



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS E
GEODINÂMICA

Dissertação

**Comparação entre dados topobatimétricos do sensor ATLAS/ICESat-2 e LiDAR
aerotransportado: estudo de caso no Arquipélago Fernando de Noronha**

RECURSOS HÍDRICOS E MEIO AMBIENTE

Discente: Eduarda de Lima Araujo - 23/2101555

Orientador: Professor Doutor Marco Ianniruberto

Coorientador: Professor Doutor Henrique Llacer Roig

**Comparação entre dados topobatimétricos do sensor ATLAS/ICESat-2 e LiDAR
aerotransportado: estudo de caso no Arquipélago de Fernando de Noronha**

Eduarda de Lima Araujo

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Marco Ianniruberto

Universidade de Brasília

Orientador

Dra. Hortência Maria Barboza de Assis

Superintendente Regional- SGB

Examinadora

Prof. Dr. Luciano Emídio Neves da Fonseca

Universidade de Brasília

Examinador

Brasília, Julho de 2025

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, a Deus e a Nossa Senhora por me guiarem com fé e força ao longo de toda a jornada do mestrado.

À minha mãe, meu pai, minha irmã e aos meus gatos, agradeço pelo amor incondicional, apoio constante e por estarem ao meu lado nos momentos mais desafiadores desses dois anos.

Expresso minha profunda gratidão ao meu orientador, Prof. Dr. Marco Ianniruberto, pelos ensinamentos, orientação dedicada e por ter confiado em mim ao longo deste projeto desafiador. Ao meu coorientador, Prof. Dr. Henrique Roig Llacer, agradeço por sempre acreditar no meu potencial e por sua colaboração.

Agradeço às professoras Dra. Tati e Dra. Rejane, pelo apoio nas disciplinas, pela paciência com minhas dúvidas e pela empolgação e incentivo constante em relação ao desenvolvimento deste trabalho. Ao Prof. Dr. Marcelo Peres e ao Dr. Davi, minha gratidão pelo suporte técnico e pela contribuição essencial na construção dos códigos utilizados.

Às professoras Dra. Sussane e Dra. Alice, agradeço pelas discussões valiosas e por me ajudarem a enxergar novas possibilidades e caminhos para a análise dos dados.

Agradeço também ao laboratório de Sensoriamento Remoto do Instituto de Geociências e aos técnicos, Leandro e Sérgio, pelo suporte técnico e auxílio indispensáveis durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

Também deixo registrado meu agradecimento aos colegas de pós-graduação: Lucas, Luana, Bruna, Sara, Elvis, Alisson, Tayline, Thais, Ana Carolina e Davi. A presença, amizade e ajuda de vocês foram fundamentais para superar os inúmeros desafios dessa caminhada.

A todos, meu sincero muito obrigada.

Resumo

A obtenção de dados batimétricos é crucial para a gestão de recursos hídricos e estudos ambientais, especialmente na extensa zona costeira brasileira. Este estudo avalia a precisão e aplicabilidade de dados topobatimétricos do sensor ATLAS/ICESat-2, comparando-os com dados de LiDAR aerotransportado, com foco no Arquipélago de Fernando de Noronha. Adotou-se uma abordagem segmentada, analisando separadamente o desempenho por feixe individual e por direção orbital (forward/backward) do ICESat-2. A análise revelou que, embora a classificação tradicional de fótons por níveis de confiança (0-4) apresente limitações em ambientes aquáticos, a inclusão de fótons classificados com confiança zero (nível 0) foi fundamental para a reconstrução batimétrica em águas profundas, ampliando a representatividade do fundo marinho e permitindo a detecção de profundidades de até 53.3 metros. A comparação detalhada dos feixes demonstrou que o feixe gt2r destacou-se como o mais robusto entre os feixes individuais (viés de 1.13 m e R^2 de 0.98), apresentando elevada correlação e baixa dispersão dos erros. Entre as direções orbitais, os feixes *backward*, especialmente os fortes (viés de 1.32 m, MAE de 1.61 m, RMSE de 2.13 m), exibiram o melhor desempenho em termos de viés e consistência altimétrica. De forma geral, a análise dos dados de profundidade consistentemente indicou uma tendência do ICESat-2 a superestimar as profundidades (viés positivo), com uma incerteza vertical (RMSE) associada variando de aproximadamente a 2.6 metros entre os diferentes feixes e direções. Os resultados comprovam a alta aplicabilidade do ICESat-2 para estimativas batimétricas regionais em áreas remotas e de difícil acesso, mesmo na ausência de dados LiDAR, oferecendo precisão suficiente para diversos fins.

Palavras-chave: ALB; batimetria; altímetro, ATLAS; recursos hídricos; ATL03

Abstract

Obtaining accurate bathymetric data is essential for managing water resources and conducting environmental studies, particularly in Brazil's extensive coastal zone. This study evaluates the accuracy and applicability of topobathymetric data from the ATLAS/ICESat-2 sensor by comparing it with airborne LiDAR data. The study focuses on the Fernando de Noronha Archipelago. We adopted a segmented approach, analyzing the performance of ICESat-2 separately by individual beam and by orbital direction (forward/backward). The analysis revealed that although the traditional classification of photons by confidence levels (0–4) is limited in aquatic environments, including photons classified with zero confidence (level 0) was essential for reconstructing the seabed in deep waters. This expanded representativeness allowed for the detection of depths up to 53.3 meters. Detailed beam comparisons showed that the GT2R beam was the most robust (bias of 1.13 m and R^2 of 0.98), presenting high correlation and low error dispersion. Among the orbital directions, the backward beams, particularly the strong ones, exhibited the best performance in terms of bias and altimetric consistency (bias of 1.32 m, MAE of 1.61 m, and RMSE of 2.13 m). Overall, the depth data analysis consistently indicated a tendency for ICESat-2 to overestimate depths (positive bias), with associated vertical uncertainties (RMSE) ranging from approximately 2.6 meters between different beams and directions. These results demonstrate the high applicability of ICESat-2 for regional bathymetric estimates in remote and difficult-to-access areas, even in the absence of LiDAR data. ICESat-2 provides sufficient accuracy for various purposes.

Keywords: ALB, bathymetry, altimeter, ATLAS, water resources, ATL03

Índice

Agradecimentos.....	3
Resumo.....	4
Abstract.....	5
Índice.....	6
Índice de Figuras.....	9
Índice de Tabelas.....	11
SIGLAS.....	12
Capítulo 1 - Introdução.....	1
Capítulo 2 - Referencial teórico.....	3
2.1) A Evolução da Batimetria por Sensoriamento Remoto.....	3
2.2) Fundamentos Físicos da Batimetria por Sensoriamento Remoto.....	3
2.2.1) Propriedades Fundamentais da Luz (Espectro Eletromagnético).....	3
2.2.2) Por que a Luz Verde é Utilizada?.....	4
2.2.3) Interação da Luz com a Atmosfera e o Oceano.....	4
2.2.4) Princípios da Batimetria por Sensoriamento Remoto.....	5
2.2.5) Impacto da qualidade da água no Laser verde.....	6
2.3) Tecnologias e Técnicas de Batimetria por Sensoriamento Remoto.....	7
2.3.1) Principais técnicas de batimetria por sensoriamento remoto.....	9
2.3.2) Detalhamento das Técnicas.....	9
2.3.2.1) Batimetria Derivada de Satélite (SDB).....	9
2.3.2.2) Lidar aerotransportado.....	12
2.3.2.3) Missão ICESat-2.....	12
2.3.2.4) ICESat-2 (Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite 2).....	13
2.3.2.6) Discussão atual sobre o ICESat-2.....	14
2.3.2.6) Aplicação do ICESat-2 no Brasil.....	14
2.3.2.7) Avaliação e Análise Comparativa.....	15
Capítulo 3 – Missão ICESat-2 e o Sensor ATLAS.....	16
3.1) Missões Anteriores e Comparação com o ICESat-2.....	16
3.2) Funcionamento e tecnologia do ATLAS.....	17
3.2.1) O observatório do ICESat-2.....	19
3.2.2) O instrumento ATLAS.....	19
a) Transmissor.....	20
b) Receptor.....	21
c) Sistema de monitoramento e controle de alinhamento.....	22
3.3) Processamento e Filtragem de Dados.....	23
3.4) Tempo Morto e estratégias de mitigação.....	23
3.5) Taxa de fótons de fundo.....	24
3.6) Produto de Dados do ICESat-2.....	24
3.6.4) Geolocalização de fótons e altura elipsoidal.....	28

3.6.5) Máscaras de classificação de superfície.....	28
3.6.6) Classificação dos fótons.....	29
3.6.7) Tempo de voo dos fótons.....	30
3.6.8) Fluxo de processamento e aplicações.....	31
3.6.9) Seleção dos fótons.....	32
3.6.10) Limitações e desafios.....	33
3.6.11) Aplicação em batimetria.....	33
3.7) Correções geofísicas.....	34
3.7.1) Tipos de correções aplicadas.....	34
3.7.2) Parâmetros estáticos e valores de referência.....	35
3.7.4) Correções não aplicadas no subproduto do ATLAS (ATL03).....	38
3.7.4.1) Correção atmosférica.....	39
I. Constituintes atmosféricos e processos de correção.....	39
II. Efeitos dos particulados atmosféricos.....	40
III. Radiação e correção em sensores remotos.....	40
IV. Aplicação no ICESat-2.....	44
3.7.4.2) Correção da refração - Lei de Snell.....	45
• Efeito da refração.....	46
• Processo de correção.....	46
3.7.4.3) Correções das marés terrestres.....	49
3.7.4.4) Correções dinâmicas da topografia oceânica.....	49
3.7.4.5) Correção do geoide.....	49
Capítulo 4- Metodologia.....	51
4.1) Área de Estudo.....	51
4.1.1) Localização e Contexto Geral.....	51
4.1.2) Justificativa da Escolha da Área.....	51
4.1.3) Características Ambientais e Oceanográficas.....	53
4.1.3.1) Geologia e Geomorfologia.....	53
4.1.3.2) Oceanografia e Clima.....	53
4.1.4) Dados de Referência: Levantamento LiDAR Aerotransportado (SGB/CPRM).....	54
4.2) O Subproduto ATL03 do ICESat-2: Processamento e Aplicações Batimétricas.....	54
4.2.1) Estrutura e Conteúdo do ATL03.....	54
4.2.2) Nível de Processamento e Validação.....	55
4.2.1.3) Correções Geofísicas Aplicadas ao ATL03.....	55
4.2.1.4) Ajustes Adicionais para Aplicações Batimétricas.....	55
4.3 Processamento dos dados.....	56
4.3.1) Pré-processamento do ATL03.....	56
4.3.2) Correções aplicadas.....	62
4.3.2.1) Conversão da altura elipsoidal para ortométrica.....	63
4.3.2.2) Correção de maré (Ocean Tide Correction).....	63

4.3.2.3) Correção atmosférica dinâmica (Dynamic Atmospheric Correction - DAC).....	64
4.3.2.4) Correção de refração (Snell's Law Correction).....	66
4.3.2.4) Filtragem da reverberação.....	67
4.3.3) Resultados das correções.....	67
Capítulo 5 - Resultados e Discussão.....	70
5.1) Classificação e Confiança dos Fótons no ICESat-2.....	70
5.2) Desafios em ambientes aquáticos.....	70
5.3) Importância dos Fótons de Nível 0.....	71
5.4) Avaliação dos resultados.....	71
5.4.1) Visão geral dos dados.....	71
5.4.1.1 Estratégia de avaliação dos dados.....	72
5.4.2) Critérios de avaliação.....	72
5.4.3) Desempenho por feixe: comparação ICESat-2 vs. LiDAR.....	77
5.4.3.1) Avaliação dos conjuntos dos feixes fortes.....	79
• Feixe gt1r.....	84
• Feixe gt2r.....	84
• Feixe gt3r.....	85
5.4.3.2) Análise comparativa dos feixes gt1r, gt2r e gt3r.....	86
5.4.3.3) Avaliação dos conjuntos dos feixes fracos.....	87
• Feixe gt1l.....	87
• Feixe gt2l.....	88
• Feixe gt3l.....	89
5.4.3.3) Análise Comparativa dos Feixes gt1l, gt2l e gt3l.....	90
5.4.4) Análise dos resultados dos conjuntos dos feixes.....	91
5.4.5) Análise Direcional: Forward x Backward.....	97
5.4.5.1) Análise Direcional Forward (Norte - Sul).....	97
• Análise do conjunto de feixes fracos no sentido forward.....	97
• Análise do conjunto de feixes fortes no sentido forward.....	100
• Análise do conjunto de feixes fracos no sentido backward.....	103
• Análise do conjunto de feixes fortes no sentido backward.....	104
5.4.5.3 Análise Comparativa dos Desempenhos Altimétricos por Tipo de Feixe e Direção.....	105
5.4.6) Avaliação da Análise.....	109
5.5) Discussão dos Erros e Incertezas.....	109
Capítulo 6 - Conclusões.....	112
7. Referências.....	115

Índice de Figuras

Figura 1- Linha do tempo e informações chave de 25 missões de altimetria por satélite lançadas nos últimos 50 anos. Cada barra retangular representa uma missão, com o comprimento da barra indicando o período de operação, e a cor indicando o modo de operação da missão.....	17
Figura 2- Padrão idealizado do feixe e pegada do ICESat-2.....	19
Figura 3- Fluxo de processamento dos dados base ATL02 para a formulação dos subprodutos do ICESat-2.....	26
Figura 4. Variação do padrão do feixe ATLAS no solo com a orientação do observatório CIEM.....	27
Figura 6- (a) radiação direta; (b) radiação difusa; (c) radiação ambiental.....	41
Fonte: Zullo Júnior (1994).....	41
Figura 7- Esquema sobre o espalhamento no sentido terra-sensor: (a) radiação direta; (b) radiação difusa; (c) radiação ambiental.....	42
Fonte: Zullo Júnior (1994).....	42
Figura 8- Relação entre os parâmetros (α , β) e a visibilidade atmosférica.....	44
Figura 9- Ilustração da refração do laser do ICESat-2.....	46
Figura 10- Diagrama da correção da refração nos fótons.....	47
Figura 12 - Fluxograma da configuração do ambiente e seleção de dado.....	57
Figura 13 - Gráficos da variação dos fótons: a) em relação a longitude (longitude x altitude) ; b) em relação a latitude (latitude x altitude); c) Trilha do sensor ATLAS (https://openaltimetry.earthdatacloud.nasa.gov/data/icesat2/).....	59
Figura 14- Fluxograma de processamento de correções de geolocalização e geofísicas de dados do ICESat-2.....	61
Figura 15 - Perfil do nível de qualidade dos fótons nível 0 (a), 2 (b) , 3 (c) e 4 (d)....	62
Figura 16 - a) Perfil da altura ortométrica (Ho1) após (verde) e antes (azul) da correção da variação da maré ao longo da latitude ; b) perfil da altura ortométrica (Ho1) após e antes da correção da variação da maré ao longo da longitude.....	64
Figura 17 - Perfil da altura ortométrica corrigida (Ho2) em laranja e altura ortométrica Ho1 em azul com as correções atmosféricas, ao longo da latitude.....	65
Figura 18 - Pontos de reverberação presentes no conjunto de fótons.....	66
Figura 19 - Resultado da remoção dos pontos de reverberação, com a delimitação da superfície terrestre (em vermelho), nível d'água (nível 0), assoalho oceânico (em verde) e os pontos originais do ICESat-2 antes das correções.....	67
Figura 20 - Fluxograma da comparação dos dados do ICESat-2 com o LiDAR.....	68
Figura 21- Mapa de localização dos conjunto dos seis feixes do ICESat-2.....	77
Figura 22 - Histograma da distribuição de profundidade de todos os fótons registrados	78
Figura 24 - Gráficos das regressões lineares do conjunto dos fótons de retorno de cada feixes fortes e fracos.....	81
Figura 25 – Regressões lineares entre as altitudes obtidas pelos feixes do ICESat-2 (ATL03) e os dados de referência LiDAR aerotransportado, na área do Arquipélago de Fernando de Noronha. A linha preta representa a reta de referência ideal ($y = x$)..	92

Figura 26 - Mapa com as marcações dos conjuntos de fótons fortes e fracos na direção forward e regressão linear.....	98
Figura 27 - Mapa com as marcações dos conjuntos de fótons fracos e fortes na direção backward e gráficos da regressão linear.....	102
Figura 28 – Regressões lineares entre as profundidades obtidas pelos feixes do ICESat-2 (ATL03) e os dados de referência LiDAR. A linha preta tracejada representa a reta de referência ($y = x$).....	108

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Comparação entre sensores remotos ativos e passivos voltados para a coleta de dados batimétricos.....	8
Tabela 2- Técnicas de batimetria por sensoriamento remoto.....	10
Tabela 3- Tabela comparativa entre os sensores/método.....	15
Tabela 4- Relação dos parâmetros de saturação e tamanho com relação a visibilidade.....	43
Tabela 5 – Estatísticas para avaliação da qualidade dos feixes do ICESat-2 com base na comparação com dados de referência (LiDAR aerotransportado).....	74
Tabela 6 –Tabela com as profundidades registradas por feixe do ICESat-2 em metros.....	79
Tabela 7 - Estatísticas da comparação entre os dados do ICESat-2 e LiDAR aerotransportado para cada feixe.....	94
Tabela 8 - Resultados de análise estatísticas da orientação do satélite.....	106

SIGLAS

ALB – *Airborne Laser Bathymetry* (Batimetria a Laser Aerotransportada)

ATLAS – *Advanced Topographic Laser Altimeter System* (Sistema Avançado de Altimetro Topográfico a Laser)

BSM – *Beam Steering Mechanism* (Mecanismo de Direção do Feixe)

DAC – *Dynamic Atmospheric Correction* (Correção Atmosférica Dinâmica)

DEM – *Digital Elevation Model* (Modelo Digital de Elevação)

DOE – *Diffraction Optical Element* (Elemento Óptico Difractivo)

GLAS – *Geoscience Laser Altimeter System* (Sistema de Altimetro Laser de Geociências)

GPS – *Global Positioning System* (Sistema de Posicionamento Global)

GTs – *Ground Tracks* (Trilhas Terrestres)

HOL – *Ocean Loading* (Deformações de Carregamento Oceânico)

HOPT – *Ocean Pole Tide* (Maré Polar Oceânica)

HP – Altura do Evento de Fóton

HSEPT – *Solid Earth Pole Tide* (Maré Polar da Terra)

HSET – *Solid Earth Tide* (Maré da Terra Sólida)

HTCA – Correção do Atraso Atmosférico Total da Coluna

ICESat-2 – *Ice, Cloud and land Elevation Satellite-2*

IMU – *Inertial Measurement Unit* (Unidade de Medição Inercial)

LIDAR – *Light Detection and Ranging* (Detecção e Medição de Distâncias por Luz)

LRS – *Laser Reference System* (Sistema de Referência do Laser)

NASA – *National Aeronautics and Space Administration*

NSIDC DAAC – *National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center*

OL – *Ocean Loading* (Maré Oceânica de Carga)

OPT – *Ocean Pole Tide* (Maré Polar Oceânica)

PCE – *Photon Counting Electronics* (Placas Eletrônicas de Contagem de Fótons)

PMT – *Photomultiplier Tube* (Tubo Fotomultiplicador)

POD – *Precise Orbit Determination* (Determinação de Órbita de Precisão)

PPD – *Precise Pointing Determination* (Determinação de Apontamento de Precisão)

PRF – *Pulse Repetition Frequency* (Frequência de Repetição de Pulso)

RGTs – *Reference Ground Tracks* (Trilhas Terrestres de Referência)

SDB – *Satellite-Derived Bathymetry* (Batimetria Derivada por Satélite)

SEPT – *Solid Earth Pole Tide* (Maré Polar da Terra)

SET – *Solid Earth Tide* (Maré da Terra Sólida)

SNR – *Signal-to-Noise Ratio* (Relação Sinal-Ruído)

TCA – *Total Column Atmospheric delay* (Atraso Atmosférico Total da Coluna)

TEP – *Time Event Processing* (Processamento de Eventos Temporais)

TOF – *Time of Flight* (Tempo de Voo)

WGS-84 – *World Geodetic System 1984* (Sistema Geodésico Mundial 1984)

Capítulo 1 - Introdução

A obtenção de dados batimétricos é fundamental para aplicações em recursos hídricos e estudos ambientais, incluindo segurança da navegação, estudos hidrodinâmicos, transporte de sedimentos e mapeamento de habitats bentônicos (Collie et al., 2000). No contexto da gestão costeira, o mapeamento batimétrico assume um papel crucial, dado que as zonas costeiras são áreas de intensa atividade econômica e alta sensibilidade a impactos antrópicos. A importância desse mapeamento é ainda mais evidente frente à necessidade de monitorar os ambientes marinhos sujeitos às mudanças climáticas e ao aumento do nível do mar, que ameaçam a sustentabilidade e a biodiversidade dos ecossistemas marinhos e costeiros (Kutser et al., 2020; Hoegh-Guldberg et al., 2007). A evolução das técnicas de mapeamento é, portanto, essencial para uma gestão eficaz dessas áreas.

Diversas técnicas de sensoriamento remoto têm sido empregadas na coleta de dados batimétricos e geomorfológicos, cada uma com suas vantagens e limitações. Entre essas técnicas, destacam-se a Batimetria Derivada de Satélite (SDB), o LIDAR (*Light Detection And Ranging*), aerotransportado (ALB) e o sistema *ATLAS* do *ICESat-2*. A Batimetria Derivada de Satélite (SDB) foi desenvolvida na década de 1980, utiliza imagens ópticas de satélites para estimar a profundidade das águas rasas. A técnica envolve a análise de sinais refletidos da superfície da água e a aplicação de modelos ópticos para inferir a profundidade (Stumpf et al., 2003). Modelos SDB são classificados como físicos, empíricos e semi empíricos. Modelos físicos, apesar de detalhados, são intensivos em computação. Modelos empíricos dependem da qualidade dos dados *in situ* e são mais rápidos, enquanto modelos semi empíricos, como o modelo de razão de bandas, equilibram precisão e eficiência computacional e são amplamente utilizados para a determinação da profundidade em áreas rasas (Kutser et al., 2020).

O LIDAR aerotransportado usa pulsos laser para medir a profundidade da água a partir de plataformas aéreas. Esta tecnologia pode fornecer densidades de dados de até 20 pontos por metro quadrado, oferecendo uma resolução alta em áreas acessíveis. No entanto, assim como o SDB, o *Lidar* aerotransportado enfrenta desafios em águas turvas, onde a alta concentração de sedimentos e a vegetação podem interferir na propagação do sinal laser (Guenther et al., 2000). Apesar dessas limitações, o LiDAR aerotransportado é valioso para áreas de difícil acesso e para aplicações que exigem alta resolução e cobertura rápida.

Lançado em setembro de 2018, o satélite *ICESat-2* é equipado com o *Advanced Topographic Laser Altimeter System (ATLAS)*, um sistema *LIDAR* inovador que utiliza um laser verde de 532 nm para penetrar na coluna d'água e coletar dados batimétricos com alta precisão (Neumann et al., 2019). O *ATLAS* opera com tecnologia de contagem de fótons, permitindo medir a superfície terrestre e a hidrosfera com uma densidade de aproximadamente 10 pontos por metro quadrado (Markus et al., 2017). Embora o *ICESat-2* ofereça avanços significativos em comparação com seu predecessor, o *ICESat*, ele ainda enfrenta limitações relacionadas às condições atmosféricas e variabilidade do nível da água, que podem afetar a precisão dos dados (Parrish et al., 2019).

A integração de tecnologias como o *ICESat-2*, os ALB (*Airborne Laser Bathymetry*) e sensores multiespectrais, como o Sentinel-2 (*SDB*), tem o potencial de aprimorar a geração de mapas batimétricos, oferecendo uma solução para muitas das limitações dos métodos tradicionais (Xi et al., 2020; Parrish et al., 2019). Este estudo visa comparar a tecnologia Lidar do *ICESat-2* com dados de referência de LiDAR aerotransportado, obtidos a partir do levantamento realizado pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM) em **janeiro de 2011**, no âmbito do projeto Plataforma Continental Rasa do Brasil, focado no arquipélago de Fernando de Noronha (CPRM, 2014). O objetivo é avaliar a precisão e a aplicabilidade do *ATLAS* em regiões oceânicas e contribuir para a literatura científica sobre a aplicação do *Lidar* em águas tropicais costeiras. Além disso, a pesquisa fornece uma base para futuros estudos sobre o uso das missões do *ICESat-2* em regiões costeiras e oceânicas, abordando as particularidades e complexidades dessas áreas e promovendo avanços na gestão e conservação dos corpos hídricos.

Capítulo 2 - Referencial teórico

2.1) A Evolução da Batimetria por Sensoriamento Remoto

Desde a década de 90 o levantamento batimétrico por Sensoriamento Remoto tem evoluído significativamente com os avanços de novos sensores e o desenvolvimento de tecnologias para batimetria orbital. A batimetria por Sensoriamento Remoto se tornou uma ferramenta essencial para mapear os ambientes subaquáticos, podendo ser utilizada em setores como: engenharia costeira, preservação ambiental, exploração de recursos naturais e segurança marítima (Lurton et al., 2010).

Se, no passado, as medições eram realizadas de maneira bastante rudimentar, utilizando cordas com pesos para determinar as profundidades, com o tempo, esses métodos foram substituídos por sonares acústicos, inicialmente de feixe único e, mais tarde, de feixe múltiplo, que permitiram uma maior precisão e rapidez no mapeamento do fundo do mar. Na década de 1990, a chegada do Lidar aerotransportado marcou um novo marco, ao viabilizar o mapeamento de áreas costeiras com alta resolução e custos operacionais reduzidos, tornando os levantamentos mais eficientes e acessíveis (Lurton et al., 2010).

Em 2018 o sistema baseado em satélite ICESat-2, revolucionou a batimetria ao fornecer dados globais de elevação terrestre e marinha, ultrapassando as limitações geográficas dos métodos convencionais (Neumann et al., 2019). Essa avançada técnica de sensoriamento remoto trouxe não apenas melhorias na precisão e na abrangência das medições, mas também tornou possível integrar dados batimétricos a outros sistemas geoespaciais, ampliando seu uso no monitoramento ambiental, na gestão de recursos hídricos, conhecimento sobre problemas climáticos e planejamento e verificação da infraestrutura costeira (Smith & Sandwell, 1997).

2.2) Fundamentos Físicos da Batimetria por Sensoriamento Remoto

2.2.1) Propriedades Fundamentais da Luz (Espectro Eletromagnético)

A radiação eletromagnética (REM) compreende uma ampla gama de comprimentos de onda, desde os raios gama até as ondas de rádio. No contexto do sensoriamento remoto óptico, a faixa de interesse concentra-se no espectro visível (400–700 nm) e no infravermelho próximo (700–1000 nm). A interação da luz com a água é dependente do comprimento de onda, sendo

que os mais curtos (azul e verde) possuem maior capacidade de penetração (Jerlov et al, 1976). Essas características tornam essas faixas espectrais (azul e verde) ideais para a obtenção de dados batimétricos por sensores orbitais e aerotransportados.

2.2.2) Por que a Luz Verde é Utilizada?

A luz verde, com comprimento de onda de aproximadamente 532 nm, é a mais utilizada em sistemas LiDAR batimétricos e em algoritmos de Batimetria Derivada de Satélite (SDB). Essa escolha deve-se ao fato de que o verde representa um equilíbrio ideal entre penetração na coluna d'água e capacidade de retorno do sinal, principalmente em águas claras (Neumann et al., 2019; Parsons et al., 2022). Sensores como o ATLAS (*Advanced Topographic Laser Altimeter System*), embarcado na missão ICESat-2, operam com laser verde justamente por essa eficiência. A combinação entre profundidade alcançada e resolução torna essa faixa espectral particularmente útil na detecção simultânea da superfície e do fundo d'água.

2.2.3) Interação da Luz com a Atmosfera e o Oceano

A interação da luz com o ambiente marinho é determinada por uma série de processos físicos que afetam a intensidade e a direção da radiação. Os principais processos são:

- **Reflexão:** Uma parte da luz incidente é refletida diretamente na interface ar-água, o que pode causar saturação do sinal ou interferências, especialmente sob altos ângulos solares (Jerlov et al., 1976).
- **Refração:** Ao atravessar a interface ar-água, a luz sofre mudança de direção devido à diferença no índice de refração dos meios. Isso afeta a geometria da detecção e deve ser corrigido em modelos de profundidade (Jerlov et al., 1976).
- **Absorção:** A absorção seletiva da luz pela água depende do comprimento de onda. O infravermelho e o vermelho são rapidamente absorvidos, enquanto o azul e o verde penetram mais profundamente (Jerlov et al., 1976).
- **Dispersão:** Partículas em suspensão, matéria orgânica e sedimentos dispersam a luz, afetando a clareza da água. A magnitude da dispersão impacta diretamente a precisão dos modelos batimétricos (Jerlov et al., 1976).

A profundidade efetiva de penetração da luz, denominada profundidade óptica, varia conforme a turbidez da água, concentração de clorofila e presença de sedimentos, sendo um dos principais limitantes da batimetria óptica (Stumpf et al., 2003; Neumann et al., 2019).

2.2.4) Princípios da Batimetria por Sensoriamento Remoto

Além das bases conceituais sobre a interação da luz com o oceano, propostas por Jerlov et al. (1976), que classificou as águas oceânicas com base na penetração da luz visível e estabeleceu as bases da óptica marinha, estudos mais recentes têm avançado significativamente na compreensão do comportamento da luz em ambientes costeiros e opticamente complexos. Autores como Lee et al. (1999) e o grupo IOCCG (2000) desenvolveram modelos que consideram as características específicas da coluna d'água, incluindo absorção e espalhamento em diferentes bandas do espectro eletromagnético.

Esses modelos têm sido fundamentais para aplicações como a Batimetria Derivada de Satélite (SDB), que depende diretamente da correta interpretação da interação entre a luz (em especial nas bandas do verde e azul) e o ambiente marinho. Trabalhos como os de Lavelle et al. (2020) e Pe'er et al. (2020) demonstram a aplicação moderna desses princípios na geração de dados batimétricos precisos, utilizando sensores como o Sentinel-2 e o WorldView-3, reforçando a importância da luz verde devido à sua maior penetração em águas rasas.

A batimetria por sensoriamento remoto é uma técnica essencial para a obtenção de dados sobre o relevo subaquático, utilizando a emissão de pulsos eletromagnéticos, como os de laser (LiDAR), ou sinais acústicos, e medindo o tempo de retorno desses pulsos. Com base nessa informação, é possível calcular a distância entre o sensor e o fundo do corpo d'água, permitindo a construção de um modelo tridimensional da topografia submersa (Sánchez et al., 2014). O LiDAR batimétrico, por exemplo, emite pulsos laser que atravessam a coluna d'água, interagem com a superfície e com objetos submersos, e refletem de volta ao sensor. A profundidade do local é determinada a partir do tempo de voo desses pulsos, de forma similar à eco-sondagem, mas com maior precisão em águas transparentes, onde a penetração da luz é mais eficiente (Hughes et al., 2016).

Para garantir medições precisas, tanto na ecobatimetria quanto na batimetria por LiDAR, é fundamental considerar variáveis oceanográficas durante o processamento dos dados. Um dos principais fatores é a velocidade do som e da luz na água, que varia conforme a temperatura,

salinidade e pressão da água, tornando necessário corrigir as medições para compensar os efeitos da refração das ondas (Carter et al., 1993).

Outro aspecto relevante é a influência das marés, pois as flutuações do nível do mar podem impactar significativamente as profundidades medidas, especialmente em zonas costeiras. Além disso, as correntes podem alterar as características das massas d'água, alterando a trajetória do sinal acústico ou laser, afetando a precisão das medições. Para minimizar esses efeitos, são aplicados modelos de correção baseados em séries temporais e dados hidrodinâmicos, ajustando as medições conforme as variações da maré e das correntes (Birkett et al., 1999). A presença de vegetação aquática, como algas e plantas marinhas, também pode afetar a qualidade dos dados, pois os sinais podem ser refletidos antes de atingir o fundo. Para contornar esse problema, sensores com capacidade de registrar múltiplos retornos por pulso são utilizados, além de algoritmos de filtragem que ajudam a diferenciar a vegetação do substrato subaquático (Thomas et al., 2012).

A composição do fundo marinho é outro fator que influencia a precisão das medições. Superfícies rochosas refletem os sinais de maneira distinta em relação a sedimentos arenosos ou lodosos, o que pode exigir ajustes nos algoritmos de processamento. Modelos de propagação de sinal e técnicas de correção específicas para diferentes tipos de fundo têm sido desenvolvidos por diferentes pesquisadores para lidar com essas variabilidades (Hofmann et al., 2016).

Dessa forma, apesar de ser uma ferramenta poderosa para o mapeamento subaquático, a batimetria por sensoriamento remoto demanda um processamento cuidadoso dos dados e a aplicação de múltiplas correções para garantir resultados precisos e confiáveis. A integração de diferentes tecnologias, como LiDAR e sonar, aliada ao uso de modelos de correção, possibilita o mapeamento detalhado de áreas marinhas e costeiras.

2.2.5) Impacto da qualidade da água no Laser verde

A qualidade da água pode impactar significativamente os resultados das medições batimétricas utilizando laser verde, como o do ICESat-2. A presença de sedimentos em suspensão, matéria orgânica e outros elementos pode atenuar o sinal do laser, reduzindo a precisão das medições. Estudos mostram que, em águas claras, o laser verde pode penetrar até maiores profundidades, enquanto em águas turvas, a penetração é limitada (Smith et al.,

2019) . Devido a essas limitações, alguns trabalhos mostram comparações com uma base de dados limitada, sendo necessário avaliar diversas passagens na busca da melhor qualidade de fótons adquiridos.

2.3) Tecnologias e Técnicas de Batimetria por Sensoriamento Remoto

Na batimetria por sensoriamento remoto podemos dividir os sensores em ativos e passivos dependendo da energia utilizada para captar dados. Segundo Jensen, 2009, os sensores remotos ativos apresentam como principal característica a não dependência da radiação solar, ou seja, produzem sua própria energia para interagir com o objeto ou superfície ou fundo de corpos hídricos. Em contrapartida, os sensores remotos passivos são dependentes da radiação solar ou de fontes externas (Oliveira et al., 2003). Nessa dissertação serão apresentados dados apenas de sensores ativos cuja energia é emitida pela própria fonte (ALB e ICESat-2). Na tabela 1 é apresentada uma análise comparativa entre os sensores ativos e passivos.

Apesar dos avanços nas técnicas de coleta de dados batimétricos por sensoriamento remoto ainda é necessário enfrentar desafios na coleta e processamento dos dados, tais como, turbidez da água, presença de vegetação e altos custos de operação em larga escala ainda são obstáculos significativos. No entanto, o contínuo desenvolvimento tecnológico, a presença de satélites com sensores ativos na coleta de dados, reduzindo os custos operacionais indicam um futuro promissor para aplicações mais amplas e acessíveis (Carter et al., 2019).

Tabela 1 - Comparação entre sensores remotos ativos e passivos voltados para a coleta de dados batimétricos

SENSORES ATIVOS X SENSORES PASSIVOS		
Aspecto	Sensores Ativos	Sensores Passivos
Definição	Emitem sua própria fonte de energia para interagir com o objeto ou superfície.	Dependem de fontes externas de energia, como a luz solar ou radiação térmica.
Fonte de Energia	Energia gerada pelo próprio sensor (ex.: ondas sonoras, pulsos laser, radar).	Energia natural (ex.: luz solar ou radiação emitida pela superfície).
Operação Noturna	Funciona independentemente da iluminação solar, podendo operar à noite.	Limitado à presença de luz ou outras fontes naturais de energia.
Exemplos de Sensores	- Sonar (feixe único e multifeixe) - Lidar Batimétrico (ALB & ICESat-2) - Radar (SWOT).	- SDB (Satellite-Derived Bathymetry) - Sensores ópticos para satélites.
Vantagens	- Operam em qualquer condição de iluminação. - Alta precisão em ambientes específicos (ex.: profundidades).	- Cobrem grandes áreas simultaneamente. - Menor custo em alguns casos.
Desvantagens	- Dependem de sistemas mais complexos e caros. - Podem ser afetados por interferências atmosféricas.	- Limitados à energia natural disponível. - Menor precisão em certas aplicações.
Aplicações Típicas	- Mapeamento de profundidades submersas. - Estudos topográficos detalhados.	- Monitoramento de áreas rasas e zonas costeiras. - Estudos de vegetação.

Fonte: Elaboração própria (2025) com base em Jensen (2009) e Oliveira et al. (2003)

2.3.1) Principais técnicas de batimetria por sensoriamento remoto

A tabela 2 apresenta uma síntese das principais técnicas de batimetria por sensoriamento remoto, destacando seus princípios de funcionamento, equipamentos e plataformas utilizados, bem como suas vantagens, limitações, aplicações típicas e referências relevantes. Essas técnicas, amplamente empregadas em estudos costeiros e ambientais, incluem abordagens baseadas em tecnologia LiDAR e análise de imagens de satélite. Cada método possui características específicas que influenciam sua aplicação, dependendo de fatores como precisão requerida, extensão da área de estudo e condições ambientais, oferecendo subsídios importantes para a escolha da metodologia mais adequada a diferentes cenários.

2.3.2) Detalhamento das Técnicas

2.3.2.1) Batimetria Derivada de Satélite (SDB)

A Batimetria Derivada de Satélite (SDB) utiliza imagens ópticas orbitais para estimar a profundidade das águas rasas, sendo uma técnica baseada na análise da luz refletida pela água, com diferentes comprimentos de onda penetrando em profundidades distintas. Recentemente, o interesse por essa técnica tem crescido, impulsionado pelas inovações em sensores multiespectrais, como os presentes nos satélites Landsat 8 e Sentinel-2A, que incluem bandas voltadas à observação da coluna d'água em regiões costeiras. Para converter a intensidade de reflexão da luz em estimativas de profundidade, são aplicados modelos ópticos e algoritmos especializados, como o algoritmo de Stumpf et al. (2003), que utiliza a razão entre diferentes bandas espectrais para estimar a profundidade dos corpos hídricos.

Essa abordagem permite correções atmosféricas e a adaptação a diferentes condições de visibilidade da água, o que torna a SDB uma técnica valiosa para cobrir grandes áreas a um custo relativamente baixo, especialmente em regiões de águas claras, como recifes de corais e zonas tropicais. No entanto, sua precisão pode ser comprometida em águas turvas, onde a maior concentração de partículas em suspensão interfere na penetração da luz. Apesar de não ser considerada uma substituta para levantamentos hidrográficos acústicos e LiDAR para aplicação na segurança da navegação, a técnica tem ganhado relevância em aplicações como o monitoramento costeiro e a alimentação de modelos de correntes marinhas (Kutser et al., 2020).

Tabela 2- Técnicas de batimetria por sensoriamento remoto

Técnica	Princípios de Funcionamento	Sensores	Vantagens	Limitações	Aplicações	Referências
Lidar Batimétrico	Pulsos laser infravermelhos (superfície) e verdes (fundo) são emitidos; o tempo de retorno é usado para calcular profundidades.	Equipamentos: RIEGL VQ-880-G, Leica Chiroptera, Teledyne Optech Titan. Plataformas: Aeronaves e drones	Alta precisão (<1m); eficaz em águas claras e rasas; cobertura rápida de áreas costeiras.	Ineficaz em águas turvas; alto custo de operação; dependência de aeronaves ou drones.	Estudos costeiros, planejamento de infraestrutura, monitoramento de habitats.	Hughes et al., 2016.
Batimetria Derivada de Satélite (SDB)	Analisa imagens de satélite utilizando propriedades ópticas da água (absorção/reflexão) para estimar profundidades.	Satélites: Landsat (8, 9), Sentinel-2, WorldView-3.	Econômica; ideal para grandes áreas e águas claras; não requer equipamentos especializados no local.	Menor precisão em águas profundas ou turvas; sensível a variáveis como turbidez e densidade de partículas.	Mapeamento em larga escala, estudos ambientais, monitoramento de mudanças costeiras.	Stumpf et al., 2003
Sensores Multiespectrais e Hiperspectrais	Capturam variações na cor da água e analisam propriedades espectrais para inferir profundidade e composição do fundo.	Sensores: AVIRIS (NASA), Hyperion (EO-1), Sentinel-2 MSI.	Útil para monitoramento ambiental; pode mapear ecossistemas aquáticos e detectar mudanças em habitats.	Eficácia reduzida em águas turvas ou muito profundas; processamentos computacionalmente intensivos.	Mapeamento ambiental, análise de qualidade da água, ecossistemas submersos.	Xi et al., 2020

Satélites Avançados (Altimetria e Laser)	Utilizam tecnologia de altimetria e laser para mapear superfícies e estruturas submersas em escala global.	Satélites: SWOT (altimetria radar de alta resolução); ICESat-2 (laser verde ATLAS).	Alta precisão; mapeamento global; permite estimar profundidades e variações topográficas mesmo em áreas remotas.	Cobertura limitada em águas muito turvas ou profundas; resolução vertical pode variar conforme o ambiente.	Estudos globais de oceanografia, monitoramento hidrológico, suporte para modelagem climática e ambiental.	Parrish et al., 2019
--	--	---	--	--	---	----------------------

Fonte: Elaboração própria (2025) com base em Hughes et al. (2016), Stumpf et al. (2003), Xi et al. (2020) e Parrish et al. (2019).

2.3.2.2) Lidar aerotransportado

O LiDAR aerotransportado utiliza a emissão de pulsos laser a partir de aeronaves para medir a profundidade da água. O laser penetra a superfície da água e, ao retornar, permite calcular a distância até o fundo do corpo hídrico a partir do tempo duplo de percurso da onda. As vantagens do Lidar aerotransportado são sua alta resolução, precisão e cobertura, podendo fornecer dados detalhados, mesmo em áreas de difícil acesso, como costas irregulares e remotas. Contudo, a eficiência dessa técnica pode ser prejudicada em águas turvas ou em áreas com vegetação submersa densa, onde a absorção e dispersão da luz interferem nas medições (Guenther et al., 2000).

2.3.2.3) Missão ICESat-2

Lançada pela NASA em 2018, a missão ICESat-2 é uma das mais avançadas com satélite de sensoriamento remoto dedicado à coleta de dados altimétricos. Equipado com o sensor ATLAS, o satélite utiliza um laser verde de 532 nm, capaz de penetrar na coluna d'água e medir a profundidade com alta precisão e com uma densidade de pontos superior a 10 pontos por metro ao longo do feixe, proporcionando uma resolução sem precedentes para áreas de águas rasas e regiões costeiras (Neumann et al., 2019). No entanto, fatores como a variabilidade da turbidez da coluna d'água e as condições atmosféricas ainda podem influenciar a qualidade e o alcance dos dados batimétricos fornecidos pelo *ICESat-2* (Neumann et al., 2019). O erro quadrático médio (RMSE) vertical é submétrico e deve ser considerado na análise. Comparado ao seu antecessor, o ICESat, o ICESat-2 utiliza uma abordagem inovadora com lasers de micropulsos que produzem energia menor a uma taxa de repetição mais alta, ideal para terrenos acidentados e heterogêneos (Neumann et al., 2022).

Os objetivos científicos do ICESat-2 são: quantificar as contribuições das camadas de gelo polar para as variações atuais e recentes do nível do mar e suas ligações com as condições climáticas; quantificar as assinaturas regionais das mudanças nas camadas de gelo para avaliar os mecanismos que as impulsionam e melhorar os modelos preditivos das camadas de gelo, incluindo o monitoramento da movimentação das geleiras de saída (*outlet glaciers*) que funcionam como canais que transportam o gelo das regiões centrais das calotas polares em direção ao oceano, sendo altamente sensíveis às variações climáticas. Segundo Taubenberger, Felikson e Neumann (2022), em estudo baseado em dados preliminares do ICESat-2, ATL06, as geleiras de saída apresentam padrões heterogêneos de variação sazonal em sua espessura,

revelando comportamentos distintos entre diferentes regiões. Enquanto algumas geleiras demonstram afinamento durante o verão — atribuído ao aumento da velocidade de escoamento e ao derretimento basal — outras áreas permanecem estáveis ou até apresentam espessamento. Esses resultados reforçam a complexidade da resposta dinâmica dessas geleiras às condições climáticas sazonais e regionais, e destacam a importância do monitoramento contínuo por altimetria a laser de alta resolução, como o fornecido pela missão, para melhorar a compreensão dos processos que controlam a perda de massa glacial e sua relação com a elevação do nível do mar. Além disso, a missão ICESat-2 visa estimar a espessura do gelo marinho para examinar as trocas de energia, massa e umidade entre o gelo, o oceano e a atmosfera, bem como medir a altura da vegetação como base para estimar a biomassa e sua variabilidade em grande escala (Neumann et al. 2019).

2.3.2.4) *ICESat-2 (Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite 2)*

O ICESat-2 representa um avanço significativo na batimetria por sensoriamento remoto, utilizando tecnologia Lidar de contagem de fótons para obter medições detalhadas da superfície e do fundo oceânico. Segundo o manual técnico escrito por Neumann et al. atualizado em 2022, o *ICESat-2*, o satélite *ICESat-2* e o instrumento *ATLAS* utilizam um Lidar de contagem de fótons e sistemas auxiliares (como *GPS* e câmeras estelares) para realizar três medições principais: o tempo de voo de um fóton do *ATLAS* até a Terra e de volta ao sensor; o vetor de apontamento no momento em que um fóton é transmitido; e a posição do *ICESat-2* no espaço no momento em que um fóton é registrado pelo *ATLAS*. Essa abordagem de medição é fundamentalmente diferente de um sistema *Lidar* de forma de onda completa.

Para melhorar a qualidade dos dados, a equipe do *ICESat-2* aplica uma série de algoritmos para detectar e corrigir vários erros potenciais, incluindo a detecção de erros grosseiros, análise e correção de erros, remoção do efeito Doppler e filtragem de ruído. Além dessas correções, é necessário considerar as condições específicas da área de coleta. Por exemplo, a presença de corais, conforme observado em Jia et al. ,2023, pode interferir no retorno dos fótons, e a alta radiação solar pode gerar ruídos adicionais no sensor.

2.3.2.6) Discussão atual sobre o *ICESat-2*

Os artigos recentes destacam o ICESat-2 como uma ferramenta promissora para mapeamento batimétrico, especialmente em áreas de difícil acesso, no entanto, também apontam várias limitações e desafios. Por exemplo, a precisão dos dados do ICESat-2 pode ser afetada por condições atmosféricas adversas e a necessidade de complexas correções geofísicas, como correções de refração e marés. Além disso, a presença de vegetação densa ou altas concentrações de sedimentos em suspensão pode interferir na detecção precisa dos fótons de retorno, impactando a qualidade dos dados batimétricos coletados (Xu et al., 2022). O lançamento do ATL24, lançado no primeiro dia de abril de 2025, é o subproduto mais recente do ICESat-2 e busca melhorar a qualidade dos dados batimétricos, mas, assim como os produtos anteriores, apresenta limitações em regiões costeiras e áreas com morfologias complexas, exigindo ainda mais atenção para ajustes e validações em determinadas condições geográficas (NSIDC, 2025).

2.3.2.6) Aplicação do *ICESat-2* no Brasil

Apesar das vantagens oferecidas pelo satélite ICESat-2 — como alta resolução altimétrica e capacidade de detecção por fótons individuais —, sua aplicação ainda é limitada no Brasil. Até o presente momento, foram identificados poucos trabalhos que exploram essa tecnologia no contexto nacional. Entre eles, destaca-se a tese de doutorado de Bacalhau (2022), na Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), que utilizou dados do produto ATL03 para a caracterização volumétrica dos reservatórios de Sobradinho e Poço da Cruz, ambos localizados no semiárido nordestino. Além disso, na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), foram desenvolvidos projetos aplicando o ICESat-2 para diferentes fins: estimativas de profundidade na Lagoa da Conceição (Da Silva et al., 2024), e análises da altura de vegetação em áreas de mata atlântica (Santos, 2023), com uso comparativo entre dados orbitais e medições de campo. Ainda na UFSC, pesquisadores também exploraram o uso do ICESat-2 na detecção de fumaça e nuvens, a partir de análises atmosféricas sobre Santa Catarina (Silva et al., 2022).

Esses poucos exemplos demonstram que, embora o ICESat-2 represente uma tecnologia promissora, ainda há uma lacuna significativa na sua aplicação e validação em ambientes brasileiros. Isso evidencia um campo de pesquisa ainda pouco explorado, oferecendo grandes

oportunidades para novos estudos que visem integrar os produtos altimétricos do satélite a análises ambientais, batimétricas e hidrológicas.

2.3.2.7) Avaliação e Análise Comparativa

A seguir são apresentadas algumas características de sensores e métodos de coleta de dados batimétricos (tabela 3).

Tabela 3- Tabela comparativa entre os sensores/método

Sensor/Método	Prós	Contras
ICESat-2 (ATLAS)	Alta resolução, capacidade de penetração na coluna d'água, abrangência global.	Necessidade de correção de refração, complexidade na classificação de fótons.
Lidar Aerotransportado	Alta precisão, adequado para áreas costeiras rasas.	Custo elevado, cobertura limitada.
Sonar Multifeixe	Alta precisão em áreas profundas, útil para mapeamento detalhado.	Limitação em águas rasas, custo elevado.
Batimetria de Satélite	Abrangência global, custo relativamente baixo.	Menor precisão comparado a métodos <i>in situ</i> , dependência de condições atmosféricas.

Fonte: Elaboração própria (2025) com base em Parrish et al. (2019) e Guo et al. (2022).

Os estudos realizados por Parrish et al. (2019) e Guo et al. (2022), demonstram que o ICESat-2 oferece uma abordagem promissora para a obtenção de dados batimétricos precisos, especialmente em áreas remotas e de difícil acesso. A integração de dados de múltiplas fontes, como o Lidar aerotransportado e o sonar multifeixe, pode complementar as informações obtidas pelo ICESat-2, fornecendo uma visão mais abrangente e detalhada da morfologia do assoalho dos corpos hídricos.

Capítulo 3 – Missão ICESat-2 e o Sensor ATLAS

3.1) Missões Anteriores e Comparação com o ICESat-2

O ICESat-2 é a terceira de uma série de missões da NASA projetadas para fornecer observações polares contínuas ao longo do tempo. As missões anteriores incluem a ICESat/GLAS, que coletou dados de 2003 até o início de 2010, e a Operação IceBridge, que realizou mais de 1.000 voos de pesquisa entre 2009 e 2019. Esta última teve como objetivo preencher a lacuna entre as missões ICESat/GLAS e ICESat-2, além de validar as medições realizadas. Quando combinados, os dados dessas missões fornecem aos pesquisadores uma base robusta para estudar as mudanças na criosfera ao longo do tempo. Esses dados têm sido aplicados no monitoramento da espessura do gelo marinho, detecção de icebergs e previsão de suas trajetórias, além de permitir estimativas sobre como o derretimento das geleiras impactará o nível do mar. Com os dados obtidos pelo sensor ATLAS, torna-se possível estimar mudanças anuais na altura das camadas de gelo da Groenlândia e da Antártida com precisão de até quatro milímetros (Markus et al., 2017).

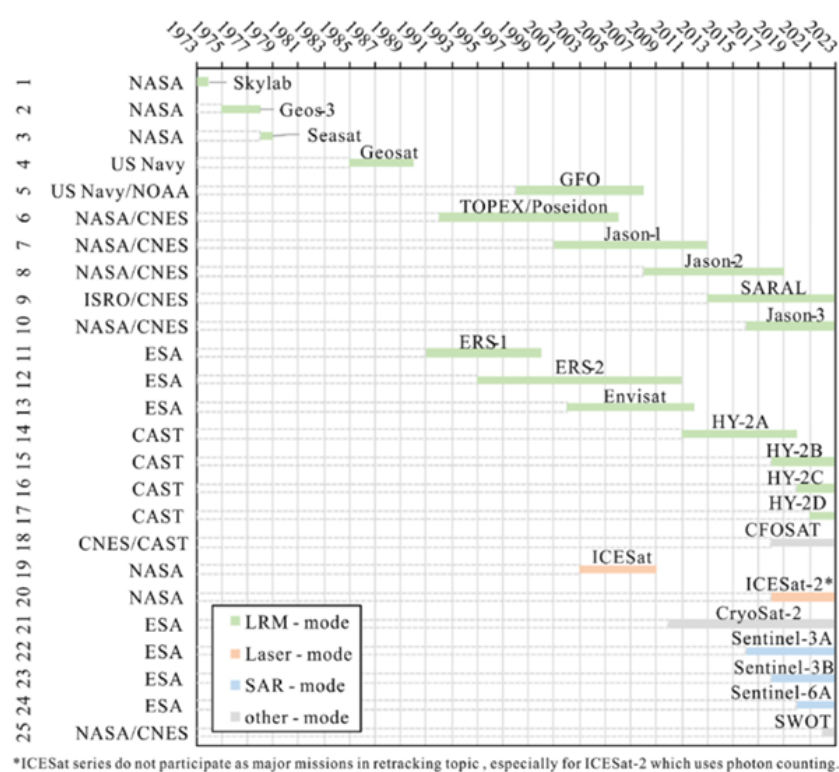
Para visualizar a evolução dessas missões ao longo do tempo, a Figura 1 ilustra a linha do tempo e as informações chave de 25 missões principais de altimetria por satélite lançadas nos últimos 50 anos. Cada barra retangular representa uma missão, sendo que o comprimento da barra indica o período de operação da missão, enquanto a cor reflete o modo de operação. As barras sobrepostas indicam a oportunidade de combinações multi-missões e validação cruzada de dados (Demg et al., 2025).

Desde seu lançamento em 2018, o ICESat-2 tem fornecido dados valiosos para uma variedade de aplicações, como o monitoramento de elevações de gelo, florestas, áreas urbanas e até medições batimétricas. Essa tecnologia garante cobertura global precisa, especialmente em terrenos complexos e corpos d'água (Neumann et al., 2019). Diferentemente de seu antecessor, que utilizava um único feixe de laser emitido na direção do nadir, o ICESat-2 opera com seis feixes de laser organizados em três pares, sendo um par orientado para o nadir e os outros dois laterais (Neumann et al., 2019). Segundo Markus et al. (2017), a adoção de múltiplos feixes espaçados lateralmente, também busca minimizar a saturação dos detectores e aumentar a redundância dos dados, assegurando maior confiabilidade mesmo sob condições atmosféricas adversas. Dessa maneira, a arquitetura não

nadir do ICESat-2 representa um avanço tecnológico importante em relação às capacidades altimétricas da missão ICESat/GLAS.

A altimetria por satélite tem evoluído continuamente desde o final do século XX, desempenhando um papel fundamental no monitoramento das superfícies terrestres e oceânicas. A Figura 1 apresenta uma linha do tempo das principais missões de altimetria por satélite lançadas nos últimos 50 anos, destacando suas características operacionais e períodos de atividade.

Figura 1- Linha do tempo e informações chave de 25 missões de altimetria por satélite lançadas nos últimos 50 anos. Cada barra retangular representa uma missão, com o comprimento da barra indicando o período de operação, e a cor indicando o modo de operação da missão.



Fonte: Deng et al. (2025).

3.2) Funcionamento e tecnologia do ATLAS

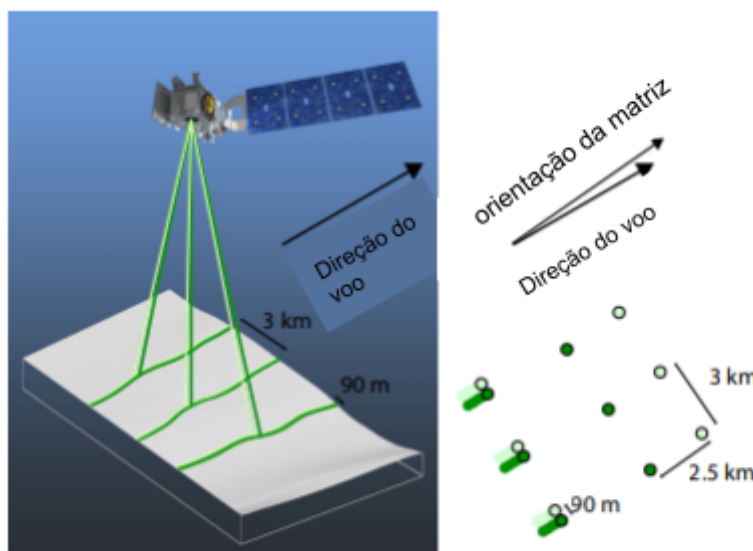
O ATLAS, principal instrumento a bordo do ICESat-2, mede a altura da superfície terrestre emitindo pulsos de laser que retornam ao satélite após refletirem no solo, ou em outros alvos

encontrados ao longo do voo. Com uma taxa de 10.000 pulsos por segundo, realiza medições a cada 71,2 cm no solo, formando pegadas circulares de aproximadamente 17 metros de diâmetro. A tecnologia do ATLAS divide um único pulso de laser em seis feixes organizados em três pares de luz verde (532 nm), com frequência de repetição de pulso (Pulse repetition Frequency - PRF) de 10 kHz, sendo cada par composto por um feixe “forte” e outro “fraco”, separados por 90 metros na direção transversal (Figura 2).

Essa configuração permite a medição da inclinação da superfície nas direções ao longo e transversal à trilha com apenas uma passagem, possibilitando também a detecção de variações de altura entre passagens subsequentes. A sensibilidade à detecção de fótons únicos, conforme descrito por Degnan (2002), possibilita a determinação dos tempos de voo (*Time Of Flight* - TOF) com precisão de até 800 ps.

Segundo Parrish (2019), cada fóton emitido pelo ATLAS é marcado no tempo e geolocalizado, permitindo medições altamente precisas da elevação da superfície terrestre. Isso contribui significativamente para o entendimento das características topográficas e das mudanças climáticas no planeta. A alta resolução espacial do instrumento, combinada aos requisitos rigorosos de TOF e PRF, garante medições de altura da superfície do mar em aberturas de gelo marinho com precisão vertical de até 3 cm. As medições obtidas podem ser agregadas para atender aos requisitos científicos gerais da missão ICESat-2 (Markus et al., 2017). Para determinar a direção de apontamento do ATLAS, a plataforma carrega rastreadores de estrelas de última geração e uma Unidade de Medição Inercial (IMU) instalada na bancada óptica do ATLAS. A posição tridimensional do centro de massa do satélite é obtida por meio de sistemas GPS redundantes de dupla frequência. A combinação dos dados de TOF com informações de posição e atitude do observatório resulta na geolocalização precisa de cada fóton detectado. A **Figura 2** apresenta o padrão idealizado de feixes e pegadas do ICESat-2. Os círculos verde-claros representam as pegadas dos feixes fracos, enquanto os círculos verde-escuros indicam as dos feixes fortes. À medida que o satélite avança, a sobreposição das pegadas forma uma trilha contínua na superfície da Terra.

Figura 2- Padrão idealizado do feixe e pegada do ICESat-2



Fonte: Traduzida e modificada pela autora com base em Neumann (2019).

3.2.1) O observatório do ICESat-2

A missão ICESat-2 é composta por dois componentes principais: o observatório espacial e o sistema terrestre, responsável pelo recebimento e processamento dos dados. O observatório é constituído por dois elementos essenciais:

- **Instrumento ATLAS:** sistema Lidar responsável pela emissão e recepção dos fótons.
- **Barramento da espaçonave:** fornece energia via painéis solares e abriga sistemas GPS, antenas e demais equipamentos de suporte (Neumann et al., 2019).

O satélite utiliza Lidar de contagem de fótons e sistemas auxiliares como GNSS e câmeras estelares para realizar três medições principais: o TOF do fóton entre o ATLAS e a superfície terrestre e viceversa; o vetor de apontamento no instante de emissão do fóton; e a posição do ICESat-2 no espaço quando o fóton é detectado (Neumann et al., 2022).

3.2.2) O instrumento ATLAS

O ATLAS (*Advanced Topographic Laser Altimeter System*) é o altímetro de última geração a bordo do ICESat-2, projetado para medir a altura da superfície da Terra com altíssima

precisão. O sistema é composto por três subsistemas principais: o transmissor, responsável pela geração dos pulsos de laser; o receptor, encarregado da detecção e cronometragem dos fótons de retorno; e o sistema de monitoramento e controle de alinhamento, que garante o correto apontamento dos feixes por meio de um sistema de referência a laser (*Laser Reference System*, LRS).

a) Transmissor

O transmissor do ATLAS é composto por diferentes componentes essenciais que atuam de forma integrada para gerar e moldar o feixe laser utilizado nas medições:

- **Lasers:** dois dispositivos (um ativo e um redundante), sendo operado apenas um por vez. Os lasers foram desenvolvidos pela Fibertek, Inc. e atendem aos seguintes requisitos de desempenho: largura de pulso inferior a 1,5 ns, energia de pulso de até 1,2 mJ e frequência de repetição de pulso (PRF) de 10 kHz (Sawruk et al., 2015).
- **Conjunto de Amostragem a Laser:** coleta amostras da luz transmitida e determina com precisão o tempo de emissão do pulso, essencial para o cálculo do tempo de voo (TOF).
- **Óptica de Modelagem do Feixe:** define a divergência do feixe em função da distância, resultando em uma pegada de aproximadamente 17 m de diâmetro na altitude orbital média de 500 km.
- **Mecanismo de Direção do Feixe (BSM):** ajusta dinamicamente o vetor de apontamento, garantindo o alinhamento com os campos de visão do receptor. Esse sistema possui hardware redundante, minimizando o risco de falhas.
- **Elemento Óptico Difrativo (DOE):** divide o feixe único em seis feixes primários. Após essa divisão, cada feixe possui informações específicas quanto à direção, intensidade e forma, sendo o DOE o último ponto comum do sistema óptico.

O transmissor opera com um sistema oscilador/amplificador (*Master Oscillator Power Amplifier*, MOPA), que gera luz infravermelha (1064 nm) e a converte em luz verde (532 nm) por duplicação de frequência. Embora essa conversão reduza a eficiência energética, ela permite o uso de detectores sensíveis e confiáveis nessa faixa espectral, aumentando a eficácia geral do sistema.

Após a geração do pulso, o feixe segue por um caminho óptico comum onde é monitorado pelo Conjunto de Amostragem de Laser, que garante a estabilidade do comprimento de onda e registra com exatidão o instante de emissão. Combinado ao tempo de chegada do fóton de retorno, esse dado permite o cálculo preciso do TOF — a principal medição do ATLAS.

A energia do pulso laser é distribuída de forma desigual entre os seis feixes: cerca de 80% da energia (~660 μJ dos 835 μJ totais) é aproveitada, enquanto 20% é perdida em modos de ordem superior. Três feixes são relativamente fortes (~175 μJ por pulso, ou 21% cada) e três são mais fracos (~45 μJ por pulso, ou 5,2% cada), resultando em uma razão de energia de aproximadamente 4:1. Essa configuração aprimora a faixa dinâmica radiométrica, acomodando alvos com diferentes níveis de refletância (Markus et al., 2017).

Os feixes fortes são utilizados para a detecção de alvos de baixa refletividade, como oceanos e vegetação, enquanto os feixes fracos são mais adequados para superfícies de alta refletividade, como gelo marinho e neve compacta (Neumann et al., 2019). Essa abordagem garante relações sinal-ruído apropriadas para as diversas aplicações científicas da missão ICESat-2.

b) Receptor

No receptor ATLAS, a luz coletada é direcionada e focada por meio do telescópio para as ópticas do receptor. O design do telescópio, incluindo sua forma, acabamento e revestimento, é otimizado para a transmissão eficiente da luz verde. Cada um dos seis feixes de luz é direcionado para cabos de fibra óptica focados, e, na altitude nominal do ICESat-2, isso gera um campo de visão de 45 m de diâmetro no solo (Neumann et al., 2019).

Segundo Neumann et al., 2019. A luz filtrada é acoplada por fibra a um dos dois conjuntos de tubos fotomultiplicadores (PMTs) sensíveis a fótons únicos. Os módulos detectores

convertem a energia óptica em pulsos elétricos. O ATLAS utiliza PMTs de 16 elementos fabricados pela Hamamatsu, dispostos em uma matriz 4×4.

Para os três feixes fortes, cada pixel de um único PMT é utilizado independentemente, resultando em 16 saídas elétricas independentes. Para os feixes fracos, que possuem cerca de 1/4 da potência óptica dos feixes fortes, os pixels do detector são combinados em uma matriz 2×2. Assim, o ATLAS possui 60 saídas elétricas mapeadas para canais de temporização independentes.

c) Sistema de monitoramento e controle de alinhamento

- Projeto do Tempo de Voo

O sistema de medição do TOF do ATLAS é projetado para medir com precisão os eventos de fótons recebidos e envolve vários componentes críticos. Segundo o material técnico *“The Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite–2 Mission: A global geolocated photon product derived from the advanced topographic laser altimeter system”* feito por Neumann et al., 2019, os principais componentes incluem:

- Placas Eletrônicas de Contagem de Fótons (PCEs)

As saídas elétricas dos pixels do detector são direcionadas para placas eletrônicas de contagem de fótons (PCEs), responsáveis pela medição precisa dos eventos de fótons. O ATLAS possui três placas PCE:

- **Feixes fortes:** Uma placa para cada feixe forte, com 16 canais de temporização.
- **Feixes fracos:** Uma placa para cada feixe fraco, com quatro canais de temporização.
- **Canais de pulso de partida:** Duas placas para os canais do detector, utilizadas para cronometrar os pulsos de partida.
- Sincronização e Calibração

Os dados transmitidos incluem os tempos grosseiros e finos dos eventos registrados por cada PCE, além de dados adicionais necessários para calibrar os tempos entre as diferentes PCEs. A sincronização do sistema é realizada usando um contador de corrida livre acionado por um

Oscilador Ultra Estável (USO), sincronizado pelo sinal de pulso por segundo GPS da espaçonave, permitindo a combinação do tempo interno do ATLAS com o horário do GPS. A estabilidade da frequência do USO é crucial para a precisão da medição do tempo de voo (TOF) do fóton, impactando diretamente a capacidade do ATLAS de medir alterações de altura com precisão (Markus et al., 2017).

3.3) Processamento e Filtragem de Dados

O processamento dos dados é realizado em solo para determinar o tempo absoluto dos eventos ATLAS, incluindo os tempos de disparo do laser e os tempos de chegada dos fótons. O software de bordo do ATLAS limita o número de eventos de fótons marcados no tempo, reduzindo assim o volume de dados telemetrados para as estações terrestres. Para otimizar a detecção de superfícies de interesse, um modelo digital de elevação (DEM) e uma máscara de classificação de superfície são utilizados para restringir o intervalo de tempo aos fótons que têm maior probabilidade de serem refletidos da superfície da Terra. Durante o voo, os pulsos individuais transmitidos pelo ATLAS são separados por um intervalo temporal de voo correspondente a aproximadamente 15 km, visando garantir cobertura eficiente. Além disso, a janela vertical de captura dos fótons varia conforme o relevo: ela pode chegar a até 6 km em áreas com terreno acidentado e diminuir para cerca de 1 km em regiões planas (Neumann et al., 2019). Dessa forma, o sensor consegue equilibrar a coleta detalhada dos dados com a limitação do volume de informações armazenadas.

3.4) Tempo Morto e estratégias de mitigação

O fenômeno do tempo morto é um aspecto crucial a ser considerado no desempenho dos detectores utilizados pelo ATLAS. Diferentemente do instrumento altímetro GLAS a bordo do ICESat, que enfrentava problemas de saturação do detector devido a pulsos de retorno de alta energia, resultando em formas de onda cortadas ou artificialmente alargadas (Sun et al., 2017; Fricker et al., 2005), o ATLAS utiliza detectores de tubo fotomultiplicador (PMT). Embora os PMTs não apresentem saturação, eles são suscetíveis a efeitos de tempo morto (Williamson et al., 1988; Sharma e Walker, 1992), que é o intervalo após a detecção de um fóton, durante o qual o detector se torna incapaz de detectar outro evento. Esse período resulta em uma lacuna na detecção, onde fótons que chegam imediatamente após um evento anterior não são registrados. Durante períodos de alta intensidade de fótons, um canal

detector pode permanecer inativo se os fótons adicionais chegarem durante o tempo morto, o que pode levar a uma extensão significativa do tempo morto efetivo.

3.5) Taxa de fótons de fundo

A taxa de fótons de fundo, que é um tipo de ruído detectado pelo instrumento, varia principalmente conforme o ângulo solar e a refletividade da atmosfera e da superfície terrestre na faixa de 532 nm (luz verde). Em condições de alto ângulo solar e alta refletância, a taxa de fótons de fundo pode alcançar cerca de 10 MHz, ou seja, aproximadamente 10 milhões de fótons de fundo por segundo. Isso equivale, em termos práticos, a um fóton detectado a cada 3 metros de altura na medição. Esse nível de fótons de fundo pode aumentar o desvio padrão do pulso de retorno em até 50%, resultando em incertezas de cerca de 2,5 cm para os feixes fortes e 5 cm para os feixes fracos (Markus et al., 2017).

Embora o ATLAS utilize uma filtragem passa-banda -técnica que permite que apenas a luz (ou sinais) dentro de uma faixa específica de comprimentos de onda (ou frequências) passe por um filtro, enquanto bloqueia ou reduz a passagem de luz fora dessa faixa–, que restringe a luz recebida a um intervalo muito específico ($532,272 \pm 0,15$ nm), a presença de fótons solares de fundo ainda é significativa durante as observações da Terra iluminada pelo sol. Além disso, o sistema aplica um padrão temporal para limitar ainda mais os fótons captados fora do intervalo esperado do sinal verdadeiro.

No entanto, mesmo com essas técnicas, fótons solares refletidos na superfície terrestre podem entrar no telescópio do ATLAS e ser registrados como ruído. Para mitigar esse efeito, o processamento dos dados a bordo realiza técnicas avançadas de filtragem e seleção dos pulsos verdadeiros, especialmente durante o dia, devido a interferência da radiação solar, garantindo a qualidade dos dados. Essas técnicas são baseadas em métodos desenvolvidos para outros altímetros a laser, como o Mercury Laser Altimeter e o Lunar Observer Laser Altimeter, e foram adaptadas para o ICESat-2 (Abshire et al., 2005; Cavanaugh et al., 2007; Smith et al., 2010).

3.6) Produto de Dados do ICESat-2

O produto ATL02 – produto primário/base – (Martino et al., 2018) é responsável por converter a telemetria de baixo nível do observatório em dados úteis, aplicando calibrações

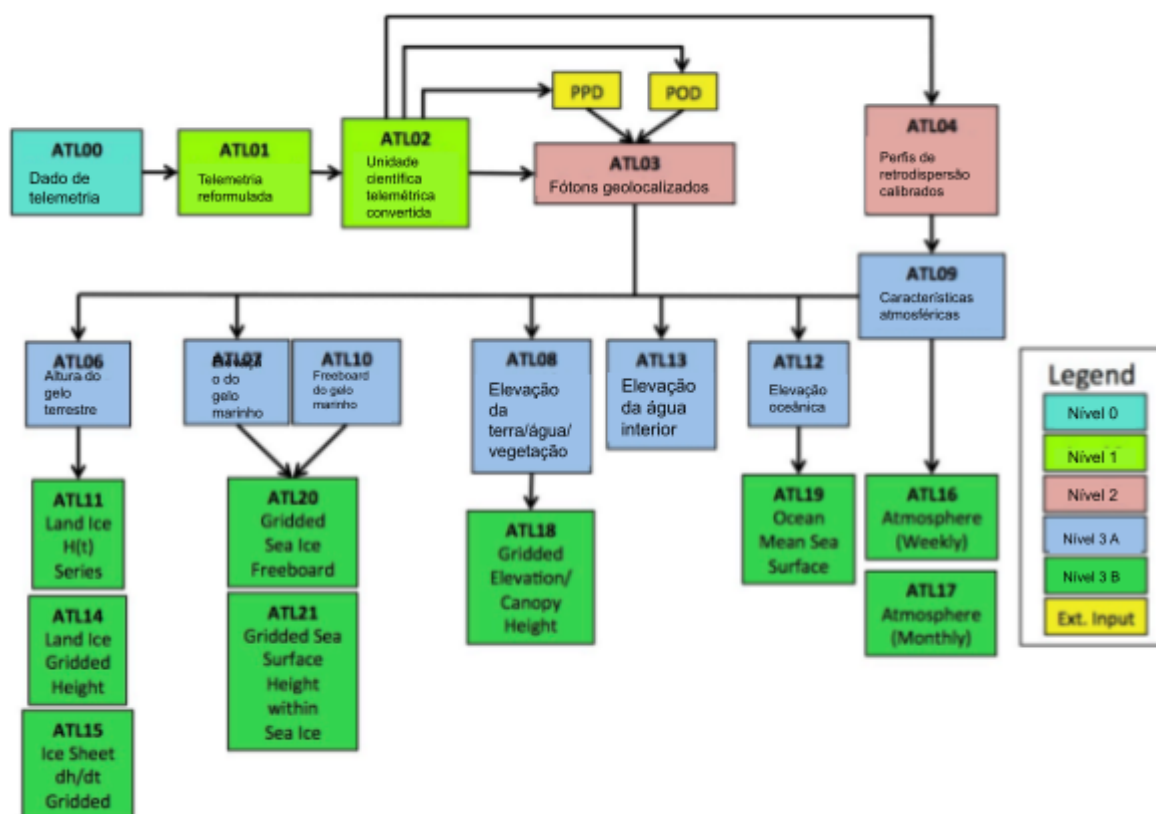
aos dados primários de fótons para gerar tempos precisos de voo. Este produto é estruturado em diferentes grupos e subgrupos que contêm informações essenciais para a análise e interpretação dos dados científicos coletados pelo ATLAS. O produto base reúne os dados básicos do ICESat-2 organizados em grupos principais, que incluem: dados científicos de altimetria, informações sobre a órbita do satélite, dados dos rastreadores de estrelas e dados para determinar a direção dos feixes de laser (Neumann et al., 2018).

Para atender aos requisitos científicos da missão (Markus et al., 2017), os tempos de voo dos fótons individuais do produto de dados ATL02, figura 3, são combinados com os vetores de apontamento a laser e a posição do observatório ICESat-2 em órbita. Isso permite determinar a latitude, longitude e altura dos eventos de fótons recebidos individualmente em relação ao elipsóide WGS-84. Esses fótons geolocalizados são o principal componente do subproduto de dados ATL03 – dado fundamental para estudos batimétricos – (Neumann et al., 2018). O ATL03 inclui a discriminação grosseira entre o sinal provável e os eventos de fótons de fundo; a classificação de superfície para identificar regiões de terra, oceano, gelo terrestre, gelo marinho e água interior; e correções geofísicas globais para as alturas dos fótons para explicar marés e efeitos atmosféricos.

O padrão de pegada do ICESat-2 refere-se à forma como os feixes de laser do instrumento ATLAS interceptam a superfície terrestre, formando pegadas ou *footprints* ao longo do deslocamento orbital do satélite. Essas pegadas são dispostas em pares, organizadas lateralmente em trilhas conhecidas como Ground Tracks (gts), nomeadas da esquerda para a direita no sentido do movimento orbital: gt1l, gt1r, gt2l, gt2r, gt3l e gt3r, conforme ilustrado na Figura 4 (Neumann et al., 2019; Markus et al., 2017).

Cada pegada individual cobre uma área de aproximadamente 11 metros de diâmetro e é separada da próxima por cerca de 60 metros ao longo da trilha, formando sequências regulares de amostras que percorrem a superfície terrestre. As trilhas de solo consecutivas resultam da varredura contínua dos feixes e possibilitam a obtenção de medições de alta resolução espacial (Neumann et al., 2019; Markus et al., 2017; Parrish et al., 2019).

Figura 3- Fluxo de processamento dos dados base ATL02 para a formulação dos subprodutos do ICESat-2



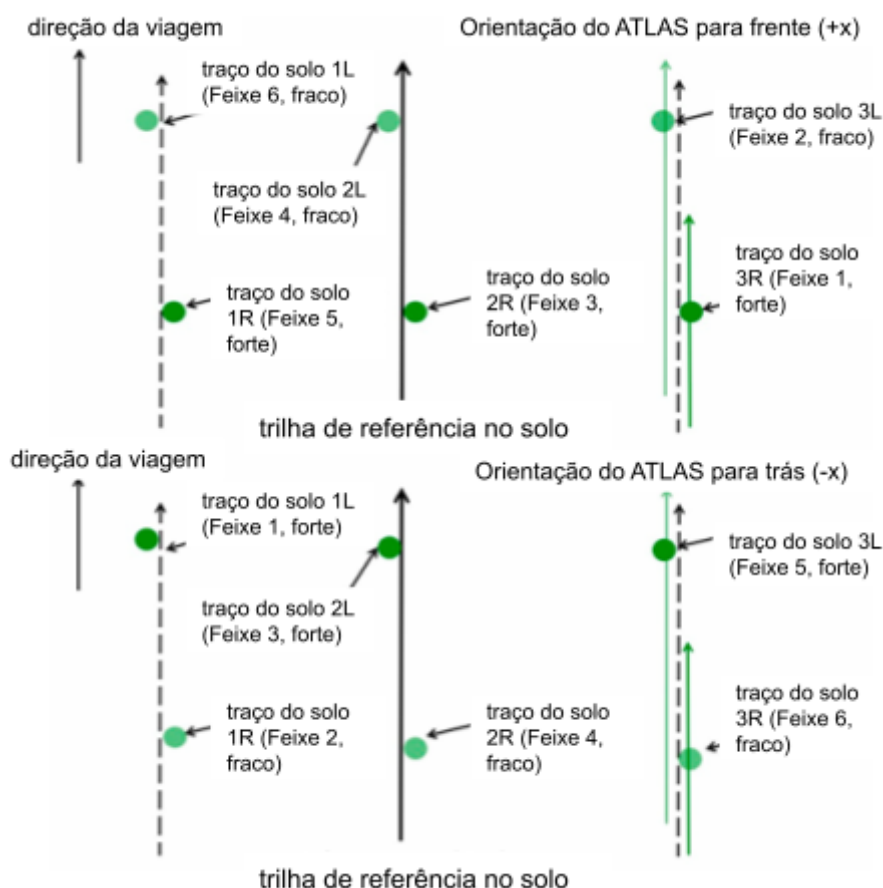
Fonte: Parcialmente traduzida e modificada pela autora com base em Neumann (2022)

O ICESat-2 possui um ciclo de revisitação de 91 dias, ou seja, ele repassa os mesmos locais da Terra a cada três meses. Isso permite observar variações sazonais em diversas variáveis ambientais, como altura da vegetação, gelo marinho e mudanças na batimetria costeira. Durante esse ciclo de 91 dias, o satélite percorre um total de 1.387 trilhas distintas, denominadas Trilhas Terrestres de Referência (*Reference Ground Tracks – RGTs*). A partir de abril de 2019, o ICESat-2 passou a utilizar um sistema de apontamento controlado para seguir precisamente essas RGTs. Essa estratégia visa preencher lacunas de cobertura e garantir um mapeamento sistemático e repetitivo das alturas do solo e do dossel florestal, ampliando o valor científico da missão (Markus et al., 2017).

Na figura 4 é possível ver que o padrão do feixe ATLAS no solo varia com a orientação do observatório CIEM. O padrão superior refere-se à orientação para a frente (+x), enquanto o

inferior corresponde à deslocamento para trás ($-x$). Os números identificam os feixes ATLAS correspondentes, com o mapeamento L/R sendo utilizado no ATL03 e nos produtos de dados de nível superior (Neumann, et al. 2019).

Figura 4. Variação do padrão do feixe ATLAS no solo com a orientação do observatório CIEM



Fonte: Traduzida e modificada pela autora com base em Neumann (2019)

Os feixes gt2l e gt2r do ICESat-2 são considerados feixes centrais, posicionados próximos ao nadir, porém não coincidem exatamente com a “*sub-satellite track*” (nadir geodésico). Essa separação angular é intencional para proteger os detectores do sistema ATLAS contra danos causados por retornos especulares diretos e para acomodar as variações naturais da posição do satélite ao longo da órbita. (NASA, 2022).

A orientação do sensor ATLAS a bordo do ICESat-2 não depende diretamente da direção da trilha orbital — seja descendente (Norte-Sul) ou ascendente (Sul-Norte) , mas sim da

orientação do satélite (spacecraft orientation), indicado nos dados pelo campo *sc_orient*. Esse parâmetro define se o satélite está operando no modo forward (*sc_orient* = 1) ou backward (*sc_orient* = 0), determinando quais feixes estão posicionados à frente na direção de voo. No modo forward, é o +x, Norte para Sul, os feixes fracos estão à frente e os fortes atrás; no modo backward, é o -x, Sul para Norte, ocorre o inverso. Como os pares de feixes são dispostos transversalmente à trajetória orbital, essa orientação afeta diretamente a posição relativa dos feixes fortes e fracos em relação ao terreno, sendo um fator relevante na análise espacial de dados batimétricos em ambientes costeiros. A intensidade que os feixes emitem não é alterada com a mudança de posição (Neumann, et al. 2019).

3.6.4) Geolocalização de fótons e altura elipsoidal

A determinação precisa da posição dos fótons detectados pelo ICESat-2 requer dois elementos principais: os vetores de apontamento do laser ATLAS e a posição orbital do satélite. Essas informações são obtidas, respectivamente, pelos sistemas de Determinação de Apontamento de Precisão (PPD) e Determinação de Órbita de Precisão (POD).

Com base nesses dados, o algoritmo de geolocalização combina o tempo de voo (TOF) do fóton, a direção de emissão do feixe e a posição do satélite no momento da detecção. O resultado é a atribuição precisa de latitude, longitude e altura elipsoidal (WGS-84) para cada evento de fóton. Essas informações são organizadas no produto ATL03, com os fótons agrupados por trilha terrestre e acompanhados de incertezas associadas. A precisão da geolocalização foi avaliada em cerca de 4,9 metros nos testes iniciais da missão (Luthcke et al., 2018).

3.6.5) Máscaras de classificação de superfície

O produto de dados ATL03 inclui um conjunto de máscaras de classificação de superfície que segmentam a Terra em cinco categorias principais: terra, oceano, gelo marinho, gelo terrestre e áreas de águas interiores. Essas máscaras se sobrepõem em faixas de aproximadamente 20 km, garantindo que os produtos geofísicos de nível superior utilizem os fótons do ATL03 de acordo com suas respectivas classes de superfície (Neumann et al., 2019).

As máscaras de classificação não são exclusivas, permitindo que várias áreas possuam múltiplas classificações, como terra e oceano, especialmente em zonas costeiras ou em

regiões onde as definições de superfície se sobrepõem, como no caso de terra e gelo terrestre. Nesses casos de classificação múltipla, produtos de nível superior específicos são gerados para cada classe de superfície representada. Além disso, os produtos de nível superior podem refinar o conjunto de fótons utilizados, excluindo áreas não correspondentes; por exemplo, os produtos de gelo marinho excluem áreas de oceano aberto, mas essa exclusão deve ser verificada para evitar superestimação (Neumann et al., 2019).

3.6.6) Classificação dos fótons

Em condições atmosféricas favoráveis, a luz laser transmitida pelo ATLAS alcança a superfície da Terra como pulsos de fótons de descida. No solo, os fótons são dispersos uma ou várias vezes por interações superficiais, como com vegetação ou grãos de neve e gelo, e se propagam em todas as direções, incluindo de volta ao ATLAS.

Com base em modelos de desempenho, até doze fótons por pulso laser transmitidos retornam ao plano focal do telescópio do ATLAS e são registrados pelo detector. Ao mesmo tempo, fótons de fundo provenientes da luz solar continuamente entram no telescópio quando a superfície é iluminada pelo sol, e os tempos de chegada destes também são registrados.

Segundo o manual técnico produzido por Neumann et al., 2022, o número e a distribuição dos fótons retornados dependem da geometria e da refletância da superfície terrestre, da dispersão e atenuação na atmosfera, e, para os fótons de fundo, do ângulo solar. Nesse contexto, qualquer fóton cronometrado pelo ATLAS, independentemente da sua fonte, é classificado como evento de fóton.

O ATLAS classifica cada evento de fóton transmitido como sendo provavelmente sinal ou fundo do corpo hídrico usando dois métodos: um método de histogramação e um método de ponderação de fótons. O objetivo da classificação de fótons por histograma é reduzir o volume de dados que os produtos de dados de nível superior subsequentes devem analisar. O objetivo da abordagem de ponderação de fótons é fornecer uma métrica de densidade relativa de fótons.

Por fim, os produtos de dados de nível superior específicos da superfície geram alturas elipsoidais precisas a partir dos eventos de fóton de sinal identificados. Essas alturas precisas e específicas da superfície são usadas para atender aos objetivos finais da missão ICESat-2.

Em condições saturadas, fótons que são característicos dos efeitos do instrumento ATLAS e não provavelmente superfície verdadeira podem ser rotulados como sinal.

Os eventos de fótons telemétricos registrados pelo ATL03 incluem tanto fótons de sinal quanto fótons de fundo (ruído). Para discriminar entre esses dois tipos, o processamento do ATL03 utiliza um algoritmo desenvolvido para identificar eventos de fótons de sinal enquanto minimiza a inclusão de fótons de fundo (Neumann et al., 2018). Este algoritmo gera histogramas ao longo da trilha e detecta prováveis eventos de sinal ao identificar regiões onde a taxa de eventos de fótons excede significativamente a taxa de fundo. Além disso, são utilizados parâmetros específicos de cada tipo de superfície (terra, oceano, gelo marinho, gelo terrestre, águas interiores) para otimizar essa discriminação.

A taxa de eventos de fótons de fundo é, então, utilizada para definir um limite de identificação de fótons de sinal. O algoritmo gera histogramas das alturas elipsoidais dos fótons, distinguindo os fótons de sinal dos de fundo com base nesse limite. Dependendo da relação sinal-ruído (SNR), os fótons são classificados em quatro categorias: sinal de alta confiança ($SNR \geq 100$), confiança média ($100 > SNR \geq 40$), confiança baixa ($40 > SNR \geq 3$) e fundo provável ($SNR < 3$) (Neumann et al., 2018). Em áreas de superfícies inclinadas, onde os fótons podem ser distribuídos em diversas alturas, o algoritmo utiliza um histograma inclinado, baseado nos fótons circundantes ou em suposições sobre a inclinação da superfície (Neumann et al., 2019).

Os dados de classificação de fótons são armazenados no produto ATL03 como o parâmetro *signal_conf_ph*, que categoriza cada fóton em uma das cinco superfícies: terra, oceano, gelo marinho, gelo terrestre e águas interiores. Os valores de classificação variam de 4 (sinal de alta confiança) a -2 (fótons de TEP), com variações intermediárias correspondentes a diferentes níveis de confiança no sinal (Neumann et al., 2019). O parâmetro de sinal de confiança é fundamental para o processamento de dados subsequente, garantindo que cada fóton seja adequadamente classificado de acordo com a superfície correspondente.

3.6.7) Tempo de voo dos fótons

Cada uma das três placas PCE (Photon Counting Electronics) do ATLAS utiliza dois canais de temporização para registrar as informações do pulso de partida. O pulso de transmissão

gerado pelo ATLAS possui uma largura total na metade da duração máxima de $<1,5$ ns (Sawruk et al., 2015), com uma leve assimetria.

- **Registro do Pulso:** O ATLAS mede o tempo em que o pulso de laser cruza dois limiares de energia nas bordas ascendentes e descendentes do pulso de transmissão. Cada PCE registra os tempos de cruzamento, que são combinados no processamento em solo para calcular o centróide dos tempos, alinhando-os para gerar um único tempo de início para cada pulso.
- **Condições de Operação:** A altitude de órbita do ICESat-2 e o PRF (*Pulse Repetition Frequency*) resultam em aproximadamente 30 pulsos de laser transmitidos e refletidos a qualquer momento. Os tempos dos pulsos de laser transmitidos e as etiquetas de tempo de fóton recebidas devem ser alinhados no processamento terrestre para determinar com precisão o tempo de voo de qualquer fóton. Erros de alinhamento podem resultar em erros de ~ 15 km no intervalo relatado (Neumann et al., 2018).
- **Calibrações Necessárias:** Além dos processos de temporização, calibrações são necessárias para variações de temperatura e tensão na eletrônica de temporização e PMTs, com ajustes baseados em dados de TEP (Time Event Processing) e nas condições de temperatura e voltagem de manutenção (Neumann et al., 2019).

3.6.8) Fluxo de processamento e aplicações

O NSIDC DAAC distribui produtos *ICESat-2/ATLAS* dos níveis 1, 2, 3A e 3B, cobrindo o período de outubro de 2018 até o presente. Embora a missão do *ICESat-2* teve uma duração planejada de três anos, continua coletando dados além dessa meta.

Segundo Neumann, 2019, os produtos de dados do *ATLAS*, nominados como ATLxx, são organizados diferentes níveis de processamento:

- **Nível 1:** O produto ATL01 reformata e descompacta os dados brutos do *ICESat-2*, convertendo-os em unidades de engenharia utilizáveis (exemplo: hdf5).
- **Nível 2:** O produto ATL02 aplica correções instrumentais aos dados, ajustando registros de tempo e apontamento. O ATL03 combina dados de geolocalização e correções geofísicas para fornecer alturas elipsoidais precisas para cada evento de

fóton. ATL04 oferece perfis de retroespalhamento relativo, enquanto ATL09 fornece perfis atmosféricos calibrados e parâmetros relacionados.

- **Nível 3A:** Estes produtos utilizam os dados geolocalizados do ATL03 e os parâmetros atmosféricos do ATL09 para fornecer informações detalhadas ao longo da trajetória do satélite, como alturas elipsoidais para gelo terrestre (ATL06), gelo marinho e oceanos polares (ATL07), vegetação (ATL08), altura do gelo marinho livre (ATL10), alturas oceânicas (ATL12) e de águas interiores (ATL13).
- **Nível 3B:** Produtos em grade derivados dos dados de Nível 3A, como séries temporais de altura do gelo terrestre (ATL11), alturas anuais do gelo terrestre (ATL14), mudança de altura do gelo terrestre (ATL15), dados atmosféricos semanais e mensais (ATL16 e ATL17), dados terrestres (ATL18), alturas médias da superfície do mar (ATL19) e dados de gelo marinho para o Ártico e Antártico (ATL20 e ATL21).

Além dos dados sobre criosfera e suas características, o *ATLAS* também mede a altura de superfícies oceânicas e terrestres, incluindo florestas, lagos, rios, ondas oceânicas e áreas urbanas. Essas medições adicionais são úteis em diversas pesquisas científicas e para aplicações relacionadas a perigos e desastres naturais. Por exemplo, dados florestais podem ajudar a estimar a quantidade de carbono armazenada nas florestas e a melhorar as previsões sobre o comportamento de incêndios florestais. Dados de espessura da neve e altura de rios podem auxiliar no planejamento de inundações e secas, enquanto dados de elevação ao redor de vulcões podem melhorar a precisão das previsões de erupções vulcânicas (Parrish et al., 2019; Neuenschwander et al., 2019).

3.6.9) Seleção dos fótons

Segundo Neumann (2022), o processo de seleção do fóton de referência é crucial para a geolocalização precisa ao longo de segmentos de trilha terrestre. Este algoritmo identifica os fótons de referência para cada segmento de trilha terrestre, selecionando os fótons mais próximos ao centro do segmento, que é o ponto central da linha de observação do satélite dentro do conjunto de fótons que retornaram ao sensor, com o mais alto nível de classificação. Em vez de calcular a correção do atraso do caminho atmosférico para todos os eventos de fótons individuais, a correção é calculada apenas para os fótons de referência, garantindo precisão sem a necessidade de processar cada fóton individualmente.

No contexto da água, o processo de seleção do fóton de referência permanece visando uma boa geolocalização. A identificação de fótons de referência ao longo dos segmentos de trilha terrestre é crucial para aplicações que envolvem a superfície da água, sendo utilizada para as correções de altitude e para a precisão da localização das características da superfície da água, como lagos, oceanos e rios. A partir dos critérios de seleção estabelecidos, os fótons de referência são identificados para cada segmento de trilha terrestre, contribuindo para uma melhor compreensão da topografia e das características das massas de água ao longo do trajeto de medição. Essa abordagem auxilia na modelagem precisa dos contornos da superfície da água e na interpretação de dados hidrográficos, promovendo avanços nos estudos relacionados à hidrologia e à dinâmica oceânica (Neumann, 2019; Neumann, 2022; Parrish, 2019; Neuenschwander et al., 2019).

3.6.10) Limitações e desafios

O *ICESat-2*, apesar de sua ampla cobertura e alta precisão, pode ser afetado por condições atmosféricas adversas e a necessidade de correções complexas, como a correção de refração, atmosférica, correção geoidal e correção da maré, para assegurar a precisão dos dados batimétricos (Neumann, 2019; Neumann, 2022; Parrish, 2019) .

A missão *ICESat-2* gera produtos geofísicos específicos, entre esses produtos, destaca-se o ATL03, que serve como produto básico contendo as medições de fótons que são a base (Neumann et al., 2022). O dado ATL03 precisa ser verificado em conjunto com o dado do ATL13 que por sua vez precisa ser corrigido com as informações do ATL08. A correção é para distinguir os dados que não pertencem a região costeira (Neuenschwander et al., 2019).

3.6.11) Aplicação em batimetria

Os fótons brutos no conjunto de dados *ATLAS* são altamente ruidosos devido a vários fatores. Para avaliar a confiabilidade de cada fóton, o conjunto de dados oficial fornece um parâmetro de "confiança" chamado confiança de altitude, que varia de zero a quatro. Um valor mais alto indica um nível maior de confiança de que o fóton representa um sinal da superfície da Terra. Para áreas terrestres, valores de alta confiança correspondem principalmente a sinais de eco de superfície e têm uma boa correlação com o terreno real. No entanto, alta confiança em fótons pode resultar de múltiplas reflexões na superfície da água e não representa necessariamente a topografia subaquática (Jia et al., 2023).

Segundo Jia et al. (2023), para obter com precisão os fótons do fundo marinho, um processo de duas etapas precisa ser empregado. Isso envolveu a separação de fótons de superfície e subaquáticos e a clusterização de fótons do fundo marinho. Primeiro, todos os fótons precisam ser agrupados em intervalos de elevação fixos, e o número de fótons em cada intervalo é contado. O intervalo com a maior contagem de fótons corresponde à superfície da água porque a superfície da água geralmente contém mais fótons e apresenta mínimas flutuações de elevação. A fronteira inferior desse intervalo serve como linha divisória para distinguir fótons de superfície e subaquáticos.

3.7) Correções geofísicas

As correções geofísicas aplicadas aos dados do ICESat-2 são essenciais para garantir a precisão das medições de altura dos fótons detectados pelo instrumento ATLAS. O Documento de Base Teórica do Algoritmo ICESat-2 para Fótons Geolocalizados Globais (ATL03), elaborado por Neumann et al. (2019), fornece uma descrição detalhada dessas correções. Elas são utilizadas para gerar produtos científicos precisos e são semelhantes às aplicadas em outras missões satelitais altimétricas e geodésicas.

3.7.1) Tipos de correções aplicadas

As correções aplicadas para regularizar o tempo das variações do ponto de resalto da superfície do fóton, fornecidas na base de dados do ATL03, incluem as seguintes:

- **Atraso Atmosférico Total da Coluna (TCA - *Total Column Atmospheric delay*):** engloba o atraso troposférico e o atraso neutático, com valores que podem variar entre -2,6 e -0,9 metros.
- **Maré da Terra Sólida (SET - *Solid Earth Tide*):** corrige variações na crosta terrestre causadas pela atração gravitacional do Sol e da Lua, podendo alcançar ± 40 cm.
- **Maré Oceânica de Carga (OL - *Ocean Loading*):** leva em consideração os efeitos do peso das massas de água oceânica sobre a crosta.
- **Maré Polar da Terra (SEPT - *Solid Earth Pole Tide*):** ajusta a deformação da crosta causada por pequenas oscilações no eixo de rotação da Terra (efeito centrífugo), com

variações de até $\pm 1,5$ cm.

- **Maré Polar Oceânica (OPT - *Ocean Pole Tide*):** corrige a altura oceânica resultante do efeito centrífugo gerado por variações no movimento polar, com amplitude de aproximadamente ± 2 mm.
- **Movimento do Geocentro:** embora essa correção **não seja aplicada aos produtos científicos de nível 2 (L2)**, é importante notar que as variações dos eixos X, Y e Z do centro de massa da Terra oscilam entre 3 e 5 mm, sendo relevantes para análises de alta precisão.

Com base nas correções listadas, a equação que representa a altura dos eventos de fótons do ATL03, com as correções geofísicas aplicadas, é dada por:

$$H_{gc} = H_P - H_{OL} - H_{SEPT} - H_{OPT} - H_{SET} - H_{TCA}$$

onde:

- H_P é a altura do evento de fóton.
- H_{OL} são as deformações de carregamento oceânico.
- H_{SEPT} são as marés polares da Terra.
- H_{OPT} são as marés polares oceânicas.
- H_{SET} são as marés da Terra Sólida.
- H_{TCA} são as correções do atraso atmosférico total da coluna.

3.7.2) Parâmetros estáticos e valores de referência

Os parâmetros estáticos e valores de referência utilizados incluem:

- **Geóide:** As correções de geóide podem variar de -105 a +90 metros.
- **Marés Oceânicas:** Consideram marés diurnas, semi-diurnas e de longo período, com variações de até ± 5 metros.
- **Correção Atmosférica Dinâmica (DAC):** Inclui o efeito do barômetro invertido, com variações de até ± 50 cm.

- **Modelo Digital de Elevação (DEM):** Valores de altura estimados para a localização do fóton de referência, priorizando dados de fontes como ArcticDEM, REMA, MERIT e DTU13 Mean Sea Surface (MSS).

A geolocalização dos fótons ATLAS é o ponto de partida para o produto científico ATL03. Cada evento de fóton é posicionado dentro de um sistema de coordenadas geodésicas. As elevações são fornecidas no sistema de referência ITRF2014 e as coordenadas geográficas (latitude, longitude e altura) são referenciadas ao elipsóide WGS-84 com base no modelo G1150 ($a_e = 6378137$ m, $1/f = 298.257223563$).

Cada fóton emitido pelo ATLAS passa pela atmosfera e sofre atrasos que dependem do índice de refração ao longo do caminho óptico. Os fótons encontram uma superfície na Terra (terrestre, oceânica ou coberta por neve/gelo) e são refletidos de volta para o sistema receptor do satélite. O tempo de ida e volta de um fóton é usado como base para a geolocalização. Sobre oceanos, gelo marinho e superfícies de plataformas de gelo, cada evento de fóton geralmente requer correções para variabilidade temporal nas interações atmosférica-oceânicas (como efeitos de barômetro invertido e campo de vento), além de correções para marés e outros fatores. Sobre superfícies terrestres, são necessárias correções geofísicas para carregamento oceânico e marés de terra sólida.

As alturas dos fótons relatadas no produto ATL03 são referenciadas ao elipsóide WGS-84 G1150 ($a_e = 6378137$ m, $1/f = 298.257223563$) no sistema de referência ITRF 2014. De maneira geral, o cálculo da altura da superfície do mar (SSH) ou de uma altura análoga da superfície terrestre é realizado da seguinte forma:

$$H_p = H_{satélite_{elipsóide}} - H_{satélite_{superfície}}$$

- H_p é altura do evento de fóton
- $H_{satélite_{elipsóide}}$ representa a altura do satélite acima do elipsóide WGS-84 (determinada pelo POD)
- $H_{satélite_{superfície}}$ é a altura do satélite acima da superfície sobre a qual o fóton foi refletido.

Esta altura é frequentemente referida como uma faixa, compreendida como metade do tempo de ida e volta do sinal (consistindo em um fóton sendo transmitido no tempo t_T , refletido pela superfície da Terra e depois recebido no tempo t_R multiplicado pela velocidade da luz, c):

$$H_{\text{satélite}_{\text{superfície}}} = c(t_T - t_R)/2$$

Essas quantidades são fundamentais para os processos de determinação de órbita de precisão (POD- *precision orbit determination*) e geolocalização de fótons. De forma geral, a altura do evento de fóton, H_p , é corrigida para um número i de efeitos geofísicos variáveis temporais e espaciais (como marés e carregamento), representados por C_i , subtraindo-se:

$$H_{gc} = H_p - \sum C_i$$

onde H_{gc} São as alturas corrigidas geofisicamente referidas ao elipsoide WGS-84.

Para obter alturas de eventos de fótons oceânicos referidas a uma superfície média do mar (MSS- mean sea surface), a equação da SSH (Altura da Superfície do Mar) em relação ao elipsoide, torna-se:

$$SSH = H_{gc} - MSS = H_p - MSS - \sum C_i$$

Marés oceânicas (de curto e longo período) e Correções Atmosféricas Dinâmicas não foram aplicadas às alturas dos fótons ATL03. O ATL03 fornece esses parâmetros como informações de referência, permitindo aos usuários re-referenciar alturas ao geoide, aplicar marés oceânicas e correções atmosféricas dinâmicas, conforme necessário. Por convenção, as correções são subtraídas dos valores de altura para formar alturas corrigidas. Se uma correção precisar ser removida para aplicar uma correção modelada de forma diferente, a correção original é adicionada à altura corrigida.

A implementação das correções geofísicas geralmente requer o cálculo ou a interpolação de cada parâmetro geofísico para um grupo de fótons. Como a distribuição de fótons é muito densa e os parâmetros geofísicos variam suavemente em escalas locais, calcular correções

para cada fóton individual seria extremamente oneroso em termos computacionais. Por isso, as correções são calculadas ou interpoladas ao longo de cada trilha no solo a cada 20 metros e aplicadas uniformemente a todos os fótons dentro de cada segmento (Neumann et al., 2019).

Os fótons de referência permitem uma discretização regular ao longo da trilha, possibilitando que as correções sejam determinadas com base na localização e no tempo desses fótons. Para garantir que os erros das correções aplicadas uniformemente permaneçam pequenos, foram analisadas as variações geográficas locais e regionais, além da sensibilidade dos parâmetros da Correção geoidal e da correção das marés oceânicas (Neumann et al., 2019).

3.7.4) Correções não aplicadas no subproduto do ATLAS (ATL03)

Assim como comentado anteriormente, as correções geofísicas que precisam ser aplicadas aos dados do ICESat-2 incluem:

- **Correções atmosféricas:** Isso envolve a correção da refração atmosférica, que afeta a trajetória da luz medida pelo instrumento, garantindo que as medições estejam corrigidas para os efeitos atmosféricos e proporcionem valores precisos de altitude (Freire, 1996).
- **Correção da refração interface ar/água:** A refração ocorre quando a luz ou outros tipos de ondas eletromagnéticas atravessam a interface entre dois meios com diferentes índices de refração, como o ar e a água. Esse fenômeno é descrito pela Lei de Snell, que estabelece uma relação entre os ângulos de incidência e refração da onda ao mudar de meio. No caso de medições batimétricas, como as realizadas pelo sensor ICESat-2, a aplicação desta correção é fundamental, pois o laser emitido sofre um desvio ao penetrar na coluna d'água, alterando sua trajetória. Para obter dados de profundidade precisos, é necessário corrigir o ângulo de refração e ajustar as medições conforme o índice de refração da água. Essa correção é essencial para garantir a precisão das altitudes medidas sob a superfície oceânica (Snell, 1621; Mobley, 1994).
- **Correções de marés terrestres:** Essas correções levam em consideração as variações na gravidade causadas pela atração lunar e solar, bem como pela deformação da Terra devido ao movimento das marés. Isso é importante para obter medições precisas e consistentes das alturas de superfícies oceânicas e terrestres (Petti et al., 2010).

- **Correções dinâmicas da topografia oceânica:** Essas correções consideram as variações temporais na topografia da superfície oceânica devido a correntes oceânicas, marés e outros fenômenos dinâmicos. Isso é especialmente relevante para medições de alturas oceânicas e gelo marinho (Makin, 1999).
- **Correção do geóide:** Essa correção envolve ajustar as medições altimétricas para refletir a altura em relação ao geóide, uma superfície equipotencial da Terra que representa o nível médio dos oceanos em repouso. O ICESat-2 mede altitudes em relação a um elipsóide de referência, mas, para obter alturas ou profundidades precisas que estejam em conformidade com o nível médio dos mares, é necessário aplicar a correção do geóide. Isso assegura que as medições de elevação sejam consistentes globalmente e estejam alinhadas com o nível de referência gravitacional da Terra, crucial para monitorar as variações no nível do mar e para medições topográficas e batimétricas precisas (Smith et al., 1997).

3.7.4.1) Correção atmosférica

A correção atmosférica constitui um processo indispensável nas análises espectrais realizadas por sensores remotos, uma vez que a radiação eletromagnética emitida ou refletida pela superfície terrestre é alterada ao atravessar a atmosfera. Tais alterações decorrem principalmente dos fenômenos de espalhamento e absorção, os quais distorcem os dados adquiridos pelos sensores, comprometendo a precisão das informações sobre as características da superfície (Latorre et al., 2002). A atmosfera terrestre, por sua natureza dinâmica, pode ocasionar efeitos perceptíveis nas imagens capturadas, como a redução do brilho em determinadas regiões do espectro e a formação de névoa, particularmente em comprimentos de onda mais curtos, como a faixa do azul (Freire, 1996).

I. Constituintes atmosféricos e processos de correção

A atmosfera é composta por gases, como Nitrogênio (N_2), Oxigênio (O_2) e Argônio (Ar), e gases de concentração variável, como o vapor d'água, cuja concentração varia com as condições atmosféricas e a localização geográfica (Liou, 1980). O vapor d'água é relevante para processos de absorção e emissão de radiação, tornando-o um fator crucial na correção atmosférica (Latorre et al., 2002).

Em busca de minimizar os efeitos da atmosfera nas imagens de sensoriamento remoto, diversos métodos de correção atmosférica são aplicados. Entre eles, destacam-se os modelos físicos, que simulam a interação da radiação com a atmosfera com base em parâmetros atmosféricos no momento da aquisição, e os métodos empíricos, que utilizam informações conhecidas de alvos de referência para ajustar os dados (Latorre et al., 2002). Esses métodos são essenciais para garantir que as imagens tratadas reflitam com maior precisão as condições reais da superfície terrestre.

II. Efeitos dos particulados atmosféricos

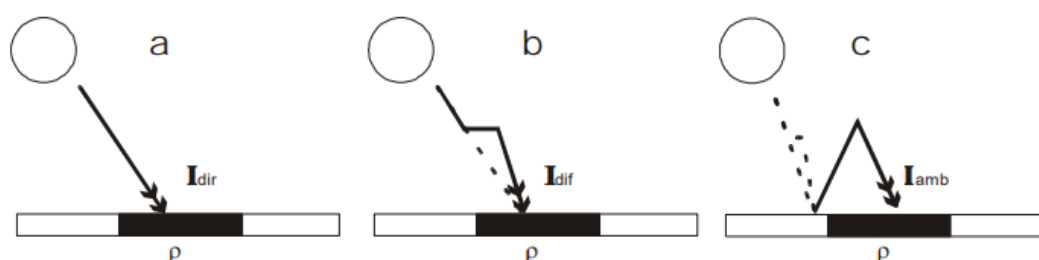
Os particulados presentes na atmosfera, como aerossóis, cristais de gelo e gotículas de água, desempenham um papel fundamental na interação com a radiação solar. Esses particulados, cujas concentrações são altamente variáveis, podem ser tanto de origem natural quanto antrópica (Liou, 1980). Entre os particulados atmosféricos, os aerossóis se destacam por sua diversidade de origem e composição, incluindo minerais solúveis e insolúveis, partículas oceânicas e orgânicas (WMO, 1986). Esses particulados influenciam diretamente a propagação da radiação na atmosfera, principalmente por meio de dois efeitos: o espalhamento e a absorção. O espalhamento, que ocorre de forma aleatória e em todas as direções, sem alterar o comprimento de onda da radiação, atenua o sinal captado pelos sensores remotos, impactando a qualidade das imagens (Zullo, 1994; Slater, 1980). A intensidade desse fenômeno depende da relação entre o tamanho da partícula e o comprimento de onda incidente. Partículas menores, como moléculas de gases, estão associadas ao espalhamento de Rayleigh, enquanto partículas maiores resultam no espalhamento de Mie (Liou, 1980). Além disso, os aerossóis também modificam as propriedades ópticas e o tempo de vida das nuvens, influenciando o balanço radiativo da Terra e, conseqüentemente, o clima global (IPCC-Painel Intergovernamental na Mudança do Clima, 2001).

III. Radiação e correção em sensores remotos

O espalhamento atmosférico é um fenômeno importante a ser considerado em estudos de sensoriamento remoto, uma vez que afeta diretamente a propagação da radiação solar no caminho entre o Sol, a Terra e os sensores. A radiação que chega à superfície terrestre pode ser classificada em três componentes principais: a radiação direta, que é a fração que atinge a

Terra sem sofrer atenuação significativa; a radiação difusa, que resulta da radiação solar desviada pela atmosfera antes de atingir a superfície; e a radiação ambiental, que é a radiação refletida pela superfície e, em seguida, desviada novamente pela atmosfera antes de voltar à Terra (Zullo Júnior, 1994). Essas diferentes formas de radiação, apresentadas na figura 6, contribuem para a iluminação da superfície e, conseqüentemente, para a qualidade dos dados captados por sensores remotos.

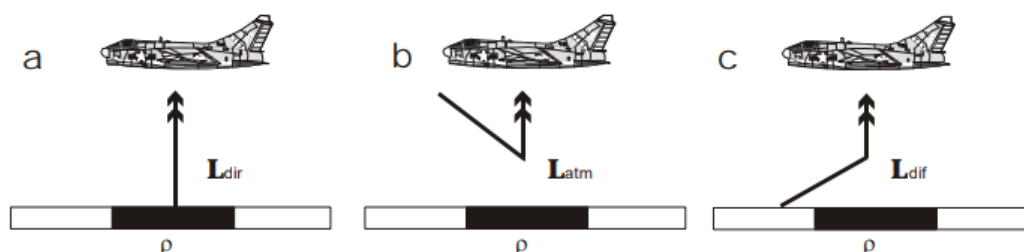
Figura 6- (a) radiação direta; (b) radiação difusa; (c) radiação ambiental



Fonte: Zullo Júnior (1994)

No percurso da radiação no sentido Terra-sensor (figura 7), o espalhamento também desempenha um papel crucial, gerando três formas de contribuição para o sinal recebido: a radiação direta do alvo, que é refletida pela superfície sem sofrer desvios; a radiação atmosférica, que é desviada pela atmosfera diretamente para o sensor, sem atingir a superfície; e a radiação difusa, que é refletida pela superfície e desviada pela atmosfera antes de ser captada pelo sensor (Zullo Júnior, 1994). Esses fenômenos afetam a radiância que chega ao sensor, influenciando a qualidade da imagem adquirida, o que torna necessária a aplicação de métodos de correção atmosférica.

Figura 7- Esquema sobre o espalhamento no sentido terra-sensor: (a) radiação direta; (b) radiação difusa; (c) radiação ambiental



Fonte: Zullo Júnior (1994)

Em condições de céu limpo, a maior parte da radiância incidente é proveniente da radiação direta, enquanto em dias nublados ou com grande densidade de aerossóis, a radiação difusa pode representar até 40% da radiação incidente (Idso et al., 1966).

Além disso, segundo Liou, 1980. o espalhamento atmosférico é influenciado por fatores como a densidade de partículas presentes na atmosfera e o comprimento da trajetória da radiação, que varia com o ângulo de iluminação e a posição do sensor. O aumento na densidade de aerossóis, tanto de origem natural quanto antrópica, pode intensificar o espalhamento, diminuindo a nitidez das imagens capturadas e reduzindo a radiação direta que chega ao sensor. Esses fatores reforçam a importância da correção atmosférica em dados de sensoriamento remoto, especialmente em regiões com alta concentração de particulados atmosféricos.

O espalhamento atmosférico é um dos principais fatores que afetam a propagação da radiação eletromagnética ao atravessar a atmosfera terrestre. Este fenômeno pode ser dividido em duas categorias principais: espalhamento molecular, também conhecido como espalhamento Rayleigh, e espalhamento por aerossóis. O espalhamento Rayleigh ocorre devido à interação da radiação com moléculas de gases presentes na atmosfera, sendo mais intenso em comprimentos de onda menores, como o azul (cerca de 400-500 nm). Sua intensidade é inversamente proporcional à quarta potência do comprimento de onda, conforme a equação:

$$K_r \propto \frac{1}{\lambda^4}$$

Onde K_r é o coeficiente de espalhamento de Rayleigh e λ é o comprimento de onda da radiação (Liou, 1980). Este tipo de espalhamento é responsável pelo céu azul durante o dia e pela redução de contraste nas imagens capturadas por sensores remotos, especialmente em condições atmosféricas com alta concentração de gases e partículas pequenas (Zullo Júnior, 1994).

Já o espalhamento por aerossóis ocorre em comprimentos de onda maiores e depende mais da concentração e das propriedades físicas das partículas suspensas, como o tamanho e a forma. A atenuação da radiação causada por aerossóis pode ser modelada pela equação, onde o coeficiente de extinção espectral K_r depende dos parâmetros de saturação e do tamanho das partículas, como mostrado na Tabela 4 (Iqbal, 1983).

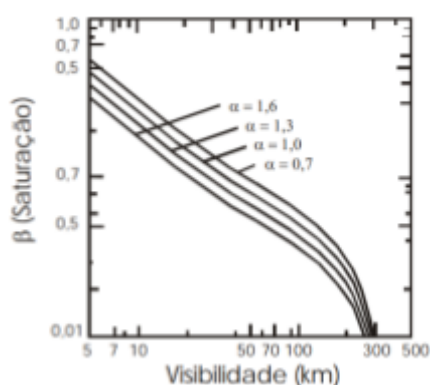
Tabela 4- Relação dos parâmetros de saturação e tamanho com relação a visibilidade

Atmosfera	β (saturação)	α (tamanho)	Visibilidade (Km)
Limpa	0	1,3	340
Clara	0,1	1,3	28
Túrbida	0,2	1,3	11
Muito turbida	0,4	1,3	<5

Fonte: Iqbal et al., 1983

Esses dois tipos de espalhamento, molecular e por aerossóis, são cruciais no contexto do sensoriamento remoto ativo, como no caso do ICESat-2, que utiliza um laser de 532 nm. Devido ao comprimento de onda relativamente curto, o espalhamento Rayleigh desempenha um papel relevante, provocando a atenuação do sinal emitido e refletido pela superfície (Liou, 1980). O efeito da atenuação provocada por atmosferas com diferentes concentrações de partículas pode ser visualizado na Figura 8. Portanto, a aplicação de correções atmosféricas, que consideram o espalhamento e a absorção atmosférica, é necessária para garantir a precisão dos dados obtidos pelo ICESat-2, principalmente em ambientes com alta concentração de partículas.

Figura 8- Relação entre os parâmetros (α , β) e a visibilidade atmosférica



Fonte: Iqbal, 1983

IV. Aplicação no ICESat-2

No contexto de sensores Lidar, como o ICESat-2, que opera com laser de espectro verde (532 nm), o comportamento do sinal emitido e refletido pela superfície terrestre ainda sofre interferências atmosféricas, embora de maneira diferente em comparação aos sensores passivos. No caso do ICESat-2, o espalhamento atmosférico, especialmente o do tipo Rayleigh, desempenha um papel importante devido ao comprimento de onda relativamente curto do laser verde. Esse espalhamento provoca a atenuação do sinal, dispersando-o em todas as direções e reduzindo a intensidade do feixe que atinge a superfície e retorna ao sensor (Liou, 1980).

A absorção por aerossóis também pode afetar o sinal Lidar, especialmente em regiões com alta concentração de partículas, como em áreas urbanas ou próximas a fontes de poluição. No entanto, como o Lidar é uma tecnologia ativa, a radiação direta e difusa provenientes do Sol não têm o mesmo impacto que nos sistemas de sensoriamento passivo. Em vez disso, a radiação que chega ao sensor Lidar é gerada pelo próprio sistema, e sua interação com a atmosfera é principalmente definida pelo caminho do laser emitido e seu retorno, o que demanda a aplicação de modelos específicos de correção atmosférica adaptados ao Lidar.

Apesar dessas diferenças, é necessário aplicar correções para atenuar os efeitos do espalhamento e da absorção atmosférica no sinal Lidar, assegurando que a energia retornada seja representativa das características da superfície terrestre, especialmente em ambientes

com variabilidade atmosférica (Liou, 1980). Tais correções são cruciais para garantir a precisão dos dados batimétricos e topográficos fornecidos por plataformas como o ICESat-2.

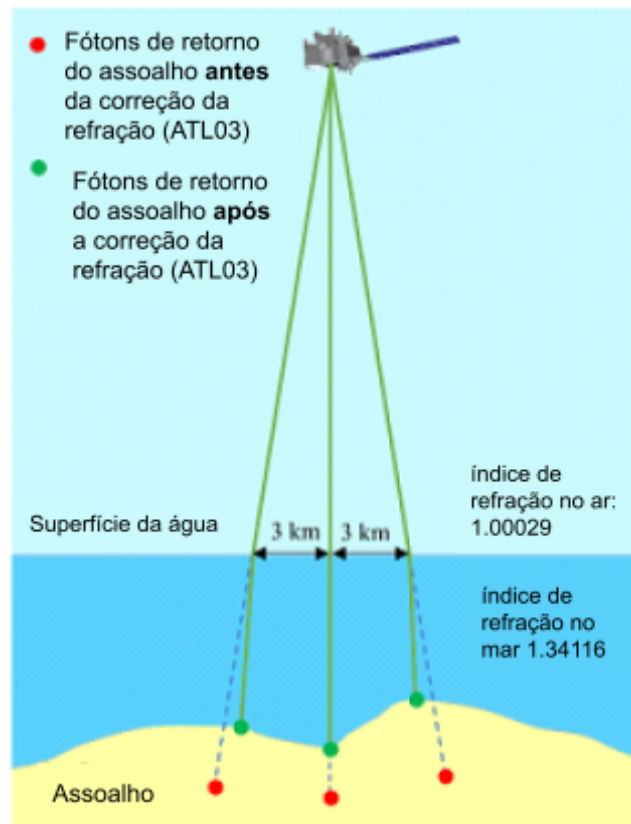
3.7.4.2) Correção da refração - Lei de Snell

O sistema ATLAS mede o Tempo de Voo do Fóton, que é o intervalo entre a emissão de um fóton pelo satélite e sua reflexão de volta ao sensor após atingir a superfície terrestre. Essa medição é crucial para calcular com precisão a distância entre o satélite e a superfície. Além disso, o sistema registra o **vetor de apontamento**, que descreve a direção precisa do feixe de laser no momento da emissão. Esse vetor é fundamental para determinar a posição exata onde o feixe atinge a superfície, pois leva em conta a orientação do satélite e possíveis desvios na trajetória do laser, garantindo maior precisão nas medições (Parrish, 2019).

De acordo com Guo et al. (2022), para obter estimativas precisas de profundidade, é fundamental corrigir os dados para o erro de refração, que ocorre devido à mudança na velocidade de propagação dos fótons ao atravessarem da atmosfera para a água. Sem essa correção, os dados do ATLAS podem apresentar erros significativos tanto na geolocalização vertical quanto horizontal. A Figura 9 ilustra como a refração afeta os lasers do ICESat-2, destacando a diferença nas posições dos fótons antes e depois da correção de refração.

A correção da refração é um passo crucial para melhorar a precisão dos dados batimétricos derivados do ICESat-2, especificamente do conjunto de dados ATL03. No processamento padrão dos dados ATL03, as posições dos fótons são calculadas considerando a propagação do laser no ar, sem levar em conta a refração que ocorre quando a luz atravessa a interface entre o ar e a água. Esse efeito de refração pode introduzir erros significativos, com desvios de elevação na ordem de metros, comprometendo a precisão das medições batimétricas.

Figura 9- Ilustração da refração do laser do ICESat-2.



Fonte: traduzida e modificada de Guo, 2022.

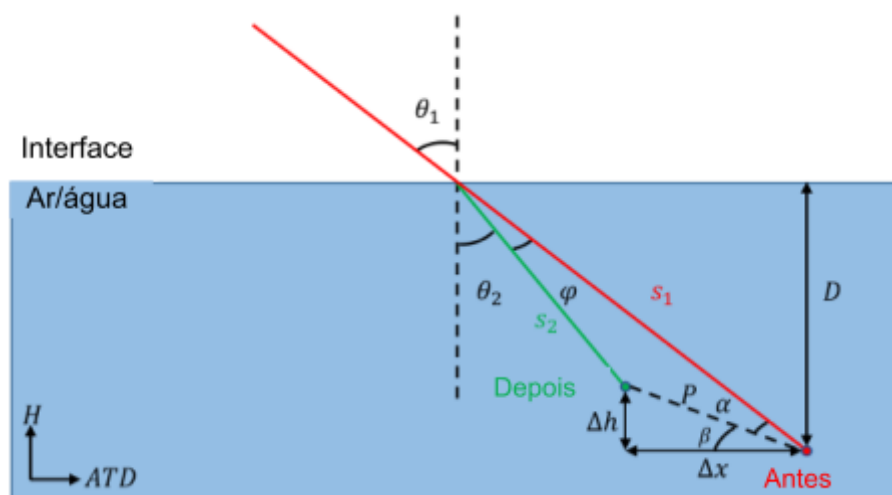
- **Efeito da refração**

Quando o feixe de laser do ICESat-2 penetra na água, sua direção e velocidade mudam devido à diferença de índice de refração entre o ar e a água, conforme descrito pela Lei de Snell. Essa mudança afeta a posição calculada dos fótons no fundo do mar, resultando em medições imprecisas se a refração não for corrigida. Portanto, a correção desse efeito é necessária para alinhar as posições dos fótons subaquáticos com suas localizações reais.

- **Processo de correção**

A correção do efeito de refração envolve duas etapas principais demonstradas na figura 10:

Figura 10- Diagrama da correção da refração nos fótons



Fonte: traduzido e modificado de Jia, 2023

1. Correção da direção de propagação:

A primeira etapa consiste em ajustar a direção do feixe de laser após ele atravessar a interface ar-água. A direção do feixe é alterada devido à diferença no índice de refração, o que faz com que o ângulo de incidência da luz mude. Utilizando a Lei de Snell, o ângulo de incidência θ_1 pode ser calculado pela fórmula:

$$\theta_1 = \frac{\pi}{2} - ref_{elev}$$

A partir desse ângulo de incidência, o ângulo de refração 2 é determinado pela Lei de Snell:

$n_1 \cdot \text{sen}(\theta_1) = n_2 \cdot \text{sen}(\theta_2)$, o ângulo de refração pode ser explicado por:

$$\theta_2 = \text{sen}^{-1}\left(\frac{n_1 \text{sen}\theta_1}{n_2}\right)$$

onde n_1 é o índice de refração do ar (1,00029) e n_2 é o índice de refração na água salgada (1,34116). Após calcular o ângulo de refração, a nova direção de propagação da luz na água pode ser determinada.

2. Correção da velocidade de propagação:

Depois de corrigir a direção do feixe, é necessário ajustar a velocidade de propagação da luz na água. Como a luz se move mais lentamente na água do que no ar, a distância percorrida pelos fótons subaquáticos precisa ser recalculada. A profundidade antes da correção de refração (D) pode ser expressa como:

$$D = \cos\theta_1 \cdot S_1$$

onde S_1 é o comprimento do caminho percorrido pelo fóton sem considerar os efeitos da refração. O comprimento do caminho corrigido S_2 é dado por:

$$S_2 = \frac{S_1 n_1}{n_2}$$

Além disso, a mudança na posição do fóton (P) antes e depois da correção pode ser calculada usando a lei dos cossenos:

$$P = \sqrt{S_2^2 + S_1^2 - 2S_2S_1\cos\varphi},$$

Onde $\varphi = (\theta_1 - \theta_2)$,

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{S_2\sin\varphi}{P}\right).$$

Dessa forma as mudanças na posição do fóton nas direções ao longo do trilho (x) e de elevação (h) são então determinadas por:

$$\Delta x = P\cos\beta,$$

$$\beta = \frac{\pi}{2} - \theta_1 - \alpha,$$

$$\Delta h = P\sin\beta.$$

3.7.4.3) Correções das marés terrestres

As marés terrestres resultam das variações gravitacionais causadas pela atração da Lua e do Sol, bem como pela deformação elástica da Terra. Essas variações, que provocam oscilações na crosta terrestre, afetam a altura das superfícies medidas e são especialmente relevantes em dados de altimetria. Correções para marés terrestres são fundamentais para garantir a precisão das medições em estudos que envolvem mudanças no nível do mar ou variações na superfície terrestre.

As marés terrestres podem causar variações de até ± 40 cm na altura da superfície (IERS Conventions, 2010; McCarthy & Petit, 2004). Sem essas correções, os dados de altimetria por satélite, como os do ICESat-2, poderiam sofrer imprecisões consideráveis, afetando tanto medições sobre os oceanos quanto sobre as massas de terra. As correções de marés terrestres são, portanto, essenciais para garantir a consistência e a precisão dos dados ao longo do tempo, principalmente em estudos de longo prazo sobre a dinâmica da Terra.

3.7.4.4) Correções dinâmicas da topografia oceânica

As correções dinâmicas da topografia oceânica são empregadas para ajustar as variações temporais na superfície do oceano causadas por fenômenos como correntes oceânicas, marés e outras flutuações dinâmicas. Essas variações podem impactar significativamente a precisão dos dados de altimetria, especialmente em regiões costeiras e áreas onde as correntes oceânicas desempenham um papel importante.

A inclusão dessas correções pode ajustar as medições em até ± 5 metros, dependendo da região e dos fenômenos envolvidos (Andersen et al., 2020; Stammer & Cazenave, 2017). Elas são particularmente importantes para estudos que medem a altura do oceano e do gelo marinho, assegurando que variações temporais de marés e correntes não comprometam a precisão dos dados de altimetria.

3.7.4.5) Correção do geoide

A correção ortométrica ajusta as alturas elipsoidais medidas em relação a uma superfície de referência global, o geóide, que representa o nível médio dos oceanos, considerando as variações do campo gravitacional da Terra. Este ajuste é essencial para a coerência das

medições globais de altimetria e batimetria, incluindo as realizadas pelo ICESat-2 (Neumann et al., 2019).

A correção ortométrica pode variar em até -105 a +90 metros, dependendo da localização (Pavlis et al., 2012; Tapley et al., 2005). Ao referenciar as medições ao geóide, os dados obtidos podem ser comparados com precisão em diferentes regiões geográficas.

Capítulo 4- Metodologia

4.1) Área de Estudo

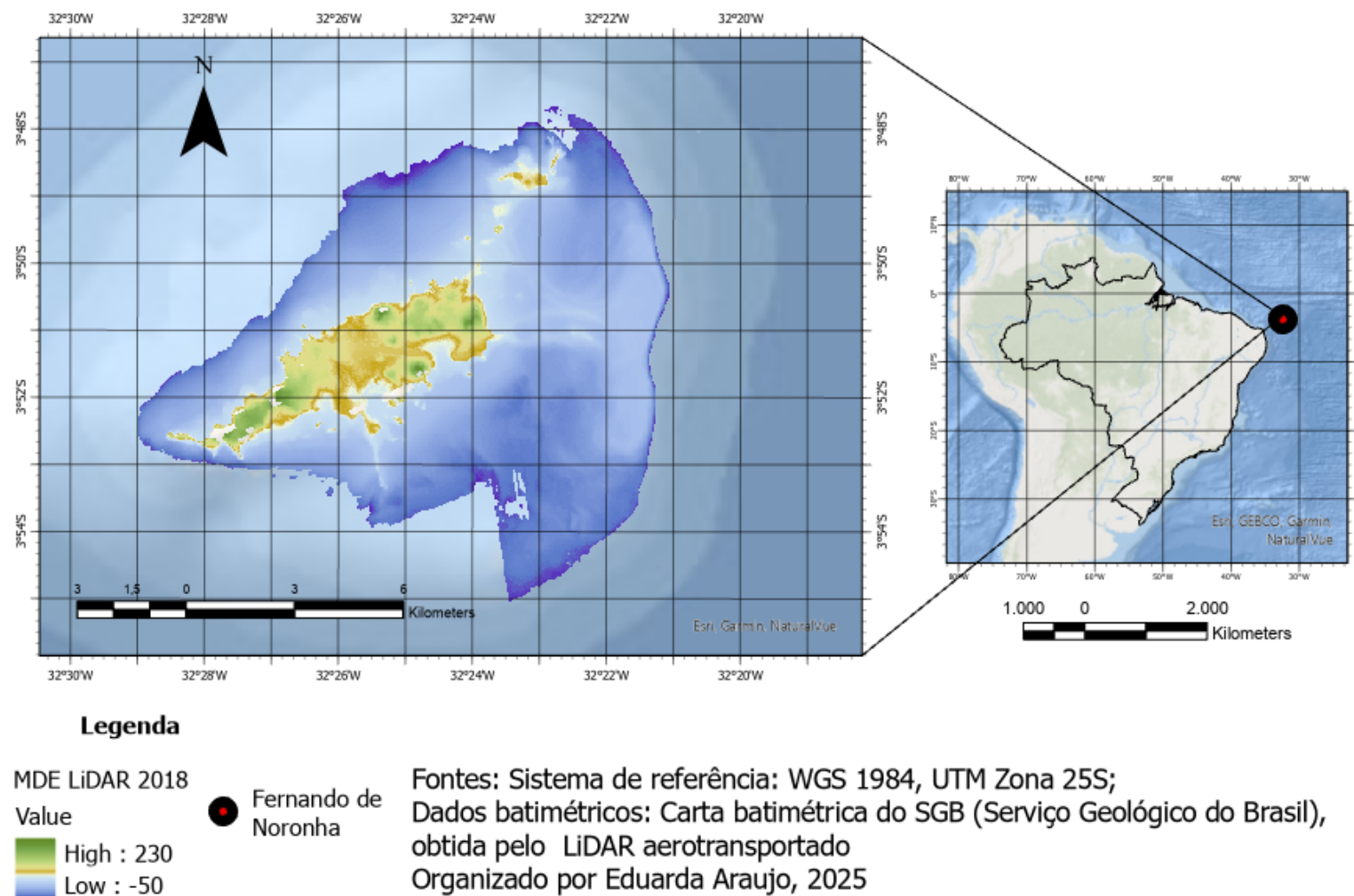
4.1.1) Localização e Contexto Geral

O Arquipélago de Fernando de Noronha está localizado no Oceano Atlântico, a aproximadamente 345 km da costa nordeste do Brasil, próximo ao estado do Rio Grande do Norte. Suas coordenadas geográficas variam entre 3°51'S e 32°25'W, abrangendo uma área total de aproximadamente 18,4 km². O arquipélago é composto por uma ilha principal — a Ilha de Fernando de Noronha (com cerca de 16,9 km²) — e mais 20 ilhas e ilhotas menores. Pertence ao estado de Pernambuco e é reconhecido por sua rica biodiversidade e importância ambiental (Mourão et al., 2011). A Figura 11 apresenta a localização geográfica do Arquipélago de Fernando de Noronha em relação ao território brasileiro e ao Oceano Atlântico equatorial.

4.1.2) Justificativa da Escolha da Área

A escolha do arquipélago como área de estudo baseia-se em uma combinação de fatores ambientais e técnicos que o tornam particularmente adequado para investigações batimétricas por sensoriamento remoto. A clareza das águas, aliada à complexa morfologia submarina e à presença de recifes, grutas e plataformas rochosas submersas, tornam Fernando de Noronha um local estratégico para levantamentos batimétricos baseados em sensores ópticos, como o ICESat-2 e aerotransportados como o ALB. Essa combinação de fatores físicos e ambientais permite a coleta de dados com boa relação sinal-ruído (SNR), além da validação com sensores ativos como o LiDAR aerotransportado, promovendo avanços na validação de técnicas batimétricas por sensoriamento remoto em áreas tropicais (Parsons et al., 2022; Brock & Purkis, 2009).

Figura 11 – Localização do Arquipélago de Fernando de Noronha - Brasil, no contexto da plataforma continental nordeste do Brasil.



Fonte: Elaborado pela autora com base nos dados do levantamento LiDAR aerotransportado realizado pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM) em **2011** (CPRM, 2014). Sistema de referência: WGS 1984, UTM Zona 25S.

A dinâmica dos leitos oceânicos ao redor de Fernando de Noronha é fortemente influenciada por processos hidrodinâmicos, como correntes de maré, ondas internas e ressurgências, que remodelam continuamente o fundo marinho, especialmente nas áreas rasas próximas aos recifes. Essas forças afetam a distribuição de sedimentos, a estabilidade das estruturas submersas e a transparência da água, fatores cruciais para a detecção precisa do fundo por sensores ópticos. Estudos mostram que a interação entre a topografia submarina acidentada e as correntes do Giro do Atlântico Sul contribui para a formação de zonas de deposição e erosão diferenciadas ao redor do arquipélago (Silva et al., 2013; Siegle et al., 2009). Esses processos também favorecem a manutenção de águas claras em certas áreas protegidas da ação direta das ondas, otimizando a resposta espectral do fundo marinho para sensores orbitais e aerotransportados. Além disso, a variabilidade sazonal nas condições hidrodinâmicas reforça a necessidade de integração temporal dos dados batimétricos, a fim de capturar a dinâmica real da morfologia submersa (Amorim et al., 2021).

4.1.3) Características Ambientais e Oceanográficas

4.1.3.1) Geologia e Geomorfologia

Fernando de Noronha situa-se sobre um grande edifício vulcânico associado à Dorsal Mesoatlântica. O arquipélago é composto majoritariamente por rochas alcalinas, classificadas como Basaltos de Ilhas Oceânicas (OIB), e apresenta estruturas derivadas de dois eventos vulcânicos principais: as Formações Remédios e Quixaba (Sial et al., 2008). A topografia é acidentada, com destaque para o Morro do Pico, ponto mais elevado da ilha, com 321 metros de altitude. A erosão marinha contínua e a ação dos antigos processos vulcânicos resultaram na formação de uma plataforma submarina ao redor das ilhas, com recifes e elevações submersas — condições ideais para mapeamento batimétrico de alta resolução (Cordani et al., 2000).

4.1.3.2) Oceanografia e Clima

A área está sob influência da corrente oceânica do Giro do Atlântico Sul, a qual regula as propriedades físico-químicas da água, como temperatura e transparência (Castro & Miranda, 1998). A temperatura da água varia entre 26°C e 28°C, com baixa turbidez durante grande

parte do ano, favorecendo a penetração da luz em profundidade. O clima é tropical, com estação seca de setembro a março e estação chuvosa de abril a agosto. A precipitação média anual gira em torno de 1.300 mm, com temperatura média de 27°C.

4.1.4) Dados de Referência: Levantamento LiDAR Aerotransportado (SGB/CPRM)

Para a validação dos dados batimétricos do ICESat-2, foram utilizados como referência os dados do levantamento com LiDAR aerotransportado do Arquipélago de Fernando de Noronha. Este levantamento foi executado pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM) como parte do projeto Plataforma Continental Rasa do Brasil. A aquisição dos dados foi realizada entre os dias 27 e 29 de janeiro de 2011, utilizando o sistema SHOALS-1000T a bordo de uma aeronave Beechcraft King Air A90.

O levantamento cobriu uma área total de 112 km², abrangendo a porção emersa e submersa do arquipélago até 50 metros de profundidade. A operação foi conduzida com um espaçamento de pontos de 5m x 5m a uma altitude de voo de 400 metros, especificações que permitiram classificar o levantamento segundo a Ordem 1b da Organização Hidrográfica Internacional (IHO). O Modelo Digital de Elevação (MDE) resultante deste projeto, com dados referenciados ao nível médio do mar (MSL), serve como base de alta precisão para a comparação e avaliação dos dados derivados do sensor ATLAS/ICESat-2 nesta dissertação.

4.2) O Subproduto ATL03 do ICESat-2: Processamento e Aplicações Batimétricas

4.2.1) Estrutura e Conteúdo do ATL03

A obtenção de dados batimétricos é essencial para diversas aplicações em recursos hídricos e estudos ambientais, especialmente em zonas costeiras sensíveis às atividades humanas. Este estudo foca no subproduto ATL03 da missão ICESat-2, que é crucial para determinar a localização geodésica (latitude, longitude e altitude) de cada fóton detectado na região do arquipélago de Fernando de Noronha. O subproduto integra os tempos de voo dos fótons registrados pelo sensor ATLAS com os dados de atitude e posição do satélite, permitindo uma coleta precisa de informações, mesmo em áreas de difícil acesso, como no caso do arquipélago.

4.2.2) Nível de Processamento e Validação

Os produtos de dados do ICESat-2/ATLAS, como o ATL03, são organizados em diferentes níveis de processamento, conforme detalhado no manual técnico de Neumann (2018). O ATL03 é classificado como um produto de Nível 2, o que significa que ele passou por correções mínimas, podendo ser posteriormente modelado para aplicações específicas. Esse produto fornece as alturas elipsoidais para cada evento de fóton, ao integrar dados de geolocalização com correções geofísicas. Essa combinação de dados e correções é essencial para validar a qualidade dos dados, um processo que foi amplamente validado pela NASA por meio de comparações com medições realizadas por aeronaves e levantamentos terrestres.

4.2.1.3) Correções Geofísicas Aplicadas ao ATL03

Os dados do ATLAS são submetidos a correções geofísicas importantes para garantir a precisão nas medições de altura dos fótons e assegurar a compatibilidade com outros produtos altimétricos. Estas correções incluem os efeitos das marés da Terra sólida, que ajustam os deslocamentos da crosta terrestre causados pela atração gravitacional da Lua e do Sol; o carregamento oceânico, que compensa as deformações causadas pelo peso das massas d'água sobre a crosta; e a maré polar oceânica, que ajusta variações na altura do nível do mar devido a oscilações do eixo de rotação terrestre. Também são aplicadas correções para o atraso atmosférico total da coluna, que ajusta variações no tempo de propagação dos fótons devido a diferenças na densidade do ar, e para o modelo geoidal, que converte as alturas do elipsóide WGS-84 para alturas ortométricas geradas pelo modelo GOT4.8, essenciais para comparações com dados de levantamentos in situ e outros produtos altimétricos (Neumann et al., 2019).

4.2.1.4) Ajustes Adicionais para Aplicações Batimétricas

Embora o conjunto de dados do subproduto do ATLAS ATL03 já contenha algumas correções fundamentais, como o ajuste do atraso atmosférico, correção do tempo de voo, ajuste nos valores de *pitch*, *roll* e *yaw*, e a correção de geolocalização que garante a precisão nas coordenadas e altitude para cada fóton, para a aplicação em batimetria é necessário realizar ajustes adicionais. Entre esses ajustes adicionais estão: a Correção Atmosférica Dinâmica (DAC), a Correção da Maré Oceânica, a correção do Geóide e a refração dos fótons na interface água-ar, com base na lei de Snell. Além disso, a filtragem de fótons

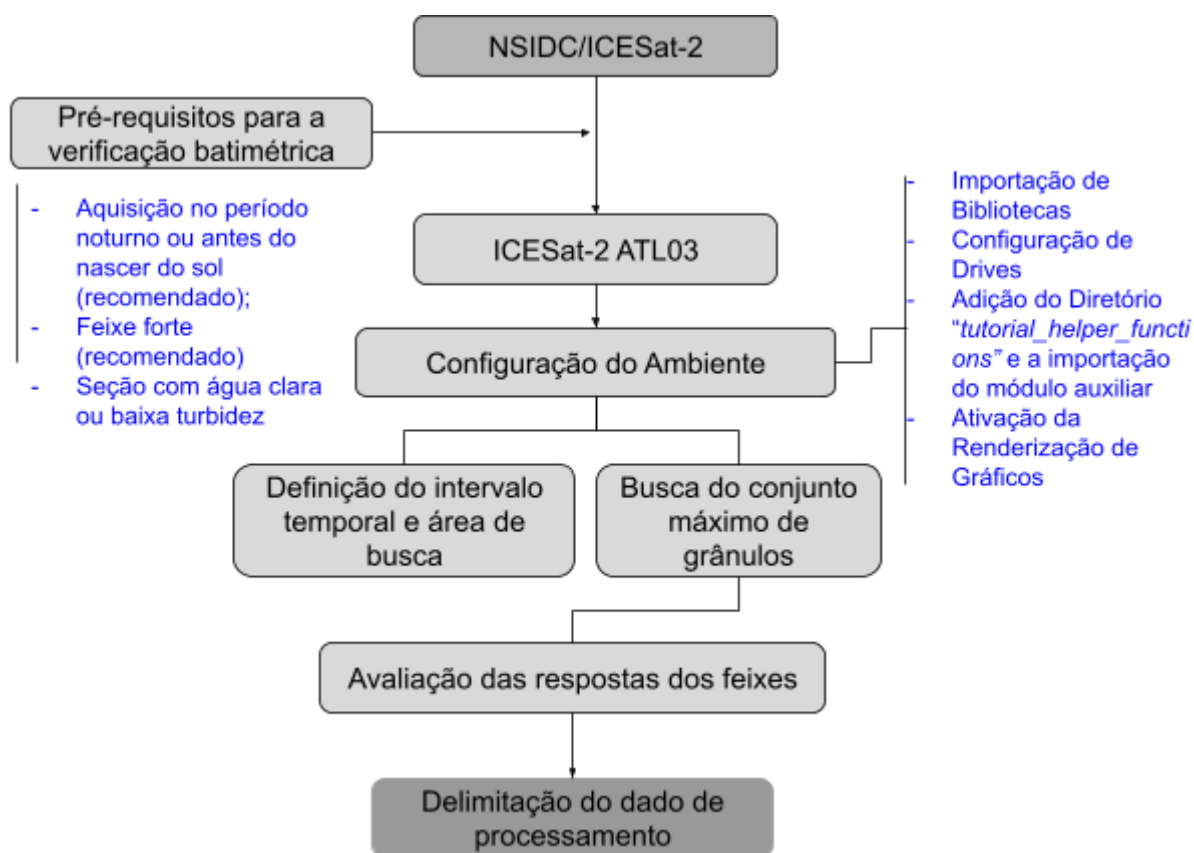
reverberados é essencial para remover erros nos dados e a delimitação das interfaces que esses fótons se encontram. Esses ajustes são necessários para garantir a precisão das estimativas batimétricas e permitir uma comparação confiável com medições em campo e outros levantamentos remotos (Giribabu et al., 2024; NASA, 2018).

4.3 Processamento dos dados

4.3.1) Pré-processamento do ATL03

A figura 12 apresenta a configuração do ambiente e a seleção do dado de melhor qualidade para processamento. A figura 14 é relativa ao fluxo de processamento adotado nesta pesquisa para a obtenção e correção dos dados batimétricos a partir do ICESat-2 (ATL03) dos feixes fortes e fracos. Cada etapa, desde a geolocalização dos fótons até a delimitação do assoalho oceânico, foi cuidadosamente aplicada para garantir a precisão dos resultados em cada grânulo – arquivos de dados que cobrem pequenos trechos da órbita – de retorno em todos os feixes disponíveis.

Figura 12 - Fluxograma da configuração do ambiente e seleção de dado



Fonte: Elaboração própria (2025)

Para o processamento dos dados do ICESat-2, foi necessário configurar o ambiente computacional e importar diversas bibliotecas que auxiliam na manipulação, análise e visualização dos dados. Foram utilizadas bibliotecas como:

- Manipulação de dados: *pandas* e *geopandas* para organização e tratamento dos dados tabulares e geoespaciais.
- Leitura e processamento de arquivos HDF5: *h5py* e *xarray* para extração e manipulação dos dados do produto ATL03.
- Geoprocessamento e reprojeção: *shapely*, *pyproj* e *pyresample* para lidar com geometrias, projeções e reamostragem espacial dos dados.
- Visualização: *matplotlib* e *mpl_toolkits.mplot3d* para geração de gráficos e perfis batimétricos.
- Acesso aos dados do ICESat-2: *earthaccess*, utilizado para a autenticação e *download* dos produtos de sensoriamento remoto.

Além disso, foi configurado o suporte à leitura de arquivos KML, necessário para lidar com dados geoespaciais adicionais. Para facilitar a manipulação dos arquivos do ICESat-2, utilizou-se um módulo auxiliar (*tutorial_helper_functions*), fornecido no conjunto dos dados, contendo funções para automação de tarefas repetitivas. A configuração do ambiente também inclui a importação de bibliotecas para manipulação de arquivos HDF5 (formato disponível dos dados), requisições HTTP, e visualização gráfica dos dados.

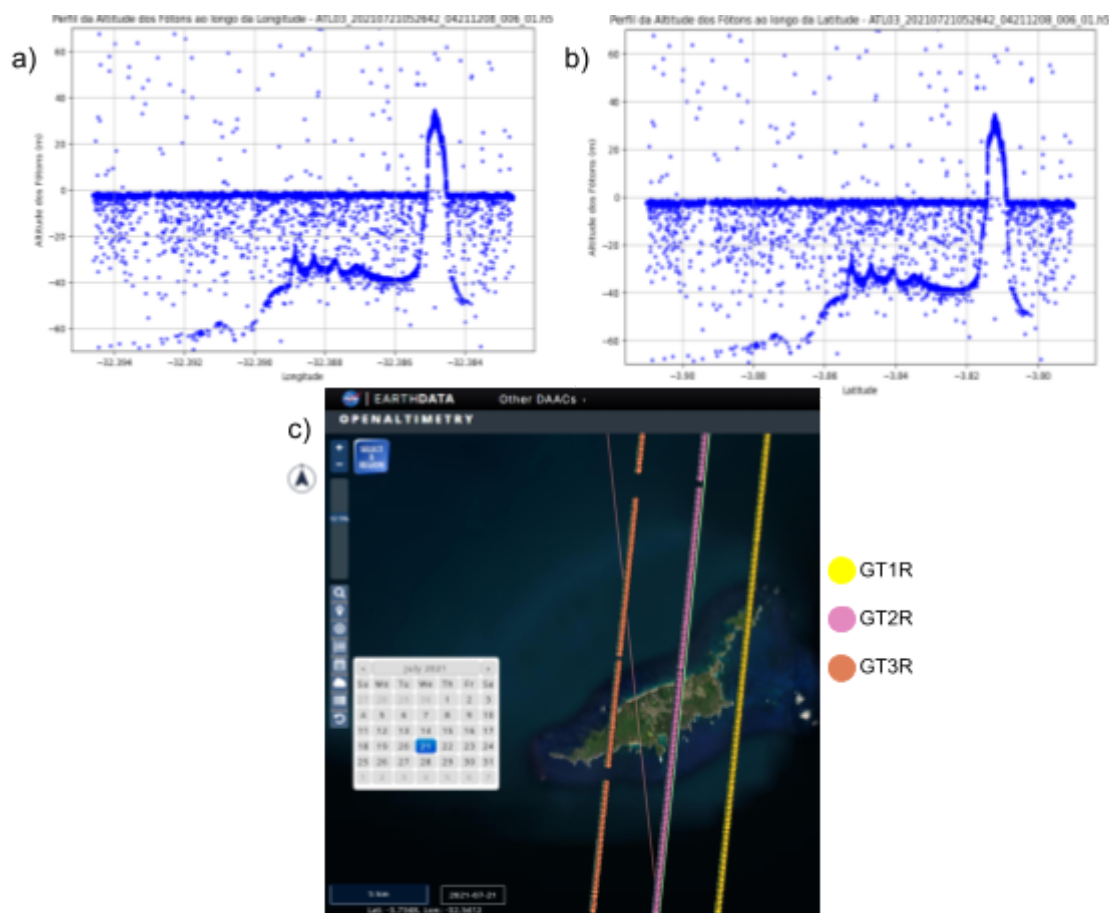
A obtenção dos dados foi realizada por meio da plataforma NASA Earthdata, utilizando a API earthaccess para buscar e baixar os produtos do ICESat-2. O produto selecionado foi o ATL03 (Global Geolocated Photon Data) na versão 006, que fornece a localização georreferenciada dos fótons detectados pelo sistema ATLAS.

Para garantir a abrangência temporal e espacial adequada ao estudo, foram definidos os seguintes critérios de busca:

- Intervalo temporal: de 10 de dezembro de 2018 até 25 de janeiro de 2025, abrangendo todo o período disponível do ICESat-2 até a data da pesquisa.
- Área de interesse: um retângulo delimitado pelas coordenadas (-32.52° a -32.34° de longitude e -3.92° a -3.77° de latitude), correspondente ao Arquipélago de Fernando de Noronha.
- Produto: ATL03, devido à necessidade de utilizar dados de fótons brutos e geolocalizados para análise batimétrica.

Após a realização da busca, os metadados dos arquivos encontrados foram inspecionados para garantir a adequação dos dados antes do *download*. Após a obtenção dos arquivos ATL03, foi realizada a extração e filtragem dos dados dos fótons detectados pelo ICESat-2, com foco nos feixes fortes gt1r, gt2r e gt3r, e feixes fracos gt1l, gt2l e gt3l. O processamento desses dados envolveu a leitura das variáveis de latitude, longitude e altura dos fótons no elipsóide.

Figura 13 - Gráficos da variação dos fótons: a) em relação a longitude (longitude x altitude) ; b) em relação a latitude (latitude x altitude); c) Trilha do sensor ATLAS
[\(https://openaltimetry.earthdatacloud.nasa.gov/data/icesat2/\)](https://openaltimetry.earthdatacloud.nasa.gov/data/icesat2/)



Fonte: Elaboração própria (2025) com dados da NASA (ICESat-2)

A partir do conjunto de fótons filtrados, foram geradas visualizações para facilitar a análise dos dados. Primeiramente, foi produzido um mapa de dispersão no qual a altitude dos fótons foi representada por uma escala de cores, permitindo a identificação de padrões espaciais. Em seguida, foi construído um histograma para visualizar a distribuição das altitudes, fornecendo informações estatísticas sobre a variação dos dados. Além disso, foram gerados perfis altimétricos ao longo da latitude e longitude, possibilitando uma melhor compreensão das variações topográficas e batimétricas na área estudada.

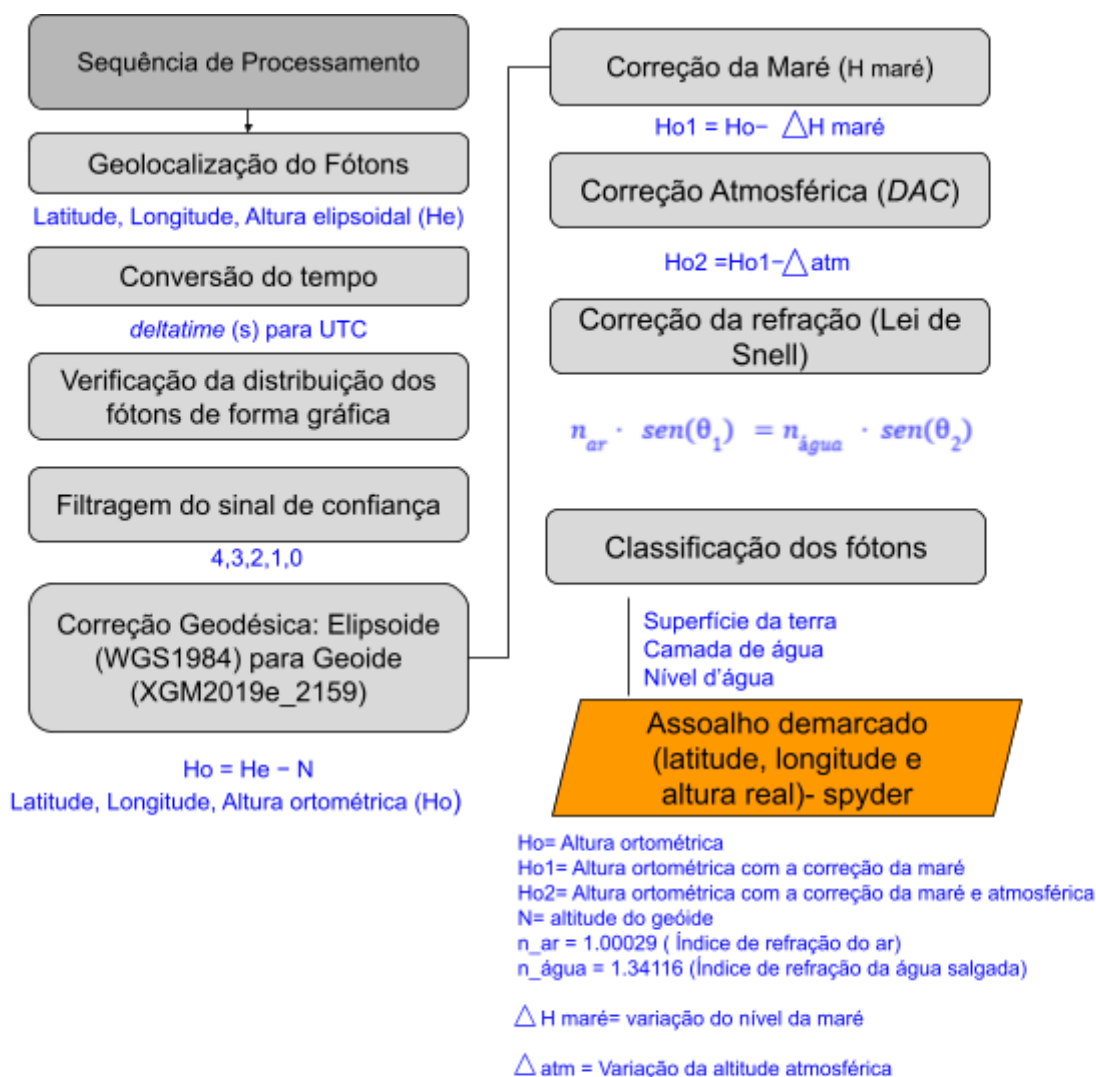
Esse processamento inicial foi fundamental para verificar a qualidade dos dados e subsidiar as próximas etapas da pesquisa, que envolvem a aplicação de correções e a análise comparativa dos resultados obtidos a partir do ICESat-2 e do LiDAR aerotransportado. O

dado utilizado para amostra de sequência do processamento é o da passagem do dia 21/07/2021 do GT1R apresentado na figura 13. Para calcular a profundidade registrada por cada fóton, é necessário seguir um fluxo estruturado, figura 14, que envolve o acesso às bibliotecas para dados geoespaciais, a extração dos dados, o uso de comandos específicos, a modelagem das informações e a geração dos resultados finais.

O processamento dos dados do ICESat-2 de feixes ATL03 segue uma sequência estruturada, iniciando pela geolocalização, na qual são extraídas as coordenadas latitude, longitude e altura elipsoidal (He) dos fótons detectados. Após essa etapa, ocorre a conversão do tempo, transformando a variável *deltatime* (segundos) para o formato UTC (Coordenada Temporal Universal – referência do ICESat-2), garantindo a padronização temporal dos dados. Em seguida, realiza-se a verificação gráfica da distribuição dos fótons, permitindo uma análise preliminar da qualidade e disposição espacial dos dados adquiridos. Para melhorar a confiabilidade dos fótons utilizados na análise, aplica-se a filtragem do sinal de confiança, que se baseia em níveis de classificação (4, 3, 2, 1, 0), figura 15, indicando diferentes graus de precisão e confiabilidade dos fótons detectados.

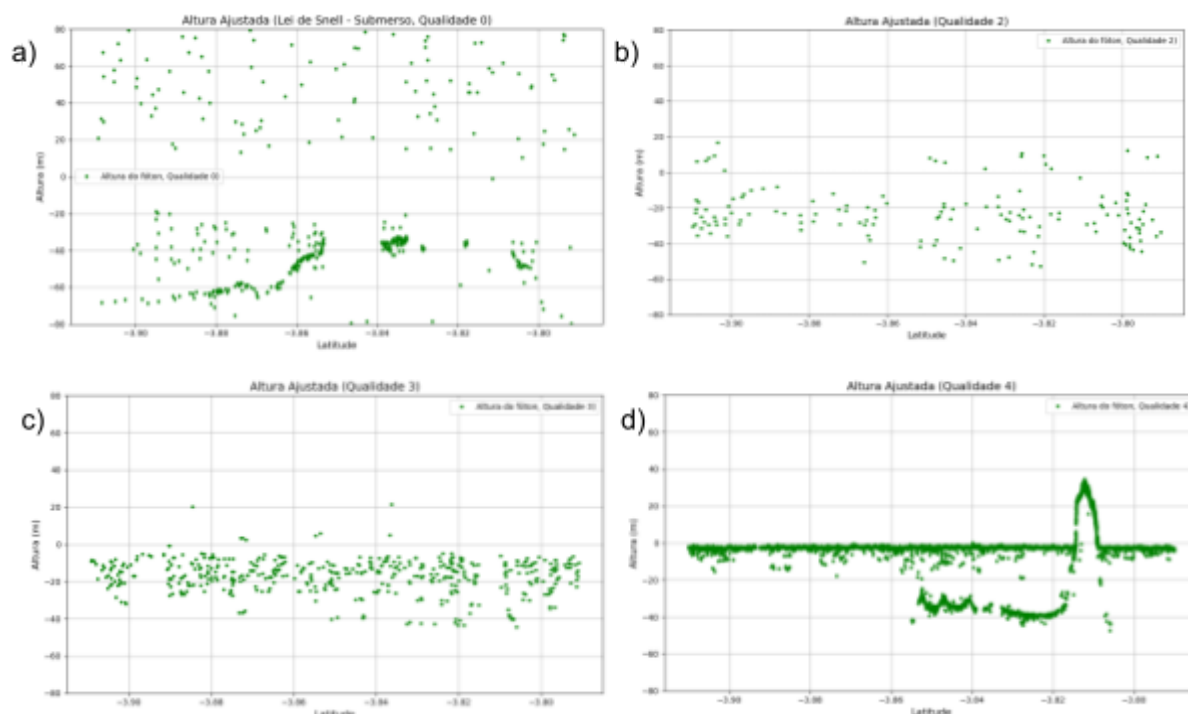
Os fótons brutos do conjunto de dados ATLAS apresentam um alto nível de ruído devido a diversos fatores. Para avaliar a confiabilidade de cada fóton, o conjunto de dados oficial fornece um parâmetro denominado ‘confiança de altitude’, que varia de zero a quatro. Valores mais altos indicam maior probabilidade de que o fóton represente um sinal real da superfície da Terra. Em áreas terrestres, níveis elevados de confiança geralmente correspondem a ecos de superfície e apresentam boa correlação com o relevo real. No entanto, em superfícies aquáticas, altos níveis de confiança podem estar associados a múltiplas reflexões na interface água-ar, o que nem sempre representa a topografia subaquática (Jia et al., 2023). Dessa forma, para minimizar interferências e garantir a representatividade dos dados batimétricos, foram considerados fótons com níveis de confiança 2, 4 e 0 (figuras 15), enquanto fótons de nível 3 (figura 15) foram descartados por apresentarem exclusivamente reverberações. O nível 1 não foi classificado neste subproduto específico do ICESat-2, essa condição do dado amostral não é regra.

Figura 14- Fluxograma de processamento de correções de geolocalização e geofísicas de dados do ICESat-2



Fonte: Elaboração própria (2025)

Figura 15 - Perfil do nível de qualidade dos fótons nível 0 (a), 2 (b) , 3 (c) e 4 (d)



Fonte: Elaboração própria (2025) com dados da NASA (ICESat-2) e da SGB (LiDAR).

Já os fótons de nível 0, apesar da classificação de confiança zero, foram mantidos no estudo devido ao seu retorno em áreas mais profundas do assoalho oceânico, onde a taxa de retorno do sinal é naturalmente reduzida. Esses fótons complementam os dados de níveis 2 e 4, preenchendo lacunas em regiões de baixa reflectância. A decisão de incluir fótons de nível 0 foi validada por comparações com dados de LiDAR aerotransportado, que confirmaram sua contribuição para a precisão dos resultados batimétricos, especialmente em áreas profundas e de difícil detecção.

4.3.2) Correções aplicadas

As correções geofísicas aplicadas aos dados ATL03 do ICESat-2 são essenciais para assegurar que os valores de altura representem com precisão o nível real da superfície oceânica e o assoalho marinho. Essas correções seguem uma ordem lógica, com base na natureza física dos fenômenos envolvidos:

4.3.2.1) Conversão da altura elipsoidal para ortométrica

A correção ortométrica é então aplicada para converter a altura elipsoidal (H_e) em altura geoidal (H_o). Para refletir a altura em relação ao nível médio do mar, a correção do geóide deve ser subtraída dos dados originais de altura do fóton (height). Essa conversão é realizada utilizando o modelo geoidal XGM2019e_2159, de forma que a altura ortométrica é obtida pela relação:

$$H_o = H_e - N$$

onde N representa a ondulação geoidal, isto é, a diferença entre o modelo elipsoidal WGS84 (modelo base do ICESat-2) e o geóide (IBGE, 2023; DGT, s.d.).

4.3.2.2) Correção de maré (Ocean Tide Correction)

Com os dados ajustados para altura ortométrica, aplicam-se três correções fundamentais para garantir a precisão dos resultados. A primeira delas é a correção da maré (*ocean_tide*), necessária devido às variações periódicas do nível do mar causadas pela interação gravitacional entre a Terra, a Lua e o Sol. Essas variações podem alterar significativamente a altura da superfície oceânica no momento da medição. Para compensar esse efeito, a correção da maré deve ser subtraída da altura observada, permitindo que os dados reflitam a superfície do mar em uma condição de maré média, eliminando flutuações temporárias (Maillard, P. (2017) . A correção da maré ($H_{\text{maré}}$) ajusta a altura ortométrica considerando essas variações no nível do mar, conforme a equação:

$$H_{o1} = H_o - \Delta H_{\text{maré}}$$

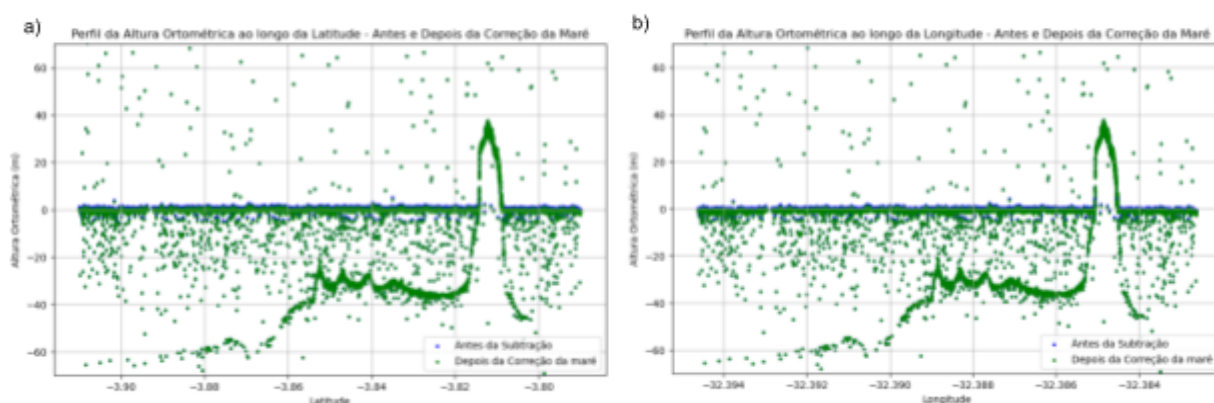
Onde:

- H_o é a altura ortométrica original;
- $\Delta H_{\text{maré}}$ é a variação da maré no instante da medição;
- H_{o1} é a altura corrigida para a maré média

A variação da maré ($\Delta H_{\text{maré}}$) foi determinada a partir dos dados de previsão horária fornecidos pela Marinha do Brasil, do dia 01/01/2019 até o dia 30/05/2025, com resolução horária. No entanto, para ajustar essas previsões ao nível de referência hidrográfico local, foi

necessário aplicar uma correção adicional: foi subtraído o valor de 0,88 m de cada registro (diferença entre o nível médio do mar e o zero hidrográfico), conforme determinado com o auxílio do *software WTides* na avaliação da maré. O resultado da subtração da variação da maré em comparação ao Ho1 está representado graficamente na figura 16.

Figura 16 - a) Perfil da altura ortométrica (Ho1) após (verde) e antes (azul) da correção da variação da maré ao longo da latitude ; b) perfil da altura ortométrica (Ho1) após e antes da correção da variação da maré ao longo da longitude



Fonte: Elaboração própria (2025) com dados da NASA (ICESat-2)

4.3.2.3) Correção atmosférica dinâmica (Dynamic Atmospheric Correction - DAC)

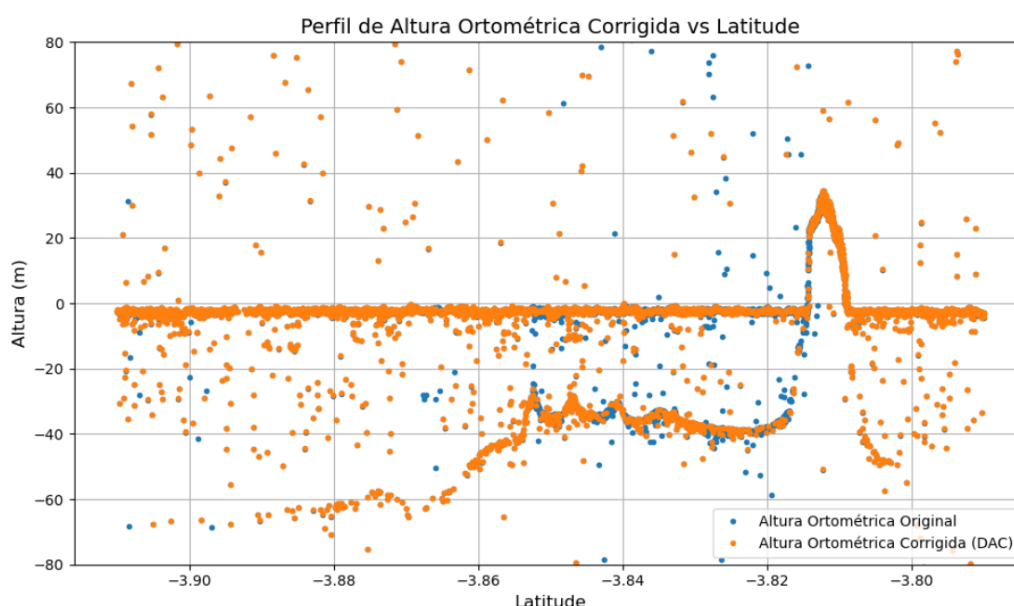
A segunda correção essencial é a Correção Atmosférica Dinâmica (DAC – *Dynamic Atmospheric Correction*), que leva em consideração os efeitos da atmosfera na propagação do sinal do ICESat-2 e no nível da superfície do oceano. Esse ajuste é necessário porque a pressão atmosférica pode provocar pequenas variações na altura da água, resultando em elevações ou depressões temporárias (NASA, 2018). Fatores como a pressão do vento e outros fenômenos meteorológicos influenciam diretamente o nível da superfície do mar, tornando essa correção indispensável para obter medidas mais precisas.

Para compensar esse efeito, a DAC deve ser adicionada aos dados de altura dos fótons, garantindo que os valores ajustados representem melhor a altura real da superfície oceânica. Esse ajuste é feito aplicando a equação:

$$Ho2 = Ho1 - \Delta atm \text{ (figura 14)}$$

onde Δatm representa a variação da altitude devido aos efeitos atmosféricos. Essa correção é especialmente importante em regiões oceânicas sujeitas a mudanças atmosféricas significativas, assegurando que os dados de altura reflitam com maior fidelidade o nível médio do mar. A figura 17 apresenta um perfil da altura ortométrica em relação à altura ortométrica após a correção atmosférica.

Figura 17 - Perfil da altura ortométrica corrigida (Ho2) em laranja e altura ortométrica Ho1 em azul com as correções atmosféricas, ao longo da latitude



Fonte: Elaboração própria (2025) com dados da NASA (ICESat-2)

A correção atmosférica deve ser aplicada ao conjunto completo de dados para evitar distorções nas medições de altura e assegurar a consistência dos resultados. Variações na pressão atmosférica e nos efeitos meteorológicos, como a Correção Atmosférica Dinâmica (DAC), impactam diretamente o nível da superfície do mar e podem introduzir erros sistemáticos caso não sejam uniformemente compensados (Neumann et al, 2018). A aplicação da correção apenas a um subconjunto de dados resultaria em diferenças artificiais entre medições ajustadas e não ajustadas, comprometendo a análise espacial e temporal dos dados batimétricos. Portanto, a correção deve ser realizada de forma abrangente para garantir que todas as medições reflitam a altura real da superfície oceânica com a máxima precisão possível.

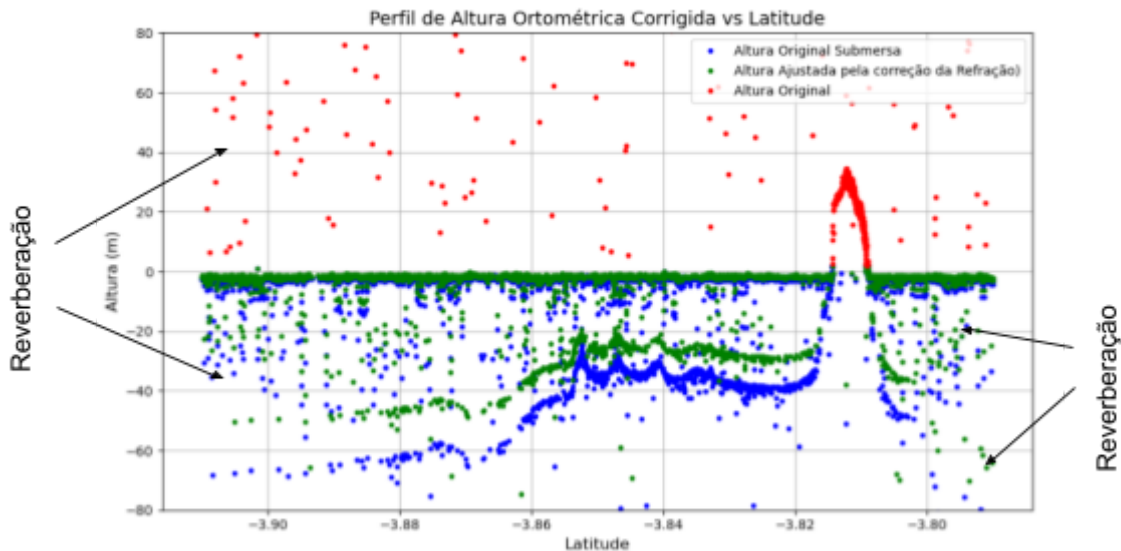
4.3.2.4) Correção de refração (Snell's Law Correction)

A terceira correção é a correção da refração (Lei de Snell), que leva em conta a mudança de direção dos fótons ao atravessarem a interface ar-água. Essa correção segue a equação da lei de snell:

$$n_{ar} * \text{sen}(\theta_1) = n_{\text{água}} * \text{sen}(\theta_2),$$

onde n_{ar} e $n_{\text{água}}$ representam os índices de refração do ar (1.00029) e da água salgada (1.34116), respectivamente, e θ_1 e θ_2 são os ângulos de incidência e refração dos fótons (figura 18). A correção de refração tem um impacto maior em fótons que atravessam camadas de água mais profundas, resultando em uma diferença maior no ajuste conforme a profundidade (Parrish et al, 2019; Neumann et al, 2019). Após as correções, os fótons são classificados em três categorias: fótons refletidos pela superfície terrestre, fótons que atravessam a camada de água e fótons que representam o nível d'água. Essa classificação é essencial para diferenciar retornos que correspondem ao fundo do oceano dos que pertencem a outras superfícies.

Figura 18 - Pontos de reverberação presentes no conjunto de fótons

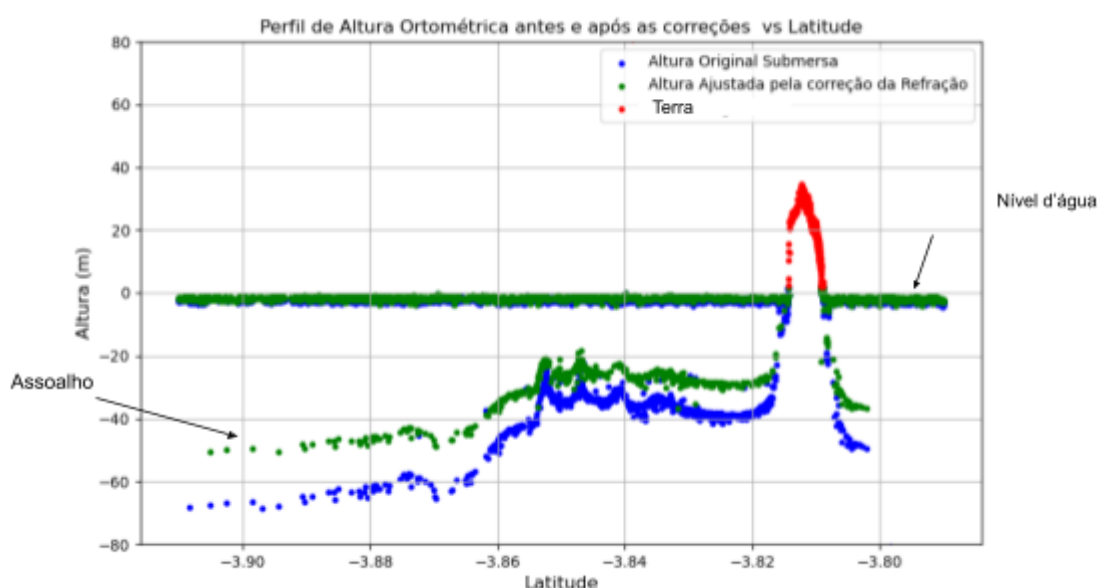


Fonte: Elaboração própria (2025) com dados da NASA (ICESat-2)

4.3.2.4) Filtragem da reverberação

A figura 19 exibe os pontos de reverberação presentes no conjunto de dados, que necessitam de filtragem para garantir a maior precisão nas medições. A figura 19 apresenta o resultado obtido após a remoção dos pontos de reverberação utilizando uma ferramenta semi-automática do ArcGis. A imagem inclui a delimitação das principais superfícies e referências geográficas: a superfície terrestre é indicada em vermelho, a linha d'água no nível 0 é mostrada, o assoalho oceânico está delimitado em verde, e os pontos originais do ICESat-2, antes das correções, são também destacados.

Figura 19 - Resultado da remoção dos pontos de reverberação, com a delimitação da superfície terrestre (em vermelho), nível d'água (nível 0), assoalho oceânico (em verde) e os pontos originais do ICESat-2 antes das correções



Fonte: Elaboração própria (2025) com dados da NASA (ICESat-2)

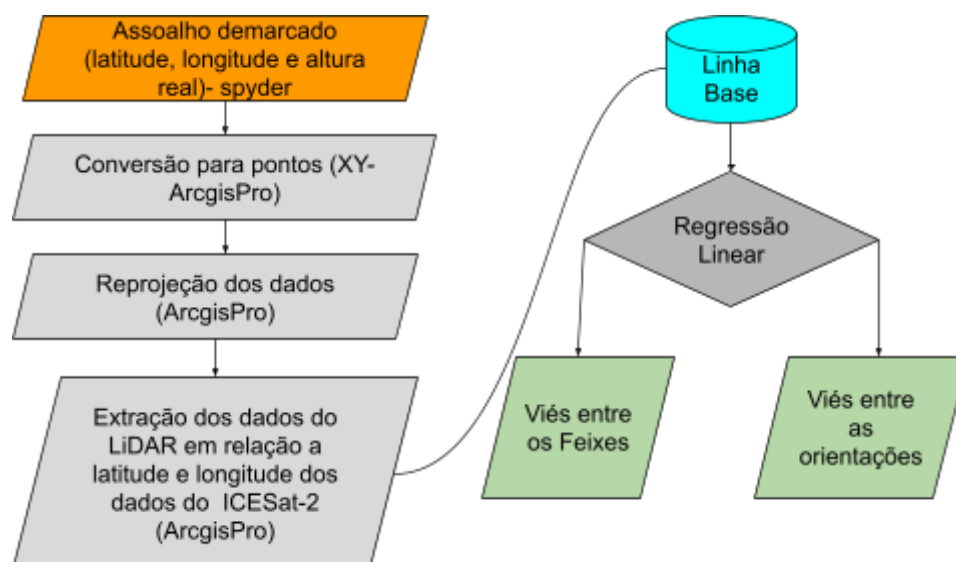
4.3.3) Resultados das correções

As elevações de fótons para o feixe amostral gt1r foram adquiridas em 21 de julho de 2021, às 05:26:42 UTC, após a aplicação das principais correções geofísicas: refração, ajuste do geóide, topografia dinâmica do oceano, marés sólidas da Terra e carga do oceano. Na figura 19, os pontos próximos de zero representam retornos de fótons à superfície; os pontos

vermelhos representam características acima da água, os pontos azuis correspondem a fótons subaquáticos antes da correção da refração; e os pontos verdes indicam as posições dos fótons no fundo do mar após a refração.

Essas correções garantem que os dados de altitude fornecidos pelo ICESat-2 estejam ajustados e padronizados em relação a referências globais, permitindo uma análise precisa da topografia oceânica, essencial para estudos de batimetria e modelagem costeira. Sem essas correções, as medições brutas de altura podem ser afetadas por uma série de fenômenos de interação da luz, como refração, reflexão, absorção, dispersão e difração, o que compromete a precisão dos dados e dificulta sua aplicação em comparações espaciais e temporais. Por fim, com todos os ajustes e classificações aplicados, é realizada a delimitação do fundo oceânico, que consiste na identificação dos fótons correspondentes a batimetria real do assoalho oceânico, possibilitando a extração de informações precisas da região de estudo para a comparação com os dados batimétricos LiDAR. A Figura 20 apresenta o fluxograma das etapas adotadas para a comparação entre os dados do ICESat-2 e os do LiDAR aerotransportado.

Figura 20 - Fluxograma da comparação dos dados do ICESat-2 com o LiDAR



Fonte: Elaboração própria (2025)

A figura 20 apresenta a sequência metodológica adotada para a comparação entre os dados altimétricos do ICESat-2 (produto ATL03) e os dados de LiDAR aerotransportado fornecidos

pelo SGB. Inicialmente, os pontos referentes ao assoalho delimitado foram importados para o ArcGIS Pro, onde foi realizada a conversão das coordenadas geográficas por meio da ferramenta XY Table To Point. Em seguida, utilizou-se o recurso Project para reprojeter os dados do ICESat-2 para o mesmo sistema de referência do raster LiDAR com alturas ortométricas.

Com os dois conjuntos de dados em projeção compatível, foi aplicada a ferramenta *Extract Values to Points*, que permitiu extrair os valores de altitude do raster do LiDAR nas exatas localizações dos pontos ICESat-2. A partir desses dados coincidentes, foi realizada a análise estatística por meio de regressão linear, com o cálculo de métricas como viés (bias), coeficiente de determinação (R^2), raiz do erro médio quadrático (RMS e RMS^2), desvio padrão, variância e erro absoluto médio (MAE).

A análise foi conduzida para diferentes agrupamentos: por feixe individual (gt1r, gt2r, gt3r, gt1l, gt2l e gt3l), por direção orbital (*Forward e Backward*), e posteriormente para o conjunto geral (soma de todos os feixes).

Os sinais dos fótons do fundo do mar foram detectados com sucesso a partir do conjunto de dados brutos ATL03 do ICESat-2. Na área de estudo, todos os seis feixes do ICESat-2 passaram sobre a região em 2021/07/21. O dado amostral serviu como base para a formulação do código de sequência de processamento que foi aplicada em todas as passagens com seus respectivos registros de cada feixe forte e fraco.

Capítulo 5 - Resultados e Discussão

5.1) Classificação e Confiança dos Fótons no ICESat-2

Os fótons brutos detectados pelo sistema ATLAS do ICESat-2 apresentam um alto nível de reverberação e ruído, devido a diversos fatores, como a dispersão atmosférica, a reflexão múltipla em superfícies complexas (como a interface água-ar) e a interferência da luz solar. Para avaliar a confiabilidade de cada fóton, o conjunto de dados oficial do ICESat-2 fornece um parâmetro denominado "confiança de altitude", que varia de 0 a 4. Valores mais altos indicam maior probabilidade de que o fóton represente um sinal real da superfície da Terra. No entanto, em superfícies aquáticas, a interpretação desses níveis de confiança requer uma análise mais cuidadosa.

De acordo com o manual técnico de Neumann et al. (2022), o processamento de dados do ICESat-2 busca discriminar entre fótons de sinal (que representam a superfície real) e fótons de fundo (ruído). O algoritmo de classificação de fótons utiliza métodos de histogramação e ponderação para identificar eventos de sinal com base na densidade relativa de fótons e na relação sinal-ruído (SNR). Os fótons são classificados em cinco categorias de confiança:

- **Nível 4:** Sinal de alta confiança ($\text{SNR} \geq 100$).
- **Nível 3:** Confiança média ($100 > \text{SNR} \geq 40$).
- **Nível 2:** Confiança baixa ($40 > \text{SNR} \geq 3$).
- **Nível 1:** Fótons de fundo provável ($\text{SNR} < 3$).
- **Nível 0:** Fótons com confiança zero, mas que podem conter informações úteis em condições específicas.

5.2) Desafios em ambientes aquáticos

Em áreas terrestres, fótons com níveis de confiança elevados (3 e 4) geralmente correspondem a ecos de superfície e apresentam boa correlação com o relevo real. No entanto, em superfícies aquáticas, fótons com alta confiança podem estar associados a múltiplas reflexões na interface água-ar, o que nem sempre representa a topografia subaquática (Jia et al., 2023). Por exemplo, fótons de nível 3 podem ser resultantes de reverberações, que distorcem a representação do fundo oceânico, devido a isso, esses fótons foram descartados no estudo.

Segundo Jia et al. (2023), para obter com precisão os fótons do fundo marinho, um processo de duas etapas precisa ser empregado. Esse processo envolve a separação de fótons de superfície e subaquáticos, seguida da clusterização de fótons do fundo marinho. Primeiramente, todos os fótons devem ser agrupados em intervalos de elevação fixos, e o número de fótons em cada intervalo deve ser contado. O intervalo com a maior contagem de fótons corresponde à superfície da água, pois essa geralmente contém mais fótons e apresenta mínimas flutuações de elevação. A fronteira inferior desse intervalo serve como linha divisória para distinguir fótons de superfície e subaquáticos.

5.3) Importância dos Fótons de Nível 0

Apesar de serem classificados com nível de confiança zero, esses fótons foram mantidos no processamento por dois motivos principais:

- a) Retorno em águas profundas: Em regiões mais profundas do assoalho oceânico, a taxa de retorno do sinal é significativamente reduzida devido à atenuação do feixe laser na água. Nessas condições, fótons de nível 0 podem ser os únicos registros disponíveis que representam o fundo oceânico. A exclusão desses fótons resultaria em uma subestimação da profundidade em áreas críticas para estudos batimétricos.
- b) Complementaridade com outros Níveis de Confiança: A combinação de fótons de nível 0 com fótons de níveis 1, 2 e 4 permite uma representação mais completa da topografia subaquática. Enquanto os fótons de nível 1, 2 e 4 fornecem dados confiáveis em áreas menos profundas, os fótons de nível 0 preenchem lacunas em regiões onde o sinal é fraco ou disperso.

A decisão de incluir fótons de nível 0 foi validada por meio de comparações com dados de LiDAR aerotransportado, que serviu como referência para a batimetria real. Essa validação demonstrou que, apesar da baixa confiança, os fótons de nível 0 contribuíram para a precisão geral dos resultados, especialmente em áreas onde outros níveis de confiança não foram detectados.

5.4) Avaliação dos resultados

5.4.1) Visão geral dos dados

A comparação com dados de LiDAR aerotransportado, fornecidos por campanhas da Diretoria de Serviço Geográfico (DSG), é fundamental para avaliar a acurácia dos dados altimétricos do ICESat-2. Por apresentarem elevada densidade de pontos e alta precisão vertical, os dados LiDAR servem como referência confiável na validação dos produtos derivados do ICESat-2, especialmente em ambientes costeiros complexos como o arquipélago de Fernando de Noronha. Essa abordagem permite quantificar desvios sistemáticos, avaliar o comportamento dos feixes em diferentes condições ambientais e consolidar a aplicabilidade da altimetria laser orbital em estudos batimétricos.

5.4.1.1 Estratégia de avaliação dos dados

A análise dos dados altimétricos do ICESat-2 foi realizada em etapas sequenciais para uma avaliação detalhada da qualidade das medições. Primeiramente, foi avaliado o conjunto total dos dados de cada feixe, sem distinção entre as direções *forward* e *backward*, para obter uma visão geral do desempenho global dos feixes. Em seguida, procedeu-se à análise separada dos conjuntos de dados correspondentes às direções *forward* e *backward*, visando identificar possíveis variações no desempenho decorrentes da geometria da passagem do satélite.

1. Avaliação conjunta dos feixes:

Ao considerar todos os feixes de forma agregada, sem distinção entre os modos “forte” e “fraco” nem entre as direções “forward” e “backward”, foi possível obter uma visão geral do comportamento global do sensor.

2. Avaliação separada por direção (*forward* vs *backward*):

Ao segmentar os dados segundo a direção orbital, observou-se que os feixes backward, especialmente os fortes, tendem a apresentar melhor aderência aos dados LiDAR de referência, com menores vieses e dispersão. Essa variação é atribuída a diferenças na geometria de aquisição e condições ambientais ao longo das passagens, reforçando a importância de considerar a direção do satélite para análise e seleção dos dados em estudos locais.

5.4.2) Critérios de avaliação

A avaliação da qualidade dos dados altimétricos obtidos pelo ICESat-2 foi realizada por meio da comparação com dados de referência adquiridos por LiDAR aerotransportado. Para

mensurar o desempenho dos feixes do satélite, foram aplicados critérios estatísticos que avaliam tanto a precisão quanto a confiabilidade das medidas.

As estatísticas utilizadas proporcionam uma avaliação abrangente da performance dos feixes do ICESat-2, possibilitando identificar pontos fortes e limitações do sensor em aplicações batimétricas costeiras, assegurando assim a confiabilidade dos resultados apresentados na dissertação. O resumo dos critérios avaliativos estão representados na tabela 5.

Tabela 5 – Estatísticas para avaliação da qualidade dos feixes do ICESat-2 com base na comparação com dados de referência (LiDAR aerotransportado).

Métrica	Significado	Valor ideal	Fórmulas	Observação adicional
N (Número de fótons de retorno)	Quantidade de dados utilizados	Maior possível	_____	Importante para validação estatística
erro bruto	Diferença entre valor estimado e valor de referência	_____	$ei = \hat{y}_i - y_i$ • y_i: valor observado (dado de referência, batimetria LiDAR); • $\hat{y}_i$: valor estimado (ICESat-2);	Erro individual por ponto.
erro absoluto	módulo do erro bruto	_____	$ ei = \hat{y}_i - y_i $	_____
Bias (viés)	Diferença média entre ICESat-2 e dado de referência	Mais próximo de 0	$Bias = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)$	Indica viés sistemático • Bias negativo → subestimação (o valor estimado está menor que o valor real) • Bias positivo → superestimação (o valor estimado está maior que o valor real)

Métrica	Significado	Valor ideal	Fórmulas	Observação adicional
RMSE	Erro quadrático médio (precisão geral)	O menor possível	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2}$	Desvio médio das medidas, sensível a grandes erros (outliers) Para avaliar é preciso fazer RMSE/s, se o resultado for: ≈ 1 Erros normalmente distribuídos e moderados > 1 Outliers presentes (sensibilidade aumentada) < 1 Variabilidade alta, mas poucos erros extremos
Desvio padrão amostral (s)	Dispersão das medidas	O menor possível	$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (e_i - \bar{e})^2}$, onde $e_i = \hat{y}_i - y_i$; $\bar{e}$: média do e_i	Mede dispersão, importante para avaliar precisão das medidas
Slope	Inclinação da reta de regressão	Próximo a 1	$y = ax + b$ $a \rightarrow slope$	a > 1 , superestimação ; a < 1 subestimação ; a = 1 , concordância
Intercepto	Valor de cruzamento da reta com o eixo Y	Próximo a 0	$y = ax + b$ $b \rightarrow intercepto$	Indica erro sistemático

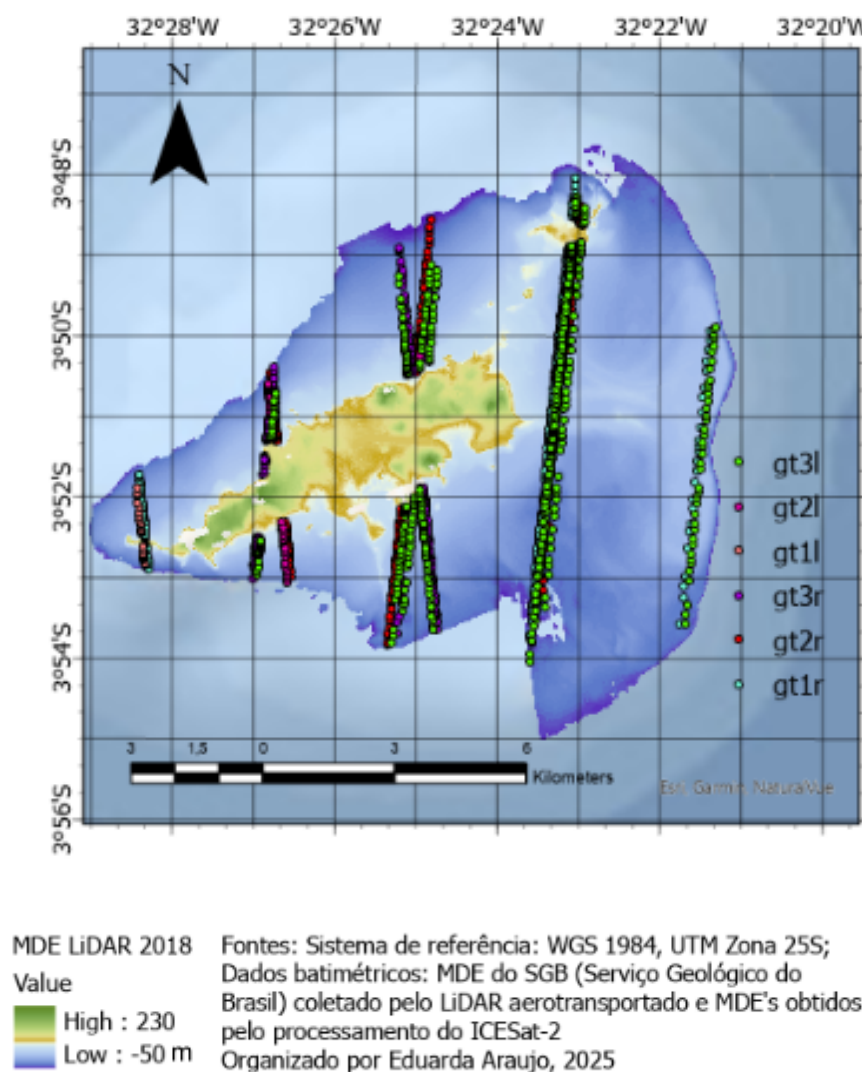
Métrica	Significado	Valor ideal	Fórmulas	Observação adicional
R ²	Coeficiente de determinação	Perto de 1	$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}$ • $\bar{y}$: média dos valores observados; • N: número de pontos.	Avalia o grau de proporcionalidade entre a medida LiDAR e ICEat-2 ou porcentagem de variância
MAE (Erro Absoluto Médio)	Média dos erros absolutos	O menor possível	$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i - \hat{y}_i $ y_i: valor observado (por exemplo, batimetria de referência); $\hat{y}_i$: valor estimado (por exemplo, valor o ICESat-2); N: número total de observações; $y_i - \hat{y}_i$: erro absoluto entre observado e estimado.	Menos sensível a outliers que o RMSE

Fonte: Autoria própria (2025)

5.4.3) Desempenho por feixe: comparação ICESat-2 vs. LiDAR

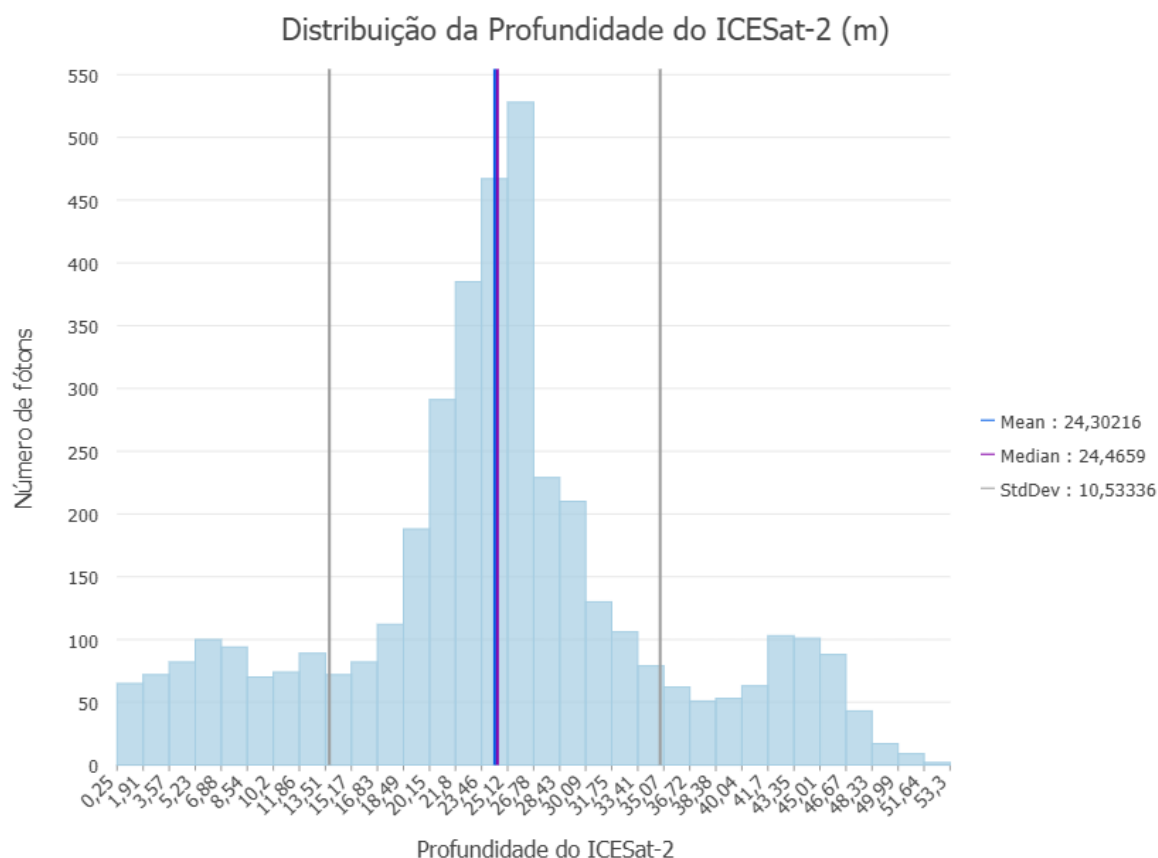
A figura 21 refere-se ao mapa do MDE do LiDAR 2011 obtido pelo SGB com sobrepostas as medidas do ATLAS, considerando todos os feixes e todos os 42 dias de retorno com 103 passagens válidas no período analisado.

Figura 21- Mapa de localização dos conjunto dos seis feixes do ICESat-2



A figura 22 mostra o histograma da distribuição da profundidade mínima e máxima de todos os fótons registrados nesse estudo, a profundidade mínima registrada foi de 0,25 m e a profundidade máxima foi de 53,3 m.

Figura 22 - Histograma da distribuição de profundidade de todos os fótons registrados



Fonte: Elaboração própria (2025) com dados da NASA (ICESat-2)

A média de profundidade de 24,30 m representa o valor central em torno do qual os dados estão, em geral, distribuídos. A mediana, de 24,47 m, é o valor que separa a metade mais rasa da metade mais profunda da amostra, indicando que a distribuição de profundidades é aproximadamente simétrica, já que a média e a mediana são muito próximas. O desvio padrão de 10,53 m revela uma variação significativa em torno da média, o que é esperado em ambientes costeiros com relevo submarino irregular, como o entorno do Arquipélago de Fernando de Noronha.

Para avaliar o desempenho de cada feixe do ICESat-2 na detecção do fundo marinho, foram analisadas as profundidades mínimas e máximas registradas por feixe ao longo do período de estudo. Essa análise permite identificar quais feixes apresentaram maior penetração na coluna d'água e quais foram mais limitados por fatores como turbidez, ângulo de incidência ou intensidade do feixe.

A tabela 6 apresenta as profundidades máximas detectadas por cada feixe.

Tabela 6 –Tabela com as profundidades registradas por feixe do ICESat-2 em metros.

Feixes	Profundidade Máxima (m)	
forte	gt1r	53,3
	gt2r	46,67
	gt3r	49,99
fraco	gt1l	50,97
	gt2l	47,04
	gt3l	51,29

Fonte: Elaboração própria (2025) com dados da NASA (ICESat-2)

Observa-se que o feixe gt1r foi o que atingiu a maior profundidade, registrando 53,3 m.

5.4.3.1) Avaliação dos conjuntos dos feixes fortes

A figura 24 refere-se à análise da regressão linear de todas as passagens e as respectivas medidas de cada feixe vs. as correspondentes medidas do LiDAR de cada conjunto de fótons de retorno dos feixes fortes e fracos. Para avaliar a acurácia do ATLAS em relação ao LiDAR aerotransportado, foram calculadas estatísticas que caracterizam a qualidade e a dispersão dos erros altimétricos:

- O erro bruto, definido como a diferença direta entre a profundidade registrada pelo ICESat-2 e o valor de referência obtido pelo LiDAR, foi utilizado para estimar o viés médio (bias). Este erro para cada ponto é dado pela fórmula:

$$ei = \widehat{yi} - yi,$$

onde,

- ei representa o erro individual da i-ésima observação
- $\widehat{yi}$ é a medida do ICESat-2
- yi é a medida de referência (LiDAR)

A medida desse erro bruto fornece o viés (bias):

$$Bias = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ei = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\widehat{yi} - yi)$$

- O erro absoluto, definido como o valor absoluto do erro bruto:

$$|ei| = |\widehat{yi} - yi|,$$

- A variância (s^2) dos erros foi calculada a partir da fórmula:

$$s^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (ei - \bar{e})^2$$

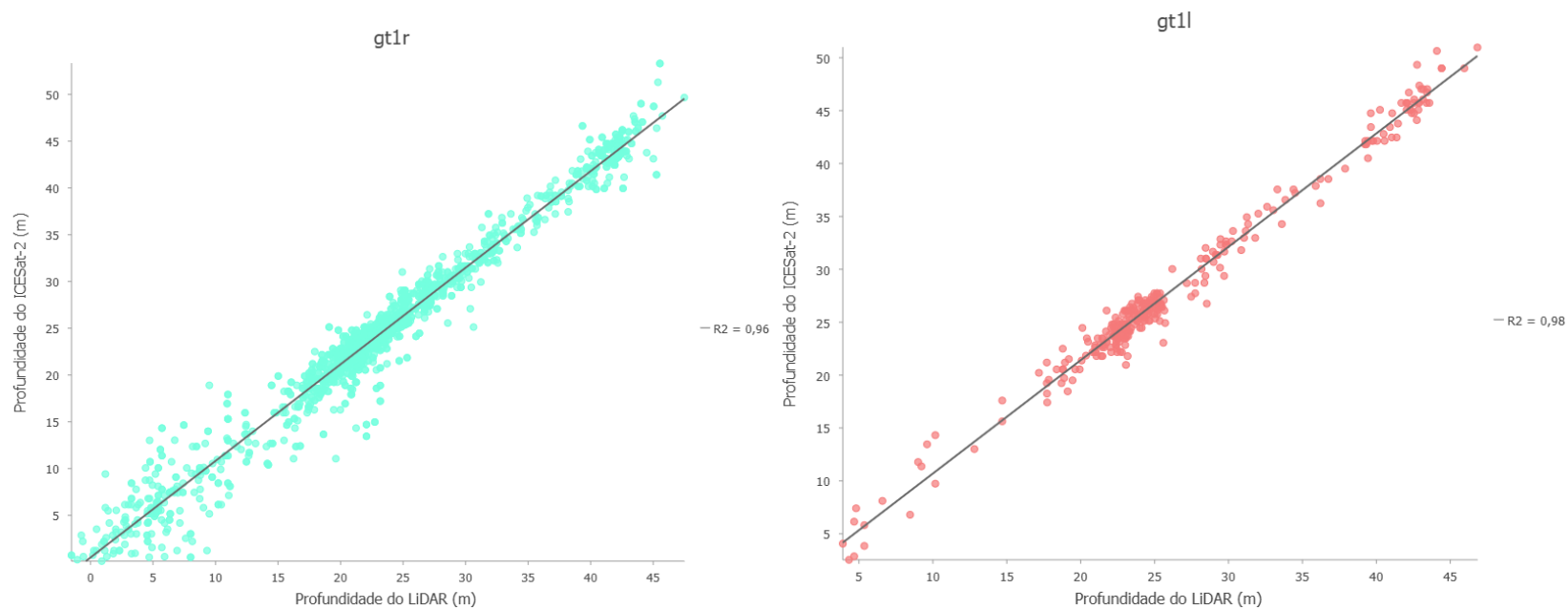
onde ei representa os erros individuais e $\bar{e}$ o viés médio.

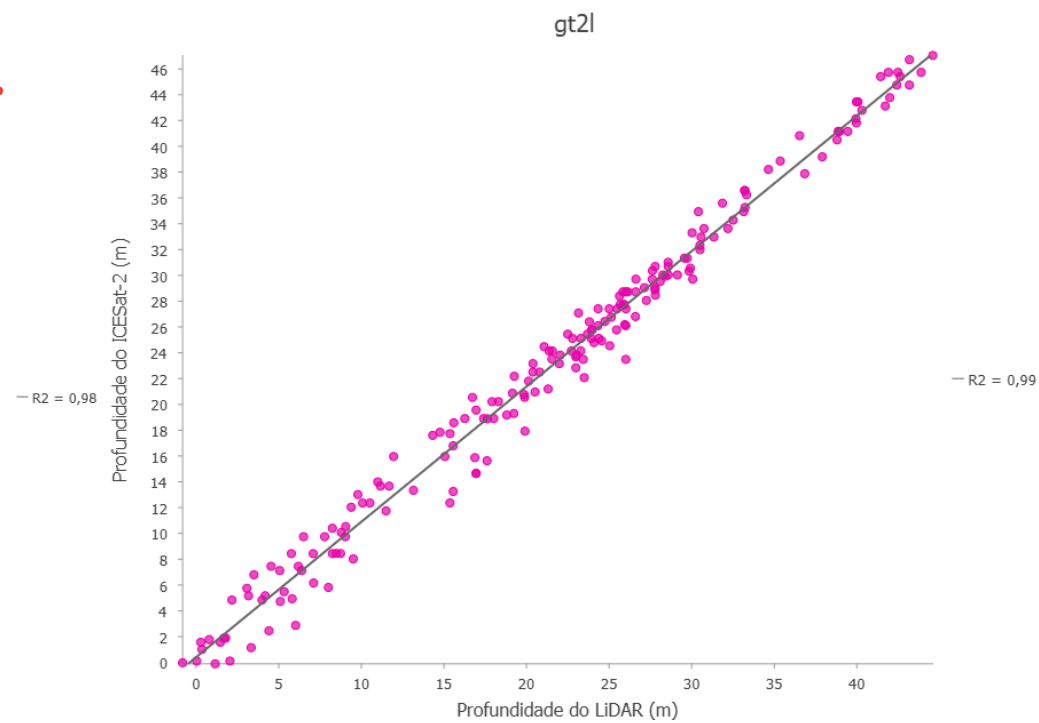
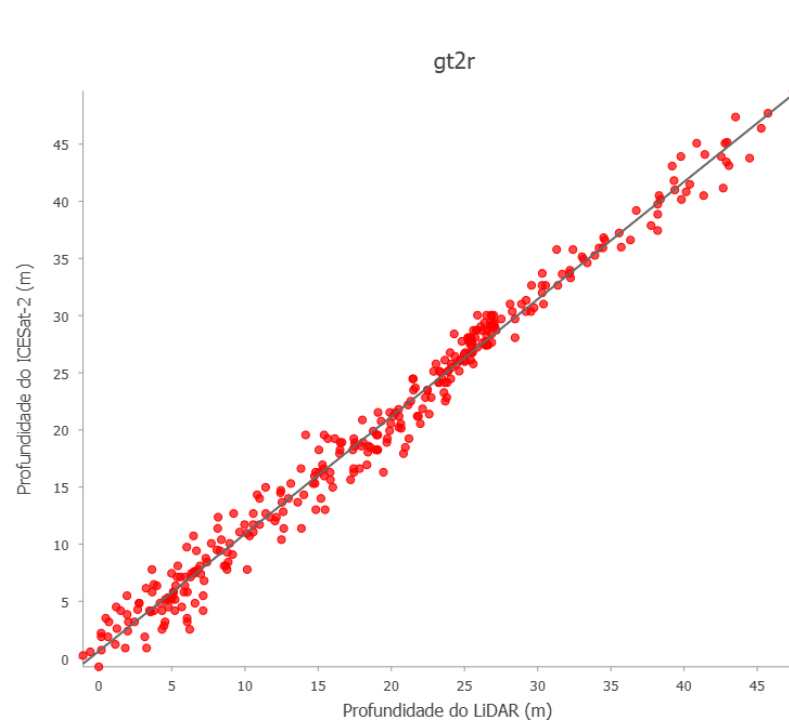
- Para quantificar a relação entre os dados de altura do LiDAR (variável independente, eixo X) e do ICESat-2 (variável dependente, eixo Y), foi realizada uma regressão linear simples:

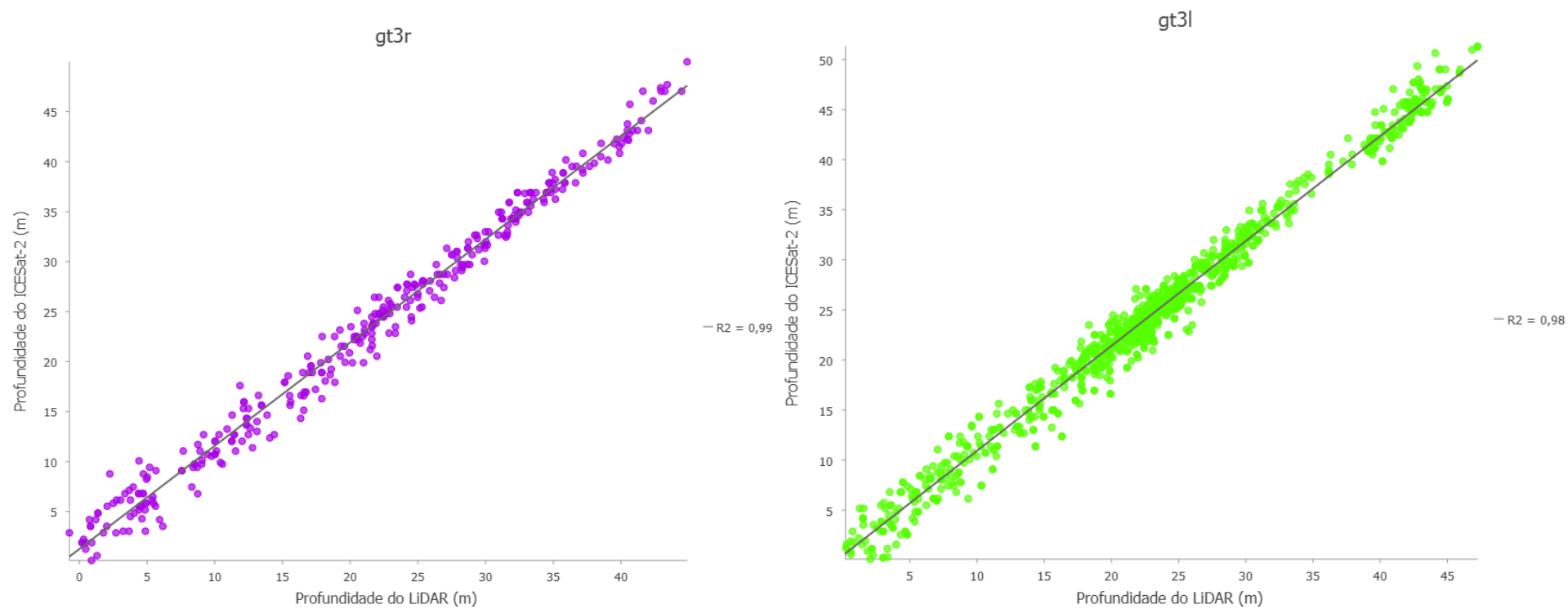
$$y = b0 + b1x$$

onde $b0$ é o intercepto e $b1$ é o coeficiente angular (*slope*).

Figura 24 - Gráficos das regressões lineares do conjunto dos fótons de retorno de cada feixes fortes e fracos







Fonte: Elaboração própria (2025) com dados da NASA (ICESat-2) e da SGB (LiDAR).

- **Feixe gt1r**

O conjunto analisado é composto por 1.830 registros e o cálculo das estatísticas forneceu os seguintes valores:

- Viés positivo de **1,25 m**, indicando que o ICESat-2 tende a superestimar sistematicamente as profundidades em relação ao modelo de referência.
- Erro Médio Absoluto (MAE) de 1,77 m, refletindo a magnitude média das discrepâncias altimétricas, independentemente do sinal do erro.
- A Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE), derivada do quadrado dos erros, foi de aproximadamente 2,24 m.
- A variância foi estimada em aproximadamente **3,45 m²**, que corresponde a um desvio padrão (*s*) de **1,86 m**.
- Regressão linear simples, cuja equação obtida foi:

$$y = 0,48 + 1,03 x$$

onde 0,48 m é o intercepto e 1,03 é o coeficiente angular (*slope*).

- Coeficiente de determinação $R^2=0,96$ indica forte dependência linear entre os datasets e boa aderência entre os dados obtidos por sensoriamento remoto orbital e aerotransportado. Apesar do viés positivo médio de 1,25 m indicar superestimação sistemática, o coeficiente angular ligeiramente superior a 1 sugere que o ICESat-2 tende a superestimar as profundidades em regiões mais profundas, indicando uma variação não linear entre os dados.

Em síntese, os indicadores estatísticos demonstram que o feixe gt1r do ICESat-2 apresenta desempenho consistente na representação batimétrica em relação ao LiDAR aerotransportado, com erro sistemático negativo, forte correlação linear e dispersão controlada dos erros.

- **Feixe gt2r**

Para o feixe gt2r do ICESat-2, foi realizada uma avaliação da acurácia altimétrica em relação ao modelo de referência LiDAR aerotransportado, com base em um total de 335 registros. Três métricas principais foram utilizadas para quantificar os erros altimétricos: o viés médio

(bias), o erro absoluto médio (MAE) e a raiz do erro quadrático médio (RMSE), além da aplicação de regressão linear simples.

O viés altimétrico (bias) estimado foi de $-1,13$ m, confirmando a tendência do ICESat-2 em superestimar levemente as profundidades quando comparado ao modelo LiDAR aerotransportado. O Erro Médio Absoluto (MAE) foi de $1,60$ m, representando discrepâncias altimétricas moderadas, porém com padrão de erro relativamente estável.

O RMSE foi calculado em $1,91$ m, com desvio padrão de $1,53$ m, indicando menor dispersão dos dados em relação ao feixe gt1r. Esses valores sugerem um comportamento ligeiramente mais estável dos dados do feixe gt2r, apesar da menor quantidade de pontos amostrados.

A relação linear entre os dados altimétricos do LiDAR (eixo X) e do ICESat-2 (eixo Y) foi investigada por meio de regressão linear simples, resultando na seguinte equação:

$$y = 0,62 + 1,023 x.$$

O coeficiente angular próximo de 1 ($1,023$) e o intercepto de $0,62$ m indicam excelente aderência entre os dados orbitais e aerotransportados, com um leve deslocamento vertical positivo. O coeficiente de determinação $R^2=0,98$ reforça a alta correlação linear entre os conjuntos, evidenciando a alta qualidade dos dados do feixe gt2r.

- **Feixe gt3r**

Para o feixe gt3r — composto por 341 registros — do ICESat-2, a avaliação da acurácia batimétrica foi conduzida por meio da comparação direta com o modelo de profundidade derivado do LiDAR aerotransportado. Os indicadores estatísticos considerados incluem o viés médio (bias), o Erro Médio Absoluto (MAE), o Erro Quadrático Médio (RMSE), o desvio padrão dos erros e a regressão linear simples entre os dados orbitais e o modelo de referência.

O viés médio registrado para este feixe foi de $-1,95$ m, indicando uma superestimação das profundidades por parte do ICESat-2 em relação ao LiDAR. Esse valor aponta para a presença de um erro sistemático relevante, possivelmente relacionado à geometria do feixe, à interação do pulso laser com o fundo marinho ou à cobertura superficial no momento da aquisição.

O MAE foi de 2,12 m, sugerindo discrepâncias médias consideráveis nas profundidades. O RMSE, de 2,36 m, reflete uma variabilidade moderada dos erros, com discrepâncias pontuais significativas ao longo do perfil batimétrico. O desvio padrão foi de 1,48 m, com variância de aproximadamente 2,19 m², indicando uma dispersão relevante dos erros em torno do viés, possivelmente associada a desníveis abruptos, vegetação ou variações na reflectância do fundo marinho.

A regressão linear simples entre os dados de profundidade do LiDAR (variável X) e os dados do ICESat-2 (variável Y) resultou na equação:

$$y = 1,25 + 1,033 x$$

com coeficiente de determinação $R^2=0,99$. Esse valor indica uma forte correlação linear entre os dois conjuntos de dados, reforçando a confiabilidade do sensor orbital. A inclinação superior à unidade (1,033) sugere que o ICESat-2 tende a acentuar as variações altimétricas em relação ao modelo de referência, enquanto o intercepto positivo (1,25 m) aponta para um deslocamento vertical sistemático das medidas orbitais.

5.4.3.2) Análise comparativa dos feixes gt1r, gt2r e gt3r

A análise comparativa entre os feixes gt1r, gt2r e gt3r do ICESat-2 revelou diferenças relevantes quanto à acurácia e precisão batimétrica, com base em indicadores estatísticos calculados em relação ao modelo de referência LiDAR aerotransportado. Os principais parâmetros analisados incluíram o viés (bias), erro absoluto médio (MAE), raiz do erro quadrático médio (RMSE), desvio padrão, e os coeficientes da regressão linear simples (inclinação, intercepto e R^2).

O feixe gt2r apresentou o melhor desempenho geral entre os três, com viés de -1,13 m, MAE de 1,60 m, RMSE de 1,91 m e desvio padrão de 1,53 m. Obteve também uma alta correlação com os dados de referência ($R^2=0,98$), inclinação da regressão de 1,023 e intercepto de 0,62 m, indicando baixa dispersão e boa aderência ao modelo batimétrico. Esses resultados sugerem estabilidade e confiabilidade para aplicações que exigem alta precisão em profundidade.

O feixe gt1r teve desempenho intermediário, com um número expressivo de registros ($N = 1830$), viés de -1,25 m, MAE de 1,77 m e RMSE de 2,24 m. O desvio padrão foi de 1,86 m.

A inclinação da regressão foi de 0,48 — significativamente inferior a 1 — e o intercepto de 1,03 m. Apesar disso, o R^2 elevado (0,96) sugere boa correlação, mas com tendência a uma estimativa mais pronunciada das profundidades em relação ao modelo de referência. A inclinação baixa pode indicar comportamento não linear ou variações sistemáticas no desempenho batimétrico ao longo da faixa de profundidade.

O feixe gt3r apresentou o maior viés positivo (1,95 m), o maior MAE (2,12 m) e o maior RMSE (2,36 m), indicando uma superestimação sistemática das profundidades. Curiosamente, foi o que obteve o menor desvio padrão (1,48 m), sugerindo certa consistência interna nos erros. A inclinação da regressão foi a maior entre os três (1,33), com intercepto de 1,25 m, e o $R^2=0,99$ indica forte correlação linear com o modelo LiDAR, apesar do desvio sistemático.

Em resumo, o feixe gt2r demonstrou maior estabilidade e precisão, sendo o mais recomendado para aplicações que requerem elevada fidelidade batimétrica, como modelagem de profundidade. Os feixes gt1r e gt3r, embora apresentem alta correlação com o modelo de referência, exigem maior cautela devido ao viés negativo mais acentuado e à variabilidade na inclinação das regressões. Recomenda-se aplicar ajustes sistemáticos ou filtros adequados ao utilizar esses feixes em análises quantitativas.

5.4.3.3) Avaliação dos conjuntos dos feixes fracos

- **Feixe gt1l**

O viés médio observado para o feixe gt1l – 321 registros – foi de 1,85 m, indicando uma superestimação consistente das profundidades obtidas pelo ICESat-2 em relação ao modelo LiDAR de referência. Esse viés negativo sugere a presença de um erro sistemático, possivelmente relacionado à geometria do feixe ou às características específicas do terreno submerso na área estudada.

O Erro Médio Absoluto (MAE) foi de 1,96 m, indicando a magnitude média dos desvios batimétricos sem considerar o sinal. A raiz do erro quadrático médio (RMSE) foi de 2,25 m, o que reforça a existência de erros individuais significativos, embora moderados, no conjunto de dados.

O desvio padrão dos erros foi relativamente baixo, de 1,29 m, apontando para uma dispersão menor dos valores em torno da média, ou seja, o feixe apresenta maior consistência interna nas medições em comparação com outros feixes analisados.

A regressão linear simples entre as profundidades medidas pelo LiDAR (variável independente) e pelo ICESat-2 (variável dependente) resultou na equação:

$$y = -0,12 + 1,07x,$$

com coeficiente de determinação $R^2 = 0,98$. A inclinação ligeiramente superior a 1 indica uma leve superestimação das variações batimétricas pelo ICESat-2, enquanto o intercepto negativo próximo de zero sugere um pequeno deslocamento vertical constante.

Em resumo, o feixe gt11 demonstrou boa correlação e consistência com o modelo LiDAR, apesar do viés negativo expressivo. A dispersão moderada dos erros indica que o feixe pode ser confiável para aplicações batimétricas, desde que considerados os ajustes necessários para compensar o viés sistemático, especialmente em áreas com relevo subaquático complexo ou condições ambientais que influenciam a medição.

- **Feixe gt21**

O viés médio observado para o feixe gt21 – 190 registros – foi de 1,46 m, indicando uma superestimação sistemática das profundidades medidas pelo ICESat-2 em relação ao modelo LiDAR de referência. Esse viés negativo revela um erro sistemático relevante, potencialmente associado à geometria do feixe, à visada oblíqua ou às condições locais do relevo submerso.

O Erro Médio Absoluto (MAE) foi de 1,84 m, refletindo a média dos desvios batimétricos em módulo, independentemente da direção do erro. Já o erro quadrático médio (RMSE) foi de 2,12 m, o que confirma a presença de erros pontuais mais expressivos no conjunto de dados.

O desvio padrão dos erros foi de 1,53 m, indicando uma dispersão moderada em torno da média. A variância associada, que é o quadrado desse valor, é de aproximadamente 2,34 m², evidenciando uma certa variabilidade batimétrica local, ainda que controlada.

A regressão linear simples entre os dados de profundidade LiDAR (eixo X) e ICESat-2 (eixo Y) resultou na equação:

$$y = 0,41 + 1,049x$$

com coeficiente de determinação $R^2=0,99$. O valor elevado de R^2 demonstra uma excelente correlação entre os dados orbitais e os dados de referência LiDAR. A inclinação acentuada (1,049) da reta sugere que o ICESat-2 tende a amplificar as variações batimétricas em relação ao modelo LiDAR, ou seja, as diferenças de profundidade medidas pelo satélite são ligeiramente exageradas. O intercepto positivo de 0,41 m, por outro lado, indica um pequeno deslocamento vertical constante, mas que é relativamente pequeno.

Em síntese, o desempenho do feixe gt2l é bastante satisfatório em termos de correlação e aderência aos dados de referência. Contudo, a presença de viés negativo e uma inclinação elevada na regressão sugerem que esse feixe pode superestimar os contrastes batimétricos, o que deve ser considerado em análises de alta precisão, especialmente em áreas com relevo subaquático acentuado ou vegetação heterogênea.

- **Feixe gt3l**

O viés médio observado para o feixe gt3l foi de 1,65 m, indicando uma superestimação sistemática das profundidades obtidas pelo ICESat-2 em relação ao modelo LiDAR. Esse viés negativo evidencia a presença de um erro sistemático recorrente, possivelmente relacionado à geometria do feixe fraco, à menor razão sinal-ruído ou às características locais da superfície.

O Erro Médio Absoluto (MAE) foi de 1,82 m, refletindo a magnitude média dos erros altimétricos sem considerar o sinal (positivo ou negativo). Já o Erro Quadrático Médio (RMSE) foi de 2,26 m, indicando que há resíduos relevantes, ainda que a dispersão esteja dentro de um intervalo esperado para dados orbitais.

O desvio padrão dos erros foi de 1,64 m, sugerindo uma dispersão moderada dos dados em torno da média. A variância, obtida pelo quadrado do desvio padrão, foi de aproximadamente 2,69 m², indicando que, além do viés, há variação altimétrica local que afeta a precisão do feixe.

A regressão linear simples entre as altitudes obtidas pelo LiDAR (eixo X) e as medidas pelo ICESat-2 (eixo Y) resultou na equação:

$$y = 0,45 + 1,047x$$

com $R^2 = 0,98$, indicando forte correlação entre os dados. A inclinação levemente superior a 1 (1,047) sugere uma superestimação sutil das variações altimétricas, enquanto o intercepto de 0,45 m representa um pequeno deslocamento vertical constante, embora relativamente próximo de zero.

Em resumo, os resultados para o feixe gt3l demonstram forte consistência com o modelo LiDAR, com alta correlação e erros dentro de um intervalo aceitável para sensores orbitais. No entanto, a presença de um viés negativo e a leve tendência de superestimativa das variações altimétricas devem ser considerados em estudos que demandam alta acurácia altimétrica, sobretudo em terrenos complexos ou cobertos por vegetação densa.

5.4.3.3) Análise Comparativa dos Feixes gt1l, gt2l e gt3l

Os feixes gt1l, gt2l e gt3l correspondem aos feixes fracos da missão ICESat-2, caracterizados por menor energia em comparação aos feixes fortes, o que os torna mais suscetíveis à perdas de sinal em superfícies com baixa reflectância, cobertura vegetal esparsa ou condições atmosféricas adversas. Em contrapartida, sua alta densidade espacial pode favorecer a análise em ambientes costeiros e insulares. A Tabela 3 apresenta os principais parâmetros estatísticos da regressão linear entre os dados altimétricos do ICESat-2 (produto ATL03) e os dados de referência LiDAR aerotransportado para cada um desses feixes.

De modo geral, os três feixes apresentaram viés positivo, evidenciando uma tendência sistemática de superestimação das altitudes em relação ao modelo de referência. O feixe gt1l apresentou o maior viés (-1,85 m), seguido de gt3l (-1,65 m) e gt2l (-1,46 m). Essa tendência pode estar relacionada à menor energia dos feixes fracos e à consequente redução da razão sinal-ruído, que afeta a detecção de fótons de retorno em regiões com menor refletância.

O Erro Médio Absoluto (MAE) variou pouco entre os feixes, oscilando entre 1,82 m (gt3l) e 1,96 m (gt1l), o que indica consistência nas magnitudes médias dos erros altimétricos. Já o Erro Quadrático Médio (RMSE) apresentou variações discretas: gt1l = 2,25 m, gt2l = 2,12 m

e $gt3l = 2,26$ m, refletindo a presença de erros pontuais mais expressivos, embora dentro de um intervalo aceitável para sensores orbitais.

Em termos de dispersão dos erros, os valores de desvio padrão indicaram maior variabilidade para o $gt3l$ (1,64 m) e $gt2l$ (1,53 m), enquanto o $gt1l$ apresentou a menor dispersão (1,29 m), sugerindo um comportamento mais estável na acurácia altimétrica local. Essas variações podem ser explicadas por fatores como o ângulo de incidência do feixe, características do terreno ou densidade de retornos.

A análise de regressão linear mostrou forte correlação entre os dados orbitais e o modelo LiDAR para todos os feixes, com coeficientes de determinação (R^2) elevados: $gt1l = 0,98$, $gt2l = 0,99$ e $gt3l = 0,98$. A variação dos coeficientes angulares (slope) indicando uma tendência de superestimação das variações altimétricas. Essa inclinação superior a 1 sugere que o ICESat-2 acentua pequenas variações topográficas em relação ao modelo aerotransportado.

Os valores de intercepto foram relativamente baixos, variando de $-0,12$ m ($gt1l$) a $0,45$ m ($gt3l$), o que aponta para deslocamentos verticais sistemáticos pequenos, porém relevantes em aplicações que exigem alta precisão, como modelagem hidrodinâmica ou monitoramento costeiro.

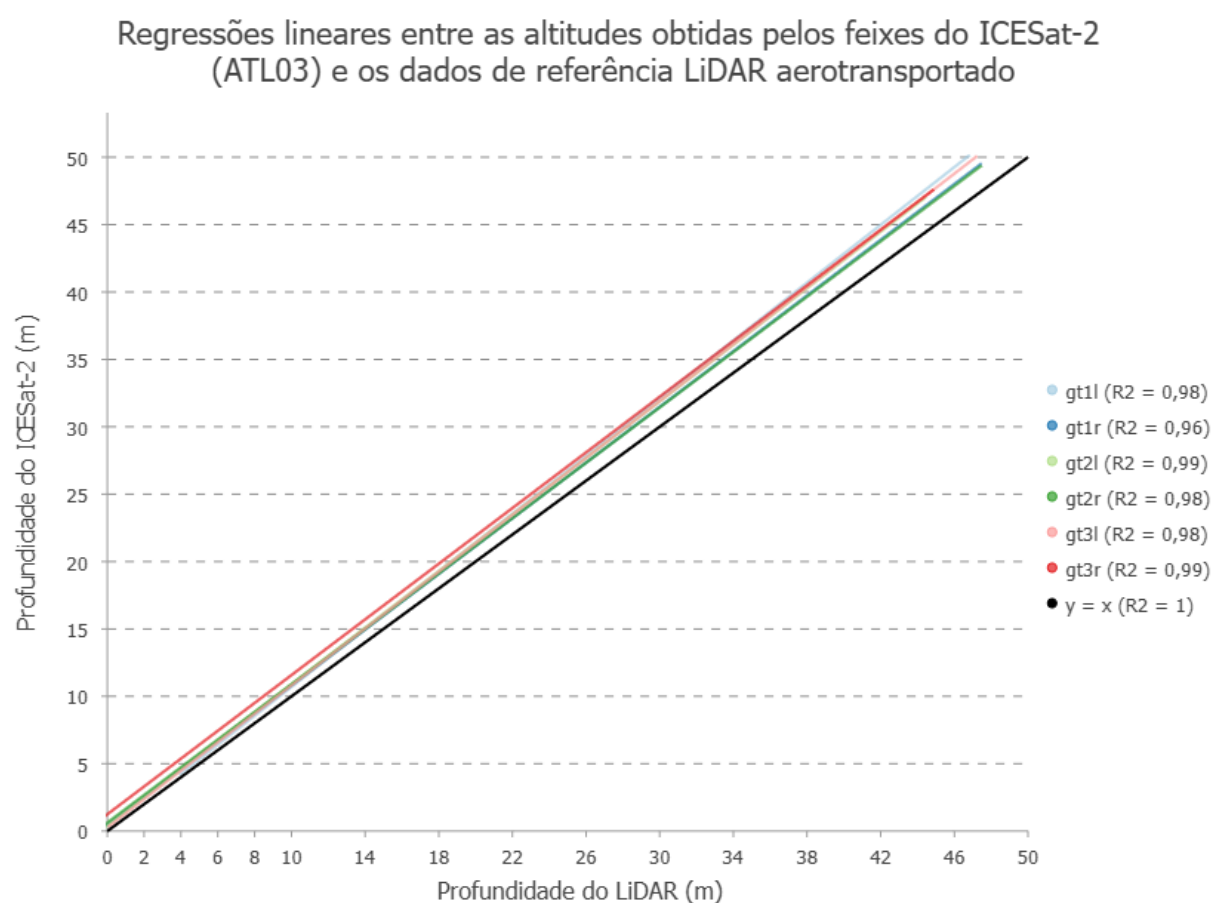
Em síntese, os feixes fracos do ICESat-2 demonstraram desempenho altimétrico consistente, com alta correlação com os dados LiDAR e níveis de erro aceitáveis. As diferenças observadas entre os feixes reforçam a importância da avaliação individual de desempenho, principalmente em contextos de alta complexidade geomorfológica ou óptica. A acurácia geral, mesmo nos feixes com menor energia, evidencia o potencial do ICESat-2 para aplicações em ambientes insulares e costeiros, especialmente quando associados a estratégias de filtragem, calibração e validação com dados de campo.

5.4.4) Análise dos resultados dos conjuntos dos feixes

Com o objetivo de avaliar de forma abrangente a acurácia altimétrica dos dados do ICESat-2 em relação ao modelo de referência LiDAR aerotransportado, foi realizada uma análise comparativa entre os seis feixes do sensor ATLAS: $gt1r$, $gt2r$ e $gt3r$ (feixes fortes) e $gt1l$, $gt2l$ e $gt3l$ (feixes fracos). A Figura 25 apresenta os resultados das regressões lineares entre as

altitudes derivadas do subproduto ATL03 e os valores correspondentes obtidos pelo LiDAR, na região do Arquipélago de Fernando de Noronha. A linha preta tracejada ($y = x$) representa a correspondência ideal entre os dois conjuntos de dados, servindo como referência para a avaliação da acurácia e da consistência altimétrica entre as plataformas.

Figura 25 – Regressões lineares entre as altitudes obtidas pelos feixes do ICESat-2 (ATL03) e os dados de referência LiDAR aerotransportado, na área do Arquipélago de Fernando de Noronha. A linha preta representa a reta de referência ideal ($y = x$)



Fonte: Elaboração própria (2025) com dados da NASA (ICESat-2) e da SGB (LiDAR)

A Figura 25 ilustra as equações de regressão linear ajustadas entre os valores de profundidade do ICESat-2 (ATL03) e os dados LiDAR aerotransportados. A linha preta indica a linha ideal de correspondência ($y = x$), servindo como base comparativa da qualidade do ajuste de cada feixe.

Observa-se que os feixes gt2r e gt1l apresentam os melhores desempenhos, com coeficientes angulares próximos de 1 (1,023 e 1,07, respectivamente) e interceptos próximos de zero, o

que indica elevada acurácia e baixa tendência sistemática de erro. Os feixes gt1r e gt3l também se alinham relativamente bem com a linha de referência, reforçando a confiabilidade da missão ICESat-2 para aplicações batimétricas orbitais.

Por outro lado, o feixe gt3r demonstra o maior desvio, com inclinação de 1,033 e intercepto de 1,25, indicando superestimação sistemática das altitudes. A representação gráfica permite, portanto, comparar o desempenho relativo entre os feixes fortes (gt1r, gt2r, gt3r) e os feixes fracos (gt1l, gt2l, gt3l), destacando o feixe gt2r como o mais adequado para fins de mapeamento batimétrico na área de estudo.

A Tabela 7 resume os principais indicadores estatísticos extraídos das regressões lineares e análises de erro, permitindo a comparação direta entre os diferentes feixes orbitais, representando de forma clara o que foi avaliado com base nos critérios da tabela 5.

Tabela 7 - Estatísticas da comparação entre os dados do ICESat-2 e LiDAR aerotransportado para cada feixe.

Feixe	N	Bias (m)	MAE (m)	RMSE (m)	s(m)	a	b (m)	R²	Análise
gt1r	1830	1,25	1,77	2,24	1,86	1,03	0,48	0,96	Bias > 0 → superestimação MAE → erro médio razoável RMSE → sensível a outliers com $RMSE/s > 1$ s → variabilidade moderada a > 1 → superestimação proporcional b > 0 → intercepto positivo, indica um erro fixo R² ≈ 1 → excelente correlação
gt2r	335	1,13	1,60	1,91	1,53	1,023	0,62	0,98	Bias > 0 → superestimação MAE → erro médio razoável RMSE → sensível a outliers com $RMSE/s > 1$ s → variabilidade moderada a ≈ 1 → proporcionalidade 0 < b < 1 → leve erro fixo R² ≈ 1 → excelente correlação

Feixe	N	Bias (m)	MAE (m)	RMSE (m)	s(m)	a	b (m)	R ²	Análise
gt3r	341	1,95	2,12	2,36	1,48	1,033	1,25	0,99	Bias > 0 → superestimação MAE → erro médio alto RMSE → sensível a outliers com $RMSE/s > 1$ s → variabilidade moderada a ≈ 1 → proporcionalidade b > 1 → erro fixo R² ≈ 1 → excelente correlação
gt1l	321	1,85	1,96	2,25	1,29	1,07	-0,12	0,98	Bias > 0 → superestimação MAE → erro médio alto RMSE → sensível a outliers com $RMSE/s > 1$ s → variabilidade menor a ≈ 1 → proporcionalidade 0 > b < 1 → baixo ou nenhum erro fixo R² ≈ 1 → excelente correlação
gt2l	190	1,46	1,84	2,12	1,53	1,049	0,41	0,99	Bias > 0 → superestimação MAE → erro médio alto RMSE → sensível a outliers com $RMSE/s > 1$

Feixe	N	Bias (m)	MAE (m)	RMSE (m)	s(m)	a	b (m)	R ²	Análise
									s → variabilidade moderada a ≈ 1 → proporcionalidade 0 < b < 1 → baixo erro fixo R² ≈ 1 → excelente correlação
gt3l	1110	1,65	1,82	2,26	1,64	1,047	0,45	0,98	Bias > 0 → superestimação MAE → erro médio alto RMSE → sensível a outliers com RMSE/s > 1 s → variabilidade moderada a ≈ 1 → proporcionalidade 0 < b < 1 → baixo erro fixo R² ≈ 1 → excelente correlação

Fonte: Autoria própria (2025)

Os resultados da análise indicam que os dados do ICESat-2 apresentam um bom ajuste em relação aos dados de referência obtidos por LiDAR aerotransportado para estimativas batimétricas no Arquipélago de Fernando de Noronha. Isso é evidenciado pelos elevados coeficientes de determinação (R^2 entre 0,96 e 0,99), que demonstram forte correlação linear entre as duas fontes de dados. Além disso, os valores de erro médio absoluto (MAE) e erro quadrático médio (RMSE) são compatíveis e indicam precisão adequada das estimativas orbitais.

Embora tenha sido identificado um viés sistemático de superestimação em todos os feixes, esse efeito é relativamente pequeno e consistente, o que sugere que é possível realizar correções para melhorar a acurácia. O desempenho diferenciado entre os feixes reforça a necessidade de uma avaliação específica para a seleção dos feixes mais confiáveis para aplicações batimétricas.

5.4.5) Análise Direcional: *Forward x Backward*

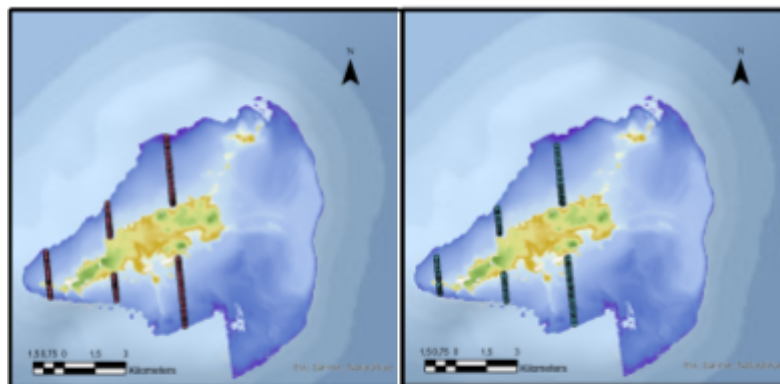
Organizando os dados organizados de acordo com a direção de varredura do satélite (forward e backward) e o tipo de feixe (forte e fraco), é possível avaliar eventuais variações sistemáticas na qualidade dos dados em função da geometria de aquisição do sensor.

5.4.5.1) Análise Direcional Forward (Norte - Sul)

- **Análise do conjunto de feixes fracos no sentido forward**

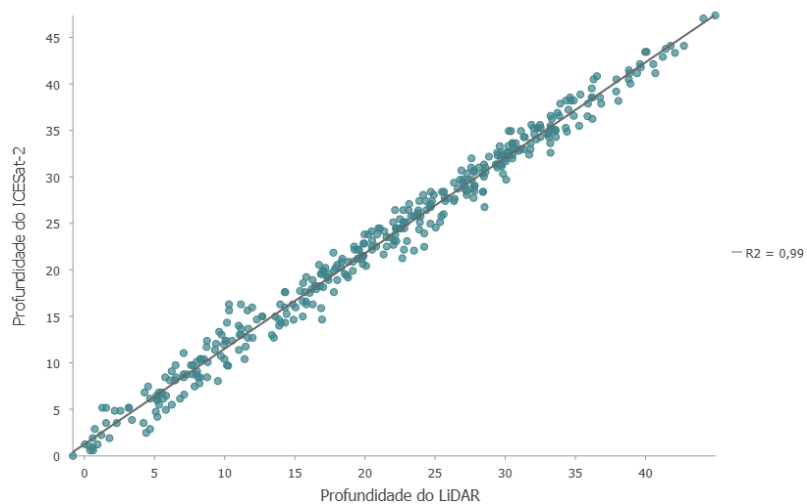
A figura 26 apresenta mapas com o conjunto de feixes fracos à direita e fortes à esquerda para a direção *forward* (passagem do satélite de Norte para Sul).

Figura 26 - Mapa com as marcações dos conjuntos de fótons fortes e fracos na direção *forward* e regressão linear

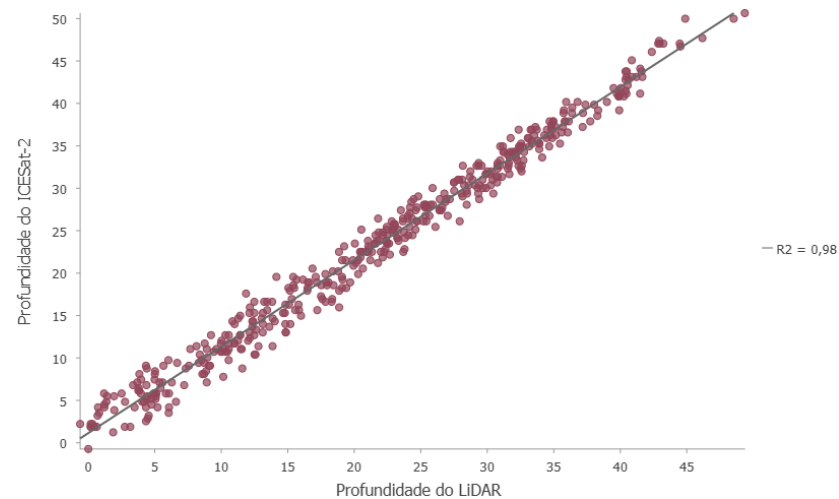


- Conjunto de feixes fortes na direção Forward
- Conjunto de feixes fracos na direção Forward

Regressão Linear entre a profundidade do LiDAR e do ICESat-2 – Feixes fracos, Direção forward



Regressão Linear entre as profundidades do LiDAR e do ICESat-2 - Feixes fortes, Direção forward



Fonte: Elaboração própria (2025) com dados da NASA (ICESat-2) e da SGB (LiDAR).

No caso do feixe Forward Fraco, o viés obtido foi de 1,81 m, evidenciando uma superestimação sistemática dos dados orbitais frente à referência aerotransportada. Este viés negativo indica que, em média, o ICESat-2 tende a registrar altitudes inferiores às fornecidas pelo LiDAR.

O erro absoluto, representado pelo valor absoluto das diferenças individuais, resultou em um Erro Médio Absoluto (MAE) de 1,96 m. Esse valor quantifica a magnitude média dos erros, independentemente da direção (positiva ou negativa), refletindo o desvio médio entre os pares de dados comparados.

Já o erro ao quadrado, utilizado para o cálculo da Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE), apresentou uma média de aproximadamente 5,11 m², resultando em um RMSE de 2,26 m. Esse indicador mostra que, mesmo havendo compensação no cálculo do viés, existem discrepâncias altimétricas significativas a serem consideradas, possivelmente relacionadas à geometria de aquisição orbital, o retorno de fótons ao sensor e à complexidade geomorfológica das áreas analisadas.

Complementarmente, foi realizada uma regressão linear simples entre os dados de altitude do LiDAR (variável independente, eixo X) e do ICESat-2 (variável dependente, eixo Y), resultando na seguinte equação:

$$y = 1,24 + 1,03 x$$

O coeficiente de determinação ($R^2 = 0,99$) evidencia uma correlação linear muito forte entre os dois conjuntos de dados. A inclinação da reta (slope) de 1,03 sugere uma leve amplificação das variações altimétricas por parte do ICESat-2 em relação ao modelo LiDAR, possivelmente influenciada por efeitos locais de detecção do sinal laser em áreas com variação abrupta de relevo ou cobertura d'água.

Além do viés, foi estimada a variância dos erros (1,79 m²) e o respectivo desvio padrão (1,34 m). Esses indicadores de dispersão indicam que, embora o viés seja relativamente estável, os erros individuais apresentam variação significativa em torno da média, o que pode impactar a acurácia espacial em determinadas porções do terreno.

Os resultados obtidos para o feixe Forward Fraco demonstram um alto grau de correlação com os dados LiDAR aerotransportados, corroborado por um R^2 de 0,99 e um modelo linear

bem ajustado. Apesar da presença de um viés negativo sistemático, a dispersão dos erros permanece controlada, com valores de MAE e RMSE abaixo de 2,5 m. Esses dados sustentam o potencial do feixe Forward Fraco para aplicações altimétricas orbitais.

- **Análise do conjunto de feixes fortes no sentido forward**

O erro bruto, ou diferença direta entre as altitudes medidas pelo ICESat-2 e pelo LiDAR, revelou um viés médio (bias) de 1,57 m para o feixe Forward Forte. Esse valor negativo confirma a tendência de superestimação sistemática das altitudes pelo sensor orbital quando comparado à referência aerotransportada, ainda que de menor magnitude que o observado para o feixe Forward Fraco.

O Erro Médio Absoluto (MAE) foi de 1,86 m, representando a média das diferenças em valor absoluto. Esse indicador expressa a magnitude média do erro altimétrico, independentemente do sinal (positivo ou negativo), evidenciando uma ligeira melhoria em relação ao feixe fraco, com menor dispersão em torno da linha de tendência.

Para o erro ao quadrado, a média dos quadrados dos erros resultou em uma variância de 2,43 m², culminando em uma Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) de 2,20 m. Esse valor confirma que, embora o viés seja relativamente baixo, ainda existem discrepâncias altimétricas significativas que devem ser consideradas, sobretudo em áreas com forte variação topográfica ou cobertura variável.

Foi também aplicada uma regressão linear entre os dados de altitude do LiDAR (eixo X) e do ICESat-2 (eixo Y), resultando na seguinte equação:

$$y = 1,45 + 1,02 \cdot x$$

O coeficiente de determinação ($R^2 = 0,983$) indica uma forte correlação linear entre os dois conjuntos de dados, embora ligeiramente inferior ao valor obtido para o feixe fraco. A inclinação da reta de regressão (1,02) sugere uma amplificação sutil das altitudes mais elevadas pelo ICESat-2, reforçando a boa aderência do modelo, mesmo com pequenas variações sistemáticas.

Além disso, a variância dos erros foi estimada em 2,43 m² e o desvio padrão associado foi de 1,56 m. Esses indicadores mostram que, embora o feixe forte apresente viés semelhante ao

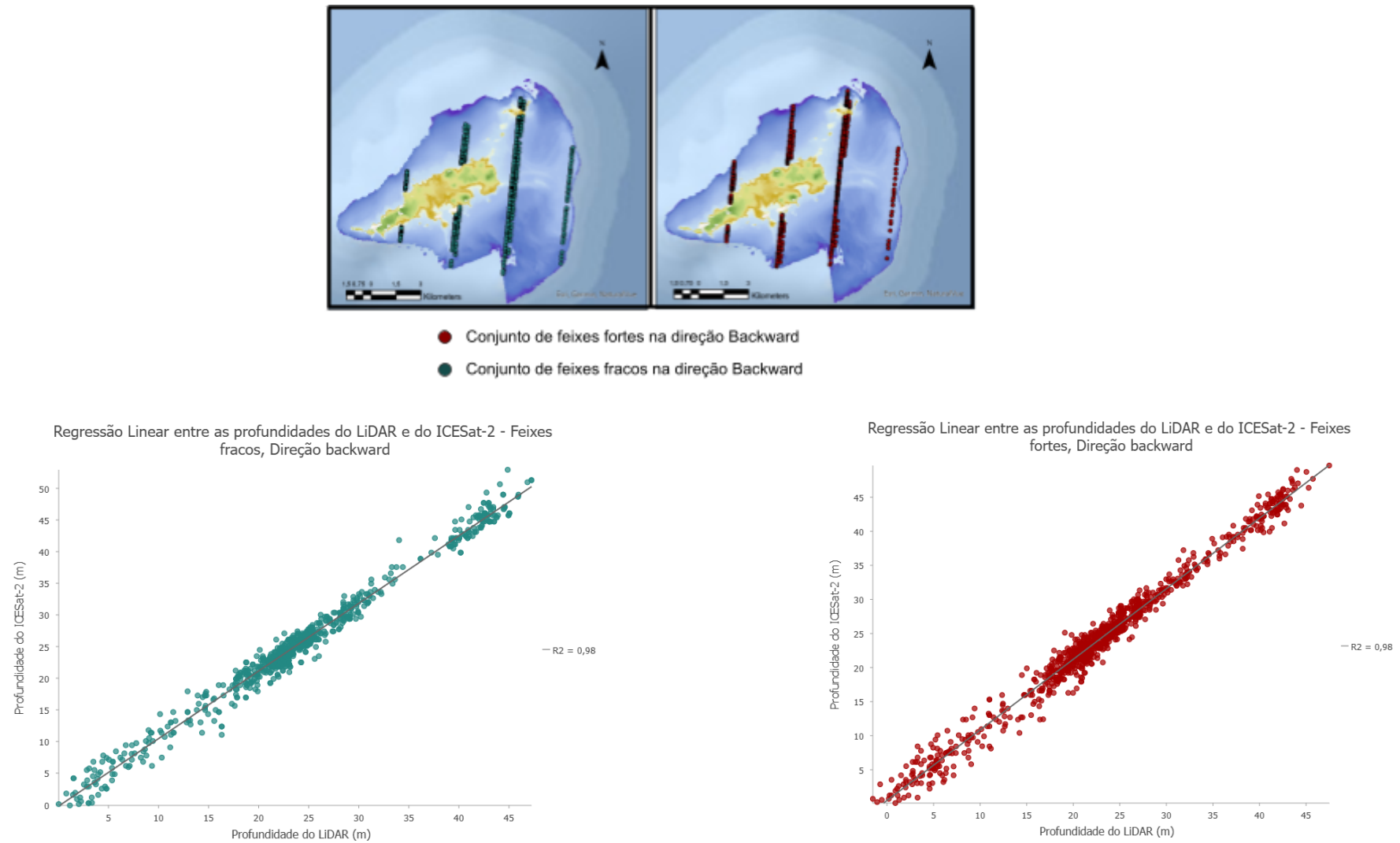
fraco, há uma dispersão um pouco maior dos erros individuais em torno da média, o que pode estar relacionado à maior energia do pulso incidente e à resposta topográfica heterogênea em ambientes costeiros e insulares.

Em síntese, tanto os feixes fracos quanto os fortes na direção forward do ICESat-2 demonstraram forte correlação com o modelo LiDAR aerotransportado, evidenciando a capacidade do sensor orbital em representar variações altimétricas com elevada fidelidade. Os feixes fracos apresentaram viés ligeiramente mais acentuado, mas menor dispersão dos erros, enquanto os feixes fortes exibiram menor viés absoluto, porém maior variabilidade. Essa diferença sugere que os feixes fracos forward podem ser mais estáveis sob certas condições topográficas, ao passo que os feixes fortes, embora também confiáveis, podem ser mais sensíveis a variações locais de reflectância e geometria de aquisição. Assim, a escolha do feixe ideal para aplicações altimétricas deve considerar o equilíbrio entre acurácia sistemática (viés) e precisão (dispersão), em função da complexidade do terreno analisado e dos objetivos da aplicação.

5.4.5.2) Análise Direcional Backward (Sul - Norte)

A Figura 27 apresenta a distribuição espacial desses fótons sobre o Arquipélago de Fernando de Noronha, juntamente com os gráficos de regressão linear que comparam as altitudes obtidas pelos diferentes feixes com os dados de referência do LiDAR aerotransportado.

Figura 27 - Mapa com as marcações dos conjuntos de fótons fracos e fortes na direção *backward* e gráficos da regressão linear



Fonte: Elaboração própria (2025) com dados da NASA (ICESat-2) e da SGB (LiDAR).

- **Análise do conjunto de feixes fracos no sentido backward**

Para avaliar a acurácia altimétrica dos dados do ICESat-2 na direção backward em relação ao LiDAR aerotransportado, foram considerados indicadores estatísticos fundamentais, como viés, erro absoluto e erro quadrático médio. No caso dos feixes fracos backward (Figura 27), o viés médio (bias) foi de 1,44 m, indicando uma superestimação sistemática por parte do ICESat-2 em relação ao modelo de referência, embora ligeiramente menos acentuada que a observada nos feixes forward.

O erro médio absoluto (MAE) foi de 1,74 m, refletindo a magnitude média dos desvios independentemente de sua direção. Já o erro quadrático médio (RMSE) foi de 2,61 m, resultado de uma média de erros ao quadrado de aproximadamente 6,812 m², sugerindo a presença de discrepâncias pontuais mais acentuadas, mesmo com uma média geral estável. Esses valores apontam para uma boa performance altimétrica, ainda que com algumas variações locais mais pronunciadas.

A regressão linear entre os dados do LiDAR (eixo X) e do ICESat-2 (eixo Y) resultou na equação:

$$y = -0,24 + 1,07 x$$

com coeficiente de determinação $R^2=0,98$, evidenciando uma forte correlação linear entre os datasets e boa aderência entre as observações orbitais e aerotransportadas. A inclinação superior a 1 sugere uma leve tendência do ICESat-2 em amplificar as variações altimétricas em relação ao modelo de referência.

Além disso, foram estimados a variância e o desvio padrão dos erros individuais em relação à média. A variância foi de 2,22 m², com um desvio padrão correspondente de 1,49 m. Esses indicadores indicam que os feixes *backward* fracos apresentam uma dispersão dos erros ligeiramente menor que os feixes forward fortes, mas superior à dos feixes forward fracos.

Em conjunto, os resultados sugerem que os feixes fracos na direção backward mantêm desempenho altimétrico robusto, com forte correlação com o LiDAR e viés sistemático moderado. Sua estabilidade estatística e a maior quantidade de registros (n=824) reforçam sua utilidade para aplicações de mapeamento topográfico e batimétrico, especialmente em

áreas onde a cobertura orbital backward oferece melhores condições geométricas de aquisição.

De modo geral, os feixes fracos na direção *backward* apresentaram desempenho altimétrico altamente satisfatório, tanto em termos de correlação linear ($R^2 = 0,98$) quanto na magnitude dos erros (MAE = 1,74 m; RMSE = 2,61 m). A dispersão relativamente controlada (desvio padrão = 1,49 m) e o viés negativo moderado (−1,44 m) observados nesse grupo — quando comparados aos feixes *forward* — sugerem que, embora operem com menor energia, os feixes *backward* podem fornecer estimativas altimétricas robustas. Isso pode estar associado à menor incidência de saturação do sinal ou efeitos de múltiplos retornos, frequentemente mais expressivos nos feixes forward. Esses achados reforçam a relevância de considerar a direção do feixe na avaliação do desempenho altimétrico do ICESat-2, especialmente em regiões costeiras e insulares como o Arquipélago de Fernando de Noronha.

- **Análise do conjunto de feixes fracos no sentido backward**

Para os feixes fortes na direção *backward*, a análise de acurácia altimétrica comparou as altitudes medidas pelo ICESat-2 com os dados de referência do LiDAR aerotransportado, utilizando os mesmos indicadores estatísticos: viés (bias), erro médio absoluto (MAE), erro quadrático médio (RMSE), além da variância e do desvio padrão dos erros.

O viés médio encontrado foi de 1,32 m, indicando uma superestimação sistemática das altitudes pelo ICESat-2 em relação ao LiDAR, embora ligeiramente menor do que nos demais grupos. O MAE calculado foi de 1,61 m, evidenciando que, em média, as discrepâncias absolutas entre os dados orbitais e os dados de referência são as menores entre os quatro grupos avaliados, o que reforça a precisão do feixe forte backward. O RMSE foi estimado em 2,13 m, confirmando uma boa acurácia altimétrica mesmo diante da complexidade topográfica do arquipélago de Fernando de Noronha.

A regressão linear entre os dados LiDAR (eixo X) e ICESat-2 (eixo Y) resultou na equação:

$$y = 0,49 + 1,04 x$$

com coeficiente de determinação $R^2 = 0,98$, valor que reforça a forte correlação linear entre os *datasets* e a confiabilidade do feixe forte backward na estimativa altimétrica. O coeficiente

angular próximo de 1 sugere boa aderência às variações topográficas locais, sem tendência acentuada de super ou superestimação em faixas altimétricas elevadas.

A variância dos erros foi estimada em 1,98 m² e o desvio padrão dos erros em 1,41 m, valores inferiores aos dos feixes forward e próximos aos dos feixes *backward* fracos. Esses resultados indicam menor dispersão dos erros e maior consistência nas medições.

Em resumo, os feixes fortes na direção backward apresentaram o melhor desempenho geral entre os quatro grupos analisados, conciliando baixo viés, erro absoluto reduzido e forte correlação com os dados LiDAR. Tais características os tornam particularmente adequados para aplicações altimétricas em áreas costeiras e insulares, como Fernando de Noronha, onde a precisão espacial é essencial. A análise também ressalta a importância de se considerar a direção e intensidade do feixe na seleção dos dados ICESat-2 para estudos geoespaciais de alta resolução.

5.4.5.3 Análise Comparativa dos Desempenhos Altimétricos por Tipo de Feixe e Direção

A análise dos indicadores estatísticos para os diferentes tipos de feixes do ICESat-2 (fortes e fracos) em ambas as direções (forward e backward) – representadas na tabela 8 e figura 28– evidencia variações relevantes na acurácia altimétrica em relação aos dados de referência do LiDAR aerotransportado.

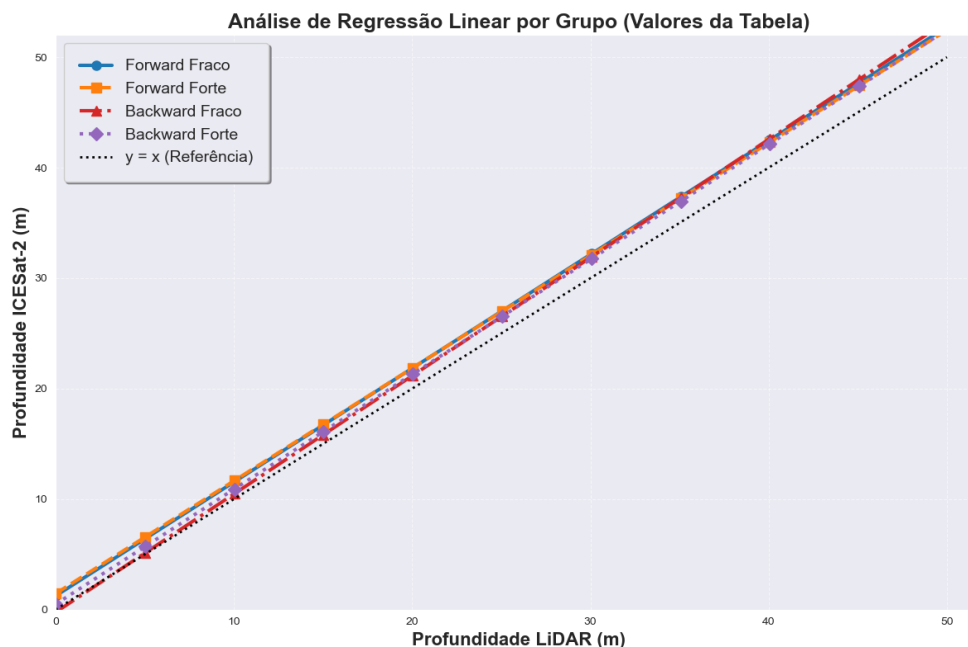
Tabela 8 - Resultados de análise estatísticas da orientação do satélite

Feixe	N	Bias (m)	MAE (m)	RMSE (m)	s (m)	a	b (m)	Análise
Forward Fraco	382	1,81	1,96	2,26	1,34	1,03	1,24	Bias > 0 → superestimação MAE → erro médio moderado RMSE → apresenta <i>outliers</i> com RMSE/s >1 s → variabilidade moderada a ≈ 1 → proporcionalidade b >1 → erro fixo R² ≈ 1 → excelente correlação
Forward Forte	445	1,57	1,86	2,2	1,56	1,02	1,45	Bias > 0 → superestimação MAE → erro médio moderado RMSE → sensível a outliers com RMSE/s >1 s → variabilidade alta a ≈ 1 → proporcionalidade b >1 → erro fixo R² ≈ 1 → excelente correlação
Backward Fraco	824	1,44	1,74	2,61	1,49	1,07	-0,24	Bias > 0 → superestimação MAE → erro médio moderado RMSE → sensível a outliers com RMSE/s >1 s → variabilidade moderada a ≈ 1 → proporcionalidade

								b <1 → erro fixo baixo ou inexistente R² ≈ 1 → excelente correlação
Backward Forte	1028	1,32	1,61	2,13	1,41	1,04	0,49	Bias > 0 → superestimação MAE → erro médio baixo RMSE → sensível a outliers com RMSE/s > 1 s → variabilidade moderada a ≈ 1 → proporcionalidade b <1 → erro fixo baixo ou inexistente R² ≈ 1 → excelente correlação

Fonte: Elaboração própria (2025) com dados da NASA (ICESat-2) e da SGB (LiDAR).

Figura 28 – Regressões lineares entre as profundidades obtidas pelos feixes do ICESat-2 (ATL03) e os dados de referência LiDAR. A linha preta tracejada representa a reta de referência ($y = x$).



Fonte: Elaboração própria (2025) com dados da NASA (ICESat-2) e da SGB (LiDAR)

A Figura 28 ilustra as equações de regressão linear ajustadas entre os valores de profundidade do ICESat-2 (ATL03) e os dados LiDAR aerotransportados. A linha preta tracejada indica a linha ideal de correspondência ($y = x$), servindo como base para avaliação visual da qualidade do ajuste de cada feixe.

Seguindo os critérios definidos na Tabela 3, a melhor performance altimétrica foi observada nos feixes fortes na direção backward, que apresentam o menor viés, os menores erros absolutos e quadráticos, além de maior consistência nos dados. Em contraste, os feixes forward fracos mostraram os maiores desvios e variabilidades, indicando menor confiabilidade para aplicações altimétricas de alta precisão. Essa comparação reforça a importância de se considerar o tipo de feixe e a direção de aquisição ao selecionar dados do ICESat-2 para estudos em regiões costeiras e ambientes topograficamente complexos, onde fatores geomorfológicos e condições ambientais podem afetar significativamente a qualidade dos dados.

5.4.6) Avaliação da Análise

A opção por realizar a análise de forma segmentada — abordando separadamente os resultados por feixe e direção — demonstrou-se uma estratégia eficaz para aprofundar a compreensão das características dos dados altimétricos obtidos pelo ICESat-2.

Essa abordagem permitiu explorar as particularidades de cada agrupamento, destacando os padrões de desempenho e as limitações específicas que seriam menos evidentes em uma análise agregada. A tabela de direção, por exemplo, evidenciou diferenças claras na precisão e viés entre as trajetórias *forward* e *backward*, sendo o feixe *Backward* Forte o que apresentou melhor desempenho geral, com menor viés e menores erros.

A análise proporcionou uma avaliação detalhada dos coeficientes de regressão, correlação e erros para cada feixe individual, permitindo identificar tendências sistemáticas de subestimação e superestimação, bem como o grau de dispersão dos dados. Como resultado, foi possível concluir que, apesar da presença de viés negativo generalizado, a proporcionalidade dos dados (indicada pelos valores de inclinação próximos a 1) e a alta correlação com os dados de referência demonstram a confiabilidade dos dados para uso em aplicações práticas, desde que sejam consideradas correções locais para os erros sistemáticos identificados.

Por fim, a análise segmentada possibilitou uma avaliação mais granular e direcionada, evidenciando oportunidades para futuros aprimoramentos, tais como a aplicação de modelos integrados ou técnicas estatísticas avançadas para otimizar a precisão dos dados altimétricos. Dessa forma, a metodologia adotada contribuiu para um entendimento mais sólido e fundamentado dos resultados obtidos.

5.5) Discussão dos Erros e Incertezas

A análise integrada dos dados do ICESat-2 e do LiDAR aerotransportado revelou a presença de desvios nas estimativas de elevação obtidas a partir dos fótons classificados e corrigidos do subproduto ATL03. Tais discrepâncias, especialmente notáveis nas bordas das trilhas do satélite, onde se observam variações mais acentuadas entre os tons de vermelho e azul, podem ser atribuídas a uma série de fatores técnicos e ambientais que impactam diretamente a qualidade da batimetria derivada por sensoriamento remoto.

Uma das principais limitações refere-se ao uso do ICESat-2 em ambientes costeiros complexos, como o arquipélago de Fernando de Noronha. Essa região apresenta forte heterogeneidade na cobertura do fundo marinho, elevada variação de profundidade em curtas distâncias e interferência de elementos como ondas, espuma superficial e vegetação bentônica. Tais características dificultam a identificação precisa do assoalho submarino, especialmente em áreas de sombra topográfica ou de alta refletância variável. Essas complexidades podem exacerbar os erros nas transições, contribuindo para os padrões de superestimação ou subestimação de profundidade observados na costa.

Adicionalmente, a diferença de resolução espacial entre os sensores utilizados é um fator determinante na ocorrência de erros. O LiDAR aerotransportado possui alta densidade de pontos e cobertura contínua, com resolução submétrica, enquanto o ICESat-2 apresenta *footprint* linear de aproximadamente 70 cm e feixes separados por cerca de 3 km. Essa diferença afeta a comparabilidade direta dos dados e pode contribuir para desvios em áreas com relevo acentuado ou alta variabilidade local, potencialmente manifestando-se como discrepâncias maiores nas áreas de borda, onde as feições batimétricas podem não ser igualmente resolvidas por ambos os sensores.

Outro aspecto relevante diz respeito à influência da refração da luz na interface ar-água. Mesmo com a aplicação de modelos de correção baseados na geometria do feixe e nas propriedades ópticas da água, a variação da profundidade, da turbidez e da densidade de partículas em suspensão interfere na precisão da correção. Em ambientes de águas rasas, essas distorções podem resultar em erros verticais significativos, especialmente quando o ângulo de incidência do feixe é elevado.

A topografia submarina também exerce influência direta sobre os retornos do laser. Superfícies irregulares, como costas rochosas, recifes ou áreas com acúmulo de sedimentos e vegetação submersa, provocam múltiplos retornos e espalhamento do sinal. Esses efeitos, aliados à presença de reverberações induzidas pela radiação solar ou por reflexos múltiplos, contribuem para a geração de ruído nos dados e dificultam a separação precisa entre os fótons correspondentes ao fundo marinho e os espúrios. A coluna d'água apresenta múltiplos retornos, com o maior acúmulo de dados e reverberações presentes em todas as linhas e conjuntos avaliados.

Ressalta-se, ainda, que a identificação dos fótons associados ao assoalho submarino foi realizada manualmente com base na análise da densidade e da distribuição dos retornos no perfil vertical. Embora critérios técnicos tenham sido adotados para garantir a consistência entre os trechos analisados, esse procedimento é suscetível a interpretações subjetivas, podendo introduzir pequenas variações nos valores extraídos, sobretudo em trechos com alta densidade de fótons de ruído – fótons de fundo – ou baixa penetração da luz.

É importante mencionar que a presença de um viés sistemático negativo nos dados do ICESat-2, em torno de $-1,90$ a $-2,20$ metros (Bias), claramente evidenciado pelos tons de vermelho predominantes em áreas mais profundas da Figura 31, não foi corrigido intencionalmente neste estudo. Essa abordagem permitiu avaliar o desempenho do sensor de forma autônoma e demonstrar que, mesmo com esse viés inerente (que indica uma superestimação da profundidade pelo ICESat-2 em relação ao LiDAR), o ICESat-2 é capaz de fornecer estimativas batimétricas consistentes e úteis para mapeamento em áreas costeiras remotas, onde dados de referência como o LiDAR não estão disponíveis. A origem desse viés pode estar ligada a limitações inerentes aos modelos globais de correção utilizados (como o modelo de maré GOT4.8, que apresentou variações de até 5 metros em áreas costeiras do arquipélago, e o modelo geoidal EGM2008, cuja acurácia é reduzida em regiões oceânicas com escassez de dados gravimétricos locais), além dos fatores técnicos e ambientais já mencionados.

Capítulo 6 - Conclusões

Este estudo teve como objetivo principal avaliar a precisão e aplicabilidade dos dados batimétricos do ICESat-2, comparando-os com dados de LiDAR aerotransportado na complexa região do Arquipélago de Fernando de Noronha.

Apesar das limitações inerentes aos ambientes costeiros complexos, os resultados demonstram a viabilidade do uso do ICESat-2 para aplicações batimétricas em ilhas oceânicas, como Fernando de Noronha. A elevada correlação observada entre os dados do satélite e os dados de referência (LiDAR aerotransportado) atesta a capacidade do sensor de captar variações altimétricas em ambientes costeiros, especialmente em águas claras e rasas, e reforça o seu potencial para mapeamentos regionais.

A análise dos dados ICESat-2 demonstrou que a classificação tradicional dos fótons por níveis de confiança (0 a 4) apresenta limitações em ambientes aquáticos, especialmente devido a efeitos ópticos como múltiplas reflexões na interface água-ar, interferência solar e turbidez. Nesse contexto, a inclusão controlada de fótons de confiança zero (nível 0), tradicionalmente considerados ruídos, mostrou-se benéfica para ampliar a detecção do fundo marinho, especialmente em áreas mais profundas ou com baixo retorno de sinal. Essa abordagem possibilitou, inclusive, a identificação da maior profundidade registrada no estudo, de 53.3 metros, e contribuiu para uma reconstrução mais abrangente da batimetria, particularmente quando validados com dados de LiDAR aerotransportado.

A escolha do feixe adequado do ICESat-2 é uma etapa crítica para a qualidade dos produtos. As variações nos valores de viés, dispersão e correlações observadas entre os feixes gt1r, gt2r e gt3r influenciam diretamente a acurácia. O desempenho superior do feixe gt2r indica maior potencial para ser utilizado como referência em validações ou calibrações cruzadas, bem como para gerar superfícies contínuas com menor necessidade de correção no pós-processamento. Já os feixes gt1r e, especialmente, gt3r, requerem maior cautela, sendo recomendável aplicar ajustes sistemáticos ou filtros que considerem seus respectivos vieses negativos.

A adoção de uma abordagem segmentada — com análises separadas por feixe, direção orbital (forward/backward) e tipo de amostragem — revelou-se uma estratégia metodológica eficaz para avaliar os padrões de erro e incerteza nos dados ATL03. Essa segmentação permitiu

isolar comportamentos sistemáticos específicos, como o viés (bias) negativo recorrente e a variação da dispersão dos resíduos entre feixes. Destacou-se também o desempenho consistente de certos feixes, no conjunto completo e entre trajetórias forward e backward — estas últimas apresentando melhor desempenho estatístico em termos de viés e RMSE, provavelmente devido à geometria de aquisição e resposta do sistema detector.

A análise evidenciou um viés altimétrico negativo médio em torno de -1.90 a -2.20 metros, indicando que o ICESat-2 tende a registrar superfícies subaquáticas mais abaixo do que as medidas pelo LiDAR, resultando em uma superestimação da profundidade em aproximadamente 2 a 3 metros, com uma incerteza vertical (RMSE) associada variando de aproximadamente a 2.6 metros entre os diferentes feixes e direções.

É fundamental ponderar que o intervalo temporal entre a aquisição dos dados de referência (LiDAR aerotransportado, 2011) e os dados do ICESat-2 (2018-2025) constitui uma fonte de incerteza na análise comparativa. O ambiente costeiro do Arquipélago de Fernando de Noronha é morfodinamicamente ativo, sujeito a processos de erosão e deposição sedimentar que podem ter alterado o assoalho marinho ao longo dessa década. Dessa forma, parte das discrepâncias quantificadas entre os dois conjuntos de dados pode refletir não apenas as limitações do sensor ATLAS, mas também mudanças reais na batimetria local.

Apesar do LiDAR aerotransportado ser considerado referência na obtenção de dados batimétricos de alta resolução e precisão, o ICESat-2 mostrou-se uma ferramenta promissora para estimativas batimétricas em áreas costeiras, mesmo na ausência de dados LiDAR. Sua abrangência geográfica, capacidade de aquisição regular de dados e a ausência de custos diretos de operação o tornam valioso para mapeamento batimétrico em regiões remotas e de difícil acesso. No entanto, é fundamental que suas limitações de precisão (particularmente o viés sistemático) sejam consideradas, e métodos complementares de filtragem e calibração sejam desenvolvidos para melhorar a acurácia em estudos que demandam alta exatidão. Embora o ICESat-2 possa apresentar erros relativos e resolução espacial inferior ao LiDAR, sua precisão é suficiente para diversas aplicações regionais e de monitoramento em larga escala.

Esta pesquisa reforça a necessidade de abordagens integradas que combinem múltiplos feixes e diferentes níveis de confiança, além de melhorias estatísticas no estudo da variação dos

erros nas áreas de superestimação e subestimação. Tais estratégias são essenciais para maximizar a acurácia dos modelos altimétricos derivados do ICESat-2, contribuindo com o avanço do monitoramento costeiro por sensoriamento remoto, sobretudo em áreas de difícil acesso e alta complexidade ambiental. A combinação dos dados orbitais do ICESat-2 com dados de LiDAR aerotransportado ou com outros tipos de sensores, quando disponíveis, continua essencial para a calibração, garantindo maior precisão e robustez nas estimativas batimétricas.

7. Referências

1. ABSHIRE, J. B. et al. Geoscience laser altimeter system (GLAS) on the ICESat mission: on-orbit measurement performance. **Geophysical Research Letters**, v. 32, n. L21S02, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2005GL024028>. Acesso em: 10 agosto 2024.
2. AMORIM, F. N.; MENDES, C. R. B.; GHERARDI, D. F. M. Hydrodynamic processes and sediment distribution in insular tropical shelves: insights from Fernando de Noronha. **Continental Shelf Research**, v. 213, p. 104329, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.csr.2020.104329>. Acesso em: 10 jun. 2025.
3. ANDERSEN, O. B. et al. Global sea level monitoring and interpretation. **Advances in Space Research**, v. 55, n. 10, p. 2431-2444, 2020.
4. BACALHAU, J. R. **Caracterização volumétrica de reservatórios por meio de sensoriamento remoto**. 2022. Dissertação (Mestrado em [Nome do Programa, se souber]) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022.
5. BROCK, J. C.; PURKIS, S. J. The emerging role of airborne LiDAR in coral reef research and coastal management. **Journal of Coastal Research**, v. 25, n. 2, p. 257-270, 2009.
6. CASTRO, B. M.; MIRANDA, L. B. Physical oceanography of the western Atlantic continental shelf located between 4°N and 34°S. In: **The Sea**, v. 11, p. 209–251, 1998.
7. CAVANAUGH, J. F. et al. The Mercury Laser Altimeter Instrument for the MESSENGER Mission. **Space Science Reviews**, v. 131, p. 451–479, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11214-007-9273-4>. Acesso em: 5 fev. 2025.
8. CHEN, Y.; ZHANG, X.; LIU, S.; WANG, J. Avaliação da precisão do ATL13 na batimetria costeira: uma revisão crítica. **Revista de Ciências da Terra e Espaço**, v. 39, n. 1, p. 45-58, 2021.
9. COLLIE, J. S. et al. A quantitative analysis of fishing impacts on shelf-sea benthos. **Journal of Animal Ecology**, v. 69, p. 785-798, 2000.
10. CORDANI, U. G.; FRAGA, L. M.; BRITO NEVES, B. B. Geocronologia e evolução geotectônica do Arquipélago de Fernando de Noronha. **Geologia USP**, v. 20, n. 2, p. 17-31, 2000.

11. DA SILVA, R. R. et al. Hydrometeorological monitoring of Lagoa da Conceição. **Revista Contemporânea**, v. 4, n. 12, p. e6974-e6974, 2024.
12. DEGNAN, J. J. Photon-counting multikilohertz microlaser altimeters for airborne and spaceborne topographic measurements. **Journal of Geodynamics**, v. 34, p. 503–549, 2002.
13. DENG, X. et al. A review of altimetry waveform retracking for inland water levels. **Geography and Environment**, v. 1, p. 1-18, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geog.2025.02.001>. Acesso em: 03 abril. 2025.
14. DIREÇÃO-GERAL DO TERRITÓRIO – DGT. **Modelo do Geoide**. [s.d.]. Disponível em: <https://www.dgterritorio.gov.pt/geodesia/modelo-geoide?language=en>.
15. FREIRE, M. L. F. **Correção atmosférica em imagens LANDSAT contaminadas por efeito de adjacência**. 1996. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1996.
16. FRICKER, H. A. et al. Assessment of ICESat performance at the Salar de Uyuni, Bolivia. **Geophysical Research Letters**, v. 32, n. L21S06, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2005GL023423>.
17. GIRIBABU, D. et al. Performance assessment of GEBCO_2023 gridded bathymetric data in selected shallow waters of Indian ocean using the seafloor from ICESat-2 photons. **Marine Geophysical Research**, v. 45, n. 1, p. 1, 2024.
18. GUENTHER, G. C. et al. Meeting the accuracy challenge in airborne Lidar bathymetry. In: EARSEL SYMPOSIUM, 20., 2000.
19. GUO, X.; JIN, X.; JIN, S. Shallow Water Bathymetry Mapping from ICESat-2 and Sentinel-2 Based on BP Neural Network Model. **Water**, v. 14, n. 23, p. 3862, 2022.
20. HOEGH-GULDBERG, O. et al. Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. **Science**, v. 318, n. 5857, p. 1737-1742, 2007.
21. IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapa da Região Nordeste do Brasil e plataformas continentais**. 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 26 maio 2025.
22. IDSO, S. B.; GATES, D. M. The energy environment of plants. In: NORMAN, A. G. (Ed.). **Advances in Agronomy**. New York: Academic Press, 1966. p. 171-218.
23. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Modelo de Ondulação Geoidal**. 2023. Disponível em:

<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/servicos-para-posicionamento-geodesico/10855-modelo-de-ondulacao-geoidal.html>.

24. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Modelo para conversão de altitudes geométricas em altitudes normais (hgeoHNOR2020)**. 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/modelos-digitais-de-superficie/modelos-digitais-de-superficie/31283-hgeohnor2020-modeloconversaoaltitudesgeometricasgnss-datum-verticalsgb.html>.
25. IOCCG. **Remote sensing of ocean colour in coastal, and other optically-complex, waters**. Reports of the International Ocean Colour Coordinating Group, No. 3. [S.l.]: IOCCG, 2000.
26. IQBAL, M. **An introduction to solar radiation**. London: Academic Press, 1983. 390 p.
27. JERLOV, N. G. **Marine Optics**. Amsterdam: Elsevier, 1976.
28. JIA, D. et al. Methods to Improve the Accuracy and Robustness of Satellite-Derived Bathymetry through Processing of Optically Deep Waters. **Remote Sensing**, v. 15, n. 22, p. 5406, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs15225406>.
29. KUTSER, T. et al. Remote sensing of shallow waters—A 50 year retrospective and future directions. **Remote Sensing of Environment**, v. 240, p. 111619, 2020.
30. LATORRE, M. et al. Correção atmosférica: conceitos e fundamentos. **Revista Espaço e Geografia**, p. 153-178, 2002.
31. LAVELLE, J. W. et al. Remote sensing of bathymetry in coastal waters using optical imagery. **Remote Sensing**, v. 12, n. 2, p. 1–20, 2020.
32. LEE, Z. et al. Hyperspectral remote sensing for shallow waters: 2. Deriving bottom depths and water properties by optimization. **Applied Optics**, v. 38, n. 18, p. 3831–3843, 1999.
33. LI, H.; WU, X.; ZHANG, Y. Correções de interferência de vegetação usando dados do ATL08 para estudos de batimetria em ambientes costeiros. **Revista de Sensoriamento Remoto e Geomática**, v. 37, n. 3, p. 420-433, 2021.
34. LIOU, K. N. **An introduction to atmospheric radiation**. New York: Academic Press, 1980. 392 p.
35. LURTON, X. **An introduction to underwater acoustics: principles and applications**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2010.

36. MAILLARD, P. **Altimetria por satélite radar aplicada à hidrologia no Brasil**. 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/320831615_ALTIMITRIA_POR_SATILIT_E_RADAR_APLICADA_A_HIDROLOGIA_NO_BRASIL_Satellite_Altimetry_for_Hydrology_in_Brazil.
37. MAKIN, V. K.; KUDRYAVTSEV, V. N. Coupled sea surface-atmosphere model: 1. Wind over waves coupling. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 104, n. C4, p. 7613-7623, 1999.
38. MARKUS, T. et al. The Ice, Cloud, and land Elevation Satellite-2 (ICESat-2): Science requirements, concept, and implementation. **Remote Sensing of Environment**, v. 190, p. 260-273, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.12.029>.
39. MARTINO, A. J. et al. **Ice Cloud and Land Elevation Satellite–2 Project Algorithm Theoretical Basis Document for ATL02 (Level-1B) Data Product Processing**. 2018. Disponível em: <https://ICESat-2.gsfc.nasa.gov/science/data-products>. Acesso em: 18 jun. 2024.
40. MCCARTHY, M. J. et al. Automated high-resolution satellite-derived coastal bathymetry mapping. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 107, p. 102693, 2022.
41. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Zona Costeira e Marinha**. [S.d.]. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/biodiversidade/biodiversidade-aquatica/zona-costeira-e-marinha.html>. Acesso em: 14 jun. 2024.
42. MOBLEY, C. D. **Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters**. [S.l.]: Academic Press, 1994.
43. MOURÃO, K. S.; CUNHA, L. C.; BARRETO, M. L. Biodiversidade marinha e conservação do Arquipélago de Fernando de Noronha. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais**, v. 6, n. 2, p. 191-210, 2011.
44. NASA. **ICESat-2 Algorithm Theoretical Basis Document for the Atmosphere (ATL04/ATL09)**. 2018. Disponível em: https://icesat-2.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/files/ATL04_ATL09_15June2018.pdf. Acesso em: 4 jun. 2024.

45. NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **Earth Science and Applications from Space: National Imperatives for the Next Decade and Beyond**. Washington, D.C.: The National Academies Press, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.17226/11820>. Acesso em: 7 jun. 2025.
46. NATIONAL SNOW AND ICE DATA CENTER (NSIDC). **ICESat-2**. [S.d.]. Disponível em: <https://nsidc.org/data/ICESat-2>. Acesso em: 14 jun. 2024.
47. NEUENSCHWANDER, A.; PITTS, K. The ATL08 land and vegetation product for the ICESat-2 Mission. **Remote Sensing of Environment**, v. 221, p. 247–259, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.11.005>. Acesso em: 17 julho 2024.
48. NEUMANN, A.; PITTS, K. O produto terrestre e vegetal ATL08 para a Missão ICESat-2. **Sensoriamento Remoto do Meio Ambiente**, v. 221, p. 247-259, 2019.
49. NEUMANN, T. et al. **ICESat-2 Algorithm Theoretical Basis Document for the Atmosphere (ATL04/ATL09)**. Greenbelt, MD: NASA Goddard Space Flight Center, 2018. Disponível em: https://icesat-2.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/files/ATL04_ATL09_15June2018.pdf.
50. NEUMANN, T. A. et al. **Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite-2 Project Algorithm Theoretical Basis Document for Global Geolocated Photons (ATL03)**. 2018. Disponível em: <https://ICESat-2.gsfc.nasa.gov/science/data-products>.
51. NEUMANN, T. A. et al. **ATLAS/ICESat-2 L2A Global Geolocated Photon Data, Version 5**. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5067/ATLAS/ATL03.005>.
52. NEUMANN, T. A. et al. ICESat-2/ATLAS Onboard Flight Science Receiver Algorithms. **Earth and Space Science**, v. 7, n. 9, p. e2020EA001235, 2020. Disponível em: <https://www.dicio.com.br/houver/>.
53. NEUMANN, T. et al. **Ice, cloud, and land elevation satellite–2 (ICESat-2) project: Algorithm theoretical basis document (ATBD) for global geolocated photons (ATL03)**. National Aeronautics and Space Administration, Goddard Space Flight Center, 2022.
54. NEUMANN, T. et al. **ICE, CLOUD, and land elevation satellite-2 (ICESat-2) project algorithm theoretical basis document (ATBD) for global geolocated photons ATL03**. National Aeronautics and Space Administration, Goddard Space Flight Center, 2019.

55. NEUMANN, T. A. et al. The Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite–2 Mission: A global geolocated photon product derived from the advanced topographic laser altimeter system. **Remote Sensing of Environment**, v. 233, p. 111325, 2019.
56. NSIDC – NATIONAL SNOW AND ICE DATA CENTER. **ICESat-2 ATL24: L3A Along Track Coastal and Nearshore Bathymetry, Version 1 – User Guide**. Boulder, Colorado, EUA: NSIDC, 2025. Disponível em: <https://nsidc.org/sites/default/files/documents/user-guide/atl24-v001-userguide.pdf>.
57. PARRISH, C. E. et al. Validation of ICESat-2 ATLAS bathymetry and analysis of ATLAS's bathymetric mapping performance. **Remote Sensing**, v. 11, n. 14, p. 1634, 2019.
58. PARSONS, A. R. et al. ICESat-2 bathymetry and seafloor reflectance in shallow coastal waters. **Remote Sensing of Environment**, v. 270, p. 112869, 2022.
59. PARSONS, E.; BEAMAN, R.; HOLMES, K. Advances in satellite-derived bathymetry: Applications to coral reef ecosystems. **Remote Sensing**, v. 14, n. 3, p. 622, 2022.
60. PARSONS, E. C. M. et al. Advances in coastal remote sensing and marine ecosystem monitoring. **Remote Sensing of Environment**, v. 278, p. 113113, 2022.
61. PE'ER, G. et al. Satellite-derived bathymetry: Evaluating the accuracy of various approaches using Sentinel-2 and WorldView-3 data. **Remote Sensing of Environment**, v. 239, p. 111–121, 2020.
62. SAWRUK, N. W. et al. ICESat-2 laser technology readiness level evolution. In: SOLID STATE LASERS CCIV: TECHNOLOGY AND DEVICES, SPIE 9342, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1117/12.2080531>.
63. SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (CPRM). **Relatório Final do Levantamento e Processamento dos Dados de Relevo, com Aplicação da Tecnologia a Laser Aerotransportada (Area Emersa e Submersa): Fernando de Noronha**. Volume I - Texto Técnico. Realizado por LASA Prospecções S.A. Brasília, DF: CPRM, 2014. 99 p.
64. SHARMA, A.; WALKER, J. G. Paralyzable and nonparalyzable deadtime analysis in spatial photon counting. Introduction of the sequential model. **Review of Scientific Instruments**, v. 63, p. 5784, 1992. Disponível em: <https://doi.org/10.1063/1.1143364>.

65. SIAL, A. N. et al. Geologia e Geoquímica das Ilhas oceânicas do Atlântico Sul: O caso de Fernando de Noronha. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 38, n. 2, p. 234-245, 2008.
66. SIEGLE, E.; KLEIN, A. H. F.; TOLDO JR., E. E. Morphodynamic behavior of headland-bay beaches in southern Brazil: a short-term analysis. **Journal of Coastal Research**, n. SI(56), p. 1804–1808, 2009.
67. SILVA, A. C.; MATOS, L. S.; AZEVEDO, E. B. Caracterização oceanográfica e climática do Arquipélago de Fernando de Noronha. **Boletim do Instituto Oceanográfico**, v. 63, n. 1, p. 21-32, 2015.
68. SILVA, L. H. S.; DOMINGUEZ, J. M. L.; BITTENCOURT, A. C. S. P. Coastal dynamics and sedimentary processes in the Brazilian continental margin. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 44, p. 72–85, 2013.
69. SILVA, R. R. da; SAKAGAMI, Y.; HAAS, R. Recuperações do ICESAT-2 Lidar para um caso de fumaça e nuvens: estimativas na região da América do Sul. **Holos Environment**, v. 21, n. 4, p. 445–456, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.14295/holos.v21i4.12458>.
70. SLATER, P. N. **Remote sensing: optics and optical systems**. Reading: AddisonWesley, 1980. 575 p.
71. SMITH, B. E. et al. This issue, land ice height-retrieval algorithms for NASA's ICESat-2 photon-counting laser altimeter. **Remote Sensing of Environment**, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111352>.
72. SMITH, D. E. et al. The lunar orbiter laser altimeter investigation on the Lunar Reconnaissance Orbiter Mission. **Space Science Reviews**, v. 150, n. 1–4, p. 209–241, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11214-009-9512-y>.
73. SMITH, J. et al. Utilização do produto ATL13 para análises de batimetria em regiões costeiras: vantagens e desvantagens. **Geociências e Sensoriamento Remoto**, v. 27, n. 4, p. 789-802, 2019.
74. SNELL, W. **Refraction of Light in Different Media**. [S.l.: s.n.], 1621.
75. STUMPF, R. P. et al. Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types. **Limnology and Oceanography**, v. 48, n. 1, p. 547–556, 2003.

76. SUN, X. et al. ICESat/GLAS altimetry measurements: received signal dynamic range and saturation correction. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 55, n. 10, p. 5440–5454, 2017.
77. TAUBENBERGER, C. J.; FELIKSON, D.; NEUMANN, T. Brief communication: Preliminary ICESat-2 measurements of outlet glaciers reveal heterogeneous patterns of seasonal dynamic thickness change.
78. TUELL, J.; REID, R.; SMITH, R. Airborne lidar bathymetry for coastal and shallow water environments: A review. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 149, p. 19-31, 2019.
79. WILLIAMSON, J. A. et al. Statistical evaluation of dead time effects and pulse pileup in fast photon counting. Introduction of the sequential model. **Analytical Chemistry**, v. 60, n. 20, p. 2198–2203, 1988. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/ac00171a007>.
80. WMO (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION). **A preliminary cloudless standard atmosphere for radiation computation**. [S.l.]: World Climatic Program, 1986. (WCP-112, WMO/TD n. 24).
81. XU, N. et al. Global estimation and assessment of monthly lake/reservoir water level changes using ICESat-2 ATL13 products. **Remote Sensing**, v. 13, n. 14, p. 2744, 2021.
82. ZULLO JÚNIOR, J. **Correção atmosférica de imagens de satélite e aplicações**. 1994. Tese (Doutorado em [Nome do Programa, se souber]) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, 1994.