

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA
CURSO DE GEOFÍSICA**

BRUNO GRECO PEREZ

**ANÁLISE DE ATRIBUTOS E CLUSTERIZAÇÃO POR K-MEANS DE DADOS DE
RADAR DE PENETRAÇÃO NO SOLO (GPR) DA PLANÍCIE COSTEIRA DO RIO
GRANDE DO SUL**

**Caçapava do Sul
2025**

BRUNO GRECO PEREZ

**ANÁLISE DE ATRIBUTOS E CLUSTERIZAÇÃO POR K-MEANS DE DADOS DE
RADAR DE PENETRAÇÃO NO SOLO (GPR) DA PLANÍCIE COSTEIRA DO RIO
GRANDE DO SUL**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Geofísica da
Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título
de Bacharel em Geofísica.

Orientador: Marcus Vinicius Aparecido
Gomes de Lima

Coorientador: Felipe Caron

**Caçapava do Sul
2025**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

P438a Perez, Bruno Greco

ANÁLISE DE ATRIBUTOS E CLUSTERIZAÇÃO POR K-MEANS DE DADOS
DE RADAR DE PENETRAÇÃO NO SOLO (GPR) DA PLANÍCIE COSTEIRA DO
RIO GRANDE DO SUL / Bruno Greco Perez.

72 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade
Federal do Pampa, GEOFÍSICA, 2025.

"Orientação: Marcus Vinicius Aparecido Gomes de Lima".

1. Georadar. 2. Geofísica Aplicada. 3. Aprendizagem de
Máquina. 4. Atributos Instantâneos. 5. Atributos Texturais. I.
Título.

BRUNO GRECO PEREZ

**ANÁLISE DE ATRIBUTOS E CLUSTERIZAÇÃO POR K-MEANS DE DADOS DE RADAR DE
PENETRAÇÃO NO SOLO (GPR) DA PLANÍCIE COSTEIRA DO RIO GRANDE DO SUL**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Geofísica da
Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do
Título de Bacharel em Geofísica.

Projeto de TCC defendido e aprovado em 10 de dezembro de 2025.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Marcus Vinicius Aparecido Gomes de Lima
Orientador
UNIPAMPA

Prof. Dr. Everton Frigo
UNIPAMPA

Prof. Dr. Welitom Rodrigues Borges
UnB



Assinado eletronicamente por **MARCUS VINICIUS APARECIDO GOMES DE LIMA**,
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR, em 18/12/2025, às 16:33, conforme horário oficial de
Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **EVERTON FRIGO**, **PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**,
em 18/12/2025, às 16:49, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais
aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site
[https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?
acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0](https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1933328** e o
código CRC **35379835**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família, minha mãe Maria de Fatima Greco Ferreira, meu pai o Eduardo Tolozana Perez, meu irmão Lucas Greco Ferreira e meu padrasto Celso Evandro Dutra Ferreira, por todo apoio e incentivo ao longo da minha graduação.

Agradeço aos mestres que me guiaram e que foram pacientes até demais comigo, Marcus Vinicius Aparecido Gomes de Lima e Felipe Caron. Este TCC seria completamente diferente se não fosse por vocês ou, até mesmo, poderia nem existir.

Agradeço aos professores que me moldaram ao longo da graduação, com destaque ao Ezequiel Galvão de Souza, Everton Frigo, Miguel Guterres Carminatti, Leugim Corteze Romio e Igor Antonio Cancela Melnik. Com menções honrosas à Angela Maria Hartmann e ao Giuseppe Betino de Toni, que tive a oportunidade de conhecê-los melhor no final da graduação.

Um agradecimento especial à professora Daniele Pantoja Monteiro, pelos apontamentos e auxílio no projeto do TCC, principalmente para estrutura e formatação do trabalho,

Agradeço aos técnicos Lenon Ilha de Melo, Sissa Kumaira, Marcelo Lusa e aos funcionários da UNIPAMPA, pela parceria e os bons momentos compartilhados.

Gratidão aos colegas que trilharam esse caminho comigo: Ana Naujokat, Frederick Karnal, Marcos Freire, Alex dos Santos, Lara Beatriz, Eduarda Fumagalli, Emilly Carneiro, Guilherme Diadosk, Lucas Barros, Edu Rockenbach, João Marcos Lobato, Roberto Umemura, João Lorenz, André Luan Rodrigues, José Carlos Neto, Alisson Souza e Felipe Batistelli. Tem muita gente para lembrar e a lista não tem grau de importância!

Gratidão à dGB *Earth Sciences* pela disponibilização da licença acadêmica do OpendTect ao LASG para execução do TCC.

Agradeço a UNIPAMPA pela estrutura e o suporte disponibilizado para a realização da minha graduação.

*"All I ever wanted, all I ever needed
Is here in my arms
Words are very unnecessary
They can only do harm"*

Depeche Mode

RESUMO

O radar de penetração no solo (GPR) é um método geofísico eletromagnético capaz de fazer um imageamento da subsuperfície, por meio da emissão de ondas de rádio. Entre as aplicações do método, o seu uso em sistemas deposicionais costeiros presentes na Planície Costeira do Rio Grande Sul, especialmente a barreira holocênica. A sua importância está relacionada com a sua capacidade em extrair informações sedimentológicas e estratigráficas, como padrões de empilhamento e geometria deposicional. Uma alternativa para aprimorar a interpretação é a aplicação de atributos, que atuam como filtros de realce e destacam diferentes características do dado que, inicialmente, podem ou não estarem claras, como continuidade, geometria e terminações de refletores. Este trabalho propõe uma nova abordagem aos dados de GPR, utilizando atributos instantâneos e texturais para analisar, de forma qualitativa e quantitativa, quais características foram realçadas e fazendo a integração dos diferentes atributos através da clusterização por *K-means*. O resultado dos atributos mostrou que a informação realçada está diretamente associada com a geometria e continuidade dos refletores, com um destaque ao cosseno da fase instantânea e ao contraste em deixar mais evidente as terminações. Foram geradas duas seções através clusterização do *K-means*, com 5 grupos definido pela regra do cotovelo, com uma delas apresentando uma forte tendência da classificação causada pelo cosseno da fase instantânea. Por conta disso, uma segunda seção classificada foi obtida através da remoção deste atributo e utilizando o valor absoluto do dado processado. Através do *K-means*, a combinação da resposta entre os diferentes atributos permitiu uma visualização mais limpa do dado, revelando não apenas aspectos geométricos dos refletores, mas também com variações de amplitude preservadas.

Palavras-chave: Georadar, Geofísica Aplicada, Aprendizagem de Máquina, Atributos Instantâneos, Atributos Texturais.

ABSTRACT

Ground Penetrating Radar (GPR) is an electromagnetic geophysical method capable of imaging the subsurface through the emission of radio waves. Among the method's applications is its use in coastal depositional systems present in the Rio Grande do Sul Coastal Plain, particularly the Holocene barrier. Its importance is related to its ability to extract sedimentological and stratigraphic information, such as stacking patterns and depositional geometry. An alternative for enhancing interpretation is the application of attributes, which act as enhancement filters and highlight different characteristics of the data that may not initially be clear, such as the continuity, geometry, and terminations of reflectors. This study proposes a new approach to GPR data, utilizing instantaneous and textural attributes for a qualitative and quantitative analysis of the enhanced features. Furthermore, it integrates the different attributes through K-means clustering. The results from the attributes demonstrated that the enhanced information is directly associated with the geometry and continuity of the reflectors, with a particular emphasis on the instantaneous phase cosine and the contrast attribute for highlighting terminations. The combined response across the different attributes allowed for a cleaner visualization of the data through the groups generated by K-means, revealing not only the geometric aspects of the reflectors but also preserving amplitude variations.

Keywords: Georadar, Applied Geophysics, Machine Learning, Instantaneous Attribute, Textural Attributes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa geológico da Planície Costeira do Rio Grande do Sul. O mapa a) é a localização da PCRS e b) a visualização em planta dos diferentes sistemas deposicionais presentes. Em c), a seção geológica no perfil A-A'.	22
Figura 2 – Mapa Geológico da PCRS, com ênfase nos diferentes padrões de empilhamento e morfologias presentes ao longo de toda a barreira holocênica.....	23
Figura 3 – Ilustração de uma atenuação exponencial da onda eletromagnética ao se propagar em um meio que há baixa atenuação.	26
Figura 4 – Os diferentes arranjos de aquisição presentes na geofísica de reflexão.	28
Figura 5 – Ilustração do conceito de um traço passando pelo filtro Dewow. A linha em vermelho indica a componente de baixa frequência presente no dado, enquanto a linha em azul representa um exemplo de traço de um radargrama.	30
Figura 6 – Fluxograma de processamento dos dados, realizado no software ReflexW, indicando todos os filtros utilizados e o critério para averiguar se foram corretamente aplicados.	34
Figura 7 – Ilustração do Traço Complexo (ou analítico) formado pela combinação da componente real e de quadratura.	37
Figura 8 – Problema dos limites da imagem ilustrado em duas situações, com uma imagem de 10x10 em pixels para ambos os casos. Os pixels preenchidos por amarelo são aqueles que possuem valor de textura calculado, enquanto os que estão sem preenchimento estão sem preenchimento estão sem valores	39
Figura 9 – Direções possíveis em que são mapeadas para a GLCM no caso bidimensional.	39
Figura 10 – Mapa de localização do Perfil 046, situado no município de Santa Vitória do Palmar.....	41
Figura 11 – Ilustração da aplicação do filtro F-K no Perfil 046 com o parâmetro plotscale igual a 1. As setas indicam as posições de ruídos lineares presentes nas porções de alta ou total atenuação do sinal.	45
Figura 12 – Ilustração da aplicação da migração topográfica no Perfil 046, mostrando as discontinuidades verticais de amplitude ao longo do dado e a correção realizada pelo filtro.....	47
Figura 13 – Resultado do perfil 046, após a aplicação de todos os filtros apresentados no fluxograma de processamento.....	49
Figura 14 – Radarfácies de um perfil GPR de 200 MHz de frequência central, mostrando um comparativo das radarfácies mapeadas com as suas respectivas respostas em cada atributo. Todas as imagens estão na mesma paleta de cor.	49
Figura 15 – Resultado do atributo instantâneo envelope aplicado no perfil 046.	52
Figura 16 – Resultado do atributo instantâneo cosseno da fase instantânea aplicado no perfil 046.....	52

Figura 17 – Resultado do atributo instantâneo frequência instantânea aplicado no perfil 046.....	53
Figura 18 – Resultado do atributo textural energia aplicado no perfil 046.....	55
Figura 19 – Resultado do atributo textural entropia aplicado no perfil 046.....	55
Figura 20 – Resultado do atributo textural contraste aplicado no perfil 046.....	56
Figura 21 – Resultado do atributo textural homogeneidade aplicado no perfil 046. ..	56
Figura 22 – Gráficos KDE do perfil 046 e de seus atributos. (a) perfil processado, (b) envelope, (c) cosseno da fase instantânea, (d) frequência instantânea, (e) energia, (f) entropia, (g) contraste e (h) homogeneidade.	57
Figura 23 – Gráfico utilizado para a regra do cotovelo, determinando o número de grupos ideal para ponto de inflexão da variação da dispersão dos pontos.	59
Figura 24 – Perfil 046 classificado em 5 grupos pelo algoritmo K-means, com o perfil processado, os atributos instantâneos e os texturais.	61
Figura 25 – Perfil 046 classificado em 5 grupos pelo K-means, utilizando o valor absoluto do perfil processado e os atributos, com exceção do cosseno da fase instantânea.	61
Figura 26 – Gráficos KDE com a densidade dos valores do perfil processado, dos atributos instantâneos e texturais que foram utilizados para cada classe do K-means.	62
Figura 27 – Gráficos KDE com a densidade e os valores absolutos do perfil processado, dos atributos instantâneos e texturais que foram utilizados para cada classe do K-means.	63

LISTA DE SIGLAS

AGC – *Automatic Gain Control*

CMP – *Common Mid-Point*

GLCM – *Gray-Level Co-occurrence Matrix*

GPR – *Ground Penetrating Radar*

NE – Nordeste

PCRS – Planície Costeira do Rio Grande do Sul

S – Sul

SW – Sudoeste

TWT – *Two-Way Travel time*

WCSS – *Within-Cluster Sum of Squares*

LISTA DE SÍMBOLOS

$\vec{\nabla}$ – operador gradiente

$\vec{\nabla} \cdot$ – operador divergente

$\vec{\nabla} \times$ – operador rotacional

∂ – 1ª derivada parcial

∂^2 – 2ª derivada parcial

d – 1ª derivada ordinária

t – tempo

$\vec{B}$ – vetor de densidade de fluxo magnético

$\vec{E}$ – vetor do campo elétrico

$\vec{D}$ – vetor de deslocamento elétrico

$\vec{J}$ – vetor de densidade de corrente elétrica

$\vec{H}$ – vetor de intensidade do campo magnético

ρ – densidade de carga elétrica

σ – condutividade elétrica

ε – permissividade dielétrica

μ – permeabilidade magnética

Y – traço de quadratura

P – valor principal de Cauchy

τ – tempo

X – traço real

Z – traço complexo

i – número imaginário ou de quadratura

θ – fase instantânea

a – amplitude instantânea

ω – frequência instância

$P_{i,j}$ – elemento da GLCM, em que i e j representam, respectivamente, a linha e coluna

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS.....	16
2.1	Objetivo Geral	16
2.2	Objetivos Específicos	16
3	JUSTIFICATIVA.....	17
4	ÁREA DE ESTUDO	18
4.1	Barreiras Costeiras	18
4.1.1	Fatores Controladores	19
4.1.2	Classificação de Barreiras Costeiras	20
4.2	A Barreira Holocênica	21
5	MATERIAIS E MÉTODOS	24
5.1	Radar de Penetração no Solo.....	24
5.1.1	Propagação de Ondas Eletromagnéticas.....	25
5.1.2	Sistema GPR.....	26
5.1.3	Técnicas de Aquisição.....	27
5.1.4	Relação Sinal-Ruído.....	28
5.1.5	Técnicas de Processamento	29
5.1.5.1	<i>Dewow</i>	29
5.1.5.2	Remoção do Tempo Zero	30
5.1.5.3	Remoção de <i>Background</i>	30
5.1.5.4	Ganho	31
5.1.5.5	Filtros Trapezoidais.....	31
5.1.5.6	Filtro F-K	32
5.1.5.7	Migração e Correção Topográfica.....	32
5.2	Atributo GPR.....	35
5.2.1	Atributos Instantâneos	36
5.2.2	Atributos Texturais.....	37
5.3	Dados Utilizados.....	41
5.4	Clusterização por <i>K-means</i>	42
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
6.1	Cálculo dos Atributos	44
6.2	Atributos Instantâneos	50
6.3	Atributos Texturais.....	54
6.4	<i>K-means</i>	58

7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	64
	REFERÊNCIAS.....	66
	APÊNDICE.....	75

1 INTRODUÇÃO

A geofísica é a ciência que estuda as características e os fenômenos físicos que ocorrem no interior e no entorno da Terra. Para isso, ela utiliza métodos indiretos para a investigação da subsuperfície, medindo variações dos campos físicos resultantes do contraste das propriedades físicas presentes no meio geológico (Telford; Geldart; Sheriff, 1990). Entre os diferentes métodos, o radar de penetração no solo (*Ground Penetrating Radar*, GPR) destaca-se como um método eletromagnético que utiliza ondas de rádio para imagear a subsuperfície, oferecendo uma forma de investigação das condições geológicas e objetos enterrados.

O resultado de uma aquisição de dados de GPR é uma seção composta por diversos traços, que são medidas do tempo de percurso duplo (*Two-Way Travel time*, TWT) da onda eletromagnética em uma posição em superfície. No entanto, para que o perfil seja interpretável, é necessário o processamento dos dados para remover ruídos e gerar uma imagem final representativa do meio geológico (Daniels, 2004).

Além das correções básicas aplicadas aos dados, uma forma de complementar à interpretação usual é a utilização de atributos GPR (Koyan, 2024). Segundo Chopra e Marfurt (2007), um atributo é qualquer medida obtida do dado que ajude a realçar visualmente ou melhorar a caracterização de feições de interesse. Atributos GPR vêm sendo cada vez mais utilizados para realçar feições e aprimorar a interpretação dos dados, principalmente nas áreas da sedimentologia (Castro *et al.*, 2014; Dantas, 2020; Forte *et al.*, 2012; Koyan, 2024; Silva Júnior, 2021; Zhao *et al.*, 2018), arqueologia (Abdulrazzaq; Thabit; Al-khafaji, 2021; Zhao; Forte; Pipan, 2016), glaciologia (Gutgesell e Forte, 2024; Zhao *et al.*, 2016) e em estudos do solo (Catakli; Mahdi; Al-shukri, 2011; Prado *et al.*, 2011), com destaque especial para atributos instantâneos e texturais.

Entre as aplicações do GPR, o seu uso em ambientes sedimentares costeiros é bem descrito na literatura, principalmente para obter informações sedimentológicas ou estratigráficas (Bristow e Jol, 2003; Jol, 2009; Neal, 2004). Em geral, a alta resistividade da areia da praia ou do campo de dunas costeiro permite uma boa profundidade de investigação (geralmente, acima de 10 metros), além de que as estruturas sedimentares de maior escala podem ser claramente observadas nos perfis de GPR (Bristow; Pugh; Goodall, 1996; Caron, 2014; Dantas, 2020).

A costa brasileira apresenta uma diversidade de sistemas deposicionais que formaram-se ao longo do Quaternário pelas mudanças no clima (precipitação e velocidade do vento) e do nível do mar, com um destaque aos sistemas laguna-barreira da Planície Costeira Rio Grande do Sul (PCRS), três deles pleistocênicos e um holocênico (Dillenburg e Hesp, 2009). Nos últimos 15 anos, o uso do método GPR na PCRS tornou-se relevante pela capacidade de imagear em alta resolução esses sistemas deposicionais, permitindo a visualização de geometrias deposicionais e a estratigrafia desses sistemas costeiros, com um destaque para barreira holocênica (Barboza *et al.*, 2009, 2011, 2021; Bitencourt *et al.*, 2020; Dillenburg e Barboza, 2014; Dillenburg *et al.*, 2024; Leandro *et al.*, 2019; Lima *et al.*, 2013; Lopes *et al.*, 2024; Rosa *et al.*, 2017, Watanabe *et al.*, 2023; Watanabe; Barboza; Hesp, 2025).

O método tem como importância nesse tipo de contexto, principalmente, para mapear a geometria deposicional e os padrões de empilhamento, características importantes associadas que variam ao longo da costa, além de que estão associados com a evolução costeira (fatores controladores autogênicos) e a interação com fatores alogênicos, como a variação nível de base (Bitencourt *et al.*, 2020, Rosa *et al.*, 2017, Watanabe *et al.*, 2023).

Este trabalho tem como proposta a análise de atributos texturais e instantâneos em dados GPR em uma porção da barreira holocênica da PCRS, situada no município de Santa Vitória do Palmar, extremo sul do litoral do Rio Grande do Sul, com controle geológico através de testemunho de sondagem. Análise foi feita com uma abordagem qualitativa e quantitativa, averiguando a resposta individual de cada atributo em relação às características dos atributos que impactam na interpretação e, através da clusterização por *K-means*, integrando esses atributos em uma única seção para validar a sua interpretabilidade conjunta.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Aplicar atributos texturais e instantâneos em perfis de GPR a fim de realçar feições sedimentares e estratigráficas da barreira holocênica da região costeira da PCRS, em uma porção com padrão de empilhamento retrogradacional.

2.2 Objetivos Específicos

- I) Caracterizar e selecionar os principais atributos texturais e instantâneos citados na literatura, de modo a definir se são efetivos na visualização de feições de interesse dos dados de GPR.
- II) Realizar uma análise qualitativa dos atributos, averiguando como eles se comportam em um contexto geológico sedimentar costeiro, com padrão de empilhamento retrogradacional.
- III) Realizar uma avaliação quantitativa por meio do algoritmo *K-means*, de tal maneira que seja possível integrar de forma semi-automática a resposta dos atributos junto ao dado processado.
- IV) Validar a utilização de atributos texturais e instantâneos em um contexto sedimentar costeiro, utilizando as abordagens qualitativa e quantitativa, ao mostrar a melhora na interpretabilidade do dado.

3 JUSTIFICATIVA

O GPR é um método geofísico capaz de mapear objetos enterrados e estruturas geológicas em alta resolução, em contextos geológicos em que não há tanta atenuação do sinal eletromagnético (Jol, 2009). No entanto, mesmo em condições favoráveis à aplicação do método, a interpretação de uma seção GPR depende da visualização nítida das feições presentes. Uma alternativa é a análise de atributos, que permite uma melhor clareza nos dados através do realce de terminações e a geometria dos refletores, impactando diretamente na interpretação (Castro *et al.*, 2014; Dantas, 2020; Koyan, 2024).

Essa análise pode ser feita tanto de forma qualitativa, analisando individualmente cada atributo em relação ao dado processado, quanto de maneira quantitativa, através da clusterização por *K-means* para identificar padrões a partir da resposta de diferentes atributos (Forte *et al.*, 2012). A proposta deste trabalho é a utilização de atributos instantâneos e texturais, em dados GPR adquiridos na barreira holocênica da PCRS com um padrão de empilhamento retrogradacional, localizada no município de Santa Vitória do Palmar, Rio Grande do Sul, Brasil.

Os atributos foram testados para demonstrar a capacidade em realçar feições como: i) terminações, geometria e continuidade de refletores, ii) novas abordagens para interpretação através da análise do traço complexo e de textura do radargrama.

4 ÁREA DE ESTUDO

4.1 Barreiras Costeiras

A costa brasileira apresenta uma diversidade de sistemas deposicionais que desenvolveram-se ao longo do Quaternário, devido às mudanças no clima (precipitação e velocidade do vento) e do nível do mar, as quais permitiram o desenvolvimento de elementos morfológicos como barreiras costeiras, planícies de maré, *wetlands* e campos de dunas costeiras (Dillenburg e Hesp, 2009). As barreiras costeiras são uma importante feição geomorfológica de costas dominadas por onda com baixo gradiente, ocorrendo em margens passivas quando, geralmente, há uma topografia mais suave e abundância de sedimentos.

Segundo Reison (1992), um sistema laguna-barreira é composto por três elementos geomorfológicos: o sistema barreira, o sistema lagunar e um canal de ligação (entre a laguna e o mar). Há um consenso que uma barreira costeira é uma estrutura paralela à costa, formada pelo acúmulo de areia, cascalho, conchas e pequenas quantidades de matéria orgânica, devido à ação das ondas, marés e ventos (Dillenburg e Hesp, 2009).

No Rio Grande do Sul, barreiras costeiras e os leques aluviais são os principais sistemas deposicionais da PCRS, sendo uma feição fisiográfica que corresponde à porção *onshore* da Bacia de Pelotas (Figura 1b). Os depósitos mais recentes desta bacia são, predominantemente, de leques aluviais na base e de 4 sistemas deposicionais laguna-barreira (Rosa *et al.* 2017). Durante o Quaternário Tardio (*Late Quaternary*, últimos 350 ka), a formação desses sistemas deposicionais laguna-barreira está associada com 4 ascensões do nível do mar (Figura 1c), em que apenas um desses ambientes sedimentares ocorre no Holoceno (Villwock *et al.*, 1986).

Barreiras costeiras são um sistema deposicional muito importante na PCRS, principalmente quando se trata de deposição e estruturas geomorfológicas. Desde os anos 2000, a barreira holocênica recebeu mais atenção dos estudos de geologia costeira a respeito de suas características e evolução, retratando suas mudanças morfológicas e distintos padrões de empilhamento (Caron, 2014; Dillenburg *et al.*, 2000; Dillenburg; Tomazelli; Barboza, 2004; Hesp *et al.*, 2005; Martinho, 2008; Toldo Jr *et al.*, 2000; Tomazelli; Dillenburg; Villwock, 2000).

4.1.1 Fatores Controladores

Há uma série de fatores que determinam as características de barreiras costeiras, como o comportamento do nível do mar, topografia antecedente (ou morfologia do substrato), a disponibilidade de sedimento (principalmente, areia), ondas, marés e ventos. Os fatores primários como gradiente do substrato, sedimentos e ondas vão formar a praia. Fatores secundários, como marés e ventos, modificam o modelo básico, abrindo enseadas e formando dunas (Dillenburg e Hesp, 2009).

Em margens passivas, o comportamento do nível do mar é um fator muito importante na evolução de barreiras em costas dominadas por onda, pois, quando há uma ascensão ou queda do nível do mar, essa variação afeta diretamente as suas características morfológicas e estratigráficas. Contudo, quando as mudanças do nível do mar são baixas ou quando há uma estabilidade dele, a evolução da barreira e a sua classificação depende mais do aporte sedimentar (Roy *et al.*, 1994).

Barreiras são formadas, principalmente, por areia, embora exista a possibilidade de haver a presença de cascalho junto a areia ou ocorrer uma dominância do cascalho, em situações de barreiras de latitudes média a altas. No entanto, esses sedimentos mais grossos estão associados com o retrabalhamento de sedimentos glaciais durante a Transgressão Marinha Pós-glacial (Dillenburg e Hesp, 2009). A disponibilidade de sedimento é crucial para o desenvolvimento das barreiras, que geralmente vem da plataforma continental, da erosão e retrabalhamento de morfologias costeiras próximas, de sistemas fluviais ou produção de carbonatos *in situ* (Dillenburg e Hesp, 2009).

Ondas são um fator controlador crítico na formação das barreiras, afetando tanto no aporte sedimentar quanto no desenvolvimento da barreira. As diferenças de energia, altura e o ângulo de incidência das ondas ao longo da costa determina algumas características da barreira, afetando o aporte sedimentar e a formação de dunas. Diferentes energias de ondas podem determinar a disponibilidade de sedimentos, fazendo com que coexistam na mesma costa barreiras com diferentes padrões de empilhamento (Dillenburg e Hesp, 2009).

4.1.2 Classificação de Barreiras Costeiras

De acordo com Martinho (2008) e Bitencourt *et al.* (2020), existem termos e definições para a classificação de sistemas costeiros, que serão adotados e estarão detalhados neste parágrafo. Barreiras costeiras são classificadas pelo seu padrão de empilhamento (progradacional, agradacional e retrogradacional) ou movimento da linha de costa (regressão ou transgressão). De acordo com Curray (1964), a transgressão é o movimento da linha de costa com sentido para o continente, enquanto a regressão é o movimento da linha de costa com sentido para o mar. Ambas as definições estão estritamente relacionadas à migração da linha de costa, em que estes termos não necessariamente estão ligados apenas ao nível relativo do mar (NRM). Os termos progradacional, agradacional e retrogradacional são termos que se referem ao preenchimento sedimentar e arquitetura estratigráfica, sendo um reflexo das variações na criação do espaço de acomodação da bacia *versus* o suprimento sedimentar, em um período de tempo especificado (Posamentier *et al.*, 1988; Catuneanu, 2006).

Morton (1994) classificou as barreiras costeiras pelo seu padrão de empilhamento, portanto, podemos ter barreiras progradacionais, retrogradacionais e agradacionais. As barreiras que são progradacionais são aquelas que migram em direção ao oceano, devido ao seu aporte sedimentar bem expressivo e/ou queda do NRM. Elas apresentam uma linha de costa ligeiramente côncava, com cordões litorâneos sendo as feições geomorfológicas predominantes (*beach ridges* ou *foredunes ridges*) ou campo de dunas costeiras.

As barreiras retrogradacionais são aquelas que migraram em direção ao continente durante o Holoceno, por conta de pequenas ascensões no nível do mar ou baixo aporte sedimentar. Geralmente, estão situadas em regiões em que a linha de costa é um pouco convexa e com concentração de energia das ondas, que potencializa a erosão.

Barreiras agradacionais são um meio termo, em que não houve uma migração expressiva tanto para o continente quanto para o oceano, sendo caracterizadas pelo equilíbrio entre progradação e retrogradação. Portanto, elas tratam-se de um equilíbrio entre aporte sedimentar e a criação do espaço de acomodação.

4.2 A Barreira Holocênica

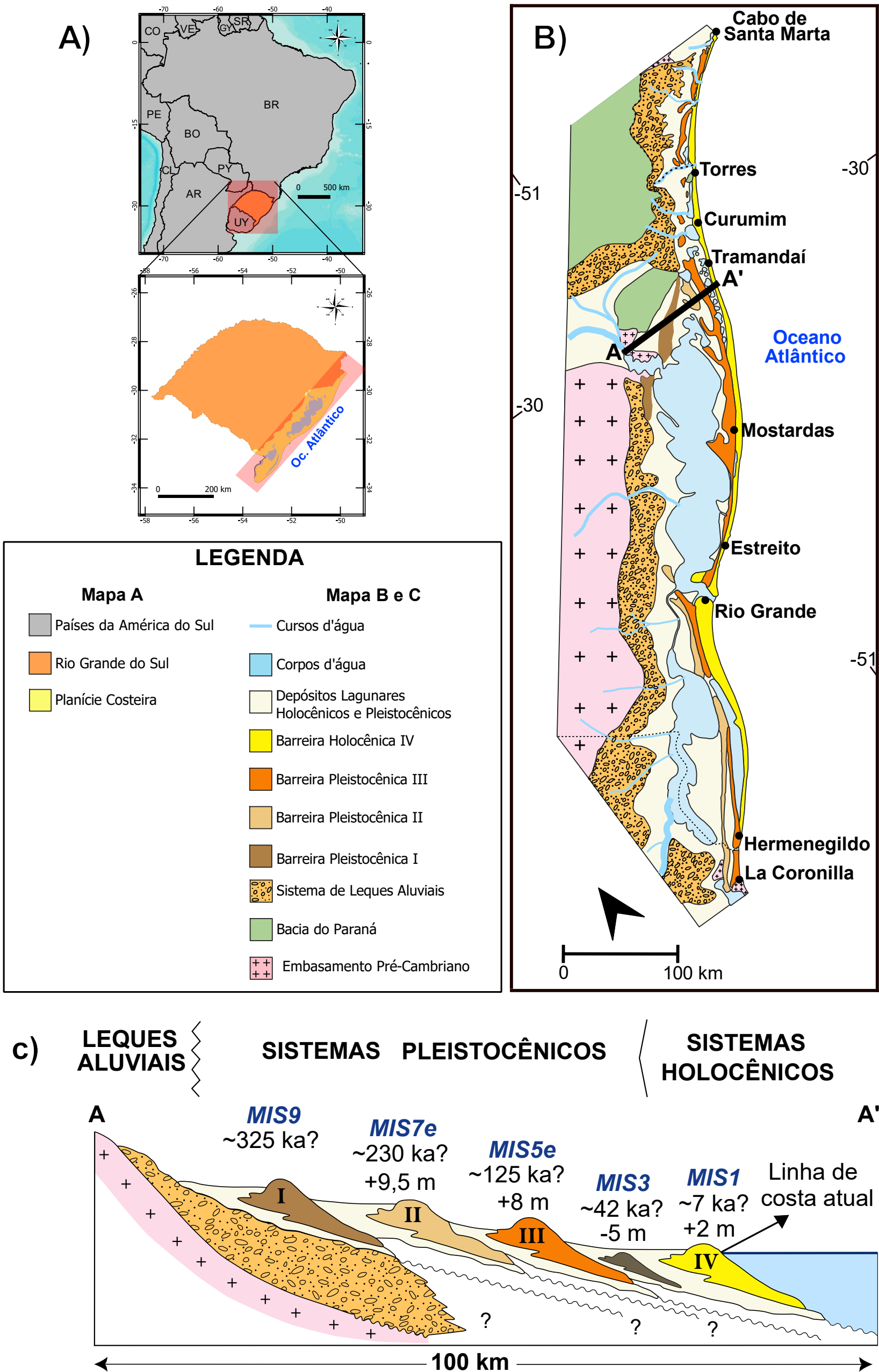
A barreira holocênica (ou barreira IV) no Rio Grande do Sul ocupa toda a extensão da costa, havendo algumas descontinuidades associadas à canais de conexão de uma lagoa com o mar, e que permanecem abertos devido a grande quantidade de descarga de água. A barreira IV se originou aproximadamente há 7 ka e continua ativa até os dias atuais, a partir da migração de uma barreira transgressiva durante os estágios finais da Transgressão Marinha Pós-Glacial, isolando grandes corpos lagunares que foram segmentados durante o rebaixamento do nível do mar, após 5 ka antes do presente (Dillenburg *et al.*, 2009).

Os sedimentos holocênicos são dominados por areia quartzosa com granulometria entre fina a média (depósitos da barreira costeira), além de sedimentos lagunares que envolvem areias quartzosas (de fina a média) com lama. Algumas exceções locais incluem a grande quantidade de sedimentos biogênicos de carbonato de cálcio (conchas e detritos de conchas), na parte mais ao sul do litoral do estado (Dillenburg *et al.*, 2009).

O vento é um fator controlador presente ao longo da barreira holocênica, sendo que os do quadrante NE são dominantes, especialmente entre setembro até março, enquanto em outros meses os ventos de S e SW são mais dominantes (Dillenburg *et al.*, 2009). No entanto, o regime dos ventos não é homogêneo por todo o litoral, com influência tanto do planalto quanto da orientação da linha de costa.

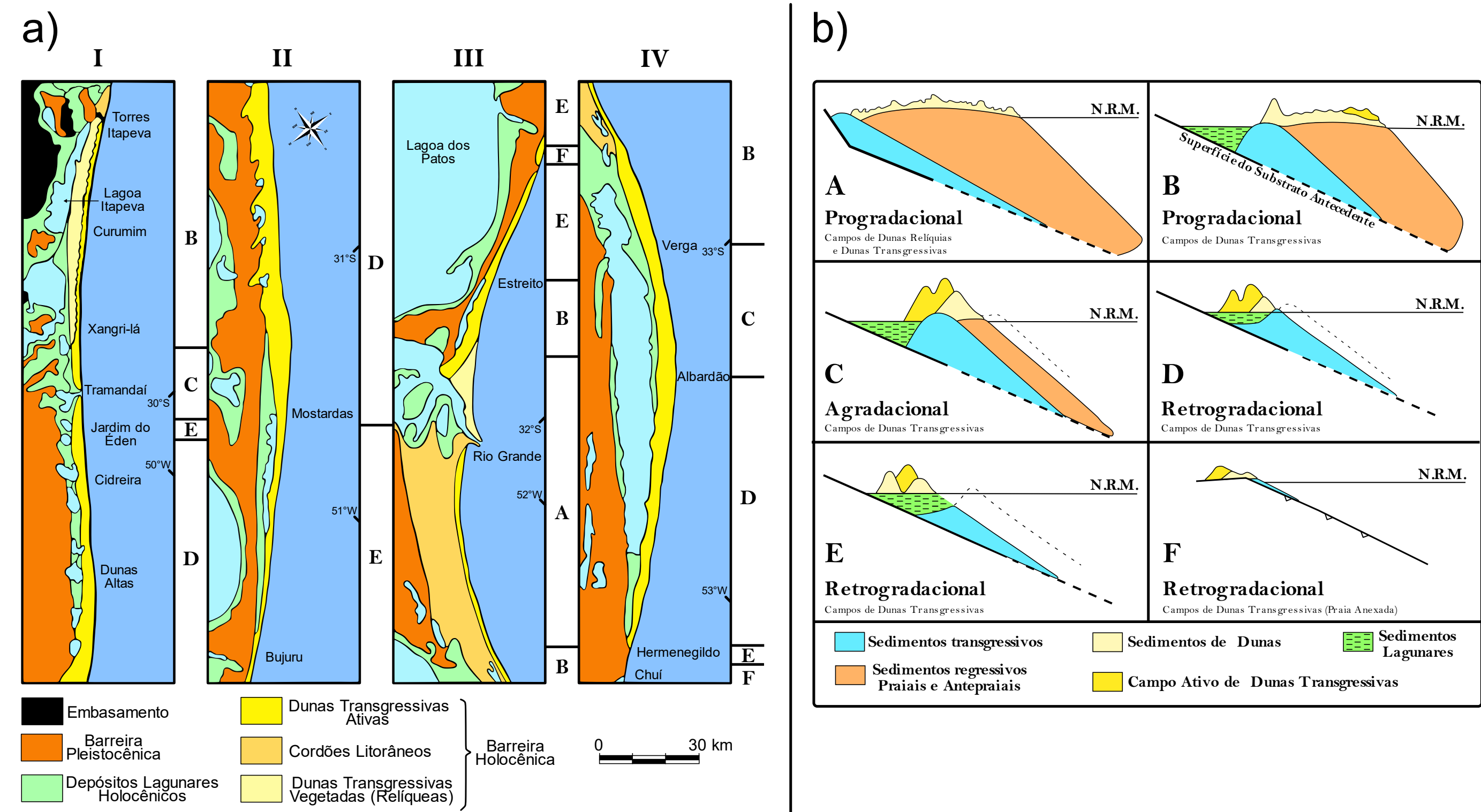
Na barreira holocênica há a coexistência de trechos com diferentes padrões de empilhamento (ou comportamento), sendo progradacional nos embaixamentos e retrogradacional/agradacional nas projeções costeiras (Bitencourt *et al.* 2020), como indicado na Figura 2. O uso do GPR para a identificação destes padrões de empilhamento tornou-se padrão, permitindo identificar a geometria deposicional da barreira holocênica e a sua estratigrafia, além de verificar fatores controladores como variação do nível do mar e disponibilidade de sedimento, por meio da visualização das fácies observadas com o GPR (Lima *et al.*, 2014, Watanabe; Barboza; Hesp, 2025).

Figura 1 – Mapa geológico da Planície Costeira do Rio Grande do Sul. O mapa a) é a localização da PCRS e b) a visualização em planta dos diferentes sistemas deposicionais presentes. Em c), a seção geológica no perfil A-A', mostrando idades e as superfícies de inundação máxima (MIS) associadas à formação de cada sistema laguna-barreira.



Fonte: modificado de Bitencourt *et al.* (2020).

Figura 2 – Mapa Geológico da PCRS, com ênfase nos diferentes padrões de empilhamento e morfologias presentes ao longo de toda a barreira holocênica. O município de Santa Vitória do Palmar fica na parte IV da figura, contendo padrões de empilhamento ilustrado em C, D e E. O perfil utilizado neste trabalho situa-se no contexto de D.



Fonte: a) adaptado de Dillenburg *et al.* (2009). b) adaptado de Caron (2014), depois de Dillenburg *et al.* (2000),

5 MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Radar de Penetração no Solo

O radar de penetração no solo é um método eletromagnético que emprega a emissão de pulsos eletromagnéticos de alta frequência, em uma faixa de 10 MHz até 6 GHz, permitindo o imageamento em alta resolução das estruturas de subsuperfície (Zhao *et al.*, 2016).

O GPR surgiu inicialmente na Glaciologia para medir a espessura de geleiras, devido ao fato de que materiais congelados (especialmente, o *permafrost*) possuem propriedades dielétricas bem diferentes de outros no meio geológico. Contudo, o método ganhou notoriedade em estudos de geologia sedimentar voltados à sedimentologia e estratigrafia a partir da década de 1990 (Neal, 2004), além de uma crescente aplicação em áreas como arqueologia, estudos forenses, meio-ambiente e engenharia civil com o surgimento de novos equipamentos, computadores e técnicas de processamento.

A base teórica do método é fundamentada nas equações de Maxwell (equações 1, 2, 3 e 4), que definem o comportamento de campos elétricos e magnéticos e a relação existente entre ambos, junto às equações constitutivas (equações 5, 6 e 7), que descrevem a resposta do meio a esses campos.

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = \frac{-\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (3)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (4)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (5)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (6)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (7)$$

Nas equações 1 a 7, $\vec{B}$ é a densidade do fluxo magnético (em Tesla, T), $\vec{E}$ é o vetor do campo elétrico (em *volt* por metro, V/m), $\vec{D}$ é o vetor de deslocamento elétrico (em Coulomb por metro quadrado, C/m²), $\vec{J}$ é o vetor densidade de corrente elétrica (em ampere por metro quadrado, A/m²), $\vec{H}$ é o vetor intensidade do campo magnético (em ampere por metro, A/m), $\vec{\nabla}$ é o operador vetorial diferencial nabla e o termo ρ é densidade de carga elétrica (em ampere por metro cúbico, A/m³).

A condutividade elétrica σ caracteriza o movimento de cargas livres, que criam uma corrente elétrica. A permissividade dielétrica ε trata-se do deslocamento de uma carga, que está presa na estrutura de um material, pela presença de um campo elétrico. A permeabilidade magnética μ estabelece como momentos magnéticos moleculares e atômicos intrínsecos respondem a um campo magnético, além de dizer o quanto um determinado material permite a passagem de um campo magnético (Jol, 2009).

Além disso, existe a fundamentação do ponto de vista da ondulatória, envolvendo Lei de Snell e coeficientes de reflexão, que estabelecem relações geométricas e são utilizadas nas diferentes técnicas de aquisição dos dados.

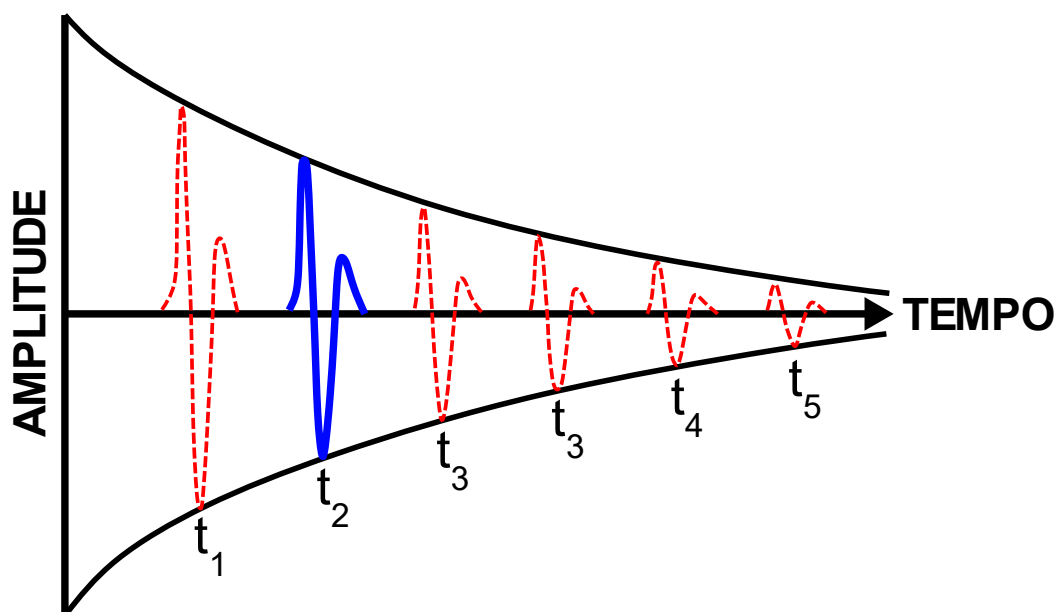
5.1.1 Propagação de Ondas Eletromagnéticas

Ondas eletromagnéticas ao se propagarem por um meio qualquer, que não seja o vácuo, passam por perdas de intensidade tanto do campo elétrico quanto magnético, causando a atenuação do sinal transmitido (Figura 3). Estes campos interagem com os materiais e reagem de acordo com as propriedades elétricas e magnéticas dos mesmos (Daniels, 2004). Especificamente, as propriedades físicas envolvidas são a condutividade elétrica, a permissividade dielétrica e a permeabilidade magnética.

Para a maioria das aplicações do método GPR, a resposta magnética é fraca e pouco influente na atenuação do sinal, pela baixa presença dos materiais magnéticos em subsuperfície. Em geral, as propriedades físicas permissividade dielétrica e condutividade elétrica são mais dominantes na maioria das aplicações

(Jol, 2009). Em situações em que há baixa perda do sinal, a onda se propaga com uma atenuação exponencial do sinal e pouca alteração na forma do pulso.

Figura 3 – Ilustração de uma atenuação exponencial da onda eletromagnética ao se propagar em um meio que há baixa atenuação.



Fonte: adaptado de Jol (2009).

5.1.2 Sistema GPR

Um equipamento (ou sistema) GPR, apesar de apresentar variações em suas dimensões, é constituído por componentes essenciais para o seu funcionamento. Todo sistema GPR vai conter um sistema de controle (ou módulo), ao menos uma antena e um dispositivo para registro e armazenamento dos dados coletados (Utsi, 2017). Os sistemas GPR mais comuns estão no grupo do domínio do tempo, nomeados de radar de impulso (*impulse radar*), em que um pulso eletromagnético é transmitido e a energia refletida é registrada em função do tempo (Koppenjan, 2009).

O módulo envia um pulso até a antena, a qual vai ser responsável em transmitir a onda eletromagnética. Por conta disso, as características da antena afetam diretamente a frequência central e seu comprimento de banda presentes na onda emitida (Koppenjan, 2009). À medida que o sinal transmitido passa por materiais com diferentes propriedades elétricas e magnéticas, parte da energia é refletida e o restante refrata, percorrendo camadas mais profundas. O sinal que

chega até a superfície carrega a informação das mudanças de propriedades físicas no percurso realizado pela onda (Utsi, 2017).

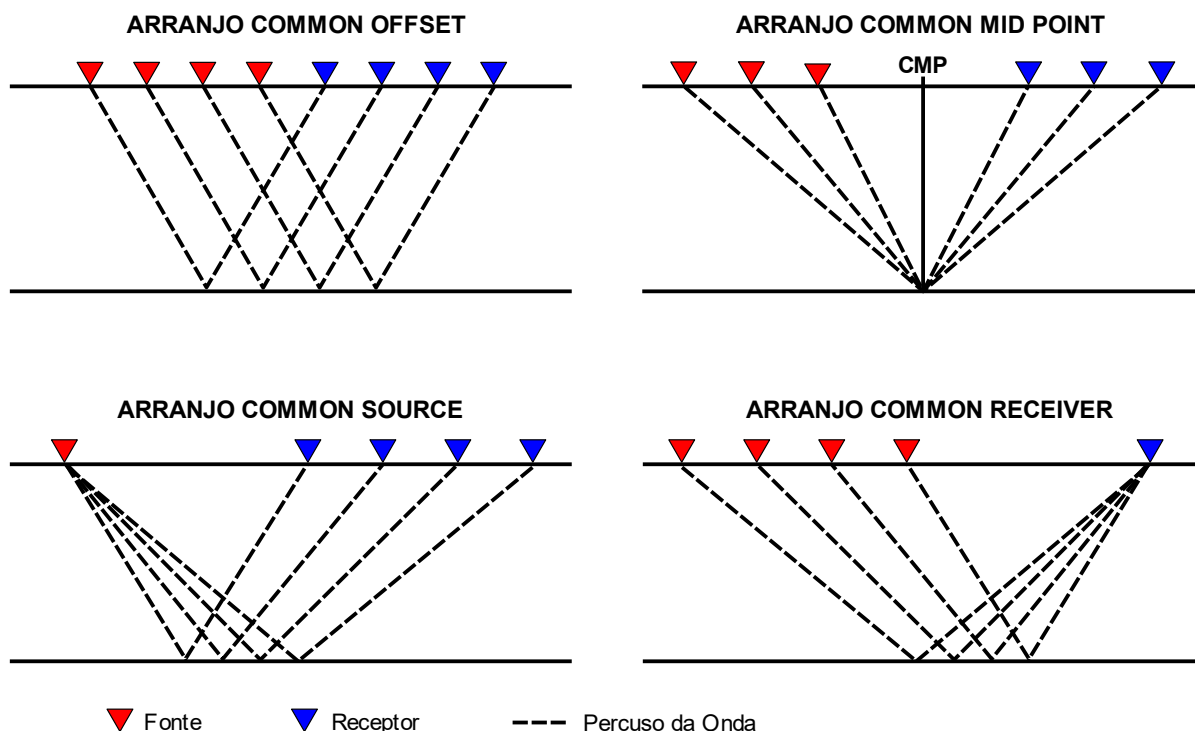
Todo GPR possui ao menos uma antena e essa informação é importante para classificar com precisão o equipamento. Quando a antena que transmite o sinal é a mesma que registra, diz-se que o sistema é monoestático e a seção obtida do levantamento está em *offset* zero, ou seja, a distância entre a fonte e o receptor é nula. Quando há duas antenas, uma transmissora e outra receptora, há uma distância que separa elas, que pode variar de acordo com o equipamento, e o sistema é classificado como biestático (Utsi, 2017).

5.1.3 Técnicas de Aquisição

Existem inúmeras técnicas de aquisição envolvendo sistemas GPR (Figura 4), envolvendo tanto formas de dados obtidos em superfície quanto em poços, porém, aqui será abordada apenas as mais utilizadas em aquisições de campo.

A técnica (ou arranjo) de aquisição mais comum é a *Common Offset*, a qual consiste em estabelecer uma geometria fixa entre as antenas transmissora e receptora, de tal forma que a distância entre elas permaneça constante por todo o levantamento. Além dela, existem outras que são comuns à geofísica de reflexão, como *Common Source*, *Common Mid-Point* (CMP), e *Common Receiver*, mas a *Common Offset* é a mais comum em sistemas GPR (Neal, 2004).

Figura 4 – Os diferentes arranjos de aquisição presentes na geofísica de reflexão.



Fonte: modificado de Neal (2004).

5.1.4 Relação Sinal-Ruído

A separação do que é sinal e ruído depende de, principalmente, dois fatores: o objetivo do levantamento e a interpretação do operador. Em geral, o sinal é aquilo que pode ser processado de tal maneira que seja possível interpretar, associado à algum contraste de propriedade física que apresente significado e seja de interesse da aplicação.

Por outro lado, o ruído seria aquilo que não seria possível interpretar (pela complexidade da resposta ou ausência de informação da natureza do sinal) ou que não traz nenhuma informação em relação ao objetivo do trabalho. Por conta disso, a blindagem de antenas GPR são comuns para suprimir ondas eletromagnéticas que fazem percursos não desejados, como as ondas aéreas, que trazem informação que não pertence à subsuperfície e são tratadas como ruído (Jol, 2009).

A razão sinal-ruído é uma medida da proporção de energia, que tem significado físico, e que pode ser útil em relação à contraparte considerada ruído, estando relacionado à qualidade dos dados adquiridos. Segundo Utsi (2017), a relação sinal e ruído é uma forma de descrever a clareza do dado e, em parte, uma

característica associada ao sistema GPR. As etapas do processamento, que serão abordadas na próxima subseção, têm como objetivo o realce do que é sinal e a remoção do ruído.

5.1.5 Técnicas de Processamento

O fluxo de processamento dos dados é a etapa fundamental para a visualização e interpretação dos dados de GPR, que vai depender, principalmente, do comportamento da onda eletromagnética em subsuperfície, da frequência utilizada, potência do equipamento e o tipo de arranjo utilizado. Segundo Utsi (2017), as técnicas de processamento mais apropriadas variam com o sistema GPR e com a área de estudo.

Cada filtro tem como objetivo suprimir algum tipo de ruído, sem que haja tanta perda do sinal. Em geral, existem etapas que visam remover efeitos que são inerentes à natureza do método, porém, investigações em meios mais complexos podem exigir a necessidade de mais técnicas para melhorar a interpretação do dado (Utsi, 2017). Por último, há a necessidade de mitigar o efeito da atenuação do sinal, a fim de recuperar parte da informação suprimida.

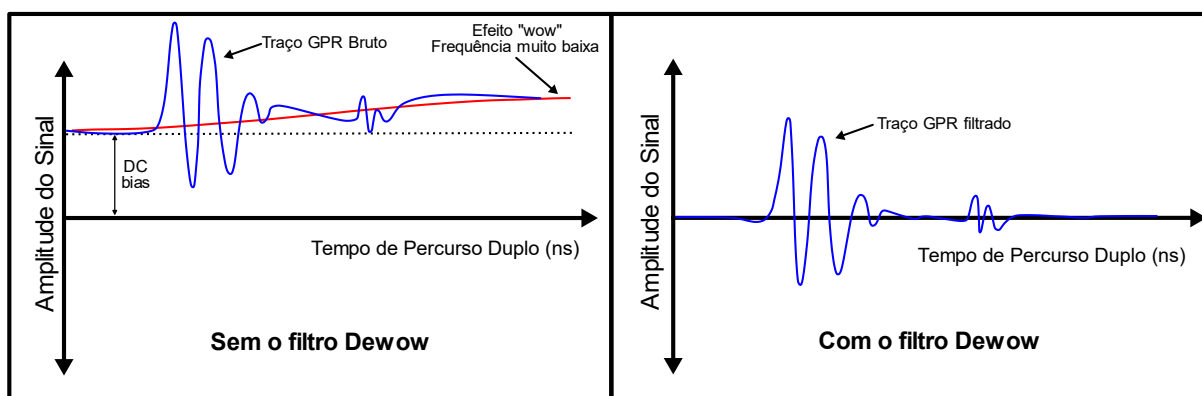
A seguir, estarão listados os filtros utilizados para o processamento dos dados e gerar as imagens denominadas como “processadas”, que servirão como ponto de partida para análise de atributos. O fluxograma contendo todas as etapas do processamento está apresentado na Figura 6.

5.1.5.1 Dewow

Devido ao fato da fonte e o transmissor estarem muito próximas, os campos eletromagnéticos muito próximos ao transmissor possuem uma energia de baixa frequência, associada com campos estáticos e indutivos, que decaem rapidamente com a distância (Jol, 2009). Esse efeito é chamado de “wow”, caracterizado por um ruído de baixa frequência associado à saturação do instrumento eletrônico por conta da grande amplitude de ondas diretas (principalmente aérea), que causa uma mudança na forma do pulso e desloca o nível zero médio do sinal (Maruddani e Sandi, 2019).

O filtro *Dewow* visa justamente a remoção deste ruído e, geralmente, é a primeira etapa a ser realizada no processamento. A Figura 5 ilustra a forma de um traço com a presença do efeito *wow* e como ele muda após a aplicação do filtro.

Figura 5 – Ilustração do conceito de um traço passando pelo filtro *Dewow*. A linha em vermelho indica a componente de baixa frequência presente no dado, enquanto a linha em azul representa um exemplo de traço de um radargrama.



Fonte: adaptado de Maruddani e Sandi (2019).

5.1.5.2 Remoção do Tempo Zero

A remoção do tempo zero (ou correção do tempo zero) trata-se de um recorte do radargrama, com objetivo de eliminar todo o registro que vem antes da onda direta. Por definição, o primeiro sinal registrado é o da onda direta aérea que se propaga do transmissor e segue direto ao receptor, qualquer registro anterior a esse é apenas sinal interno do próprio equipamento, sem nenhuma relação com que existe em subsuperfície (Utsi, 2017).

A partir da visualização *A-scan* ou traço *Wiggle* é possível encontrar o tempo de chegada da onda direta, em que esse valor tem que ser o mesmo para os outros traços. Caso contrário, é possível que a antena ou algum outro componente do sistema requeira reparo.

5.1.5.3 Remoção de *Background*

No contexto da análise de dados de GPR, as anomalias se tratam principalmente de alvos (dutos, canos, depósitos etc.) ou geometria de refletores que variam espacialmente (Jol, 2009; Utsi, 2017). A remoção de *background* é uma técnica de processamento que remove os elementos comuns presentes no

radargrama, em uma determinada janela bidimensional através de uma média extraída da amplitude dos traços (Utsi, 2017). Por conta disso, existem diferentes formas de aplicar este filtro, geralmente é aplicado em todo o radargrama. Vale ressaltar que se deve ter cuidado na sua utilização, pois, dependendo da janela estabelecida, pode-se remover as feições desejadas.

5.1.5.4 Ganho

A onda eletromagnética vai perdendo amplitude à medida que vai propagando-se para as camadas mais profundas, seja por espalhamento geométrico, pelas heterogeneidades das propriedades físicas do meio, por calor etc. Isso dificulta a visualização das feições mais profundas no radargrama, pois os sinais que chegam possuem uma amplitude muito pequena.

Para compensar este efeito, uma etapa do processamento chamado de ganho (do inglês, *gain*) é realizada para realçar os refletores mais profundos (Utsi, 2017). Geralmente, o ganho é realizado com a multiplicação do traço por uma função, podendo ser arbitrária ou com alguma forma matematicamente conhecida, como funções lineares e exponenciais.

Existem diferentes formas de aplicar um ganho, mas neste trabalho será utilizado o *Automatic Gain Control* (AGC), o qual distribui igualmente amplitudes dentro de uma janela temporal arbitrária e é aplicado em cada traço.

5.1.5.5 Filtros Trapezoidais

Após a realização dos filtros como *Dewow*, remoção de *background* e ganho, o traço muda de forma bruscamente, tanto no domínio do tempo quanto da frequência, havendo muitas vezes registros que não pertencem a faixa de frequência do equipamento utilizado.

Para contornar essa situação são aplicados filtros de frequência trapezoidais, que visam a remoção das componentes de frequência que são considerados como ruídos (Utsi, 2017). Existe uma grande variedade de filtros deste estilo existentes na literatura, por exemplo: passa-alta, passa-baixa, passa-banda, filtro *notch*, *butterworth* etc. Cada traço de uma seção GPR, que podem ser vistos como séries temporais discretas, são levados ao domínio da frequência através da transformada

de Fourier e, individualmente, são multiplicados por uma função, com valores entre 0 e 1, para suprimir frequências indesejadas.

Neste trabalho, optou-se pelo *butterworth*, que trata-se de um passa-banda no domínio do tempo, de modo a preservar um determinado conteúdo de frequência. Em geral, a faixa utilizada fica em torno da frequência central, com o valor mínimo sendo metade da frequência central e o máximo sendo o dobro, quando não há informação pelo fabricante (Utsi, 2017).

5.1.5.6 Filtro F-K

Uma aquisição de dados GPR resulta em uma seção no domínio do tempo e do espaço. A transformada 2D de Fourier permite que todos os traços sejam convertidos para o domínio da frequência (F, em Hz) e do número de onda (K, em ciclos por m), como bem descrito em Yilmaz (1987). As feições observadas no domínio F-K estarão diretamente relacionadas com o conceito de velocidade aparente, que, neste caso, vai ser a razão entre a frequência e o número de onda. O espectro F-K permite a visualização de diferentes eventos através do seu conteúdo de frequência e a sua inclinação (relacionada ao número de onda).

A filtragem F-K é uma forma eficiente de suprimir eventos com diferentes inclinações (mergulhos), que refletem no espectro F-K em valores de K, com valores altos diretamente proporcional ao mergulho. Qualquer evento (refletor) que seja plano paralelo, vai ter um $K = 0$ (Yilmaz, 1987).

Para o GPR, este filtro tem como principal aplicabilidade a remoção de ruídos lineares coerentes associados à onda direta ao longo de todo o perfil, que possuem número de onda em torno de 0 (Hayashi e Sato, 2010).

5.1.5.7 Migração e Correção Topográfica

Como descrito por Pestana e Botelho (1997), a migração topográfica tem como objetivo corrigir distorções de estruturas geológicas e reposicionar a energia das difrações, seguindo os mesmos fundamentos dos métodos de migração da sísmica de reflexão.

Segundo Dujardin e Bano (2013), um dos efeitos que causa a distorção das reflexões é a topografia do terreno, em que a irregularidade da superfície abaixo da

antena distorce o percurso esperado da onda. Em uma seção GPR esse efeito faz com que hipérboles de difração se tornem curvas de difração, além de produzir ruídos verticais de amplitude associada a essa irregularidade.

. Para corrigir este efeito, a migração topográfica pode ser realizada, inserindo um modelo de velocidade constante, o qual foi obtido através de testemunho de sondagem, calibrando com a profundidade conhecida e com a informação que todo o registro nos dados é de areia.

Apesar de haver um nome semelhante, a correção topográfica é um filtro diferente da migração topográfica. A sua aplicação é puramente para inserir a topografia na seção GPR, para corrigir a imagem evitar o falseamento da forma dos refletores, causado pela variação significativa da topografia.

Para ambos os filtros, existe a necessidade da inclusão da altitude do GPR durante a aquisição, que pode ser feita de diversas formas, seja com teodolito, GPS RTK ou DGPS (Bristow e Jol, 2003). Como geralmente o dado possui uma escala de alto detalhe, o uso de modelos de elevação digitais globais não é recomendável, considerando que, principalmente para o GPR aplicado à geologia sedimentar, é necessário obter variações de altitude com precisão menor que 1 metro. Adicionalmente, optou-se a suavização da topografia, para não haver distorções causadas em refletores predominantemente planos.

5.1.6 Interpretação dos Dados GPR

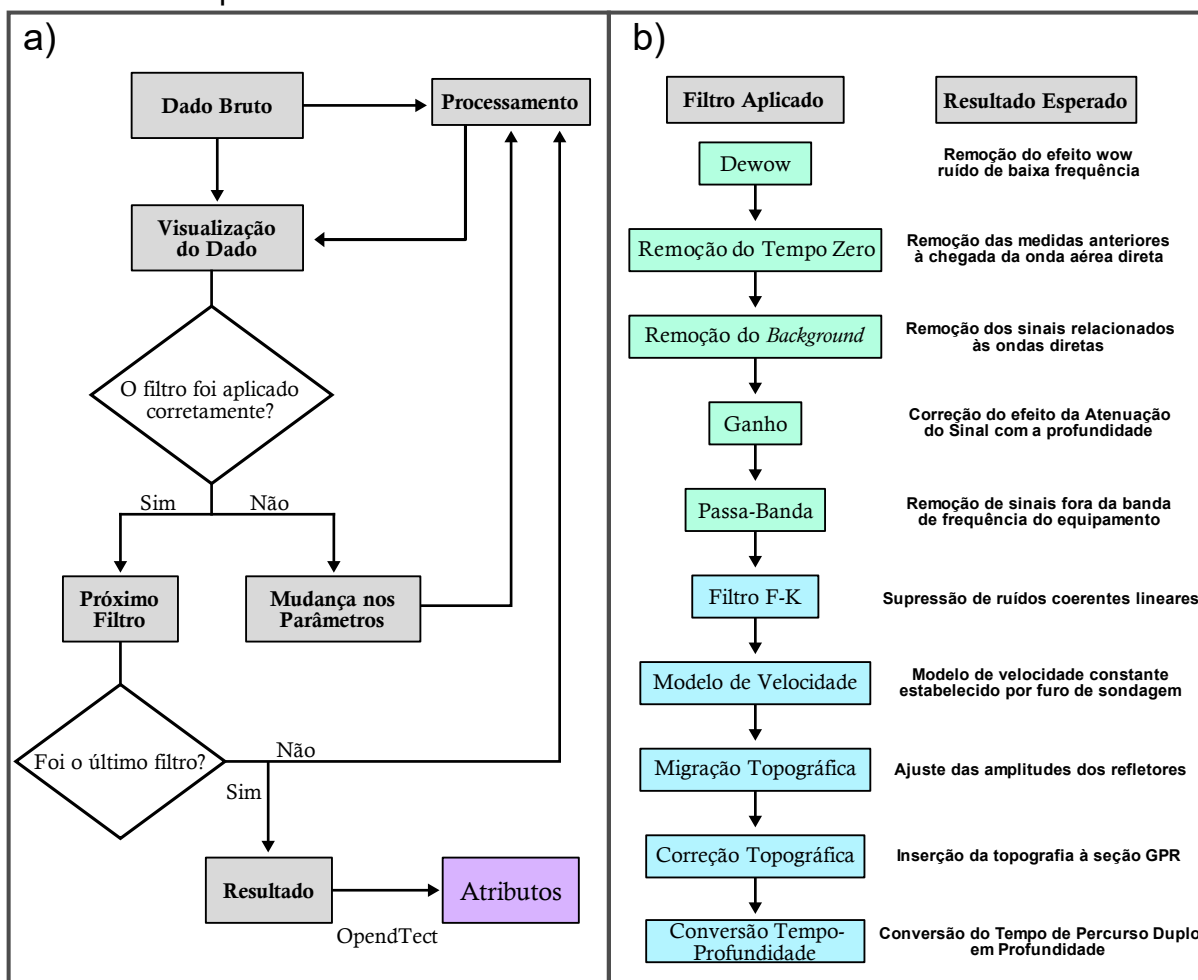
A interpretação dos dados de GPR, em aplicações voltadas à geologia sedimentar, é baseada nos princípios da sismoestratigrafia, com o termo radarestratigrafia (*radar stratigraphy*) sendo usado pela primeira vez por Jol e Smith (1991).

A sismoestratigrafia é uma forma sistemática de interpretar dados sísmicos para determinar a estratigrafia e o ambiente deposicional das formações sedimentares, desenvolvida por Mitchum et al. (1977). Os perfis são subdivididos em sequências sísmicas (*seismic sequences*), a partir de superfícies de descontinuidades (*seismic sequence boundaries*) definidas a partir de terminações dos refletores (Neal, 2004). As principais terminações existentes na literatura são toplap, donwlap, onlap e truncamento erosivo.

Além disso, ainda há as fácies sísmicas, que são sets 2D ou 3D de reflexões entre as superfícies sísmicas, caracterizadas por suas distintas geometrias, frequência, amplitude, continuidade e velocidade interna (Mitchum et al., 1977).

Para o GPR, as radarfácies seguirão o mesmo princípio, mas em uma escala muito menor. As radarfácies terão um vínculo direto com a geometria deposicional dos ambientes sedimentares costeiros e, portanto, é uma informação importante a ser obtida pelo processamento (Rosa et al., 2017, Watanabe et al., 2023).

Figura 6 – Fluxograma de processamento dos dados, realizado no software ReflexW, indicando todos os filtros utilizados e o critério para averiguar se foram corretamente aplicados.



Fonte: Perez (2025).

5.2 Atributo GPR

O objetivo do processamento de dados geofísicos é potencializar o sinal proveniente de feições de interesse e suprimir/remover o efeito do ruído. Transformar um dado de GPR em uma informação desejada para uma determinada aplicação pode ser feita de duas formas. A primeira é a resposta GPR registrada em um radargrama, a qual é apresentada em uma seção (ou perfil) ou volume para indicar anomalias que estão relacionadas com o alvo de estudo, após realizada as correções no processamento. A segunda é extrair propriedades da onda quantitativas como velocidade, atenuação ou impedância (Jol, 2009).

Dentro desta segunda forma, existe a análise por atributo, que é uma técnica de processamento oriunda da sísmica de reflexão. Segundo Chopra e Marfurt (2007), um atributo é qualquer medida derivada dos dados que ajude a realçar visualmente ou quantifique feições de interesse. A semelhança das mesmas técnicas de processamento do GPR e da sísmica vem de uma consideração do ponto de vista da ondulatória, em que ondas eletromagnéticas propagam-se de maneira análoga à energia elástica e essa premissa é válida para tempos de percurso de ondas de rádio (Fisher; Stewart; Jol, 1992).

De acordo com Koyan (2024), em contraste à classificação manual de fácies GPR, a análise de atributo permite a caracterização e delineamento de padrões estruturais de forma semiautomática e mais objetiva. Economou *et al.* (2015) estabeleceu 5 principais categorias, sendo essas: atributos estatísticos geométricos, instantâneos, texturais, coerência *semblance* e *wavelet*. Cada classe diferencia-se, principalmente, pela sua fundamentação matemática, o que impacta diretamente em seu significado e as características realçadas.

Segundo Yilmaz (1987), para extrair informações estratigráficas a partir dos atributos (principalmente, os instantâneos) é necessário preservar o conteúdo de frequência e amplitude do sinal, em cada etapa do processamento. Qualquer variação na forma de onda, que não condiz com a informação de subsuperfície, deve ser eliminada.

5.2.1 Atributos Instantâneos

Os atributos instantâneos foram introduzidos pela primeira vez em 1946 por Dennis Gabor na engenharia elétrica, mas na geofísica eles apareceram primeiro na sismologia em 1975, ganhando destaque posteriormente na exploração de hidrocarbonetos. Um atributo instantâneo é definido como um parâmetro calculado a partir da análise do traço complexo (ou analítico) do sinal, o qual é composto por uma componente real (registrada no radargrama) e outra de quadratura (Robinson e Treitel, 2008). A segunda componente, nomeada também como traço de quadratura ($Y(t)$), é obtida através da transformada de Hilbert (equação 8). O traço complexo ($Z(t)$) é definido como o par conjugado com um valor no domínio real (traço medido) e outro no domínio de quadratura, sendo então reescrito em coordenadas polares (equação 9).

$$Y(t) = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{X(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (8)$$

$$Z(t) = X(t) + iY(t) = a(t)e^{-i\theta(t)} \quad (9)$$

$$a(t) = \sqrt{X^2(t) + Y^2(t)} \quad (10)$$

$$\theta(t) = \arctan\left(\frac{Y(t)}{X(t)}\right) \quad (11)$$

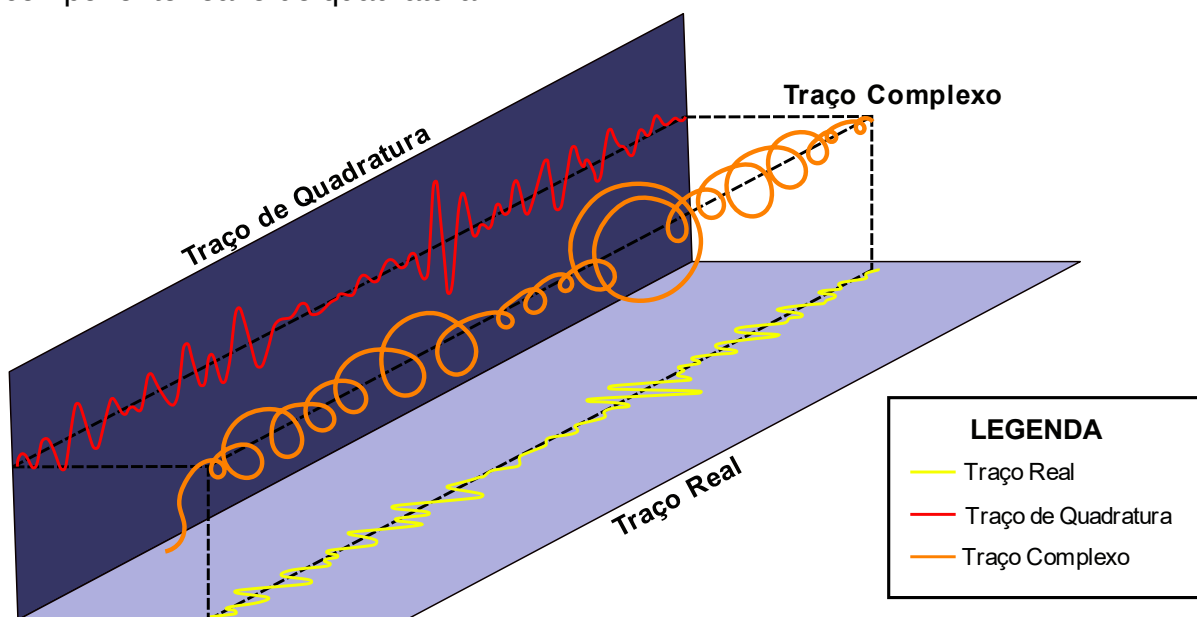
$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (12)$$

O parâmetro $a(t)$ representa a amplitude instantânea do traço complexo, que na literatura é também definido como envelope, pois é visualizado como um envelope do traço. Ele é obtido pela raiz da soma dos quadrados das componentes real e de quadratura (equação 10). O termo $\theta(t)$ representa a fase instantânea, a qual se trata de um valor específico de fase para cada instante de tempo e pode ser calculado pela equação (11). O fator P representa o valor principal de Cauchy, que

basicamente é um valor arbitrário para evitar a descontinuidade quando $t = \tau$. O termo $\omega(t)$ é a frequência instantânea, que é representado pela variação da fase instantânea em função do tempo (equação 12)

O conceito de traço analítico (Figura 7), inicialmente desenvolvido para a sísmica, foi estabelecido por Taner, Koehler e Sheriff (1979). A aplicação dos atributos instantâneos foi tornando-se cada vez mais comum, com intuito de tornar a visualização do dado mais clara. No GPR, existem diversos trabalhos que aplicam estes atributos, seja em aplicações na sedimentologia (Castro et al., 2014; Zhao et al., 2017), glaciologia (Gutgesell e Forte, 2024) ou estudos do solo (Prado et al., 2011).

Figura 7 – Ilustração do Traço Complexo (ou analítico) formado pela combinação da componente real e de quadratura.



Fonte: adaptado de Taner, Koehle e Sheriff (1979).

5.2.2 Atributos Texturais

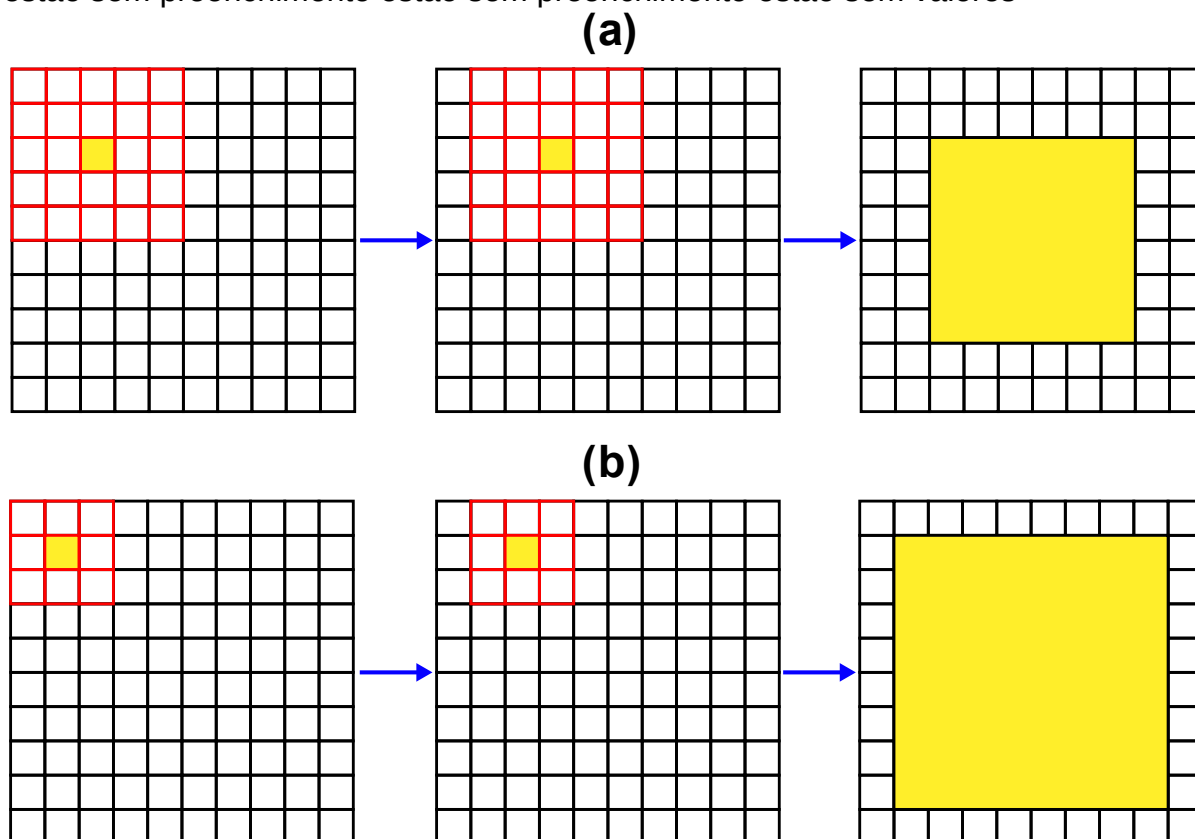
Nem todo atributo é um resultado derivado da transformada de Hilbert, como ocorre nos instantâneos. Originalmente proposto e utilizado por Haralick (1973), os atributos texturais são um método estatístico que permitem analisar a “textura” da imagem, relação à variação (ou continuidade) dos determinados *pixels* ao seu redor.

A descrição a seguir é baseada em Hall-Beyer (2007), que detalha todos os conceitos presentes nos atributos texturais.

A análise textural é feita através de uma matriz de co-ocorrência de nível de cinza (*Gray-Level Co-occurrence Matrix*, GLCM), a qual busca quantas vezes um par de *pixels*, com valores e uma relação espacial específicos, ocorrem na imagem. O cálculo da GLCM pode ser feito em direções específicas, que delimitam as posições vizinhas a serem mapeadas as co-ocorrências dos níveis de cinza. No caso bidimensional, existem quatro direções possíveis (Figura 9), com a possibilidade de utilizar todas elas.

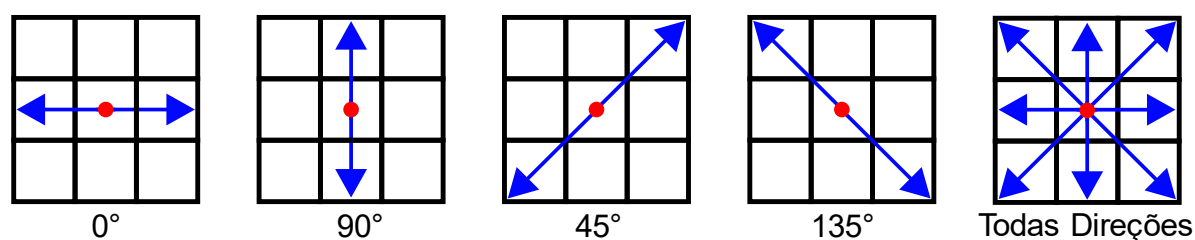
A busca pelas co-ocorrências ocorre após a discretização da amplitude do sinal, em valores que são potências de base 2 (4, 8, 16, 32 etc.) e chamados de níveis de cinza. Esse mapeamento é feito em partes através de uma janela móvel (Figura 8) que passará por toda imagem, no entanto, haverá apenas um valor de textura, correspondendo ao ponto central da janela. Quando essa janela for significativamente grande em relação à imagem, ocorre a perda de informação nas extremidades da imagem, causando o que é chamado de problema de limite da imagem (*edge of image problem*). Quando a perda nas bordas é desprezível, considera-se que a textura é homogênea da parte vazia até onde começa a ter valores de textura calculado.

Figura 8 – Problema dos limites da imagem ilustrado em duas situações, com uma imagem de 10x10 em *pixels* para ambos os casos. Os *pixels* preenchidos por amarelo são aqueles que possuem valor de textura calculado, enquanto os que estão sem preenchimento estão sem valores



Fonte: adaptado de Hall-Beyer (2007).

Figura 9 – Direções possíveis em que são mapeadas para a GLCM no caso bidimensional.



Fonte: Perez (2025).

No final, a GLCM é transformada em uma matriz de probabilidade, normalizando seus valores e começarão a variar entre 0 e 1. A partir deste ponto, existe uma variedade de texturas que podem ser extraídas a partir da GLCM normalizada, com as principais sendo energia, entropia, contraste e homogeneidade

(Abdulrazzaq; Thabit; Al-khafaji, 2021; Gutgesell e Forte, 2024; Zhao; Forte; Pipan, 2016). A quantidade de níveis de cinza afeta diretamente a resolução do atributo, porém, acima de 16 níveis de cinza é considerado desnecessário pelas mudanças quase nulas (Chopra e Marfurt, 2007).

O atributo textural energia (equação 12) é a medida da uniformidade textural da imagem, em que seus valores serão menores quando todos os elementos são iguais ou muito próximos. O atributo contraste (equação 13) é a medida da variação dos *pixels* presentes na imagem, estando relacionada com grandes variações de amplitude. O atributo entropia (equação 14) trata-se do valor da desordem ou complexidade da imagem, sendo o oposto da energia. O atributo homogeneidade (equação 15) é a medida da suavidade geral de uma imagem, trazendo informação da similaridade dos *pixels* e atinge os maiores valores quando os maiores valores da GLCM estão concentrados na diagonal principal.

$$\sum_i \sum_j P_{i,j}^2 \quad (12)$$

$$\sum_i \sum_j P_{i,j} \log P_{i,j} \quad (13)$$

$$\sum_i \sum_j (i - j)^2 P_{i,j} \quad (14)$$

$$\sum_i \sum_j \frac{P_{i,j}}{1 + (i - j)^2} \quad (15)$$

Nas equações 12 a 15, $P_{i,j}$ representa um elemento da GLCM em uma linha i e coluna j .

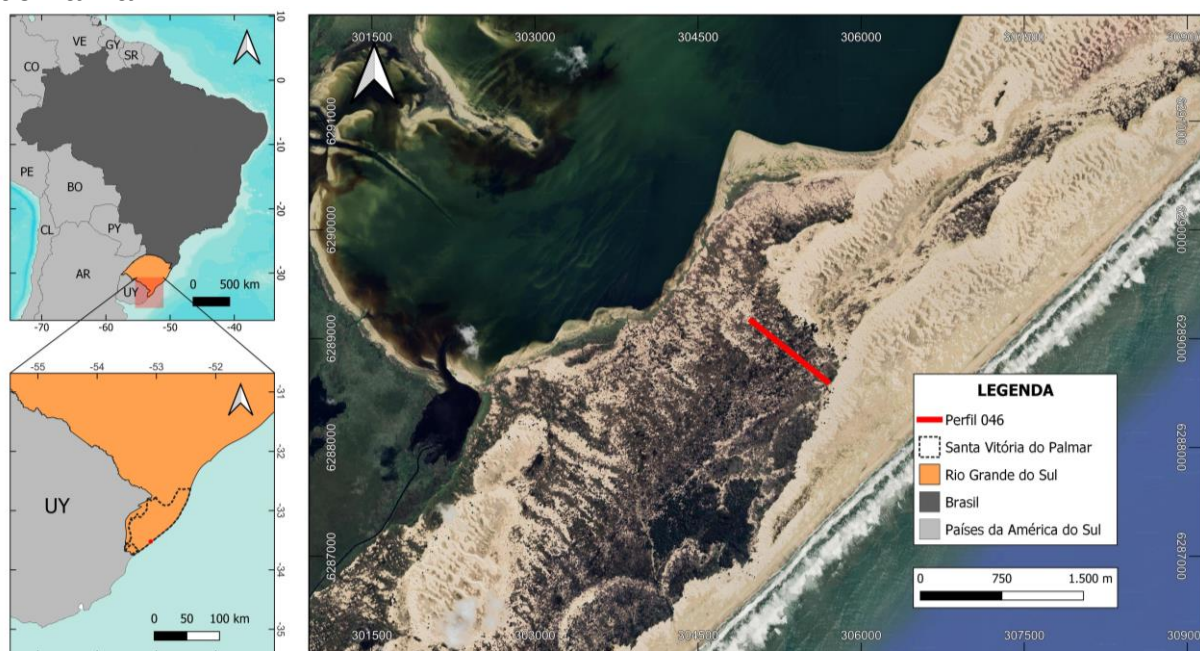
5.3 Dados Utilizados

Neste trabalho, a seção GPR a ser utilizada trata-se de um perfil realizado no município de Santa Vitória do Palmar, no estado do Rio Grande do Sul, localizado em uma porção mais ao sul da PCRS. O perfil, enumerado por 046, pertence ao trabalho de Caron (2014), que foi disponibilizado em formato dado bruto para reprocessamento e posterior aplicação da análise de atributos. A Figura 10 é o mapa de localização do perfil, indicando o posicionamento do perfil.

O perfil foi coletado através de um sistema GPR com 200 MHz de frequência central, da marca *Geophysical Survey Systems*, com o arranjo *Common Offset*. O seu comprimento é de aproximadamente 920 metros, com uma direção aproximadamente NW-SE.

Os atributos foram calculados a partir deste perfil, o qual foi reprocessado até gerar uma imagem que servirá de ponto de partida para aplicação dos atributos. Do ponto de vista qualitativo, os atributos serão analisados em relação ao dado processado, abordando as características que foram realçadas e que influenciam na interpretação do dado.

Figura 10 – Mapa de localização do Perfil 046, situado no município de Santa Vitória do Palmar.



Fonte: elaborado por Perez (2025), a partir dos dados do IBGE e Caron (2014).

5.4 Clusterização por K-means

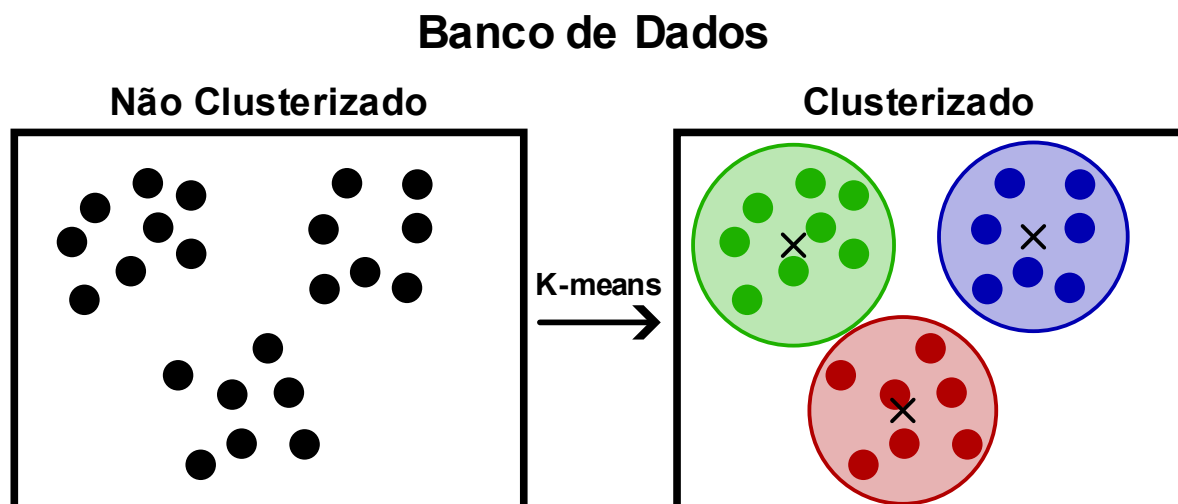
O termo clusterização trata-se de uma técnica de prospecção de dados, que tem como objetivo a construção de grupos automáticos que apresentem algum grau de semelhança entre os dados. Entre as diversas formas de clusterização existentes, a por K-means, que é um algoritmo de aprendizagem de máquina não supervisionada, amplamente empregada na obtenção de padrões em dados multidimensionais (Coates e Ng, 2012).

O algoritmo de clusterização por K-means tradicional classifica um conjunto de dados em um número arbitrário de grupos, de acordo com a menor distância entre o ponto e os centróides. A escolha do número de total dos grupos é idela que, para um determinado conjunto de dados com uma ou mais dimensões, minimize a distância quadrada entre os pontos e os centróides (Kanungo *et al.*, 2002).

Forte *et al.* (2012) já realizou este tipo de abordagem, em uma aplicação de GPR em reservatórios carbonáticos de hidrocarbonetos análogos, utilizando diferentes atributos. Como cada atributo destaca uma ou mais características do sinal, a utilização do K-means permite uma melhor caracterização dos dados quando há uma abordagem de atributos de diferentes categorias. Recentemente, Yuan *et al.* (2024) fez a classificação de dados de GPR utilizando atributos extraídos por filtros Gabor, obtendo informações de textura para caracterizar fácies sedimentares através da classificação realizada pelo K-means.

Neste trabalho, a classificação por K-means foi feita na plataforma Colab do Google, de tal maneira que é possível utilizar Python e seus pacotes para a realização de scripts de forma completamente virtual. As funções utilizadas envolvem os pacotes *Numpy*, *Matplotlib*, *Seaborn*, *Pandas* e *Sklearn*. O conjunto de dados (radargramas de atributos) foram importados em uma única tabela (*Pandas dataframe*), contendo apenas o valor de amplitude, e depois normalizados. A partir deste ponto, os dados foram manipulados pelo *dataframe*, tanto para a clusterização por K-means quanto criação de gráficos, como histogramas ou *Kernel Density Estimation* (KDE).

Figura 11 – Ilustração da clusterização de um conjunto de dados qualquer, utilizando três centróides, em função da distância média dos pontos em relação aos centróides de cada grupo.



Fonte: modificado de Atak (2025)

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Cálculo dos Atributos

Os resultados iniciais foram alcançados pelo processamento dos dados brutos do perfil 046, conforme o fluxograma detalhado na Figura 6 e executado no *software* ReflexW versão 9.1.3. Após a conclusão desta etapa, obteve-se uma seção final, a qual serviu de base para a aplicação dos atributos e, em sequência, para a realização da clusterização por *K-means*. As imagens correspondentes à seção do dado processado e dos atributos calculados foram elaboradas no *Generic Mapping Tools* (Wessel *et al.*, 2019). A tabela 1 apresenta os parâmetros utilizados em cada etapa do processamento.

Tabela 1 – Parâmetros para cada filtro utilizado ao longo de todo o processamento, antes do cálculo dos atributos.

Filtro Aplicado	Parâmetro Utilizado
<i>Dewow</i>	5 ns
Remoção de Tempo Zero	-36,75 ns
Remoção do <i>Background</i>	Todo o Perfil
AGC	Janela de 10 ns
Passa-banda (<i>butterworth</i>)	Janela de 100 até 400 MHz
Filtro F-K	-10 e 10 m/ns
Migração Topográfica	0,075 m/ns
Correção Topográfica	0,075 m/ns
Conversão Tempo-Profundidade	0,075 m/ns

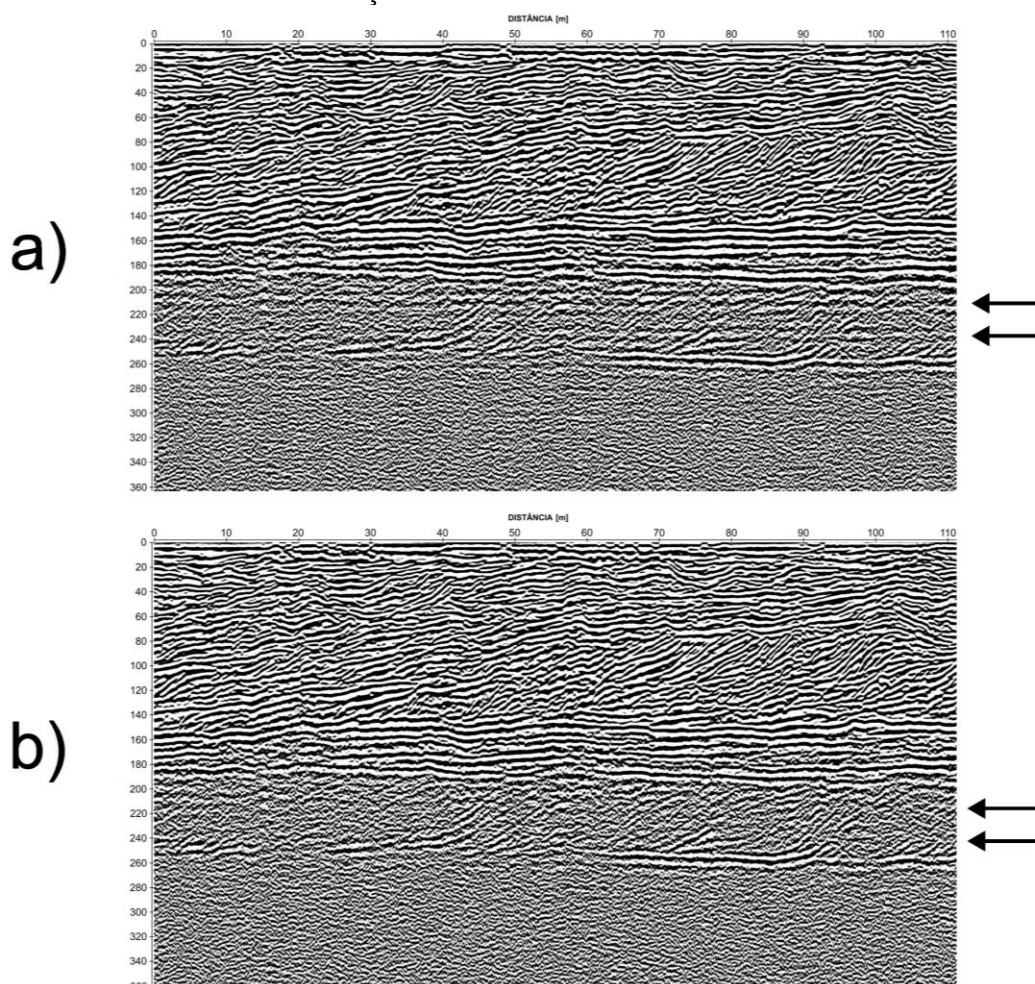
Fonte: Perez (2025)

A aplicação do filtro F-K demonstrou relevância para o estudo em dois contextos distintos. O primeiro consistiu na remoção de um ruído coerente linear, o qual estava concentrado exclusivamente na radarfície B e, por conta disso, não pôde ser removido pelo filtro de remoção do *background*. A Figura 12 mostra o ruído e a sua remoção, sem prejudicar as formas sigmoidais da radarfície B.

Esse tipo de ruído coerente plano paralelo é fácil de ser identificado no espectro F-K, por concentrar-se no $K = 0$ em todas as frequências e está associado à presença de ondas diretas.

Outro aspecto importante foi que, sem essa aplicação do filtro, a clusterização por *K-means* apresentou-se equivocada, por conta da presença desse conteúdo de onda direta. O resultado da classificação era inconsistente com o que é observado no dado processado e nos atributos.

Figura 12 – Ilustração da aplicação do filtro F-K no Perfil 046 com o parâmetro *plotscale* igual a 1. As setas indicam as posições de ruídos lineares presentes nas porções de alta ou total atenuação do sinal.



Fonte: Perez (2025)

A migração topográfica foi aplicada com objetivo de remover descontinuidades de amplitudes verticais, que podem estar correlacionadas à dissipação da energia do sinal, decorrente à irregularidade da superfície em que o

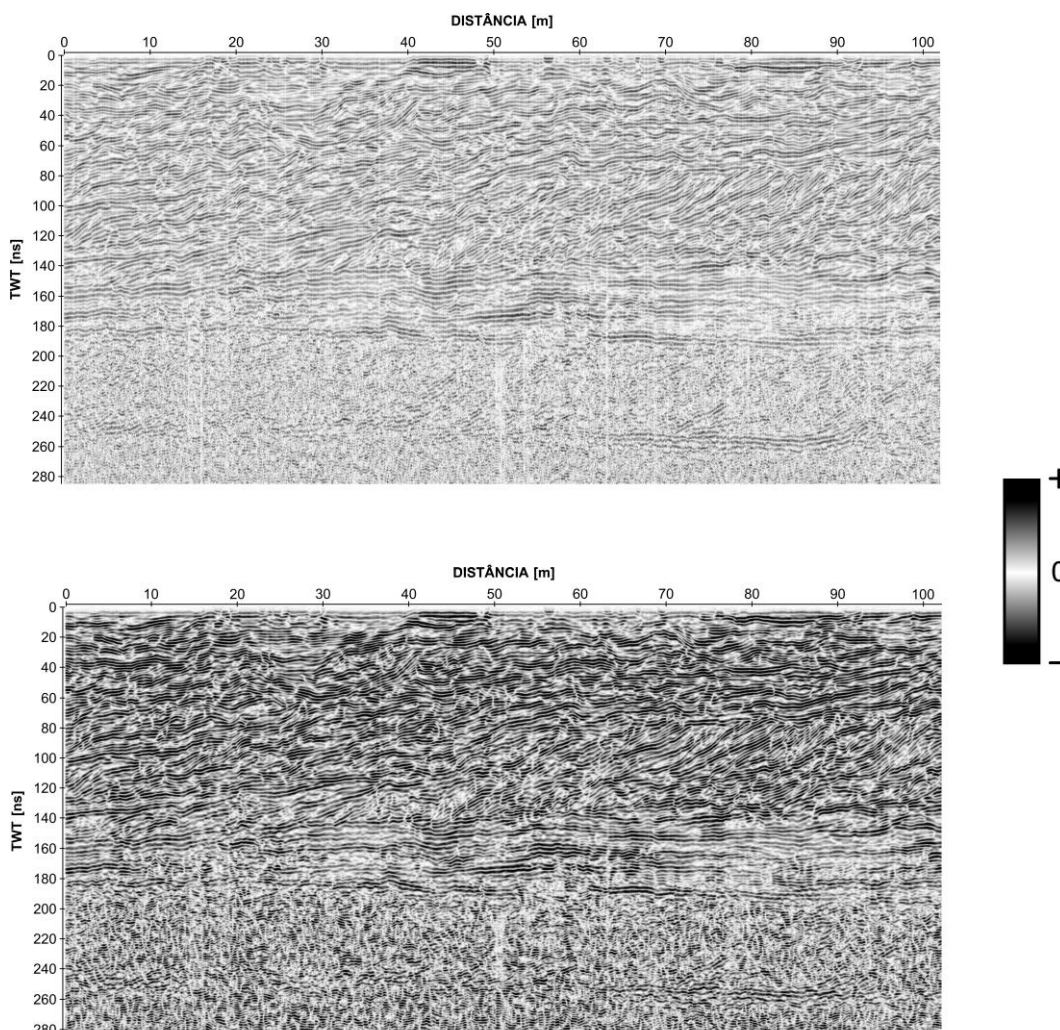
perfil foi adquirido. O efeito observado, incluindo o resultado da aplicação do filtro, está demonstrado na Figura 13.

O modelo de velocidade utilizado foi de velocidade constante para areia, calibrado através de um testemunho de sondagem de Caron (2014), o qual passa pelo perfil 046 e mostra a concentração de areia até a atenuação total do sinal, devido à presença de argilas.

Embora aparentemente sutil, esta correção proporcionou alterações significativas nos atributos texturais, visto que a resposta destes se tornou mais nítida após a remoção do ruído, notadamente nos atributos de contraste e homogeneidade. O atributo frequência instantânea foi o que mais apresentou mudanças entre os instantâneos, mas não tanto como foi nos texturais.

Apesar da aplicação da migração topográfica ter sido boa para os atributos, as reflexões mais profundas (a partir dos 180 ns) perderam nitidez por conta do filtro.

Figura 13 – Ilustração da aplicação da migração topográfica no Perfil 046, mostrando as discontinuidades verticais de amplitude ao longo do dado e a correção realizada pelo filtro.



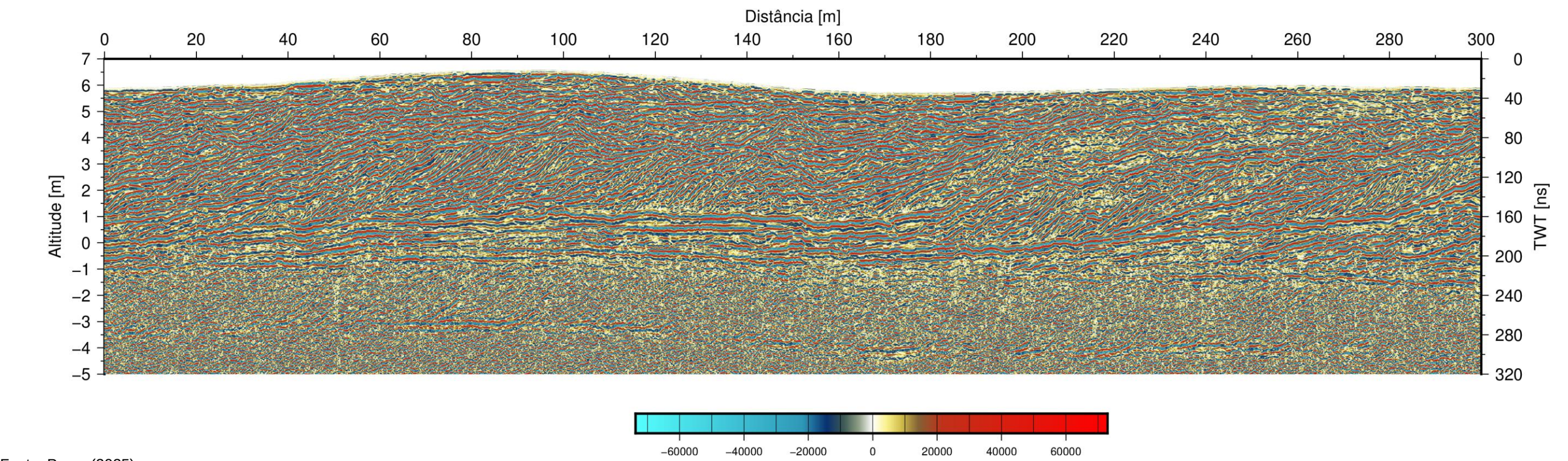
Fonte: Perez (2025)

Os atributos foram calculados pelo *software* OpendTect Pro versão 7.0.5 (licença acadêmica), o qual permitiu a aplicação dos atributos instantâneos e texturais em cima do perfil 046 processado ilustrado na Figura 14.

Os atributos instantâneos não precisaram de algum parâmetro para a sua execução. Em contrapartida, os texturais precisaram que fosse estabelecido o número de níveis de cinza, o tamanho da janela móvel utilizada para buscar as co-ocorrências dos níveis de cinza (definido por um número de traços e por uma janela de busca vertical (*vertical search window*)). Todos os parâmetros foram padronizados para 16 níveis de cinza e uma janela móvel de 2 traços e 2 amostras.

A Figura 15 apresenta um comparativo das radarfácies que já foram identificadas, com a resposta de cada atributo individualmente, para analisar a resposta realçadas por cada atributo na escala de detalhe em uma seção GPR, que ainda serão discutidos em suas respectivas subseções.

Figura 14 – Resultado do perfil 046, após a aplicação de todos os filtros apresentados no fluxograma de processamento. No apêndice A há um link contendo o perfil completo em alta resolução, para melhor visualização.



Fonte: Perez (2025)

Figura 15 – Radarfácies de um perfil GPR de 200 MHz de frequência central, mostrando um comparativo das radarfácies mapeadas com as suas respectivas respostas em cada atributo. Todas as imagens estão na mesma paleta de cor.

RADARFÁCIE	INTERPRETAÇÃO	PROCESSADO	ENVELOPE	COSSENO DA FASE INSTANTÂNEA	FREQUÊNCIA INSTANTÂNEA	ENERGIA	ENTROPIA	CONTRASTE	HOMOGENEIDADE
A	Depósitos de Fundo Lagunar Estuarino								
B	Depósitos de Margem Lagunar Estuarina								
C	Depósitos de Fundo Lacustre								
D	Depósitos de Margem Lacustre								
E	Depósitos Eólicos de Dunas e Interdunas								

Fonte: Perez (2025)

6.2 Atributos Instantâneos

O atributo instantâneo envelope está associado à refletividade das camadas, por eliminar a forma dipolar do sinal e com os maiores valores em correlação com os refletores. No entanto, quaisquer descontinuidades nos refletores influenciaram diretamente na sua visualização pelo envelope, conforme pode ser visto nas radarfácies na Figura 15. Este atributo conseguiu destacar os refletores contínuos de alta amplitude e zonas de alta atenuação do sinal.

Este atributo não apresenta bons resultados para a identificação de terminações de refletores, tendo uma performance razoável neste perfil na visualização de grandes superfícies e da abrupta mudança na geometria dos refletores em torno dos 60 metros. Na Figura 16, é notável a mudança da geometria oblíqua dos refletores para plano-paralelos.

O atributo frequência instantânea apresentou uma resposta muito semelhante ao envelope, do ponto de vista qualitativo. Na Figura 17, observa-se o realce de grandes superfícies e zonas de atenuação do sinal. No entanto, fica pouco ou quase nada visível em relação à geometria dos refletores, nem mesmo quando há uma grande variação.

Os altos de frequência são uma elevada variação de fase instantânea, a qual está associada com o contato entre refletores ou descontinuidades. Contudo, essas respostas são difíceis de serem diferenciadas e mapeadas sem uma comparação constante com o perfil processado.

Em contraste com o envelope, a frequência instantânea aprimora a delimitação da superfície que delimita a barreira holocênica da pleistocênica, além de ser possível identificar as radarfácies B, como é observável na Figura 18.

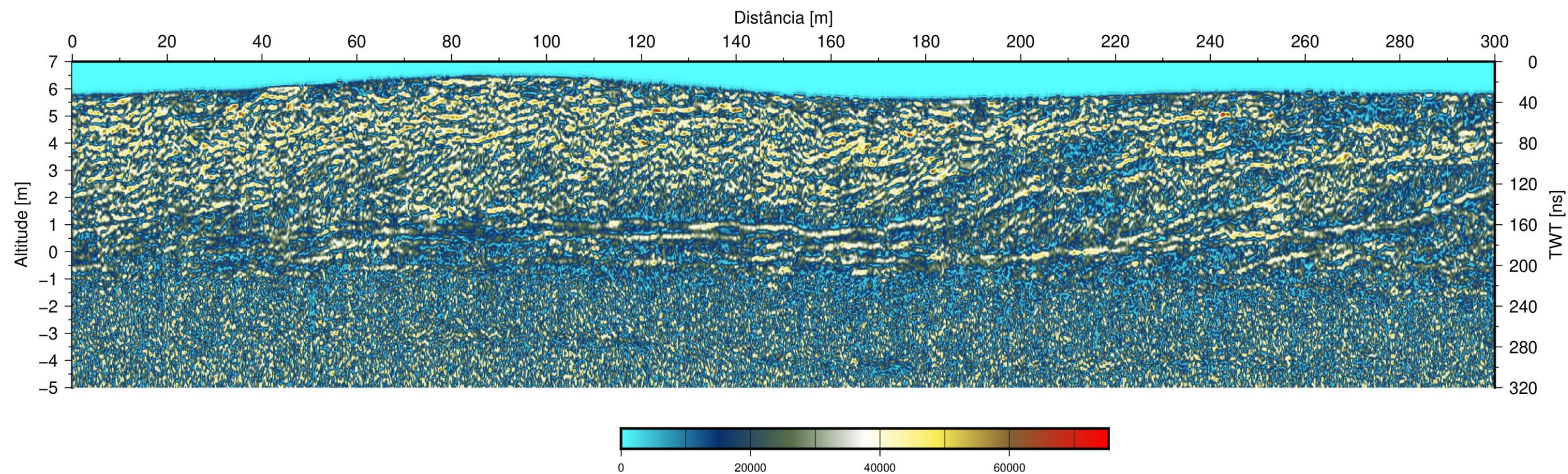
O atributo cosseno da fase instantânea mostrou um resultado significativamente distinto dos demais atributos instantâneos, por salientar as características geométricas dos refletores, como continuidade, terminações e a sua forma. A Figura 15 evidencia essa diferença, demonstrando o realce da geometria das radarfácies, independente das variações de amplitude.

Figura 18 exibe o perfil 046 com o atributo cosseno da fase instantânea, ilustrando com clareza as variações geométricas dos refletores e as suas continuidades, mesmo em porções de baixa refletividade.

O atributo fase instantânea normaliza o traço, preservando a polaridade do sinal e suprimindo as variações da intensidade do sinal. Consequentemente, observa-se uma visualização aprimorada da continuidade e das terminações dos refletores, mesmo em seções cuja determinação seria dificultada pela baixa amplitude do sinal (Figura 17). O cosseno da fase instantânea apresentou uma resposta mais suavizada da fase instantânea e preservando a resposta do atributo.

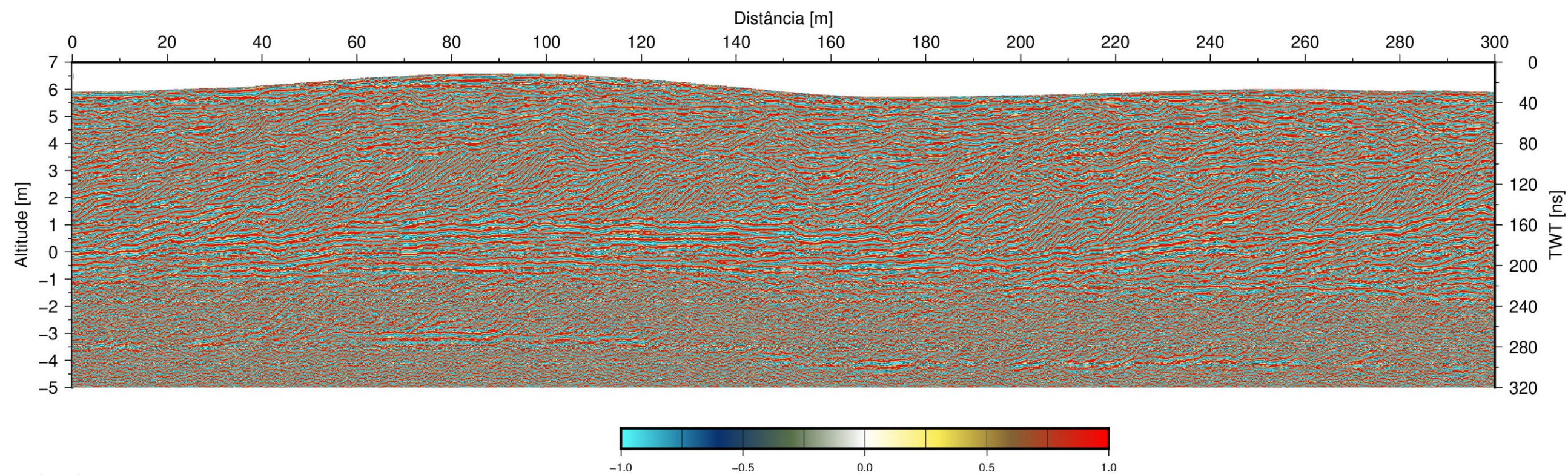
Este atributo é o mais recomendado para a identificação de terminações de refletores, seja *onlap*, *downlap*, *toplap* ou *truncation*, que possibilita uma caracterização detalhada da geometria deposicional e da estratigrafia.

Figura 16 – Resultado do atributo instantâneo envelope aplicado no perfil 046. No apêndice A há um link contendo o perfil completo em alta resolução, para melhor visualização.



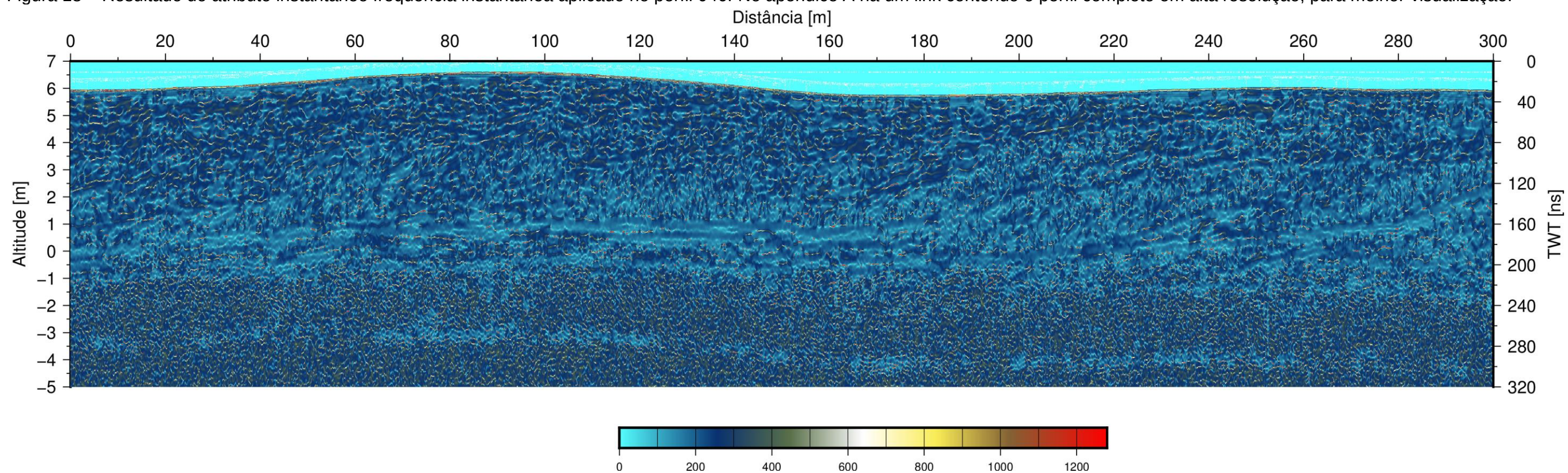
Fonte: Perez (2025).

Figura 17 – Resultado do atributo instantâneo cosseno da fase instantânea aplicado no perfil 046. No apêndice A há um link contendo o perfil completo em alta resolução, para melhor visualização.



Fonte: Perez (2025).

Figura 18 – Resultado do atributo instantâneo frequência instantânea aplicado no perfil 046. No apêndice A há um link contendo o perfil completo em alta resolução, para melhor visualização.



Fonte: Perez (2025).

6.3 Atributos Texturais

O atributo textural energia, com 16 níveis de cinza, apresentou sutilmente a continuidade e geometria dos refletores, associados aos menores valores do atributo energia. Conforme visto na Figura 15, esta correlação ficou nítida nas radarfácies, permitindo identificar a continuidade e geometria dos refletores concentradas nos menores valores, apesar da baixa nitidez.

Na Figura 19, observa-se que o atributo energia evidenciou a geometria dos refletores, com terminações *toplap* e *downlap* identificadas, mas mais nítidas nas superfícies de maior escala. Os altos de energia são as porções que a imagem são uniformes do ponto de vista da GLCM, que estão associadas com pequenas zonas de baixa refletividade.

O atributo entropia tem um comportamento inverso ao atributo energia, em que seus altos se mostraram correlacionados com as reflexões. No entanto, visualmente não é possível averiguar com clareza a continuidade e a sua geometria, como é notável na Figura 20. Na Figura 15, pouco vê-se da geometria das radarfácies conhecidas, deixando evidente que, com os 16 níveis de cinza, a imagem tem pouca interpretabilidade.

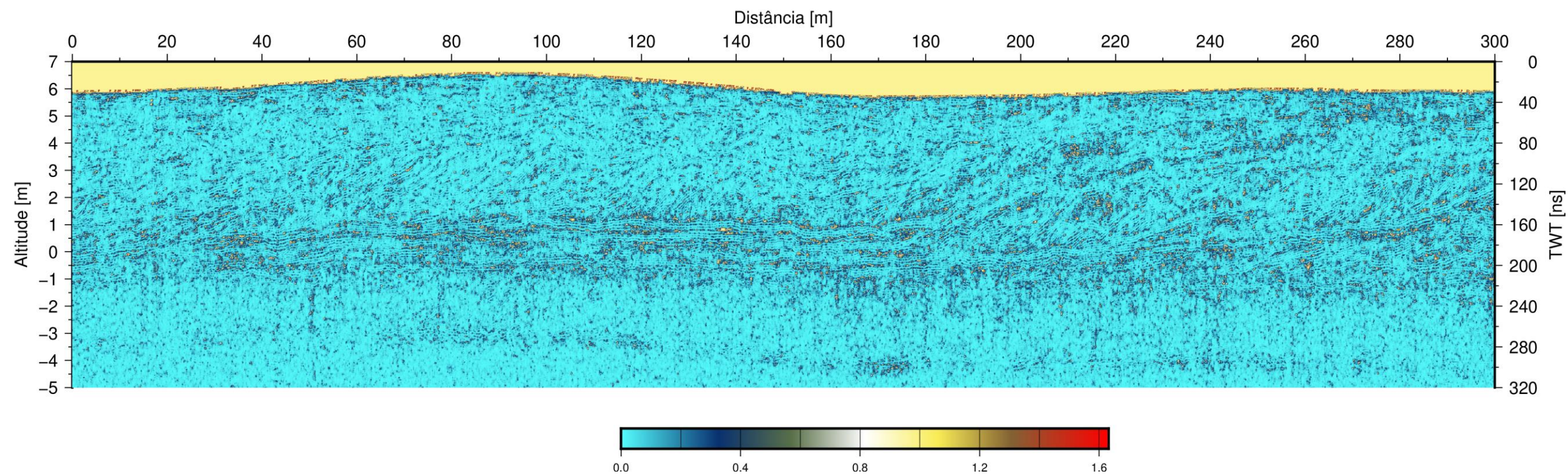
O atributo contraste realçou a variação da amplitude do sinal, possibilitando uma visualização mais clara das reflexões, tanto do ponto de vista da geometria quanto das suas terminações. Mesmo nas porções menos nítidas do perfil, como no caso da radarfície B (Figura 15), o atributo mostrou eficiência no realce da geometria.

A Figura 21 apreseta o realce de grandes superfícies presentes no dado, que são refletores de maior amplitude. No entanto, a superfície que separa o que é barreira holocênica e a pleistocênica ficou quase imperceptível, sendo ser necessário ver a imagem com todo o perfil para visualizá-la.

O atributo homogeneidade realçou a geometria dos refletores e zonas de baixa refletividade da seção GPR, como observável na Figura 22. Assim como o contraste, ele também aprimora a visibilidade da geometria e continuidade dos refletores, mas não de forma tão eficiente.

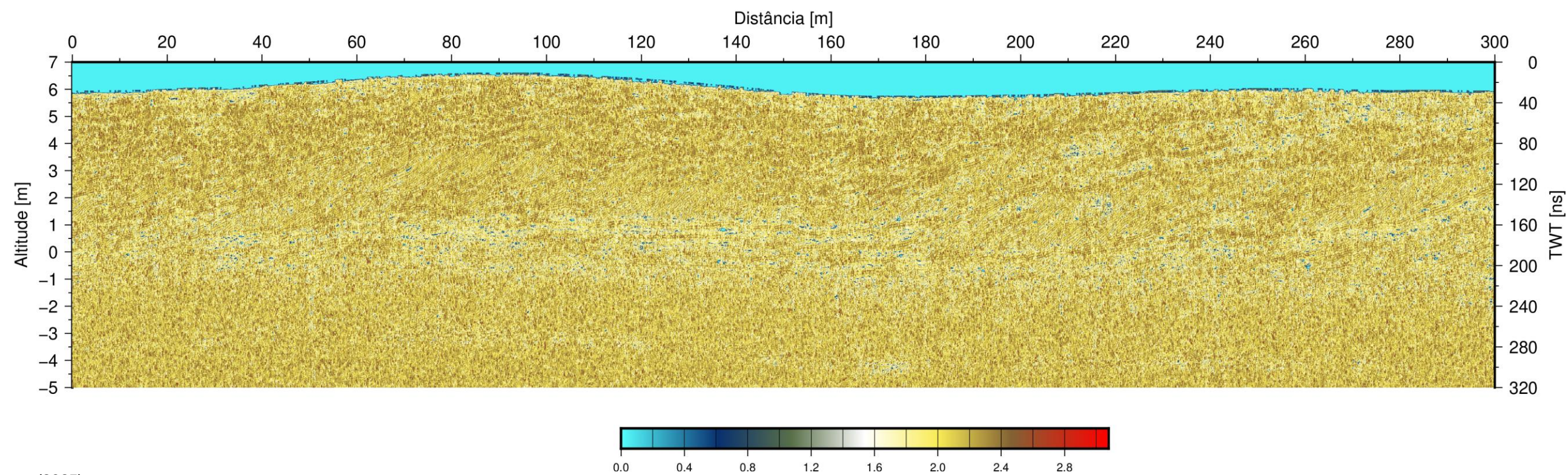
A Figura 23 mostra os histogramas do dado processado, dos atributos instantâneos e dos texturais, mostrando a dispersão dos seus valores ao longo do perfil 046.

Figura 19 – Resultado do atributo textural energia aplicado no perfil 046. No apêndice A há um link contendo o perfil completo em alta resolução, para melhor visualização.



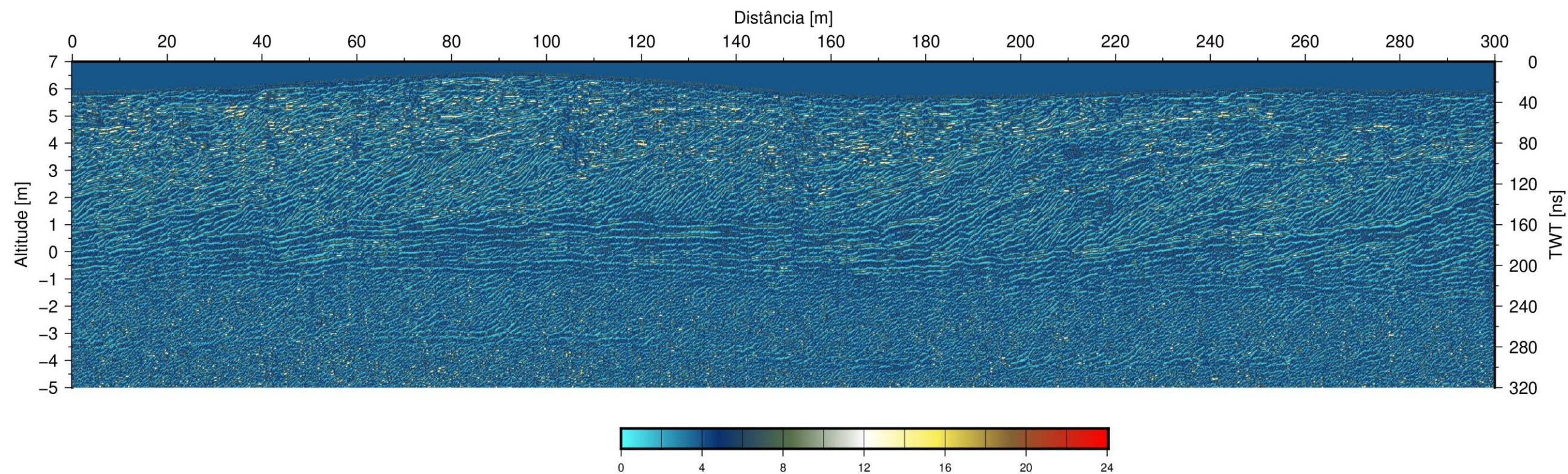
Fonte: Perez (2025).

Figura 20 – Resultado do atributo textural entropia aplicado no perfil 046. No apêndice A há um link contendo o perfil completo em alta resolução, para melhor visualização.



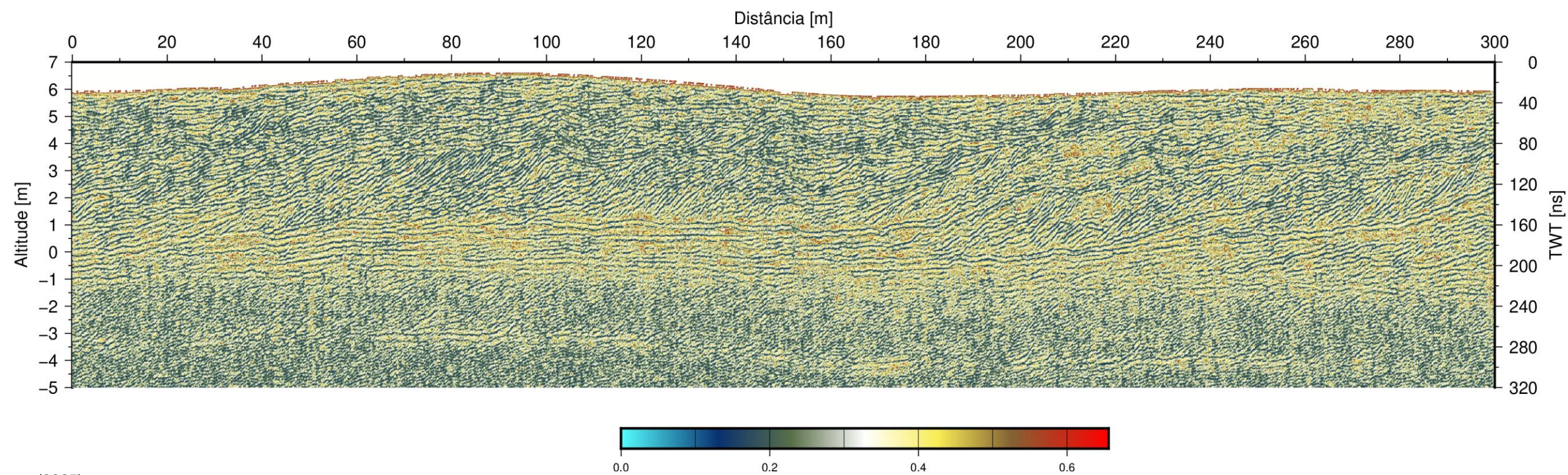
Fonte: Perez (2025).

Figura 21 – Resultado do atributo textural contraste aplicado no perfil 046. No apêndice A há um link contendo o perfil completo em alta resolução, para melhor visualização.



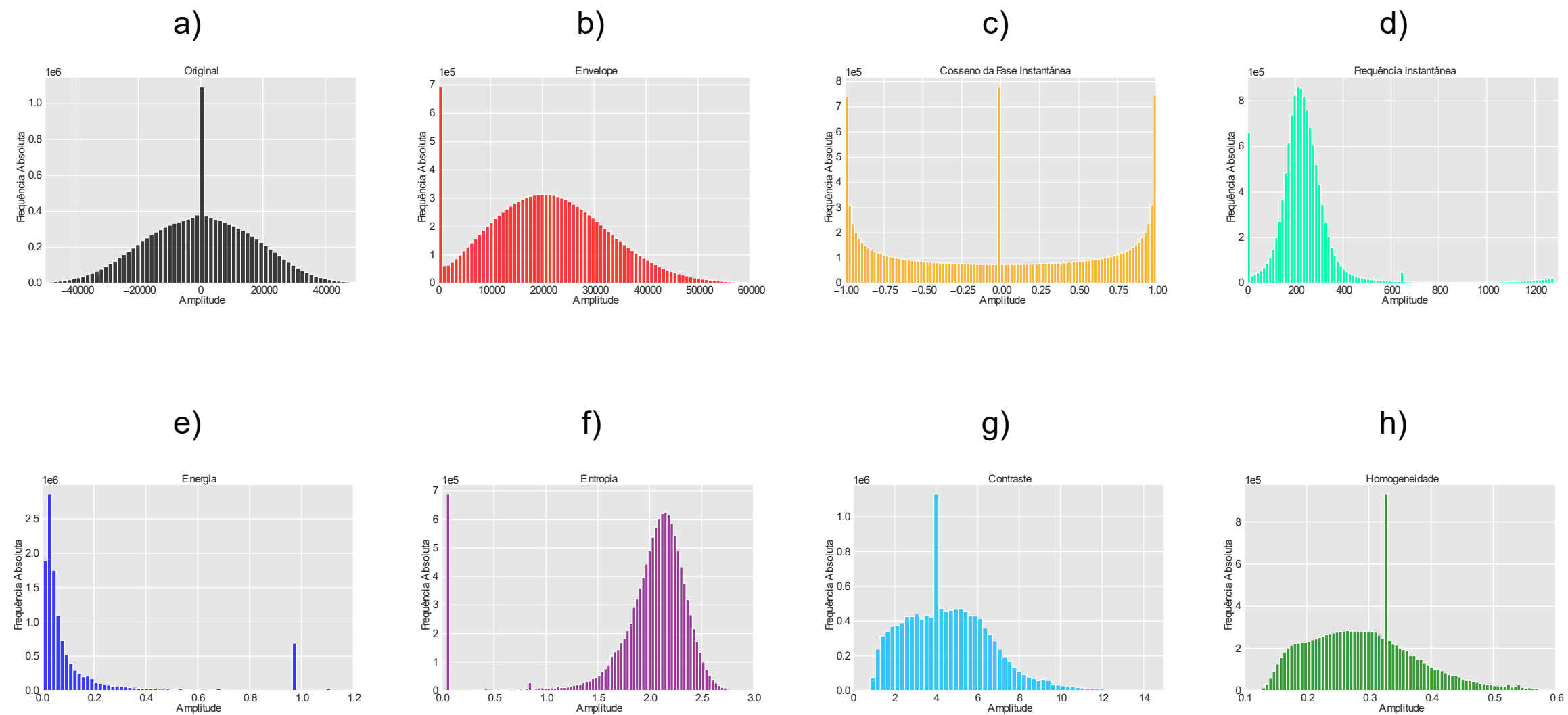
Fonte: Perez (2025).

Figura 22 – Resultado do atributo textural homogeneidade aplicado no perfil 046. No apêndice A há um link contendo o perfil completo em alta resolução, para melhor visualização.



Fonte: Perez (2025).

Figura 23 – Gráficos KDE do perfil 046 e de seus atributos. (a) perfil processado, (b) envelope, (c) cosseno da fase instantânea, (d) frequência instantânea, (e) energia, (f) entropia, (g) contraste e (h) homogeneidade.



Fonte: Perez (2025).

6.4 K-means

Para decidir o número de grupos a serem utilizados pelo K-means, a regra do cotovelo foi escolhida como critério. Ela consiste em, inicialmente, classificar os dados com diferentes números de grupos, especificamente de 1 a 20. Para cada uma dessa etapa, foi calculado a soma dos quadrados intra-clusters (*Within-Cluster Sum of Squares*, WCSS), que é a medida da dispersão dos pontos em redor do centróide o qual eles pertencem. Após isso, um gráfico foi gerado, em que a abscissa é o número de grupos e a ordenada o WCSS (Figura 24).

A curva resultante apresentou um ponto de inflexão expressivo com 5 grupos, tomando como ele o número ideal de grupos para este conjunto de dados. Pode-se notar que a maior parte da dispersão é reduzida com os três primeiros grupos, provavelmente causada pela presença de valores negativos, positivos e próximos de zero, que formam três grandes grupos.

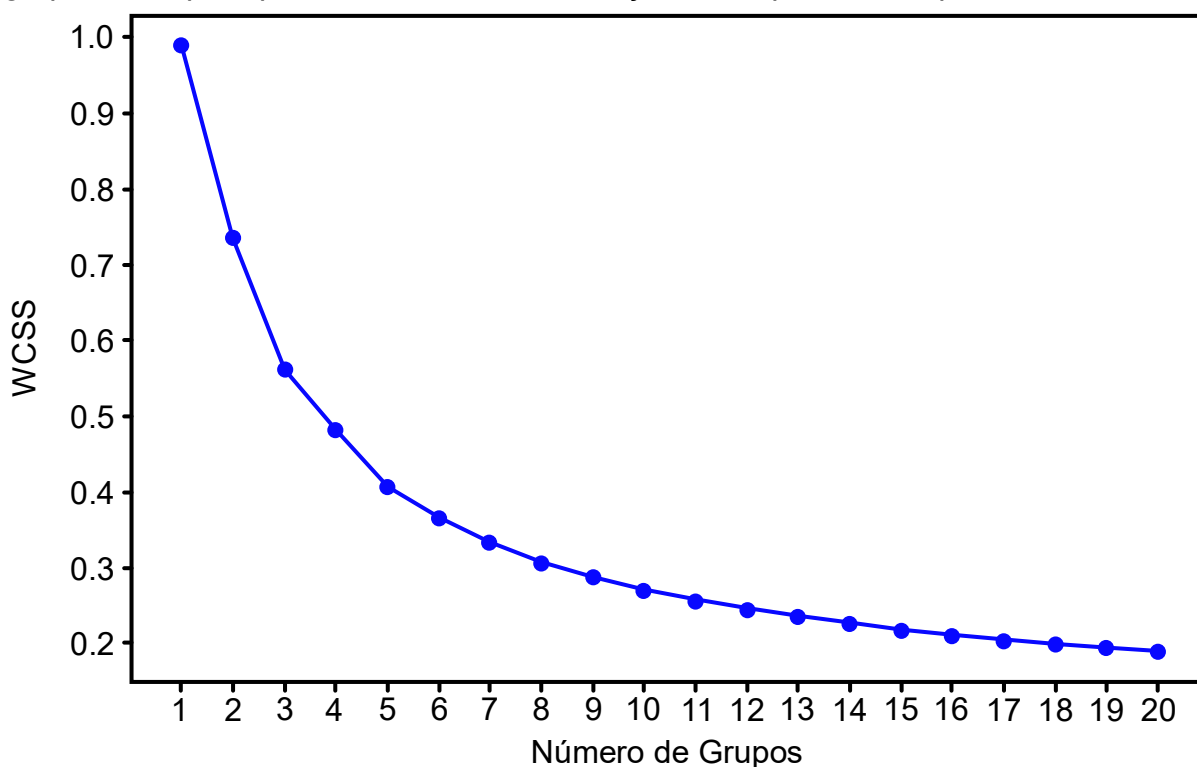
O K-means, a partir do banco de dados montado, realizou a classificação de cada um dos pontos (amostras) em um espaço com 8 dimensões (valores do processado e dos 7 atributos calculados). Desta forma, o algoritmo consegue fazer de forma automática a correlação e integração de todos os atributos.

Cada grupo do K-means corresponde a uma diferente assinatura do sinal observada, baseada no comportamento de uma mesma amostra (do dado processado) com todos os atributos calculados. Essa relação é válida quando não há redundância entre as classes, o que pode ocorrer quando há um número grande de grupos definido.

O resultado apresentado na Figura 25 é uma seção GPR com o valor da classe para cada amostra, associada com as respostas dos atributos. Na prática, a imagem permite mapear as respostas dos atributos combinadas, que vão refletir o realce da geometria dos refletores, principalmente suas terminações.

A Figura 27 mostra os gráficos KDE com os valores do dado processado, dos atributos instantâneos e texturais para todas amostras de uma mesma classe, permitindo visualizar que valores dos atributos estão naquela classificação.

Figura 24 – Gráfico utilizado para a regra do cotovelo, determinando o número de grupos ideal para ponto de inflexão da variação da dispersão dos pontos.



Fonte: Perez (2025)

Pelos gráficos KDE da Figura 27, pode-se perceber que a classificação teve uma forte tendência em relação ao dado processado e do cosseno da fase instantânea. Esse efeito se deu principalmente por conta da distribuição de seus valores, que podem ser particionados facilmente em 3 principais grupos: valores positivos, negativos e nulos (ou próximos de 0). O resultado, apesar de haver uma interpretabilidade aceitável, não foi coerente com a premissa de utilizar o *K-means* para integrar a resposta dos atributos.

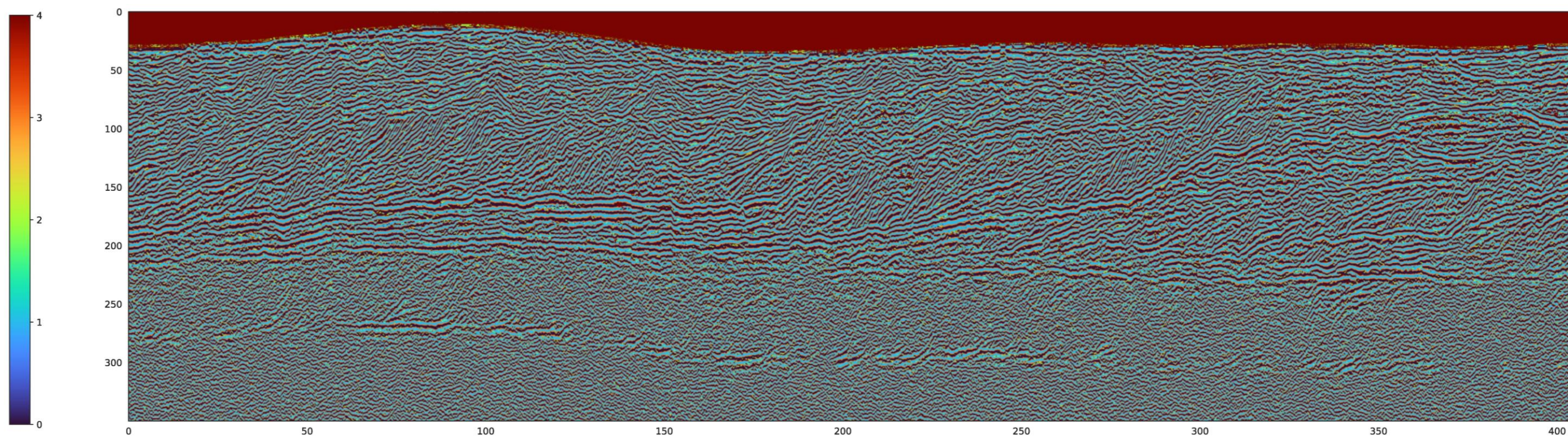
Por conta disso, uma segunda classificação foi realizada, removendo o cosseno da fase instantânea da classificação e, adicionalmente, utilizando o valor absoluto para os dados processados. Com isso, teremos um novo banco de dados que não causará uma tendência natural na classificação pelo *K-means*, devido ao comportamento dipolar dos dados processados e do cosseno da fase instantânea. Essa nova classificação está ilustrada na Figura 26.

Agora, bem diferente do resultado anterior, a classificação não mostra apenas com clareza a continuidade, geometria e terminações dos refletores, mas também variações de amplitude sinal pelo envelope e a frequência instantânea. Essas

variações, do ponto de vista interpretativo, podem estar associadas com heterogeneidades dentro do sistema deposicional.

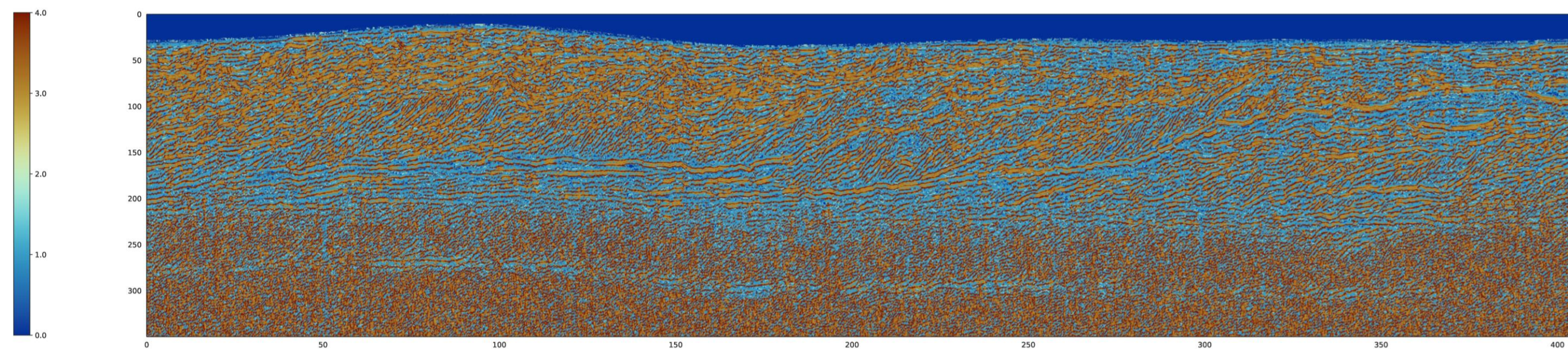
Na Figura 28, a classe de número 0 representa a parte do dado processado com amplitude zero (ou próxima de zero), que estará associada às amostras criadas em todos os traços para inserir a topografia. A classe de número 1 e 4 possuem uma assinatura bem semelhante, do ponto de vista dos atributos instantâneos, diferenciadas mais pelos valores de contraste e de homogeneidade. Ambas as classes fazem a composição de maior parte da imagem, permitindo a visualização dos refletores, a sua continuidade, geometria e suas terminações.

Figura 25 – Perfil 046 classificado em 5 grupos pelo algoritmo *K-means*, com o perfil processado, os atributos instantâneos e os texturais. No apêndice A há um link contendo o perfil completo em alta resolução, para melhor visualização.



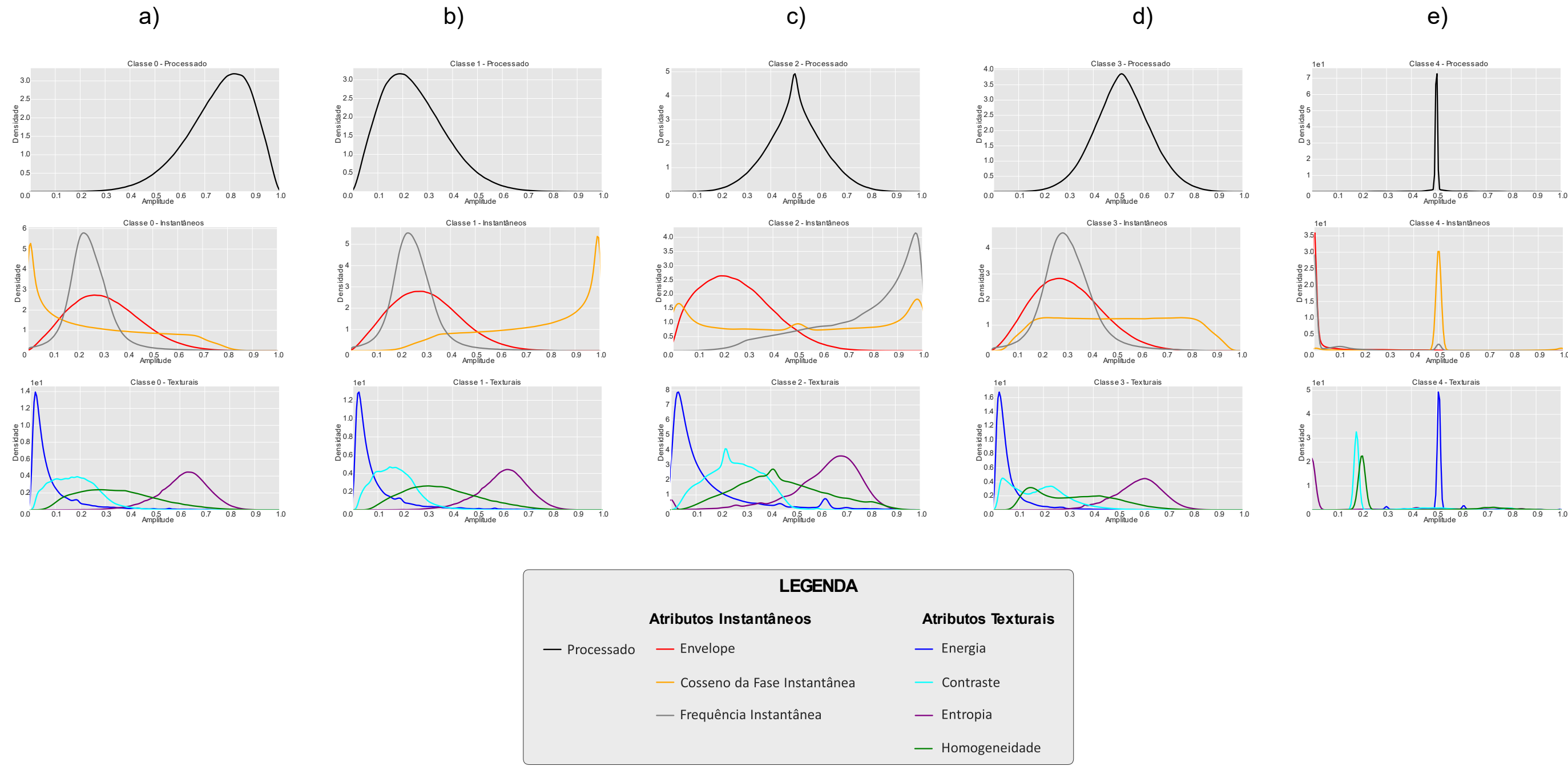
Fonte: Perez (2025).

Figura 26 – Perfil 046 classificado em 5 grupos pelo *K-means*, utilizando o valor absoluto do perfil processado e os atributos, sem o cosseno da fase instantânea no banco de dados. No apêndice A há um link contendo o perfil completo em alta resolução, para melhor visualização.



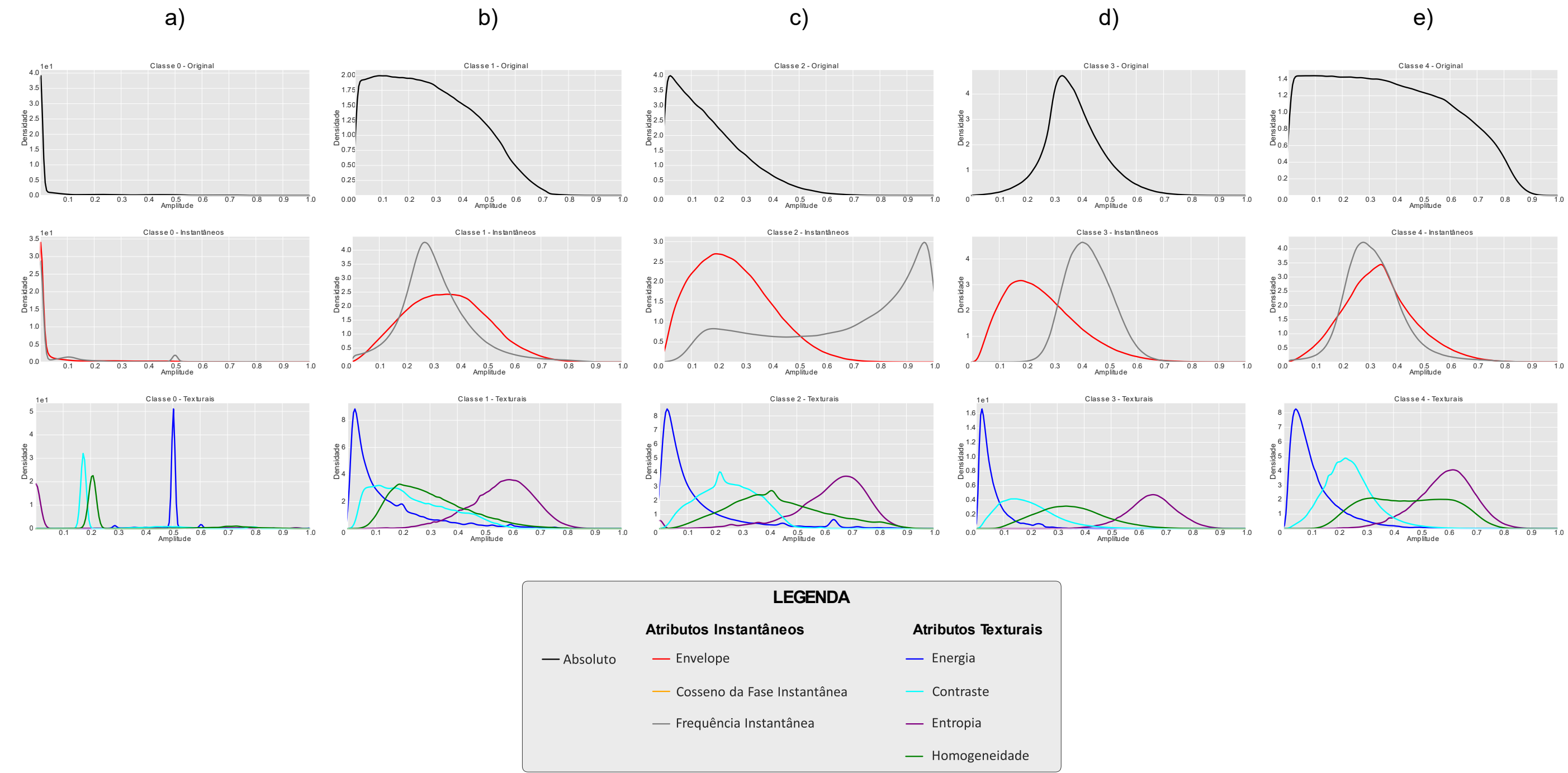
Fonte: Perez (2025).

Figura 27 – Gráficos KDE com a densidade dos valores do perfil processado, dos atributos instantâneos e texturais que foram utilizados para cada classe do K-means.



Fonte: Perez (2025).

Figura 28 – Gráficos KDE com a densidade e os valores absolutos do perfil processado, dos atributos instantâneos e texturais que foram utilizados para cada classe do K-means.



Fonte: Perez (2025).

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho mostrou como os atributos instantâneos e texturais conseguem melhorar a interpretação dos dados de GPR, através do realce de terminações e a geometria dos refletores em um sistema deposicional costeiro com padrão de empilhamento retrogradacional, integrando as suas respostas com a clusterização por *K-means*.

Como cada atributo possui uma fundamentação matemática distinta, a resposta ou informação extraída a partir do dado processado foi diferente, em que cada atributo torna-se um filtro de realce.

Os atributos instantâneos, fundamentados pelo conceito de sinal analítico (ou complexo), realçaram a amplitude e atenuação do sinal (envelope e frequência instantânea), além de destacar, com precisão, a geometria e terminações dos refletores através do cosseno da fase instantânea, o que impacta diretamente em uma interpretação mais precisa dos sistemas deposicionais.

Os atributos texturais realçaram a relação espacial dos valores dos *pixels* (níveis de cinza) ao longo da imagem, que refletem aspectos texturais, como uniformidade, desordem, contraste (variação) e suavidade. No contexto do GPR, a textura da seção terá um vínculo com a presença ou ausência de reflexões, mas alguns mostraram-se mais efetivos do que outros em salientar aspectos geométricos dos refletores, em que o contraste e homogeneidade destacaram-se.

O *K-means* mostrou a sua aplicabilidade em estabelecer grupos através desses padrões presentes no dado. O seu uso permite o realce dos refletores, incluindo geometria, continuidade e terminações, mas também variações de amplitude do sinal e, conseqüentemente, uma interpretação mais robusta.

Outros atributos poderiam ser testados, como pseudo-relevo e atributos geométricos, que vão destacar a amplitude e o mergulho dos refletores, respectivamente. O impacto da adição destes atributos na clusterização por *K-means* é incerto, que podem ou não trazer um complemento aos resultados já obtidos aqui neste trabalho.

Do ponto de vista qualitativo, um número menor de níveis de cinza pode permitir que os atributos energia e entropia tenham um resultado mais interpretável, em troca da perda de resolução. A clusterização por *K-means* também será afetada pela mudança dos níveis de cinza, mas não foram feitos testes neste trabalho

utilizando outros níveis de cinza (como 8 ou 32) ou, ainda, o uso de atributos texturais com diferentes níveis de cinza no mesmo banco de dados.

A mesma abordagem poderia ser aplicada em uma porção progradacional da barreira holocênica, tanto na aplicação e análise direta dos atributos, quanto o uso da clusterização por *K-means*. Provavelmente, a resposta observada, em cada atributo em um padrão de empilhamento retrogradacional, se manterá a mesma, realçando principalmente terminações de refletores.

REFERÊNCIAS

- ABDULRAZZAQ, Z. T.; THABIT, J. M.; AL-KHAFAJI, A. J. Performance of GPR attribute analysis to detect and characterise buried archaeological targets near Ukhaidir palace, Iraq. **Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata**, v. 62, n. 1, p. 159-172, 2021. DOI: <https://doi.org/10.4430/bgta0338>. Disponível em: https://bgo.ogs.it/sites/default/files/pdf/bgta0338_Abdulrazzaq.pdf. Acesso em: 09 de abr. de 2025.
- ATAK, Sinem. K-Means Clustering vs KNN Classification (K-Nearest Neighbors). 28 de fev. de 2025. **Medium**. Disponível em: <https://medium.com/@89ataksinem/k-means-clustering-vs-knn-classification-k-nearest-neighbors-1ecde648b22f>. Acesso em: 17 de dez. de 2025.
- BARBOZA, Eduardo Guimarães; DILLENBURG, Sergio Rebello; RITTER, Matias do Nascimento; ANGULO, Rodolfo José; SILVA, Anderson Biancini da; ROSA, Maria Luiza Corrêa da Câmara; CARON, Felipe; SOUZA, Maria Cristina de. Holocene sea-level changes in southern Brazil based on high-resolution radar stratigraphy. **Geosciences**, v. 11, n. 8, p. 326, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/geosciences11080326>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3263/11/8/326>. Acesso em: 24 de nov. de 2025.
- BARBOZA, Eduardo G.; ROSA, Maria L. C. C.; HESP, Patrick A.; DILLENBURG, Sergio R. Ground-penetrating radar profiles of two Holocene regressive barriers in southern Brazil. **Journal of Coastal Research**, p. 579-583, 2009. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/257525579_Ground-penetrating_Radar_Profiles_of_Two_Holocene_Regressive_Barriers_in_Southern_Brazil. Acesso em: 24 de nov. de 2025.
- BARBOZA, Eduardo G.; ROSA, Maria L. C. C.; HESP, Patrick; DILLENBURG, Sergio; Tomazelli, Luiz; AYUP-ZOUAIN, Ricardo. Evolution of the Holocene Coastal Barrier of Pelotas Basin (Southern Brazil)-a new approach with GPR data. **Journal of Coastal Research**, p. 646-650, 2011. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/257525062_Evolution_of_the_Holocene_Coastal_Barrier_of_Pelotas_Basin_Southern_Brazil_-_a_new_approach_with_GPR_data. Acesso em: 24 de nov. de 2025.
- BITENCOURT, Volney Junior Borges de; DILLENBURG, Sergio Rebello; BARBOZA, Eduardo Guimarães; ROSA, Maria Luiza Côrrea da Câmara; MANZOLLI, Rogério Portantiolo. Padrões de empilhamento estratigráfico e seus reflexos na morfologia da barreira costeira holocênica no litoral médio do Rio Grande do Sul, Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 21, p. 1789, 2020. DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v21i3.1789>. Disponível em: <https://rbgeomorfologia.org.br/rbg/article/view/1789>. Acesso em: 3 de jul. de 2025.
- BRISTOW, Charlie; PUGH, Jonathan; GOODALL, T. I. M. Internal structure of aeolian dunes in Abu Dhabi determined using ground-penetrating radar. **Sedimentology**, v. 43, n. 6, p. 995-1003, 1996. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1996.tb01515.x>. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/229491594_Internal_Structure_of_Aeolian_Dunes_in_Abu_Dhabi_Determined_Using_Ground-Penetrating_Radar. Acesso em 11 de abr. de 2025.

CARON, Felipe. **Estratigrafia e evolução da barreira Holocênica na região costeira de Santa Vitória do Palmar, Planície Costeira do Rio Grande do Sul, Brasil**. Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências. Programa de Pós-Graduação em Geociências, Porto Alegre, 2014. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/88625>. Acesso em: 24 de nov. de 2025

CASTRO, David Lopes; JÚNIOR, João Andrade dos Reis; TEIXEIRA, Washington Luiz Evangelista; SILVA, Victor de Albuquerque Silva; FILHO, Francisco Pinheiro Lima. GROUND-PENETRATING RADAR IMAGING TECHNIQUES APPLIED IN 3D ENVIRONMENT: EXAMPLE IN INACTIVE DUNES. **Brazilian Journal of Geophysics**, v. 32, n. 2, p. 273–289, 2 jun. 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.22564/rbqf.v32i2.482>. Disponível em: <https://sbqf.org.br/revista/index.php/rbqf/article/view/482/0>. Acesso em: 24 de nov. de 2025

CATAKLI, Ayca; MAHDI, Hanan; AL-SHUKRI, Haydar. Texture analysis of GPR data as a tool for depicting soil mineralogy. **IEEE Applied Imagery Pattern Recognition Workshop (AIPR)**, p. 1-8, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/AIPR.2011.6176377>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6176377>. Acesso em: 24 de nov. de 2025.

CATUNEANU, O. **Principles of Sequence Stratigraphy**. New York: Elsevier, 2006. 386p.

CHOPRA, Satinder; MARFURT, Kurt J. **Seismic Attributes for Prospect Identification and Reservoir Characterization**. Society of Exploration Geophysicists and European Association of Geoscientists and Engineers, 2007.

COATES, Adam; NG, Andrew Y. Learning Feature Representations with K-Means. In: MONTAVON, Grégoire; ORR, Geneviève B.; MÜLLER, Klaus-Robert (Orgs.). **Neural Networks: Tricks of the Trade: Second Edition**. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012. p. 561–580.

CURRAY, J.R. Transgressions and regressions. In: MILLER, R.L. (org.). **Papers in Marine Geology**. MacMillan, New York: p. 175-203. 1964.

DANIELS, David J. (Ed.). **Ground penetrating radar**. The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom, 2004.

DANTAS, Tarsila Barbosa. **Correlação entre a morfologia e a geometria interna de dunas eólicas parabólicas, com auxílio de GPR**. 2020. Dissertação de Mestrado (Mestrado em em Geodinâmica e Geofísica), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/28715>. Acesso em 11 de abril de 2025.

DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. Ground-Penetrating Radar for High-Resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy. **Geophysical Prospecting**, v. 37, n. 5, p. 531–551, 1989. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1989.tb02221.x>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-2478.1989.tb02221.x?msockid=0d1df57ee1b862ad00bce71ae06563e5>. Acesso pela última vez em 1 de julho de 2025.

DILLENBURG, Sérgio R.; HESP, Patrick A. **Geology and Geomorphology of Holocene Coastal Barriers of Brazil**. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009. v. 107. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-44771-9>.

DILLENBURG, Sergio R.; BARBOZA, Eduardo G. The strike-fed sandy coast of Southern Brazil. **Geological Society**, London, Special Publications, v. 388, p. 333-352, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1144/SP388.16>. Disponível em: <https://www.lyellcollection.org/doi/full/10.1144/SP388.16>. Acesso em: 24 de nov. de 2025.

DILLENBURG, Sergio R.; BARBOZA, Eduardo G.; HESP, Patrick A.; ROSA, Maria Luiza C. C.; CARON, Felipe; GUADAGNIN, Felipe. The progradational Curumim barrier in southern Brazil: an archive of sea-level changes, and cyclic aeolian activity in the Holocene. **Geomorphology**, v. 448, p. 109028, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.109028>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X23004488>. Acesso em: 24 de nov. de 2025.

DILLENBURG, Sérgio R.; BARBOZA, Eduardo G.; TOMAZELLI, Luiz J.; HESP, Patrick A.; CLEROT, Luiz C. P.; AYUP-ZOUAIN, Ricardo N. The Holocene Coastal Barriers of Rio Grande do Sul. In: DILLENBURG, Sérgio R.; HESP, Patrick A. **Geology and geomorphology of holocene coastal barriers of Brazil**. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-44771-9>.

DILLENBURG, S. R.; ROY, P. S.; COWELL, P. J.; TOMAZELLI, L. J. Influence of antecedent topography on coastal evolution as tested by the shoreface translation-barrier model (STM). **Journal of Coastal Research**, p. 71-81, 2000. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/279541354_Influence_of_antecedent_topography_on_coastal_evolution_as_tested_by_the_Shoreface_Translation-Barrier_Model_STM. Acesso em: 24 de nov. de 2025.

DILLENBURG, Sergio R.; TOMAZELLI, Luiz J.; BARBOZA, Eduardo G. Barrier evolution and placer formation at Bujuru southern Brazil. **Marine Geology**, v. 203, n. 1-2, p. 43-56, 2004. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(03\)00330-X](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(03)00330-X). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002532270300330X>. Acesso em: 24 de nov. de 2025.

DUJARDIN, Jean-Remi; BANO, Maksim. Topographic migration of GPR data: Examples from Chad and Mongolia. **Comptes Rendus. Géoscience**, v. 345, n. 2, p. 73-80, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crte.2013.01.003>. Disponível em: <https://comptes-rendus.academie->

sciences.fr/geoscience/articles/en/10.1016/j.crte.2013.01.003. Acesso em: 25 de nov. de 2025.

ECONOMOU, Nikos; VAFIDIS, Antonis; BENEDETTO, Francesco; ALANI, Amir M. GPR data processing techniques. In: BENEDETTO, Francesco (ed.); PAJEWSKI, Lara (ed.). **Civil engineering applications of ground penetrating radar**, p. 281-297, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-04813-0>.

FISHER, Steven C.; STEWART, Robert R.; JOL, H. M. Processing ground penetrating radar (GPR) data. **CREWES Research Report**, v. 4, p. 1-21, 1992. Disponível em: <https://www.crewes.org/Documents/ResearchReports/1992/1992-11.pdf>. Acesso em: 11 de abr. de 2025.

FORTE, E; PIPAN, M.; CASABIANCA, D.; DI CUIA, R.; RIVA, A. Imaging and characterization of a carbonate hydrocarbon reservoir analogue using GPR attributes. **Journal of Applied Geophysics**, v. 81, p. 76-87, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.09.009>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926985111002011>. Acesso em: 11 de abr. de 2025.

GUTGESELL, Pietro; FORTE, Emanuele. Integrated GPR attribute analysis for improved thermal structure characterisation of polythermal glaciers. **Bulletin of Geophysics & Oceanography (BGO)**, v. 65, n. 2, p. 257-270, 2024. DOI: <https://doi.org/10.4430/bgo00439>. Disponível em: https://bgo.ogs.it/sites/default/files/pdf/bgo159_Gutgesell_online.pdf. Acesso em: 09 de abr. de 2025.

HALL-BEYER, Mryka. **GLCM texture tutorial**. University of Calgary, v. 21, 2007. Disponível em: <https://lapi.fi-p.unam.mx/assets/img/materias/RP/materialesPracticas/Tutorial-GLCM.pdf>. Acesso em: 11 de abr. de 2025.

HARALICK, Robert M.; SHANMUGAM, K.; DINSTEN, Its'Hak. Textural Features for Image Classification. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, v. SMC-3, n. 6, p. 610–621, nov. 1973. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSMC.1973.4309314>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4309314>. Acesso em: 24 de nov. de 2025.

HAYASHI, Naoki; SATO, Motoyuki. *F-k* Filter Designs to Suppress Direct Waves for Bistatic Ground Penetrating Radar. **IEEE transactions on geoscience and remote sensing**, v. 48, n. 3, p. 1433-1444, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2032536>. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5308353>. Acesso em: 3 de nov. de 2025.

HESP, Patrick A; DILLENBURG, Sergio R.; BARBOZA, Eduardo G.; TOMAZELLI, Luiz J.; AYUP-ZOUAIN, Ricardo N.; ESTEVES, Luciana S.; GRUBER, Nelson L. S.; TOLDO JR, Elirio E.; TABAJARA, Luiz L. C. De A.; CLEROT, Luiz C. P. Beach ridges, foredunes or transgressive dunefields? Definitions and an examination of the Torres to Tramandaí barrier system, Southern Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 77, p. 493–508, set. 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0001->

[37652005000300010](https://www.scielo.br/j/aabc/a/6JC8khpMqZG6CdmmRTRBmvH/). Disponível em: <https://www.scielo.br/j/aabc/a/6JC8khpMqZG6CdmmRTRBmvH/>. Acesso em: 1 de jul. de 2025.

JOL, Harry M. (Ed.). **Ground penetrating radar : theory and applications**. Amsterdam, Netherlands; Oxford, UK: Elsevier Science, 2009.

KANUNGO, Tapas; MOUNT, David M.; NETANYAHU, Nathan S.; PIATKO, Christine D.; SILVERMAN, Ruth; WU, Angela Y. An efficient k-means clustering algorithm: Analysis and implementation. **IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence**, v. 24, n. 7, p. 881-892, 2002.

KOPPENJAN, Steven. Ground Penetrating Radar Systems and Design. In: JOL, Harry M. (Ed.). **Ground penetrating radar : theory and applications**. Amsterdam, Netherlands; Oxford, UK: Elsevier Science, 2009.

KOYAN, Philipp. **3D attribute analysis and classification to interpret ground-penetrating radar (GPR) data collected across sedimentary environments: Synthetic studies and field examples**. Tese de Doutorado. Universität Potsdam – Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, Institut für Geowissenschaften, Potsdam, 2024. Disponível em: https://publishup.uni-potsdam.de/opus4-ubp/frontdoor/deliver/index/docId/63948/file/koyan_diss.pdf. Acesso em: 25 de nov. de 2025.

LEANDRO, Carolina G.; BARBOZA, Eduardo G.; CARON, Felipe; JESUS, Felipe A. N. GPR trace analysis for coastal depositional environments of southern Brazil. **Journal of Applied Geophysics**, v. 162, p. 1-12, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.01.002>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092698511830065X?via%3Dihub>. Acesso em: 25 de nov. de 2025.

LIMA, Leonardo G; DILLENBURG, Sergio R.; MEDEANIC, Svetlana; BARBOZA, Eduardo G.; ROSA, Maria L. C. C.; TOMAZELLI, Luiz J.; DEHNHARDT, Beatriz A.; CARON, Felipe. Sea-level rise and sediment budget controlling the evolution of a transgressive barrier in southern Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 42, p. 27–38, 1 mar. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2012.07.002>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0895981112000855>. Acesso em: 25 de nov. de 2025.

LOPES, Renato Pereira; PEREIRA, Jamil Corrêa; CARON, Felipe; DILLENBURG, Sergio Rebello; ROSA, Maria Luiza Corrêa da Câmara; BARBOZA, Eduardo Guimarães; SAVIAN, Jairo Francisco; SAWAKUCHI, André Oliveira; TATUMI, Sonica Hatsue; YEE, Márcio. Stratigraphy and evolution of the late Pleistocene (MIS 5) coastal Barrier III in southern Brazil. **Quaternary Research**, v. 119, p. 129-151, 2024. <https://doi.org/10.1017/qua.2023.67>. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/journals/quaternary-research/article/abs/stratigraphy-and-evolution-of-the-late-pleistocene-mis-5-coastal-barrier-iii-in-southern-brazil/0CD4E2DB515149C93C63165AC5E45F7B#article>. Acesso em: 25 de nov. de 2025.

MARTINHO, Caroline Thaís. **Morfodinâmica e evolução de campos de dunas transgressivos quaternários do litoral do Rio Grande do Sul**. Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências. Programa de Pós-Graduação em Geociências, Porto Alegre, 2008. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/13783>. Acesso em 1 de julho de 2025.

MARUDDANI, Baso; SANDI, Efri. The Development of Ground Penetrating Radar (GPR) Data Processing. **International Journal of Machine Learning and Computing**, v. 9, n. 6, p. 768–773, dez. 2019. DOI: <https://doi.org/10.18178/ijmlc.2019.9.6.871>. Disponível em: <https://www.ijml.org/vol9/871-PC021.pdf>. Acesso em: 25 de nov. de 2025.

MITCHUM, R. M., Jr.; VAIL, P. R.; SANGREE, J. B. Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea Level, Part 6: Stratigraphic Interpretation of Seismic Reflection Patterns in Depositional Sequences. In: PAYTON, Charles E. (Org.). **Seismic Stratigraphy — Applications to Hydrocarbon Exploration**. American Association of Petroleum Geologists, v. 26, 1977.

MORTON, Robert A. Texas barriers. In: Davis, Richards A. (ed.). **Geology of holocene barrier island systems**, 1994, p. 75-114.

NEAL, Adrian. Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. **Earth-Science Reviews**, v. 66, n. 3, p. 261–330, 1 ago. 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2004.01.004>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012825204000054>. Acesso em: 25 de nov. de 2025

OLIVEIRA, Elaine B.; BARBOZA, Eduardo G. A multi-scale assessment of shoreline changes at an undeveloped beach in southern Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 131, p. 104632, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104632>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0895981123004443>. Acesso em: 25 de nov. de 2025.

PRADO, Renato Luiz; BARBOSA, Emílio Eduardo Moreira; MENDES, Rodolfo Moreda; MARINHO, Fernando Antônio Medeiros; DE OLIVEIRA, Orlando Martini. Uso do atributo amplitude instantânea do dado GPR na avaliação do teor de umidade de solos e sedimentos. **Brazilian Journal of Geophysics**, v. 29, n. 3, p. 571-581, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.22564/rbqf.v29i3.100>. Disponível em: <https://www.sbgf.org.br/revista/index.php/rbqf/article/view/100>. Acesso em: 25 de nov. de 2025.

POSAMENTIER, H.W.; JERVEY, M.T.; VAIL, P.R. (1988). Eustatic controls on clastic deposition I — conceptual framework. In: WILGUS, C.K.; HASTINGS, B.S.; KENDALL, C.G.ST.C.; POSAMENTIER, H.W.; ROSS, C.A.; VAN WAGONER, J.C. (org.) **Sea Level Changes — An Integrated Approach**. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists (SEPM), Special Publication, v. 42, p. 110-124.

REISON, Gerald E. Transgressive barrier island and estuarine systems. In: Walker R. G. e James N. P. (eds.), **Facies models response to sea level change**, p. 179-194, 1992.

ROBINSON, Enders A.; TREITEL, Sven. **Digital imaging and deconvolution: The ABCs of seismic exploration and processing**. Geophysical References Series, Society of Exploration Geophysicists, 2008.

ROSA, Maria L. C. C.; BARBOZA, Eduardo G.; ABREU, Vitor S.; TOMAZELLI, Luiz J.; DILLENBURG, Sergio R. High-Frequency Sequences in the Quaternary of Pelotas Basin (coastal plain): a record of degradational stacking as a function of longer-term base-level fall. **Brazilian Journal of Geology**, v. 47, p. 183–207, jun. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/2317-4889201720160138>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/bjgeo/a/v56pksKMvmzXb555FNBGVcj/abstract/?lang=en>. Acesso em: 25 de nov. de 2025.

ROY, P.S.; COWELL, P.J.; FERLAND, M.A.; THOM, B.G. Wave-dominated coasts. In: CARTER, R.W.G. & WOODROFFE, C.D. (Eds.) **Coastal evolution, Late Quaternary Shoreline Morphodynamics**. Cambridge, Cambridge University Press, p.121-186, 1994.

SILVA JÚNIOR, José Romero dos Santos. **Estudo GPR de rochas carbonáticas fraturadas e carstificadas da Formação Salitre no município de Morro do Chapéu/BA**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Departamento de Geologia. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/34359>. Acesso em: 11 de abr. de 2025.

TANER, M. T.; KOEHLER, F.; SHERIFF, R. E. Complex seismic trace analysis. **Geophysics**, v. 44, n. 6, p. 1041–1063, 1 jun. 1979. DOI: <https://doi.org/10.1190/1.1440994>. Disponível em: <https://pubs.geoscienceworld.org/seg/geophysics/article/44/6/1041/68333/Complex-seismic-trace-analysis>. Acesso em: 25 de nov. de 2025.

TELFORD, W. M.; Geldart, L. P.; Sheriff, R. R. **Applied Geophysics**. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, 358. 1990.

TOLDO JR., Elirio E.; DILLENBURG, Sergio R.; IRAN, C. S.; ALMEIDA, Luiz E. S. B. Holocene Sedimentation in Lagoa dos Patos Lagoon, Rio Grande do Sul, Brazil. **Journal of Coastal Research**, v. 16, n. 3, p. 816–822, 2000. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/287832372_Holocene_sedimentation_in_Lagoa_dos_Patos_Lagoon_Rio_Grande_do_Sul_Brazil. Acesso em: 25 de nov. de 2025.

TOMAZELLI, Luiz Jose; DILLENBURG, Sergio Rebello; VILLWOCK, Jorge Alberto. Late Quaternary geological history of Rio Grande do Sul coastal plain, southern Brazil. **Brazilian Journal of Geology**, v. 30, n. 3, p. 474-476, 2000. DOI: <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2000303474476>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/228490100_Late_Quaternary_geological_hi

[story of Rio Grande do Sul coastal plain southern Brazil](#). Acesso em: 1 de jul. de 2025.

UTSI, Erica Carrick. **Ground Penetrating Radar: Theory and Practice**. Oxford Cambridge: Butterworth-Heinemann, 2017.

VILLWOCK, J. A.; TOMAZELLI, L. J.; LOSS, E. L.; DEHNHARDT, E. A.; HORN, N. O.; BACHI, F. A.; DEHNHARDT, B. A. Geology of the Rio Grande do Sul Coastal Province. In RABASSA, J. (org.) **Quaternary of South America and Antarctic Peninsula**. Balkema, Rotterdam: p. 79-97, 1986.

WATANABE, Débora Sayuri Zanchi; BARBOZA, Eduardo Guimarães; HESP, Patrick. Surface and subsurface stratigraphic record of aeolian mobility on the southernmost coast of Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 161, p. 105564, 1 ago. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2025.105564>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0895981125002263>. Acesso em: 25 de nov. de 2025.

WATANABE, Débora Sayuri Zanchi; BARBOZA, Eduardo Guimarães; ROSA, Maria Luiza Côrrea da Câmara; DILLENBURG, Sérgio Rebello; CARON, Felipe; RITTER, Matias do Nascimento; BITENCOURT, Voltey Junior Borges de; MANZOLLI, Rogério Portantio. Geomorfologia e padrões de empilhamento da barreira holocênica no Litoral Norte do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 24, n. 1, 10 mar. 2023. DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v24i1.2223>. Disponível em: <https://rbgeomorfologia.org.br/rbg/article/view/2223>. Acesso em: 3 de jul. de 2025.

WESSEL, P.; LUIS, J. F.; UIEDA, L.; SCHARROO, R.; WOBBE, F.; SMITH, W. H. F.; TIAN, D. The Generic Mapping Tools version 6. **Geochemistry, Geophysics, Geosystems**, 20, 5556–5564, 2019. <https://doi.org/10.1029/2019GC008515>

YILMAZ, Özdoğan. **Seismic data processing**. Tulsa, OK : Society of Exploration Geophysicists, 1987.

YUAN, Lin; ZHAO, Wenke; FORTE, Emanuele; FONTOLAN, Giorgio; PIPAN, Michele; ZHU, Aobo. Intelligent identification and classification of ground-penetrating radar datasets for sedimentary characterization. **CATENA**, v. 247, p. 108514, 1 dez. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108514>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0341816224007112>. Acesso em: 25 de nov. de 2025.

ZHAO, Wenke; FORTE, Emanuele; COLUCCI, Renato R.; PIPAN, Michele. **High-resolution glacier imaging and characterization by means of GPR attribute analysis**. *Geophysical Journal International*, v. 206, n. 2, p. 1366-1374, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1093/gji/ggw208>. Disponível em: <https://academic.oup.com/gji/article/206/2/1366/2606029>. Acesso em: 09 de abr. de 2025

ZHAO, Wenke; FORTE, Emanuele; PIPAN, Michele. **Texture attribute analysis of GPR data for archaeological prospection**. *Pure and Applied Geophysics*, v. 173, n.

8, p. 2737-2751, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00024-016-1355-3>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00024-016-1355-3>. Acesso em: 09 de abr. de 2025.

ZHAO, Wenke; FORTE, Emanuele; FONTOLAN, Giorgio; PIPAN, Michele.
Advanced GPR imaging of sedimentary features: Integrated attribute analysis applied to sand dunes. Geophysical Journal International, v. 213, n. 1, p. 147-156, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1093/gji/ggx541>. Disponível em: <https://academic.oup.com/gji/article/213/1/147/4757071>. Acesso em: 11 de abr. de 2025.

APÊNDICE

APÊNDICE A – PASTA CONTENDO TODAS AS FIGURAS DO PERFIL 046 EM ALTA RESOLUÇÃO, QUE FORAM APRESENTADAS NO TRABALHO.

<https://drive.google.com/drive/folders/1SlunzdIrtWLphykChp6n3Mhnh5NVryX2?usp=sharing>