UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DINÂMICA DOS OCEANOS E DA TERRA

ILSON DE OLIVEIRA PIO FILHO

ANÁLISE MULTIDIMENSIONAL DE PARÂMETROS GEOACÚSTICOS PARA CARACTERIZAÇÃO ESPACIAL DE OCORRÊNCIAS MINERAIS MARINHAS DA ELEVAÇÃO DO RIO GRANDE

Niterói

2024

ILSON DE OLIVEIRA PIO FILHO

ANÁLISE MULTIDIMENSIONAL DE PARÂMETROS GEOACÚSTICOS PARA CARACTERIZAÇÃO ESPACIAL DE OCORRÊNCIAS MINERAIS MARINHAS DA ELEVAÇÃO DO RIO GRANDE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre. Área de concentração: Geologia e Geofísica Marinha.

Orientador(a): Prof. Dr. Arthur Ayres Neto

Coorientador(a): Prof. Dr. Luciano Emidio Neves da Fonseca

Niterói

2024

ILSON DE OLIVEIRA PIO FILHO

ANÁLISE MULTIDIMENSIONAL DE PARÂMETROS GEOACÚSTICOS PARA CARACTERIZAÇÃO ESPACIAL DE OCORRÊNCIAS MINERAIS MARINHAS DA ELEVAÇÃO DO RIO GRANDE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e Terra, da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre. Área de Concentração: Geofísica

Aprovada em 29 de agosto de 2024.

BANCA EXAMINADORA

_____

Prof. Dr. Arthur Ayres Neto [Orientador]

Universidade Federal Fluminense

_____

Prof. Dr. Luciano Emidio Neves da Fonseca [Coorientador]

Universidade de Brasília

_____

Prof. Dr. Antônio Fernando Menezes Freire

Universidade Federal Fluminense

_____

Prof. Dr. Marcelo Peres Rocha

Universidade de Brasília

_____

Dr. Claudio Gino Gallea

Consultor Independente

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

P662a Pio Filho, Ilson de Oliveira
ANÁLISE MULTIDIMENSIONAL DE PARÂMETROS GEOACÚSTICOS PARA CARACTERIZAÇÃO ESPACIAL DE OCORRÊNCIAS MINERAIS MARINHAS DA ELEVAÇÃO DO RIO GRANDE / Ilson de Oliveira Pio Filho. - 2024.
75 f.: il.

Orientador: Arthur Ayres Neto.
Coorientador: Luciano Emidio Neves da Fonseca.
Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense, Instituto de Geociências, Niterói, 2024.

1. Elevação do Rio Grande. 2. Batimetria. 3. Sísmica. 4. Atributos geoacústicos. 5. Produção intelectual. I. Ayres Neto, Arthur, orientador. II. Fonseca, Luciano Emidio Neves da, coorientador. III. Universidade Federal Fluminense. Instituto de Geociências. IV. Título.

CDD - XXX

Bibliotecário responsável: Debora do Nascimento - CRB7/6368

DEDICATÓRIA

À minha eterna namorada,

Sherlyê Carvalho

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à Deus pela oportunidade de estar usando meus conhecimentos para o bem, e o crescimento e o desenvolvimento da ciência no país.

Agradeço à minha família, meus pais Ilson e Suely, e meu irmão Douglas por terem me dado forças para seguir nessa trajetória de pesquisa e mesmo quando estive estressado e ausente, me acolheram como é em um lar.

Agradeço ao meu orientador e amigo Arthur Ayres Neto pelas horas dedicadas ao meu mestrado, pelas experiências científicas e profissionais que obtive durante essa jornada e, pelas conversas amistosas que tivemos em nossos encontros e viagens.

Agradeço ao professor e coorientador Luciano Neves da Fonseca por toda a dedicação e ajuda durante a fase de estudo e desenvolvimento do projeto.

Agradeço aos membros da banca examinadora de defesa de dissertação, aos professores e aos funcionários do Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra (PPGDOT), aos amigos que fiz durante as disciplinas cursadas e durante os dias que eu passei na UFF.

Agradeço aos amigos do projeto Multisonar por toda a ajuda fornecida ao desenvolvimento do meu trabalho, sobretudo nos conhecimentos adquiridos sobre a linguagem Python.

Agradeço à Sociedade Brasileira de Geologia (SGB) e ao Plano de Levantamento da Plataforma Continental Brasileira (LEPLAC) pela disponibilização dos dados, e a Fundação de Empreendimentos Científicos e Tecnológicos (FINATEC) pela bolsa concedida durante o projeto, para o desenvolvimento do meu mestrado.

E por fim, e nem um pouco menos importante, dedico o meu mestrado a minha eterna namorada, noiva e esposa Sherlyê Francisco de Carvalho por todo apoio, carinho e cuidado comigo durante os mais de dez anos de relacionamento. Todas as conversas e conselhos vindos de você, fortaleceram minha mente para enfrentar esse período do meu mestrado. Essa vitória é nossa!

RESUMO

A margem continental brasileira corresponde a uma área equivalente a aproximadamente 50% do território nacional, onde apenas o Brasil pode explorar economicamente. Navegação, patrimônio genético e biodiversidade, recursos pesqueiros, turismo, geração de energia renovável e a exploração de recursos minerais fazem dessa faixa oceânica um fator fundamental para a economia e a soberania do país, além da estabilidade climática e a qualidade ambiental das costas brasileiras. No entanto, o grande desafio da atualidade é conhecer essas águas em toda a sua complexidade para extrair esse potencial de forma racional, sustentável e socialmente responsável. Nesse contexto, a Elevação do Rio Grande (ERG) é uma região estratégica e ainda desconhecida, devido ao escasso número de trabalhos e levantamentos feitos na área. O objetivo desse trabalho é usar dados de batimetria multifeixe e sísmica de alta-resolução adquiridos pelo Serviço Geológico Brasileiro (SGB) e pelo Projeto LEPLAC para investigar a correlação entre atributos geoacústicos e parâmetros geológicos, visando desenvolver uma ferramenta que permita extrapolar os dados geológicos espacialmente aumentando a eficiência dos levantamentos geofísicos marinhos, reduzindo custos e riscos em projetos de exploração de recursos minerais marinhos.

Palavras-chave: Elevação do Rio Grande, batimetria, sísmica, atributos geoacústicos

ABSTRACT

The Brazilian continental margin accounts for an area equivalent to approximately 50% of the national territory, where only Brazil can economically exploit. Navigation, genetic and biodiversity heritage, fishery resources, tourism, renewable energy generation, and the exploitation of mineral resources make this oceanic strip a fundamental factor for the country's economy and sovereignty, as well as for climate stability and the environmental quality of the Brazilian coasts. However, the current major challenge is to understand these waters in all their complexity to harness their potential in a rational, sustainable, and socially responsible manner. In this context, the Rio Grande Rise (RGR) is a strategic and still relatively unknown region, due to the limited number of studies and surveys conducted in the area. The objective of this study is to use multibeam bathymetry and high-resolution seismic data acquired by the Brazilian Geological Survey (SGB) and the LEPLAC Project to investigate the correlation between geoacoustic attributes and geological parameters, aiming to develop a tool that allows for the spatial extrapolation of geological data, thereby increasing the efficiency of marine geophysical surveys, reducing costs and risks in marine mineral resource exploration projects.

Keywords: RGR, bathymetry, seismic, geoacoustic attributes

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Figura 1: Geomorfologia da América do Sul e do Oceano Atlântico Sul. Em destaque, e na figura ampliada, a Elevação do Rio Grande Ocidental, na qual foi realizada o trabalho. Em verde, a linha da atual Zona Exclusiva Econômica e, em vermelho, o aumento proposto pelo Brasil.

Figura 2: Figura 2: Localização na Elevação do Rio Grande dos dados levantados pelo *Deep Sea Drilling Project* (DSDP) *Leg* 72 (preto) e pelo Plano de Levantamento da Plataforma Continental Brasileira (LEPLAC) (vermelho), onde é possível ver o poço 516F. Fonte: Praxedes e De Castro, 2020.

Figura 3: Modelo proposta para evolução geológica da Elevação do Rio Grande. Fonte: Praxedes *et al.*, 2019.

Figura 4: Figura 4: Exemplos de crostas ferromanganesíferas da Elevação do Rio Grande. Legenda: *non-phosp. crust* = crosta não-fosforilada; *phosp. crust* = crosta fosforilada; *phosp. lens* = lentes de fósforo. Fonte: Benites *et al*. (2020)

Figura 5: Figura 5: Traço sísmico complexo. Em vermelho, o traço real; em preto, o traço imaginário; e em verde, o traço sísmico complexo. Fonte: Souza (2016).

Figura 6: Traço sísmico (wiggles) demostrando que os valores de amplitude são envelopados, pois apenas é apresentado os valores positivos (preenchimento em amarelo).

Figura 7: Figura 7: NHpHo Vital de Oliveira (H39), utilizado na campanha de levantamento dos dados. Fonte: marinha.mil.br

Figura 8: Exemplo de geometria de aquisição sísmica monocanal. Fonte: NOAA Ocean Exploration

Figura 9: Perfilador de sub-fundo SBP 120. Fonte: Kongsberg

Figura 10: Levantamento com ecobatímetro multifeixe, mostrando a eficiência e a cobertura desse tipo de equipamento. Fonte: internet.

Figura 11: Figura 11: Princípio fundamental da medição e da interpretação do retroespalhamento acústico. O padrão de faixa (A) das ondas incidentes (amarelo – C, E) geram ondas de reflexão (azul escuro – E), espalhamento (azul claro – E), retroespalhamento (vermelho – C, D, E, F) e transmissão (verde – E). A intensidade

do eco do retroespalhamento depende do ângulo de incidência da onda no fundo. Fonte: Lamarche e Lurton (2017).

Figura 12: Ecobatímetro EM 122. Fonte: Kongsberg

Figura 13: Geometria completa do levantamento de SBP. No detalhe, a região da ERGO que foi estudada. As linhas foram escolhidas delimitadas dentro do polígono e por domínio descrito por Lisniowski (2020).

Figura 14: Figura 13: Batimetria utilizada para a correlação com as linhas sísmicas. Em cinza, as linhas escolhidas para o estudo. Fonte: Modificado de Lisniowski (2020).

Figura 15: *Plot* de retroespelhamento acústico e amplitude sísmica da linha 640.

Figura 16: *Plot* de declividade e amplitude sísmica para a linha 640.

Figura 17: Perfis de batimetria e amplitude sísmica da linha 640.

Figura 18: *Plot* de profundidade e amplitude sísmica da linha 640.

Figura 19: *Plot* de retroespalhamento acústico e amplitude sísmica da linha 1763.

Figura 20: *Plot* de declividade e amplitude sísmica da linha 1763.

Figura 21: Perfis de amplitude sísmica e profundidade da linha 1763

Figura 22: *Plot* de profundidade e amplitude sísmica da linha 1763.

Figura 23: *Plot* de retroespalhamento acústico e amplitude sísmica da linha 1776.

Figura 24: *Plot* de declividade e amplitude sísmica da linha 1776.

Figura 25: Perfis de profundidade e amplitude sísmica da linha 1776.

Figura 26: *Plot* de profundidade e amplitude sísmica da linha 1776.

Figura 27: *Plot* de retroespalhamento acústico e amplitude sísmica da linha 1777.

Figura 28: *Plot* de declividade e amplitude sísmica da linha 1777.

Figura 29: Perfis de profundidade e amplitude sísmica da linha 1777.

Figura 30: *Plot* de profundidade e amplitude sísmica da linha 1777.

Figura 31: *Plot* de retroespalhamento acústico e amplitude sísmica da linha 1871.

Figura 32: *Plot* de declividade e amplitude sísmica da linha 1871.

Figura 33: Perfis de profundidade e amplitude sísmica da linha 1871.

Figura 34: *Plot* de profundidade e amplitude sísmica da linha 1871.

Figura 35: *Plot* de retroespalhamento acústico e amplitude sísmica da linha 1884.

Figura 36: *Plot* de declividade e amplitude sísmica da linha 1884.

Figura 37: Perfis de profundidade e amplitude sísmica da linha 1884.

Figura 38: *Plot* de profundidade e amplitude sísmica da linha 1884.

Figura 39: *Plot* de retroespalhamento acústico e amplitude sísmica da linha 1890.

Figura 40: *Plot* de declividade e amplitude sísmica da linha 1890.

Figura 41: Perfis de profundidade e amplitude sísmica da linha 1890.

Figura 42: *Plot* de profundidade e amplitude sísmica da linha 1890.

Figura 43: Correlações entre as linhas para os valores de retroespalhamento acústico e amplitude sísmica.

Figura 44: Correlações entre as linhas para os valores de profundidade e amplitude sísmica.

Figura 45: Correlações entre as linhas para os valores de profundidade e amplitude sísmica.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Linhas utilizadas no trabalho.

Tabela 2: Tabela com valores de coeficiente de correlação (r) para as linhas e domínios sedimentares segundo Lisniowski. Em vermelho, valor para hipótese nula (H0) foi aceita.

LISTA DE ABREVIATURAS

ERG – Elevação do Rio Grande

ERGL – Elevação do Rio Grande Oriental

ERGO – Elevação do Rio Grande Ocidental

LCS – Lineamento Cruzeiro do Sul

Mm/Ma – Milímetros por milhão de anos

M/s – Metros por segundo

SBP – *Sub Bottom Profiler* / Perfilador de Sub-fundo

MBES – Ecobatímetro Multfeixe

Kg/s.m – Kilograma sobre segundo vezes metro

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....1
1.1. OBJETIVOS.....2
2. ÁREA DE ESTUDO.....3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....5
3.1. CONTEXTO GEOLÓGICO.....5
3.2. CROSTAS FERROMANGANESÍFERAS.....8
3.3. ONDAS ACÚSTICAS.....9
3.4. AMPLITUDE SÍSMICA.....10
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....13
4.1. PERFILADOR DE SUB-FUNDO.....13
4.2. BATIMETRIA MULTIFEIXE.....14
4.3. RETROESPALHAMENTO ACÚSTICO.....15
4.4. REGRESSÃO LINEAR.....17
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....19
5.1. LINHA 640.....21
5.2. LINHA 1763.....24
5.3. LINHA 1776.....27
5.4. LINHA 1777.....30
5.5. LINHA 1871.....33
5.6. LINHA 1884.....37
5.7. LINHA 1890.....40
5.8. RETROESPALHAMENTO ACÚSTICO X AMPLITUDE SÍSMICA.....45
5.9. AMPLITUDE SÍSMICA X PROFUNDIDADE/DECLIVIDADE.....47
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....50
REFERÊNCIAS.....51
APÊNDICE I.....53
APÊNDICE II.....60

1. INTRODUÇÃO

Os oceanos ainda são fonte de grandes mistérios para a humanidade. Apesar dos esforços e a incessante corrida tecnológica, ainda existem muitos desafios acerca da exploração submarina. Segundo Cordes e Levin (2018), cerca de apenas 5% assoalho oceânico foi mapeado com o nível de detalhamento igual aos mapas de alta resolução das superfícies da Lua e de Marte. Diversos são os fatores que dificultam maiores avanços nas pesquisas sobre os oceanos, como sua extensão (cerca de 70% do planeta é coberto por massas de água), suas grandes profundidades, suas altas pressões e outros parâmetros que limitam a compreensão total do seu funcionamento.

Conhecer a composição sedimentar e propriedades físicas do leito oceânico é um dos maiores desafios para alguns setores e atividades, como a instalação de equipamentos para exploração mineral, engenharia submarina e meio ambiente, devido aos altos custos envolvidos na aquisição desses dados. A geofísica é uma ciência que auxilia no estudo do fundo e sub-fundo marinho, pois ela utiliza ondas acústicas para gerar seus dados, diminuindo a necessidade de intervenção direta no substrato marinho.

A exploração mineral submarina cada vez mais se apresenta como uma alternativa a prospecção de minerais que estão cada vez mais escassos na parte emersa do planeta. Estudos (Sousa, 2019; Benites *et al*., 2020; Ayres Neto *et al*., 2020) apontam para a presença de alguns minerais em crostas polimetálicas na Elevação do Rio Grande (ERG), que está a cerca de 1000 km da costa brasileira. A ERG é um sistema de planaltos e cadeias de montes submarinos localizada no Oceano Atlântico Sul, dividida em dois setores: a ERGO (Elevação do Rio Grande Ocidental) e a ERGL (Elevação do Rio Grande Oriental).

A exploração desses minerais é de relevante interesse nacional, uma vez que poderiam alavancar o desenvolvimento tecnológico do país. Essa região já é atualmente considerada como território brasileiro, visto que o Brasil já depositou o pedido na CNUDM o pedido de incorporação. Entretanto, esse pedido pode ser negado, uma vez que existe a necessidade da comprovação que a ERG tem ligação geológica com o continente.

A presente dissertação de mestrado faz parte do projeto 6653, intitulado “Novas tecnologias de processamento acústico para o mapeamento geológico e caracterização dos fundos marinhos: estudo de caso no Alto Rio Grande”, cujo o grande objetivo é estudar e compreender a dinâmica sedimentar da região.

Por isso, este trabalho visa estudar a correlação entre a sedimentação da Elevação do Rio Grande com as ondas acústicas, a fim de, posteriormente, treinar uma inteligência artificial para reconhecimento do substrato do fundo marinho a partir de atributos acústicos. Para isso, serão usados dados de Perfilador de Sub-fundo e Ecobatímetro – os dados de batimetria foram retirados de Lisniowski (2020) – e serão feitas correlações entre as respostas de cada equipamento, para ver se é possível entender a disposição dos sedimentos com base nessas informações.

1.1. OBJETIVOS

O objetivo principal desse trabalho é aprofundar o estudo das respostas acústicas dos materiais que compõem o fundo marinho a diferentes métodos geofísicos marinhos, que atuam em diferentes escalas e frequências, visando o desenvolvimento de uma ferramenta para o mapeamento espacial da geologia do fundo marinho.

Os objetivos específicos são:

- Adquirir dados de amplitude sísmica a partir de dados de *sub-bottom profiler*.
- Avaliar a correlação da amplitude sísmica com valores de *backscatter*, profundidade e gradiente do fundo.
- Estudar a variação dessas propriedades acústicas com o ambiente geológico do fundo marinho.

2. ÁREA DE ESTUDO

Estruturas localizadas na bacia oceânica e que não tem atividade sísmica são conhecidas como estruturas assísmicas (Gamboa e Rabinowitz, 1984). A Elevação do Rio Grande (ERG) é um extenso planalto assísmico que se eleva até 4000m a partir do assoalho oceânico. Localizada no Oceano Atlântico Sul, mais precisamente no lado ocidental, ela está a aproximadamente 1000 km da costa brasileira, e juntamente com a Cadeia de Walvis (localizada à leste da Cadeia Mesoceânica), eles formam um sistema de *guyots*, montes submarinos e cordilheiras, sendo umas das feições mais proeminentes do Oceano Atlântico (Baker, 1982) (Figura 1). Com mais de 3000 km2, a ERG está localizada entre as latitudes 28º e 34º S e as longitudes 28º e 40º W e é descrita como sendo divididas em duas partes: Elevação do Rio Grande Ocidental (ERGO) e Elevação do Rio Grande Oriental (ERGL) (Gambôa e Rabinowitz, 1984).

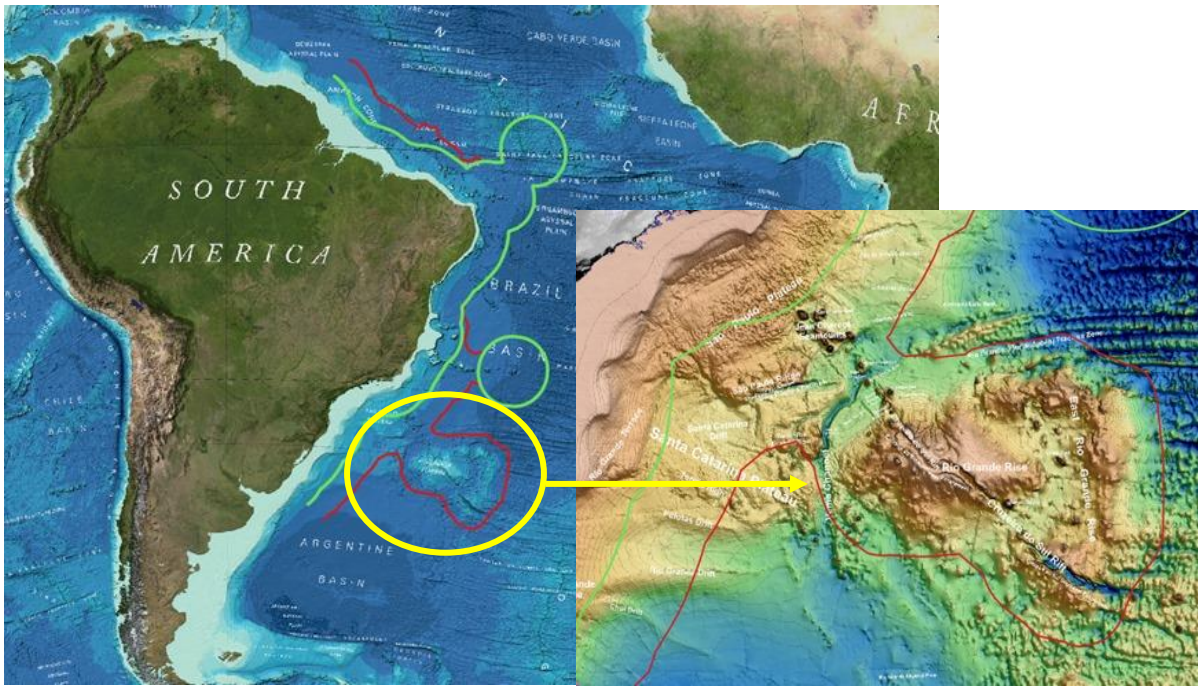

Figura 1: Geomorfologia da América do Sul e do Oceano Atlântico Sul. Em destaque, e na figura ampliada, a Elevação do Rio Grande Ocidental, na qual foi realizada o trabalho. Em verde, a linha da atual Zona Exclusiva Econômica e, em vermelho, o aumento proposto pelo Brasil.

A ERGO é uma área elevada com formato elíptico e o topo dela tem aproximadamente 2000 m de profundidade média, podendo chegar a 700 m de profundidade em algumas regiões mais elevadas, com a presença de cristas e *guyots*.

Essa feição é cortada pelo Lineamento Cruzeiro do Sul (LCS), um rift abortado que está associado a um evento tectono-magmático que atingiu a região. Ainda segundo Gambôa e Rabinowitz (1984), a ERGL tem o comprimento de 600 km e tem uma direção N-S, paralela à Dorsal Mesoatlântica. Essa feição é limitada ao norte e ao Sul por zonas de fraturas. As duas porções da Elevação do Rio Grande são separadas por uma extensa planície abissal com profundidades acima de 4000m.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. CONTEXTO GEOLÓGICO

Ainda não existe um consenso sobre a gênese da Elevação do Rio Grande. Desde o início da década de 1960, diversos artigos (Dietz e Holden, 1970; Barker *et al*., 1983; Gamboa e Rabinowitz, 1984; Mohriak *et al*., 2010; Galvão e De Castro, 2017) tentam explicar sua formação.

Os principais dados sobre a ERG provêm dos levantamentos sísmicos e de poços perfurados durante a *Deep Sea Drilling Project* (DSDP), sendo os principais dados de rocha obtidos na perfuração do poço 516F (figura 2), localizado ao norte da ERG oriental, próximo aos poços 22 e 357. Esse poço perfurou 1252 m de sedimentação carbonática pelágica e 19 m do embasamento basáltico. Baker (1983) e Gamboa e Rabinowitz (1984) interpretaram e estudaram esses dados e desenvolveram a história geológica da ERG.

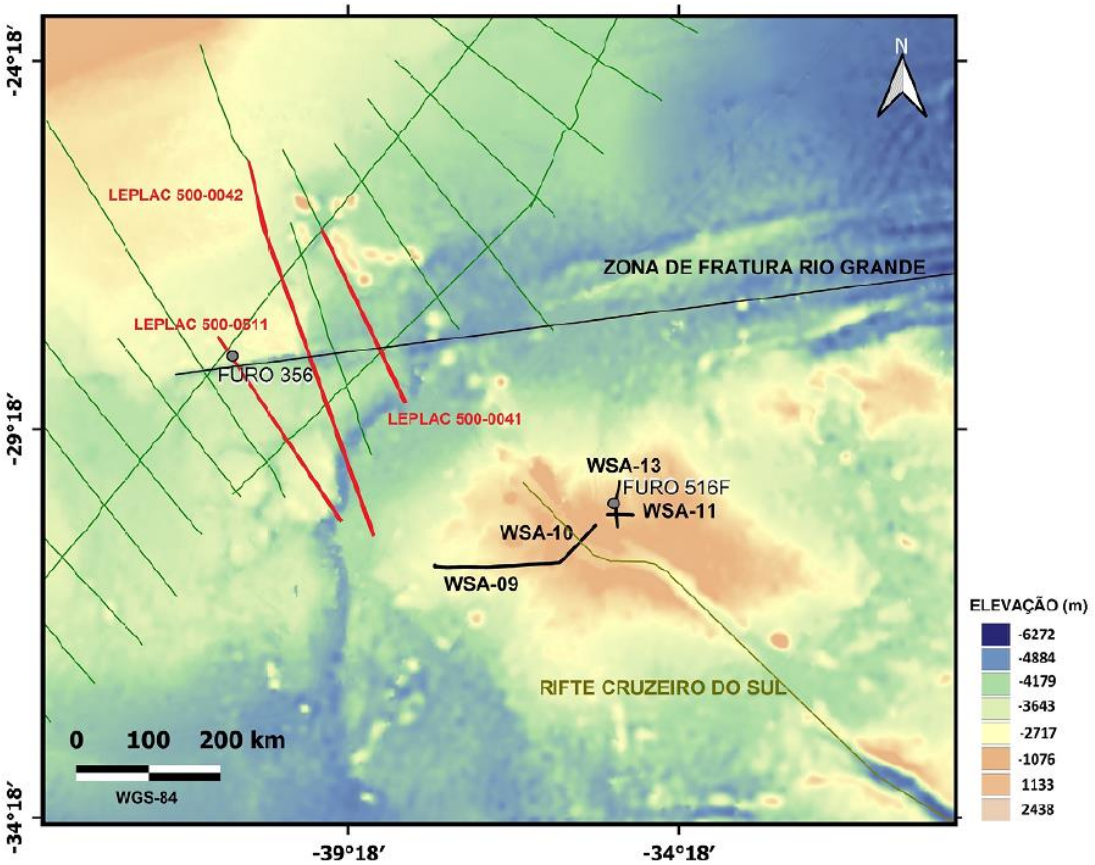

Figura 2: Localização na Elevação do Rio Grande dos dados levantados pelo *Deep Sea Drilling Project* (DSDP) *Leg* 72 (preto) e pelo Plano de Levantamento da Plataforma Continental Brasileira (LEPLAC) (vermelho), onde é possível ver o poço 516F.

Fonte: Praxedes e De Castro, 2020.

Alguns autores sugerem histórias geológicas distintas entre as duas porções da ERG. Thiede (1977) sugere que a ERGO foi uma ilha extensa situada 2 km acima do nível do mar entre o Santoniano-Campaniano e submergiu de forma lenta. O embasamento do poço tem idade do Santoniano, aproximadamente 85 Ma. Entretanto, os dados sísmicos e os dados de perfuração sugerem que os montes e *guyots* são feições mais recentes (Eoceno). Gambôa e Rabinowitz (1984) indicam que a ERGO não esteve exposta acima do nível do mar devido à presença de basaltos observados por Milliman (1983), sugerindo um ambiente de águas rasas.

Durante o Eoceno, uma anomalia termal teria afetado a crosta da ERGO, iniciando a morfologia atual da região (figura 3). Após uma série de ocorrências de vulcanismo, incluindo uma porção da Elevação que ficou exposta, ela foi erodida pela ação das ondas. Devido ao vulcanismo e a subsidência da região, a Elevação do Rio Grande Ocidental foi muito afetada por falhamentos e estruturas pré-existentes foram inclinadas e os sedimentos sofreram diversos eventos de instabilidade.

Em divergência, a ERGL é muito menos estudada e possui uma escassez de dados se comparada a ERGO. Os dados de Gambôa e Rabinowitz (1984) sugerem que a formação da Elevação do Rio Grande Oriental é contemporânea a Cadeia de Walvis, sendo resultado do mesmo processo.

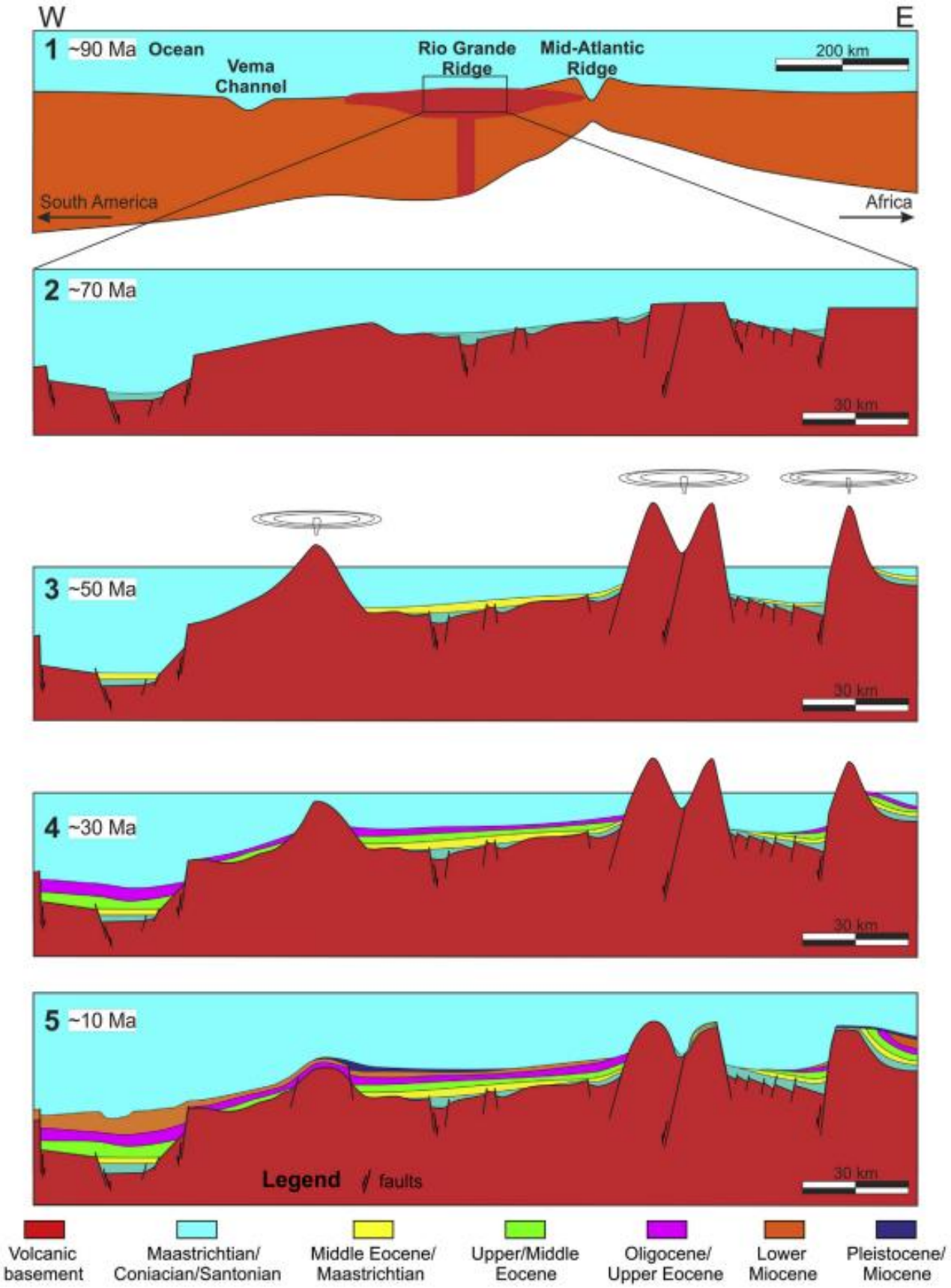

Figura 3: Modelo proposta para evolução geológica da Elevação do Rio Grande. Fonte: Praxedes *et al.*, 2019.

3.2. CROSTAS FERROMANGANESÍFERAS

As acumulações de óxidos e hidróxidos de ferro e manganês são conhecidas desde a Antiguidade e ocorrem em todos os ambientes aquáticos do mundo (Palma e Pessanha, 2001). De acordo com Benites *et al.* (2020), crostas ferromanganesíferas são rochas sedimentares químicas e são formados pela precipitação de oxi-hidróxido de ferro e óxido de manganês diretamente da água do mar sobre o fundo oceânico, normalmente encontradas em áreas profundas. Elas têm uma taxa de crescimento notavelmente pequena, da ordem de 1-5 mm/Ma. (Figura 4)

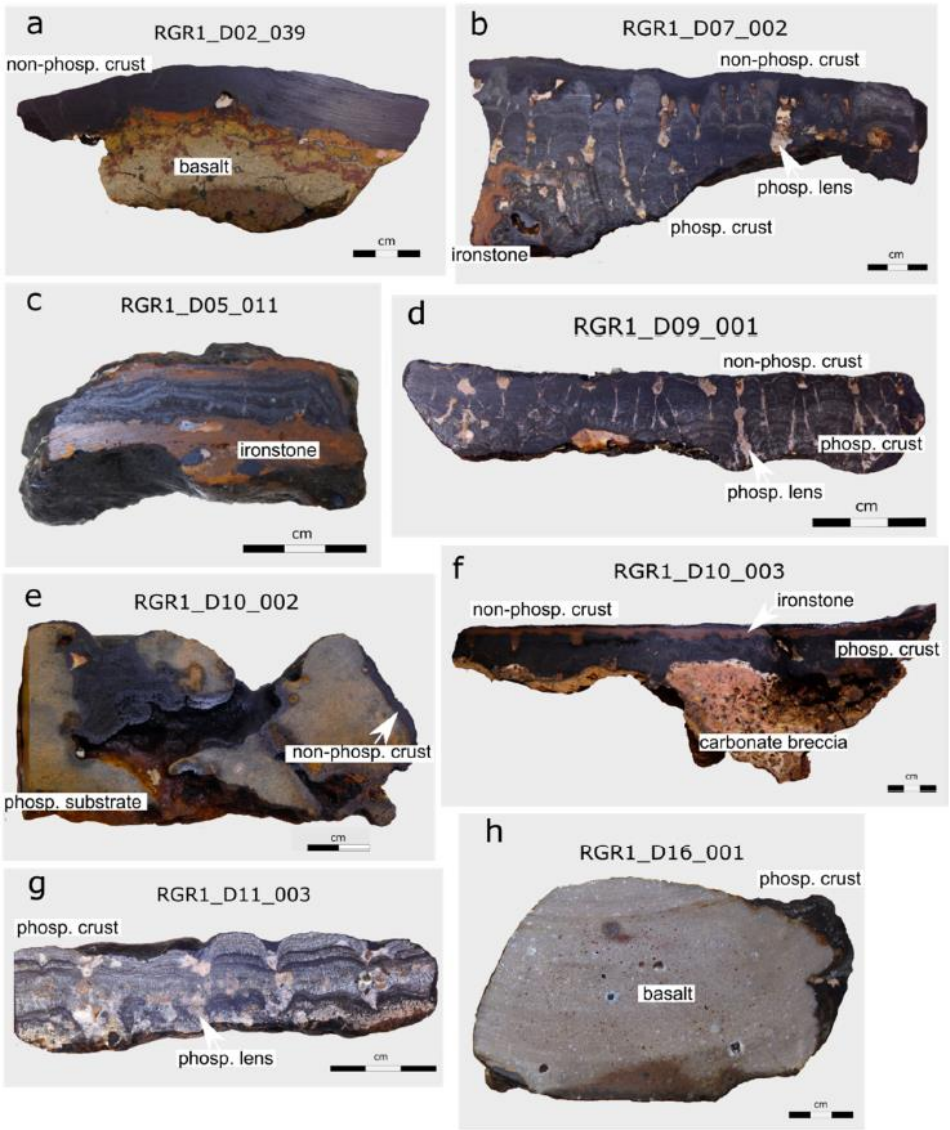

Figura 4: Exemplos de crostas ferromanganesíferas da Elevação do Rio Grande.

Legenda: *non-phosp. crust* = crosta não-fosforilada; *phosp. crust* = crosta fosforilada; *phosp. lens* = lentes de fósforo.

Fonte: Benites *et al*. (2020)

Pela necessidade de um substrato duro para sua formação, as crostas são normalmente encontradas em regiões entre 1000 e 3000 m de profundidade, longe de áreas com sedimentação terrígena, sendo mais comuns em montes submarinos, elevações e nas cordilheiras mesoceânicas. Um fator de grande importância para o desenvolvimento das crostas polimetálicas é a circulação oceânica (Palma e Pessanha, 2001), pois ela impede que essas áreas sejam cobertas por sedimentos durante milhões de anos, sendo possível o crescimento dessa sedimentação química em um ambiente pouco perturbado.

Pesquisas recentes (Benites *et al*., 2020, Guan *et al*., 2017, Ren *et al*., 2023) apontam que as crostas ferromanganesíferas são ricas em Co, Ni, Cu, Tl, Te, Nb, Zn, além de Fe e Mn, e elementos terras raras. Esses elementos são muito utilizados nos setores de tecnologia e eletrônica, automotivo, energia renovável e na área da Defesa, por exemplo. Além desses fatores, devido à sua taxa muito baixa de crescimento, as crostas podem ser objetos de estudo valorosos para entender a evolução dos oceanos.

A ERG se apresenta no Brasil como uma área de possível mineração submarina dessas crostas. Porém, devido ao alto custo, limitações tecnológicas e questões ambientais, além da escassez de estudos que comprovem a viabilidade econômica do projeto, ainda levará tempo para o início dessa nova exploração.

3.3. ONDAS ACÚSTICAS

O sensoriamento remoto acústico é o principal meio de investigação do fundo do mar, pois os métodos convencionais usados na superfície terrestre são eficientes na coluna d’água devido à atenuação das ondas eletromagnéticas na coluna d’água. (Ayres Neto, 2000)

As principais ondas acústicas utilizadas nos estudos do fundo e subfundo oceânico são as ondas P (ondas primárias) e as ondas S (ondas secundárias), e suas velocidades são regidas pelas leis definidas por Schön (1996):

$$V_p = \sqrt{\frac{k+\frac{4}{3}\mu}{\rho}} \text{ e } V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

Onde ρ: é a densidade do meio em que a onda se propaga, κ é a módulo de compressibilidade e μ é a módulo de rigidez. O módulo de rigidez da água é igual a zero e por isso, a velocidade da onda S na coluna d'água é zero. A velocidade média da onda P na água é aproximadamente 1500 m/s.

Os componentes básicos de uma onda acústica são a frequência, o número da onda e a amplitude. Frequência pode ser definida como o número de vezes que uma onda de pressão passa em um determinado ponto e é medida em Hz. O número de onda é da distância entre dois picos da onda sonora e a amplitude mede a intensidade do retorno da onda após a interação com o alvo. A amplitude é um atributo sísmico e será desenvolvida nesse trabalho nas próximas seções.

3.4. AMPLITUDE SÍSMICA

Segundo Taner (1999) e Subrahmanyam (2008), um atributo sísmico é toda e qualquer informação medida, computada ou quantidade retirada de um dado sísmico. Desde os anos 1970, diversos atributos foram criados ou calculados com o objetivo de desenvolver um melhor entendimento sobre o sinal sísmico.

O sinal sísmico ou o traço sísmico é definido como a componente real x(t), que neste caso é o traço sísmico convencional, e de uma componente imaginária y(t), qual é a transformada de Hilbert de x(t). Quando os traços são somados, o resultado é o traço sísmico complexo z(t):

$$z(t) = s(t) + ih(t)$$

A amplitude sísmica foi um dos primeiros atributos calculados no traço sísmico, representado na figura 5. Também conhecida como Amplitude Instantânea, ou Envelope do traço, ela pode ser calculada a partir do traço sísmico complexo pela fórmula (White, 1991):

$$A(t) = \sqrt{s(t)^2 + h(t)^2}$$

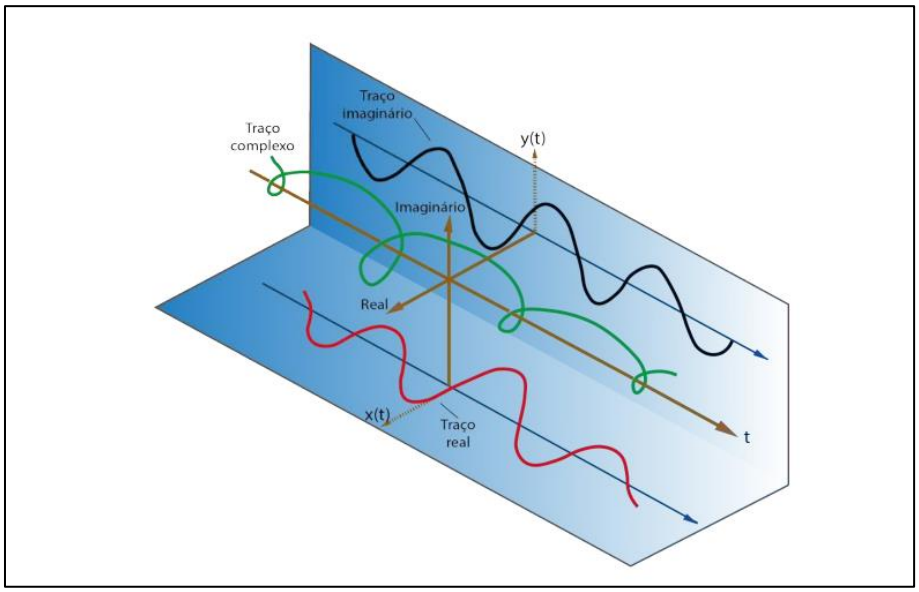

Figura 5: Traço sísmico complexo. Em vermelho, o traço real; em preto, o traço imaginário; e em verde, o traço sísmico complexo. Fonte: Souza (2016).

onde A(t) é o Envelope, s(t) é o sinal registrado/parte real e h(t) é a transformada de Hilbert de s(t). O Envelope, por ser independente da fase e sensível a alterações da impedância acústica, enfatiza mudanças de amplitude da seção sísmica, que estão ligados ao tipo de substrato presente na interface água/sedimento, sendo um excelente método para determinar o tipo de fundo marinho.

Apesar de conter o traço sísmico completo, ou seja, tanto a parte real como a parte complexa do dado, o Envelope é uma função positiva, o que significa que seu valor numérico é sempre positivo.

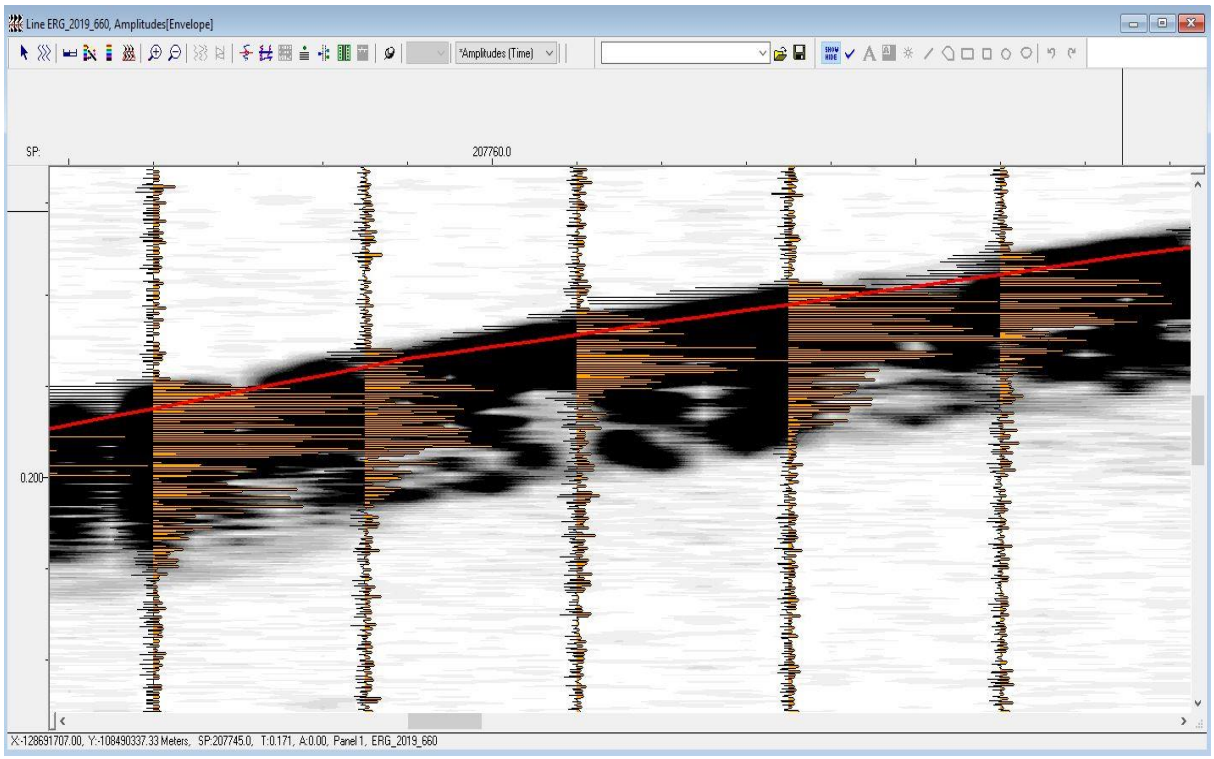

Figura 6: Traço sísmico (wiggles) demostrando que os valores de amplitude são envelopados, pois apenas é apresentado os valores positivos (preenchimento em amarelo).

4. MATERIAS E MÉTODOS

Os dados para essa pesquisa foram adquiridos entre 08 e 30 de janeiro de 2019, durante a campanha a bordo do Navio de Pesquisa Oceanográfico (NPqHo) Vital de Oliveira (figura 6), da Marinha do Brasil. Essa expedição teve como objetivo a coleta de dados e informações de sísmica rasa, batimetria, correntometria e perfilagem de parâmetros físicos da água do mar, para sustentar a defesa da expansão do mar territorial brasileiro junto à Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar (CNUDM).

Figura 7: NHpHo Vital de Oliveira (H39), utilizado na campanha de levantamento dos dados.
Fonte: marinha.mil.br

4.1. PERFILADOR DE SUB-FUNDO

Uma aquisição sísmica depende da interação entre ondas elásticas e sedimento. Na figura 7, pode-se ver a geometria de uma aquisição. Ela obedece a Lei de Snell, em que se tem a transmissão do sinal, a reflexão pelo fundo e sub-fundo, e o retorno do sinal para o equipamento, com ângulo de incidência igual ao ângulo de reflexão. Nesse caso, considera-se, para efeitos práticos, como incidência normal ao fundo marinho. Ao longo desse caminho, o sinal sofre atenuação na coluna d’água e

no momento de reflexão com o fundo marinho, ou seja, não é possível obter 100% de retorno do sinal.

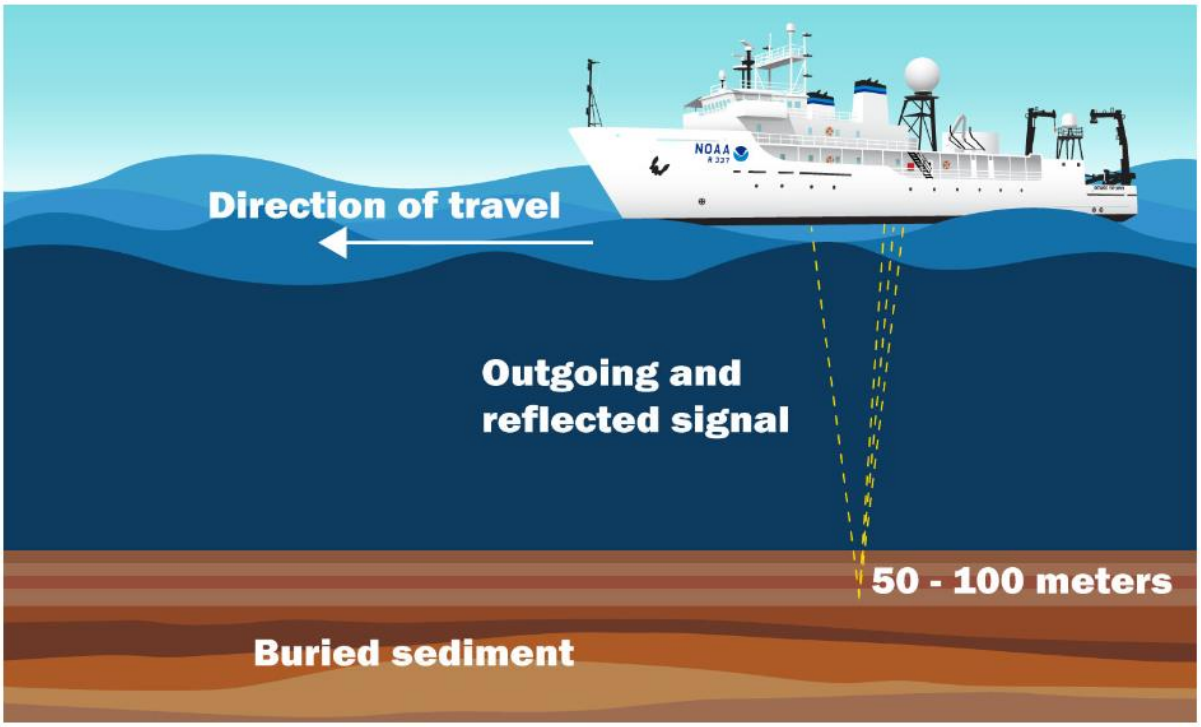

Figura 8: Exemplo de geometria de aquisição sísmica monocal. Fonte: NOAA Ocean Exploration

Os perfiladores de sub-fundo, do inglês *Sub Bottom Profiler* (SBP), são equipamentos amplamente utilizados na indústria e na academia como método para investigação de fundo e subfundo marinho. Essa técnica geofísica é rápida e não invasiva, baseada na propagação das ondas acústicas através da coluna d'água e das camadas sedimentares. (Souza, 2022)

O perfilador de sub-fundo é uma fonte de alta frequência, normalmente operando com sinais que variam entre 2 e 12 kHz. Estas fontes são chamadas ressonantes e utilizam as propriedades piezo-elétricas de alguns cristais para a geração do sinal. As fontes ressonantes são, ao mesmo tempo, transmissoras e receptoras, diferentemente de outras fontes sísmicas. Segundo Ayres Neto (2000), o sinal desse tipo de equipamento pode chegar até 50 metros abaixo do fundo marinho dependendo do sedimento.

O perfilador de sub-fundo é considerado uma sísmica monocanal e, apesar de o produto ser um dado envelopado, é possível retirar atributos *como* fase e frequência. Porém, neste trabalho, optou-se apenas pela correlação com os dados de amplitude.

Neste trabalho, o perfilador de sub-fundo usado foi o SBP 120 da Kongsberg, cuja forma da onda transmitida é o pulso *chirp* (figura 8). Ele tem um range de frequências entre 2,5 kHz e 7,0 kHz, tendo aproximadamente 225 m de alcance vertical máximo. Foram levantadas mais de 2000 linhas sísmicas durante a expedição e o *software* utilizado para a aquisição foi o Topas MMI3.1.

Figura 9: Perfilador de sub-fundo SBP 120. Fonte: Kongsberg

Posteriormente, as linhas sísmicas foram interpretadas e realizado o *picking* das amplitudes dos traços sísmicos, que pode ser feito de duas formas: manual ou automático. A seleção foi feita de maneira manual, selecionando os valores mais próximos do primeiro retorno, para uma maior precisão dos dados.

4.2. BATIMETRIA MULTIFEIXE

A batimetria é a ciência que estuda a extensão da coluna d'água até o solo de um corpo aquático, ou seja, ela mede a profundidade do oceano em relação ao nível do mar. A profundidade é calculada medindo-se o tempo necessário para que o pulso sonoro, emitido por um transdutor, percorra a coluna de água até encontrar o fundo marinho, seja refletido e seu sinal de retorno seja registrado por um receptor

(Lisniowski, 2020). Para esse cálculo, é assumida a velocidade média do som na água de 1500 m/s.

Ecobatímetros multifeixes (MBES) são sistemas amplamente usados para aquisição de dados batimétricos (figura 10). Eles possibilitam uma grande eficiência em levantamentos de grandes áreas e possibilitam a cobertura total do fundo marinho. Os MBES enviam um pulso acústico ao longo de uma larga faixa perpendicular à direção de navegação do navio. (Parnum *et al.*, 2004)

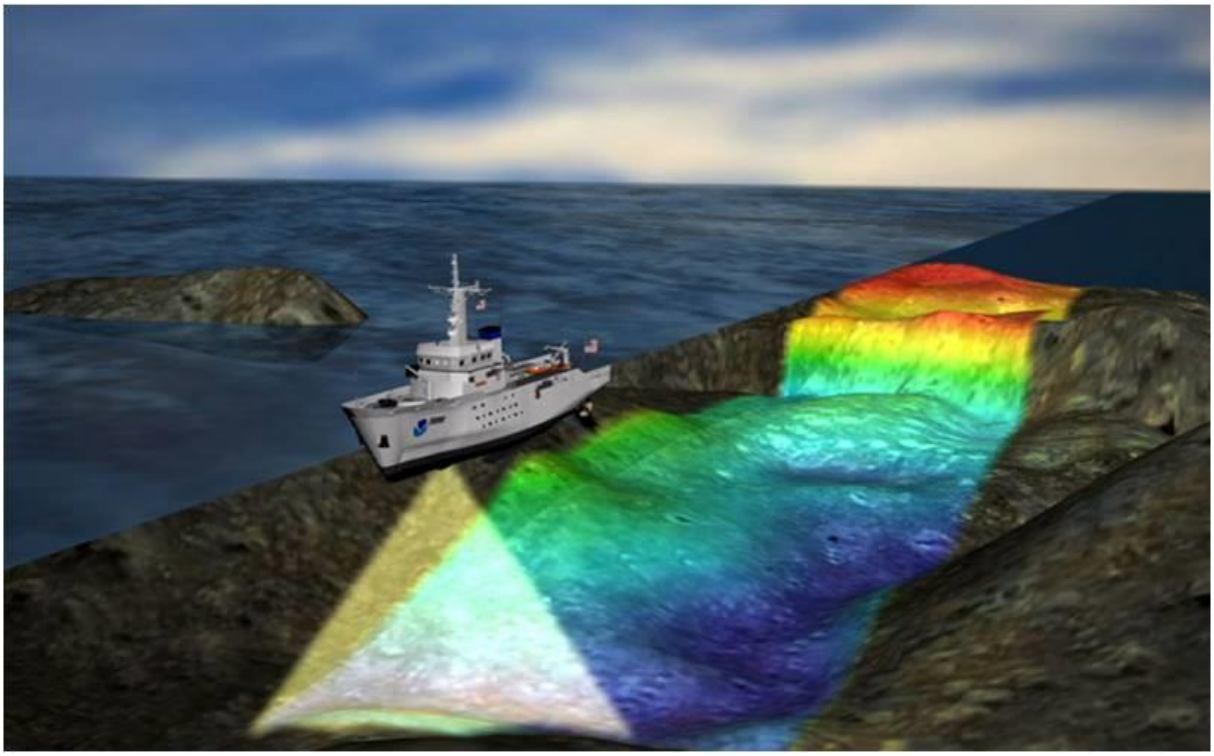

Figura 10: Levantamento com ecobatímetro multifeixe, mostrando a eficiência e a cobertura desse tipo de equipamento. Fonte: internet.

4.3. RETROESPALHAMENTO ACÚSTICO - *BACKSCATTER*

O Retroespalhamento Acústico é um subproduto da batimetria. Ele é a força da energia acústica refletida pelo sedimento marinho (Pinho *et al.*, 2016). A taxa de energia refletida é determinada pelo coeficiente de reflexão, que está relacionada com a impedância acústica do sedimento (MacLenann & Simmonds, 1992). A figura 11 explica os princípios da aquisição dos dados do *backscatter*.

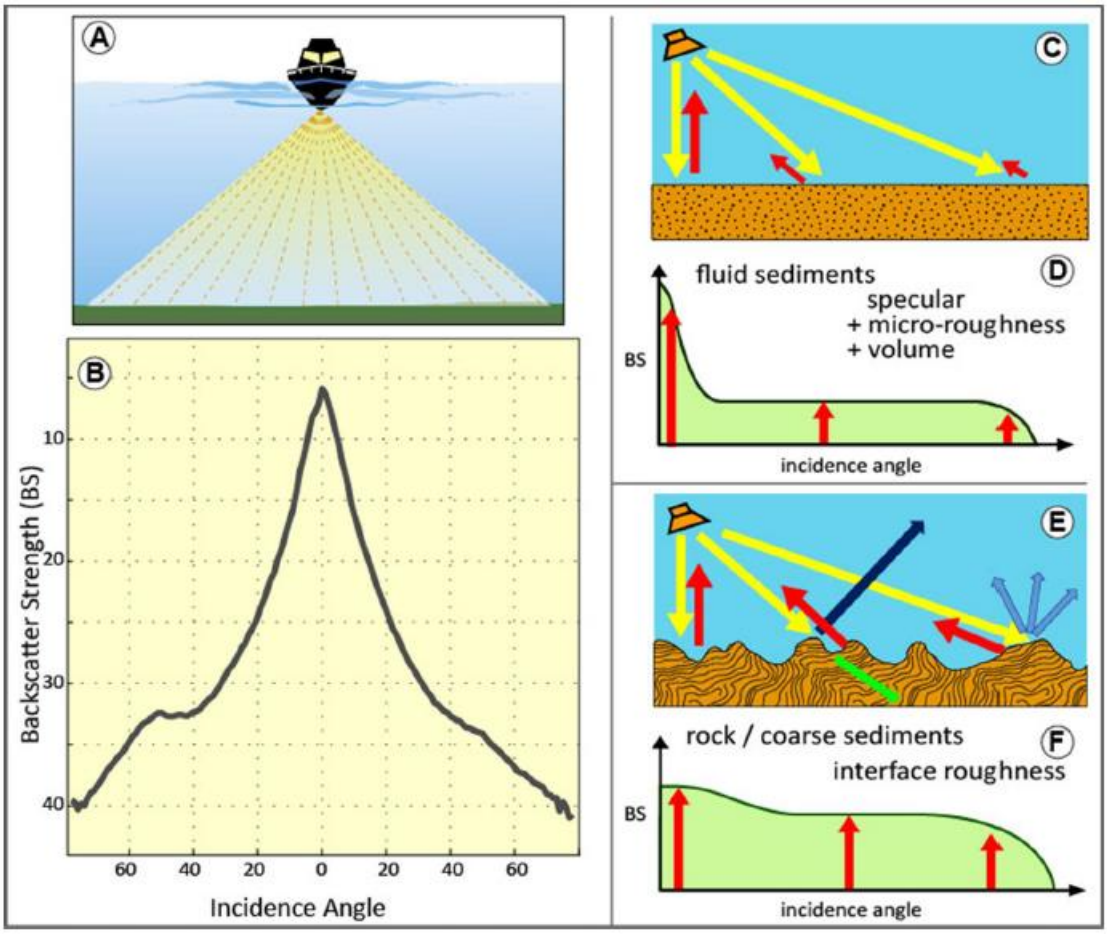

Figura 11: Princípio fundamental da medição e da interpretação do retroespalhamento acústico. O padrão de faixa (A) das ondas incidentes (amarelo – C, E) geram ondas de reflexão (azul escuro – E), espalhamento (azul claro – E), retroespalhamento (vermelho – C, D, E, F) e transmissão (verde – E). A intensidade do eco do retroespalhamento depende do ângulo de incidência da onda no fundo. Fonte: Lamarche e Lurton (2017).

Entretanto, a intensidade do eco para obter informações sobre a natureza dos sedimentos necessita de processos mais complexos (Lemarche & Lurton, 2017). Enquanto a intensidade do *backscatter* é relativa às características do alvo e da geometria de aquisição, os fenômenos detalhados dependem de uma combinação de processos acústicos e geofísicos, considerando tanto as características de transmissão/recepção e processamento, quanto os fenômenos físicos que ocorrem tanto na coluna d'água, quanto no leito marinho.

Os dados de batimetria e retroespalhamento acústico utilizados neste trabalho foram adquiridos usando o ecobatímetro EM 122, da Kongsberg, (figura 12) com o auxílio do *software Seafloor Information System* (SIS). Esse ecobatímetro opera na frequência de 12 kHz, com mais de 800 sondagens por *ping*, cobrindo uma largura de faixa acima de 30 km no fundo marinho, dependendo da profundidade.

Figura 12: Ecobatímetro EM 122. Fonte: Kongsberg

4.4. REGRESSÃO LINEAR

A regressão linear é uma técnica estatística utilizada para relacionar duas ou mais variáveis independentes, ou conjuntos de dados independentes. O objetivo é encontrar uma linha reta que melhor se ajusta aos dados. Em particular, a regressão linear simples é um método que correlaciona uma variável dependente (y) e uma variável independente (x) (Yan e Gan Su, 2009). Esse modelo de regressão é regido pela fórmula:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x$$

onde y é a variável dependente, β_0 é o intercepte do eixo y, β_1 é o gradiente e x é a variável independente. No geral, duas variáveis que tenha um coeficiente de correlação diferente de zero são correlacionadas.

O coeficiente de correlação pode variar entre -1 e 1, com -1 indicando uma correlação negativa perfeita, 1 indicando uma correlação positiva perfeita e 0, ausência de correlação. Por definição, uma correlação entre 0 e 0,3 é chamada de fraca, 0,3 e 0,6 é uma correlação moderada e entre 0,6 e 1 tem-se uma correlação forte (Ayres, 1998).

Um número alto de medidas independentes fornece uma alta taxa de significância da correlação, ou seja, quanto mais medidas, mais confiável e significativo é uma correlação. Existem diversos testes para provar a significância do

coeficiente de correlação. Um desses testes é o Teste t de Significância (Kanji, 2006). Com esse teste, pode-se testar duas hipóteses: H_0 se a correlação for nula e H_1 se a correlação for diferente de nula (Ayres, 1998). O teste é dado pela seguinte fórmula:

$$t = \frac{r}{\sqrt{1 + r^2}} \cdot \sqrt{n - 2}$$

onde r é o coeficiente de correlação e n-2 é o grau de liberdade, no qual n é o número de amostras. Com o valor de t calculado, compara-se o valor de t com a tabela de distribuição t de Student, apresentada no apêndix II.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O levantamento de dados de SBP geraram mais de 2000 linhas. Entretanto, a área com batimetria processada é muito menor (figura 13). Para as análises e correlações do presente trabalho, as linhas foram selecionadas de forma aleatória, contemplando os domínios determinados por Lisniowski (2020). Nos próximos parágrafos serão analisadas 8 linhas de SBP:

Nome Original da Linha	Novo Nome da Linha
ERG_2019_0640_000	640
ERG_2019_1763_000	1763
ERG_2019_1776	1776
ERG_2019_1777	1777
ERG_2019_1871_000	1871
ERG_2019_1884_001	1884
ERG_2019_1890	1890

Tabela 1: Linhas utilizadas no trabalho.

A figura 14 mostra a disposição das linhas na área da Elevação do Rio Grande. Foram analisadas as correlações *Backscatter* x Amplitude Sísmica, Profundidade x Amplitude Sísmica e Declividade x Amplitude Sísmica. Os resultados dessas análises serão demonstrados e discutidos durante esse capítulo. Além disso, foi usado o Teste t de significância para validar os coeficientes de correlação.

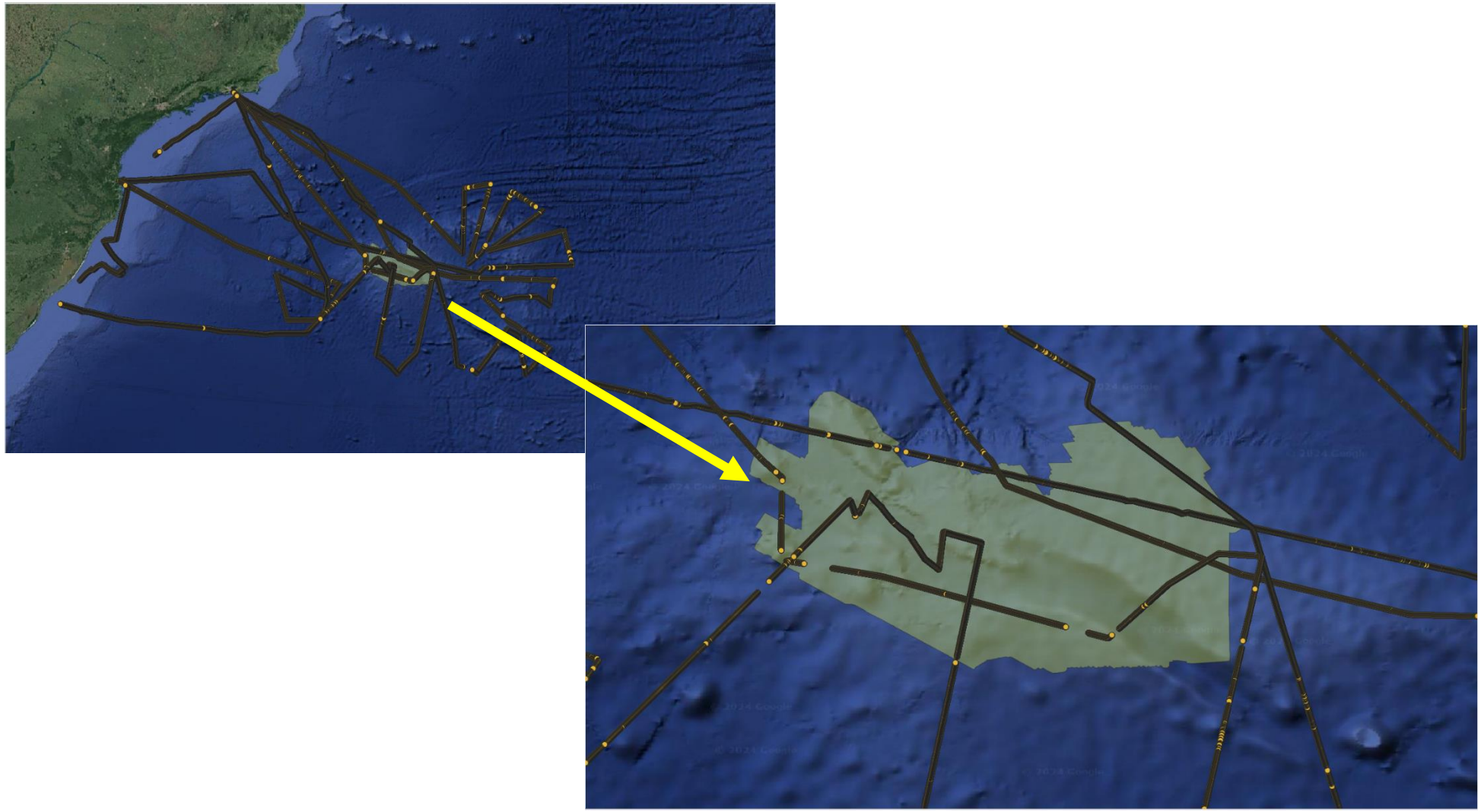

Figura 13: Geometria completa do levantamento de SBP. No detalhe, a região da ERGO que foi estudada. As linhas foram escolhidas delimitadas dentro do polígono e por domínio descrito por Lisniowski (2020).

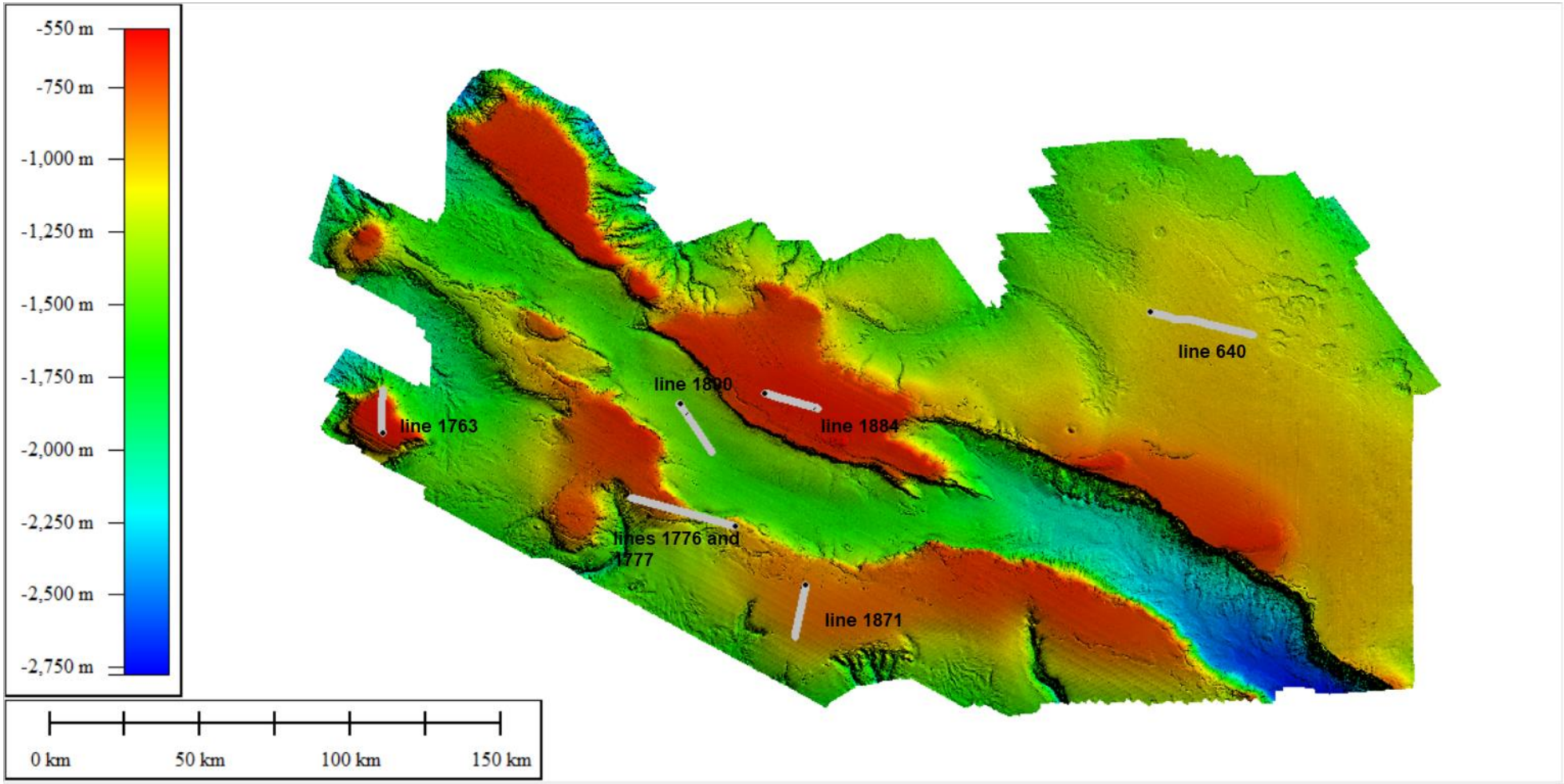

Figura 14: Batimetria utilizada para a correlação com as linhas sísmicas. Em cinza, as linhas escolhidas para o estudo. Fonte: Modificado de Lisniowski (2020).

5.1. LINHA 640

A linha 640 está localizada na região Nordeste da ERG Ocidental (Figura 13). Essa área é descrita como uma das partes mais profundas da ERG (abaixo de -800 m). Na figura 14 observa-se a correlação entre os dados de retroespalhamento acústico e amplitude sísmica.

A linha 640 apresentou valores baixos de amplitude sísmica, variando entre 900 e 1150, assim como apresentou valores mais baixos para o retroespalhamento acústico, entre -27 e -32 dB. Lisniowski (2020) aponta para uma área essencialmente plana, pouca perturbada no sedimento, com sedimentos homogêneos lamosos. Os dados entre os dois métodos acústicos têm um coeficiente de correlação muito baixo (r=-0,09). Ainda, foi realizado o teste t de significância e obteve-se um valor de -5,05 para o t. O valor de referência para um nível de significância de 0,005 é -2,807 < t < 2,807. Como nosso valor é acima da referência, rejeitamos a hipótese H0 e conclui-se que, apesar do baixo coeficiente de correlação, ela existe.

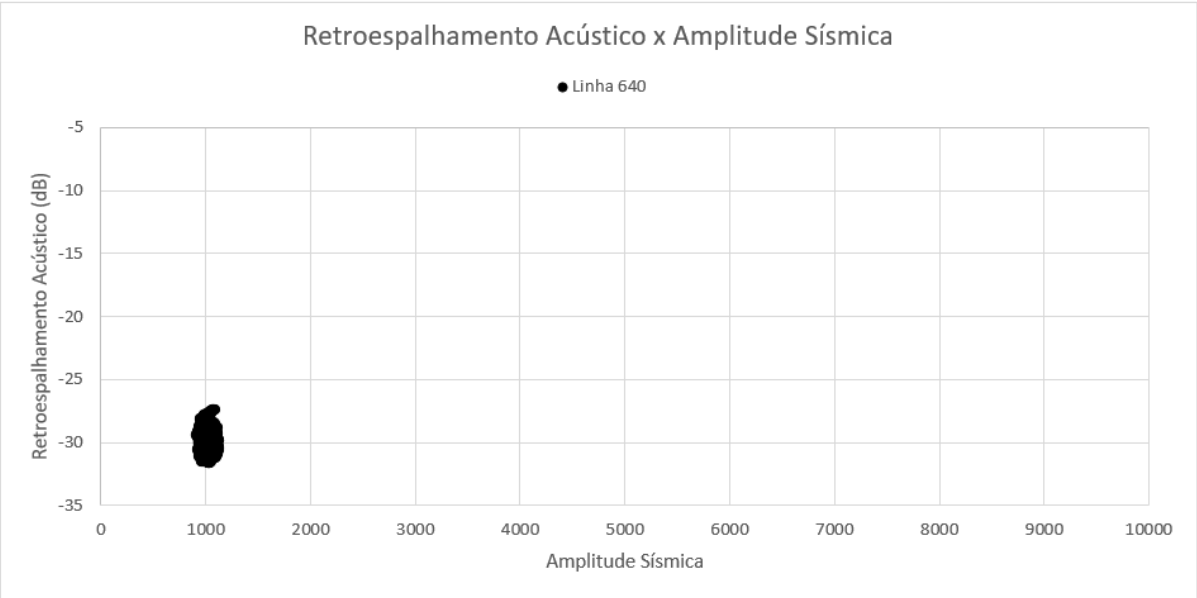

Figura 15: *Plot* de retroespelhamento acústico e amplitude sísmica da linha 640.

Os valores de declividade para a linha 640 são baixos, variando entre 0 e 2,5 graus.

Já para a correlação entre declividade e amplitude sísmica (figura 15), tem-se também um valor muito baixo para o coeficiente de correlação (r=-0,06). O teste de significância demonstra o valor de -3,45 para t. Como ele também está acima do valor de referência, aceita-se a hipótese H1 para essa correlação.

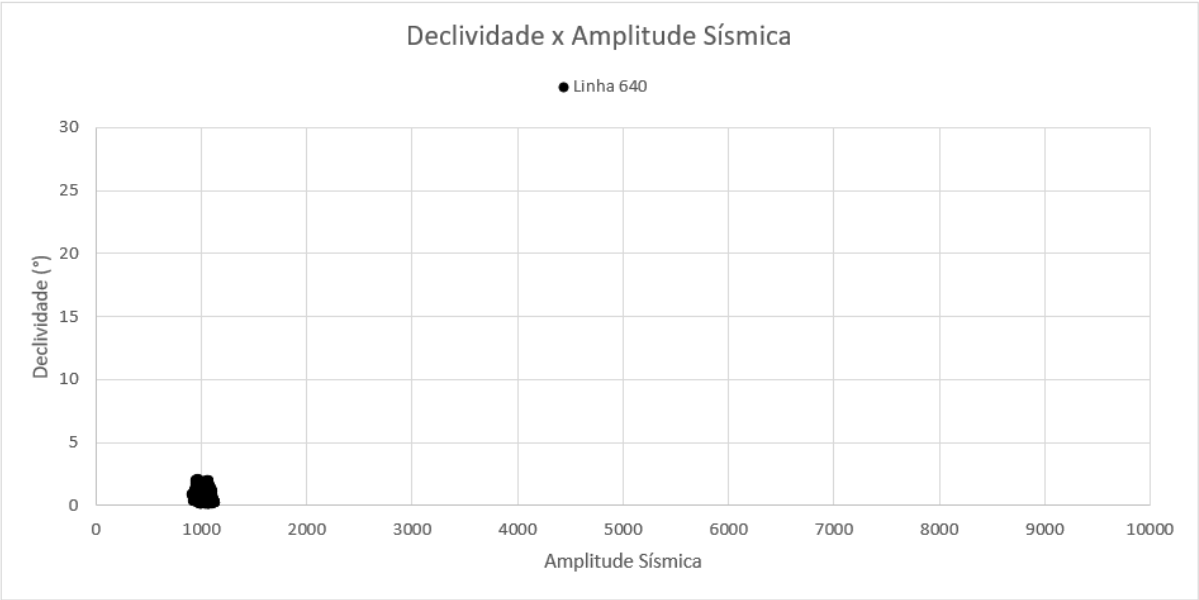

Figura 16: *Plot* de declividade e amplitude sísmica para a linha 640.

Ainda na linha 640, foi feita a correlação entre os dados de batimetria (profundidade) e amplitude sísmica. A figura 16 ilustra o perfil batimétrico da linha, mostrando que a área, apesar de estar localizada em uma região plana, existe um relevo relativo de pouco mais de 60 metros ao longo da linha. Além disso, não há uma grande variação na resposta da amplitude sísmica, evidenciando uma área com sedimentação homogênea.

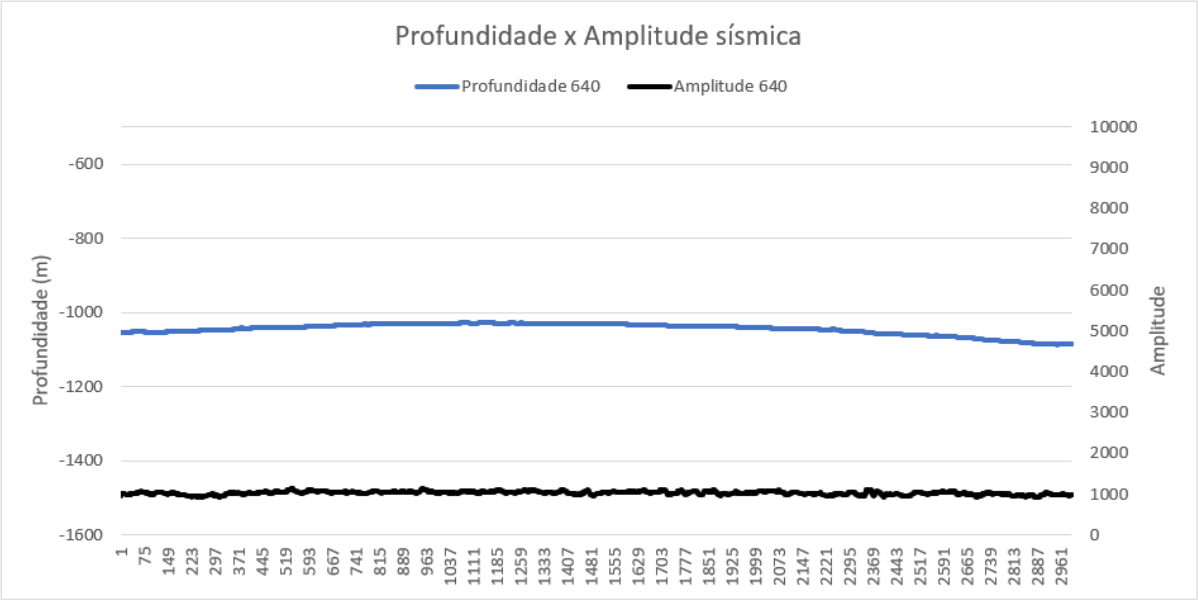

Figura 17: Perfis de batimetria e amplitude sísmica da linha 640.

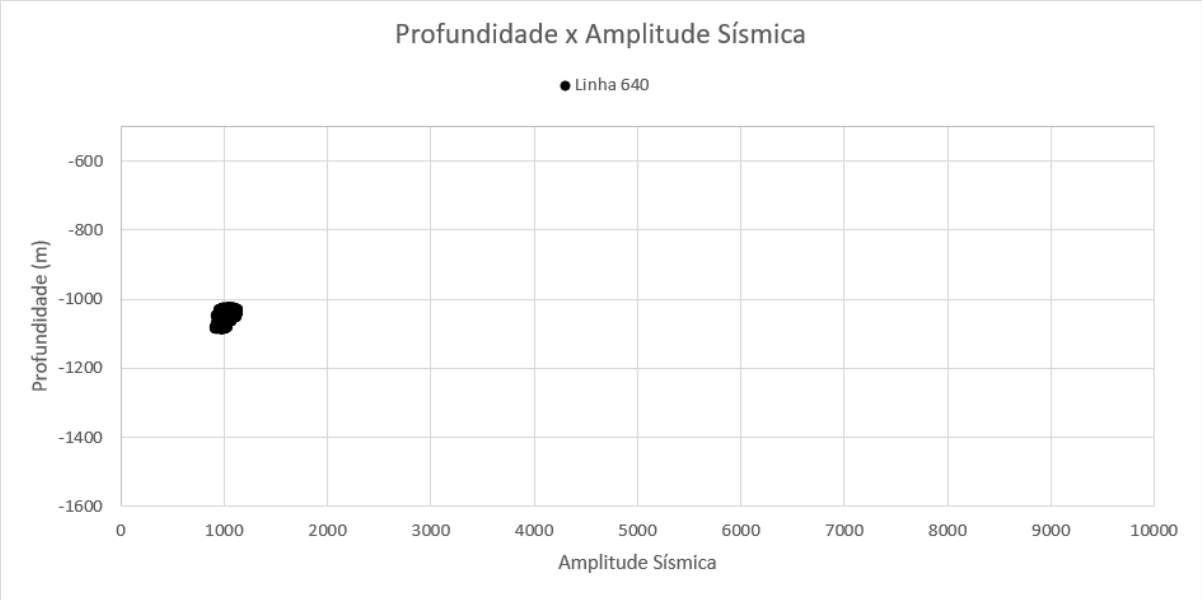

Figura 18: *Plot* de profundidade e amplitude sísmica da linha 640.

A correlação entre os dados de batimetria e os dados de amplitude para a linha 640 (figura 17) gerou um coeficiente de correlação r =0,54, mostrando uma correlação maior entre os dados. O valor de t para o teste de significância foi de 26,18, acima do valor de referência. Portanto, a hipótese H0 foi rejeitada e vemos que a correlação é significante.

Os gráficos apresentados para a linha 640 mostram uma grande dispersão dos dados. Além disso, os coeficientes de correlação dos dados têm valores baixos a médio que, combinados com os valores de t, evidenciam que não são uma boa abordagem para determinação do tipo de sedimentação do fundo.

5.2. LINHA 1763

A linha 1763 está localizada na parte sudoeste da ERG Ocidental (Figura 13). Ela mapeou o topo de um platô com a presença de crostas ferromanganesíferas e sedimentos com marcas onduladas (Lisniowski, 2020).

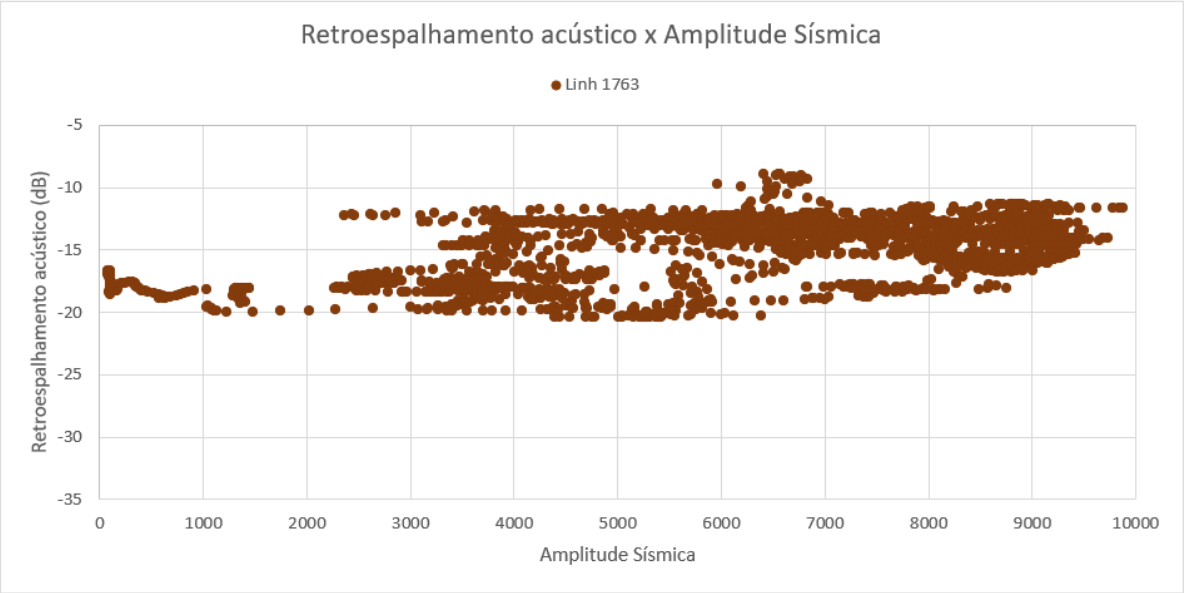

Figura 19: *Plot* de retroespalhamento acústico e amplitude sísmica da linha 1763.

A linha 1763 apresentou os valores mais altos de retroespalhamento acústico (entre -20 e -10 dB) e grande variação dos valores de amplitude sísmica, chegando a valores próximos de 10.000 (figura 18). A presença de crostas nessa região pode ser o principal motivo para os altos valores desses dados, devido à natureza desse tipo de sedimento. Devido ao aumento de velocidade do som nas crostas, relativa à interface água/sedimento, a intensidade do retorno é mais forte, aumentando a resposta do sinal.

Entretanto, o coeficiente de correlação é considerado médio para essa relação (r=0,43), evidenciando uma relação não muito alta. O teste t mostrou valor de 19,38. Portanto, a hipótese H0 foi rejeitada e pode-se confiar no valor calculado para r.

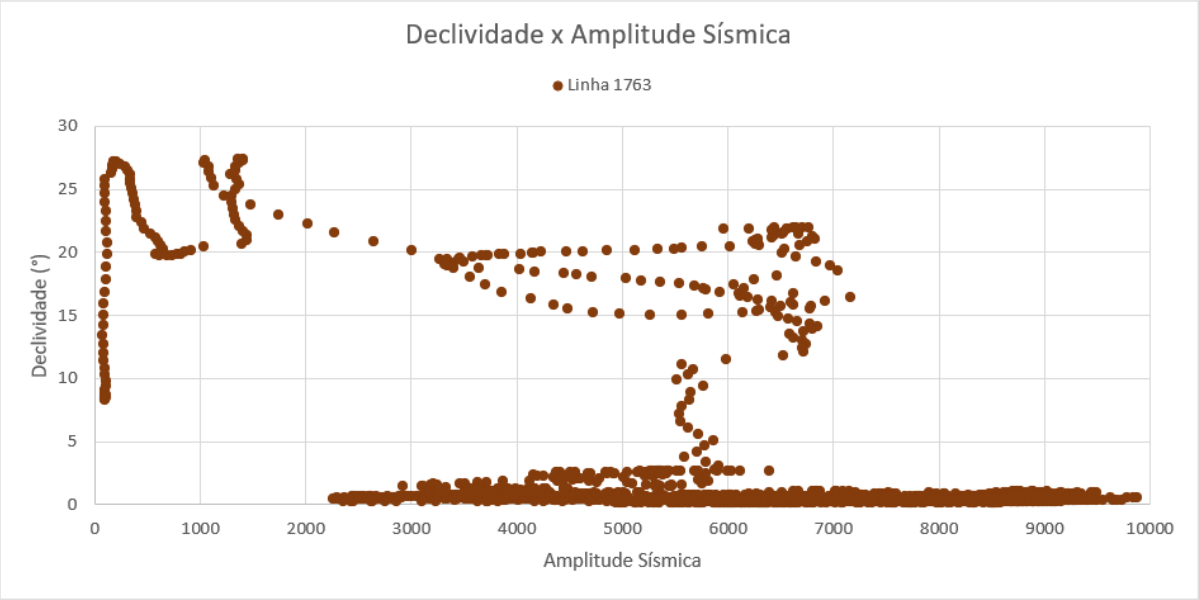

Figura 20: *Plot* de declividade e amplitude sísmica da linha 1763.

A declividade para a linha 1763 variou entre 0 e 30 graus (figura 19). Entretanto, por ser em grande parte um platô, as declividades se concentraram próximo a 0, sendo os valores mais altos localizados na porção N da linha, onde existe uma escarpa com relevo relativo de aproximadamente 400 m. A correlação entre os valores de declividade e amplitude sísmica foi r=-0,44, sendo um valor médio para a correlação. O valor do teste t foi de -19,68. Sendo assim, rejeita-se a hipótese H0 e aceita-se a correlação.

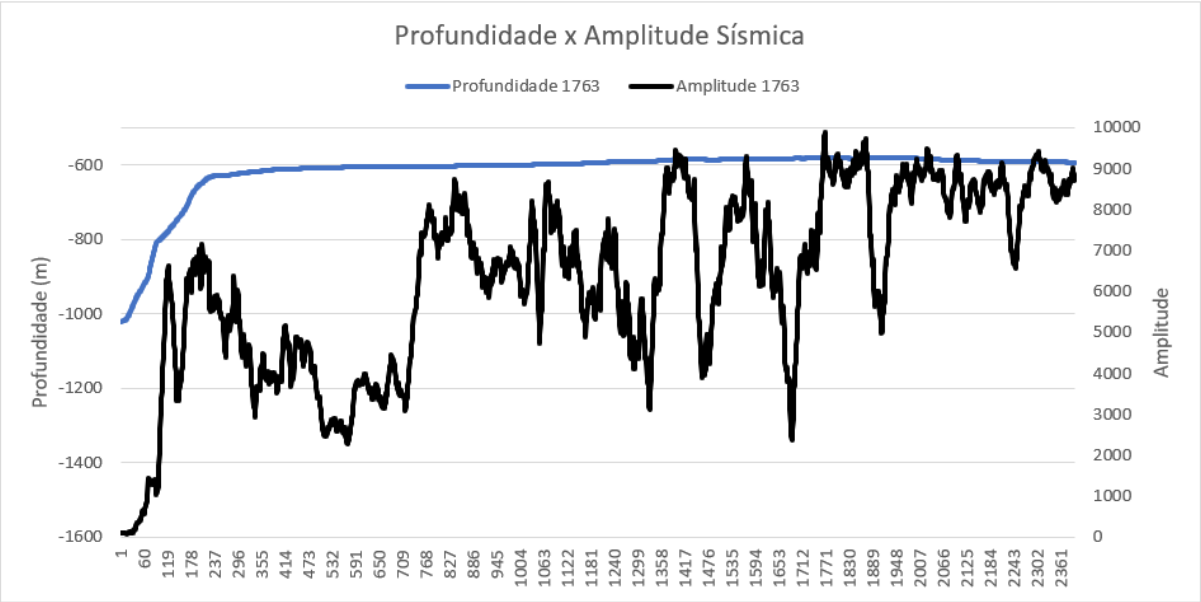

Figura 21: Perfis de amplitude sísmica e profundidade da linha 1763

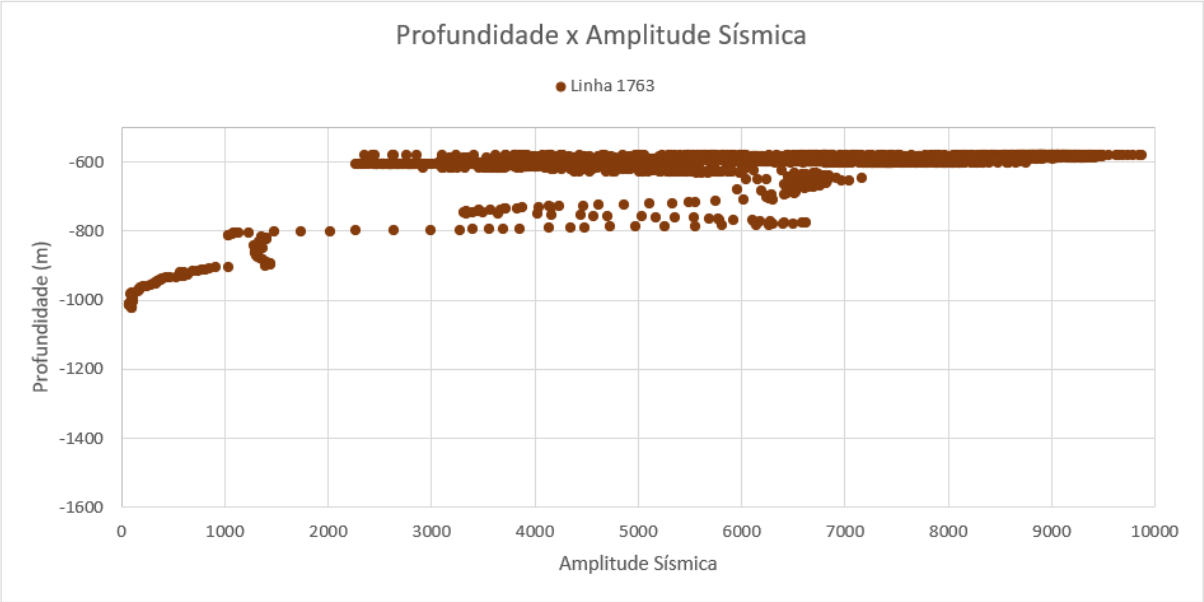

Figura 22: *Plot* de profundidade e amplitude sísmica da linha 1763.

A profundidade da linha 1763 variou entre -1031 e -580 m. Na figura 20, é possível observar que os maiores valores de amplitude estão localizados no topo do platô, em uma profundidade média de -600 m, conforme apontou Lisniowski (2020).

A correlação (figura 21) entre os dados de profundidade e amplitude sísmica foi r=0,60, o que mostra uma relação considerável entre os dados. Além disso, o valor de

t foi 25,07. Portanto, a hipótese H0 foi rejeitada e indicando que a correlação é significativa.

Lisniowski (2020) aponta para a presença de crostas na região da linha 1763. A correlação entre profundidades menores (em torno de -600m) e altos valores de amplitude (acima de 5000) pode ser uma abordagem eficiente para a determinação da presença de crostas polimetálicas em outras regiões da ERG. Os valores mais baixos nessa região podem ser relativos à presença de sedimentos areias carbonáticas, que seriam menos reflexivas.

5.3. LINHA 1776

A linha 1776 está localizada na borda sul do Rifte Cruzeiro do Sul na porção Ocidental da Elevação do Rio Grande (Figura 13). Lisniowski (2020) descreve essa área como sendo platô de crostas polimetálicas e afloramentos em declives e paredões, com a presença de rochas basálticas e brechas.

A figura 22 mostra a correlação entre os dados de amplitude sísmica e retroespalhamento acústico para a linha 1776.

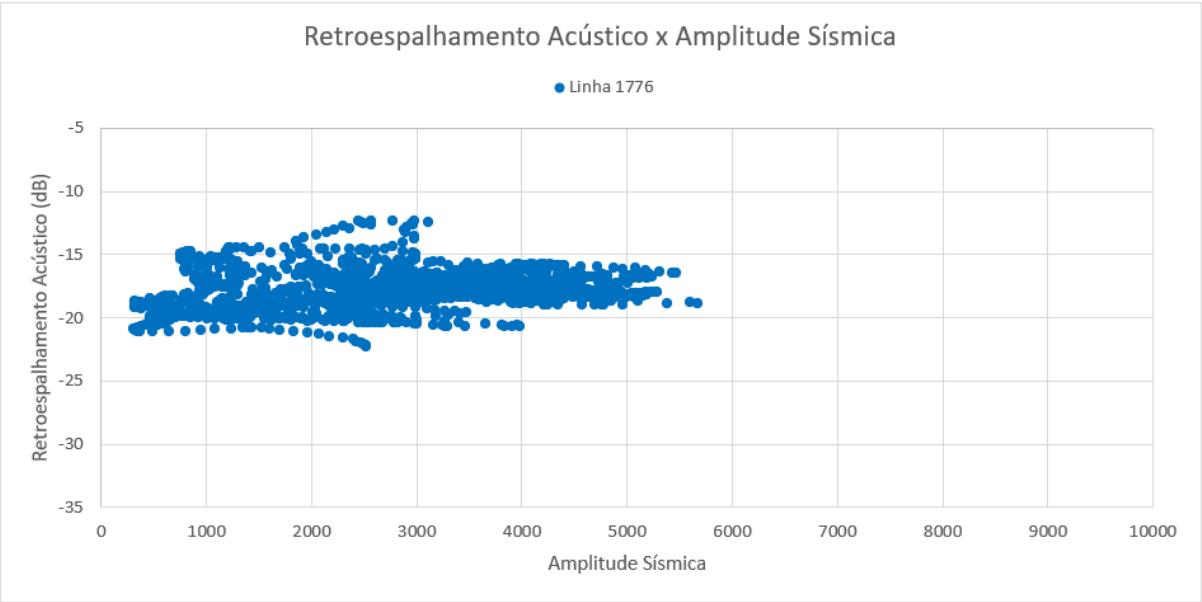

Figura 23: *Plot* de retroespalhamento acústico e amplitude sísmica da linha 1776.

Os valores de amplitude sísmica variam entre 6000 e 300, sugerindo uma grande variação do tipo de sedimento no fundo. Possivelmente, essa extensa

diversificação dos valores se deve a presença de rochas basálticas, crostas polimetálicas e areias carbonáticas. O retroespalhamento acústico apresentou valores -22 e -12 dB.

A correlação entre os dados de amplitude sísmica e retroespalhamento acústico teve um valor baixo para r (r=0,22), evidenciando uma baixa correlação entre os dois dados para essa área. O valor de t para a distribuição foi de 9,06, tendo sido a hipótese H0 rejeitada e aceito o valor de r.

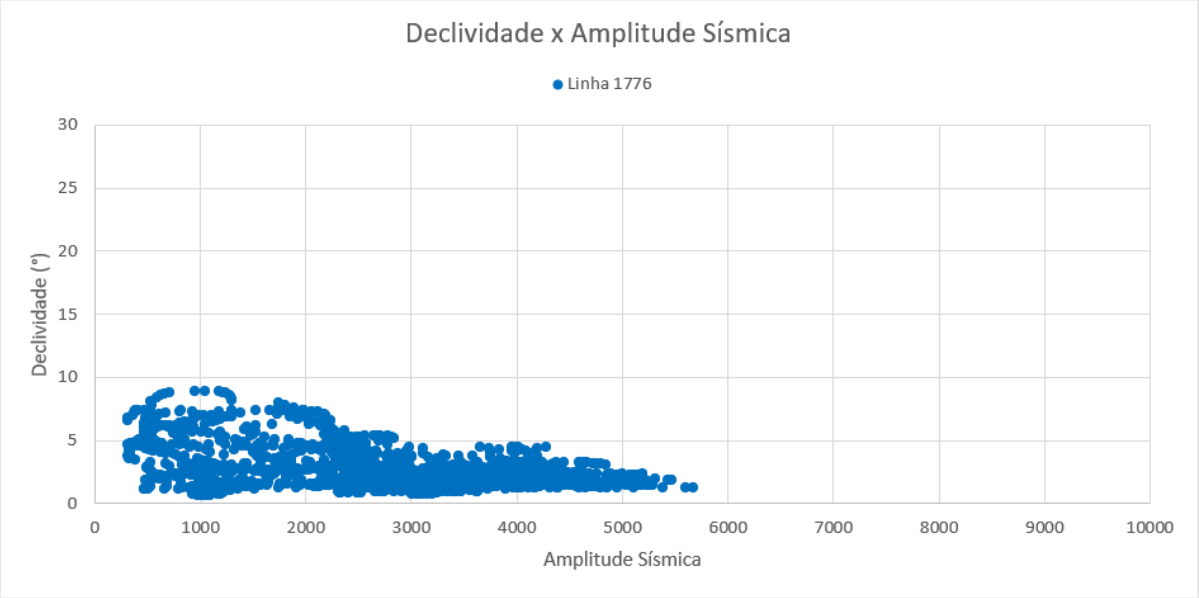

Figura 24: *Plot* de declividade e amplitude sísmica da linha 1776.

Os valores de declividade (figura 23) ficaram bastante dispersos, variando entre 0,64 e 8 graus. Esses valores são compatíveis com o tipo de ambiente apresentado por Lisniowski (2020), como sendo um terreno acidentado com a presença de grandes declives e paredões. Além disso, os valores mais baixos de declividade podem ser relacionados com a área do platô com a presença das crostas.

O valor do coeficiente de correlação foi mais alto do que o anterior (r=-0,45). Porém ainda não é considerado alto. O valor para t calculado foi de -17,70, acima do valor de referência. Portanto, a hipótese H0 foi rejeitada e assume-se que confiável correlação existe.

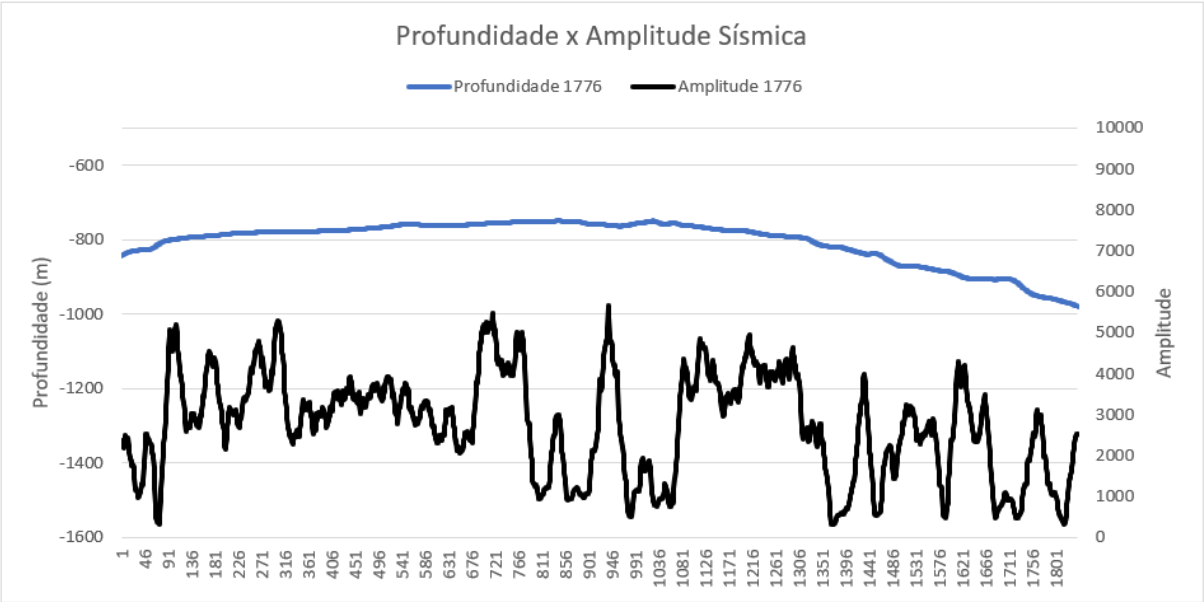

Figura 25: Perfis de profundidade e amplitude sísmica da linha 1776.

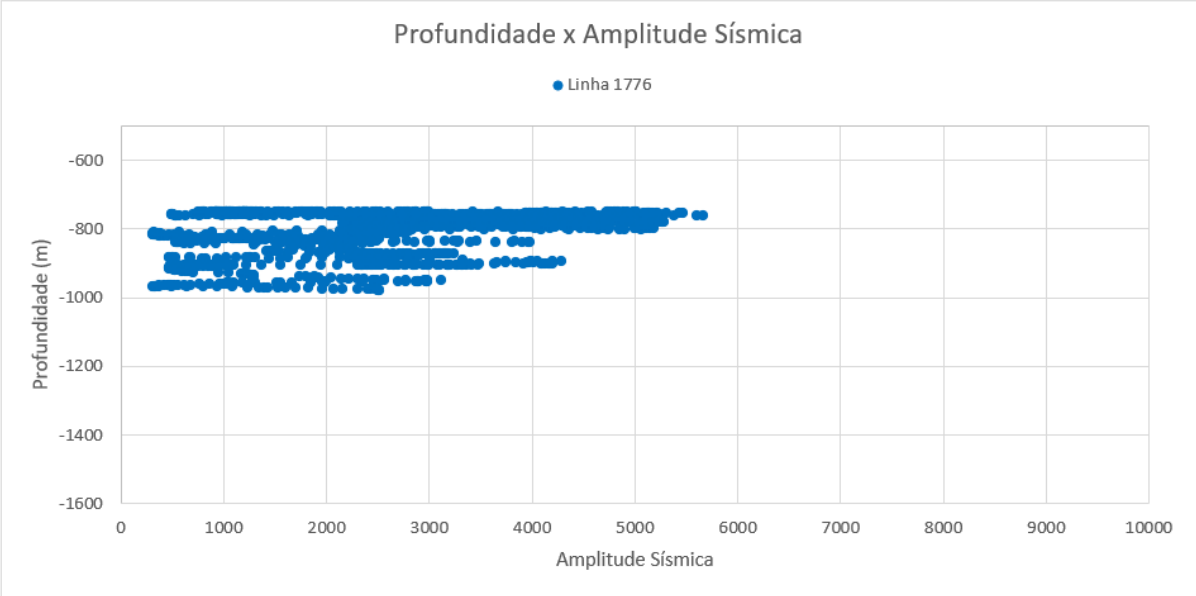

Figura 26: *Plot* de profundidade e amplitude sísmica da linha 1776.

Os valores de profundidade dessa região variam entre -750 e -980 m. Segundo Palma e Pessanha (2000), as profundidades de ocorrência de crostas variam entre 400 m a 4.000 m, porém as mais enriquecidas em cobalto encontram-se geralmente entre 800 m e 2.200 m na zona de mínimo de oxigênio. Portanto, esses valores são

compatíveis com a presença de crostas, principalmente em crostas enriquecidas com cobalto. Analisando a figura 24, é possível confirmar que se trata de uma região de platô, onde segundo Lisniowski (2020), é previsto a presença de crostas polimetálicas.

A correlação entre a profundidade e a amplitude sísmica (figura 25) para a linha 1776 foi média (r=0,36) e o valor para o teste t foi 14,67, onde rejeitou-se a hipótese H0 e foi aceito o valor de r.

As análises feitas para a linha 1776 demonstrando baixos valores de correlação entre os dados. Isso pode ser devido à complexidade do ambiente, visto que é uma região muito acidentada com escarpas e declives. Os valores altos de amplitude podem ser em virtude da presença de crostas polimetálicas ou de afloramentos basálticos.

5.4. LINHA 1777

A linha 1777 é uma continuação da linha 1776, na parte Sul da Elevação do Rio Grande, na borda do Rift Cruzeiro do Sul (Figura 13). Sendo subsequente a linha 1776, essa linha também é caracterizada por afloramentos e platôs.

A figura 26 representa a correlação entre os dados de amplitude sísmica e retroespalhamento acústico para a linha 1777. Para o retroespalhamento, os valores variam entre -11 e -22 dB, sendo valores altos para esse dado. A amplitude varia entre 136 e 3520.

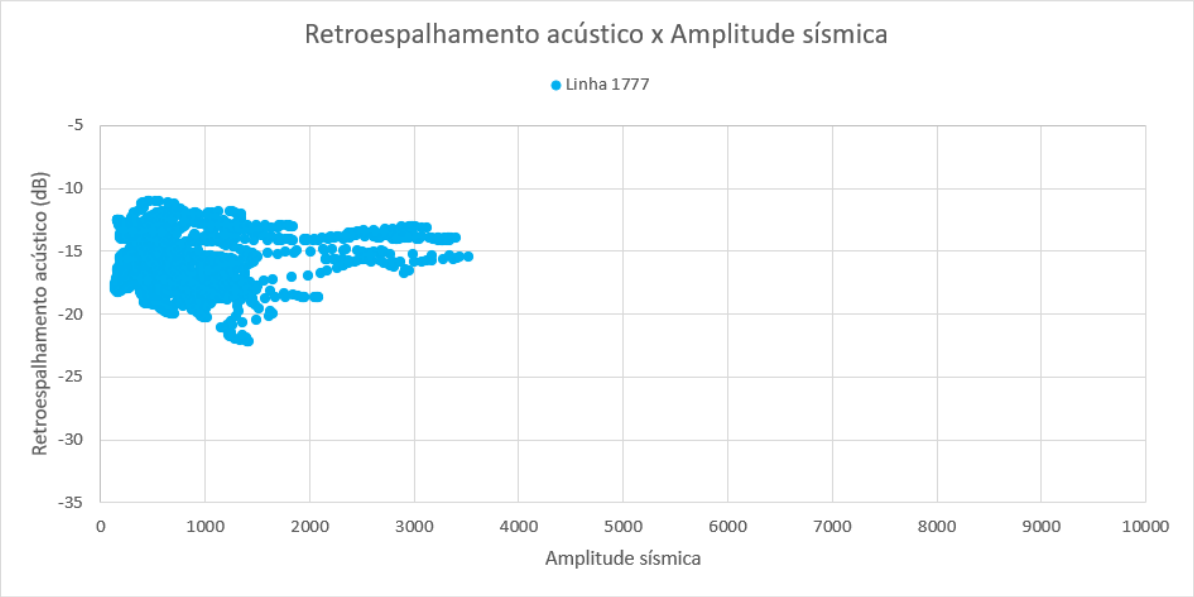

Figura 27: *Plot* de retroespalhamento acústico e amplitude sísmica da linha 1777.

A correlação entre amplitude e retroespalhamento foi baixa, com r tendo o valor igual a 0,10, demonstrando uma correlação muito fraca entre os dados. O teste t mostrou o valor de 4,37 para t, acima do valor de referência. Portanto, rejeita-se a hipótese H0 e é aceito o valor de r.

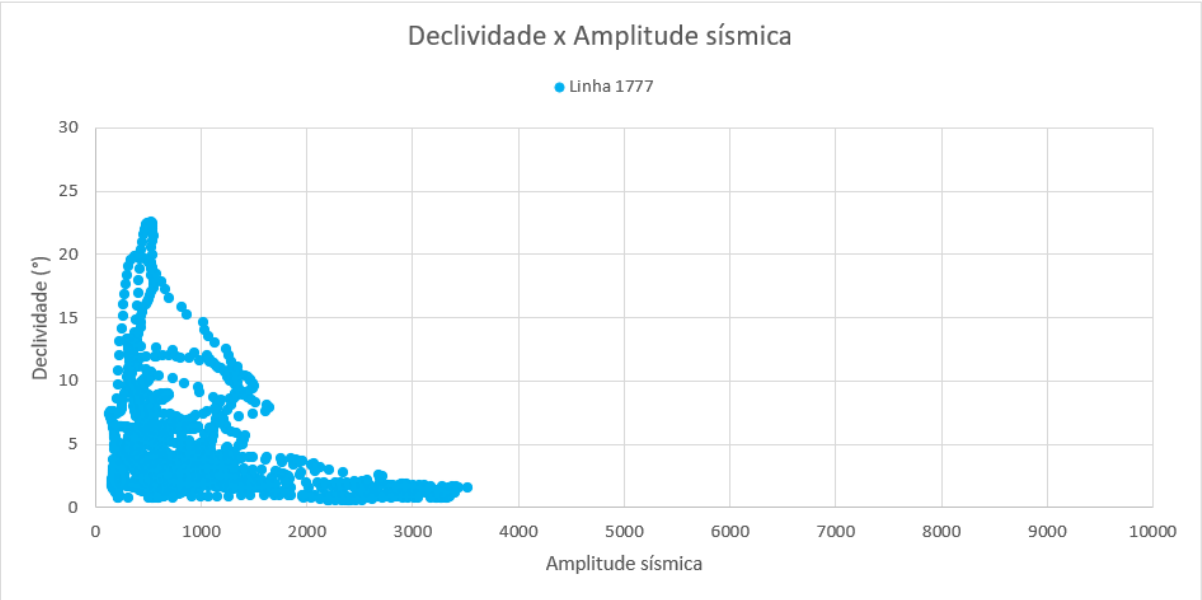

Figura 28: *Plot* de declividade e amplitude sísmica da linha 1777.

A figura 27 acima ilustra a correlação entre os dados de declividade e os dados de amplitude. A declividade varia entre 0,49 e 22 graus, mostrando que existem regiões com maiores inclinações nessa área, que correspondem às áreas de afloramentos em declives apresentadas por Lisniowski (2020).

Entretanto, para a correlação temos uma correlação mais baixa do que a correlação entre os dados na linha 1776. O coeficiente de correlação teve como resultado -0,34, que é próxima do limite para uma correlação fraca. O valor de t foi -13,57, então rejeita-se a hipótese H0 e aceita-se uma correlação quase fraca para os dois tipos de dados nessa linha.

Já para os dados de profundidade (figura 28), tivemos um cenário diferente da linha 1776. Os dados apontam para uma região mais profunda, entre -1191 e -959 m (figura 29). A correlação entre a profundidade e a amplitude teve o valor de r=0,59, que é um valor próximo ao aceitável para uma correlação boa. O valor de t calculado foi 21,37, então aceita-se o valor do coeficiente de correlação.

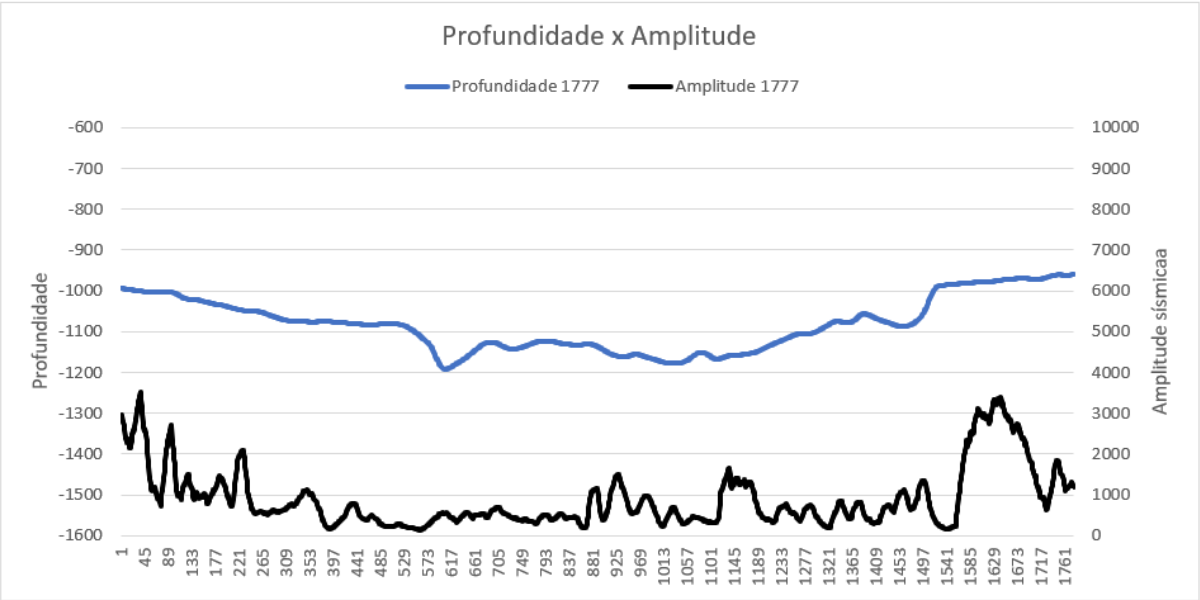

Figura 29: Perfis de profundidade e amplitude sísmica da linha 1777.

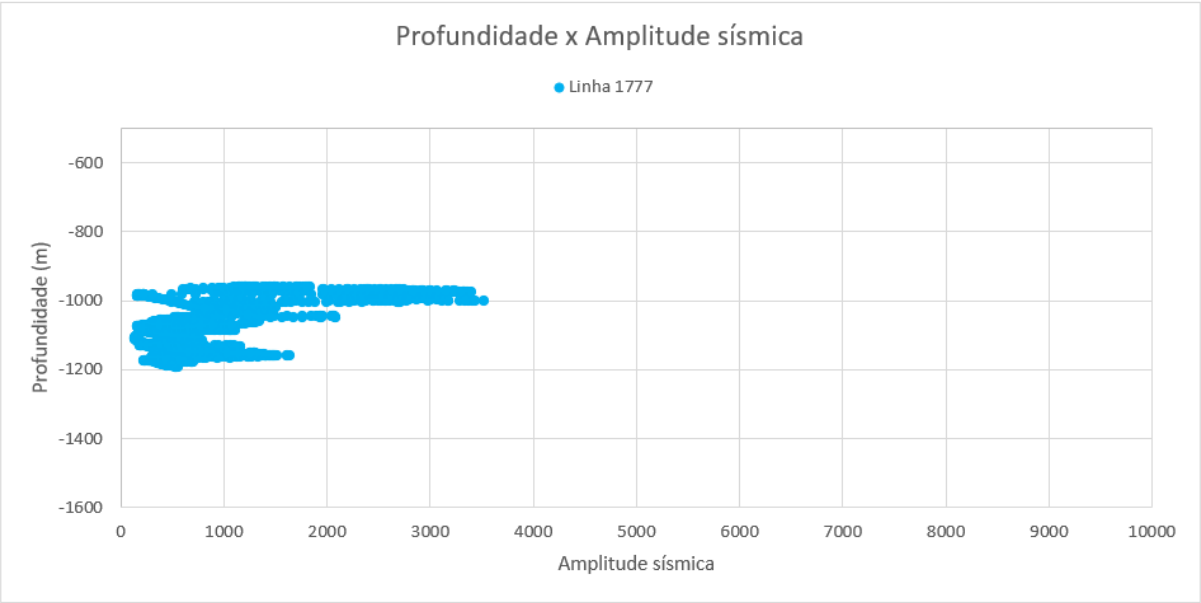

Figura 30: *Plot* de profundidade e amplitude sísmica da linha 1777.

Os dados da linha 1777, de forma geral, não apresentaram bons resultados para correlação. Apenas a correlação entre profundidade e amplitude sísmica obteve um valor de r aceitável. Na figura 28, é possível fazer uma interpretação visual em que os maiores valores de amplitude estão na parte mais elevada da região. Isso pode ser devido à presença de crostas polimetálicas ou à presença de rochas basálticas.

5.5. LINHA 1871

A linha 1871 está localizada ao sul do rifte Cruzeiro do Sul, na porção ocidental da ERG (Figura 13). Essa linha tem uma orientação aproximadamente N-S e está situada em uma região denominada Bacias Profundas Lamosas por Lisniowski (2020).

Na figura 30, tem-se a correlação entre os dados de amplitude e retroespalhamento para a linha 1871.

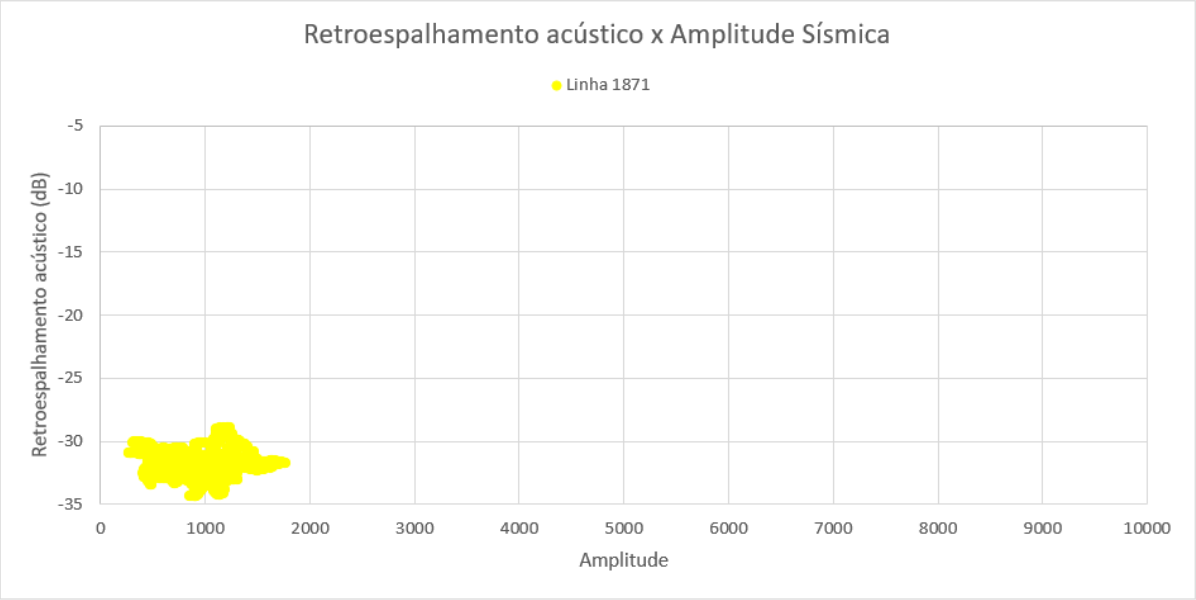

Figura 31: *Plot* de retroespalhamento acústico e amplitude sísmica da linha 1871.

Os valores de amplitude variam entre 270 e 1765. Já os valores de retroespalhamento variam entre -29 e -34 dB. Com esses resultados, pode-se concluir que se trata de uma área menos reflexiva, possivelmente uma região com sedimentação pelágica mais homogênea.

O coeficiente de correlação para retroespalhamento e amplitude na linha 1871 foi r=-0,22 e o teste t teve valor de -10,77. Portanto, a hipótese H0 foi rejeitada e aceita a hipótese e de que a correlação existe, apesar do moderado coeficiente de correlação calculado.

A declividade da região também foi muito baixa, tratando de uma área plana, com pouco relevo acidentado, como é possível observar na figura 31. Os valores de declividade variam entre 0,17 e 3,40 graus.

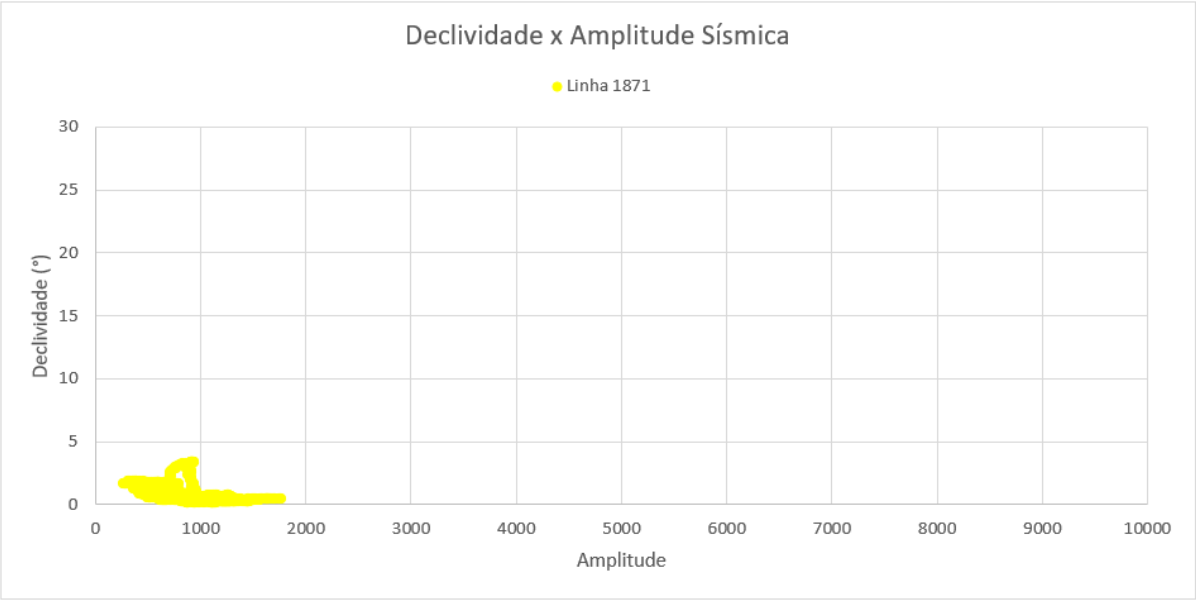

Figura 32: *Plot* de declividade e amplitude sísmica da linha 1871.

A correlação foi média, com r=-0,59 e o t=-25,00. Esses valores apontam que, apesar de não ser uma correlação boa entre os dados de declividade e amplitude sísmica, essa correlação existe e pode ser validada com o teste t.

A figura 32 mostra o perfil da batimetria da linha 1871. Apesar de ser uma região com um aclive, essa subida é suave, como apontam os valores de declividade. A profundidade é compatível com a região explicitada por Palma e Pessanha (2000) como sendo uma profundidade com possível ocorrência de crostas polimetálicas. Contudo, Lisniowski (2020) aponta a área como bacias profundas lamosas, sem a presença de crosta. Essa pode ser a explicação para os baixos valores de amplitude e retroespalhamento acústico.

A correlação, entretanto, para os dados de profundidade e amplitude para a linha 1871 é alta, com um coeficiente de correlação igual a 0,75. Além disso, o valor de t para o teste foi de 29,65. Sendo assim, rejeita-se a hipótese H0 e aceita que a correlação é, de fato, forte.

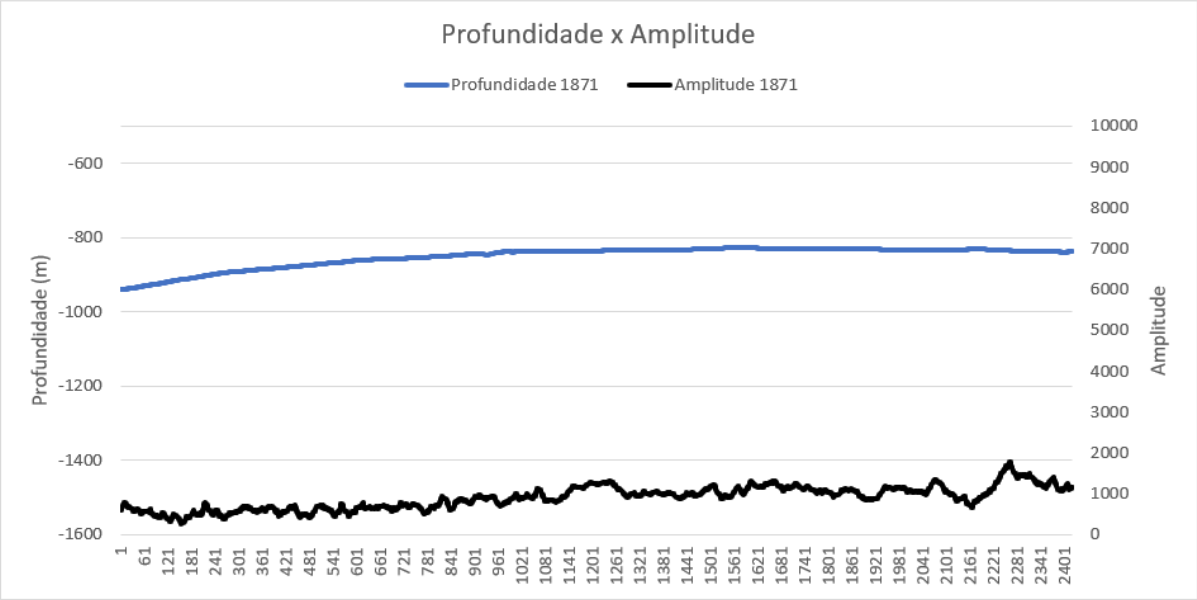

Figura 33: Perfis de profundidade e amplitude sísmica da linha 1871.

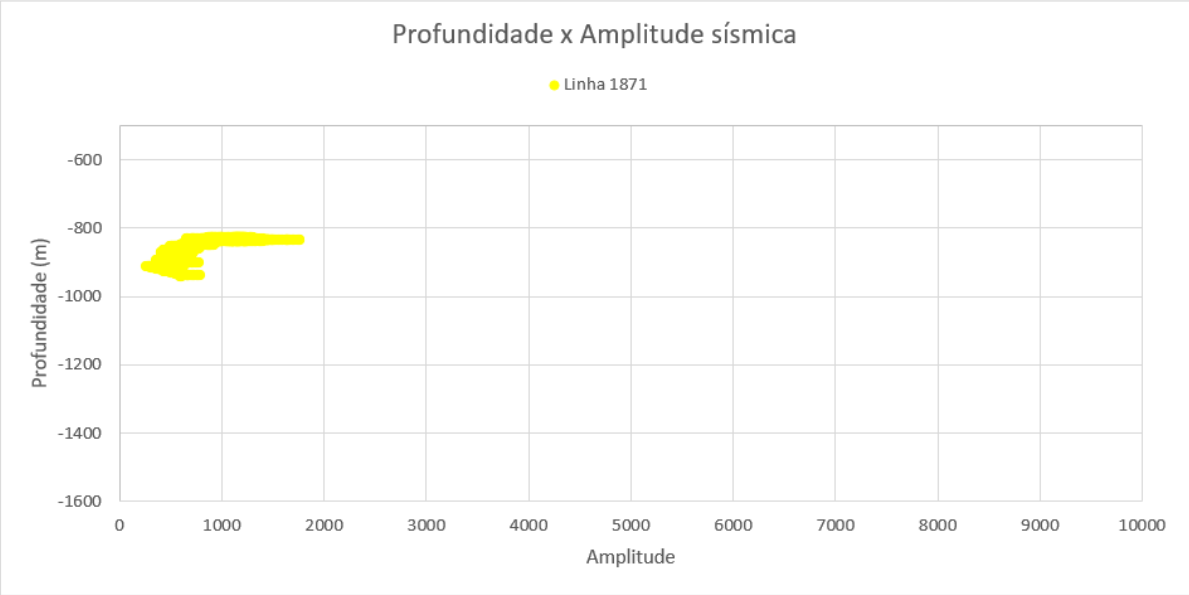

Figura 34: *Plot* de profundidade e amplitude sísmica da linha 1871.

A linha 1871 apresentou valores baixos de correlação, exceto na relação profundidade/amplitude. Contudo, essa área não apresenta descrição sobre a presença de crostas polimetálicas na literatura.

5.6. LINHA 1884

A linha 1884 está localizada em um platô ao norte do lineamento Cruzeiro do Sul, também na porção Ocidental da ERG (Figura 13). Essa área é descrita como platô de crostas polimetálicas por Lisniowski (2020).

A figura 34 mostra os valores de retroespalhamento acústico e amplitude sísmica para a linha 1884. Os valores de retroespalhamento variam entre -25 e -15 dB, enquanto os valores de amplitude sísmica estão entre 1000 e 6300. Os altos valores de retroespalhamento acústico podem estar associados à presença de crostas/rochas e a uma profundidade menor da região. Os valores baixos para a amplitude sísmica podem ser explicados devido à proximidade de uma região com sedimentação mais fina e menos reflexiva, sem a presença ou com pouca rugosidade, descrita como sendo um platô de vaza carbonática.

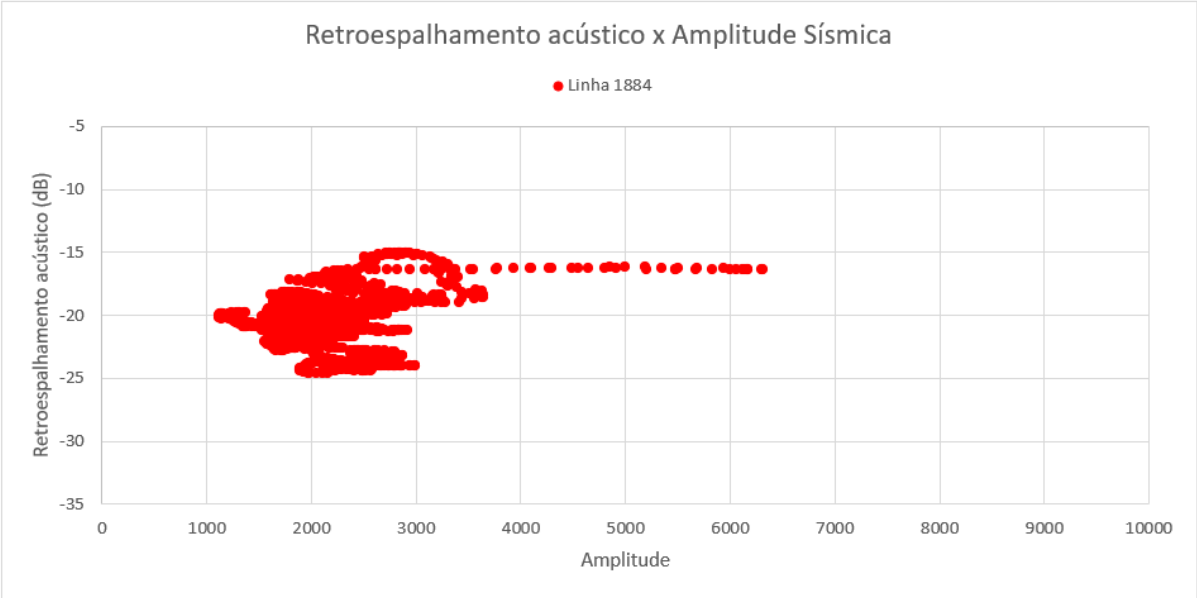

Figura 35: *Plot* de retroespalhamento acústico e amplitude sísmica da linha 1884.

A correlação entre esses dados foi baixa, com o valor de r=0,33 e t=15,32. A estimativa da localização das crostas por esse método pode não ser a melhor abordagem, dado que não foi possível calcular uma relação alta entre os dois tipos de dados.

A declividade da região é baixa, como pode ser visto nos valores da figura 35. Variando entre 0 e 1,5 graus, a região aparenta ser plana, com pouca variação no relevo ou com variações suaves da declividade.

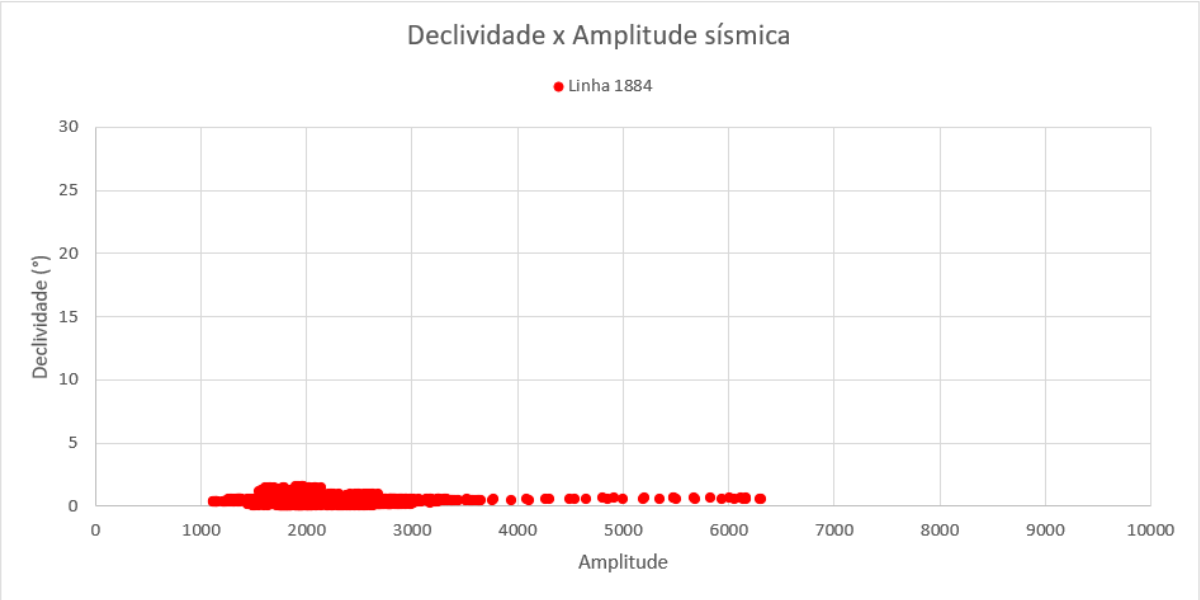

Figura 36: *Plot* de declividade e amplitude sísmica da linha 1884.

O coeficiente de correlação para retroespalhamento acústico e amplitude sísmica foi r=0,09. Esse valor é muito baixo e não demonstra uma relação expressiva para os dados. Apesar disso, o valor de t calculado foi 4,32, acima do valor de referência e, portanto, a hipótese H0 foi rejeitada e pode se aceitar o valor de r.

Entretanto, a profundidade varia em torno de 20 m, de acordo com os dados da batimetria (figura 36). Os valores vão de -600 a -620 m, com uma declividade suave segundo o perfil batimétrico.

De acordo com Lisniowski (2020), essa área é uma área com crostas polimetálicas, com uma profundidade média de -600 m. Entretanto, os valores de amplitude estão baixos para crostas polimetálicas, segundo as outras linhas do estudo. Evidenciando isso, a correlação entre a profundidade e a amplitude sísmica (figura 37) para a linha 1884 foi r=-0,03. Além disso, o valor de t foi -1,48. O valor de t ficou abaixo do valor de referência da tabela de distribuição t de Student. Ou seja, a hipótese H0 é aceita e rejeitamos correlação.

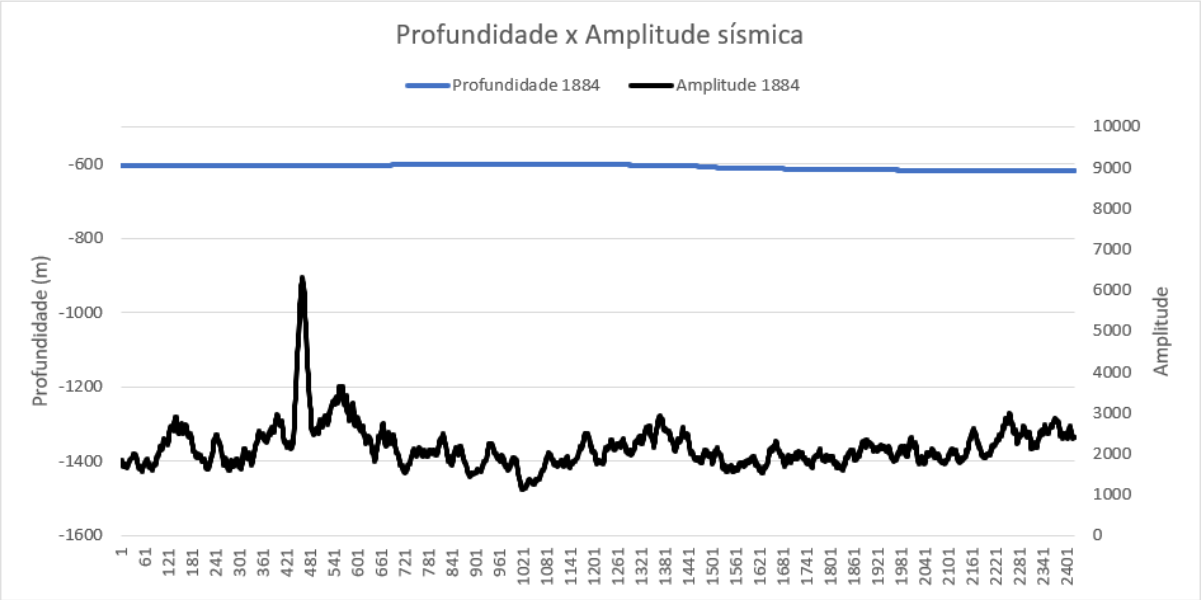

Figura 37: Perfis de profundidade e amplitude sísmica da linha 1884.

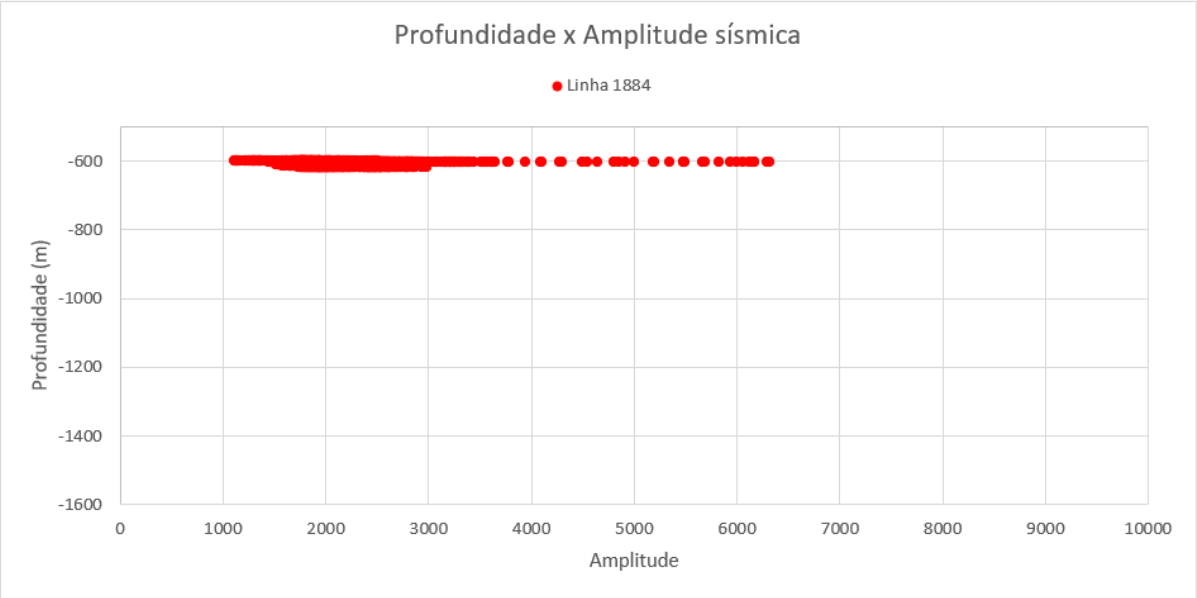

Figura 38: *Plot* de profundidade e amplitude sísmica da linha 1884.

5.7. LINHA 1890

A linha 1890 está localizada dentro do lineamento Cruzeiro do Sul, na porção central da ERG Oriental (Figura 13). A linha tem orientação SE-NO. Lisniowski (2020) classifica essa área com sedimentação composta por vasas de foraminíferos, com correntes de fundos atuantes, formando marcas onduladas em diversas direções.

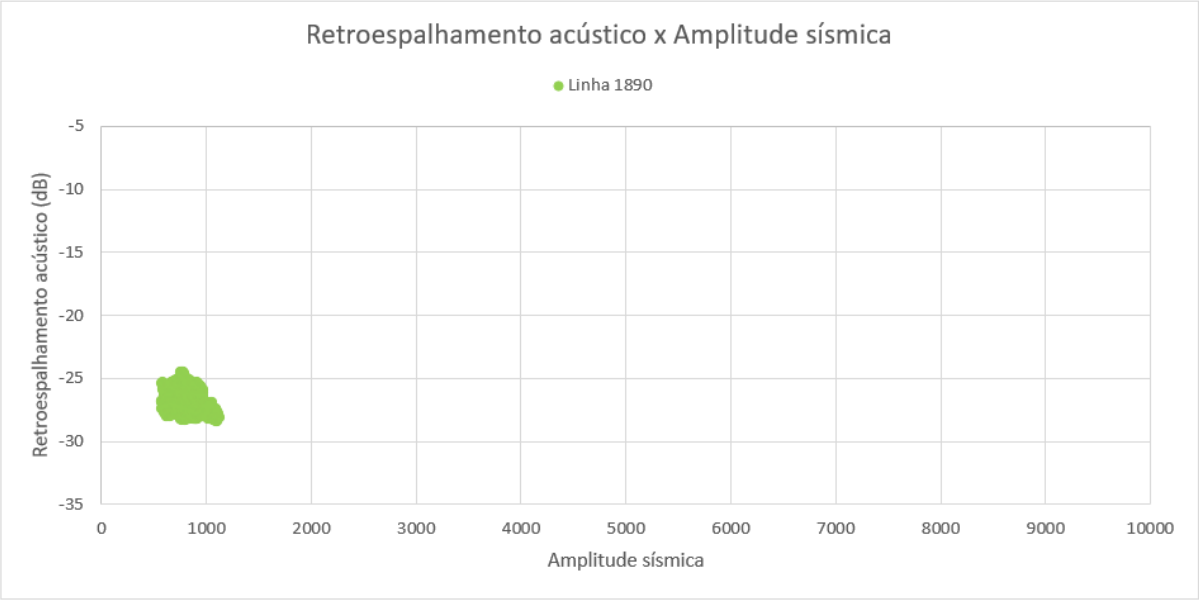

Figura 39: *Plot* de retroespalhamento acústico e amplitude sísmica da linha 1890.

Os valores de retroespalhamento acústico variam entre -24 e -29 dB. Já os valores para a amplitude sísmica variam entre 550 e 1150 (figura 38). Os valores registrados foram muito baixos para ambos os métodos. Isso pode ser compatível com a profundidade da região, uma vez que regiões mais profundas tendem a ter menor retorno do sinal e a terem sedimentação pelágica.

O coeficiente de correlação para esses dados na linha foi r= -0,40, mostrando uma correlação negativa entre os dados, porém um valor baixo. O teste t mostro um valor de -12,81. Portanto, rejeita-se a hipótese nula e a correlação, de fato, existe.

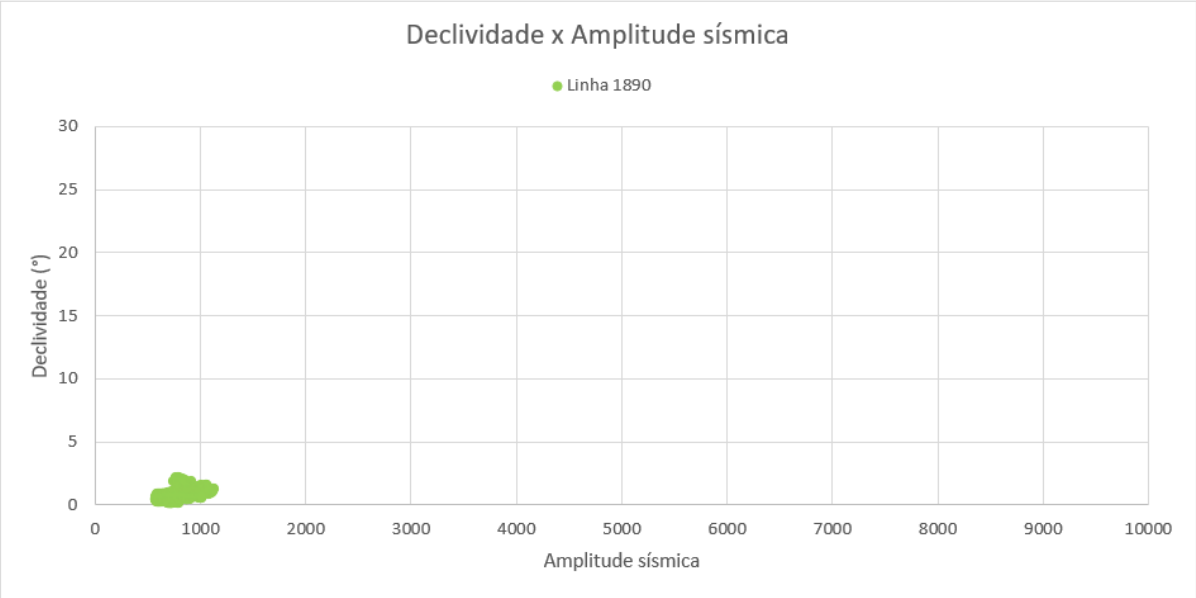

Figura 40: *Plot* de declividade e amplitude sísmica da linha 1890.

Os valores de declividade variaram entre 0,16 e 2,10 graus (figura 39). Os valores são compatíveis com uma inclinação suave, que será atestada com os valores de profundidade.

A correlação entre os dados de declividade e amplitude sísmica foi r=0,52, valor não considerado como uma boa correlação. O teste t foi t=15,91, ou seja, a hipótese H0 foi rejeitada, confirmando a existência da correlação.

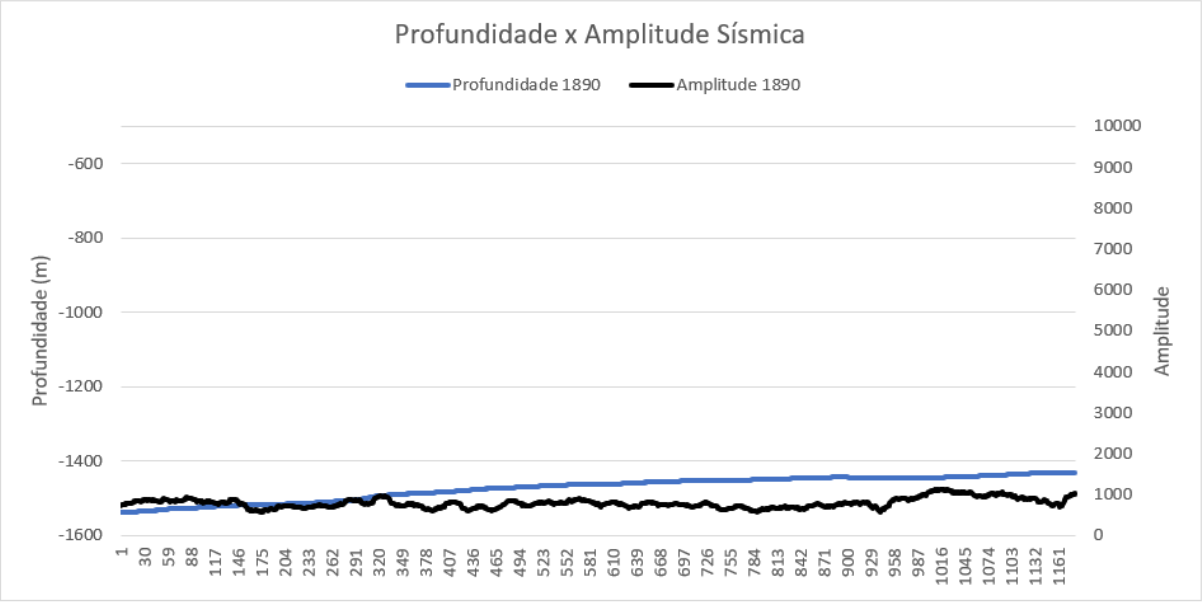

Figura 41: Perfis de profundidade e amplitude sísmica da linha 1890.

A figura 41 mostra que os valores de amplitude variam muito com a profundidade, mantendo uma média próxima a 780. Os valores de profundidade variam entre -1540 e -1430 m, valores que não estão dentro da classificação da profundidade das crostas de Lisniowski (2020).

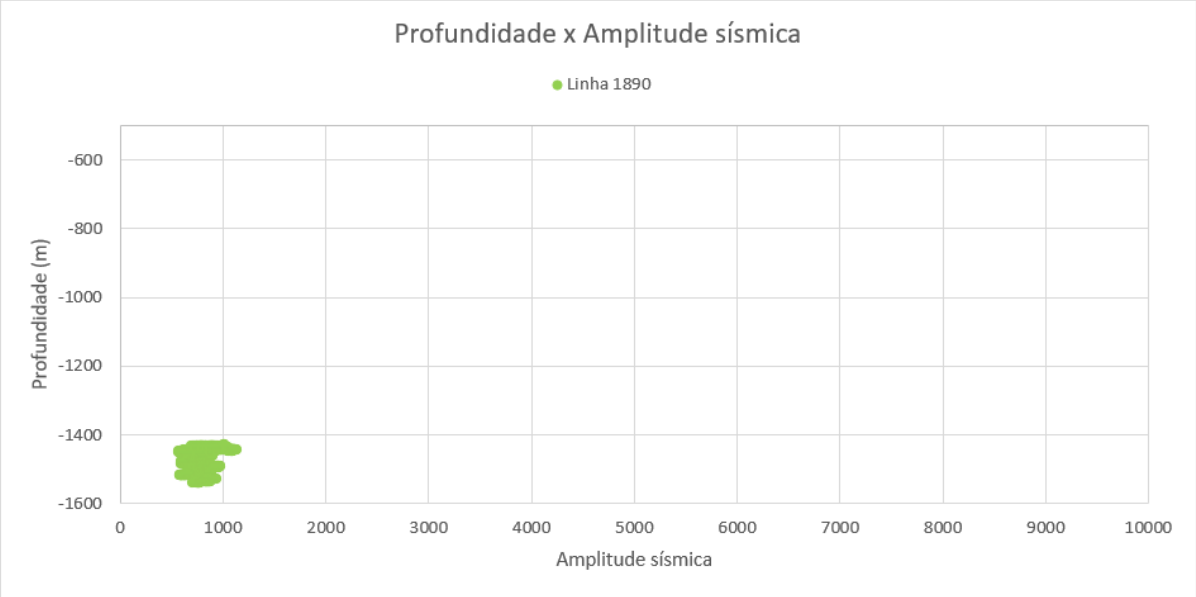

Figura 42: *Plot* de profundidade e amplitude sísmica da linha 1890.

A correlação entre os dados de profundidade e amplitude sísmica foi r=0,18, com o t=6,24 para o teste t. Esses valores mostram uma correlação fraca entre as duas variáveis, não sendo uma abordagem interessante para determinação do tipo de fundo da área.

Os resultados para a linha 1890 de maneira geral foi fraca, sem correlação expressiva. Lisniowski (2020) aponta para uma área com areia de foraminíferos, que seriam sedimentos pouco reflexivos. Contudo, a profundidade da região parece determinar o nível de energia do sinal, fazendo com que o retorno seja mais fraco do que seria em regiões mais rasas.

Na tabela abaixo pode-se observar os coeficientes de correlação (r) para cada linha analisada e nos próximos parágrafos serão feitas análises sobre a área de estudo relativo a esses dados, visando compreender a interação dos sedimentos com os métodos acústicos.

Linhas	Retroespalhamento acústico X Amplitude sísmica	Declividade X Amplitude sísmica	Profundidade X Amplitude sísmica	Domínios
640	-0,09	-0,06	0,54	Bacias lamosas profundas
1763	0,43	-0,44	0,60	Platôs de crostas Fe-Mn
1776	0,21	-0,45	0,36	Platôs de crostas Fe-Mn
1777	0,10	-0,34	0,59	Afloramentos em declives e paredões
1871	-0,22	-0,59	0,75	Bacias lamosas profundas
1884	0,33	0,09	-0,03	Platôs de crostas Fe-Mn
1890	-0,40	0,52	0,18	Areias de foraminíferos

Tabela 2: Tabela com valores de coeficiente de correlação (r) para as linhas e domínios sedimentares segundo Lisniowski. Em vermelho, valor para hipótese nula (H0) foi aceita.

5.8. RETROESPALHAMENTO ACÚSTICO X AMPLITUDE SÍSMICA

É esperado para os dados de retroespalhamento e amplitude sísmica uma correlação intrínseca devido à sua natureza. Ambos os dados são, primeiramente, dependentes do contraste de impedância da interface água/sedimento.

Na figura 42, vemos o *plot* com todas as linhas para os dados de retroespalhamento acústico (*backscatter*) versus amplitude sísmica. É possível separar as análises em três regiões de acordo com esses dois dados. A primeiro domínio corresponde às linhas 640 (preta), 1871 (amarela) e 1890 (verde). Essas áreas são caracterizadas por baixos valores de amplitude sísmica e baixos valores de *backscatter*. Lisniowski (2020) apresenta essas localidades como sendo bacias lamosas profundas e areias de foraminíferos. Além disso, a batimetria aponta para regiões mais profundas dessas linhas.

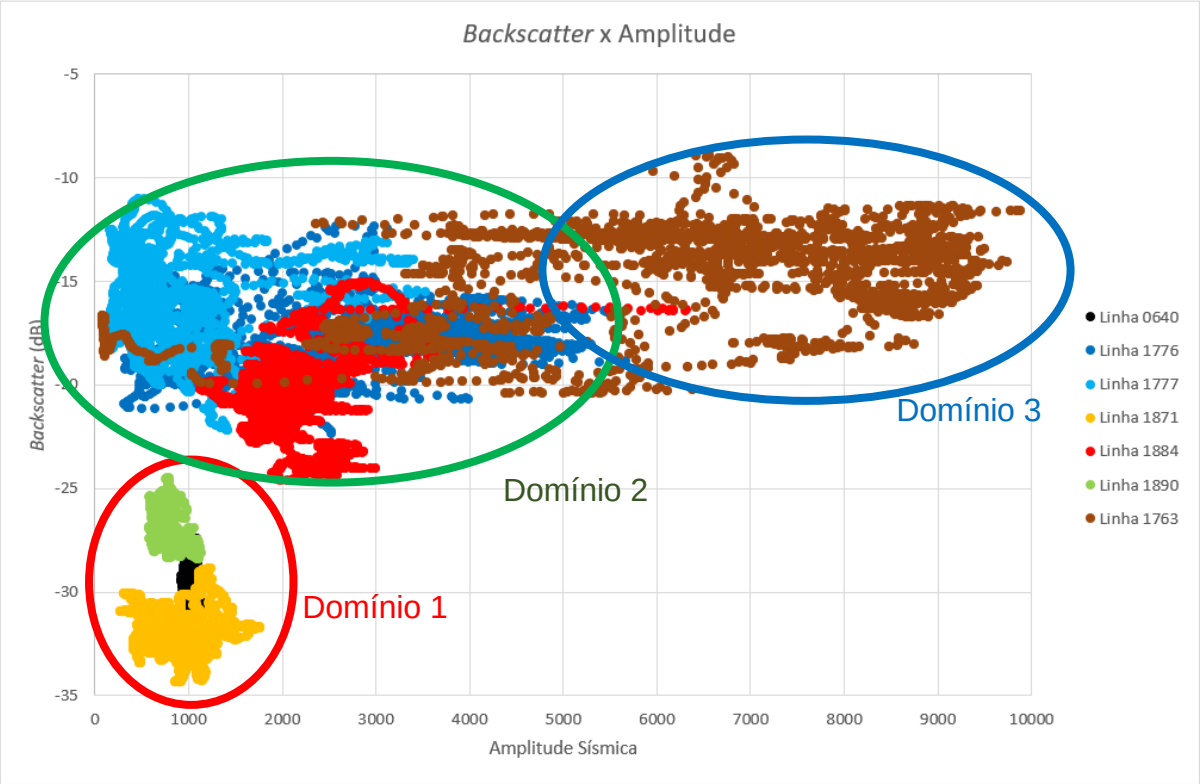

Figura 43: Correlações entre as linhas para os valores de retroespalhamento acústico e amplitude sísmica.

O segundo domínio aponta para regiões com *backscatter* entre -25 e -10 dB, correspondentes às linhas 1776, 1777, 1884 e 1763. Esse domínio já apresenta valores mais altos também para a amplitude e corresponde às regiões que contém presença de crostas polimetálicas.

Entretanto, a maior parte dos dados da linha 1763 pode ser encaixado no terceiro domínio, onde tem-se os valores mais altos de retroespalhamento acústico e amplitude sísmica (> 6000). A linha 1763 está localizada sobre a região descrita como sendo um platô de crostas ferromanganesíferas.

O gráfico apresentado possibilita a distinção de domínios nas linhas estudadas. Porém, isso não foi observado quando foi calculado o coeficiente de correlação. Os baixos valores de r mostram que é fraca ou não existe relação entre os dados. Uma possível explicação é o modo de interação dos dois métodos acústicos com o meio e seu tipo de análise. Devido à diferença de frequência de trabalho do perfilador de sub-fundo (3,5 kHz) e do ecobatímetro multifeixe (12 kHz), a intensidade do sinal terá uma variação considerável. Sinais com frequências menores tendem a penetrar mais no substrato marinho e sofrer com efeitos de absorção e reflexão/ refração, limitando a intensidade do retorno. Os principais efeitos de atenuação do sinal são a divergência esférica e a absorção.

5.9. AMPLITUDE SÍSMICA X PROFUNDIDADE/DECLIVIDADE

Os dados de amplitude sísmica e profundidade/declividade (Figuras 43 e 44) indicam que os valores de amplitude são maiores em regiões menos profundas e com a presença de crostas polimetálicas. Isso pode ser explicado porque os principais efeitos de atenuação do sinal são a divergência esférica e a absorção. Kinsler *et al.* (1982) propôs que à medida que a distância de propagação do sinal aumenta, e quanto maior a frequência do sinal, a absorção é o fator que define a atenuação.

No gráfico de correlação das linhas para os dados de profundidade (Figura 43), observa-se que os valores de amplitude diminuem à medida que as profundidades aumentam. Isso mostra um forte controle da batimetria sobre os dados do perfilador de sub-fundo. De maneira geral, quanto mais profundo, menor será o retorno do sinal devido à diversos fatores como atenuação do sinal, espalhamento, tamanho da pegada e dispersão na interface água/sedimento.

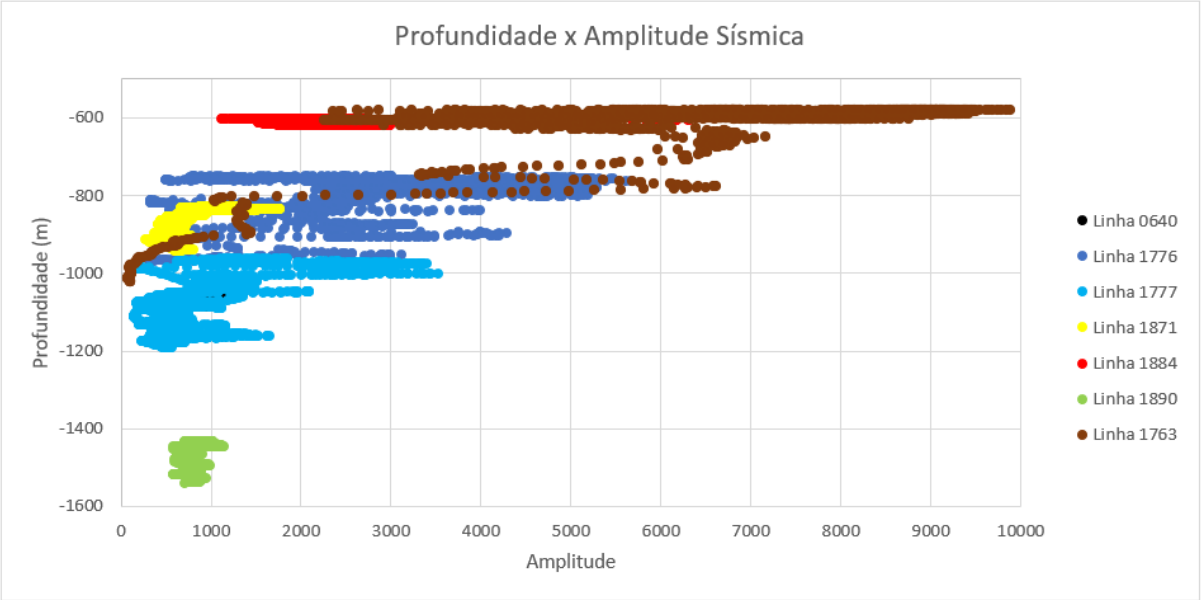

Figura 44: Correlações entre as linhas para os valores de profundidade e amplitude sísmica.

Para as correlações de declividade (Figura 44), é difícil diferenciar as regiões. A complexidade da região com altos estruturais, *guyots* e platôs, além das regiões abissais que compõem a morfologia da ERG resultam em valores variados de

declividade em todas as regiões. Além disso, a medição da declividade a partir da batimetria é pode apresentar erros relativos às correções e à profundidade.

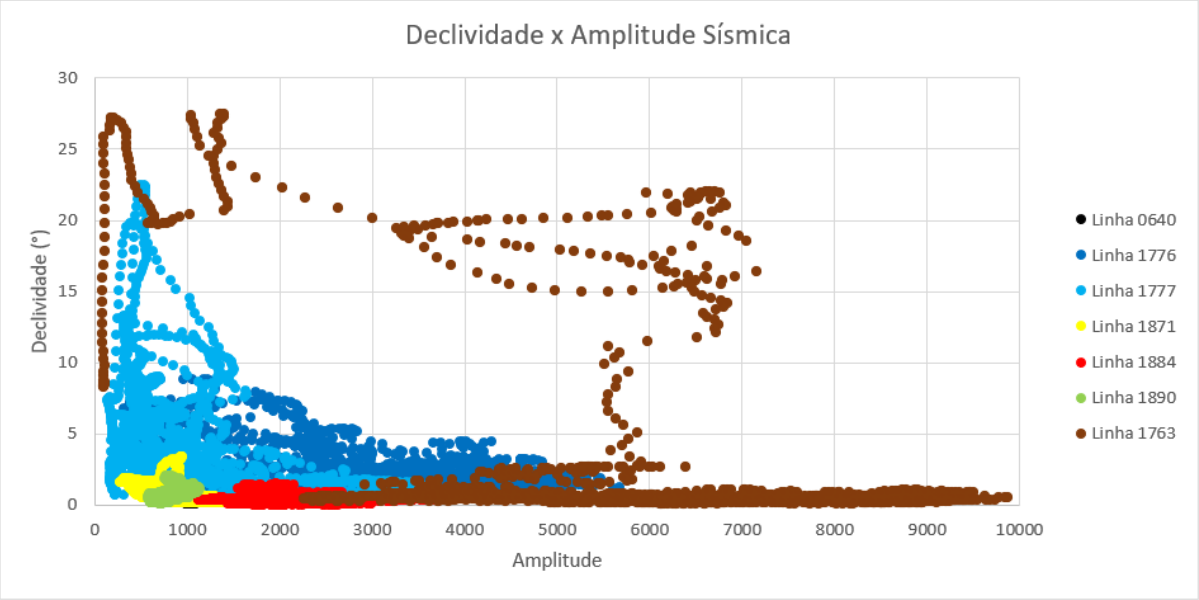

Figura 45: Correlações entre as linhas para os valores de profundidade e amplitude sísmica.

Além disso, os maiores valores de amplitude se concentraram em regiões com pouca inclinação, ou seja, com platôs carbonáticos e platôs de crostas polimetálicas. O perfilador de subfundo trabalha com sistema zero-*offset*, ou seja, com a diretividade do tiro completa abaixo do transmissor. As regiões com pouca rugosidade no fundo favorecem à qualidade do sinal de retorno, uma vez em que regiões mais acidentadas tendem a refletir mais o sinal em outras direções, reduzindo a intensidade sinal de retorno.

O presente trabalho procura entender a disposição das crostas polimetálicas e de outros sedimentos usando a correlação de dados geofísicos acústicos com a geologia e a geomorfologia da região. Os baixos e médios valores de coeficiente de correlação evidenciam que a abordagem tem limitações, sejam elas devido aos equipamentos ou devido à própria geologia do terreno e a profundidade.

A linha 1763 mostrou resultados promissores. O valor do coeficiente aproximou-se de um valor forte (r=0,60) para a relação amplitude

sísmica/profundidade. De modo geral, em profundidades menores, obteve-se valores de amplitude, *backscatter* e r mais altos.

As melhores correlações foram obtidas a partir do cruzamento entre os dados de amplitude e profundidade, o que pode indicar que a batimetria é um fator que controla a intensidade do retorno do sinal.

Ayres Neto *et al.* (2016) aponta para valores de impedância entre 4180 e 9170 kg/s.m^2 para as crostas polimetálicas. A impedância acústica é definida como sendo o produto da velocidade do som e a densidade. Assim sendo, quanto maior a velocidade do som do sedimento, maior será a impedância. Esse dado pode ser relacionado com a amplitude sísmica, pois ela também depende contraste de impedância. E isso ocorre na área de estudo, pois em regiões em que há a presença de crostas, tem-se um aumento significativo no valor da amplitude (valores acima de 6000).

Entretanto, a pegada do perfilador de sub-fundo no leito marinho é de aproximadamente de 2100 m de diâmetro. Tendo o equipamento uma abertura de 35° no feixe de transmissão, em profundidade de 1500m, tem-se a pegada do fundo possivelmente concatenando mais de um domínio em uma mesma informação. A resolução para esse entrave seria a utilização de SBP em um AUV (*Autonomous underwater vehicle*), em que é possível chegar a grandes profundidades, levando o equipamento a aproximadamente 40 m acima do fundo do mar, diminuindo o tamanho da pegada para 56 m, diminuindo o erro do dado associado à presença de mais de um domínio geológico/geomorfológico na resposta acústica. Os fatores de dispersão pelas ondas e pelos movimentos do navio são compensados, uma vez que o equipamento se encontra fisicamente conectado à embarcação. Outro fator que é minimizado pela utilização de um veículo autônomo subaquático para levantamentos geofísicos é a declividade, pois o equipamento acompanha o relevo, mantendo sempre a mesma altura e inclinação próxima à zero em relação ao fundo.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Elevação do Rio Grande ainda é um ambiente pouco estudado devido à diversos fatores. A complexidade do terreno, marcada por características geológicas diversas, torna a compreensão da região um desafio adicional. Além disso, a profundidade da Elevação do Rio Grande, aliada aos altos custos associados à realização de levantamentos geofísicos e geológicos em águas profundas, limita a frequência e a abrangência das pesquisas. Esses obstáculos têm contribuído para um conhecimento ainda limitado sobre as características geológicas e os processos que atuam nessa região.

Entretanto, o interesse do governo brasileiro na extensão da plataforma continental – a chamada Amazônia Azul – e as descobertas de riquezas nessa região (recursos minerais e biodiversidade marinha) tem levado ao aumento do número de pesquisas na região.

Uma abordagem futura pode ser o treinamento de inteligência artificial para a identificação de crostas polimetálicas na ERG, em regiões menos profundas (acima de -900 m), onde a amplitude sísmica seja mais alta (acima de 6000). Porém, mesmo com uma IA bem treinada e com dados mais robustos, ainda se faz necessário a investigação direta, ainda mantendo os custos de estudo e futuramente exploração mineral na Elevação do Rio Grande elevados.

REFERÊNCIAS

AYRES NETO, A. **Uso da sísmica de reflexão de alta resolução e da sonografia na exploração mineral submarina.** Revista Brasileira de Geofísica, v. 18, n. 3, p. 241–256, 2000.

AYRES NETO, A. et al. **Relationship between geoacoustic properties and chemical content of submarine polymetallic crusts from offshore Brazil.** Marine Georesources & Geotechnology, v. 38, n. 4, p. 437–449, 20 abr. 2020.

BARKER, P. F.; CARLSON, R. L.; JOHNSON, D. A. Initial Reports of the DeepSea Drilling Project, 72. [s.l.] U.S. Government Printing Office, 1983. v. 72

BENITES, M. et al. **Genesis and Evolution of Ferromanganese Crusts from the Summit of Rio Grande Rise, Southwest Atlantic Ocean.** Minerals, v. 10, n. 4, p. 349, 14 abr. 2020.

CORDES, E. E.; LEVIN, L. A. **Exploration before exploitation.** Science, v. 359, n. 6377, p. 719–719, 16 fev. 2018.

DIETZ, R. S.; HOLDEN, J. C. **Reconstruction of Pangaea: Breakup and dispersion of continents, Permian to Present.** Journal of Geophysical Research, v. 75, n. 26, p. 4939–4956, 10 set. 1970.

GALVÃO, I. L. G.; DE CASTRO, D. L. **Contribution of global potential field data to the tectonic reconstruction of the Rio Grande Rise in the South Atlantic.** Marine and Petroleum Geology, v. 86, p. 932–949, set. 2017.

GUAN, Y. et al. **Mineralogy, geochemistry and genesis of the polymetallic crusts and nodules from the South China Sea.** Ore Geology Reviews, v. 89, p. 206–227, out. 2017.

KANJI, G. K. **100 statistical tests.** 3rd ed ed. London; Thousand Oaks, Calif: Sage Publications, 2006.

LAMARCHE, G.; LURTON, X. **Recommendations for improved and coherent acquisition and processing of backscatter data from seafloor-mapping sonars.** Marine Geophysical Research, v. 39, n. 1–2, p. 5–22, jun. 2018.

LISNIOWSKI, M. A. **CARACTERIZAÇÃO DE POTENCIAIS HABITATS BENTÔNICOS NA ELEVAÇÃO DO RIO GRANDE.** [s.d.]. 2020.

MOHRIAK, W. U. et al. **Geological and geophysical interpretation of the Rio Grande Rise, south-eastern Brazilian margin: extensional tectonics and rifting of continental and oceanic crusts.** Petroleum Geoscience, v. 16, n. 3, p. 231–245, ago. 2010.

PALMA, J. J. C.; PESSANHA, I. B. M**. Dépositos ferromanganesíferos de oceano profundo.** Revista Brasileira de Geofísica, v. 18, n. 3, p. 433–446, 2000.

PINHO, M. P. D. et al. **3D BATHYMETRY AND ACOUSTIC SEABED CLASSIFICATION OF PELOTAS BASIN, BRAZIL.** Revista Brasileira de Geofísica, v. 34, n. 1, 3 fev. 2016.

REN, Y. et al. **Nano-mineralogy and growth environment of Fe-Mn polymetallic crusts and nodules from the South China Sea.** Frontiers in Marine Science, v. 10, p. 1141926, 24 fev. 2023.

SOUSA, I. M. C. DE. **Crostas Ferromanganesíferas e Sedimentos Carbonáticos da Elevação do Rio Grande: Interpretações Paleoceanográficas e Geológicas**., p. 103, 2019.

SOUZA, L. A. P. D. **Shallow-Water Sub-Bottom Seismic Investigation: a Multi-Frequency Approach. Brazilian Journal of Geophysics**., v. 40, n. 5, 25 out. 2022.

SUBRAHMANYAM, D.; RAO, P. H. **Seismic Attributes- A Review.** [s.d.].

WHITE, R. E. **Properties of instantaneous seismic attributes.** The Leading Edge, v. 10, n. 7, p. 26–32, jul. 1991.

APÊNDICE I

LINHA 640

Amplitude máxima: 1135,61

Amplitude mínimo: 911,51

Backscatter máximo: -27,38

Backscatter mínimo: -31,67

Declividade máxima: 2,02

Declividade mínima: 0,14

Profundidade máxima: -1086,56

Profundidade mínima: -1026,60

N: 2996

Grau de liberdade: 2994

Amplitude sísmica x *backscatter*

R^2: 0,009 R: -0,09 T: -5,05

Equação linear: y = -0,0153x - 28,201

Amplitude sísmica x declividade

R^2: 0,004 R: -0,06 T: -3,45

Equação linear: y = -0,0061x + 1,2793

Amplitude sísmica x profundidade

R^2: 0,30 R:0,55 T: 26,18

Equação linear: y = 2,207x - 1271,9

LINHA 1763

Amplitude máxima: 9879,20

Amplitude mínimo: 79,76

Backscatter máximo: -8,92

Backscatter mínimo: -20,42

Declividade máxima: 27,42

Declividade mínima: 0,11

Profundidade máxima: -1023,08

Profundidade mínima: -580,35

N: 2397

Grau de liberdade: 2395

Amplitude sísmica x *backscatter*

R^2: 0,19 R: 0,43 T: 19,38

Equação linear: y = 0,0005x - 17,825

Amplitude sísmica x declividade

R^2: 0,19 R: -0,44 T: -19,68

Equação linear: y = -0,0011x + 9,4136

Amplitude sísmica x profundidade

R^2: 0,36 R: 0,60 T: 25,07

Equação linear: y = 0,0196x - 738,76

LINHA 1776

Amplitude máxima: 5670,64

Amplitude mínima: 309,60

Backscatter máximo: -12,32

Backscatter mínimo: -22,33

Declividade máxima: 8,90

Declividade mínima: 0,64

Profundidade máxima: -979,11

Profundidade mínima: -749,61

N: 1842

Grau de liberdade: 1840

Amplitude sísmica x *backscatter*

R^2: 0,05 R: 0,22 T: 9,06

Equação linear: y = 0,0025x - 18,425

Amplitude sísmica x declividade

R^2: 0,21 R: -0,45 T: -17,71

Equação linear: y = -0,0058x + 4,2507

Amplitude sísmica x profundidade

R^2: 0,13 R: 0,36 T: 14,67

Equação linear: y = 0,171x - 851,96

LINHA 1777

Amplitude máxima: 3520,32

Amplitude mínimo: 136,76

Backscatter máximo: -11,00

Backscatter mínimo: -22,18

Declividade máxima: 22,51

Declividade mínima: 0,50

Profundidade máxima: -1191,61

Profundidade mínima: -959,91

N: 1778

Grau de liberdade: 1776

Amplitude sísmica x *backscatter*

R^2: 0,01 R: 0,10 T: 4,38

Equação linear: y = 0,0031x - 16,025

Amplitude sísmica x declividade

R^2: 0,12 R: -0,34 T: -13,57

Equação linear: y = -0,0176x + 6,2952

Amplitude sísmica x profundidade

R^2: 0,35 R: 0,59 T: 21,37

Equação linear: y = 0,523x - 1128,8

LINHA 1871

Amplitude máxima: 1765,63

Amplitude mínimo: 269,57

Backscatter máximo: -28,88

Backscatter mínimo: -34,36

Declividade máxima: 3,40

Declividade mínima: 0,18

Profundidade máxima: -941,03

Profundidade mínima: -827,36

N: 2442

Grau de liberdade: 2440

Amplitude sísmica x *backscatter*

R^2: 0,05 R: -0,22 T: -10,77

Equação linear: y = -0,0075x - 31,379

Amplitude sísmica x declividade

R^2: 0,34 R: -0,59 T: -25,00

Equação linear: y = -0,0113x + 1,7013

Amplitude sísmica x profundidade

R^2: 0,56 R: 0,75 T: 29,65

Equação linear: y = 0,7739x - 921,22

LINHA 1884

Amplitude máxima: 6316,27

Amplitude mínimo: 1118,56

Backscatter máximo: -15,04

Backscatter mínimo: -24,58

Declividade máxima: 1,51

Declividade mínima: 0,07

Profundidade máxima: -619,19

Profundidade mínima: -600,36

N: 2442

Grau de liberdade: 2440

Amplitude sísmica x *backscatter*

R^2: 0,11 R: 0,33 T: 15,32

Equação linear: y = 0,0115x - 23,171

Amplitude sísmica x declividade

R^2: 0,008 R: 0,09 T: 4,32

Equação linear: y = 0,0004x + 0,2659

Amplitude sísmica x profundidade

R^2: 0,0009 R: -0,03 T: -1,48

Equação linear: y = -0,0036x - 607,12

LINHA 1890

Amplitude máxima: 1134,66

Amplitude mínimo: 574,66

Backscatter máximo: -24,48

Backscatter mínimo: -28,38

Declividade máxima: 2,12

Declividade mínima: 0,16

Profundidade máxima: -1538,14

Profundidade mínima: -1430,63

N: 1182

Grau de liberdade: 1180

Amplitude sísmica x *backscatter*

R^2: 0,16 R: -0,40 T: -12,81

Equação linear: y = -0,0261x - 24,951

Amplitude sísmica x declividade

R^2: 0,27 R: 0,52 T: 15,91

Equação linear: y = 0,0139x - 0,3921

Amplitude sísmica x profundidade

R^2: 0,03 R: 0,18 T: 6,24

Equação linear: y = 0,505x - 1512,7

APÊNDICE II

Tabela com a distribuição t de Student

Número de graus de liberdade	Nível de significância para o teste bilateral (α)					
	0,20	0,10	0,05	0,02	0,01	0,005
1	3,078	6,314	12,706	31,821	63,657	127,32
2	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	14,089
3	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	7,453
4	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	5,598
5	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	4,773
6	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	4,317
7	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	4,029
8	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	3,832
9	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	3,690
10	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	3,581
11	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	3,497
12	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	3,428
13	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	3,372
14	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	3,326
15	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	3,286
16	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	3,252
17	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,222
18	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,197
19	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,174
20	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,153
21	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831	3,135
22	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,119
23	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807	3,104
24	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797	3,090
25	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787	3,078
26	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,067
27	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,056
28	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,047
29	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,038
30	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750	3,030
40	1,303	1,684	2,021	2,423	2,704	2,971
60	1,296	1,671	2,000	2,390	2,660	2,915
120	1,289	1,658	1,980	2,358	2,617	2,860
∞	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576	2,807