transparente para que seja possível realizar uma discussão com mais detalhes e ênfase nos assuntos.

Por fim, recomenda-se que trabalhos similares sejam feitos ao longo de toda a costa do estado, buscando mais informações acerca das barreiras arenosas e a sua preservação quanto as mudanças de nível do mar, e em como essas informações podem ser úteis para o futuro, e para eventuais projetos de alimentação artificial de praias.

REFERÊNCIAS

- ABREU, J. G. N. *et al.* Sedimentologia da planície costeira adjacente ao litoral Centro-norte do estado de Santa Catarina, Brasil. *In: IX CONGRESSO NACIONAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO*, 2003, Recife. **Boletim de resumos**, 2003.
- ABREU, J. G. N. *et al.* Impacto ambiental e modificações texturais dos sedimentos provocadas pela alimentação artificial da praia de Balneário Camboriú (SC). *In: Congresso Brasileiro da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário, ABEQUA*. 2003.
- ALMEIDA, F.F.M. Contribuição à geomorfologia da região oriental de Santa Catarina. **Boletim Paulista de Geografia**, n. 10, p. 3-32, 1952.
- ALVES, L. V. **Investigação em superfície e subsuperfície da área utilizada como jazida para o projeto de alimentação artificial da Praia Central de Balneário Camboriú, SC**. Monografia, UFSC, Florianópolis. 100p, 2023.
- ANGULO, R.J., LESSA, G.C. The Brazilian sea-level curves: a critical review with emphasis on the curves from the Paranaguá and Cananéia regions. **Marine Geology**, v. 140, n. 1-2, p. 141-166, 1997.
- ASSUMPÇÃO, M. *et al.* The São Vicente earthquake of 2008 April and seismicity in the continental shelf off SE Brazil: further evidence for flexural stresses. **Geophysical Journal International**, v. 187, n. 3, p. 1076-1088, 2011.
- AYRES, A.; NETO, JAB. Métodos Diretos e Indiretos de Investigação do Fundo Oceânico. **Introdução à geologia marinha. Rio de Janeiro: Interciência**, v. 6, p. 127-151, 2004.
- BORTOLIN, E. C.; WESCHENFELDER, J.; COOPER, A. A. Incised valley paleoenvironments interpreted by seismic stratigraphic approach in Patos Lagoon, Southern Brazil. **Brazilian Journal of Geology**, v. 48, n. 03, p. 533-551, 2018.
- CARUSO JR., F. Notas Técnicas: Mapa Geológico da Ilha de Santa Catarina, escala 1:100.000. Departamento Nacional da Produção Mineral – DNPM; Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica – CECO/UFRGS. **Nota técnica, n.º 6**. 1993.
- CATUNEANU, O. **Principles of Sequence Stratigraphy**. Elsevier, 2006.
- COOPER, J. A. G. Geomorphological variability among microtidal estuaries from the wave-dominated South African coast. **Geomorphology**, v. 40, n. 1-2, p. 99-122, 2001.
- COOPER, J. A. G. Temperate coastal environments. **Environmental Sementology**. p. 263-301 p. 2007.

COOPER, J. A. G. *et al.* Sandy barrier overstepping and preservation linked to rapid sea level rise and geological setting. **Marine Geology**, v. 382, p. 80-91, 2016.

COOPER, J. A. G. *et al.* Late Quaternary stratigraphic evolution of the inner continental shelf in response to sea-level change, Santa Catarina, Brazil. **Marine Geology**, v. 397, p. 1-14, 2018.

CORRÊA, I. C. S. Les variations du niveau de la mer durant les derniers 17.500 ans BP: l'exemple de la plate-forme continentale du Rio Grande do Sul-Brésil. **Marine Geology**, v. 130, n. 1-2, p. 163-178, 1996.

COVELLO, Cristina. **A paisagem de Itapema: estudo da geodiversidade para a educação ambiental e o geoturismo**. Tese de Doutorado. UFSC, Florianópolis. 173p, 2011.

DE LECEA, A. M. *et al.* Stepped Holocene sea-level rise and its influence on sedimentation in a large marine embayment: Maputo Bay, Mozambique. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 193, p. 25-36, 2017.

FÁVERA, J.C.D. **Fundamentos de Estratigrafia Moderna**. Rio de Janeiro, Editora UERJ, 263p, 2001.

GALVÃO, W. F. L. **Investigação de sub-superfície da Plataforma Continental Interna nas proximidades da Enseada da Pinheira, Palhoça-SC**. Monografia, UFSC, Florianópolis. 83p, 2018.

GALVÃO, W. F. L. *et al.* Holocene barrier overstepping, estuarine rollover and drainage merging in a sub-tropical bay. **Marine Geology**, v. 462, p. 107076, 2023.

GORNITZ, V. Sea-level rise: A review of recent past and near-future trends. **Earth surface processes and landforms**, v. 20, n. 1, p. 7-20, 1995.

HEIN, C. J. *et al.* Evidence for a transgressive barrier within a regressive strandplain system: Implications for complex coastal response to environmental change. **Sedimentology**, v. 60, n. 2, p. 469-502, 2012.

HORN FILHO, N. O. **O quaternário costeiro da Ilha de São Francisco do Sul e arredores, nordeste do estado de Santa Catarina: aspectos geológicos, evolutivos e ambientais**. Tese de Doutorado. UFRGS, Porto Alegre. 283p, 1997.

HORN FILHO, N. O. Setorização da Província Costeira de Santa Catarina em base aos aspectos geológicos, geomorfológicos e geográficos. **Geosul**, v. 18, n. 35, p. 71-98, 2003.

HORN FILHO, N.O., FELIX, A., DE CAMARGO, J. **Atlas geológico da planície costeira do estado de Santa Catarina em base ao estudo dos depósitos quaternários (AGPCSC)**. 1ed. Florianópolis: Edições do Bosque. 331 p, 2020.

HOUSER, C., HAPKE, C., HAMILTON, S., S. Controls on coastal dune morphology, shoreline erosion and barrier island response to extreme storms. **Geomorphology**, v. 100, n. 3-4, p. 223-240, 2008.

KENDALL, C. G. ST. C., LERCHE, I. The rise and fall of eustasy. **Sea-Level Changes – An integrated Approach, SEPM Special Publications 42**, p. 3-17, 1988.

KLEIN A. H. F., SHORT A. D., BONETTI J. Santa Catarina beach systems. **Brazilian beach systems**, p. 465-506, 2016.

KUCHLE, J.; SCHERER, C. M. S. Sismoestratigrafia de bacias rifte: técnicas, métodos e sua aplicação na Bacia do Recôncavo. **Boletim de Geociências da PETROBRAS**, v. 18, n. 2, p. 33-60, 2010.

LI, S. *et al.* Earthquake-related soft-sediment deformation structures in Palaeogene on the continental shelf of the East China Sea. **Frontiers of Earth Science in China**, v. 2, p. 177-186, 2008.

LIU, J. P., MILLIMAN, J. D. Reconsidering melt-water pulses 1A and 1B: global impacts of rapid sea-level rise. **Journal of Ocean University of China**, v. 3, p. 183-190, 2004.

MACEDO, H. C., FIGUEIREDO JR, A. G. D., MACHADO, J. C. Propriedades acústicas (velocidade de propagação e coeficiente de atenuação) de sedimentos marinhos coletados nas proximidades da Ilha do Cabo Frio, RJ. **Revista brasileira de geofísica**, v. 27, p. 195-204, 2009.

MARTINS, J. L. Noções do método sísmico e de resolução sísmica. **RIBEIRO, HJPS, Estratigrafia de Sequências, métodos e aplicações**, p. 43-70, 2001.

MENDONÇA, F. Aquecimento global e saúde: uma perspectiva geográfica–notas introdutórias. **Terra Livre**, v. 1, n. 20, p. 205-221, 2003. Disponível em: <https://publicacoes.agb.org.br/terralivre/article/view/184>. Acesso em: 25 maio. 2024.

MITCHUM JR, R.M., VAIL, P.R., SANGREE, J.B. Seismic stratigraphy and Global Changes of Sea Level, Part 6: Stratigraphy Interpretation of Seismic Reflection Patterns in Deposition Sequences. **PAYTON, C.E. (Ed.). Seismic Stratigraphy – Applications to Hydrocarbons Explorations (Memoir # 26)**. Tulsa, AAPG, 117-133, 1977.

MIX, A. C., BARD, E., SCHNEIDER, R. Environmental processes of the ice age: land, oceans, glaciers (EPILOG). **Quaternary Science Reviews**, v. 20, n. 4, p. 627-657, 2001.

MORANG, A.; LARSON, R.; GORMAN, L. Monitoring the coastal environment; part III: geophysical and research methods. **Journal of Coastal Research**, p. 1064-1085, 1997.

OERTEL, G.F. The barrier island system. **Marine Geology**, v. 63, p. 1-18, 1985.

ORFORD, J.D., CARTER, R.W.G., JENNINGS, S.C. Simon C. Coarse clastic barrier environments: evolution and implications for Quaternary sea level interpretation. **Quaternary International**, v. 9, p. 87-104, 1991.

PARKINSON, R. W.; WADOWINSKI, S. A unified conceptual model of coastal response to accelerating sea level rise, Florida, USA. **Science of the Total Environment**, v. 892, p. 164448, 2023.

POPP, J. H. Introdução ao estudo da estratigrafia e da interpretação de ambientes de sedimentação. **Curitiba: Scientia et Labor. 323p**, 1987.

POSAMENTIER, H. W.; VAIL, P. R. Eustatic controls on clastic deposition II—sequence and systems tract models. **Sea-Level Changes: An Integrated Approach**. p 125-154, 1988.

POSAMENTIER, H. W. *et al.* Forced regressions in a sequence stratigraphic framework: concepts, examples, and exploration significance. **AAPG bulletin**, v. 76, n. 11, p. 1687-1709, 1992.

POSAMENTIER, H. W.; ALLEN, G. P. **Siliciclastic sequence stratigraphy—concepts and applications**. SEPM Society for Sedimentary Geology, 210p 1999.

SEVERIANO RIBEIRO, H. J. P. *et al.* Estratigrafia de Sequências – Fundamentos e Aplicações. São Leopoldo, Edunisinos, 428 p., 2001.

STONE, G.W., LIU, B., PEPPER, D.A., WANG, P., The importance of extratropical and tropical cyclones on the short-term evolution of barrier islands along the northern Gulf of Mexico, USA. **Marine Geology**, v. 210, n. 1-4, p. 63-78, 2004.

RIGOZO, N. R.; NORDEMANN, D.J.R. Análise por regressão iterativa de periodicidades em séries temporais de registros geofísicos. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 16, p. 149-158, 1998.

RODRIGUEZ, A. B.; ANDERSON, J. B.; SIMMS, A. R. Terrace inundation as an autocyclic mechanism for parasequence formation: Galveston Estuary, Texas, USA. **Journal of Sedimentary Research**, v. 75, n. 4, p. 608-620, 2005.

ROY, P. S. *et al.* Wave-dominated coasts. **Coastal evolution: Late Quaternary shoreline morphodynamics**, p. 121-186, 1994.

SANCEVERO, S. S., REMACRE, A. Z. , PORTUGAL, R. S. O papel da inversão para a impedância acústica no processo de caracterização sísmica de reservatórios. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 24, p. 495-512, 2006.

SOUZA, J. A. G. de. **Caracterização morfossedimentar da plataforma continental interna da enseada do pântano do sul, Ilha de santa Catarina, SC**. Dissertação de Mestrado, UFRGS, Porto Alegre. 100p, 2007.

SUGUIO, K. **Dicionário de geologia sedimentar e áreas afins**. 1998.

VAIL, P.R. Seismic stratigraphy interpretation using sequence stratigraphy: Part 1: Seismic stratigraphy interpretation procedure. **Atlas of Seismic Stratigraphy**. Tulsa, AAPG, 1987.

VAIL, P.R., MITCHUM, R.M.JR., THOMPSON, S. Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea Level, Part 3: Relative Changes of Sea Level from Coastal Onlap. **Seismic Stratigraphy – Applications to Hydrocarbon Exploration**. Tulsa, AAPG 1977.

VITAL, M. H. F. Aquecimento global: acordos internacionais, emissões de CO2 e o surgimento dos mercados de carbono no mundo. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 48 , p. [167]-244, 2018.

WESCHENFELDER, J. *et al.* Quaternary incised valleys in southern Brazil coastal zone. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 55, p. 83-93, 2014.

WESCHENFELDER, J. *et al.* Paleocanais como indicativo de eventos regressivos quaternários do nível do mar no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 26, p. 367-375, 2008.

WILDNER, W. *et al.* Mapa geológico do Estado de Santa Catarina. Porto Alegre: CPRM, 2014. Escala 1: 500.000. **Programa Geologia do Brasil. Subprograma de Cartografia Geológica Regional**. 2014.

ZECCHIN, M. *et al.* Sequence stratigraphic significance of tidal channel systems in a shallow lagoon (Venice, Italy). **The Holocene**, v. 24, n. 6, p. 646-658, 2014.

ANEXO A

Figura A.1 – Perfil A-A' completo sem interpretação

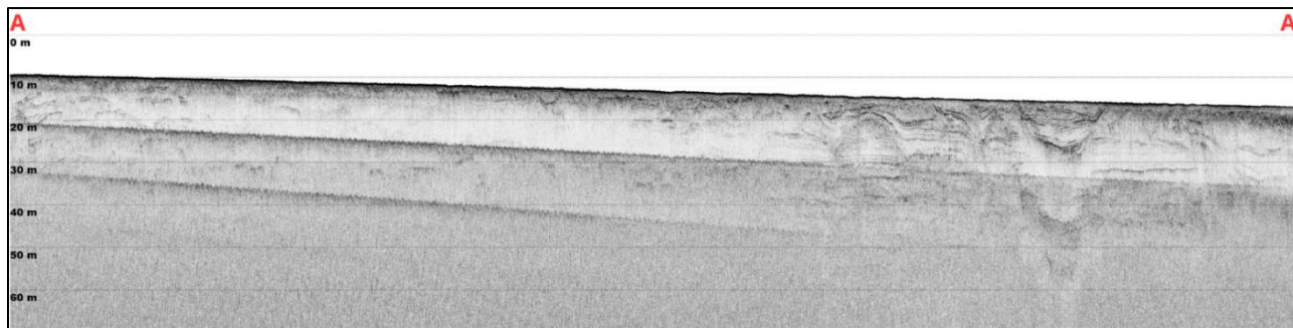


Figura A.2 – Perfil B-B' completo sem interpretação

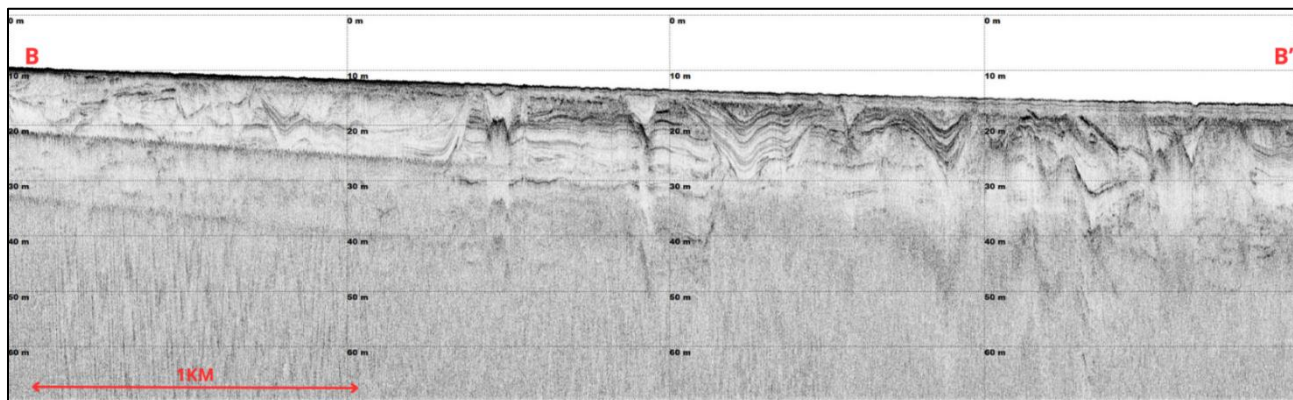


Figura A.3 – Perfil C-C' completo sem interpretação

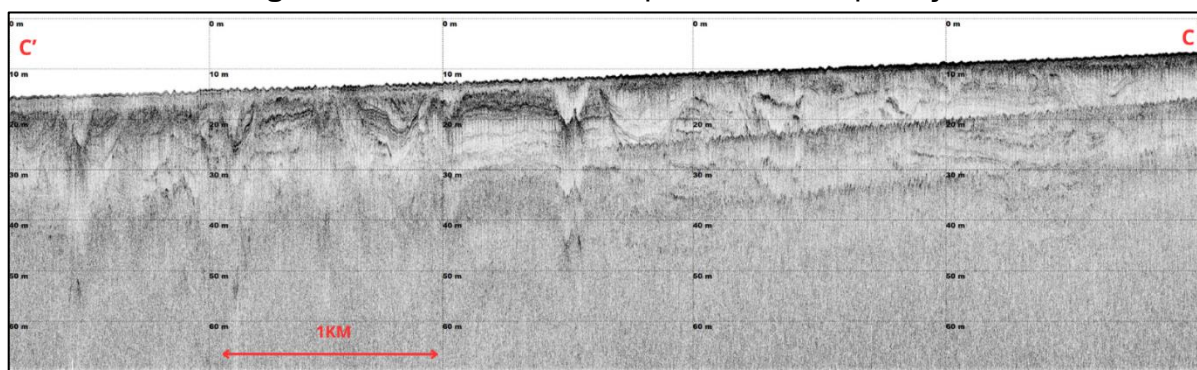


Figura A.4 – Perfil D-D' completo sem interpretação

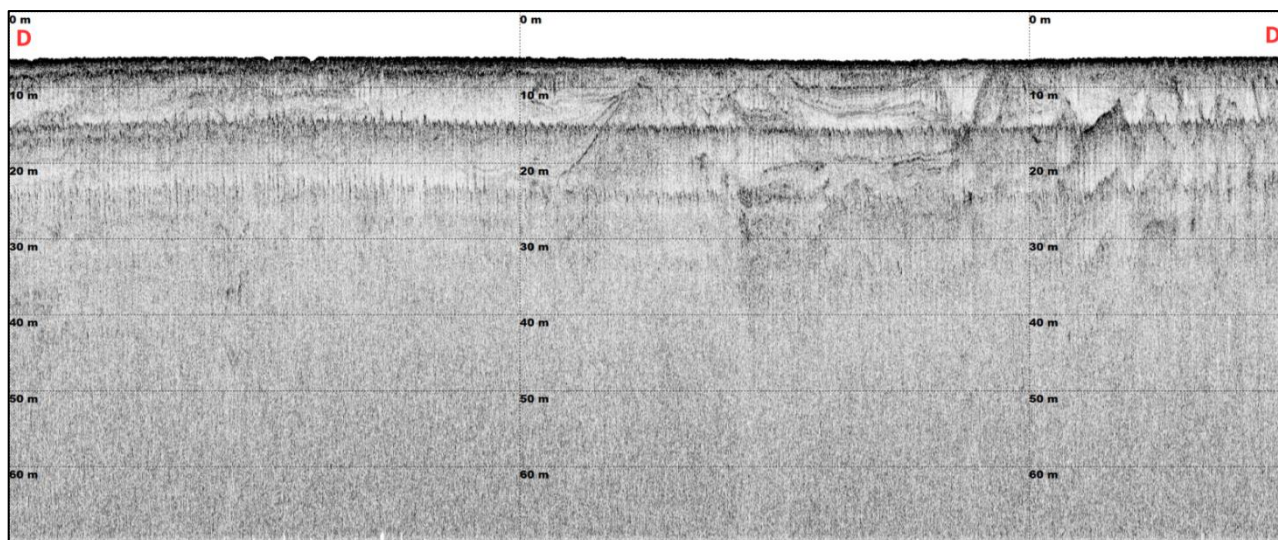


Figura A.5 – Perfil E-E' completo sem interpretação

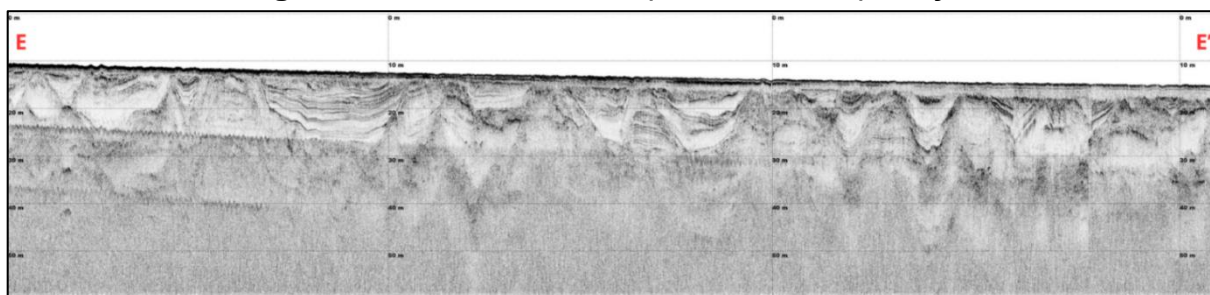


Figura A.6 – Imagem de Cooper em comparação com mesma unidade NA ENSEADA DE Porto Belo

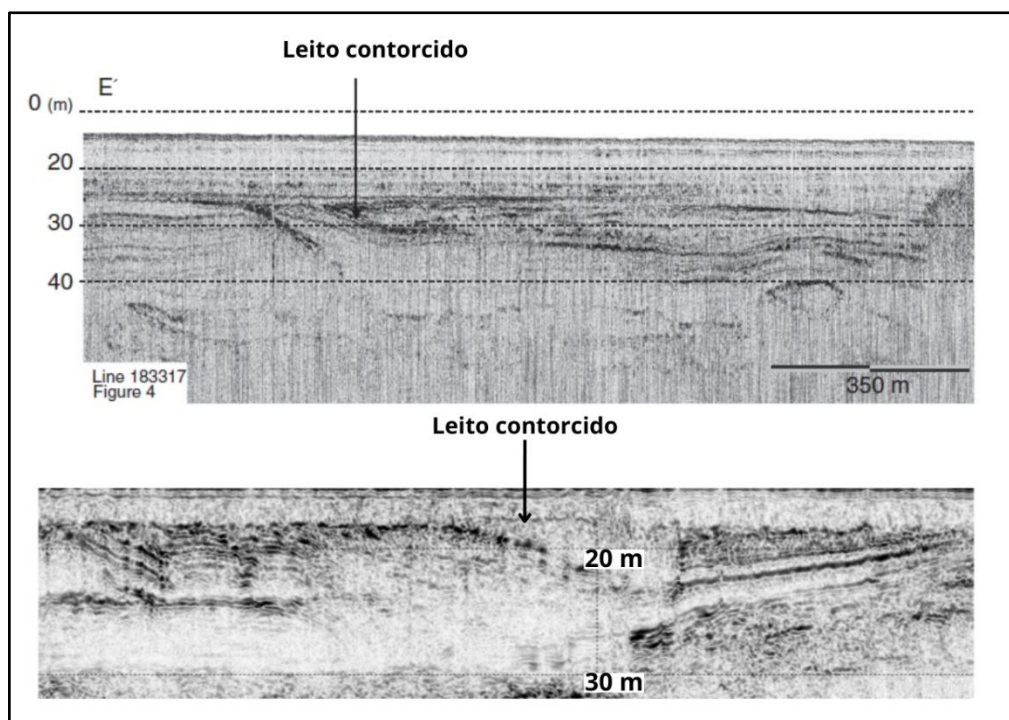
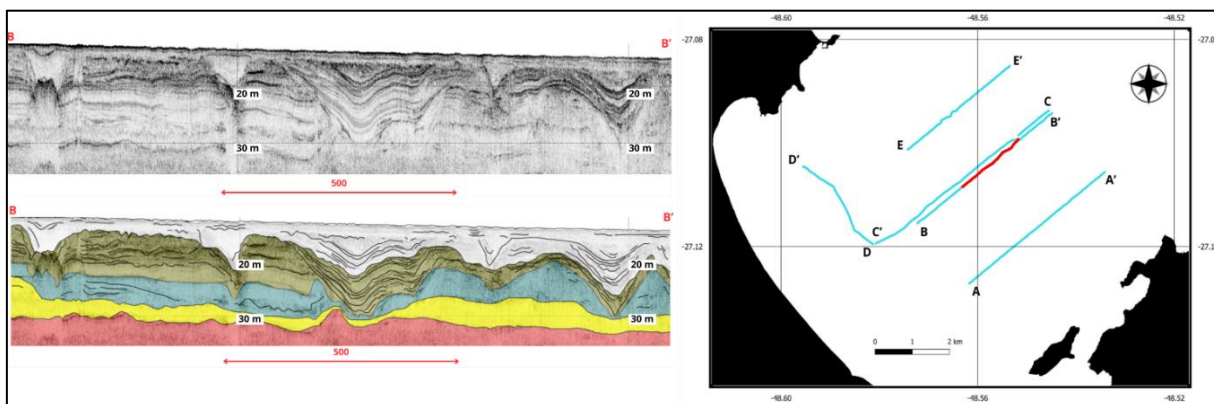
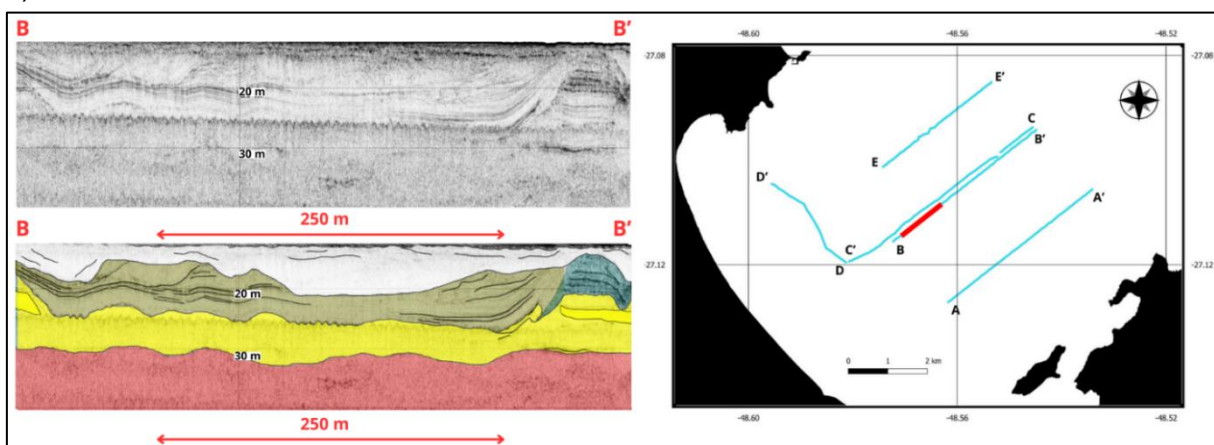


Figura A.7 – Perfis de truncamentos erosivos e sistemas lagunas-barreiras interpretados. Perfis a) B-B' b) B-B' c) C-C' d) D-D' e) E-E' f) E-E'

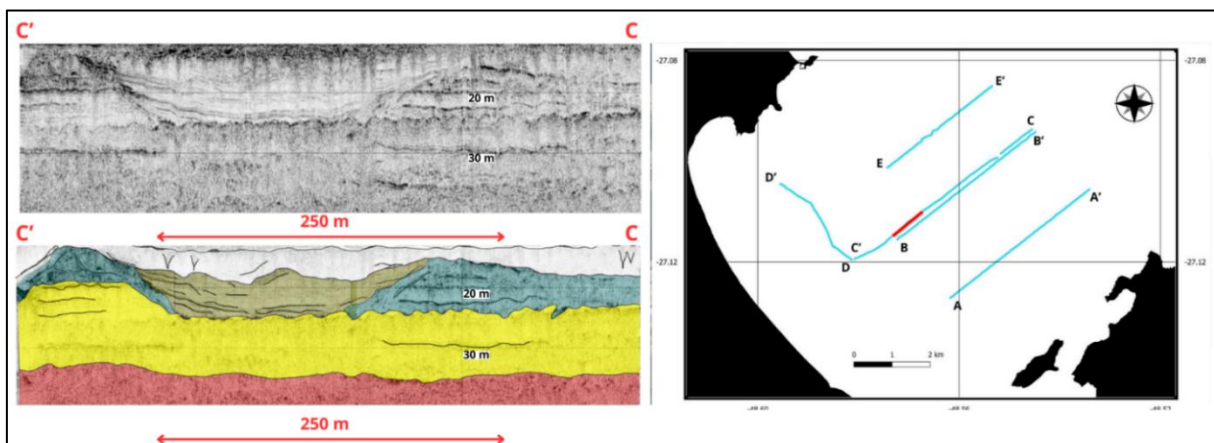
a)



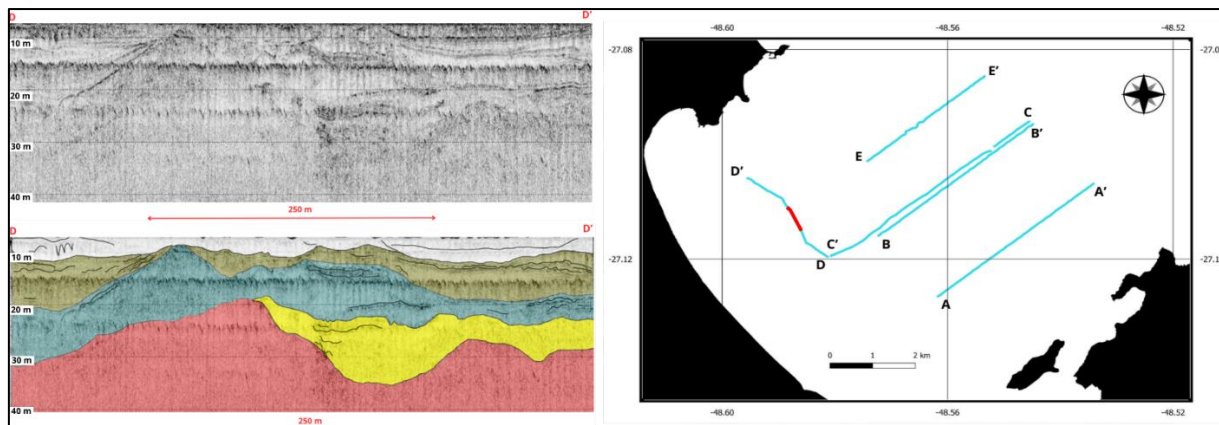
b)



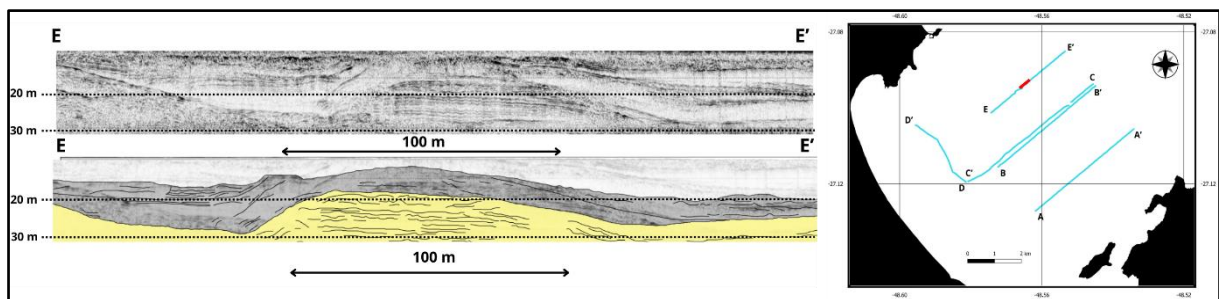
c)



d)



e)



f)

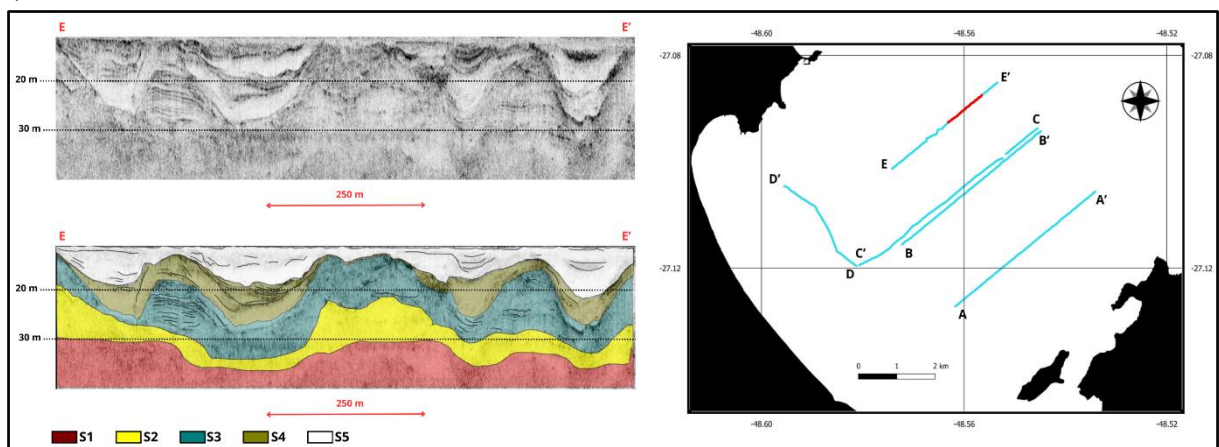


Figura A.8 – Paleocanais marcados

