



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**José Edson de Almeida Júnior**

**AVALIAÇÃO DA RETRAÇÃO NO CURTO PRAZO DA FALÉSIA  
COSTEIRA DA BARREIRA DO INFERNO COM O USO DO LASER  
ESCÂNER TERRESTRE**

Natal

2017

**José Edson de Almeida Júnior**

**AVALIAÇÃO DA RETRAÇÃO NO CURTO PRAZO DA FALÉSIA  
COSTEIRA DA BARREIRA DO INFERNO COM O USO DO LASER  
ESCÂNER TERRESTRE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

**Orientador:** Prof. Dr. Venerando Eustáquio Amaro  
**Coorientadora:** Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Ada Cristina Scudelari

Natal

2017

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN  
Sistema de Bibliotecas - SISBI  
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Almeida Júnior, José Edson de.

Avaliação da retração no curto prazo da falésia costeira da Barreira do Inferno com o uso do Laser Escâner Terrestre / José Edson de Almeida Júnior. - 2017.

110 f.: il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Pós-Graduação em Engenharia Civil. Natal, RN, 2017.

Orientador: Prof. Dr. Venerando Eustáquio Amaro.

Coorientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Ada Cristina Scudelari.

1. Recuo de falésias - Dissertação. 2. Formação barreiras - Dissertação. 3. Erosão - Dissertação. 4. Triangulated irregular network - Dissertação. I. Amaro, Venerando Eustáquio. II. Scudelari, Ada Cristina. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 551.435.31

**José Edson de Almeida Júnior**

**AVALIAÇÃO DA RETRAÇÃO NO CURTO PRAZO DA FALÉSIA  
COSTEIRA DA BARREIRA DO INFERNO COM O USO DO LASER  
ESCÂNER TERRESTRE.**

Dissertação apresentada ao Programa de  
Pós-graduação em Engenharia Civil, da  
Universidade Federal do Rio Grande do Norte,  
como requisito parcial à obtenção do título de  
Mestre em Engenharia Civil.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. VENERANDO EUSTÁQUI AMARO – Orientador (UFRN)

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> ADA CRISTINA SCUDELARI – Coorientadora (UFRN)

---

Prof. Dr. OLAVO FRANCISCO DOS SANTOS JÚNIOR – Examinador Interno ao  
Programa (UFRN)

---

Prof. Dr. ANDRÉ LUIS SILVA DOS SANTOS – Examinador Externo a Instituição  
(IFMA)

**Natal, 18 de agosto de 2017.**

# **AVALIAÇÃO DA RETRAÇÃO NO CURTO PRAZO DA FALÉSIA COSTEIRA DA BARREIRA DO INFERNO COM O USO DO LASER ESCÂNER TERRESTRE**

**José Edson de Almeida Júnior**

**Orientador:** Prof. Dr. Venerando Eustáquio Amaro

**Coorientadora:** Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Ada Cristina Scudelari

## **RESUMO**

O presente trabalho tem como objetivo a avaliação multitemporal de curto prazo da retração numa falésia da Formação Barreiras, na área do Centro de Lançamento Barreira do Inferno (CLBI), localizada no litoral oriental do Estado do Rio Grande do Norte (RN). Os estudos foram conduzidos entre agosto de 2016 e fevereiro de 2017, com a utilização do Laser Escâner Terrestre (LT), aparelho que utiliza o pulso laser para fazer o mapeamento da falésia. A primeira etapa do estudo usou os dados da nuvem de pontos levantada em 21 de agosto de 2016, para a construção de 10 Modelos Digitais do Terreno (MDT) em quatro diferentes softwares, para a seleção do método interpolador que melhor representa a superfície estudada. A segunda etapa consistiu na caracterização da falésia quanto ao seu principal indutor erosivo, através da utilização de 30 perfis transversais a face da falésia obtidos a partir dos MDTs, gerados na etapa anterior, resultando numa subdivisão da falésia em 5 setores de acordo com esta caracterização. As avaliações e quantificação da erosão total e da taxa de retração foram conduzidas a partir da comparação entre os MDTs e perfis transversais gerados em cada um dos levantamentos. Os resultados mostraram que a falésia apresentou uma retração de aproximadamente 6 cm com uma erosão total de 333 m<sup>3</sup> no período de estudo. O resultado também mostrou a importância de se avaliar a confiabilidade da nuvem de pontos com relação a presença de vazios,

ocasionados por sombreamentos durante os levantamentos, que podem ser fontes de erros significativos. O estudo desta falésia se faz importante por ser o primeiro a utilizar o LT neste tipo de formação, como também por representar uma nova ferramenta para o entendimento da dinâmica costeira.

Palavras-Chave: Recuo de Falésia. Formação Barreiras. Erosão. Triangulated Irregular Network.

# **EVALUATION OF SHORT-TERM RETREAT THE *BARREIRA DO INFERNO* SEACLIFF USING TERRESTRIAL LASER SCANNING**

**José Edson de Almeida Júnior**

**Advisor:** Prof. Dr. Venerando Eustáquio Amaro

**Co-advisor:** Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Ada Cristina Scudelari

## **ABSTRACT**

This research aims a short-term multi-temporal evaluation of the seacliff retreat of the Barreiras Formation, in the Barreira do Inferno Launch Center (CLBI, in Portuguese) located in the eastern coast of Rio Grande do Norte (RN), Brazil. The studies were conducted between August 2016 and February 2017 through a Terrestrial Laser Scanning (TLS), which is equipment that utilizes a pulsed laser to map seacliffs face. The first phase of the study used the point cloud generated on August 21, 2016, for the construction of 10 Digital Elevation Model (DEM) via four different softwares for selecting the interpolation method that best represents the studied surface. The second phase was the description of the seacliff according to its main erosive cause through 30 transversal seacliff face profiles obtained through the DEM generated in the previous phase. It led to a subdivision of the seacliff in 5 segments according to its description. The evaluation and quantification of the net erosion and the retreat rate were conducted through comparing the DEMs with the transversal profiles generated. The results expressed that the seacliff had a retreat of approximately 6 centimeters with a net erosion of 333 m<sup>3</sup> during the study period. It was also observed the importance of evaluating the reliability of the point cloud because of the presence of blanks due to the shading during the data collection, which may cause significant errors. The evaluation of this seacliff was relevant not

only because it was the first to be done through TLS in this type of formation, but also because it represents a new way for understanding the coast dynamic.

Keywords: Cliff retreat. Barreiras Formation. Erosion. Triangulated Irregular Network.



## DEDICATÓRIA

***À minha família.***

*“Aquele que crê em mim nunca estará sozinho”*

João 12:46

*“Ser feliz sem motivo é a mais autêntica forma de felicidade”*

Carlos Drummond de Andrade

*“Em algum lugar, alguma coisa incrível está esperando para ser conhecida”*

Carl Sagan

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço profundamente a Deus por ter abençoado toda a minha vida, permitindo e dando forças em todas as etapas e momentos desta caminhada rumo ao conhecimento.

Agradeço aos meus pais, José Edson de Almeida e Gilvaneide Wanderley, por serem os primeiros incentivadores e apoiadores em todos os momentos e por representarem os exemplos de honestidade, dignidade, afeto e carinho em minha vida.

À minha esposa, Ana Paula Almeida Gomes de Souza, por estar sempre presente e ao meu lado, por ser o incentivo constante e o meu porto seguro em todos os momentos. Sou muito grato e feliz por te amar, pois, você é um exemplo e uma luz na minha vida.

Aos professores Venerando Eustáquio Amaro e Ada Cristina Scudelari, meus orientadores, os quais tenho muita admiração e agradecimentos aos ensinamentos compartilhados e especialmente a compreensão e suporte durante todo período dos estudos e pesquisas. Acima de tudo, agradeço a confiança depositada desde o início desta jornada.

Agradeço a professora Maria de Fátima Alves Matos, por todo o apoio durante todos os momentos das pesquisas e aos demais colegas e bolsistas do Laboratório de Geoprocessamento (GEOPRO) pelo apoio e suporte as atividades de campo.

Agradeço ao meu amigo Célio Isaias de Souza, por ser um grande incentivador e por compreender minhas ausências ao trabalho para desenvolver as pesquisas necessárias. Agradeço, ainda, aos meus estimados colegas do trabalho pelo incentivo e apoio de sempre.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>XII</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>XVI</b>
<b>LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS .....</b>	<b>XVII</b>
<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>1</b>
Introdução .....	1
1.1 Objetivo Geral e Específicos.....	4
1.2 Caracterização de Área de Estudo .....	4
1.2.1 Localização .....	4
1.2.2 Aspectos Geológicos e Geomorfológico .....	6
1.2.3 Aspectos Climáticos, Hidrográficos e Marinhos .....	12
<b>CAPÍTULO 2 .....</b>	<b>14</b>
<b>REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>14</b>
2.1 Erosão Costeira .....	14
2.2 Taxa de Retração em Falésias .....	21
2.3 Aplicações do Laser Escâner Terrestre (LT) .....	25
2.4 Modelo Digital do Terreno.....	32
<b>CAPÍTULO 3 .....</b>	<b>36</b>
<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>36</b>
3.1 Equipamentos e Softwares .....	38
3.2 Etapa Prévia .....	39
3.3 Aquisição dos Dados .....	39
3.4 Processamento dos Dados .....	44
3.5 Seleção do Interpolador.....	46
3.6 Análise Multitemporal.....	49

<b>CAPÍTULO 4.....</b>	<b>52</b>
<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>52</b>
4.1 Análise Comparativa entre os MDTs para a Seleção do Interpolador .....	52
4.2 Correlação entre os Perfis Transversais.....	58
4.3 Análise Multitemporal de Curto Prazo .....	64
4.3.1 Detecção das Mudanças Através dos Perfis Transversais .....	66
4.3.2 Erosão e Taxa de Retração no Curto Prazo .....	70
<b>CAPÍTULO 5.....</b>	<b>80</b>
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>80</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>84</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Vista panorâmica da Barreira do Inferno. Ao fundo, o trecho mais elevado da falésia marinha ativa que atinge ordem de 20 m de altura. ....	5
Figura 1.2 - Mapa de localização da área de estudo na Barreira do Inferno, Centro de Lançamento Barreira do Inferno (CLBI), Município de Parnamirim, Litoral Oriental do Rio Grande do Norte/RN, Nordeste do Brasil.....	6
Figura 1.3 - Relação espacial entre fácies da Formação Barreiras identificadas por Araújo et al. (2006) na área de estudo: a) Seção colunar contígua a área de estudo levantada por Araújo et al. (2006); b) Trecho principal da falésia estudada e mais próximo a seção colunar representada; c) Representação das fácies encontradas por Araújo et al. (2006) e a área de estudo; d) Arenito de textura mais grossa avermelhado na base da falésia; e) Presença de grande quantidade de seixos de quartzo.. ....	9
Figura 1.4 – Esboço das unidades litoestratigráficas presentes na área de estudo, setor do Centro de Lançamento da Barreira do Inferno (CLBI). Adaptado de Carta Geológica do Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2017). ....	10
Figura 1.5 - Área de estudo com a indicação das unidades geomorfológicas. Os depósitos eólicos vegetados e não vegetação recobrem os afloramentos da Formação Barreiras. A face da falésia se apresenta quase que inteiramente sem vegetação e é possível notar que a face da praia se apresenta com inclinação suave e não sendo identificado a presença de pós-praia. Ao fundo, a falésia apresenta em sua base materiais soltos provenientes de desmoronamentos anteriores.....	11
Figura 2.1 - Matriz para avaliação do perfil esperado de acordo com a correlação entre o perfil, a sua homogeneidade e o agente erosivo predominante em uma falésia ativa.. ....	20
Figura 2.2 - Diferentes formas de quantificação da retração em falésias.....	24
Figura 2.3 - Representação de uma superfície através de um Modelo Digital de Elevação.....	32
Figura 2.4 – Métodos para a determinação dos valores da superfície de acordo com o interpolador utilizado. a) Inverse Distance Weighting (IDW); b) Natural Neighborhoods (NN); c) Kriging; d) Triangular irregular Network (TIN). ....	34
Figura 3.1 – Procedimentos metodológicos adotados nesta pesquisa. Com todas as etapas de atividades de campo, processamento dos dados, seleção do interpolador, processamento e análise multitemporal. ....	37

Figura 3.2 – Barreira do Inferno e a faixa de areia disponível mostrando o trecho saturado na zona do estirâncio e ao fundo a falésia marinha ativa recoberta por campos dunares.....	39
Figura 3.3 - Laser Escâner Terrestre (LT) montado sobre base robótica, tripé e base metálica durante o primeiro levantamento de campo em 21/08/2016. ....	40
Figura 3.4 – Contexto geral da área estudada: a) na imagem são indicados os posicionamentos do Laser Escâner Terrestre (LT) e dos Alvos de controle durante o primeiro levantamento de campo realizada em 21/08/2016; b) Laser Escâner Terrestre (LT) montado sobre base robótica, tripé e base metálica; c) Alvo de controle.....	43
Figura 3.5 - Nuvem de pontos das feições geomorfológicas (praia, falésia e duna) da Barreira do Inferno obtida através do PolyWorks. ....	45
Figura 3.6 - Trecho selecionado para a geração dos Modelos Digitais do Terreno comparativos para a seleção do método interpolador. Destaque para a ocorrência de cavas na base da falésia.....	47
Figura 3.7 - Distribuição dos pontos da seção escolhida para a criação dos Modelos Digitais do Terreno e Perfis transversais para cada um dos softwares e interpoladores testados.....	48
Figura 3.8 - Mapa de Kernel com a densidade dos pontos da nuvem do 1º levantamento. No detalhe, a seção escolhida para a seleção do interpolador.....	48
Figura 3.9 - Variação sazonal do nível da face de praia entre a primeiro e o segundo levantamento de campo. a) 21/08/2016, b) 24/02/2017. ....	50
Figura 3.10 - A seção hachurada representa o setor da falésia acima da cota +3,0m utilizada para a comparação entre os levantamentos realizados em 21/08/2016 e 24/02/2017. ....	51
Figura 4.1 – Modelos Digitais do Terreno (MDTs) com os perfis transversais comparativos (Superfície obtida X nuvem de pontos) gerados no ArcMap com os seguintes interpoladores: a) TIN; b) Kriging; c) IDW; d) NN. Detalhe para a ausência da cava em todos os modelos e a interpolação inadequada da parte superior da superfície com o uso do IDW e o NN. ....	53
Figura 4.2 – Modelos Digitais do Terreno (MDTs) com os perfis transversais comparativos (Superfície obtida X nuvem de pontos) gerados no Surfer com os seguintes métodos interpoladores: a) IDW; b) NN; c) Kriging; d) TIN. Detalhe para a ausência da cava em todos os modelos e interpolação inadequada da parte superior da superfície em todos os métodos utilizados.....	54

Figura 4.3 - Modelo Digital do Terreno (MDT) com o perfil transversal comparativo (Superfície obtida X nuvem de pontos) gerado com o CloudCompare. Detalhe para a presença da cava no modelo. ....	55
Figura 4.4 – Modelo Digital do Terreno com o perfil transversal comparativo (Superfície obtida X nuvem de pontos) gerado no Global Mapper. Detalhe para a ausência da cava no modelo e falta de precisão entre os pontos da nuvem e o perfil na parte superior. ....	55
Figura 4.5 - Comparação entre os Modelos Digitais do Terreno gerados entre o CloudCompare (a) e o ArcMap (b) com destaque para as áreas das cavas. ....	57
Figura 4.6 - Modelo Digital do Terreno gerado com o CloudCompare: a) MDT da seção de teste; (b) Perfis transversais; (c) Convergência entre o perfil transversal e a nuvem de pontos; (d) detalhe dos perfis transversais com ênfase para a área das cavas existentes na base da falésia junto a praia. ....	58
Figura 4.7 - Modelo Digital do Terreno gerado a partir do CloudCompare com a locação dos perfis transversais à face da falésia utilizados para identificação do principal indutor erosivo. ....	59
Figura 4.8 - Localização dos 5 setores onde tiveram os seus perfis transversais agrupados. Setor 01 – 5 perfis com altura máxima de 13m sem a identificação da crista da falésia; Setor 02 – 8 perfis com altura média de crista da falésia de 11,0m ; Setor 03 – 4 perfis com altura média da crista da falésia de 12,5m; Setor 04 – 5 perfis com altura média da crista da falésia de 19 m ; Setor 05 – 8 perfis com altura média da crista da falésia em 20m. ....	60
Figura 4.9 – Adaptação da matriz proposta por Emery & Kuhn (1982). Adaptação em destaque com a inclusão dos perfis esperados para o caso de camada mais resistente no topo e na base da falésia, onde M – causas marinhas; SA – causas continentais. ....	61
Figura 4.10 - (a) Setor 01- falésia de perfil suave e com a presença de sulcos e voçorocas; (b) e (c) Setor 02 – Notar a inclinação quase vertical e a presença de materiais oriundos de deslizamentos anteriores; (d) Setor 03– Perfis com inclinação variando entre 30° e 60° com a presença material solto em sua base e na face da falésia; (e) Setores 04 e 05 – Setores com predominância vertical e presença de material solto na base. ....	63
Figura 4.11 - Modelo Digital do Terreno gerado a partir dos dados levantados em (a) 21/08/2016 e (b) 24/02/2017. ....	65
Figura 4.12 - (a) Representação tridimensional do Modelo Digital do Terreno gerado a partir dos dados levantados em (a) 21/08/2016 e (b) 24/02/2017 ....	66
Figura 4.13 - Locação dos perfis transversais comparativos por setor. ....	67



Figura 4.14 - Perfis transversais comparativos entre os dois levantamentos de campo realizados em 21/08/2016 e 24/08/2017. ....	68
Figura 4.15 – Vista de trecho do setor 01 durante os dois levantamentos de campo. Na área em destaque é evidenciado na faixa de praia sinais de constantes fluxos pluviais. ....	69
Figura 4.16 - Vista de trecho do setor 02. Em sentido horário começando do alto à esquerda é possível notar em destaque a presença de material solto que foi removido parcialmente durante todo o monitoramento. ....	69
Figura 4.17 – (a) e (c) mostram as nuvens de pontos do setor 01 levantadas em 21/08/2016 e 24/02/2017 respectivamente, este setor apresentou grandes vazios e pontualmente apresentaram diferenças de cobertura entre si, mostradas nas áreas destacadas; (c) e (d) exibem os MDTs do setor 01 para os dois períodos, no destaque é possível observar a diferença nas superfícies em cada um dos modelos.....	71
Figura 4.18 - Fonte de erro motivada pela locação do LT com relação a face da falésia em áreas de muitos recortes. a) A posição do LT mais distante com relação a face da falésia permitiu uma maior varredura das erosões existentes no setor 01; b) e c) demonstram que para a mesma face da falésia os Modelos Digitais do Terreno podem gerar superfícies com diferenças significativas apenas com a mudança da posição de instalação do LT. ....	72
Figura 4.19 – (a) e (b) mostram as nuvens de pontos do setor 01 levantadas em 21/08/2016 e 24/02/2017 respectivamente, em destaque as áreas com maiores discrepâncias entre os levantamentos; (c) e (d) exibem os MDTs do setor 01 para os dois períodos, na área destacada é possível observar a diferença nas superfícies de cada um dos modelos. ....	74
Figura 4.20 - (a) e (c) mostram as nuvens de pontos do setor 03 levantadas em 21/08/2016 e 24/02/2017 respectivamente, em destaque as áreas com maiores discrepâncias entre os levantamentos; (c) e (d) exibem os MDTs do setor 03 para os dois períodos, na área destacada é possível observar a diferença nas superfícies de cada um dos modelos. ....	75
Figura 4.21 – (a) e (b) mostram as nuvens de pontos do setor 04 coletadas em 21/08/2016 e 24/02/2017 respectivamente, com destaque para a área com baixa densidade de pontos; (c) e (d) exibem os MDTs do setor 04 do primeiro e do segundo levantamento respectivamente, na área destacada é possível observar a diferença nas superfícies de cada um dos modelos. ....	77
Figura 4.22 - (a) e (b) mostram as nuvens de pontos do setor 05 coletadas em 21/08/2016 e 24/02/2017. ....	78

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Compilação de estudos que objetivaram a quantificação da taxa de retração em falésias. ....	23
Tabela 3.1 - Especificações técnicas do modelo ILRIS-3D. ....	38
Tabela 3.2 - Configuração utilizada no laser escâner terrestre para a aquisição dos dados em cada um dos levantamentos de campo. ....	42
Tabela 3.3 - Coordenadas geodésicas dos pontos de controle: L – Coordenada Leste, N – Coordenada Norte, dL – Desvio padrão para a coordenada Leste, dN – Desvio padrão para a coordenada Norte, dH – Desvio, H - altura Ortométrica. ....	44
Tabela 3.4 - Dados estatísticos da área selecionada para a geração dos Modelos Digitais do Terreno comparativos. ....	47
Tabela 4.1 - Relação dos Modelos Digitais do Terreno gerados para cada um dos softwares e os respectivos métodos interpoladores existentes. ....	52
Tabela 4.2 - – Comparação do tempo de processamento para a elaboração dos Modelos Digitais do Terreno para cada um dos softwares e os respectivos métodos interpoladores adotados. ....	57
Tabela 4.3 - Identificação do agente erosivo predominante para cada um dos setores da falésia. ....	62
Tabela 4.4 - Volumes de erosão e taxa de retração calculado a partir do levantamento com o LT da falésia da Barreira do Inferno para o período de levantamento: 21/08/2016 a 24/02/2017. ....	70
Tabela 4.5 - Dados de volume de erosão e taxa de retração para os setores 02 e 2A. ....	73
Tabela 4.6 - Dados de volume de erosão e taxa de retração para os setores 03 e 3A. ....	76
Tabela 4.7 - Dados de volume de erosão e taxa de retração para os setores 04 e 4A. ....	76
Tabela 4.8 - Volumes de erosão e taxa de retração calculado a partir do levantamento com o LT da falésia da Barreira do Inferno para o período de levantamento: 21/08/2016 a 24/02/2017 ....	79

**LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS**

CBLI	Centro de Lançamento Barreira do Inferno
ESSE	Leste-Sudeste
EUA	Estados Unidos da América
GEOPRO	Laboratório de Geoprocessamento da UFRN
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
IDW	Inverse Distance Weighting
IGARN	Instituto de Gestão das Águas do Rio Grande do Norte
ILRIS	Intelligent Laser Ranging & Imaging System
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiance
LA	Laser Escâner Aerotransportado
LT	Laser Escâner Terrestre
MAPGEO	Modelo de Geoide Gravimétrico do IBGE
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDS	Modelo Digital de Superfície
MDT	Modelo Digital do Terreno
NM	Nível médio dos Mares
NN	Natural Neighborhood
NRM	Nível Relativo do Mar
RN	Rio Grande do Norte
PEC	Departamento de pós-graduação em Engenharia Civil da UFRN
PPK	Postprocessed Kinematic
SE	Sudeste
SGB	Sistema Geodésico do Brasil
SIG	Sistema de Informações Geográficas

SSE	Sul-Sudeste
TAMAR	Projeto Tartaruga Marinha
TIN	Triangular Irregular Networks
WGS84	World Geodetic System
UFRN	Universidade Federal do Rio Grande do Norte
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

## CAPÍTULO 1

# Introdução

Mais da metade da população mundial vive em regiões costeiras (Bird, 2008). Diversas são as atividades e atratividades que as regiões litorâneas possuem, sejam pela sua biodiversidade, suas belezas cênicas naturais e as diversas atividades econômicas que podem ser desempenhadas nesses setores geográficos estratégicos. Estas regiões são os limites entre a zona continental emersa e marinha, gerando receitas para, por exemplo, as atividades turísticas, imobiliárias, transportes, atividades portuárias, recreativas e esportivas.

Nas últimas décadas, grande parte dessas regiões costeiras tem sofrido a intensificação do aumento populacional, para usos diversificados. Esta ocupação antrópica tem ocorrido nos setores do sistema praias-dunas e estuários, mas também nas áreas de topo de falésias marinhas, com a construção de infraestruturas diversas. Um dos fatores que promovem tanto interesse, especificamente em relação às falésias, é movido pelo grande fascínio que despertam devido à beleza paisagística, por proporcionar visão ampla dos Oceanos (Marques, 2009; Dewez *et al.*, 2013). Os diversos tipos de falésias representam 80% de todas as linhas de costas ao redor do mundo (Emery & Kuhn, 1982).

Nesta Dissertação, usa-se o termo falésia como um complexo de topologia íngreme (geralmente com inclinação superior a 40°), frequentemente vertical e, por vezes, com inclinação negativa, formado pela ação erosiva (abrasão) das ondas sobre os estratos litológicos (Suguio, 1998). As falésias por vezes estão recuando em sua base, como resultado da erosão marinha, acompanhada pela erosão continental da face e do seu topo decorrente de escoamento superficial e pluvial. As falésias estão diretamente expostas a um conjunto amplo de variáveis ambientais que interferem em sua morfologia, tais como: arrebentação das ondas, correntes, ação de ventos, variação das marés, tempestades, sismos, ocupação vegetacional, entre outras. Porém, quando exposta diretamente ao contínuo processo de erosão denomina-se falésia marinha ativa, tratando-se do tipo de falésia que ocorre ao longo da linha de costa atual (Suguio, 1998).

As falésias marinhas calham com uma bem definida quebra entre a terra (porção emersa) e o mar. Podem ter variações na inclinação das faces, geralmente vertical a subvertical, formadas quando a erosão costeira promove os deslocamentos e desmoronamentos (Dias & Neal, 1992; Moore & Griggs, 2002; Lim *et al.*, 2005; Bird, 2008). Sua topologia é diretamente ligada aos agentes erosivos predominantes, no caso das costeiras os agentes marinhos, as suas características mecânicas, a consolidação do material e as diferenças na resistência entre as camadas estratigráficas existentes (Emery & Kunh, 1982). Portanto, considerando-se este aspecto, as falésias marinhas têm uma grande variação de características geomorfológicas dependentes de sua composição, estrutura e exposição ao intemperismo e à ação das forças marinhas (Doody & Rooney, 2015).

Diante do interesse econômico existente sobre as zonas costeiras, tratam-se de regiões sujeitas às intensas transformações e constantes mudanças morfológicas, tanto influenciadas por fatores naturais quanto antropogênicos, nas diferentes escalas espaço-temporais (de curto, médio e/ou longo prazo), como destacam alguns trabalhos de referência como Emery & Kuhn (1982), Dias & Neal (1992), Moore & Griggs (2002) e Hoffmeister *et al.* (2012). Neste contexto complexo de interesses da ocupação antrópica e da intensa dinâmica de mudanças físicas espaço-temporais, o estudo da erosão costeira conexa às falésias marinhas tem papel relevante no reconhecimento dos processos envolvidos (Santos Jr. *et al.*, 2011) e às mudanças do nível médio do mar (NM) no Cenozóico.

Alguns autores já destacaram que a presença humana nesse ambiente é um dos principais agentes transformadores, ocasionado pela ocupação desordenada em regiões com elevados riscos (Souza *et al.*; 2005; Suguio, 2010). Desta forma, a interação entre o crescimento ocupacional e o processo erosivo natural nas falésias transforma-se em catalizador de graves problemas para as comunidades costeiras (Del Rio *et al.*, 2009). Santos Jr. *et al.* (2011) relatam que a ocupação urbana em áreas de falésias tem sido o motivador de risco, devido as ameaças de desmoronamentos e as ações dos processos erosivos. Entretanto, diversos estudos em zonas costeiras ao redor do mundo têm focado exclusivamente nas ações dinâmicas de setores praias, sendo ainda reduzidos, comparativamente, os estudos que tratam dos processos erosivos que atuam nas áreas de falésias (Del Rio *et al.*, 2009). No Brasil, e especificamente na Região Nordeste, o mesmo também pode ser aludido, pois ainda

são poucos os estudos com enfoque na erosão de falésias marinhas ativas e na quantificação da taxa de retração das mesmas.

No Estado do Rio Grande do Norte (RN), localização da área de estudo, vale ressaltar que o a linha de costa tem extensão aproximada de 410 km, ocupada por 23 municípios que concentram quase 50% da população do Estado. Esta é constituída preponderantemente por praias arenosas (72%) e falésias ativas (26%) compostas por litologias pertencentes à Formação Barreiras (Vital, 2003; Vital *et al.*, 2006b). As atividades turísticas e imobiliárias na zona costeira desempenham papel importante para a economia do RN, assim como a preservação deste ambiente deveria ser um fator relevante para a gestão sustentável dessa fonte econômica. A ocupação imobiliária das áreas do topo das falésias, análogo ao que ocorre ao redor do mundo, já é uma realidade nesse litoral, em que os empreendimentos cada vez mais disputam espaço entre si e com importantes áreas de preservação ambiental. Vários são os exemplos na costa do RN em que os processos erosivos se manifestam sobre setores de importância socioeconômica, como por exemplo, a área urbana da Praia de Ponta Negra (Amaro *et al.*, 2013; Amaro *et al.*, 2015).

Os métodos e resultados apresentados nesta Dissertação de Mestrado abordam o estudo realizado no setor de falésias marinhas no litoral oriental do RN conhecido como Barreira do Inferno, inserida no Município de Parnamirim, a sul da cidade de Natal, capital do Estado. Trata-se do primeiro estudo para avaliação multitemporal de curto prazo (6 meses) das modificações ocorridas em falésia com litologias da Formação Barreiras empregando o Laser Escâner Terrestre (LT). O estudo possibilitou o reconhecimento local da dinâmica da erosão costeira e a quantificação da taxa de retração no curto prazo. Por ser um estudo pioneiro para este tipo de aplicação, pretende-se que as discussões apresentadas sirvam como modelo para trabalhos futuros com mesma temática, neste local ou em outros setores costeiros, para coleta e processamento de dados em intervalos temporais mais amplos (médios e longos prazos).

Nas zonas costeiras, os processos erosivos agem de modo contínuo, induzidos pelas forçantes marinhas, e a tecnologia do LT, combinado com a precisão de levantamentos geodésicos, permite a detecção e a mensuração em alta acurácia e precisão das modificações de seções instáveis em qualquer escala temporal. A vantagem da praticidade de sua utilização se confirma diante das dificuldades de

acesso para o mapeamento dos pontos de interesse na face e no topo de falésias com os equipamentos convencionais, incluindo também o custo, para alcance da precisão pretendida (Gutierrez *et al.*, 2001; Santos 2014; Santos *et al.*, 2014; Santos *et al.*, 2015b).

## **1.1 Objetivo Geral e Específicos**

Compreender as modificações de curto prazo em falésia marinha ativa no litoral oriental do RN é a principal motivação desta atividade de pesquisa, visto que a área de estudo é susceptível a processos erosivos diversos. As atividades de pesquisa tiveram como objetivo principal a análise multitemporal de curto prazo (6 meses) e mensuração em alta precisão e acurácia das modificações ocorridas na falésia da Barreira do Inferno através do uso do LT combinado a levantamentos geodésicos.

Neste contexto, desdobram-se como objetivos específicos:

- Seleção do método interpolador mais adequado;
- Caracterização da falésia a partir dos perfis transversais à face da falésia com relação ao principal agente indutor erosivo;
- Elaboração e comparação dos Modelos Digitais do Terreno (MDT), para cada um dos levantamentos de campo para a obtenção do volume de erosão ocorrido no período;

## **1.2 Caracterização de Área de Estudo**

### **1.2.1 Localização**

A falésia marinha ativa objeto deste estudo está inserida no contexto do Centro de Lançamento Barreira do Inferno (CLBI), área militar localizada no Município de Parnamirim, a 12 km a sul da cidade de Natal/RN. O CLBI foi criado no dia 12 de outubro de 1965 como a primeira base aérea de foguetes da América do Sul para o lançamento de foguetes de sondagem e rastreamento de engenhos espaciais e a escolha da sua localização obedeceu às seguintes disposições: proximidade com o equador



magnético, suporte logístico pré-existente; ampla área de impacto (oceano) e condições climáticas favoráveis, com baixo índice pluviométrico e condições de ventos predominantemente favoráveis (CLBI, 2017).

O CLBI ocupa área de aproximadamente 1.800 ha com um total de 9 km de linha de costa, apresentando grande importância ecológica e ambiental para o litoral oriental do RN. Na praia arenosa do CLBI ocorrem as maiores densidades de desova da tartaruga de pente no Atlântico Sul (TAMAR, 2016). Trata-se da conhecida Barreira do Inferno que teve sua denominação atribuída a cor avermelhada da falésia, motivada pela presença de óxido de ferro que, para os antigos pescadores, sob os raios do sol ao amanhecer, assemelhavam-se à labaredas de fogo.

A falésia principal da área do CLBI têm aproximadamente 2,5 km de extensão de exposição lateral com altura variável alcançando 20 m de altura na sua parte central (Figura 1.1). Para esta pesquisa considerou-se um trecho de aproximadamente 650 m da falésia principal, trecho destacado na Figura 1.2.

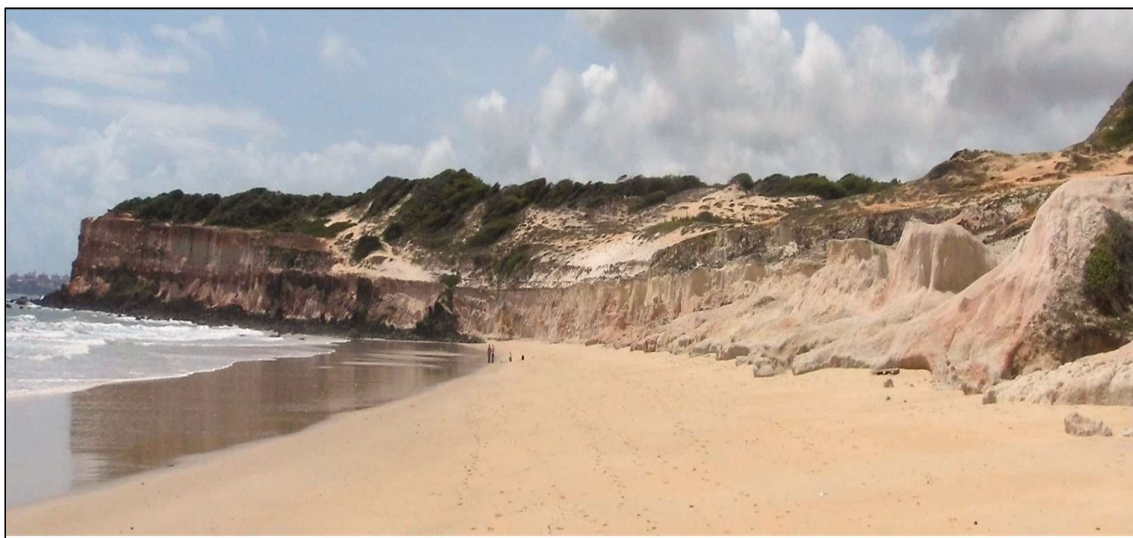


Figura 1.1 – Vista panorâmica da Barreira do Inferno. Ao fundo, o trecho mais elevado da falésia marinha ativa que atinge ordem de 20 m de altura.

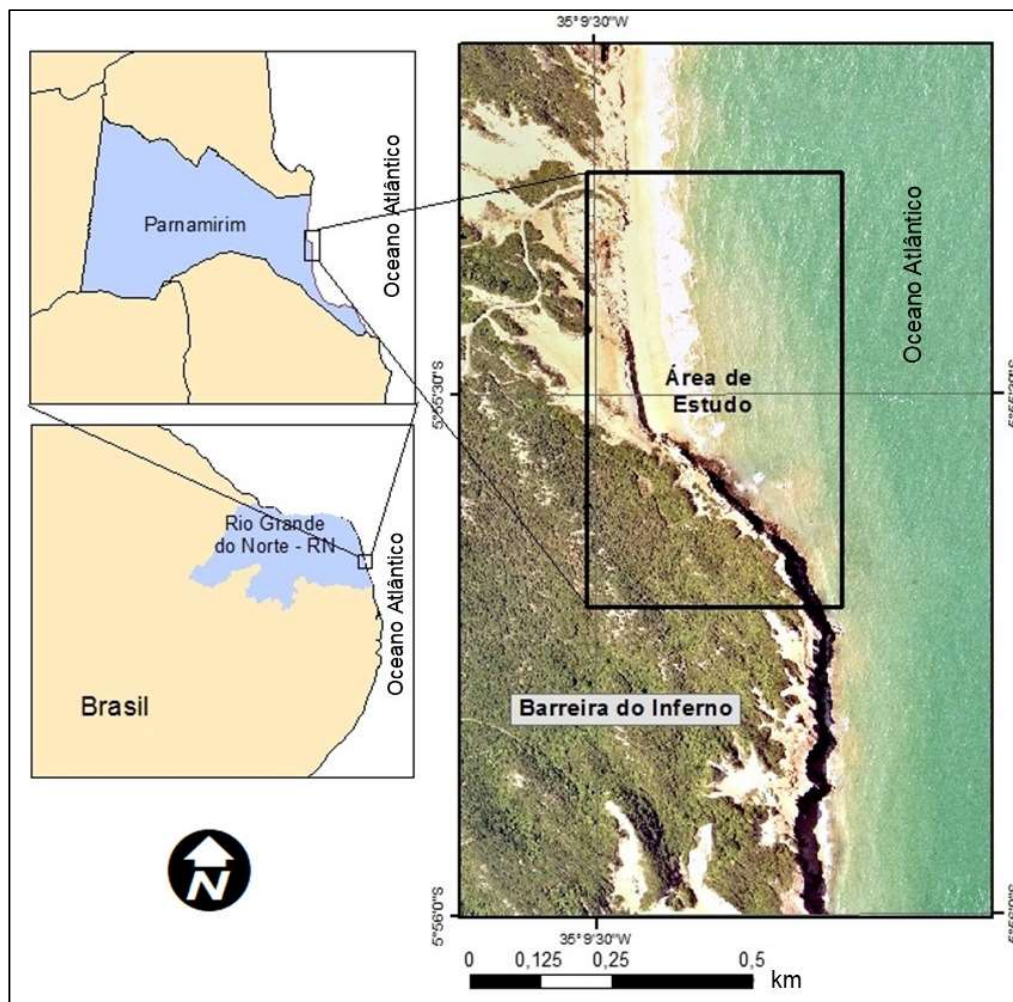


Figura 1.2 - Mapa de localização da área de estudo na Barreira do Inferno, Centro de Lançamento Barreira do Inferno (CLBI), Município de Parnamirim, Litoral Oriental do Rio Grande do Norte/RN, Nordeste do Brasil.

### 1.2.2 Aspectos Geológicos e Geomorfológico

O litoral do RN é normalmente subdividido em dois setores distintos: litoral oriental e litoral setentrional. O litoral oriental tem como principal característica morfológica a sequência de baías em forma de zeta com erosão relacionada à padrões de refração e difração de ondas devido a processos de erosão diferencial da Formação Barreiras, na presença de direção predominante de aproximação das ondas. É observado também a predominância de campos de dunas parabólicas controladas pela vegetação. No setor setentrional as dunas são em sua maioria barcanas e barcanóides. Também faz presente neste setor os sistemas de ilhas

barreiras entre a ponta do mel e a ponta dos Três Irmãos (Vital *et al.*, 2006a). O litoral oriental é onde a Barreira do Inferno está inserida e é compreendido desde o Cabo do Calcanhar (Município de Touros) até a divisa com o Estado da Paraíba. Este litoral tem um comprimento de 166 km, sendo destes, 65 km de falésias ativas da Formação Barreiras (Vital, 2003; Vital *et al.*, 2006a).

A Formação Barreiras tem sua ocorrência desde o Estado do Rio de Janeiro até o Estado do Amapá, caracterizada pela ocorrência quase contínua e pela regularidade geomorfológica, tornando-se a unidade mais importante da costa brasileira (Arai, 2006; Araújo *et al.*, 2006; Furlan, 2014; Moura-Fé, 2014). Esta Formação está sendo estudada desde o início do século 20 (Arai, 2006; Araújo *et al.*, 2006; Moura-Fé, 2014). No entanto, segundo Moura-Fé (2014), diversos pormenores a respeito da sua gênese e da idade geológica permanecem indefinidas, refletindo na sua denominação litoestratigráfica. Alguns autores, divergem na forma adotada para a sua denominação, como por exemplo Araújo *et al.* (2006) que nomeia como Formação em sua pesquisa. Em contraponto, Arai (2006) atribui à denominação de Grupo. Foi adotado a denominação Formação Barreiras neste trabalho por ser a esta mais adotada em estudos recentes (Moura-Fé, 2014).

A Formação Barreiras origina-se por sedimentos Terciários e moldados no Pleistoceno e no Holoceno, formando os tabuleiros e coberta por depósitos arenosos Quaternários até atingir a costa, onde se apresentam como falésias. Ao longo da costa, os sedimentos da Formação Barreiras apoiam-se sobre o embasamento cristalino e são marcados pelas falésias esculpidas, onde a sedimentação litorânea é escassa ou inexistente (Barreto *et al.*, 2004; Souza *et al.*, 2005; Muehe, 2006; Vital *et al.*, 2006; Souza, 2009; Suguio, 2010). A Formação Barreiras é composta por camadas intercaladas de arenitos e argilas com conglomerados. Cimentos ferruginosos também são encontrados e em alguns casos, os sedimentos da Formação Barreiras normalmente estão sobrepostos por dunas eólicas (Araújo *et al.*, 2006; Muehe, 2006; Santos Jr. *et al.*, 2011). Após as falésias, observa-se a praia, a qual possui largura variável ao longo da costa, limitando-se em alguns trechos com a presença de arenitos e possuindo um reduzido aporte de sedimentos (Muehe, 2006).

No aspecto geológico, especificamente o afloramento da Formação Barreiras na falésia marinha da Barreira do Inferno foi estudado por Araújo *et al.* (2006). Os autores observaram que a falésia apresenta sucessivas camadas de arenitos

intercaladas por camadas menos espessas de lamitos, localizadas em situação centralizada na face da falésia, ou seja, acima da influência da arrebentação das ondas e abaixo do topo da falésia, conforme seções colunares levantadas pelos autores. Assim, foram identificadas três litofácies principais, que se empilham verticalmente, com as seguintes denominações: (i) primeira fácies–conglomerados, sustentados por matriz arenosa, com estratificação cruzada acanalada de grande e médio porte e, subordinadamente, conglomerados com clastos suportados, predominando seixos, feldspatos e clastos de argila;(ii) segunda fácies– arenitos de textura muito grossa, grossa e média, de cor amarelada, com estratificação cruzada acanalada e subordinadamente tubular, mostrando seixos dispersos; e (iii) terceira fácies– lamitos, com diferentes proporções de argila, silte e areia, mostrando coloração avermelhada, com intercalação de arenito fino e muito fino. A Figura 1.3 correlaciona uma das seções colunares levantadas pelos autores com a área de estudo. Os autores também explanam que é possível interpretar a existência de depósitos de preenchimento de canal (primeira e segunda fácies) e de depósitos de planície de inundação (terceira fácies), conforme o modelo de fácies proposto por Walker (1976) para sistemas fluviais meandrantos. Em contraponto, Arai (2006) aponta que muitas das litofácies descritas como sistema fluvial meandrantos seriam, na verdade, associadas a um ambiente costeiro transicional, dando um caráter de ampla influência marinha para a Formação Barreiras.

Quanto às características geomorfológicas do litoral oriental, as praias arenosas, os campos dunares, as planícies estuarinas e os depósitos sedimentares da Formação Barreiras são os elementos de relevo predominantes no litoral oriental, com planícies fluviais restringindo-se a desembocadura dos principais rios (Barreto *et al.*, 2004; Vital *et al.*, 2006a; Vital *et al.*, 2006b). Outra característica marcante do litoral oriental é a presença de linhas de arenitos praias (*beachrocks*) intermitentes e aproximadamente paralelas à linha de costa, que se comportam como barreiras naturais às forças hidrodinâmicas, alterando o padrão de arrebentação das ondas e assim acentuando a erosão costeira nas áreas de interrupção de suas ocorrências (Vital, 2003; Vital *et al.*, 2006a). Segundo Muehe (2006), a costa do litoral oriental está inserida no chamado Macrocompartimento Costa do Tabuleiro Norte.



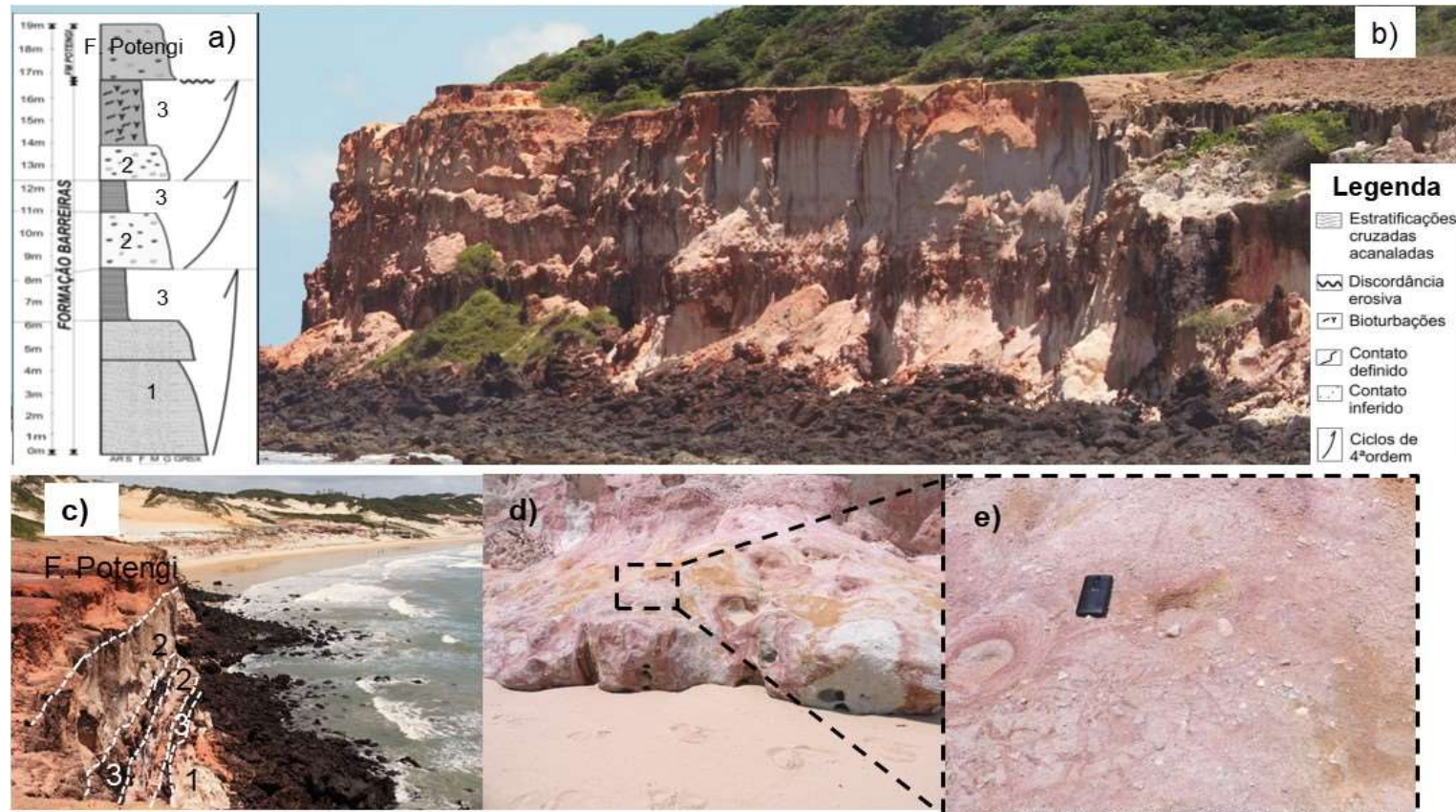


Figura 1.3 - Relação espacial entre fácies da Formação Barreiras identificadas por Araújo et al. (2006) na área de estudo: a) Seção colunar contigua a área de estudo levantada por Araújo et al. (2006); b) Trecho principal da falésia estudada e mais próximo a seção colunar representada; c) Representação das fácies encontradas por Araújo et al. (2006) e a área de estudo; d) Arenito de textura mais grossa avermelhado na base da falésia; e) Presença de grande quantidade de seixos de quartzo.

Legenda: 1 – Arenito avermelhado (1ª fácies); 2 – Arenito de cor amarelada (2ª fácies); 3 - Lamito de cor avermelhada (3ª fácies).

Localmente, a face da falésia marinha apresenta-se livre de outros sedimentos e no seu topo é sobreposta por depósitos eólicos vegetados e não vegetados, campos dunares, conforme mostrado no esboço geológico da Figura 1.4.

A área de estudo apresenta as seguintes características principais: (a) A falésia apresenta-se com uma altura de até 20 m; (b) a vegetação é praticamente nula em toda a sua face; (c) a faixa de praia frontal à falésia marinha é variável quanto à extensão e declividade, chegando a ser quase inexistente em seu trecho de maior elevação e mais íngreme, mesmo em baixamar nas marés de sizígia, e em outros setores apresentam os elementos praias: ante praia e estirâncio, não sendo identificado o pós-praia (Figura 1.5).

Em termos de compartimentação de relevo na região litorânea compreendida pela área de estudo, foram identificadas as seguintes feições geomorfológicas: campos de dunas fixas (depósitos eólicos litorâneos vegetados) e dunas móveis (depósitos eólicos litorâneos não vegetados) e falésias da Formação Barreiras.

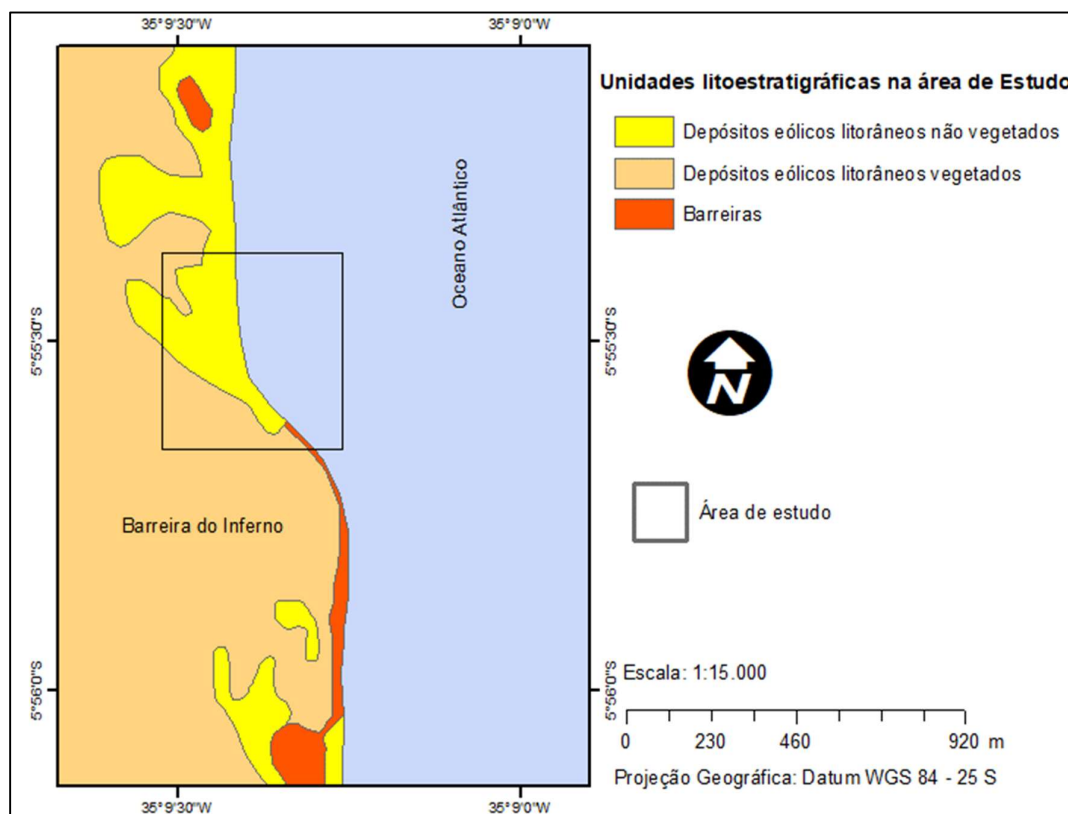


Figura 1.4 – Esboço das unidades litoestratigráficas presentes na área de estudo, setor do Centro de Lançamento da Barreira do Inferno (CLBI). Adaptado da Carta Geológica do Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2017).

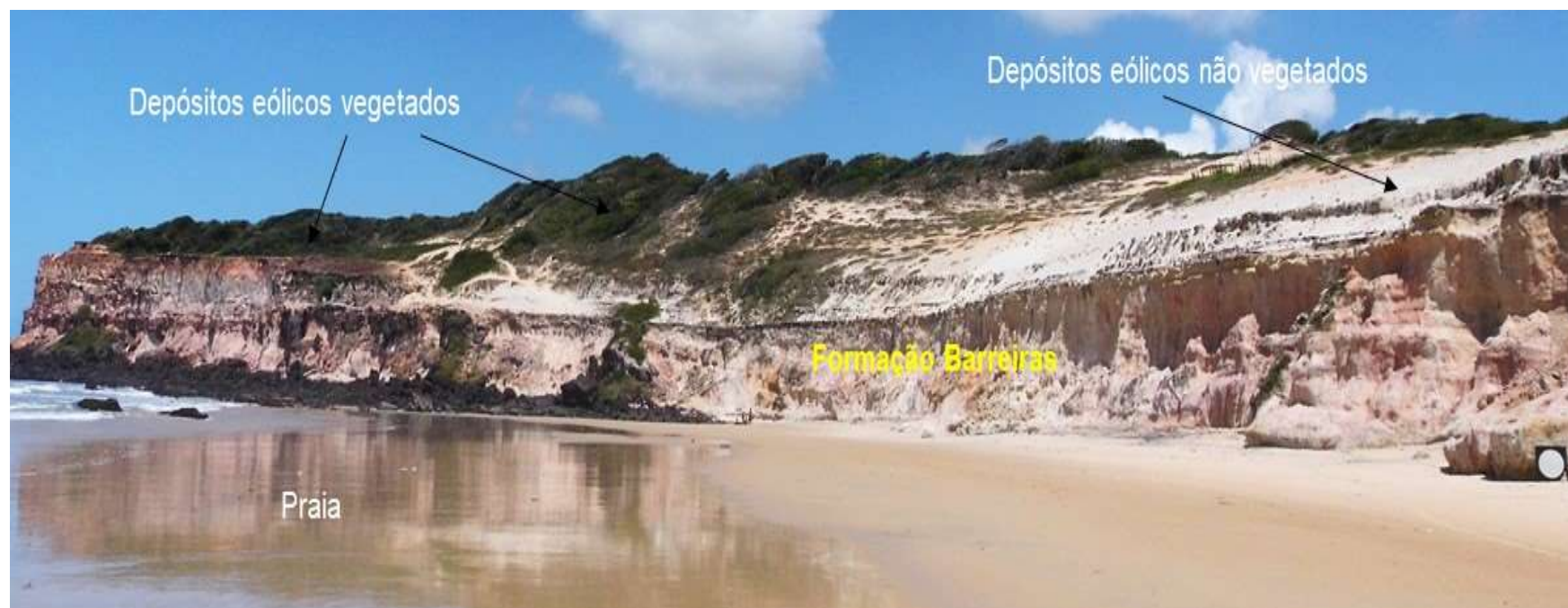


Figura 1.5 - Área de estudo com a indicação das unidades geomorfológicas. Os depósitos eólicos vegetados e não vegetados recobrem os afloramentos da Formação Barreiras. A face da falésia se apresenta quase que inteiramente sem vegetação e é possível notar que a face da praia se apresenta com inclinação suave e não sendo identificado a presença de pós-praia. Ao fundo, a falésia apresenta em sua base materiais soltos provenientes de desmoronamentos anteriores.

Os depósitos eólicos fixos são representados por paleodunas ou dunas fixas, compostas por sedimentos eólicos quaternários, constituídos predominantemente por areias finas e finas a médias quartzosas, bem selecionadas e grãos arredondados. Ocorrem sobrepostos a Formação Barreiras e com cobertura vegetal, que protegem os sedimentos da erosão por transporte eólico. Os depósitos eólicos móveis não vegetados, dunas móveis, são formados por processos eólicos e constituídos por areia fina a média quartzosa, esbranquiçada e apresentam grãos bem arredondados a subarredondados, como também selecionados e estão sujeitas a retrabalho eólico (Ferreira Jr., 2005).

### **1.2.3 Aspectos Climáticos, Hidrográficos e Marinhos**

O clima é fator primordial para a compreensão dos processos erosivos e do comportamento da dinâmica costeira, através das correlações possíveis com os dados de precipitações, energia de ondas, direções de correntes e ondas, amplitude das marés, direção e velocidade dos ventos. Agindo direta ou indiretamente, tais características contribuem para a modificação da morfologia e fisiografia litorânea, sobretudo nas praias arenosas, campos de dunas móveis e falésias marinhas ativas.

O clima nesta porção do RN é quente e úmido, do tipo As', de acordo com a classificação internacional de Köppen, com uma temperatura média anual acima de 26°C (Nimer, 1989). A média anual de precipitação obtida entre anos de 2006 e 2016 foi de 1.516 mm/ano na região do estudo, em Parnamirim (EMPARN, 2017). Para Nimer (1989), nesta região, ocorrem entre 45% e 50% das chuvas no trimestre mais chuvoso (Abril-Maio-Junho) e também apresenta média de 4 a 5 meses secos por ano. Em razão do clima, a região apresenta duas estações bem definidas, sendo uma seca e outra chuvosa. Pode dizer que a região apresenta um regime térmico relativamente uniforme de baixa amplitude ao longo de todo o ano.

Ainda segundo Nimer (1989), as alterações anuais do clima estão relacionadas ao movimento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). A ZCIT influencia o clima em toda a Região Nordeste do Brasil e a sua posição pode oscilar, conforme ocorram mudanças de temperaturas na superfície do Oceano Atlântico. De acordo com a sua posição e seu tempo de permanência sobre a região, pode provocar anos com



pluviosidade excessiva ou anos com estiagem. Esta massa de ar tropical possui temperaturas mais ou menos elevadas, fornecidas pela intensa radiação solar e forte umidade específica proveniente da intensa evaporação marítima.

Com relação aos ventos, a área de estudo é caracterizada pelo padrão de ventos alísios com forte componente SE, variando sazonalmente entre as direções SSE e ESE. Já em relação a sua intensidade, a média mensal entre 2006 e 2016, indica que os meses de setembro a novembro são os que apresentam maiores velocidades médias nos meses de abril e maio são os que apresentam os menores. Entretanto, a diferença média entre os meses com maiores e menores intensidades de ventos é relativamente pequena, sendo 10 km/h nos meses mais ativos e 7 km/h nos mais amenos (CLBI, 2017). A ação contínua dos ventos alísios é responsável por promover a intensa deriva costeira e o transporte de sedimentos para o norte, paralelamente à linha de costa. A área de estudo é caracterizada por ter um ciclo de marés do tipo mesomarés semidiurnas, duas preamares e duas baixamares em ciclo de aproximadamente 25 horas (Amaro *et al.*, 2013; Furlan, 2014).

Quanto à hidrografia, o litoral oriental do RN é recortado, de norte a sul, pelas bacias hidrográficas dos rios Boqueirão, Punaú, Maxaranguape, Ceará-Mirim, Doce, Potengi, Pirangi, Trairi, Jacu, Catu, Curimataú e Guaju, as quais detêm padrão geométrico semelhante, com os seus escoamentos aproximadamente paralelos em direção às suas fozes no litoral. Este litoral também apresenta uma bacia hidrográfica caracterizada pela ausência de rios e a presença de lagoas, que é nomeada de bacia da faixa litorânea de escoamento difuso que, por sua vez, é subdividida em oito sub-bacias. A área de estudo está contida em uma destas sub-bacias de escoamento difuso, entre as bacias dos rios Potengi e Pirangi, com uma área de 187,70 km<sup>2</sup> (IGARN, 2017).

## CAPÍTULO 2

# Referencial Teórico

### 2.1 Erosão Costeira

A erosão costeira é um dos sérios problemas que enfrentam as comunidades costeiras. Poulton et al. (2006) relatam que as consequências para a vida, os bens e o meio ambiente podem ser enormes. Contudo, são corriqueiramente negligenciadas pelos proprietários privados de áreas costeiras e igualmente pelo poder público. Diante disto, a ocupação desenfreada é um dos principais agentes transformadores em regiões com grandes riscos, uma vez que os fenômenos naturais são em sua maioria previsíveis (Souza *et al.*, 2005; Suguio, 2010). A combinação de costa com recortes abruptos e uma alta concentração de energia das ondas ou das marés transforma o ambiente das falésias marinhas em um local de forte erosão.

As áreas costeiras se configuram por situações de ténue equilíbrio dinâmico, como por exemplo, entre as taxas de deposição e de erosão das feições costeiras, que caracterizam as costas em avanço ou em retração, respectivamente (Suguio, 2010). Por sua vez, o seu estudo é um dos aspectos fundamentais nas pesquisas desenvolvidas sobre os ambientes costeiro e marinho, pois o conhecimento do grau de vulnerabilidade em relação à erosão da linha de costa é informação fundamental para a definição dos limites passíveis de serem edificadas (Muehe, 2006). A vulnerabilidade costeira aborda a probabilidade de exposição ao risco/perigo de ocorrências de processos erosivos e com estas informações é possível a identificação dos locais onde devem ser empreendidos maiores esforços de gestão sustentável de uso e ocupação da zona costeira.

A abordagem de riscos e vulnerabilidade é utilizada pelo gerenciamento costeiro com o objetivo de promover a segurança das pessoas, já que os responsáveis pela sua implementação devem estar preparados para detectar e tomar decisões que podem afetar a população como, por exemplo, aqueles que constroem suas residências próximas às bordas de falésias. Tais decisões dependem,

prioritariamente, de se identificar quais os processos que estão se desenvolvendo e com qual intensidade, com estas informações, o processo de tomada de decisão será claro e seguro (Dewez *et al.*, 2013).

O risco associado à ocupação da zona costeira, especialmente das bordas de falésias, tende a piorar com a perspectiva de elevação do NM, tendo a principal causa o aumento significativo do aquecimento global (Young, 2006). Associado a isto, a ocupação antrópica intensifica o problema da erosão costeira, aumentando a fragilidade das feições costeiras e, assim, os impactos sobre os processos naturais. Em contraponto, quando a urbanização é planejada, pode beneficiar economicamente a região, através da geração de empregos e aumento da arrecadação de impostos, dentre outros (Severo, 2005).

A combinação de costa com recortes abruptos e uma alta concentração de energia das ondas ou das marés transforma o ambiente das falésias marinhas em um local de forte erosão. Estes fatores promovem o recuo da linha de costa na direção do continente. Por outro lado, tal erosão pode ser um processo necessário no fornecimento de sedimentos para as praias arenosas (Souza *et al.*, 2005; Amaro *et al.*, 2015). Young (2006) e Young & Ashford (2006) realizaram durante 6 anos estudos nas praias da Califórnia/EUA com o objetivo de avaliar, identificar e quantificar os sedimentos que chegam as praias. Os pesquisadores avaliaram que cerca de 67% do percentual de sedimentos que chegam as praias são oriundos de ações erosivas nas falésias marinhas ativas, o que demonstra quão importante pode ser para algumas praias arenosas. Também em outras regiões do mundo, pesquisas já apontam a importância da erosão nas falésias como fonte de sedimentos com grande contribuição ao balanço sedimentar das praias (Zviely & Klein, 2004).

Segundo Marques (2009), o estudo para a identificação dos agentes causadores da instabilidade em falésias tem recebido pouca atenção, com a maioria dos estudos tratando de falésias de baixa resistência e retração rápida. Ainda de acordo com o autor, falésias mais resistentes são pouco estudadas, devido à dificuldade no monitoramento acurado da sua evolução de modo que seja possível produzir avaliação a respeito da sua instabilidade. Aliado a isto, todo o sistema e mecanismo que gera a erosão costeira é complexo e vários aspectos devem ser observados, entre eles: o ambiente continental, o ambiente marinho, o tempo e o clima, as construções, a variabilidade geológica da costa (Poulton *et al.*, 2006). Dias

& Neal (1992) enumeram que os sistemas de juntas, heterogeneidade litológica, posição da camada mais e menos resistentes, existências de argilas, nível da água também são elementos que devem ser observados.

Os fatores oceanográficos/hidrológicos envolvem sobretudo as ações das ondas, amplitude de marés, velocidade e direção dos ventos, e os demais fenômenos gerados por cada um destes fatores. Os fatores climático/meteorológicos têm maior influência no NM e na atuação dos ventos, o que consequentemente age no comportamento das correntes costeiras (Souza *et al.*, 2005).

Emery & Kuhn (1982) e Suguio (1998) descrevem que as falésias podem ser classificadas de acordo com os seguintes estágios: ativa, inativa e extinta. As falésias são chamadas de ativas quando estão expostas e em constante retração sob influência dos processos de origem marinha e continental. É considerada inativa a falésia que está envolta em sua base por material que foi proveniente de deslizamentos anteriores e com inclinação normalmente entre 25° e 30° e muitas vezes comportando vegetação, incluindo árvores. Classificaram como extinta a falésia onde não há influência marinha. A maior atividade e inatividade das falésias depende da praia adjacente. Se a face de praia é larga, as ondas não alcançam a base da falésia, exceto em marés excepcionais e condições de tempestades. Se a face de praia é curta, as ondas facilmente atingem as falésias e rapidamente a erosão atua (Dias & Neal, 1992).

As falésias ativas estão retrocedendo, geralmente, como resultado das seguintes causas: a erosão de origem marinha e a erosão de origem continental (Emery & Kuhn, 1982; Dias & Neal, 1992; Moore & Griggs, 2002; Bird, 2008; Olsen, 2009; Santos Jr. *et al.*, 2011). As erosões de origem marinha são causadas pela ação das ondas e variação das marés, as quais desempenham um papel importante na desestabilização das falésias através da erosão da sua base, e são também influenciadas pelo intemperismo biológico, físico e químico nas litofácies que compõem a falésia.

Na base ocorre a ação abrasiva das ondas, em função dos sedimentos misturados na água das ondas, e pela própria energia da ação física das ondas e correntes marinhas. A energia das ondas atinge a falésia gerando entalhes e erosão de base, provocando maior inclinação do talude e desmoronamentos. Quanto às marés, a sua amplitude é o fator mais importante na questão da alteração

geomorfológica (Furlan, 2014). Os movimentos de marés influenciam nas ações das ondas, onde as marés elevadas levam a ação das ondas para costa adentro, o que interfere no processo erosivo das falésias (Bird, 2008).

Após substancial erosão na base da falésia, maiores deslocamentos podem ocorrer, devido à redução da estabilidade de toda a sua seção. Este mecanismo é regulado pelas forças das ondas, marés e pela proteção eventualmente existente (Silva, 2003; Olsen, 2009). Esta erosão pode ser interrompida temporariamente quando ocorre um desmoronamento, no qual se deposita na base o material desagregado, exercendo uma proteção contra a erosão marinha (Emery & Kuhn, 1982; Bird, 2008). Todavia, segundo Dias & Neal (1982) este tempo de proteção de base na falésia pode ser bastante rápido e condicionado, principalmente, as condições das ondas.

O intemperismo na falésia inclui processos físicos que provocam a desintegração da superfície da rocha, como também processos químicos que decompõe o afloramento rochoso e processos biológicos que podem atacar ou proteger a rocha. Os processos de dissolução são particularmente ativos em rochas calcárias (Bird, 2008). De acordo com a *United States Army Corps of Engineers* (1995), outro aspecto que desencadeia o processo erosivo de origem marinha é o desencadeado a partir da saturação da base da falésia sob a ação das ondas e marés. Em tais condições, os organismos marinhos podem localmente aumentar a acidez da água, facilitando a dissolução do calcário ou carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), através da lixiviação bioquímica. Nesse caso, a água dissolve o carbonato e carrega partículas finas, formando rachaduras e fendas na face da falésia. Adicionalmente, Furlan (2014) relata que o intemperismo físico, químico e pelo sal, geralmente, agem juntos e operam mais eficientemente quando e onde o substrato rochoso está sujeito a frequentes alternâncias de umidade e ressecamento.

Os processos erosivos de causas continentais, por sua vez, podem ser provocados pelos seguintes aspectos: precipitação meteorológica e seus efeitos, sobrepressão, expansão de argilominerais, intemperismo biológico e ação antrópica.

As precipitações erodem a falésia a partir do seu topo para baixo, com a formação de sulcos e ravinas em locais de fluxo de água concentrado. A água subterrânea também é um fator gerador de erosão na falésia, através do transporte da água em camadas altamente permeáveis de arenitos que, juntamente com o

cimento de carbonato de cálcio no solo/rocha, formam ácido carbónico, acelerando a erosão através de intemperismo químico.

Além disso, a formação de fissuras de tração permite que a água se infiltre na falésia, causando erosão e adicionando peso extra a falésia. Esta água, em seguida, cria uma pressão hidrostática, empurrando a fenda para longe (Olsen, 2009). Quanto a este processo, Severo (2005) lembra que a velocidade de retração depende da intensidade e duração da precipitação pluviométrica, do tipo e estado do solo/rocha encontrado ao longo dos caminhos das águas pluviais. Conclusões semelhantes foram relatadas por Kolander et al. (2013). Santos Jr. et al. (2011), conduziram ensaios de laboratório com amostras de falésias da Formação Barreiras próximo à área do estudo, sendo observado que a rocha sofre grande redução de sua resistência após a saturação, favorecendo o processo erosivo. Os autores também mostraram que o processo de instabilidade nestas falésias é associado a intensidade das precipitações pluviométricas.

As formações costeiras podem ser modificadas pelos ventos. Além de interferir na formação das ondas, o vento também age como indutor erosivo, pois, ventos fortes carregam sedimentos das falésias, dunas e praias. O vento, carregado de partículas, pode erodir a face da falésia através do efeito abrasivo (Bird, 2008; Furlan, 2014). A face da falésia pode se tornar esburacada como resultado deste intemperismo, o qual inclui os efeitos de umedecimento e ressecamentos recorrentes, cristalização do sal, corrosão pela chuva e respingos do mar (Furlan, 2014).

Intemperismo biológico ocorre quando a vegetação costeira cresce em fendas, quebrando sedimentos fracos, separando-os até a falha ocorrer devido a decomposição ou dissolução, ocorrendo principalmente em afloramentos de rochas calcárias. Plantas na falésia também podem adicionar peso para a falésia, levando-o a instabilidade (Dias & Neal, 1992; Bird, 2008; Olsen, 2009). A vegetação exerce muitas vezes um papel positivo na estabilidade da falésia, protegendo dos efeitos do clima e as raízes podem reforçar o solo/rocha através do efeito solo/raiz.

A ação antrópica é fator importante no desenvolvimento dos processos erosivos, tornando-se num dos principais catalizadores deste processo como, por exemplo, as construções nos topos das falésias ocasionam um sobrepeso, reduzindo a estabilidade do maciço e aumentando a impermeabilização. Consequentemente gera um aumento do fluxo de água que corre sobre o topo e sua face durante as

precipitações. Muitas vezes, como características dos processos construtivos adotados, ocorrem às retiradas das camadas superiores que estão estabilizadas, incluindo a vegetação, aumentando o grau de erosão causado pelas precipitações (Emery & Kuhn, 1982; Dias & Neal, 1992).

De modo geral, rochas homogêneas são usualmente mais resistentes à erosão do que as formações rochosas heterogêneas, com inúmeras descontinuidades, tais como muitas camadas, muitas juntas, planos de clivagens e fraturas, pois facilitam a decomposição da falésia (Bird, 2008). O autor também relata que a influência da litologia e das feições estruturais presentes no perfil da falésia também expressa a diversidade nas variações costeiras, assim como a linha de costa também pode ser influenciada pela topografia das áreas adjacentes.

Emery & Kuhn (1982) propuseram uma matriz para identificação do principal agente erosivo dominante a partir do seu perfil transversal e do grau de homogeneidade do maciço em dado local (Figura 2.1). De uma forma simplificada, os autores concluem que as erosões marinhas tendem a deixar a base da falésia muito angular e quase vertical, enquanto que as erosões causadas por processos continentais tendem a deixar a falésia com um perfil mais suave (convexo para cima). Ainda a respeito desta matriz, Del Rio et al. (2009) apontam que a constituição litológica da camada superior e da inferior tem uma grande influência na prevalência da erosão marinha ou continental e, conseqüentemente, na morfologia do perfil da falésia. Os autores em sua pesquisa na costa de Cádiz, Espanha, concluíram que a costa desta região segue a matriz proposta por Emery & Kuhn (1982), com falésias brucas onde o processo marinho prevalece. Esta matriz também foi utilizada por diversos autores em suas pesquisas (Dias & Neal, 1992; Young & Ashford, 2006; Kuhn & Prüfer, 2014).

Neste contexto, os processos erosivos no RN já vêm atuando há muito tempo. Um dos principais motivadores para este processo é o déficit no balanço sedimentar e não a variação do NRM (Diniz, 1999). Outro fator, levantado por Vital (2003), é a respeito da deriva continental, a qual tem um fator importante na distribuição e movimentação dos sedimentos. Toda a zona costeira do RN é governada por fatores dinâmicos de alta energia, que causam processos de erosão, acreção e alta instabilidade na linha de costa (Amaro *et al.*, 2013). Medidas mitigatórias em caráter

emergencial já são necessárias, devido ao contínuo e intenso processo erosivo em diversos trechos nas zonas costeiras (Amaro *et al.*, 2012).

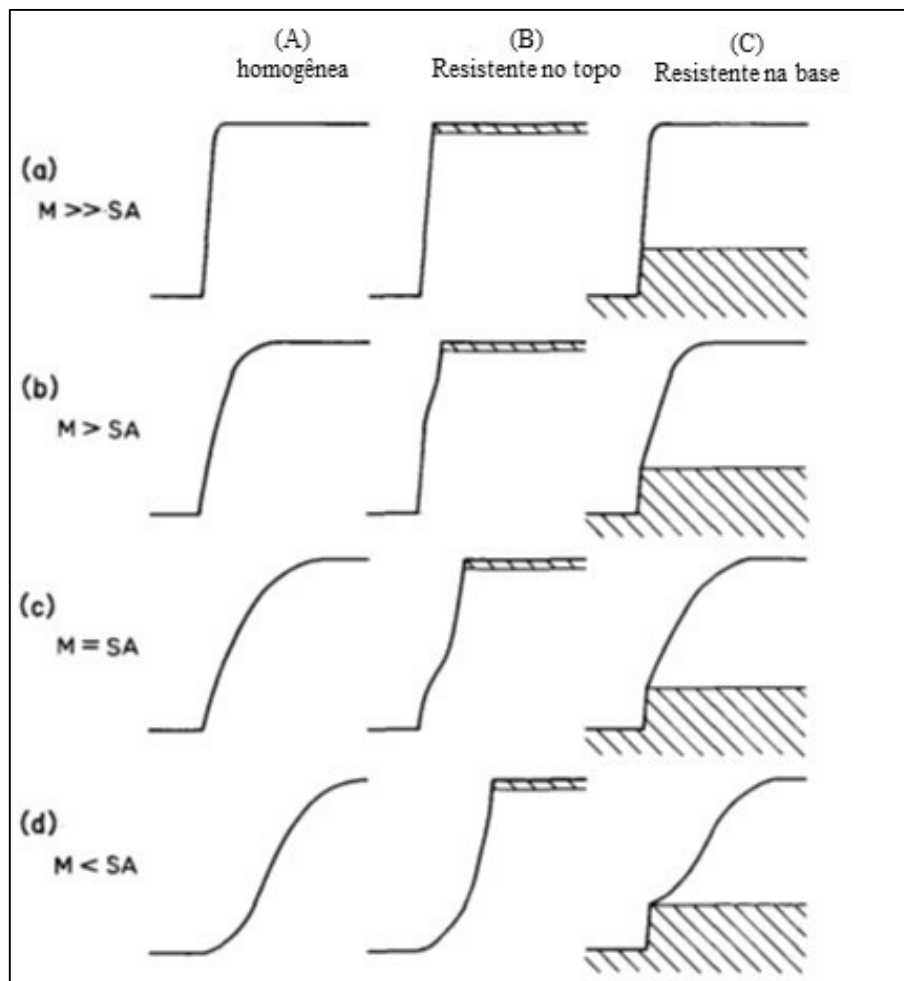


Figura 2.1 - Matriz para avaliação do perfil esperado de acordo com a correlação entre o perfil, a sua homogeneidade e o agente erosivo predominante em uma falésia ativa. Legenda: M – causas marinhas; SA – causas continentais

Fonte: Emery & Kuhn (1982).

No RN, as principais causas e elementos da erosão costeira, como agentes que desencadeiam as mudanças, são: dinâmica da circulação costeira, evolução holocênica da planície costeira, suprimento sedimentar ineficiente, construção de estruturas de concreto perpendiculares a linha de costa na zona de praia e fatores tectônicos (Vital *et al.*, 2006a).



Vital et al. (2006b) relatam que já são identificados na costa do estado inúmeros processos erosivos entre os quais: retrogradação costeira; severa erosão dos afloramentos da formação Barreira; destruição dos mangues; destruição de obras costeiras; concentração de minerais pesados nas áreas emersas e formação de enseadas nas praias. Os mesmos autores também alertam que os estudos empreendidos no RN nunca tiveram uma avaliação global de toda a costa, foram restritos a pequenos setores.

## **2.2 Taxa de Retração em Falésias**

Uma das maiores fontes de mudanças na zona costeira é a causada pelo processo erosivo. Uma forma com a qual este processo é medido em escala temporal é através da quantificação da taxa de retração ou recuo da falésia. A taxa de retração é obtida a partir da diferença entre a posição recente e passada da linha de costa demarcada por falésias, dividido pelo respectivo período de tempo passado entre as duas medidas trazidas para uma escala anualizada.

A retração que ocorre em uma falésia ameaça as infraestruturas no topo e, estimativas das suas posições futuras, são informações importantes no processo de implementação de ações de mitigação dos riscos associados a este processo. Neste aspecto, é primordial que a taxa de retração nas falésias seja medida com precisão, de modo que as pessoas possam planejar sua vida nesse ambiente em constantes mudanças. O poder público, na maioria dos casos, tem limitados recursos, dados e ferramentas para usar, entender e fazer importantes decisões com respeito aos processos erosivos complexos (Olsen, 2009). Com este enfoque, as pesquisas a respeito da identificação dos processos que agem e causam a retração, assim como o mecanismo de estabilidade, é muito significativo no estabelecimento de orientações para o gerenciamento urbano nestas áreas, como também para minimizar os possíveis cenários de riscos. Isto pode ser alcançado pelo monitoramento contínuo das áreas costeiras (Santos Jr. *et al.*, 2011).

Moore & Griggs (2002) mencionam que os casos de retração em falésias são muitas vezes relatados como episódicos, um fenômeno específico atrelado ao local. Entretanto, o processo erosivo que ocorre em falésias geralmente é intercalado entre

períodos de retração de forma muito lenta intercalados por eventos erosivos repentinos de alta magnitude, no qual a retração atinge valores bem maiores que o valor médio. Bird (2008) chega a semelhante conclusão, onde a retração da falésia é normalmente pontual e ocorre durante fases de forte ataque das ondas. Isto também ocorre associados a processos continentais como as precipitações intensas e/ou duradouras, e em áreas sujeitas a sismos. Algumas mudanças são imediatas, outras, porém, alcançam a escala de séculos para que sejam notadas.

Também é importante o entendimento que a retração em uma falésia depende de uma série de outros fatores além do tempo, tais como a litologia, estratigrafia, características mecânicas e hidráulicas dos solos e rochas que formam o maciço e suas respostas as intempéries (Moore & Griggs, 2002; Silva, 2003; Collins & Sitar, 2008; Santos Jr. *et al.*, 2011). Obras marinhas em áreas adjacentes também podem acelerar o processo de retração em falésias, tais como espigões e muros de proteção, podendo também reduzir o fornecimento de areias oriundas das praias protegidas (Dias & Neal, 1992; Del Rio *et al.*, 2009). Portanto, diante destas variáveis, a retração é uma característica potencialmente única e particular para cada região em um dado intervalo de tempo.

Corroborando, Moore & Griggs (2002) ressaltam que a limitada avaliação das observações históricas fornece uma média da taxa de retração, mas extrapolação destas taxas para estimativas futuras é problemática, por causa da magnitude da variabilidade no tempo e no espaço. Em contraponto, uma determinação de faixa de proteção, baseada em dados históricos de retração, é menos suscetível a pressões externas que uma faixa definida a partir de método que utiliza o zoneamento probabilístico, o que exigiria o conhecimento preciso de um grande número de variáveis envolvidas em cada situação geológica e geomorfológica (Marques, 2009).

Devido à complexidade de elementos que influencia o processo de retração, a taxa encontrada em pesquisas ao redor do mundo é uma componente bastante variável onde, na sua maioria, apresentam valores da ordem de centímetros por ano (Young, 2006; Dewez *et al.*, 2013). No entanto, alguns locais onde o processo é extremamente intenso, a sua taxa pode atingir valores que se aproximam da dezena de metros por ano (Collins & Sitar, 2008; Machutchon, 2015).

A quantificação da taxa de retração já foi abordada em diversos estudos ao redor do mundo. Muitos destes basearam-se em imagens de sensoriamento remoto

históricas e dados cartográficos, com observações do comportamento da falésia no longo prazo. Segundo Zviely & Klein (2004), a taxa de retração média das falésias ao redor do mundo apresentou uma tendência de elevação no século 20 comparado com os dados históricos.

Nos últimos anos, novas técnicas foram empregadas para a obtenção da taxa de retração com confiabilidade e em períodos de observações com menores escalas de tempo, podendo ser menores que um ano de observação. Na Tabela 2.1 são mostrados diversos estudos que tiveram como objetivo a quantificação da taxa de retração e seus valores encontrados, bem como a técnica empregada na pesquisa.

Tabela 2.1 - Compilação de estudos que objetivaram a quantificação da taxa de retração em falésias.

<b>Autores</b>	<b>Local</b>	<b>Trecho estudado</b>	<b>Técnica utilizada</b>	<b>Período de pesquisa</b>	<b>Retração cm/ano</b>
Moore & Griggs (2002)	Santa Cruz, São Francisco, EUA	67 km	Foto	41 anos	10 - 32
Zviely & Klein (2004)	Kurkar Cliff, Israel	70 km	Foto	82 anos	21
Young (2006)	Del Mar, Califórnia, EUA	700m	LT	set/04 - abr/05	4,4
Collins & Sitar (2008)	Pacifica, Norte da Califórnia, EUA	1,5 km	LT	5 anos*	76 - 800
Del Rio et al. (2009)	Costa de Cádiz, Espanha	200 km	Foto	50 anos	50 - 120
Young et al.(2011)	Point Loma, San Diego, EUA	7,1 km	LA	5,5 anos	7,8
Dewez et al.(2013)	Costa de Mesnil Val, França	850m	LT	2,5 anos	13
Earlie et al.(2013)	Península de Cornwall, Reino Unido	NI	LA	4 anos	3 - 37
Kolander et al. (2013)	Ilha Wolin, Polônia	11,7 km	LT	4 meses	4,3 - 9
Kuhn & Prüfer (2014)	Ilha de Rügen, Alemanha	NI	LT	5 anos	34,6
Machutchon (2015)	Monwabisi beach, False Bay, África do Sul	500 m	LA / LT	abr/13 - nov/14	220
Parente et al. (2015)	Costa de East Sussex, Reino Unido	11 km	LA	2 anos	2 - 30
* Alguns setores tiveram períodos diferentes dos citados Legenda: LA - Laser escâner aéreo; LT - Laser escâner terrestre; Foto - Fotogrametria; NI - Não identificado					

Os dados obtidos de retração devem garantir que a estimativa seja confiável e que possa ser comparável com outras pesquisas. A possibilidade de comparação passa pela escolha do local na falésia onde as mudanças serão medidas, pois em uma falésia as estimativas das mudanças podem ser obtidas da crista, base ou na face e podem diferenciar-se significativamente durante curtos intervalos de tempo. Por exemplo, as ações das ondas podem causar erosão na base da falésia sem, contudo, acarretar erosão da crista. Adicionalmente, quando ocorre uma erosão no topo e consequentemente na crista da falésia, a mesma pode resultar em uma grande massa deslocada, que acumula em sua base e, portanto, retração na crista. Os autores também alertam que as alterações da crista e da face da falésia são mais influenciadas pelas estações chuvosas, enquanto que a erosão de base da falésia não é sazonal.

Young (2006) e Young & Ashford (2006) mostram que é crítico o entendimento de como a taxa de retração está sendo calculada e que as pesquisas podem não ser diretamente comparáveis (Figura 2.2). Os autores utilizaram em suas pesquisas o valor médio da erosão em toda a face da falésia, como o valor correto no caso do cálculo da taxa de retração em pesquisas de curto intervalo de monitoramento. Contudo, Young et al. (2009) estudaram as diversas formas de aferição da taxa de retração nas falésias da região de Del Mar, Califórnia, enfatizando que no longo período de observação as taxas de retração convergem para a média independente da forma de sua aferição.

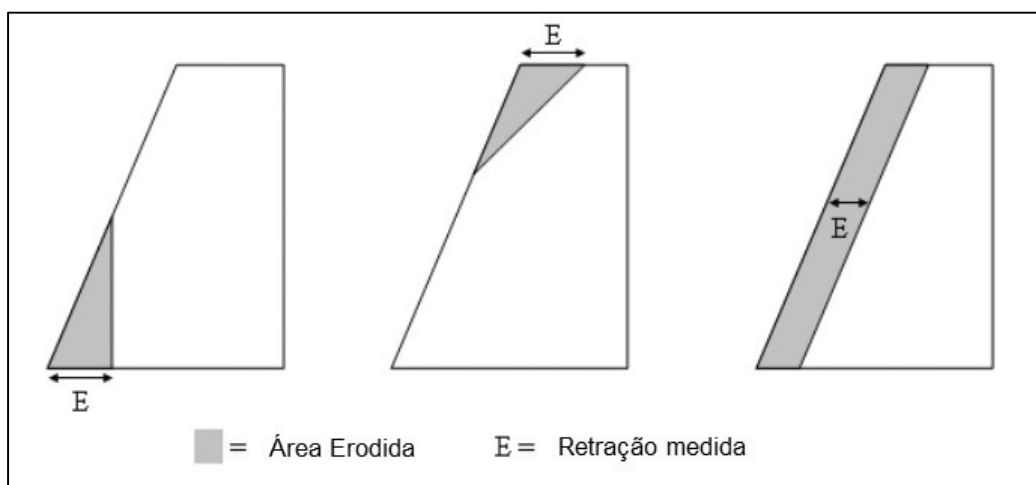


Figura 2.2 - Diferentes formas de quantificação da retração em falésias.

Fonte: Young & Ashford (2006); Young (2006).

### 2.3 Aplicações do Laser Escâner Terrestre (LT)

Uma das formas modernas de se quantificar a retração numa falésia é através do uso do LT. O mesmo vem se tornando numa tecnologia de alta confiabilidade e precisão, fornecendo dados de elevação de alta resolução, sendo utilizado amplamente na modelagem bidimensional e tridimensional, com aplicações em diferentes e diversas áreas, como a Arqueologia, Geografia, Geologia, Geomorfologia, Sismologia, Sensoriamento Remoto e Física Atmosférica (Franklin, 2008; Olsen, 2009).

O LT por princípio faz a determinação da posição dos pontos de uma superfície, através do processo de varredura ou imageamento, e possibilita a criação de modelos digitais comparáveis no tempo, devido à altíssima precisão da localização dos pontos no espaço tridimensional. Esta varredura é realizada com a utilização de um feixe de laser (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiance*) que vai ao encontro do objeto/alvo. Após atingir o objeto, uma fração do sinal retorna ao sensor, onde é feita a medição de distância e sua elevação. Para a correta utilização da técnica é necessária a utilização de metodologia que possa ser replicada e que forneça confiabilidade.

O LT fornece uma altíssima resolução espacial e acurácia no levantamento, sendo também indicado para pesquisas de identificação das variações em falésias quando comparado aos métodos convencionais de levantamentos, quais sejam: mapas topográficos e aerofotogrametria (Young *et al.*, 2010). Neste estudo de caso na falésia marinha ativa da Barreira do Inferno foi utilizado o equipamento montado sobre um tripé estático. O LT tem sido largamente usado em estudos para a avaliação da mudança nas áreas costeiras durante pesquisas de curto intervalo de tempo.

A técnica do uso do imageamento a laser pode ser empregada de duas formas: Laser Escâner Terrestre (LT) e o Laser Escâner Aerotransportado (LA), ambas capazes de identificar as mudanças que estão ocorrendo nas falésias em pequenas ou grandes áreas e em diferentes escalas temporais. Todavia, cada uma das técnicas oferece distintas vantagens. Nos levantamentos em grandes áreas e com restrição de tempo para o levantamento de campo, sem necessidade de alta densidade de pontos, bem como em pesquisas com acesso restrito a faixa de areia da praia, o LA é o mais indicado, sendo muitas vezes o LT inviável. Adicionalmente, o LA permite uma

cobertura superior da linha da costa, útil para a estimativa da retração do topo e crista da falésia, além de detectar grandes ou profundos deslizamentos que se estendam para além da face da falésia. Por outro lado, quando se necessita de uma altíssima densidade de pontos, precisão e necessidade de avaliação de curto prazo, o LT é o mais indicado (Young, 2006; Young *et al.*, 2010; Amaro *et al.*, 2012; Collins & Stock, 2012; Amaro *et al.*, 2013).

Young (2006) observa que o LT é o mais indicado em levantamentos de falésias marinhas ativas devido a sua maior capacidade de quantificar as mudanças em cavas e sulcos na base da falésia, permitindo uma quantificação da variação volumétrica da ordem de centímetros. Com relação ao LA, o LT tem como vantagem uma melhor acurácia, alta resolução e cobertura temporal. Como desvantagem, destaca-se a limitada cobertura espacial e a necessidade de georreferenciamento mais apurado. O uso do LT é preferível em pequenas regiões, geralmente menor que 1,0 km<sup>2</sup> (Conner, 2013).

Devido à refletância dos materiais, a intensidade do retorno também pode ser medida pelo LT e também oferecer informações a respeito das características da superfície estudada (Kersting *et al.*, 2004; Olsen, 2009; Santos, 2014). Em contraponto, Jensen (2009) alerta que em distâncias e ângulos maiores, aumenta-se a perda do retorno e, conseqüentemente, há uma redução da leitura da intensidade do mesmo. Ainda segundo Jensen (2009), não existe um procedimento de como interpretar os dados de intensidade. Semelhante conclusão pode ser tirada dos trabalhos de Lichti & Harvey (2002), os quais mediram a intensidade do retorno do laser e quantificaram variações de mais de 100% entre os retornos, medidos apenas com a mudança em relação à distância ao alvo, preservando todas as demais condições.

Com o uso do LT, um único imageamento pode rapidamente recolher mais de um milhão de pontos, recobrando densamente dezenas de metros de costa, dependendo da complexidade da topografia. Na maioria dos casos, o controle da precisão deve ser através do registro e georreferenciamento dos dados que são um produto típico de uma pesquisa com o LT e necessária para a sobreposição e alinhamento dos dados obtidos em séries temporais. (Whitworth *et al.*, 2006; Olsen, 2009; Collins & Stock, 2012). Como outra vantagem da tecnologia, os dados podem

ser obtidos em qualquer horário, devido o mesmo ser um sistema ativo, que não é dependente da iluminação solar (Jensen, 2009).

Nos recentes anos, diversos estudos foram desenvolvidos utilizando o LT com os mais variados objetivos e locais de aplicações. Lim et al. (2005) realizaram levantamentos utilizando o LT de forma combinada com fotogrametria digital de alta resolução em falésias rochosas no Norte de Yorkshire, Reino Unido. Os autores concluíram que as alterações identificadas apenas por meios aéreos são insuficientes para a correta quantificação da retração em falésias quase verticais.

Young (2006) realizou levantamento de curto prazo nas praias da Califórnia/EUA, com o uso combinado do LT e do LA. O autor identificou que as falésias da área de estudo contribuem de forma significativa com sedimentos para as praias, bem como quantificou a taxa de retração para o intervalo de tempo estudado.

Poulton et al. (2006), utilizaram o LT no monitoramento da erosão costeira em falésias da região do Sul de Happisburgh, Norfolk, Reino Unido. As falésias estudadas estão sofrendo grande processo erosivo, com retrações significativas, onde os autores utilizaram o LT como forma de melhor quantificar este volume erodido e a taxa de retração comparando com dados históricos do local pesquisado.

Collins & Sitar (2008) estudaram falésias areníticas, de fraca cimentação, na cidade de Pacífica, Califórnia/EUA. Os autores afirmaram que o LT forneceu um novo discernimento a respeito dos mecanismos de desestabilização das falésias estudadas e que as ações marinhas ocasionadas pelas ondas, combinadas com o efeito de elevação do nível de água, provocado, pelas precipitações são os principais causadores da instabilidade na área de estudo.

Olsen (2009), baseado em levantamentos na área de San Diego, Califórnia/EUA, desenvolveu um método de levantamento em campo, com o uso do LT em ambientes dinâmicos, onde métodos de controle convencionais não podem ser efetivamente implementados para mapeamento em grande escala

Young et al. (2010) realizaram levantamentos para a comparação entre as técnicas do LT e LA na região de Del Mar, Califórnia/EUA, na qual obtiveram como resultado que o LT apresenta dados mais precisos de erosão na falésia quando comparado ao LA. Por outro lado, estimativa aérea e terrestre de mudanças promovidas por deposição são concordantes.

Abellán et al. (2011), monitoraram a encosta rochosa de Castellfollit de la Roca, Espanha, por um intervalo de 22 meses. Assim, a partir da utilização do LT, foi possível identificar e quantificar os desmoronamentos dos blocos rochosos com a obtenção da estimativa de retração da encosta.

Lee et al. (2011), utilizando o LT, realizaram levantamentos para a identificação dos volumes de acresção e erosão na praia de Anmok, Coreia do Sul.

Schmid et al. (2011) desenvolveram estudos em pântanos na região de Charleston, Carolina do Sul/EUA. Os autores demonstraram, com base nesta investigação, que os erros verticais quantificados em ambientes pantanosos são maiores que os obtidos em ambientes mais secos. Também concluíram que diferentes tipos de vegetação e densidades afetam estes erros.

Collins & Stock (2012) utilizaram o LT em conjunto com o LA para o monitoramento de encostas rochosas no parque nacional do Yosemite/EUA. Estes autores também estudaram a influência da vegetação na obtenção dos dados e relataram que para a criação de uma superfície nua do terreno em área com vegetação envolvem várias etapas de aplicação extremamente difícil. Concluem também que no caso de falésias, normalmente é encontrado pouca ou nenhuma vegetação para se remover da nuvem de pontos.

Hoffmeister et al. (2012) realizaram levantamentos em praias pedregulhosas sujeitas a ações marinhas de alta energia no oeste da Grécia. Os autores chegaram à conclusão que o LT é confiável para o monitoramento costal com leve limitação em praias rugosas. Mostraram, também, que o processamento da nuvem de pontos em praias muito rugosas e planas é problemático, devido ao efeito do ruído e o sombreamento, exigindo um maior esforço no tratamento dos dados.

Chazaly et al. (2013) realizaram mapeamentos para a avaliação da vulnerabilidade costeira, utilizando o LT montado em um barco, na região do Côte d'Azur, França.

Dewez et al. (2013), realizaram seis levantamentos na costa francesa do canal da mancha na região de Mesnil Val. O estudo teve como objetivo a identificação do período de retorno dos deslizamentos e fornecer os dados as autoridades responsáveis pelo gerenciamento costeiro.



Kolander et al. (2013), estudaram as falésias da costa da ilha Wolin, Polônia. A região pesquisada sofre com o processo erosivo, que é influenciado pelo ciclo de congelamento e descongelamento das águas do mar Báltico.

Feagin et al. (2014) realizaram levantamentos com o uso do LT em dunas para a quantificação das mudanças nos volumes de sedimentos e vegetações após a passagem do furacão Ike, na península de Matagorda, Texas/EUA. Os autores constataram que os dados levantados mostram um processo cíclico de erosão e deposição ao longo do ano. Contudo, os ciclos se revelaram com déficit sedimentar e não evidenciaram uma recuperação da área após o furacão.

Kuhn & Prüfer (2014) estudaram, com o uso do LT, uma falésia calcária na ilha de Rügen, Alemanha. O processo de retração nas falésias existentes da região é uma ameaça às áreas residências existentes. Após a realização de sucessivos levantamentos e a partir de análise multitemporal, os autores concluíram que os processos continentais, causados pelas precipitações, são os principais indutores da erosão nesta falésia.

Hayakawa & Obanawa (2015) efetuaram mapeamento detalhado da morfologia da cachoeira de Kagon, na região central do Japão. Nesta cachoeira são frequentes os deslizamentos e a pesquisa teve como objetivo a quantificação e a distribuição espacial dos mesmos.

Machutchon (2015) utilizou o LT e LA combinados para o monitoramento e levantamento da retração em falésias na região da praia de Monwabasi, África do Sul.

Schubert et al. (2015) realizaram estudos utilizando dois LTs na praia de Newport, Califórnia/EUA. Foram construídas bermas protótipos no local para o acompanhamento e avaliação de todo o processo erosivo, ocasionado pela ação das ondas. Dentre as conclusões, os autores citam que o uso do LT permitiu o acompanhamento contínuo das bermas expostas às marés e às ondas. Dessa forma, foi possível a identificação e levantamento dos dados que conduziram a um modelo empírico em quatro dimensões da dinâmica da berma.

Lim et al. (2005), Abellán et al. (2011) e Kuhn & Prüfer (2014) identificaram em suas pesquisas que um limitador para o uso do LT é quando esta técnica é utilizada para a coleta de dados em solos muito úmidos, pois a utilização desta ferramenta em solos com tais características produz quebras no retorno do sinal e gera uma menor

precisão nos dados. O motivo desta limitação consiste na proximidade entre o comprimento de onda do laser e a banda de absorção da água.

No Brasil, alguns trabalhos com o uso do LT já são observados. Entre eles, estão os trabalhos desenvolvidos pelo grupo de pesquisa do Laboratório de Geoprocessamento da UFRN (GEOPRO), com ênfase em praias arenosas e outras quantificações.

Amaro et al. (2013) realizaram mapeamentos morfológicos na praia de Ponta Negra, Natal, com o uso do LT. Os autores enfatizaram que os resultados do trabalho validam que a utilização do LT, em conjunto com modelos geodésicos, é reproduzível e se aplica a outros segmentos praias que também estão inseridos em ambientes altamente dinâmicos.

Santos (2014), Santos et al. (2014) e Santos et al. (2015a) analisaram a dinâmica costeira na praia da Soledade, entre os municípios de Guamaré e Macau/RN. A área de estudo está inserida no sistema de canais de maré, praias oceânicas e ilhas barreiras de alta dinâmica de transporte de sedimentos. Os autores destacam que o LT foi adequado para a investigação e possibilitou a identificação dos detalhes morfológicos de forma precisa para o monitoramento de curto prazo.

Silva et al. (2016) objetivaram a avaliação da acurácia do cálculo volume em pilhas de rejeito, realizado por meio dos MDTs, gerados a partir do uso do LT, GNSS e VANT. Os autores concluíram que o VANT apresentou a melhor acurácia. Entretanto, não refutaram as qualidades e acurácia dos demais métodos em outras aplicações.

Em trabalho recente, Buck et al. (2017) propuseram método para detecção e cálculo da população de árvores, com o uso do LT através da modelagem tridimensional das nuvens de pontos. Os autores demonstraram que há uma subestimativa do número de árvores quando se utiliza apenas uma varredura, devido ao efeito do sombreamento e que a subestimativa é eliminada quando se utiliza múltiplas varreduras.

Pesquisas com o LT podem fornecer alta resolução de dados necessários para a avaliação volumétrica, estrutural e análises de deformações, potencialmente fazendo destes levantamentos de campo uma rotina. Entretanto, a utilização do LT envolve uma série de cuidados que devem ser tomados em todas as fases da sua

utilização, pois as fontes de erros e imprecisões em levantamentos podem ocorrer devido a características do equipamento, dos alvos de controle, da configuração do equipamento e do alinhamento entre os escaneamentos, bem como da possibilidade de assentamento da plataforma, quando o escaneamento está sendo realizado em superfície arenosa molhada ou solta, e da existência de vegetação (Olsen, 2009; Collins & Stock, 2012). Lichti & Harvey (2002) discutem que diversos fatores podem influenciar na força do sinal do retorno e, por conseguinte, no seu erro potencial, quais sejam: as características da superfície refletora, a sua aspereza, a umidade, distância a partir do escâner, materiais componentes e seu ângulo de incidência.

Um importante erro com o uso do LT que deve ser considerado é em relação ao tamanho do ponto na superfície levantada, que cresce conforme mais distante a superfície. Como consequência, influenciará na acurácia e na capacidade de modelar as pequenas variações, principalmente a longas distâncias. Normalmente, o poder do laser e a sua trajetória são os dois maiores contribuintes para a separação do feixe e, portanto, o tamanho do ponto. O alto poder do laser reduz a separação, enquanto que o inverso acontece com o aumento da distância (Olsen, 2009; Collins & Stock, 2012). Os erros aumentam quanto mais oblíquo for o sinal em relação à superfície e mínimo quando o mesmo é perpendicular à superfície (Young *et al.*, 2010; Collins & Stock, 2012). Portanto, quanto mais próximo e frontal o ponto de interesse estiver do Laser, mais acurado é o seu ponto na nuvem.

Outra fonte de erro comum que ocorre é motivada pelas mudanças sazonais no nível de areia da praia, que podem interferir nas medições das alterações na falésia. Young *et al.* (2009) cita que no processo de coleta de dados, a estimativa de volume erodido em uma falésia pode também levar em consideração de forma equivocada do volume de areia oriundo do processo de acreção sazonal, que tenha ocorrido antes da deposição ocasionada pela erosão da falésia.

Diante disto, foi utilizada nesta pesquisa a metodologia já empregada em outras realizadas pelo GEOPRO. Para esta escolha, considera-se a experiência adquirida com o uso do LT no monitoramento das variações geomorfológicas, com pesquisas realizadas na praia de Ponta Negra, Natal-RN (Amaro *et al.*, 2013; Amaro *et al.*, 2015) e na Praia de Soledade, em Macau-RN (Santos, 2014; Santos *et al.* 2014; Santos *et al.*, 2015a).

## 2.4 Modelo Digital do Terreno

A representação digital de uma dada superfície é chamada de Modelo Digital de Elevação (MDE) (Figura 2.3). O MDE pode ser entendido como a representação planialtimétrica, em coordenadas X, Y e Z, de todas as suas características topográficas da superfície que também abrange não unicamente a característica altimétrica do terreno, como demais ocorrências distribuídas continuamente no espaço (Rocha, 2007; Amaro *et al.*, 2012). De acordo com Jensen (2009), os MDEs podem ser subdivididos em dois tipos:

1. Modelo Digital de Superfície (MDS): contém informações de elevação de todas as feições encontradas no levantamento, quais sejam: vegetações, edificações e outras estruturas;
2. Modelo Digital do Terreno (MDT): representação digital que não contempla a vegetação e as construções, apenas contém as informações da superfície nua da terra.

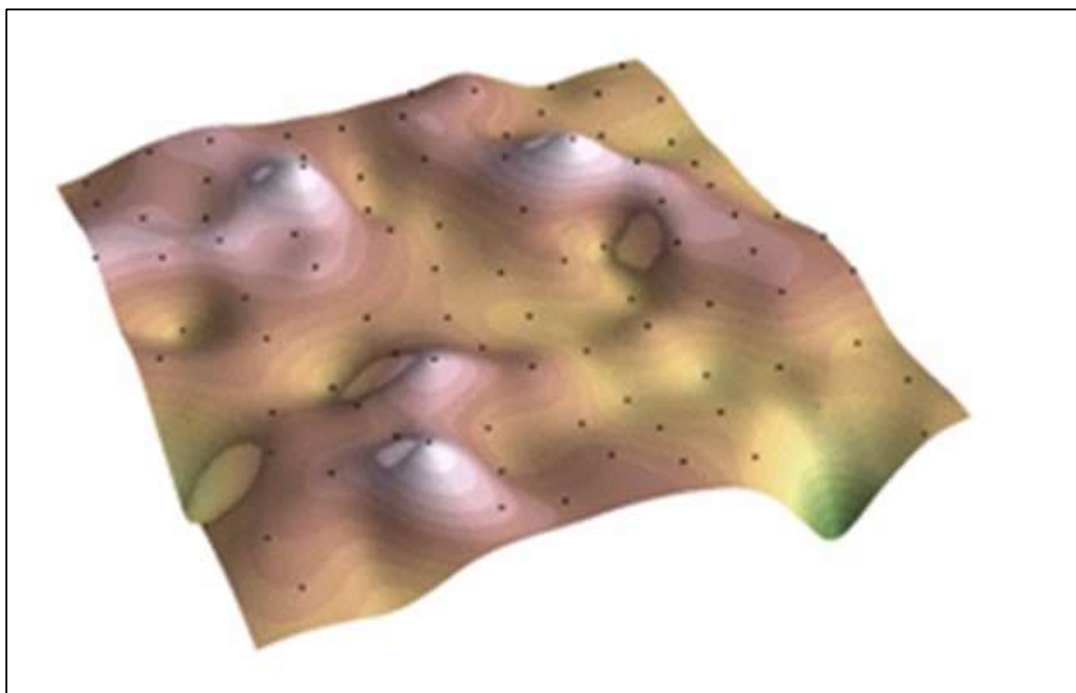


Figura 2.3 - Representação de uma superfície através de um Modelo Digital de Elevação. Fonte: ESRI, 2017

Na geração de qualquer tipo de MDE é necessária a interpolação dos dados para o preenchimento dos vazios existentes, devido à irregularidade da distribuição espacial dos dados de elevações. Para esta tarefa, é necessário a utilização de algum tipo de algoritmo de interpolação, o qual preenche estes vazios a partir de uma formulação matemática e a sua escolha pode influenciar na estimativa de elevação obtida no modelo (König, 2014; Rodrigues, 2015). Este, produzido a partir do processo de interpolação, é a base da geração de muitos produtos de grande importância para a caracterização de uma área (König, 2014). Segundo Fernandes & Menezes (2005), a partir do MDT pode-se calcular volumes, construir perfis, gerar mapas de declividade, calcular áreas e distâncias e perspectivas tridimensionais. Também é possível o mapeamento de áreas de inundação, do planejamento do ordenamento urbano e no planejamento de expansões territoriais (Jansen, 2009).

Segundo Rodriguez (2015), há duas classificações para as metodologias de interpolação, que são os métodos determinísticos e os métodos geoestatísticos. Os métodos determinísticos estimam a relação dos dados a partir do modelo, o qual está baseado nos valores medidos circundantes; já os métodos geoestatísticos utilizam a totalidade dos dados para inferir relação de semelhança ao uso de valores interpolados a partir da vizinhança (Figura 2.4). São exemplos de algoritmos interpoladores:

Inverse Distance Weighting (IDW) – É um método da ponderação baseado no inverso da distância: é determinístico, onde se usa a variável dos dados para a geração da superfície a partir da ponderação dos valores, em relação a sua distância, ou seja, quanto mais próximo ao ponto, maior peso tem no processo de cálculo da média. Como característica, este método resulta comumente em achatamento dos picos e vales (Rodriguez, 2015; ESRI, 2016).

Natural Neighborhoods (NN) - é um método determinístico, que pode realizar interpolação e extrapolação, preservando os dados de mínimos e máximos valores, utilizando os pontos mais próximos para criar um casco em torno do local de interpolação, dando pesos proporcionais as áreas ao redor destes pontos (Rodriguez, 2015).

Kriging – é um complexo método geoestatístico que produz uma acurada superfície. Kriging realiza correlação espacial dos pontos, normalmente distribuídos e sem representar uma tendência. Utilizando para interpolação, todos os pares

possíveis de pontos e usa estas informações para modelar e obter a superfície (Rodriguez, 2015).

Triangular Irregular Network (TIN) – é uma forma de dados geográficos digitais, baseados em vetores, e são construídos por triangulação de um conjunto de vértices, formando uma rede de triângulos não sobrepostos. O resultado é que, triângulos longos e finos são evitados tanto quanto possível (Amaro *et al.*, 2012; ERSI, 2016). Existem diferentes métodos para a formação destes triângulos, como a triangulação de Delaunay (Amaro *et al.*, 2012), que usa o critério da maximização dos ângulos mínimos de cada triângulo.

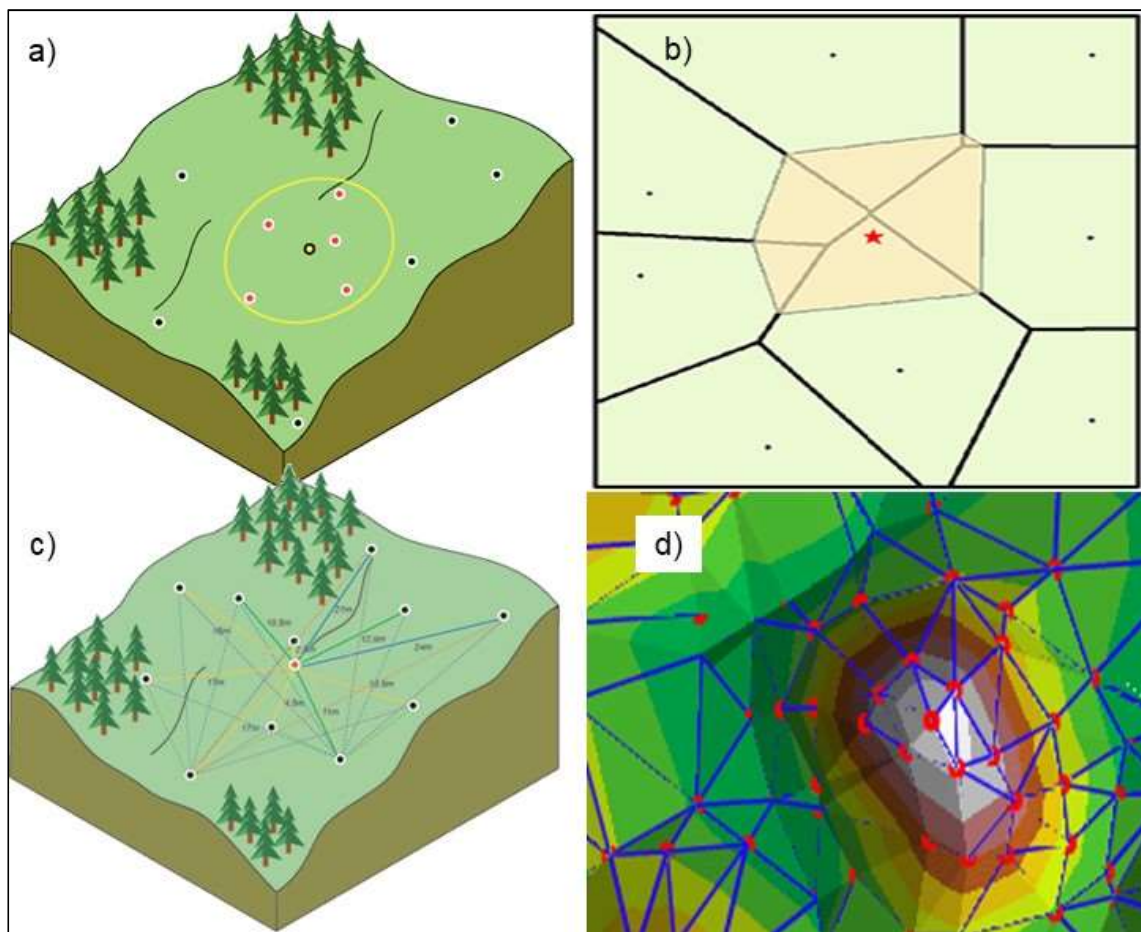


Figura 2.4 – Métodos para a determinação dos valores da superfície de acordo com o interpolador utilizado. a) Inverse Distance Weighting (IDW); b) Natural Neighborhoods (NN); c) Kriging; d) Triangular irregular Network (TIN).

Além da correta escolha do modelo interpolador, é necessário o conhecimento das limitações e das características dos softwares de geoprocessamento utilizados para a geração do MDT. Segundo Fernandez et al. (2007), é muito difícil descrever todos os softwares existente que podem processar nuvem de pontos e a sua escolha depende de vários fatores, entre os quais: atividade a ser realizada, volume de dados, resultados esperados. Cada software tem suas vantagens e suas desvantagens, cabe ao operador a sua correta escolha e definição dos seus parâmetros de entrada, que influenciaram na forma de se construir o modelo e, conseqüentemente, no sucesso da obtenção dos dados e análises oriundos destes.

## CAPÍTULO 3

# Materiais e Métodos

O estudo apresentará o monitoramento multitemporal de curto prazo numa falésia marinha ativa. Os levantamentos com o LT foram conduzidos em dois momentos: o primeiro foi em 21 de agosto de 2016 e o segundo em 24 de fevereiro de 2017, o que equivale a aproximadamente 6 meses. Com este período de monitoramento, a decisão de se utilizar o LT tornou-se a mais viável, pois, para este intervalo de tempo proposto de acompanhamento as mudanças normalmente são pequenas e um método de grande precisão para a sua identificação é exigido.

As atividades de pesquisa seguiram os procedimentos metodológicos apresentados na Figura 3.1. Esta proposição foi elaborada com base na metodologia empregada por diversos autores em seus trabalhos com o uso do LT combinado ao levantamento geodésico de precisão (Amaro *et al.*, 2013; Santos, 2014; Santos *et al.*, 2014; Amaro *et al.*, 2015; Santos *et al.*, 2015a; Santos *et al.*, 2015b; Silva *et al.*, 2016). A metodologia foi implementada com a inclusão das atividades de seleção do software para a obtenção dos MDTs de acordo com as especificidades e particularidades necessárias para o desenvolvimento desta pesquisa. Serão descritos a seguir, cada uma das fases da pesquisa desde a etapa de atividades de campo, compreendida por uma etapa prévia e as etapas de levantamento dos dados propriamente ditas até as atividades finais da análise multitemporal.



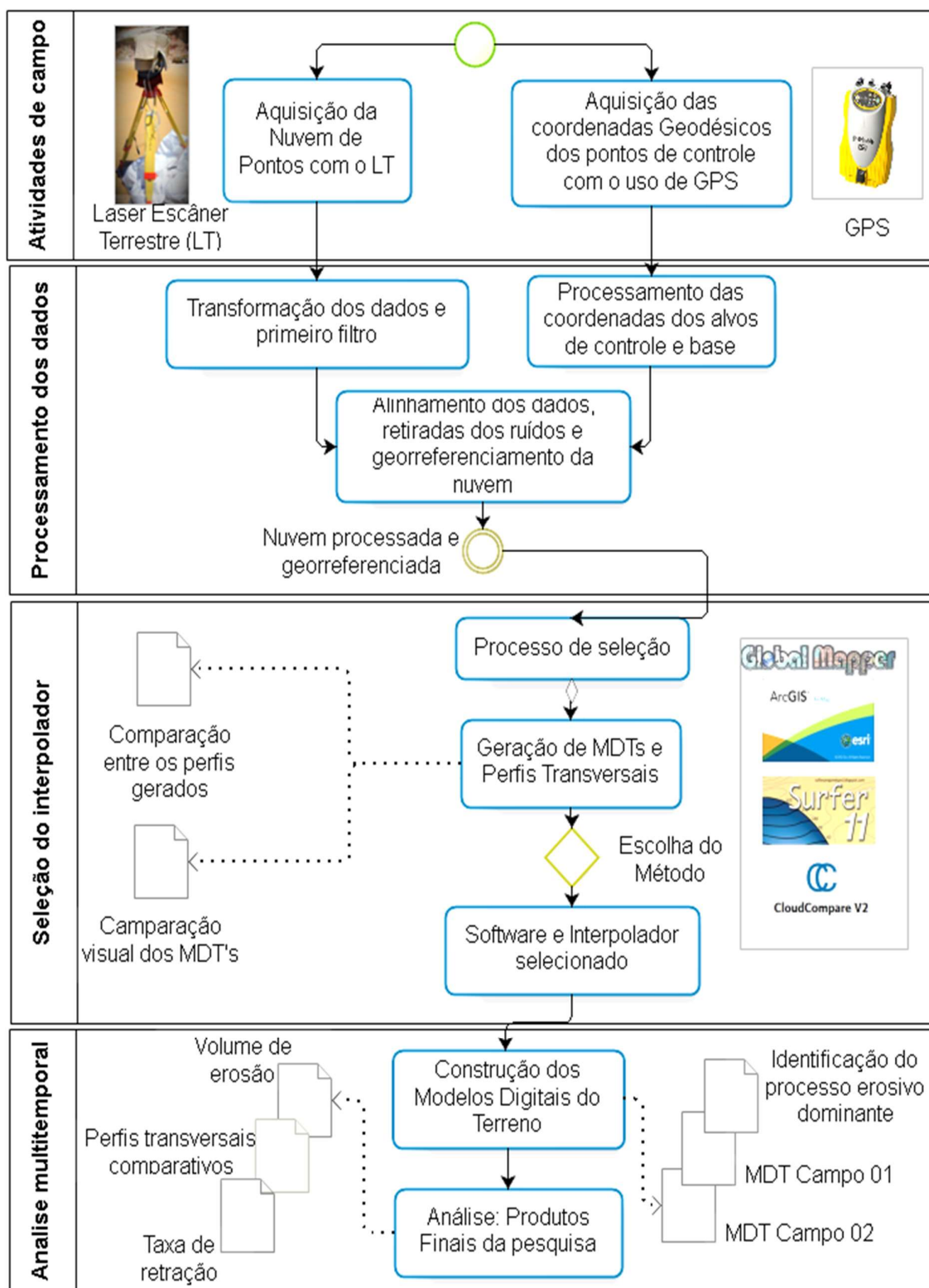


Figura 3.1 – Procedimentos metodológicos adotados nesta pesquisa. Com todas as etapas de atividades de campo, processamento dos dados, seleção do interpolador, processamento e análise multitemporal.

### 3.1 Equipamentos e Softwares

No levantamento de campo foi utilizado o LT, modelo ILRIS-3D (*Intelligent Laser Ranging & Imaging System*), da Optech Inc.(Canadá), montado estaticamente em base robótica sobre tripé. As especificações técnicas básicas são apresentadas na Tabela 3.1.

Para o georreferenciamento foram utilizados dois receptores modelo Trimble. Um modelo Trimble 5700 nas frequências L1 e L2, com precisão horizontal de 3 mm + 0,5 ppm e vertical de 5 mm + 0,5 ppm instalado na estação de referência (marco geodésico) e o outro do modelo Trimble R3 na frequência L1 com precisão horizontal de 5mm + 1 ppm e vertical de 5 mm + 2 ppm instalado de forma móvel nos pontos de interesse (LT e alvos de controle).

Nas etapas de processamento dos dados foram empregados os seguintes softwares: ILRISPARSE®, da Optech; O PolyWorks®, da Innovametrics.

Para a elaboração dos MDTs foram utilizados os softwares: ArcMap®, da ESRI; Surfer, da Golden Software Inc.; Global Mapper, da Blue MarbleGeographics e CloudCompare, software livre.

Tabela 3.1 - Especificações técnicas do modelo ILRIS-3D Optech Inc.

<b>Alcance</b>	3m-1800m
<b>Acurácia</b>	Distância: +/- 7mm a 100m Ângulo: +/- 8 mm a 100m
<b>Resolução do ponto</b>	Maior que 26 micro-radiano
<b>Taxa de amostragem</b>	2.000 pontos/s
<b>Densidade</b>	2cm a 1000m
<b>Exportação</b>	Nuvem de pontos XYZ, densidade, imagem digital e explicação dos dados.
<b>Câmera</b>	3.1 MP
<b>Interface de Operação</b>	Visor: 17cm VGA Câmera digital: 4 megapixel Controlador: Notebook

Fonte: Catálogo de especificações ILRIS-3D Optech Inc.

### 3.2 Etapa Prévia

Em 13 de março de 2016 foi realizada a primeira atividade de campo com o intuito de se identificar *in loco* os seguintes pontos relevantes: marcos geodésicos existentes; possíveis locais de instalação do LT e dos alvos de controle (também chamados de *targets*).

Esta atividade foi muito importante, pois, a partir dela foi possível identificar que o local de instalação prevista para o LT fica saturado mesmo na baixa-mar, podendo ocasionar o deslocamento do equipamento durante o levantamento. Este risco ocorre devido o perfil da praia ser muito plano deixando uma grande faixa de areia saturada e com baixa estabilidade. Diante disto, ficou definido que o LT seria instalado numa posição intermediária entre a face da falésia e a linha d'água durante a maré baixa para se evitar e reduzir este risco durante o levantamento (Figura 3.2).



Figura 3.2 – Barreira do Inferno e a faixa de areia disponível mostrando o trecho saturado na zona do estirâncio e ao fundo a falésia marinha ativa recoberta por campos dunares.

### 3.3 Aquisição dos Dados

O primeiro levantamento em campo foi realizado no dia 21 de agosto de 2016, no período da manhã, com a mínima maré em 0,0m, às 11h15. O segundo levantamento foi realizado no dia 24 de fevereiro de 2017, no período da manhã, com a maré mínima em 0,6m, às 9h00. Ambos os levantamentos tiveram o seu início, com a montagem do equipamento e o levantamento propriamente dito, ainda no momento

do recuo da maré, com o objetivo de maximizar o acesso a faixa de praia e permitir o levantamento com segurança.

Nesta etapa de aquisição dos dados, as maiores preocupações a respeito do uso do LT recaíram nos seguintes pontos: instalar o equipamento em uma superfície estável, configurar o equipamento de acordo com a densidade de pontos requerida e a pequena janela de tempo disponível para o levantamento.

Com o objetivo de evitar o deslocamento do LT durante a aquisição dos dados, foi confeccionada uma base metálica de 1,00m x 1,00m para uma melhor estabilização do tripé e distribuição do peso do equipamento, também foram colocados sacos com areia sobre a mesma, para promover uma maior estabilidade durante a aquisição dos dados (Figura 3.3).

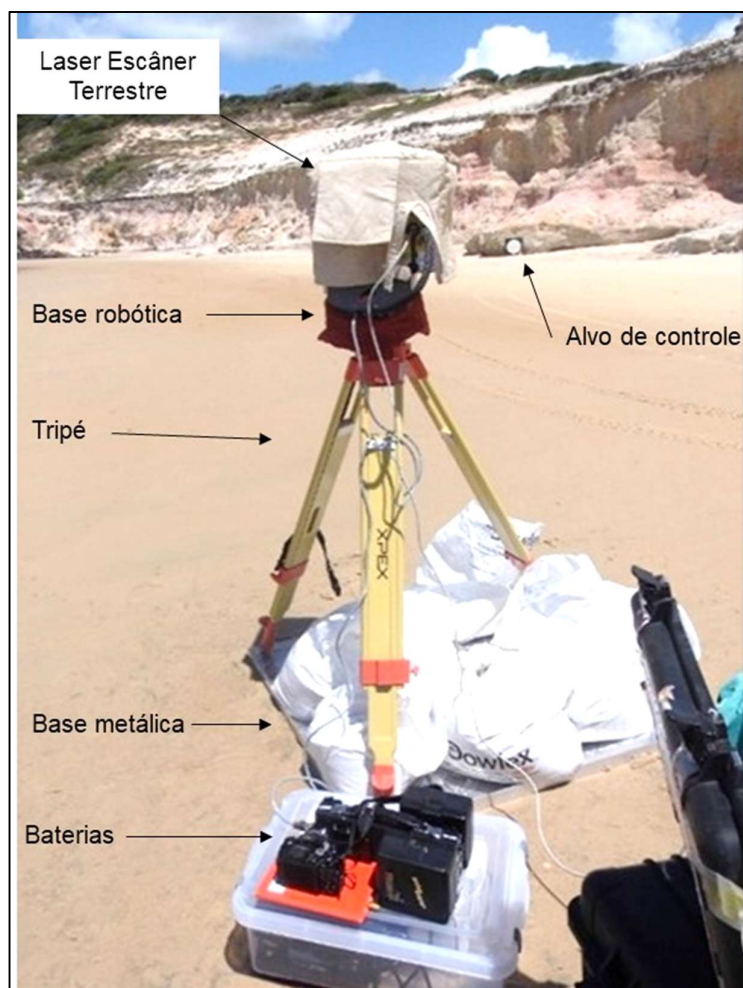


Figura 3.3 - Laser Escâner Terrestre (LT) montado sobre base robótica, tripé e base metálica durante o primeiro levantamento de campo em 21/08/2016.

O LT empregado permite a configuração da densidade de pontos de acordo com a necessidade do levantamento ou requisitos da pesquisa. No entanto, quanto maior a densidade de pontos, maior será a necessidade de tempo para a aquisição dos dados e, futuramente, mais necessidade de tempo de processamento.

A obtenção de uma densidade apropriada de ponto da nuvem é uma das mais importantes questões durante o uso e coleta de dados com o LT (Collins & Stock, 2012). Com a locação do equipamento na base da falésia, a densidade dos pontos aumentará de cima para baixo e dos lados para o ponto em que o feixe do escâner faz uma perpendicular ao alinhamento da falésia (Collins & Stock, 2012).

A densidade programada é tal que o ponto mais desfavorável de uma coleta tenha um número ideal mínimo de pontos para a correta interpretação e eficácia dos dados. No entanto, a obtenção desta densidade é governada pelas características técnicas do equipamento, da distância até a superfície, tempo disponível para o escaneamento e do volume de dados gerados. Adicionalmente, a acurácia e a extensão do arquivo são dependentes dos parâmetros da coleta de dados, particularmente do seu espaçamento de pontos (Feagin, 2014).

Seguindo estas recomendações, o equipamento foi configurado conforme mostrado na Tabela 3.2. A aquisição dos dados é realizada normalmente em três etapas para uma única base (locação do LT), são elas: a varredura com o LT do primeiro alvo de controle, a varredura do segundo alvo de controle e a varredura da superfície de interesse (face da falésia). Todavia, no primeiro levantamento de campo foi necessária a realização de 2 cenas, com o LT na mesma locação, para varrer toda a superfície da falésia. Esta divisão foi devido a impossibilidade do levantamento da falésia em uma única cena, ocasionado pela forma de instalação do equipamento.

Por causa dos requisitos da visada do equipamento e da complexidade da topografia, a completa topologia da falésia, muitas vezes, não pode ser coletada por um único imageamento ou em uma varredura única. Por exemplo, efeitos de sombreamentos e obstruções causados por objetos geram vazios que podem ser corrigidos por outras adicionais varreduras. A incapacidade de ter um fluxo contínuo de dados aumenta a complexidade na obtenção de dados e de processamento, uma vez que requer um algoritmo para registrar nuvens de pontos de varreduras adjacentes para o alinhamento (Olsen, 2009).

Com a utilização de apenas uma base para realizar todo o levantamento foi excluída a etapa de alinhamento entre as sucessivas varreduras que compõem o mesmo levantamento. Com esta simplificação, uma importante fonte de erros no uso do LT foi eliminada.

Tabela 3.2 - Configuração utilizada no laser escâner terrestre para a varredura / aquisição dos dados em cada um dos levantamentos de campo.

<b>Levantamento</b>	<b>Ponto de interesse</b>	<b>Distância média configurada (m)</b>	<b>Densidade de pontos na Horizontal e Vertical na Distância Média (mm)</b>	<b>Tempo de varredura (aquisição)</b>
21 de agosto de 2016	Alvo de controle 01	50	2	55 s
	Alvo de controle 02	75	3	18 s
	Falésia Cena 01	150	72	9 min 43s
	Falésia Cena 02	200	72	13 min
24 de fevereiro de 2017	Alvo de controle 01	100	4	40 s
	Alvo de controle 02	75	4,5	25 s
	Falésia Cena única	150	60	14 min

Para possibilitar a comparação temporal ao longo do período da pesquisa, os dados devem ser georreferenciados em um sistema de coordenadas real e comum (Olsen, 2009). Collins & Stock (2012) abordam que normalmente é exigido um esforço adicional para o georreferenciamento dos dados com o LT, quando comparado com o LA. O esforço é devido à falta de pontos de controle no levantamento acessíveis ou visíveis (por exemplo, refletores ou prismas) na parte superior das falésias, que são geralmente necessários para conectar levantamentos em áreas vizinhas no mesmo sistema de coordenadas local.

Nesta pesquisa, as nuvens de pontos foram georreferenciadas e niveladas em relação ao Sistema Geodésico do Brasil (SGB) com a utilização dos marcos geodésicos já existentes na área do CLBI. Os dados brutos da nuvem de pontos foram obtidos em X, Y e Z com relação ao equipamento (0,0,0). Assim, foi necessária a



conversão dos dados para um sistema de coordenadas globais. Neste estudo, foram determinadas as coordenadas geodésicas (Latitude, longitude e altitude geométrica) dos três pontos de controle: a estação base (LT) e os dois alvos de controle instalados na falésia (Figura 3.4).

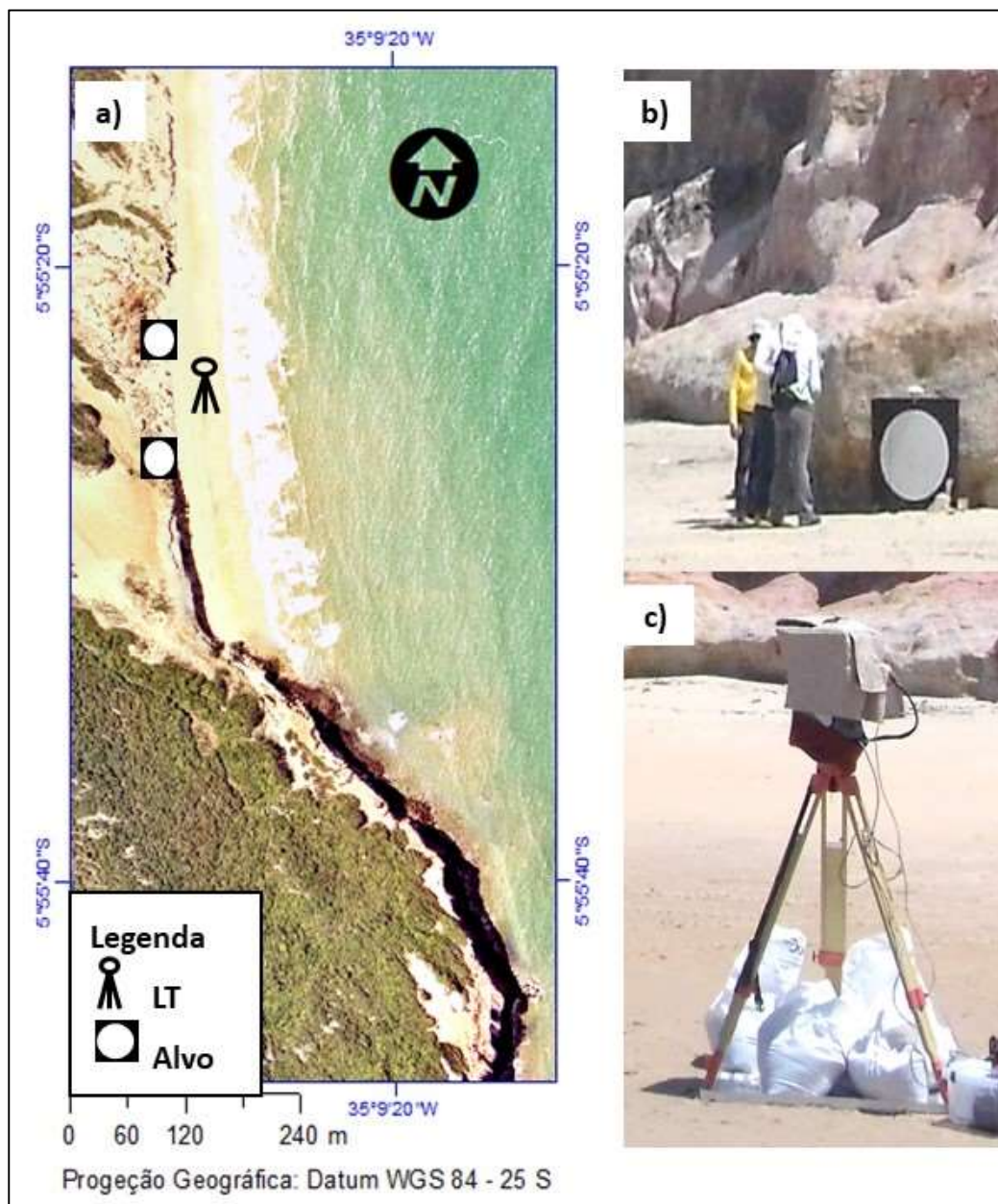


Figura 3.4 – Contexto geral da área estudada: a) na imagem são indicados os posicionamentos do Laser Escâner Terrestre (LT) e dos Alvos de controle durante o primeiro levantamento de campo realizada em 21/08/2016; b) Laser Escâner Terrestre (LT) montado sobre base robótica, tripé e base metálica; c) Alvo de controle.

Para a obtenção das coordenadas geodésicas foram empregados dois receptores coletando dados continuamente: um instalado na estação de referência (marco geodésico), e o outro em cada um dos pontos de interesse (LT ou Alvo de controle). Como estação de referência foi utilizado o marco geodésico existente na área do CLBI. A partir disto, os dados foram processados com o uso do software Topcon Tools®, foi possível a obtenção das coordenadas geodésicas e os erros padrões dos pontos levantados do campo. Para a determinação das altitudes ortométricas foi utilizado o aplicativo desenvolvido por Santos & Amaro (2011), o qual calcula estes dados utilizando a estação de referência existente e o geóide gravimétrico MAPGEO 2015 do IBGE (IBGE, 2016). A Tabela 3.3 exhibe as coordenadas geodésicas calculadas com a utilização do aplicativo. Estas coordenadas estão no sistema de referência WGS84 na projeção Zona 25 Sul.

Tabela 3.3 - Coordenadas geodésicas dos pontos de controle: L – Coordenada Leste, N – Coordenada Norte, dL – Desvio padrão para a coordenada Leste, dN – Desvio padrão para a coordenada Norte, dh – Desvio em h, H - altura Ortométrica.

Levantamento	Ponto	L (metros)	N (metros)	dL (metros)	dN (metros)	dh (metros)	H (cm)
21 de agosto de 2016	LT	261162,308	9344722,542	0,003	0,002	0,007	195,1
	Alvo 01	261145,461	9344684,597	0,003	0,005	0,008	231,6
	Alvo 02	261135,139	9344783,995	0,003	0,002	0,008	2,635
24 de fevereiro de 2017	LT	261172,704	9344721,79	0,003	0,003	0,008	193,2
	Alvo 01	261146,081	9344684,165	0,002	0,002	0,007	306,9
	Alvo 02	261137,469	9344761,682	0,003	0,002	0,007	281,4

### 3.4 Processamento dos Dados

A etapa de processamento da nuvem de pontos consiste na eliminação de ruídos, limpeza e o georreferenciamento da nuvem. O processamento da nuvem de pontos foi realizado com a utilização dos seguintes softwares: ILRIS PARSE®, da Optech e PolyWorks®, da Innovametrics.



O PARSE é fornecido junto com o LT e foi o primeiro software a ser utilizado, ele foi usado para a captura dos dados oriundos do LT e permitir a exportação dos mesmos na extensão \*.ixf, extensão compatível com o PolyWorks. Além disso, no PARSE, é realizada uma primeira etapa de limpeza automática dos pontos, com a retirada dos pontos discrepantes ou fora do range de interesse da pesquisa, com o uso da ferramenta *shot Alignment & Reduction*.

A próxima etapa do processamento dos dados foi realizada através do software PolyWorks, módulos AMAlign e AMSurvey. O primeiro passo consiste na junção de todos os imageamentos realizados na etapa de campo, são eles: alvos de controle e falésia. Nesta etapa foi processada uma limpeza manual dos pontos mais distantes e isolados. No segundo momento, com o uso da ferramenta *manual match*, dentro do módulo AMAlign, foi possível o georreferenciamento dos alvos, bem como do LT, e consequentemente, de toda a nuvem a partir dos dados de coordenadas importados em formato texto \*.txt. A Figura 3.5 mostra a nuvem de pontos após o processo de filtragem.

A última etapa do processamento com o PolyWorks foi realizada no módulo AMSurvey, onde é feita a exportação da nuvem de pontos em formato texto \*.ASCII. Este formato permite o uso e manipulação em diversos softwares do tipo Sistema de Informações Geográficas (SIG).

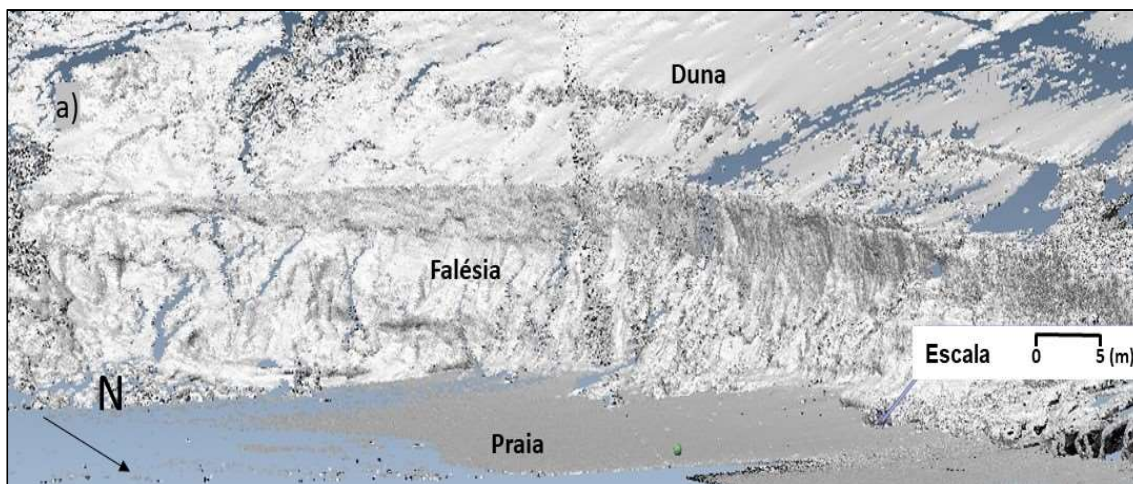


Figura 3.5 - Nuvem de pontos das feições geomorfológicas (praia, falésia e duna) da Barreira do Inferno obtida através do PolyWorks.

### 3.5 Seleção do Interpolador

Após o processamento e georreferenciamento dos dados da nuvem de pontos, os mesmos foram exportados para quatro softwares para a geração dos MDTs, são eles: ArcMap; Global Mapper; Surfer e CloudCompare. Os três primeiros softwares estão entre os mais utilizados como ferramentas de geoprocessamento em todo o mundo, sendo o quarto, um software livre e uma nova opção para pesquisas com o LT.

Com estes softwares foram gerados MDTs com a utilização dos métodos de interpolação IDW, NN, Kriging e TIN. O método TIN foi utilizada a restrição de Delaunay.

Para o processo de seleção do software e do método interpolador foi escolhida uma seção representativa da nuvem de pontos com características marcantes e de grande complexidade topológica, grande densidade de pontos e de fácil comparação visual. Tal escolha foi motivada pela presença de uma topologia particular com a existência de cavas na sua base e com trecho de inclinação vertical na sua face (Figura 3.6). Esta divisão foi utilizada devido ao grande tamanho da amostra e para melhor visualização das pequenas variações que ocorreram entre os diversos MDT's. Foram gerados perfis transversais de cada MDT e, a partir deles, a comparação visual foi empregada para a definição do software e interpolador mais adequado para o prosseguimento da pesquisa. Este trecho recortado da nuvem de pontos apresentou as seguintes características estatísticas mostradas na Tabela 3.4. Também se observou que mesmo na seção selecionada a distribuição dos pontos não é uniforme com uma maior concentração de pontos na faixa da praia. A seção recortada apresenta mais de 2 milhões de pontos com uma distribuição apresentada no gráfico da Figura 3.7.

Outra característica importante que justificou a escolha do referido local para análise foi motivada por a mesma ser a área da falésia que ficou mais próxima do local de instalação do LT e, portanto, é a área de maior densidade de pontos de toda a nuvem, conforme mapa de Kernel (Figura 3.8). O método de Kernel calcula a densidade de pontos por uma unidade de área a partir de em uma fórmula quadrática com o valor mais alto no centro da superfície (a localização do ponto) e diminuindo para zero na distância do raio de busca (ESRI, 2017). Através deste, foi possível

observar que a distribuição de pontos não é uniforme ao longo da nuvem e também não o é ao longo da altura da seção da falésia, sendo mais concentrados próximos ao LT e nas menores distâncias até o equipamento.



Figura 3.6 - Trecho selecionado para a geração dos Modelos Digitais do Terreno comparativos para a seleção do método interpolador. Destaque para a ocorrência de cavas na base da falésia.

Tabela 3.4 - Dados estatísticos do trecho selecionada para a geração dos Modelos Digitais do Terreno comparativos.

Setor	Tamanho da amostra (pontos)	Altitude Min.	Altitude Máx.	Altitude Média	Altitude Mediana	Desvio padrão
Trecho Selecionado	2.004.358	-0,11	12,512	1,938	0,0659	2,9694

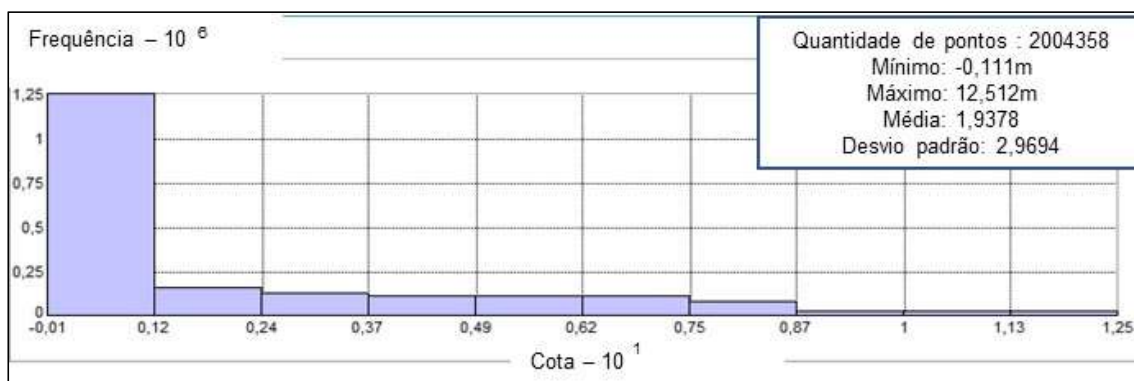


Figura 3.7 - Distribuição dos pontos da seção escolhida para a criação dos Modelos Digitais do Terreno e Perfis transversais para cada um dos softwares e interpoladores testados.

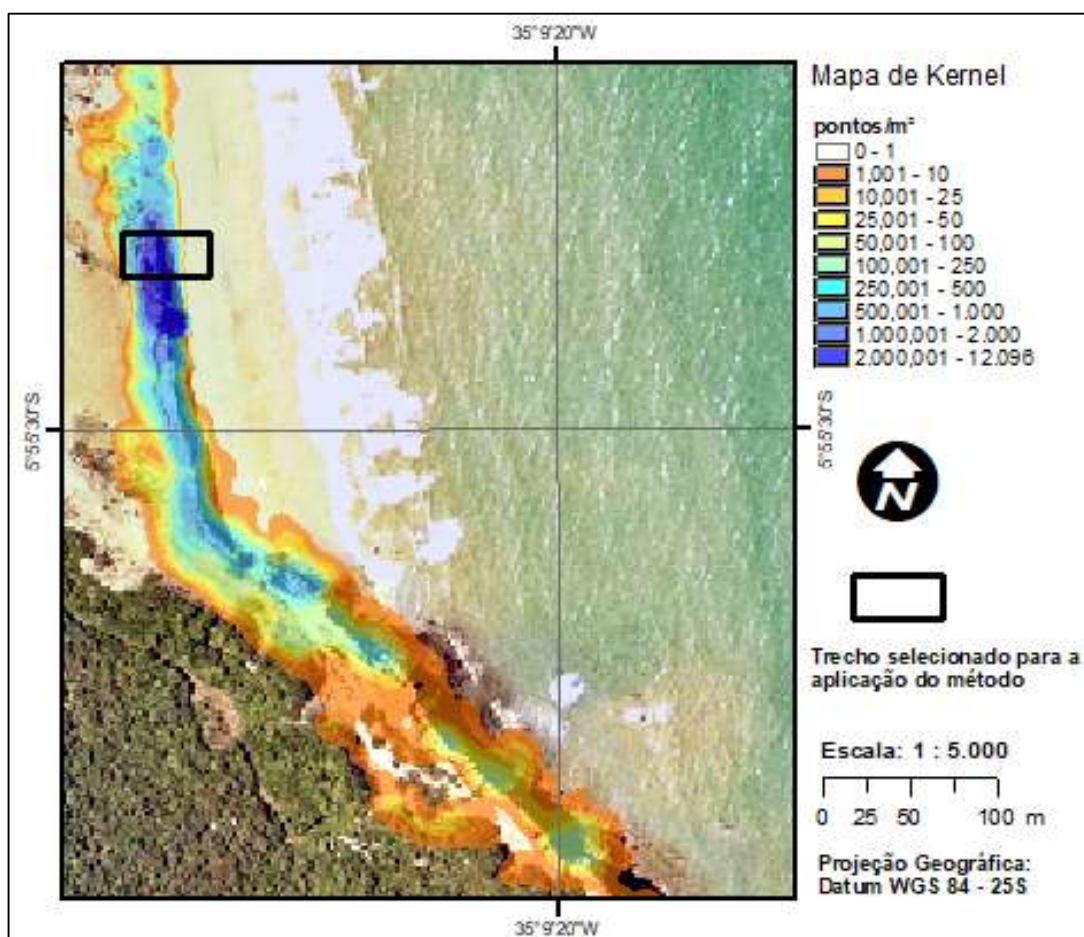


Figura 3.8 - Mapa de Kernel com a densidade dos pontos da nuvem do primeiro levantamento. No detalhe, a seção escolhida para a seleção do interpolador.

Após o processo de seleção do software e do método interpolador anteriormente descrito, foi possível a elaboração do MDT para toda a superfície da falésia referente ao primeiro levantamento. Este MDT foi gerado através do processo de *mesh* no CloudCompare utilizando a restrição de Delaunay. Após esta etapa, com a ferramenta *extrac selec*, foram extraídos 30 perfis transversais a face da falésia para permitir a identificação quanto ao processo erosivo dominante proposto com Emery & Khum(1982). O CloudCompare foi utilizado até esta etapa, pois, o mesmo não apresenta as ferramentas que permitiriam as demais análises necessárias para o prosseguimento da pesquisa. Nas demais etapas, foi adotado o ArcMap para a elaboração dos MDTs e das respectivas análises espaciais.

### 3.6 Análise Multitemporal

Esta etapa consistiu na comparação entre os MDTs do primeiro e do segundo levantamento de campo, com o uso do método interpolador TIN através do ArcMap. A comparação foi realizada a partir de perfis transversais e do cálculo de volume de erosão.

As análises e comparações foram realizadas por setor, através de perfis transversais comparativos, cálculo do volume erodido e taxa de retração. Para cada um dos 05 setores foi gerado pelo menos um perfil transversal comparativo entre os levantamentos de 21 de agosto de 2016 e 24 de fevereiro de 2017, com o uso da ferramenta *StackProfile* do ArcMap.

Para a comparação multitemporal entre os MDTs, e posterior quantificação do volume de erosão entre os dois levantamentos, foi utilizada a ferramenta *Surface Volume* do ArcMap. Esta ferramenta faz o cálculo do volume e da área total do MDT. Com estes dados, foi possível quantificar a diferença entre os modelos que é a erosão total que ocorreu durante o período.

Durante o intervalo de tempo da pesquisa, observou-se que a área da praia sofreu um processo de acreção entre o primeiro levantamento do dia 21/08/2016 e o segundo levantamento de 24/02/2017 (Figura 3.9). Como anteriormente citado, este volume de acreção é uma fonte de erros quando se trabalha com o cálculo da taxa de retração em falésias, pois, deve ser evitado que estes volumes entrem de forma



equivocada nos cálculos. Portanto, para se eliminar este risco, inseriu-se na ferramenta *Surface Volume* um parâmetro limitador de cálculo para apenas quantificar os volumes acima da cota +3,00 m (Figura 3.10). Nas regiões onde a presença de materiais soltos e que não foi viável a limpeza da nuvem este limitador ficou na cota + 5,00m.



Figura 3.9 - Variação sazonal do nível da face de praia entre a primeiro e o segundo levantamento de campo. a) 21/08/2016, b) 24/02/2017.

Após os cálculos dos volumes totais obtidos, a partir de cada um dos MDTs, foi possível quantificar a diferença entre estes volumes, obtendo a erosão total no período. Com estes dados e utilizando a formulação proposta por Young & Ashford (2006) calculou-se a taxa de retração no período e anualizada (Fórmula 3.1).

$$R = V / (H_c \times L_c \times T) \quad (\text{Fórmula 3.1})$$

Onde: R= Taxa linear de retração (m/ano); V= Volume total erodido (m³); Hc = média da altura da falésia (m); Lc = comprimento da falésia ao longo da costa; T = intervalo de tempo entre consecutivos levantamentos (ano).



Figura 3.10 - A seção hachurada representa o setor da falésia marinha acima da cota +3,0m utilizada para a comparação entre os levantamentos realizados em 21/08/2016 e 24/02/2017.

## CAPÍTULO 4

## Resultados e Discussões

### 4.1 Análise Comparativa entre os MDTs para a Seleção do Interpolador

A partir do trecho selecionado da falésia marinha ativa, 10 MDTs foram modelados variando-se o software e o método interpolador, conforme mostrado na Tabela 4.1. Elaborou-se para cada um dos MDTs o seu respectivo perfil transversal e com ele foi possível fazer a comparação com os pontos da nuvem de pontos que originaram os modelos, servindo estes pontos como controle e referência (Figuras 4.1; 4.2; 4.3 e 4.4). Selecionou-se para esta etapa de comparação dois métodos Determinísticos (NN, IDW), um método Geostáticos (Kriging) e o método baseado em vetores (TIN).

Tabela 4.1 - Relação dos Modelos Digitais do Terreno gerados para cada um dos softwares e os respectivos métodos interpoladores adotados.

SOFTWARES	INTERPOLADOR			
	TIN	NN	IDW	Kriging
ArcMap	X	X	X	X
Surfer	X	X	X	X
Global Mapper	X	ND	ND	ND
CloudCompare	X	ND	ND	ND
TIN – Triangular Irregular Network; NN – Natural Neighborhoods; IDW – Inverse Distance Weighting; ND – Não disponível.				



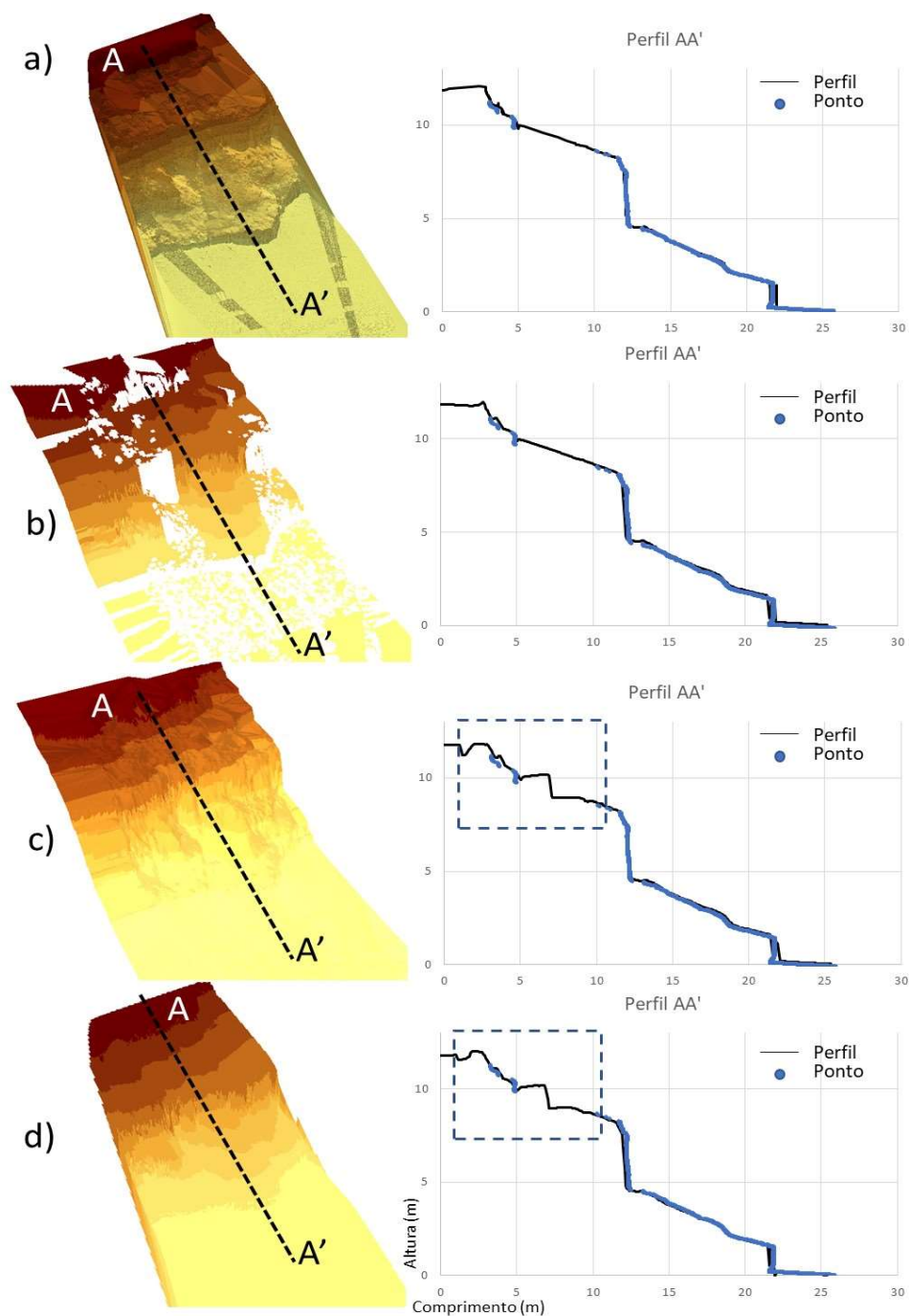


Figura 4.1 – Modelos Digitais do Terreno (MDTs) com os perfis transversais comparativos (Superfície obtida X nuvem de pontos) gerados no ArcMap com os seguintes interpoladores: a) Triangular Irregular Network (TIN); b) Kriging; c) Inverse Distance Weighting (IDW); d) Natural Neighborhoods (NN). Detalhe para a ausência da cava em todos os modelos e a interpolação inadequada da parte superior da superfície com o uso do IDW e o NN.

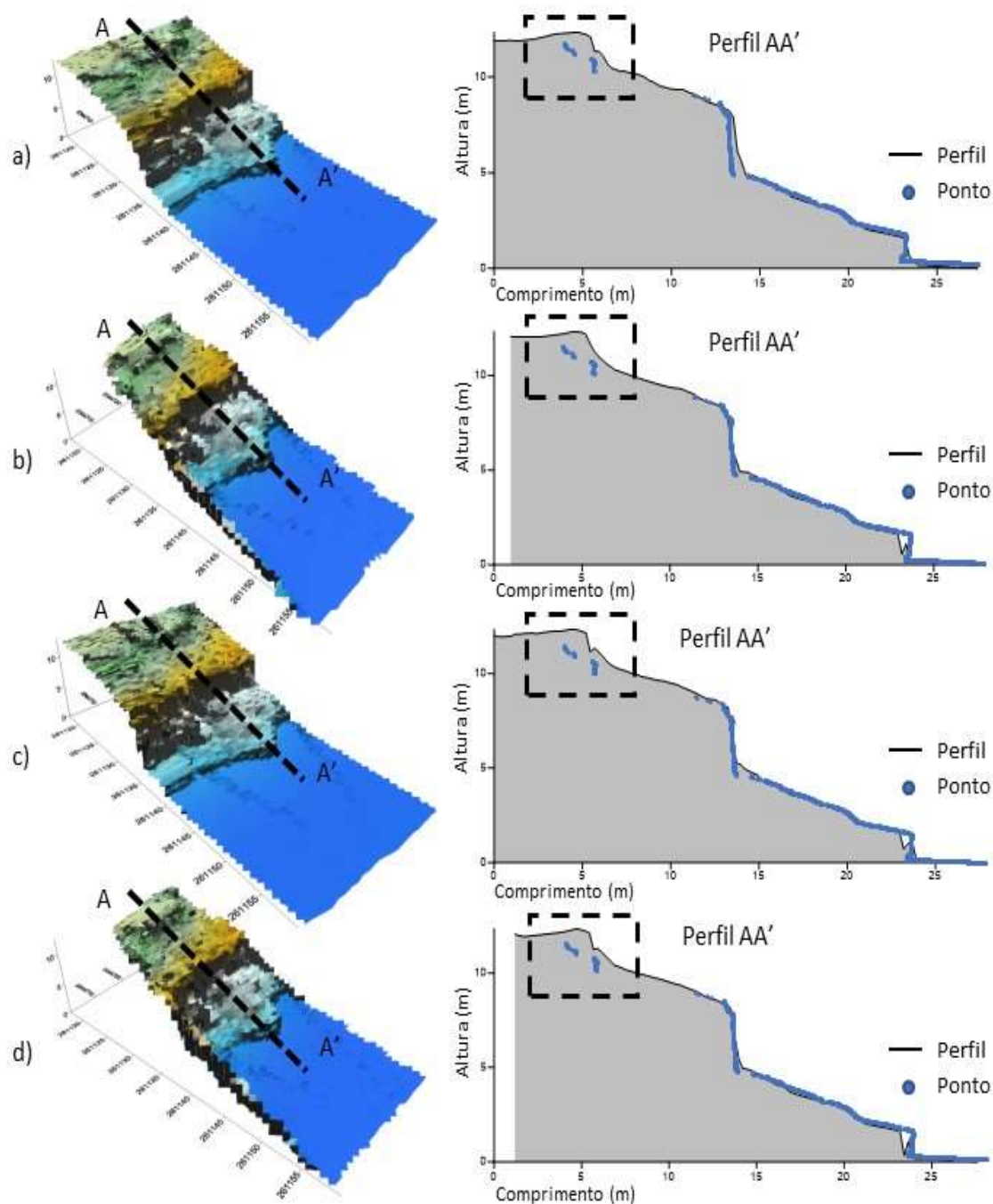


Figura 4.2 – Modelos Digitais do Terreno (MDTs) com os perfis transversais comparativos (Superfície obtida X nuvem de pontos) gerados no Surfer com os seguintes métodos interpoladores: a) Inverse Distance Weighting (IDW); b) Natural Neighborhoods (NN); c) Kriging; d) Triangular Irregular Network (TIN). Detalhe para a ausência da cava em todos os modelos e interpolação inadequada da parte superior da superfície em todos os métodos utilizados.

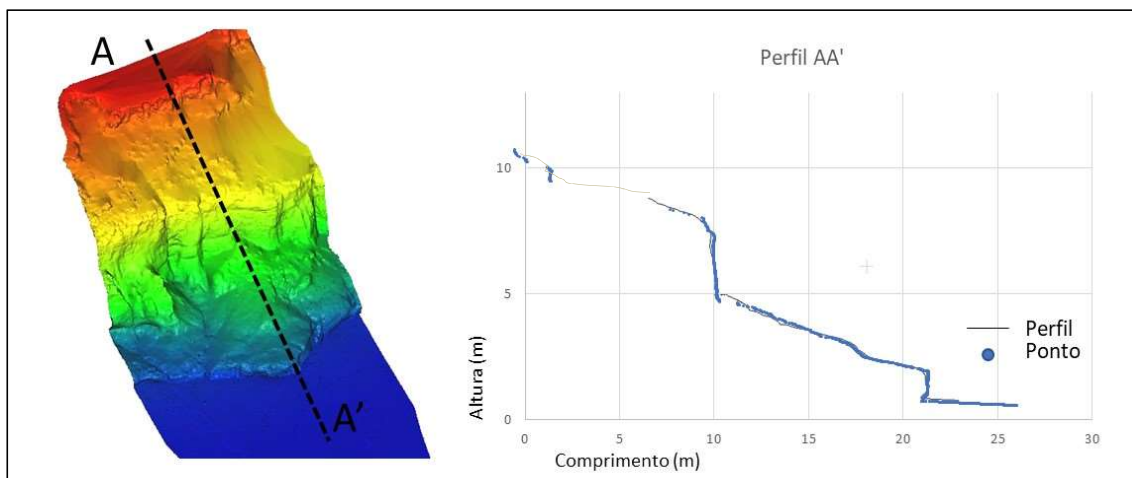


Figura 4.3 - Modelo Digital do Terreno (MDT) com o perfil transversal comparativo (Superfície obtida X nuvem de pontos) gerado com o CloudCompare com o método interpolador Triangular Irregular Network (TIN). Detalhe para a presença da cava no modelo.

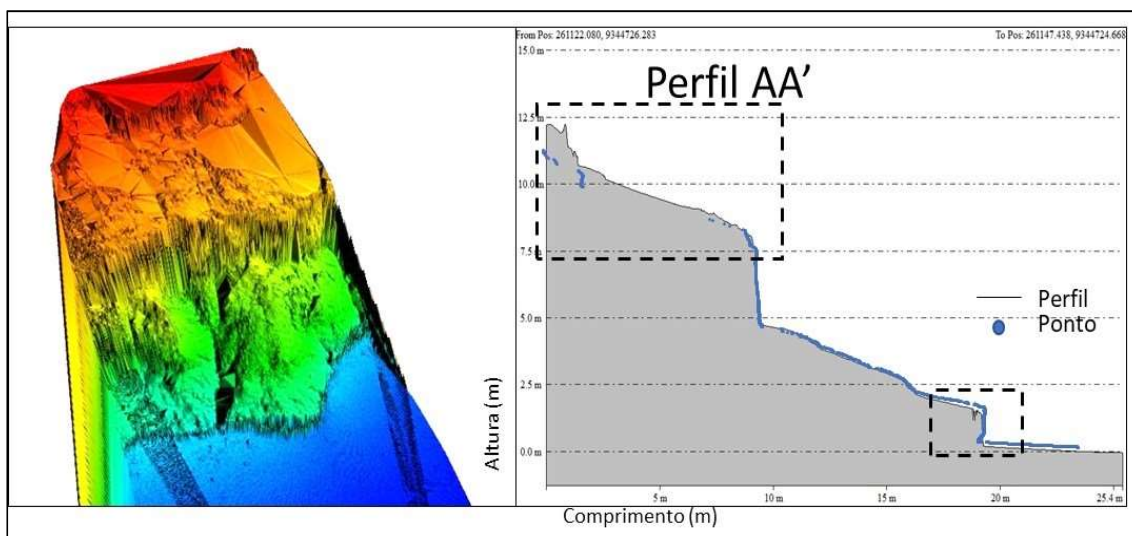


Figura 4.4 – Modelo Digital do Terreno com o perfil transversal comparativo (Superfície obtida X nuvem de pontos) gerado no Global Mapper com o método interpolador Triangular Irregular Network (TIN). Detalhe para a ausência da cava no modelo e falta de precisão entre os pontos da nuvem e o perfil na parte superior.

A partir da comparação dos diversos MDTs e seus respectivos perfis foi observado que os métodos que representaram a falésia com a maior quantidade de detalhes foram os que utilizavam o interpolador TIN através do CloudCompare e do ArcMAP. Os demais modelos utilizados para a comparação não apresentaram qualidade satisfatória com imprecisões nos trechos superiores da falésia. Tais imprecisões foram observadas a partir da comparação visual entre a nuvem de pontos e a superfície interpolada.

O método TIN de interpolação é recomendado por Amaro et al. (2012) e Lima et al. (2016) para ambientes costeiros, especificamente em faces de praia. Diversos autores, em seus estudos com a utilização do LT, utilizaram o TIN para a modelagem das superfícies (Abellan *et al.*, 2011; Lee *et al.*, 2011; Schmid *et al.*, 2011; Santos, 2014; Santos *et al.*, 2014; Garae, 2015; Hayakawa & Obanawa, 2015; Santos *et al.*, 2015a; Santos *et al.*, 2015b). Para o caso de falésias, Collins & Stock (2012) concluíram que a utilização do TIN é o recomendado e, muitas vezes, a sua utilização é indispensável para a modelagem deste tipo de topografia complexa. Zeiler (1999), por sua vez, chegou a semelhante conclusão a respeito da vantagem da modelagem TIN em relação aos outros modelos interpoladores. O método geostático do tipo Kriging, utilizando o ArcMap, também se mostrou bastante confiável. Apesar disso, o mesmo por utilizar uma formulação complexa exigiu um tempo de processamento muito grande para a geração desta fração da nuvem de pontos, aproximadamente 28 horas de processamento. Tal exigência de processamento foi um dos motivadores para não prosseguir com a sua utilização em toda a nuvem de pontos. Além disto, o método TIN mostrou-se de rápido processamento e com excelente qualidade nos resultados obtidos (Tabela 4.2)

Quando comparados os MDTs que utilizaram o interpolador do tipo TIN, gerados no CloudCompare e no ArcMap, o que melhor representou visualmente a real superfície da falésia foi o obtido com o uso do CloudCompare, pois, foi o único de todos os modelos e softwares testados que modelou as cavas existentes na base da falésia, conforme exibido na Figura 4.5. Também se observa, com maiores detalhes, a grande convergência entre a superfície gerada e a nuvem de pontos, bem como uma melhor visualização das cavas modeladas pelo software (Figura 4.6).

Tabela 4.2 – Comparação do tempo de processamento para a elaboração dos Modelos Digitais do Terreno para cada um dos softwares e os respectivos métodos interpoladores adotados.

SOFTWARES	INTERPOLADOR			
	TIN	NN	IDW	Kriging
ArcMap	1 min	1 min	1 min	28 h
Surfer	1 min	7 min	6 min	7 min
Global Mapper	6 min	ND	ND	ND
CloudCompare	8 min	ND	ND	ND
TIN – Triangular Irregular Network; NN – Natural Neighborhoods; IDW – Inverse Distance Weighting; ND – Não disponível.				

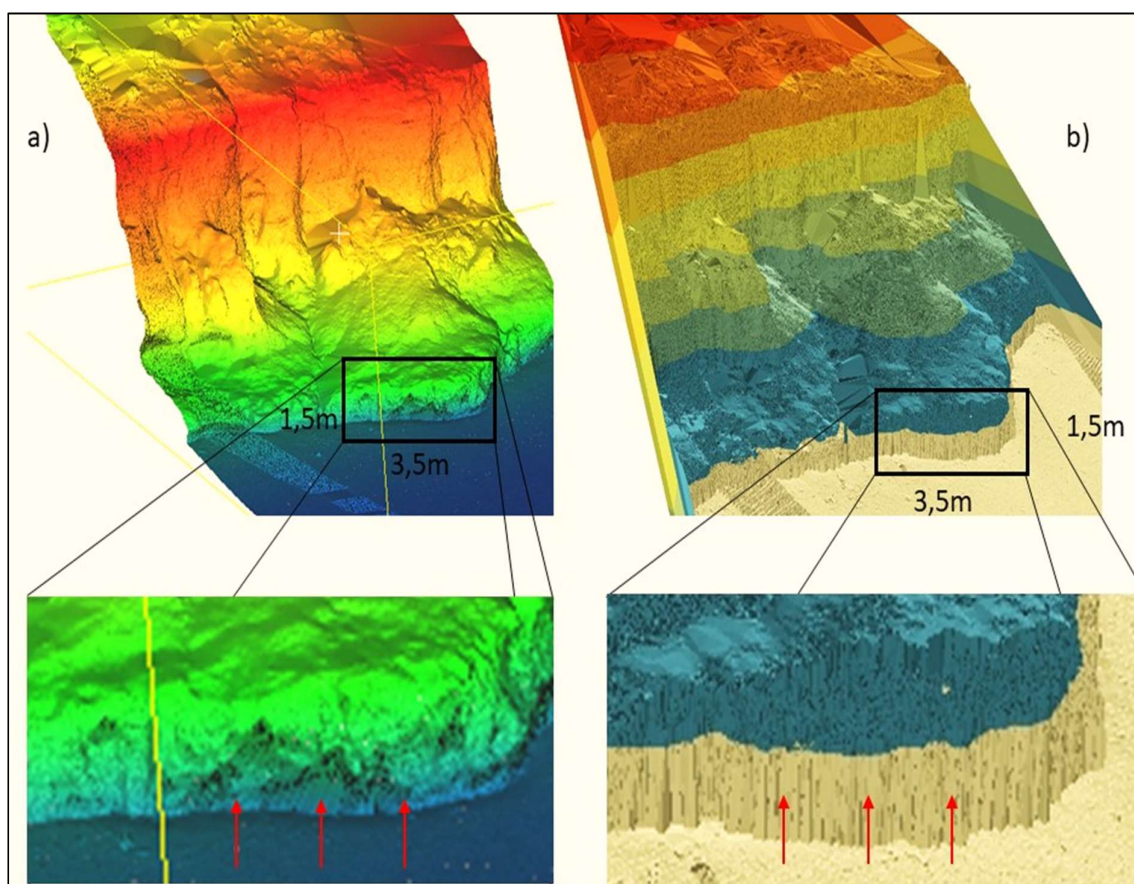


Figura 4.5 - Comparação entre os Modelos Digitais do Terreno gerados entre o CloudCompare (a) e o ArcMap (b) com destaque para as áreas das cavas.



De acordo com Zeiler (1999), uma das limitações do ArcMap é a impossibilidade de gerar superfícies com inclinação negativa como cavas e falésia verticais. Porém, devido as limitações do CloudCompare no que tange a manipulação dos dados e obtenção de perfis e volumes comparativos, o ArcMap foi o software utilizado para estas aplicações.

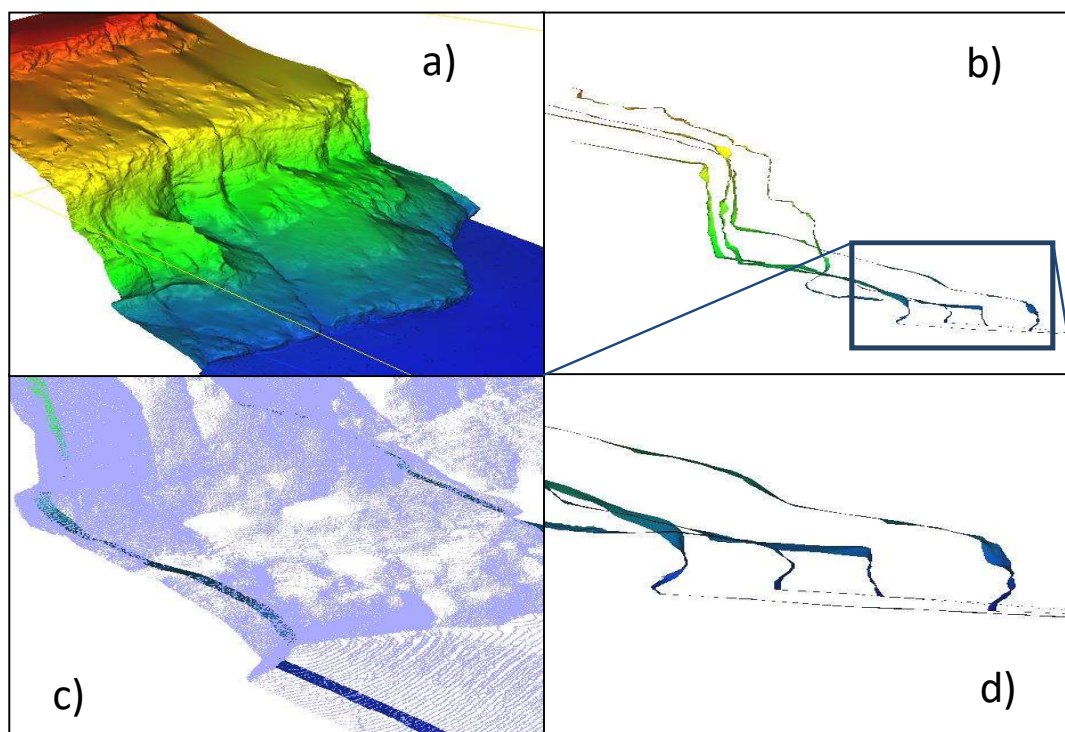


Figura 4.6 - Modelo Digital do Terreno gerado com o CloudCompare: a) MDT da seção de teste; (b) Perfis transversais; (c) Convergência entre o perfil transversal e a nuvem de pontos; (d) detalhe dos perfis transversais com ênfase para a área das cavas existentes na base da falésia junto a praia.

## 4.2 Correlação entre os Perfis Transversais

A Figura 4.7 apresenta o MDT gerado a partir do levantamento de 21 de agosto de 2016, usado como modelo para a criação de 30 perfis transversais à face da falésia, ao longo de toda a área do levantamento. Os perfis foram gerados a cada 20 m de distância. A área do levantamento foi subdividida em 5 setores e seus perfis em seguida foram agrupados, permitindo a identificação de similaridade em sua geometria (Figura 4.8).

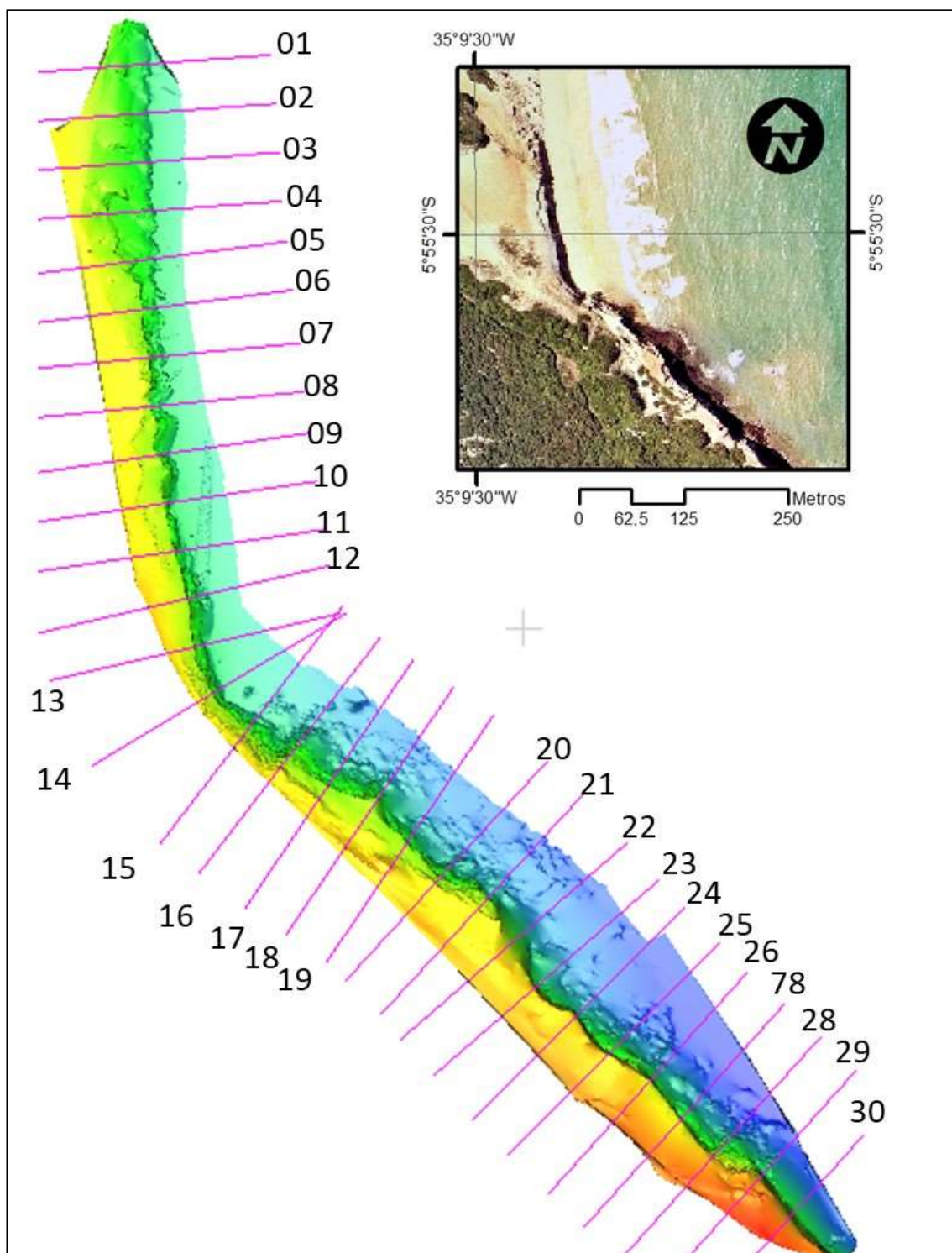


Figura 4.7 - Modelo Digital do Terreno gerado a partir do CloudCompare com a localização dos perfis transversais à face da falésia utilizados para identificação do principal indutor erosivo.

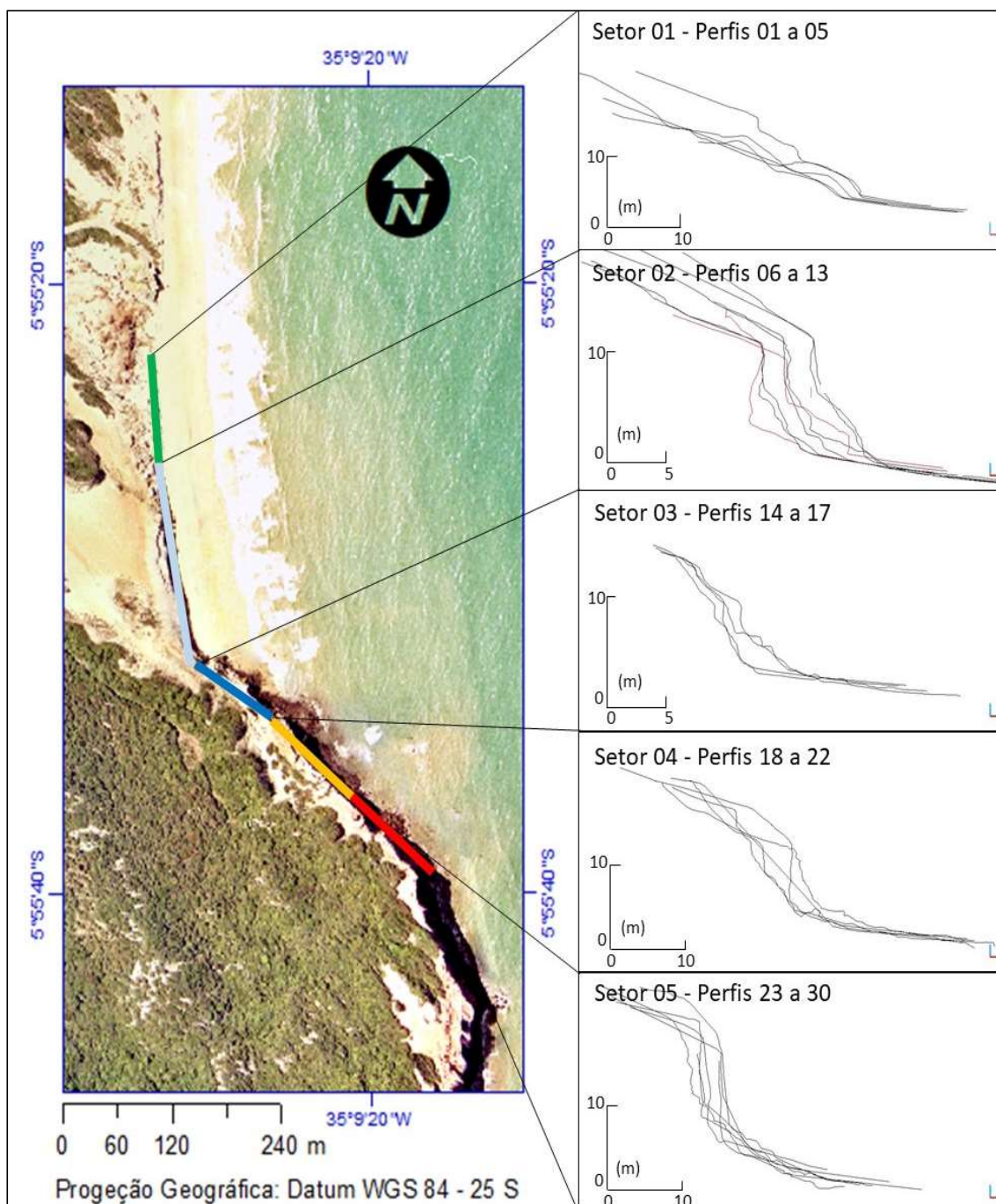


Figura 4.8 - Localização dos 5 setores onde tiveram os seus perfis transversais agrupados. Setor 01 – 5 perfis com altura máxima de 13m sem a identificação da crista da falésia; Setor 02 – 8 perfis com altura média de crista da falésia de 11,0m;

Setor 03 – 4 perfis com altura média da crista da falésia de 12,5m; Setor 04 – 5 perfis com altura média da crista da falésia de 19 m; Setor 05 – 8 perfis com altura média da crista da falésia em 20m.



Com os perfis agrupados realizou-se a correlação entre os mesmos e a matriz de identificação do principal agente erosivo proposta por Emery & Kuhn (1982). Entretanto, a matriz proposta pelos autores não abrange o caso de falésia com diversas camadas. Dias & Neal (1992) pesquisaram falésias com sucessivas camadas e propuseram a simplificação de considerá-las homogêneas, para permitir a identificação conforme proposição de Emery & Kuhn (1982).

No estudo foi realizada a adaptação da matriz de identificação do principal agente erosivo para o caso de camada mais resistente no topo e na base da falésia, através da adequação dos modelos (B) camada resistente no topo e (C) camada resistente na base, descritos na Figura 4.9, a partir deles foi possível criar os modelos (D) camada resistente no topo e base na mesma Figura que representam a falésia com as camadas mais resistentes no topo e na base. Com esta proposição, foi possível classificar os 5 setores da falésia de acordo com o principal agente erosivo conforme mostrado na Tabela 4.3.

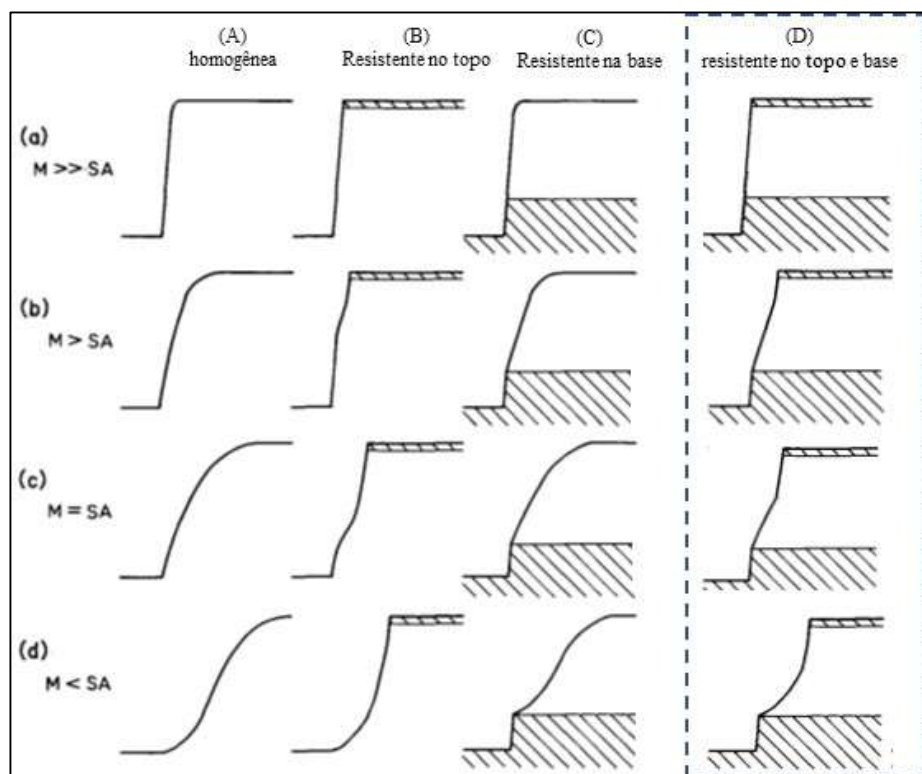


Figura 4.9 – Adaptação da matriz proposta por Emery & Kuhn (1982). Adaptação em destaque com a inclusão dos perfis esperados para o caso de camada mais resistente no topo e na base da falésia, onde M – causas marinhas; SA – causas continentais.

Tabela 4.3 – Identificação do agente erosivo predominante para cada um dos setores da falésia.

Setor	Grupo de perfis	Agente Erosivo predominante				Consideração a respeito da heterogeneidade e local da camada mais resistente
		M >> C	M > C	M = C	M < C	
1	Perfis 02 – 06				X	Resistente na base (C)
2	Perfis 07 – 14		X			Resistente na base e topo (D)
3	Perfis 15 – 18			X		Resistente na base e topo (D)
4	Perfis 19 – 23	X				Resistente na base e topo (D)
5	Perfis 24 – 30	X				Resistente na base e topo (D)
M = Erosão marinha; C = Erosão continental						

O setor 01 apresenta erosões do tipo sulcos e voçorocas, com uma superfície apresentando inclinação suave de forma convexa para cima, deixando clara a dominância da erosão continental em detrimento a erosão marinha (Figura 4.10a). As baixas inclinações apresentadas pelos perfis transversais neste setor não permitiram a identificação da crista da falésia. Neste setor, os perfis transversais apresentaram semelhança com o perfil esperado em falésias marinhas com a camada resistente apenas na sua base.

O setor 02, por sua vez, apresenta uma inclinação predominantemente vertical na sua face, por vezes até negativa próximo a crista (Figura 4.10b; 4.10c). O setor apresentado em alguns pontos uma camada de base remanescente a frente das demais camadas, o que indica que esta camada sofre menos os efeitos erosivos que as camadas subsequentes conforme se elevam no perfil da falésia. Nesta camada de base nota-se a presença de cavas, principalmente no primeiro levantamento, onde o nível da face da praia estava menor que o encontrado no levantamento posterior. Este setor também apresenta pontualmente materiais soltos provenientes de desmoronamentos anteriores.

O setor 3 apresenta-se com uma inclinação variando entre 30° e 60°. Este setor foi caracterizado como estando em equilíbrio entre os agentes erosivos marinhos e continentais. A falésia no setor apresenta-se com proteção momentânea da sua base, devido à presença de blocos de materiais provenientes de desmoronamentos anteriores. Em toda a face da falésia são encontrados pequenos sulcos indicando a ocorrência de erosão pluvial (Figura 4.10d)

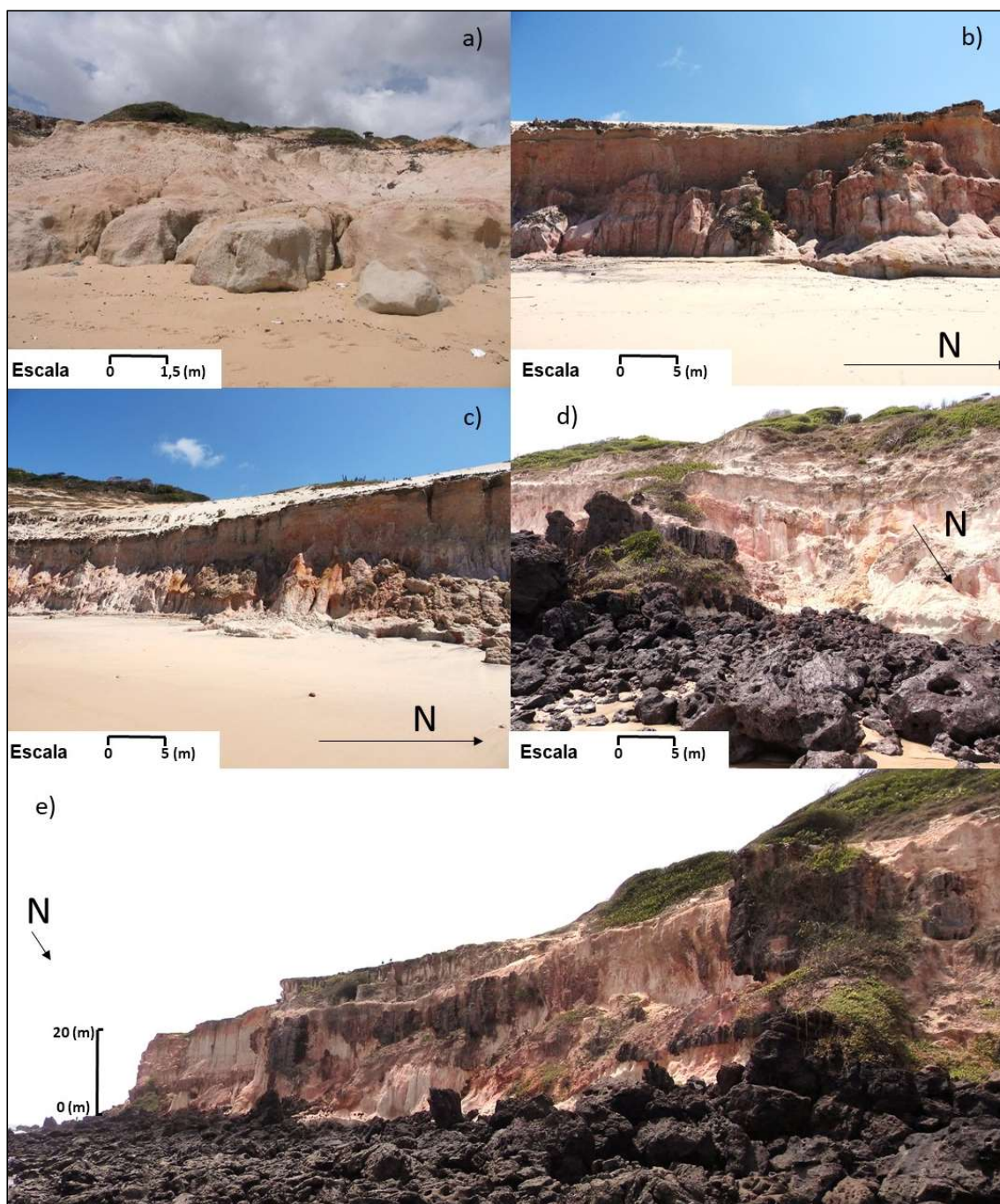


Figura 4.10 - (a) Setor 01- falésia de perfil suave e com a presença de sulcos e voçorocas; (b) e (c) Setor 02 – Notar a inclinação quase vertical e a presença de materiais oriundos de deslizamentos anteriores; (d) Setor 03– Perfis com inclinação variando entre 30° e 60° com a presença material solto em sua base e na face da falésia; (e) Setores 04 e 05 – Setores com predominância vertical e presença de material solto na base.

Os setores 04 e 05 estão localizados no trecho mais elevado da falésia e com inclinações verticais (Figura 4.10e). No setor 04 é observada uma segunda linha de crista da falésia mais recuada, indicando ser a Formação Potengi, relatada por Araújo et al. (2006). Em correspondência com o setor 03, nestes dois setores também são observados grandes volumes de materiais soltos na base da falésia, conferindo os benefícios já relatados por suas presenças. Contudo, a falésia apresenta-se mais exposta as forçantes marinhas, a face de praia é praticamente inexistente e os poucos espaços existentes estão ocupados pelo material solto proveniente de desmoronamentos anteriores de material da falésia. Todas estas evidencias denotam que o agente erosivo predominante é o marinho, mesmo sendo observados pequenos sulcos indicando a ocorrência de erosão pluvial de pequena magnitude no setor 04.

O método de identificação do principal agente erosivo proposto deve ser considerado como um indicador. O mesmo pode servir de apoio a outras formas de análise e avaliação da erosão em falésias, permitindo, em conjunto, uma correta identificação dos principais agentes erosivos.

### **4.3 Análise Multitemporal de Curto Prazo**

A análise multitemporal representa a principal avaliação a ser realizada para a quantificação das mudanças que estão ocorrendo numa falésia em um dado intervalo de tempo. As Figuras 4.11 e 4.12 apresentam os dois MDTs elaborados para o 1º levantamento e para o 2º levantamento. A partir destes, foi possível proceder a análise multitemporal por meio da comparação entre os perfis transversais, a face da falésia, entre os dois levantamentos e a quantificação do volume de erosão entre os MDTs. Com o volume de erosão obtido entre os dois levantamentos, foi quantificada a taxa de retração durante o período estudado e a sua taxa de forma anualizada.

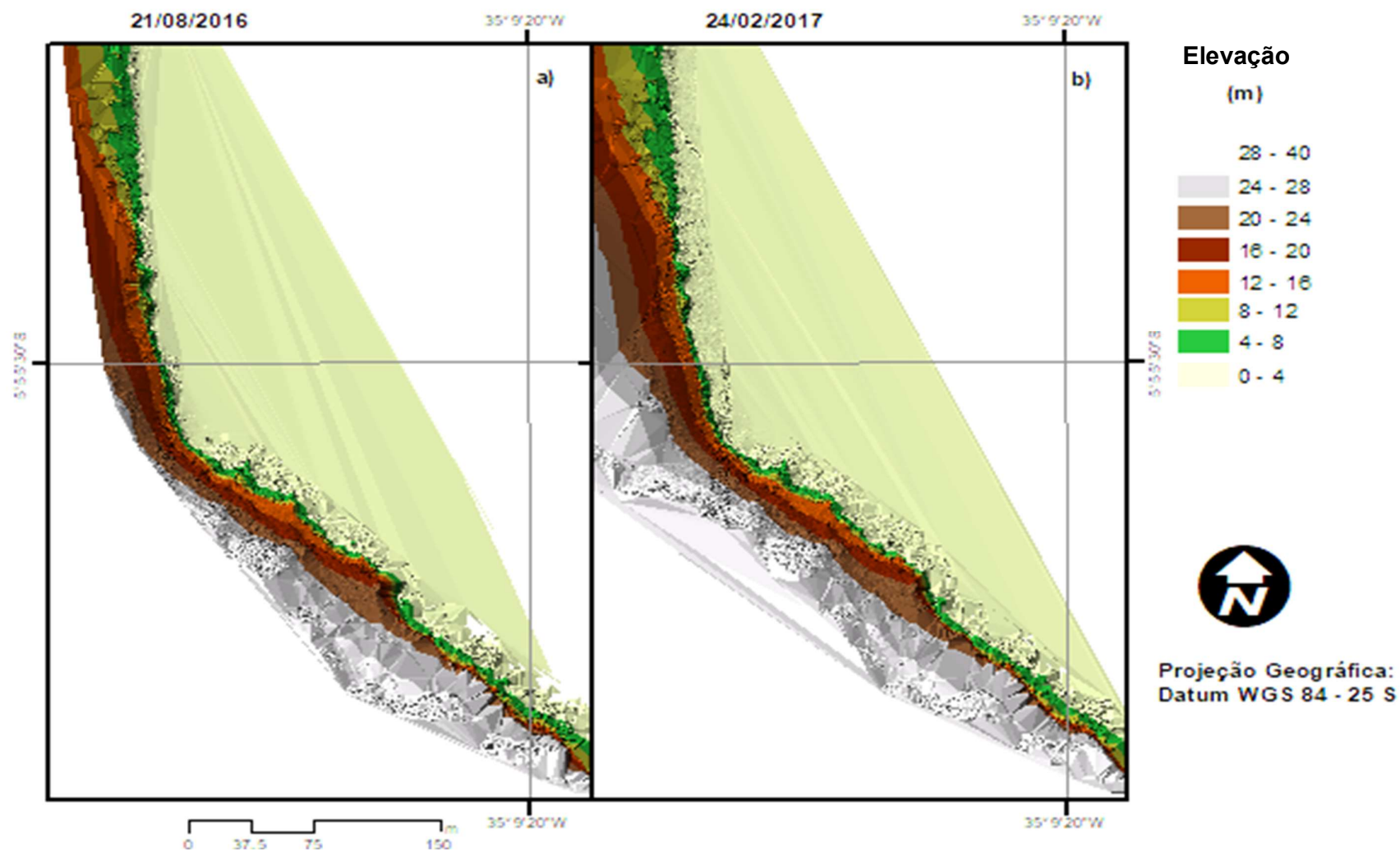


Figura 4.11 - Modelo Digital do Terreno gerado a partir dos dados levantados em (a) 21/08/2016 e (b) 24/02/2017.



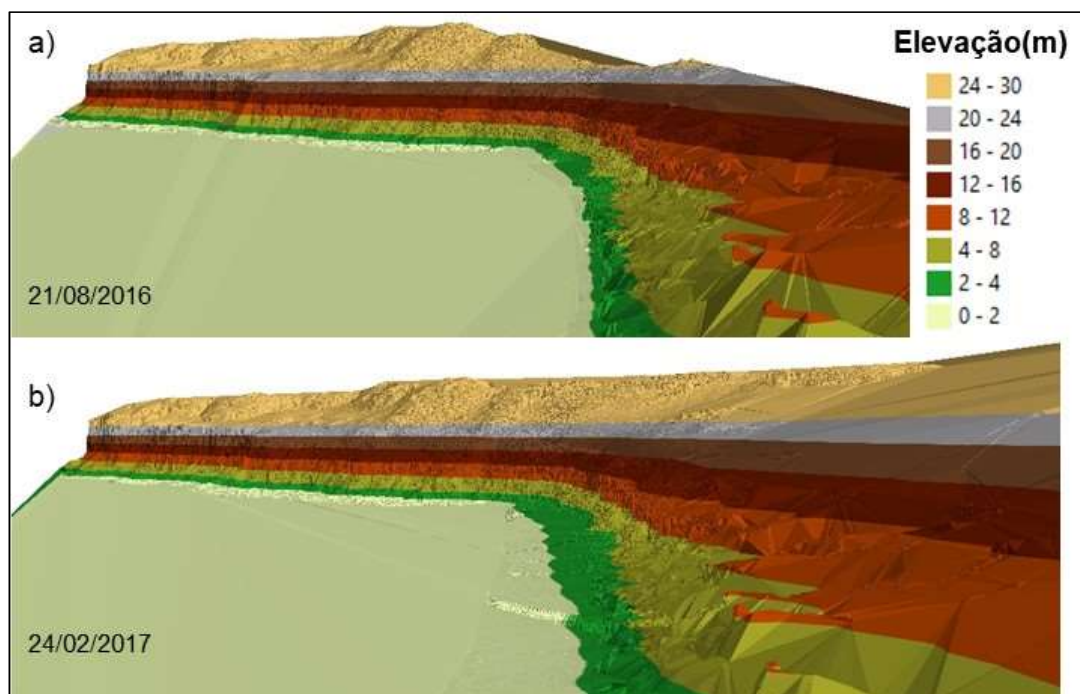


Figura 4.12 - (a) Representação tridimensional do Modelo Digital do Terreno gerado a partir dos dados levantados em (a) 21/08/2016 e (b) 24/02/2017

#### 4.3.1 Detecção das Mudanças através dos Perfis Transversais

Tomando a mesma divisão por setores, adotada na seção 4.1, foi realizada a comparação multitemporal entre 8 perfis transversais comparativos e suas locações com relação aos setores são apresentadas na Figura 4.13. A escolha do local para a geração dos perfis comparativos seguiu as seguintes premissas: que a região da nuvem apresente boa densidade de pontos; seleção de pelo menos um perfil por setor e no caso de setores com mais de um perfil, que os mesmos tenham uma distribuição espacialmente uniforme entre si.

A escolha dos locais onde as nuvens de pontos apresentam as maiores densidades permitiu uma melhor identificação das reais modificações que ocorreram na falésia entre os levantamentos com uma menor influência de eventuais descontinuidades ou vazios nas nuvens de pontos. Os perfis comparativos são apresentados na Figura 4.14.

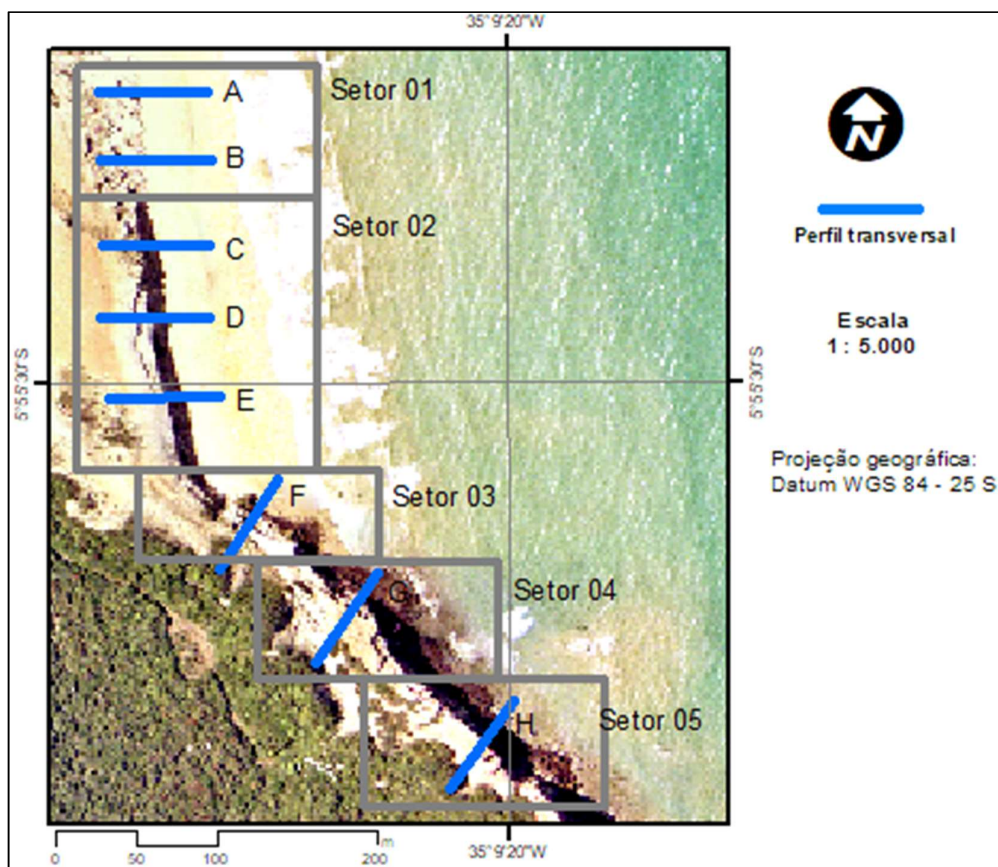


Figura 4.13 - Localização dos perfis transversais comparativos por setor.

Cabe destaque aos perfis comparativos “A” e “B”, localizados no setor 01, por apresentarem pontos com retrações consideráveis da ordem de metros. A grande diferença observada nestes perfis pode ter relação com o fato do setor apresentar sinais de erosões significativas e indicação de constantes fluxos pluviais (Figura 4.15).

Os perfis comparativos “C”, “D” e “E”, localizados no setor 2, não apresentaram variações morfológicas significativas, não sendo identificável através deles sinais de movimentações de massas durante o período pesquisado, revelando que este setor permaneceu estável durante o período de monitoramento. Durante os levantamentos de campo foram identificados materiais soltos na base da falésia, provenientes de desmoronamentos anteriores. Estes materiais, permaneceram no local durante todo o intervalo de tempo de monitoramento, sendo parcialmente removidos da sua base. Tal fato, indica que a ação marinha neste setor durante o período do monitoramento não foi intensa (Figura 4.16).

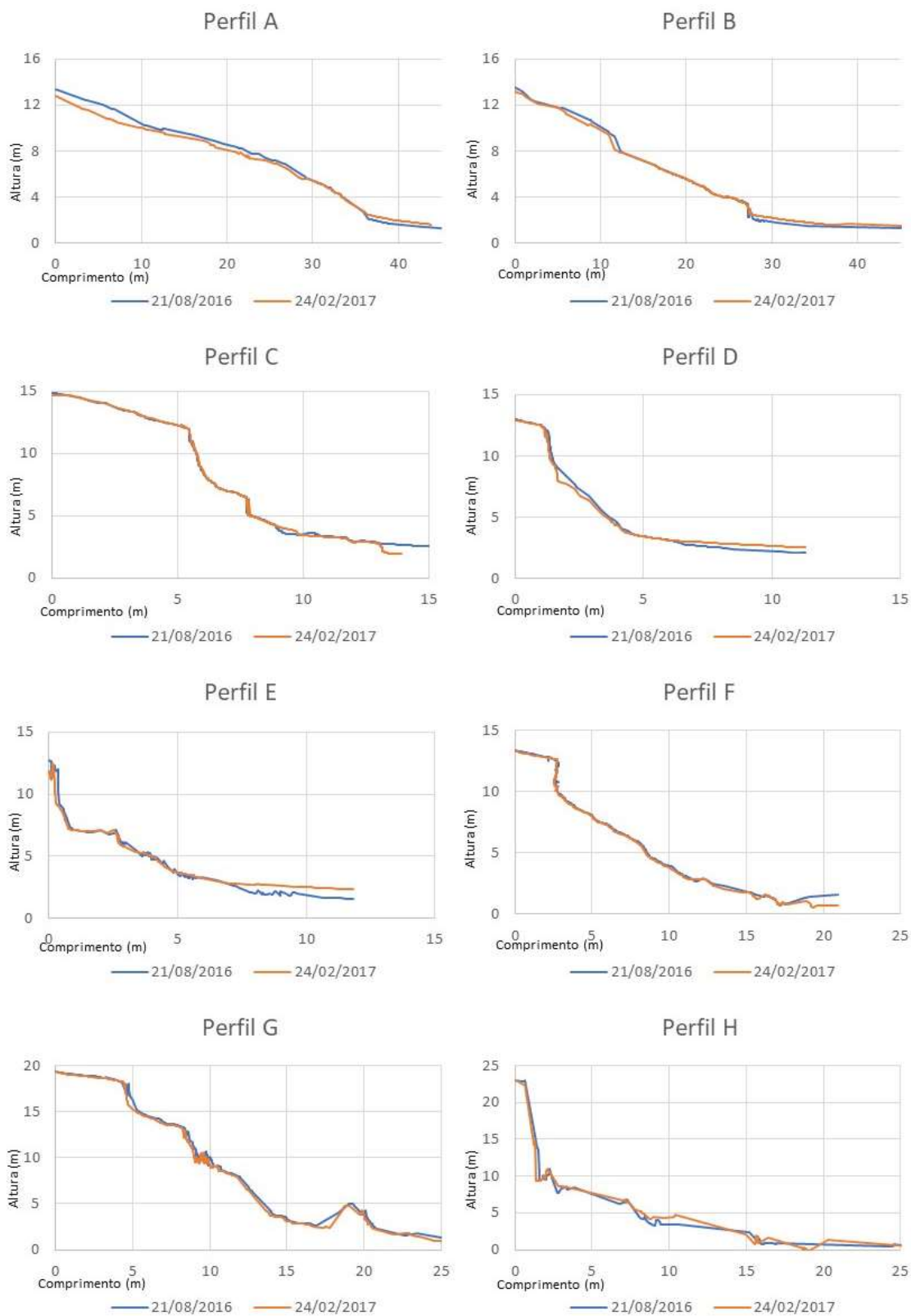


Figura 4.14 - Perfis transversais comparativos entre os dois levantamentos de campo realizados em 21/08/2016 e 24/08/2017.





Figura 4.15 – Vista de trecho do setor 01 durante os dois levantamentos de campo. Na área em destaque é evidenciado na faixa de praia sinais de constantes fluxos pluviais.

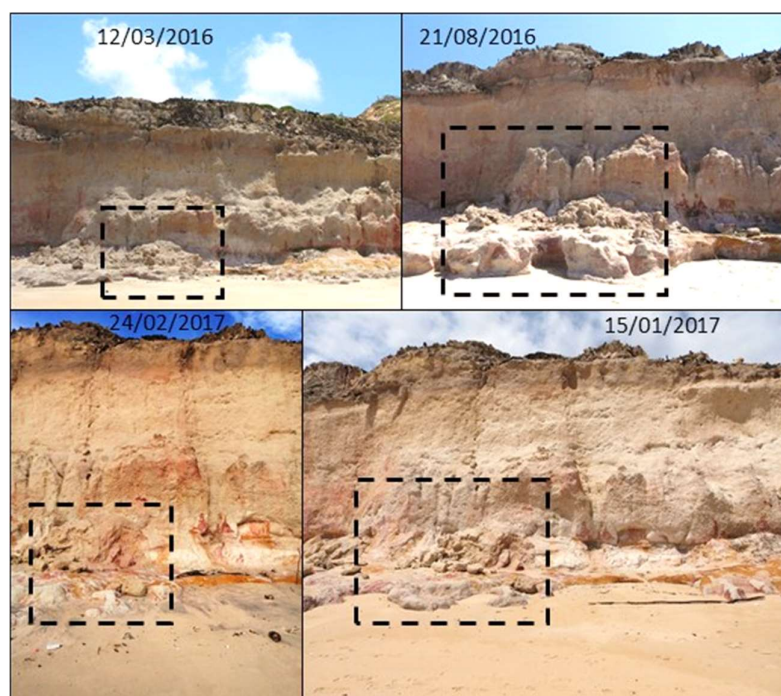


Figura 4.16 - Vista de trecho do setor 02. Em sentido horário começando do alto à esquerda é possível notar em destaque a presença de material solto que foi removido parcialmente durante todo o monitoramento.

Os perfis comparativos “F”, “G” e “H”, respectivamente dos setores 03, 04 e 05, não exibiram variações significativas sem apresentarem sinais de movimentação de massas durante o período da pesquisa.

Um aspecto observado durante o monitoramento foi a elevação do nível da face da praia. No perfil “C” observa-se que a elevação atingiu ordem 75 cm entre os dias 21/08/2016 e 24/02/2017.

#### 4.3.2 Erosão e Taxa de Retração no Curto Prazo

Análises mais detalhadas de mudanças na geometria da morfologia podem ser realizadas consultando os MDTs. Isso é feito comparando sucessivos MDTs e calculando as diferenças entre eles. A partir desta comparação, a análise permitiu identificar os setores onde ocorreram maiores volumes erodidos e, conseqüentemente, quantificar a taxa de retração da falésia (Tabela 4.4). A retração total foi calculada em 23 cm no período e aproximadamente  $46 \pm 5,3$  cm ao ano. O erro calculado foi obtido a partir dos dados de acurácia do equipamento (Tabela 3.1).

Tabela 4.4 - Volumes de erosão e taxa de retração calculados a partir do levantamento com o LT da falésia da Barreira do Inferno para o período de levantamento: 21/08/2016 a 24/02/2017.

Setor	L (m)	Vol 1 (m³)	Vol 2 (m³)	Dif (m³)	Retração (cm)	Erro (cm)	Retr/ano (cm / ano)
1	99	12541	12072	469	67	$\pm 1,008$	$134 \pm 2,0$
2	200	3431	3307	124	7	$\pm 1,108$	$14 \pm 2,2$
3*	97	1428	1311	117	17	$\pm 2,625$	$34 \pm 5,2$
4*	115	3408	2576	832	60	$\pm 3,738$	$120 \pm 7,4$
5	139	9523	9432	91	3	$\pm 5,187$	$6 \pm 10,3$
Total	650	30331	28698	1633	23	$\pm 2,646$	$46 \pm 5,3$

\* Volume quantificado a partir da cota + 5,00m

L – Comprimento; Vol 1 – Volume de referência obtido no 1º levantamento; Vol 2 – Volume de referência obtido no 2º levantamento; Dif – Erosão ( Vol 1 – Vol 2); Retração – Taxa de retração no período de estudo; Erro – Erro associado a precisão do equipamento; Retr / ano – Taxa de retração anualizada.

As taxas de retrações encontradas pelos modelos para os setores 01 e 04 revelaram-se elevadas quando comparadas aos estudos já realizados ao redor do mundo, exibidas na Tabela 2.1. Com isto, para ratificação dos dados encontrados, foi conduzido uma análise setor a setor buscando identificar algum processo de erosão não detectado nas fases anteriores da pesquisa que justifique os dados obtidos ou se os mesmos apresentam confiabilidade suficiente.

O setor 01 foi o primeiro avaliado, o mesmo apresentou uma erosão de 469 m<sup>3</sup> e retração de 67 cm no período, estes valores foram ao encontro com os dados obtidos a partir da comparação entre os perfis transversais que apresentaram uma retração significativa.

Entretanto, um fator a ser considerado nesta observação consiste na existência de grandes áreas de vazios nas duas nuvens de pontos. Além disto, o primeiro levantamento apresentou maiores áreas de vazios, possivelmente ocasionados por um maior sombreamento durante a varredura com o LT em comparação ao segundo levantamento que varreu uma maior extensão das erosões já existentes na falésia (Figura 4.17).

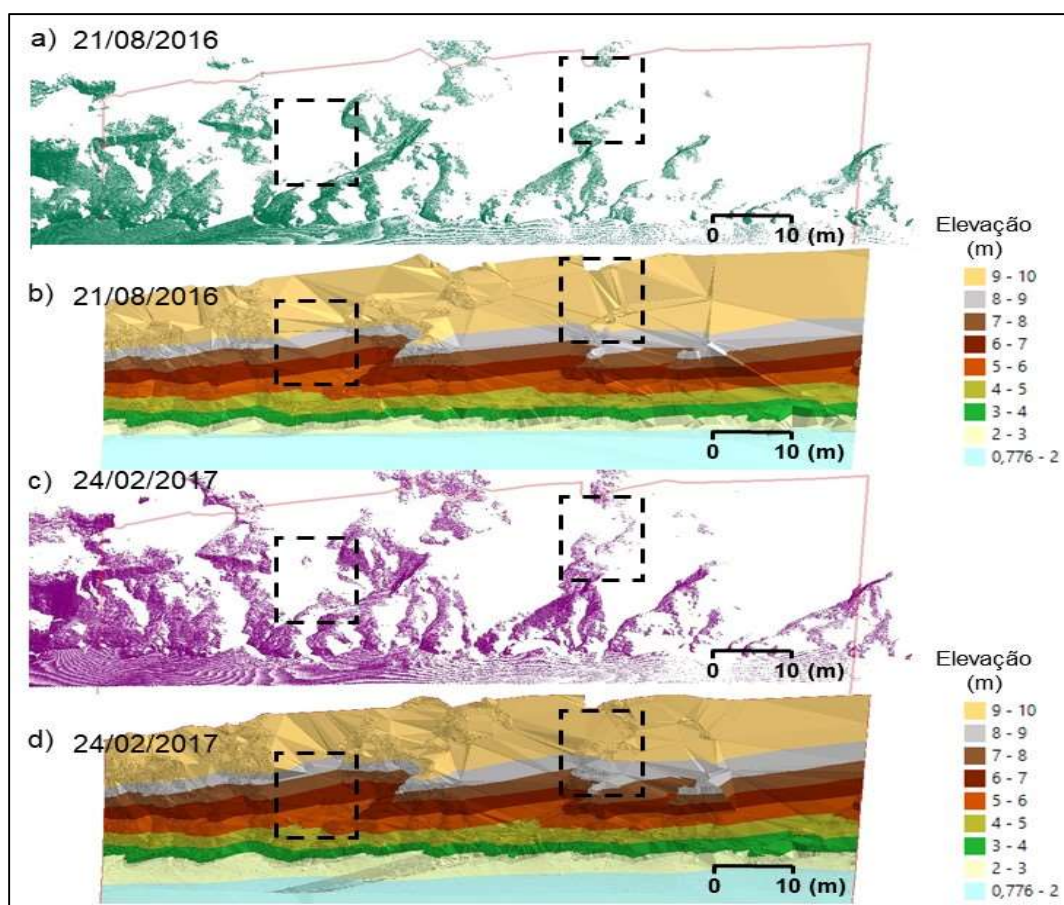


Figura 4.17 – (a) e (c) mostram as nuvens de pontos do setor 01 levantadas em 21/08/2016 e 24/02/2017 respectivamente, este setor apresentou grandes vazios e pontualmente apresentaram diferenças de cobertura entre si, mostradas nas áreas destacadas; (c) e (d) exibem os MDTs do setor 01 para os dois períodos, no destaque é possível observar a diferença nas superfícies em cada um dos modelos.

A maior quantidade de vazios entre os levantamentos teve como um dos motivadores a posição de locação do LT com relação a face da falésia, pois, no segundo levantamento, o LT ficou instalado mais distante da face da falésia do que no primeiro levantamento. Esta maior distância permitiu uma melhor cobertura das feições existentes e, em consequência, uma maior precisão no MDT obtido a partir da nuvem gerada. Neste caso, o volume de erosão foi superestimado por conta destas diferenças como exemplificado na Figura 4.18.

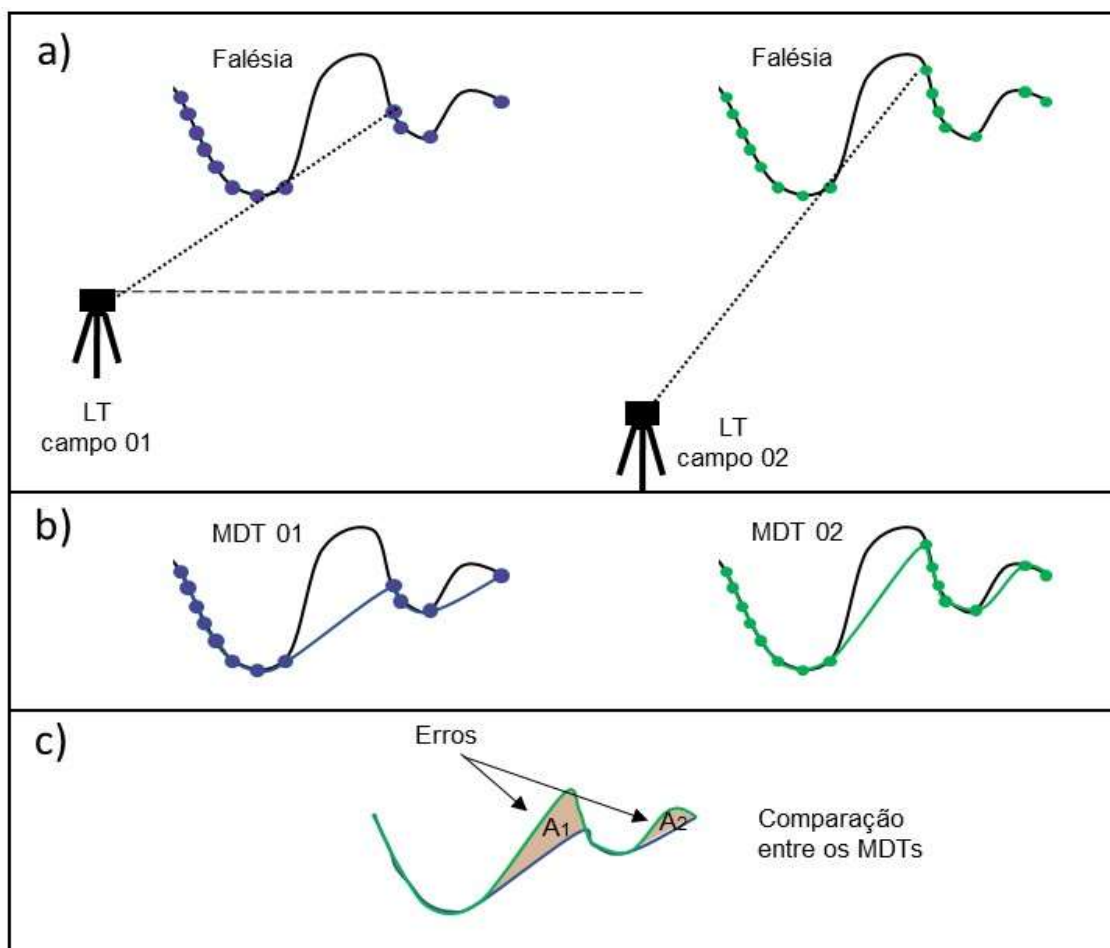


Figura 4.18 - Fonte de erro motivada pela locação do LT com relação a face da falésia em áreas de muitos recortes. a) a posição do LT mais distante com relação a face da falésia permitiu uma maior varredura das erosões existentes no setor 01; b) e c) demonstram que para a mesma face da falésia os Modelos Digitais do Terreno podem gerar superfícies com diferenças significativas apenas com a mudança da posição de instalação do LT.

A partir das Figuras 4.19a e 4.19b é possível observar que as nuvens de pontos coletadas para o setor 02 têm uma boa cobertura e apresentam poucos vazios. A boa cobertura obtida foi motivada pela posição do LT durante os levantamentos, pois, o mesmo foi locado em frente ao setor, deixando-o com uma maior densidade de pontos. Ainda assim, nota-se a presença de vazios nas nuvens, com ênfase para duas áreas que apresentaram diferenças perceptíveis nas superfícies dos MDTs, indicando que estes vazios podem ter influenciado nos dados obtidos de erosão (Figuras 4.19c; 4.19d).

Com a necessidade de se quantificar e avaliar a influência que estes vazios exercem nos dados obtidos, foram elaborados novos MDTs sem estas áreas para posterior comparação, esta subdivisão foi nomeada de setor 2A. A partir destes, todos os cálculos de volumes de erosão e taxas de retração foram refeitos (Tabela 4.5). Com os novos dados obtidos, comparativamente, foi possível verificar que o setor 2A apresentou uma taxa de retração 39% menor que o obtido para todo o setor 02, demonstrando que o efeito do sombreamento, gerando vazios nas nuvens de pontos, é uma fonte significativa de erros neste tipo de pesquisa.

Tabela 4.5 - Dados de volume de erosão e taxa de retração para os setores 02 e 2A.

Setor	L (m)	Vol 1 (m³)	Vol 2 (m³)	Dif (m³)	Área 2D (m²)	Retração (cm)
2	200	3431	3307	124	1733	7
2A	154	2526	2455	71	1363	5
L – Comprimento; Vol 1 – Volume de referência obtido no 1º levantamento; Vol 2 – Volume de referência obtido no 2º levantamento; Dif – Erosão ( Vol 1 – Vol 2); Área 2D – Área da Face da falésia; Retração – Taxa de retração no período de estudo						

As Figuras 4.20a e 4.20c exibem as nuvens de pontos obtidas para o setor 03 nos dois levantamentos realizados. Nesta mesma Figura observa-se a existência de duas áreas com vazios em ambas às nuvens de pontos. A partir destas nuvens, foram gerados dois MDTs mostrados nas Figuras 4.20b e 4.20d, as superfícies dos MDTs obtidos apresentam diferenças perceptíveis nestas regiões.



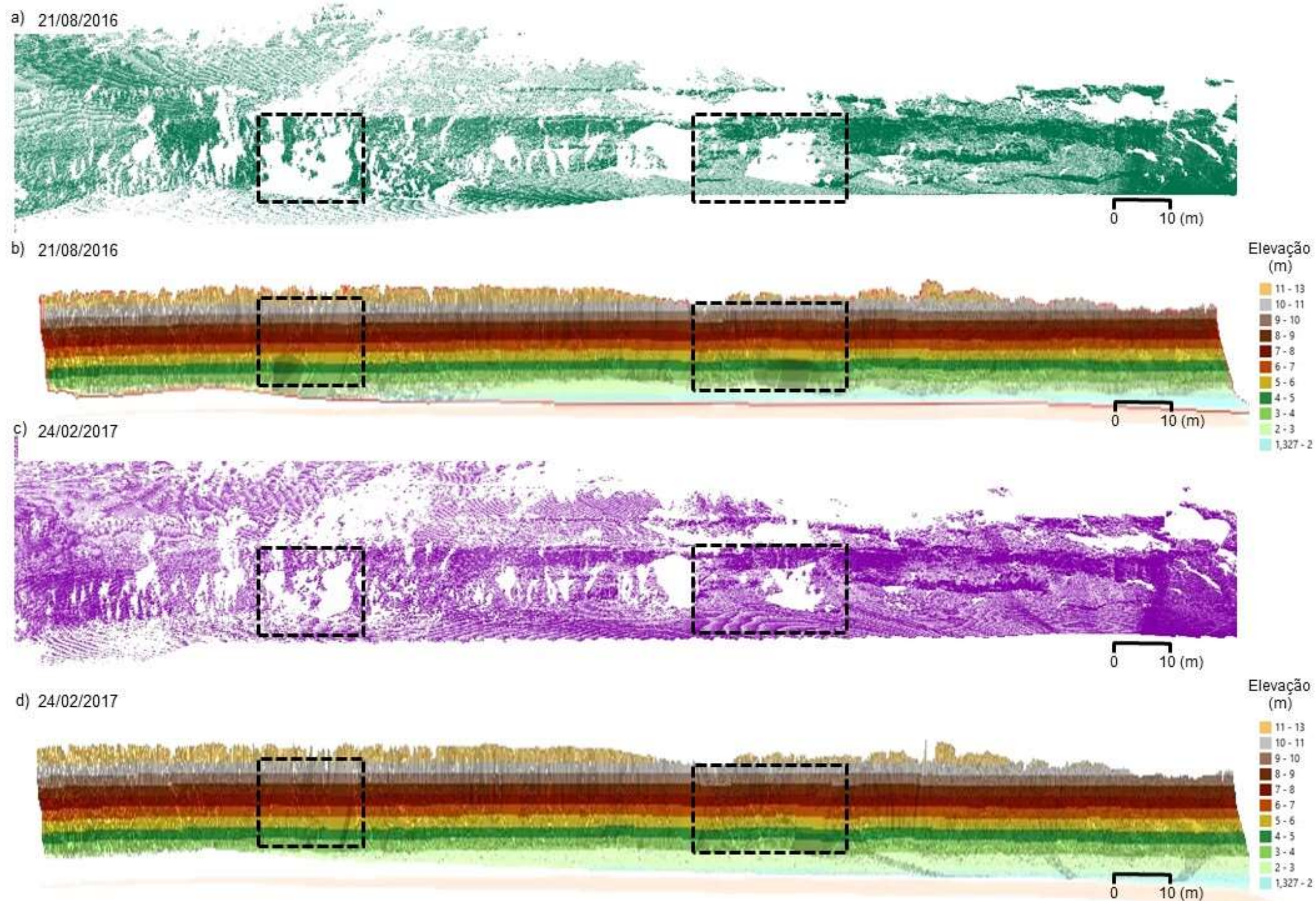


Figura 4.19 – (a) e (b) mostram as nuvens de pontos do setor 01 levantadas em 21/08/2016 e 24/02/2017 respectivamente, em destaque as áreas com maiores discrepâncias entre os levantamentos; (c) e (d) exibem os MDTs do setor 01 para os dois períodos, na área destacada é possível observar a diferença nas superfícies de cada um dos modelos



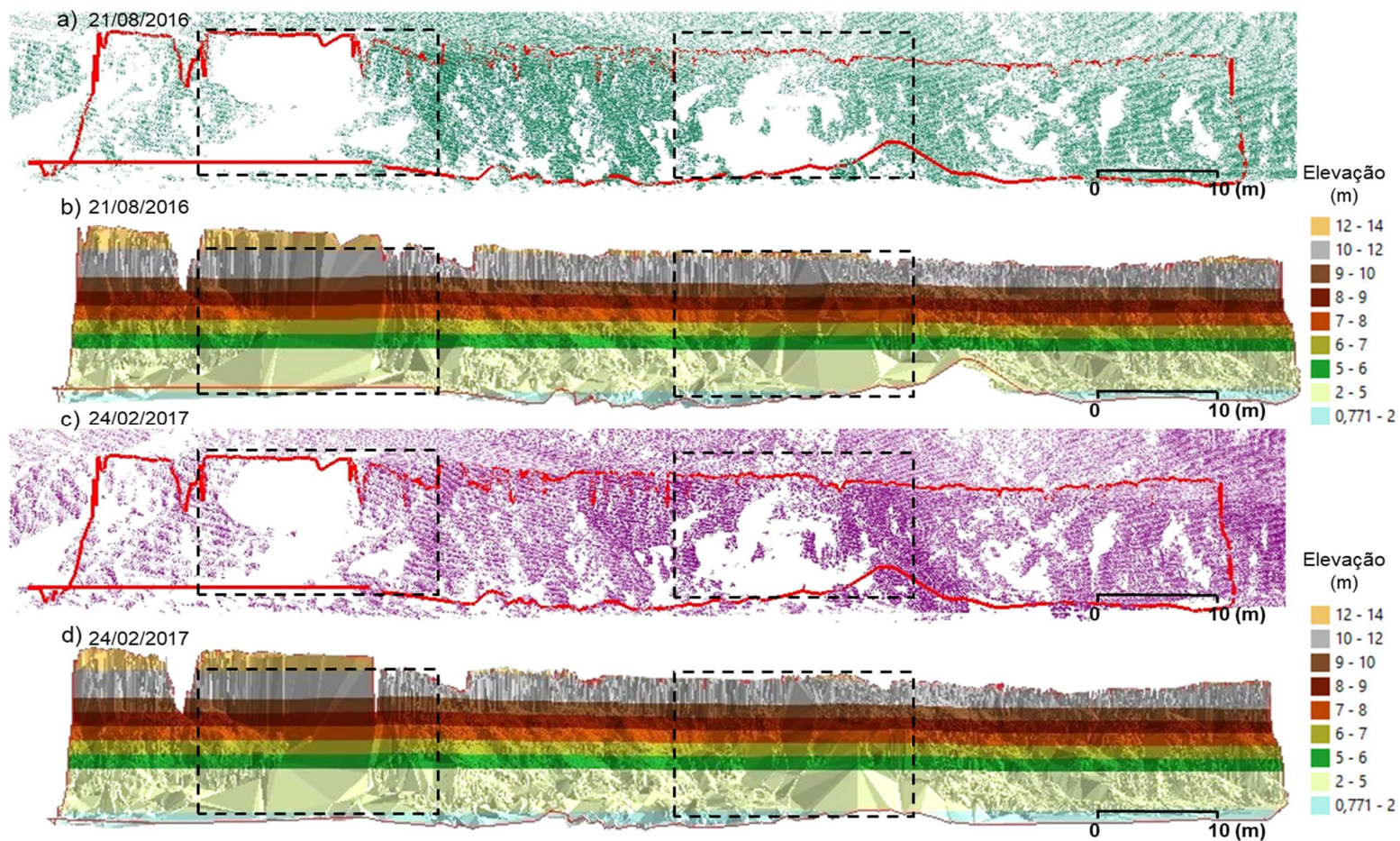


Figura 4.20 - (a) e (c) mostram as nuvens de pontos do setor 03 levantadas em 21/08/2016 e 24/02/2017 respectivamente, em destaque as áreas com maiores discrepâncias entre os levantamentos; (c) e (d) exibem os MDTs do setor 03 para os dois períodos, na área destacada é possível observar a diferença nas superfícies de cada um dos modelos.

Adotou-se para este setor o procedimento já relatado para o setor 02 com a criação dos novos MDTs para o setor 3A, sem as áreas das nuvens com estes vazios. A partir destes novos modelos, todos os cálculos de volumes de erosão e taxas de retração foram refeitos (Tabela 4.6). Os resultados obtidos revelaram que o setor 3A apresentou um volume erodido de 117 m<sup>3</sup>, comparativamente com o setor 03 a taxa de retração passou de 17 cm para 13 cm no período.

Tabela 4.6 - Dados de volume de erosão e taxa de retração para os setores 03 e 3A.

Setor	L (m)	Vol 1 (m³)	Vol 2 (m³)	Dif (m³)	Área 2D (m²)	Retração (cm)
3	97	1428	1311	117	693	17
3A	71	984	920	64	497	13

L – Comprimento; Vol 1 – Volume de referência obtido no 1º levantamento; Vol 2 – Volume de referência obtido no 2º levantamento; Dif – Erosão ( Vol 1 – Vol 2); Área 2D – Área da Face da falésia; Retração – Taxa de retração no período de estudo

O setor 04 apresentou a maior área de vazios entre todos os setores com aproximadamente 826 m<sup>2</sup>, podendo ser visualizada através da Figura 4.21. Seguindo o mesmo método já adotado anteriormente para os setores 02 e 03, foi procedida a criação do setor 4A o que possibilitou a obtenção dos novos dados de volume erodido e taxa de retração no período. A Tabela 4.7 apresenta uma comparação entre os dados obtidos antes e após os ajustes. Desta forma, é possível observar de forma comparativa que o volume calculado de erosão no período foi de 107 m<sup>3</sup> para o novo setor 4A, representando uma redução de 87% no anteriormente calculado. Consequentemente a taxa de retração no período foi corretamente quantificada em 14 cm.

Tabela 4.7 - Dados de volume de erosão e taxa de retração para os setores 04 e 4A.

Setor	L (m)	Vol 1 (m³)	Vol 2 (m³)	Dif (m³)	Área 2D (m²)	Retração (cm)
4	115	3408	2576	832	1378	60
4A	70	1319	1212	107	756	14

L – Comprimento; Vol 1 – Volume de referência obtido no 1º levantamento; Vol 2 – Volume de referência obtido no 2º levantamento; Dif – Erosão ( Vol 1 – Vol 2); Área 2D – Área da Face da falésia; Retração – Taxa de retração no período de estudo



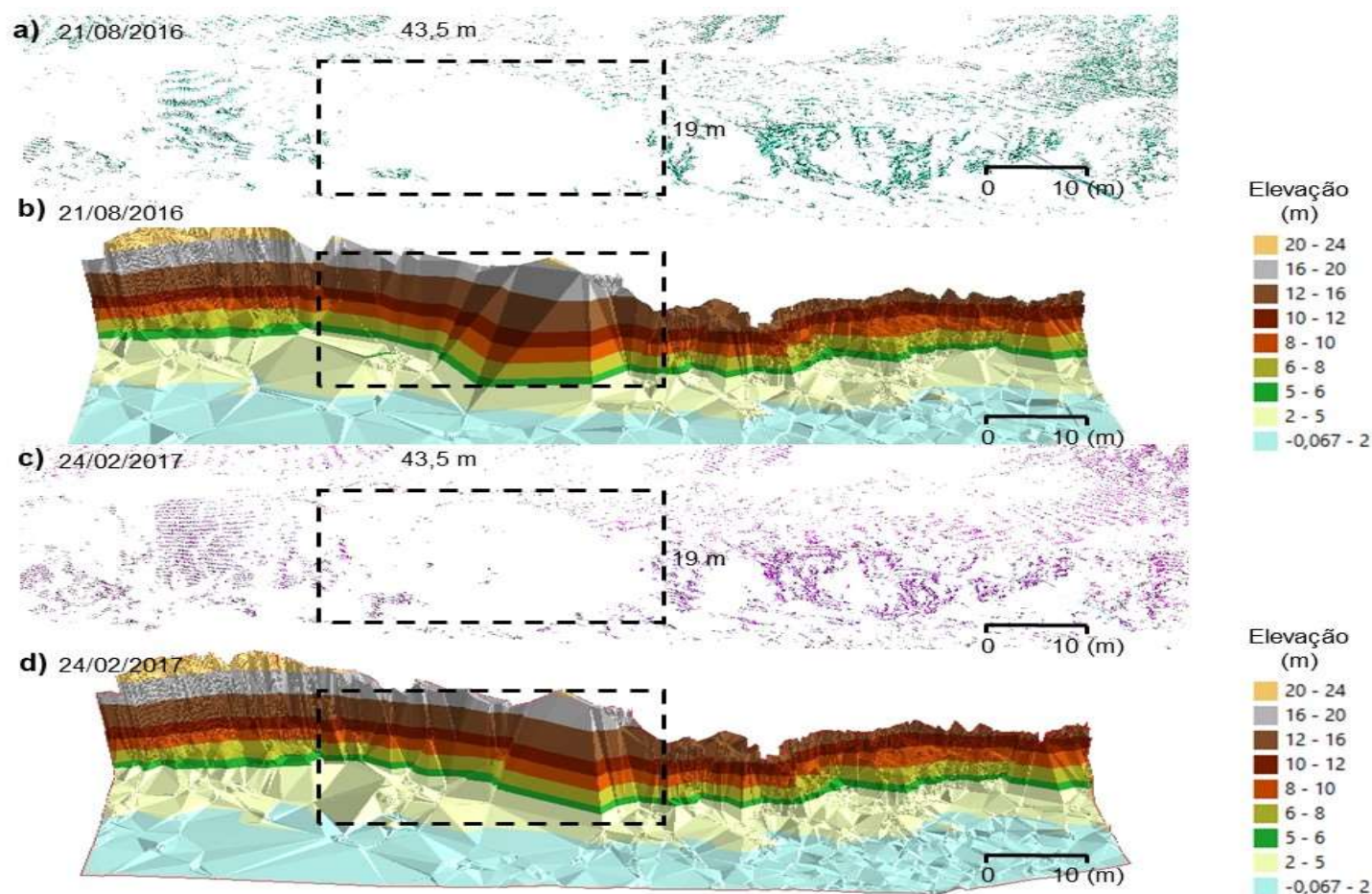


Figura 4.21 – (a) e (b) mostram as nuvens de pontos do setor 04 coletadas em 21/08/2016 e 24/02/2017 respectivamente, com destaque para a área com baixa densidade de pontos; (c) e (d) exibem os MDTs do setor 04 do primeiro e do segundo levantamento respectivamente, na área destacada é possível observar a diferença nas superfícies de cada um dos modelos.

O setor 05 da falésia apresentou a menor taxa de retração durante o levantamento. Mesmo sem apresentar uma grande densidade de pontos, a nuvem cobriu todas as áreas do setor de forma regular sem deixar vazios significativos. Cabe ressaltar que a taxa de retração obtida de 3 cm no período é menor que o erro do equipamento para a distância média do setor que é de  $\pm 5,2$  cm. A Figura 4.22 mostra as duas nuvens de pontos obtidas durante os levantamentos para o setor 05.

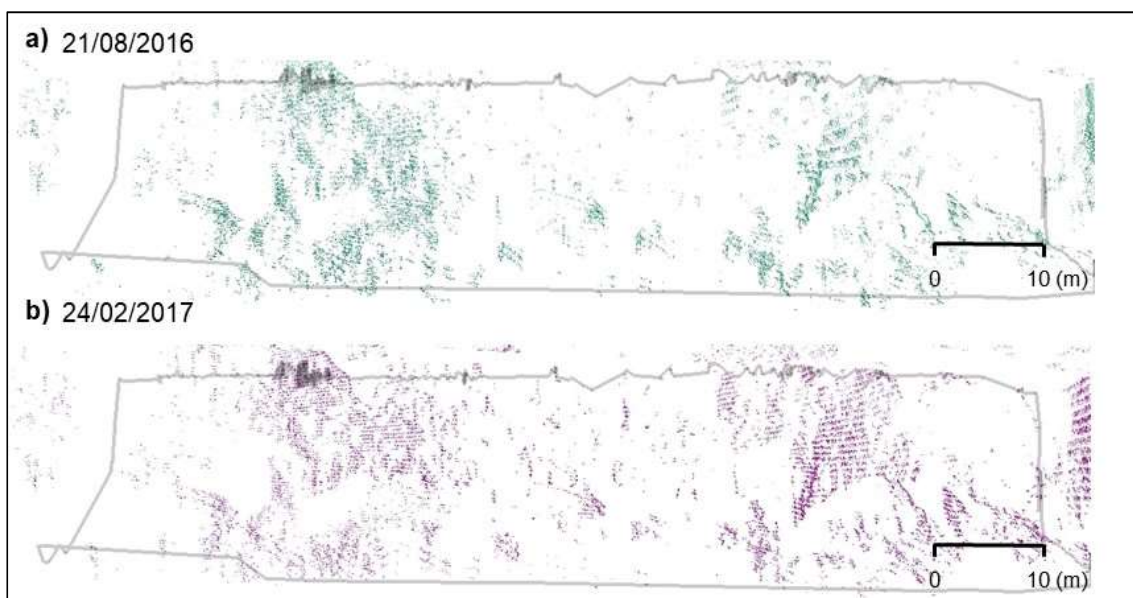


Figura 4.22 - (a) e (b) mostram as nuvens de pontos do setor 05 coletadas em 21/08/2016 e 24/02/2017.

Outro fator que deve ser considerado nesta análise quanto a taxa de retração encontrada, reside no fato que o período de monitoramento foi realizado nos meses mais secos do ano, onde a precipitação registrada no período foi de 334 mm. Esta precipitação de acordo com a média histórica dos últimos 10 anos equivale a aproximadamente 27% esperado para o ano (EMPARN, 2017).

A Tabela 4.8 traz a compilação dos volumes mensurados de erosão e taxa de retração para o intervalo de monitoramento após as considerações relativas as áreas de vazios nas nuvens de pontos encontradas nas reanálises, bem como a consideração a respeito de cada um dos setores da falésia utilizando os novos MDTs gerados.



## CAPÍTULO 5

### Considerações Finais

Embora de grande importância, a avaliação com alta acurácia e precisão da retração de falésias marinhas é pouco realizada no Brasil sendo mais comumente desenvolvidos trabalhos pontuais e, em sua maioria, focados nos processos erosivos nas praias arenosas adjacentes. As modificações impetradas nas litologias e morfologias da Formação Barreiras são de amplo interesse, pela localização no litoral brasileiro e importante ação antrópica, o que realça cada vez mais a necessidade do conhecimento da dinâmica e da intensidade com que os processos erosivos estão atuando sobre a mesma.

Diante disto, esta Dissertação de Mestrado apresentou uma avaliação da retração no curto prazo (6 meses) em falésia marinha ativa da Formação Barreiras com base no uso do LT na região conhecida como Barreira do Inferno, localizada no Município de Parnamirim, a sul da cidade de Natal/RN. O estudo foi conduzido a partir de 2 levantamentos realizados em 21 de agosto de 2016 e em 24 de fevereiro de 2017. Para se alcançar esta meta, o trabalho foi conduzido em etapas: (o) Levantamento e processamento dos dados, (i) seleção do método de interpolação, (ii) identificação do principal agente indutor dos processos erosivos; e (iii) análise multitemporal por meio dos perfis transversais e dos MDTs.

Na etapa de seleção do método de interpolação foram gerados 10 MDTs em 4 diferentes softwares para avaliação da precisão entre o modelo e os dados das nuvens de pontos. Com os MDTs gerados foi possível constatar que os modelos que utilizaram o método do tipo TIN, que usa a totalidade dos pontos na forma de vetores, o que melhor representou a superfície real da falésia com uma maior riqueza de detalhes, quando modelados nos softwares ArcMap e CloudCompare. Destes, o CloudCompare apresentou maior eficiência na modelagem das cavas existentes na base da falésia marinha, sendo utilizado para a segunda etapa do presente estudo. Já o ArcMap foi o software utilizado para as demais etapas por apresentar maiores funcionalidades necessárias para os processos de análise multitemporais. Os resultados demonstraram ainda, que apesar da utilização do mesmo método

interpolador, as superfícies obtidas em diferentes softwares apresentaram discrepâncias. Tal observação demonstra que a seleção e manutenção do mesmo software durante toda a pesquisa é fundamental para a confiabilidade dos dados nas análises multitemporais.

Na segunda etapa da pesquisa foi realizada a identificação do agente erosivo predominante na falésia. Esta avaliação foi conduzida a partir de 30 perfis transversais gerados com o uso do TIN, através do software CloudCompare.

Para possibilitar a utilização da matriz de avaliação existente, foi proposta uma adaptação da mesma para o caso de falésias com a camada de base e topo mais resistentes, situação predominante na Barreira do Inferno. Com isto, a área de estudo foi subdividida em 5 setores, e nestes os perfis transversais foram agrupados e caracterizados. Esta nova matriz mostrou-se bem ajustada aos perfis encontrados em campo e permitiu chegar a resultados consistentes quando comparada com as evidências encontradas in loco. Pode citar como exemplos, os setores 04 e 05 que apresentam as menores faixas de praia e os seus perfis verticais são os que expõem os efeitos das ações marinhas de forma mais intensa, evidenciados pela ampla quantidade de materiais soltos provenientes de desmoronamentos anteriores. Por outro lado, o setor da falésia com superfície mais suave e maior faixa de praia, as ações continentais foram apontadas como mais significativas, o que foi confirmado pela presença de sulcos ocasionados por erosão pluvial no setor 01. Evidenciado isto, o método adaptado deve ser utilizado em futuros estudos em falésias da região com as mesmas características.

A partir dos resultados obtidos com esta matriz foi identificado que a falésia estudada apresenta grande variação com relação ao agente erosivo predominante, mostrando que em áreas de forte transformação a variabilidade espacial é significativa, mesmo em área circunvizinha.

Na terceira e última etapa, o volume medido para a erosão e a taxa de retração no período de 6 meses foram obtidos a partir da comparação multitemporal entre 8 perfis transversais e entre os MDTs.

A partir dos perfis comparativos, foi possível observar que a falésia permaneceu estável nesta avaliação no período de monitoramento, ocorrendo retração significativa apenas nos perfis A e B, ambos no setor 01.

O estudo mostrou que o efeito do sombreamento em levantamentos utilizando o LT em áreas com grandes recortes, como o caso da falésia estudada, é significativo.

Pois, os mesmos foram os principais motivadores de vazios nas nuvens de pontos obtidas durante os levantamentos. Estes vazios foram relevantes para os dados alcançados inicialmente e seus efeitos necessitaram ser considerados durante as análises dos resultados. Devido à existência de sombreamentos nas nuvens de pontos, a taxa de retração foi calculada antes e depois a exclusão dos principais trechos sombreados identificados.

Os resultados encontrados indicaram que, ao se utilizar os MDTs corrigidos, a taxa de retração apresentou um resultado 73 % menor que a originalmente calculada com o uso das nuvens sem os recortes, apresentando variação de 23 cm para 6 cm no período de monitoramento. Portanto, com o modelo corrigido, os resultados mostraram que no período ocorreu uma erosão líquida de 333 m<sup>3</sup>, resultando numa taxa de retração de 6 cm no período e uma taxa anualizada de  $12 \pm 6,2$  cm/ano.

O LT forneceu dados de altíssima precisão, o que não seria possível com outras tecnologias de forma viável em tempo, precisão e custo. Mostrou, também, a importância da sua utilização no processo de compreensão da intensidade do processo erosivo atuante na falésia nesta pesquisa de curto prazo, onde as mudanças acontecem em pequena escala.

Por ser uma pesquisa inicial e sob alguns aspectos pioneira, recomenda-se a sequência dos trabalhos com novas verificações de campo. Deste modo, buscar-se conhecer de forma mais aprofundada a evolução dos processos erosivos neste local numa escala maior de tempo, bem como possibilitar a avaliação dos processos que atuam na faixa de praia adjacente, o que não foi o foco deste estudo.

Sugere-se que novos estudos com o uso do LT sejam realizados com mais de uma varredura por levantamento com o fim de aumentar a densidade e cobertura da nuvem de pontos, com isto, reduzir as áreas de vazios nas nuvens, reduzindo a probabilidade de erros de quantificação no volume de erosão.

Estes novos estudos com o LT também podem avaliar a sua acurácia frente a outras técnicas de sensoriamento remoto, tais como o uso de *drone* ou VANT.

Recomenda-se que a matriz adaptada proposta de avaliação da falésia seja utilizada em outras falésias da região em estudos e no apoio as políticas de gerenciamento costeiro. Devido a complexidade e heterogeneidade da Formação Barreiras, orienta-se ainda que o método sofrer novas adaptações com vistas a alcançar o maior número de variáveis quanto a localização da camada mais resistente.

Recomenda-se ainda que sejam realizadas novas pesquisas com esta temática, em outros locais com afloramentos da Formação Barreiras. Tais pesquisas são fundamentais para consolidar um conhecimento regional mais aprofundado do tema.

## REFERÊNCIAS

- ABELLÁN, A.; VILAPLANA, J. M.; CALVET, J.; D. GARCÍA-SELLÉS, D.; ASENSIO, E. Rockfall monitoring by Terrestrial Laser Scanning – case study of the basaltic rock face at Castellfollit de la Roca (Catalonia, Spain). **Natural Hazards and Earth System Sciences**, 2011.vol. 11, p. 829-841. Disponível em: <<http://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/11/829/2011/>> Acesso em: 21 fev. 2016.
- AMARO, V. E.; GOMES, L. R. S. ; LIMA, F. G. F. ; SCUDELARI, A. C. ; NEVES, C. F. ; BUSMAN, D. V. ; SANTOS, A. L. S. . Multitemporal Analysis of Coastal Erosion Based on Multisource Satellite Images, Ponta Negra Beach, Natal City, Northeastern Brazil. **Marine Geodesy**, nº38, p. 1-25, 2015.
- AMARO, V.E.; SANTOS, A.L.S.; SCUDELARI, A.C.; COSTA, B.C.P. Use of terrestrial-LiDAR for quantifying morphological changes in Ponta Negra Beach, Natal City, northeast Brazil. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM FOR GIS AND COMPUTER CARTOGRAPHY FOR COASTAL ZONES MANAGEMENT,11., 2013, Victoria, Canadá, **Proceedings...** Victoria, Canadá: International Geographical Union's Commission on Coastal Systems and the International Cartographic Association, p. 5-9. 2013.
- AMARO, V.E.; SANTOS, M.S.T.; SOUTO, M.V.S. **Geotecnologias Aplicadas ao Monitoramento Costeiro: Sensoriamento Remoto e Geodésia de Precisão**. 1ª Ed. Natal, Edição dos Autores, 2012.
- ARAÍ, M. A Grande Elevação Eustática do Mioceno e Sua Influência na Origem do Grupo Barreiras. **Geol. USP Sér. Cient.**, São Paulo, v.6, n.2, p. 1-6, out. 2006.
- ARAÚJO, V.D.; REYES-PERES, Y.A.; LIMA, R.O.; PELOSI, A.P.M.R.; MENEZES, L., CÓRDOBA, V.C., LIMA-FILHO, F.P. Fácies e Sistema Depositional da Formação Barreiras na Região da Barreira do Inferno, Litoral Oriental do Rio Grande do Norte. **Geol. USP Sér. Cient.**, São Paulo, vol. 6, n. 2, p. 43-49, out. 2006.
- BARRETO, A.M.F.; SUGUIO, K.; BEZERRA, F.H.R.; TATUMI, S.H.; YEE, M.; GIANNINI, P.C.F. Geologia e Geomorfologia do Quaternário Costeiro do Estado do Rio Grande do Norte. **Geol. USP Sér. Cient.**, São Paulo, vol. 4, n.2, p. 1-12, out. 2004.
- BIRD, E.C.F. **Coastal Geomorphology: An Introducion**. 2ª Ed. Wiley, Chichester, 2008.p.436.
- BUCK, A.L.B.; LINGNAU, C.; MACHADO, A.M.L.; NETTO, S.P. Detecção de árvores em nuvens de pontos de varredura laser terrestre. **Boletim de Ciências Geodésicas** – On-Line, Curitiba, vol 23, n.1, p. 21-38, jan/mar, 2017.
- CHAZALY, B; MITCHELL, T.; SUAREZ, G. Evaluation of Coastal Vulnerability with Mobile Laser Scanning from a Vessel. In: OCEANS Conference 2013, San Diego. **Anais eletrônicos...** San Diego: IEEE Oceanic Engineering Society, 2013.



CLBI – Centro de Lançamento Barreira do Inferno. Disponível em <<http://www.clbi.cta.br/internet/index.php/historico>> Acesso em: 01 de fev. 2017.

COLLINS, B.D.; SITAR, N. Processes of coastal bluff erosion in weakly lithified sands, Pacifica, California, USA. **Geomorphology**, Elsevier, 2008. vol. 97, p. 483-501.

COLLINS, B.D.; STOCK, G.M. LiDAR-based rock-fall hazard characterization of cliffs. In: GEOCONGRESS, 2012, Oakland. **Anais...** Oakland: American Society of Civil Engineers, 2012. p. 3021-3030. doi:10.1061/9780784412121.309.

CONNER, J.C. **Quantification of Landslide Movement in a Forested Environment**. Thesis (degree of Master of Science). OREGON STATE UNIVERSITY, OREGON, 2013.

CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Disponível em <[http://geobank.cprm.gov.br/pls/publico/geobank.download.downloadVetoriais?p\\_webmap=N&p\\_usuario=1](http://geobank.cprm.gov.br/pls/publico/geobank.download.downloadVetoriais?p_webmap=N&p_usuario=1)> Acesso em: 04 de mar. 2017.

DEL RIO, L.; GRACIA, F.J.; BENEVENTE, J. Mass Movements and Cliff Retreat along the SW Spain Coast. **Journal of Coastal Research**, SI 56, p. 717-721, Lisbon, Portugal, 2009. ISSN 0749-0258.

DEWEZ, T.J.B.; ROHMER, J.; REGARD, V.; CNUDE, C. Probabilistic coastal cliff collapse hazard from repeated terrestrial laser surveys: case study from Mesnil Val. **Journal of Coastal Research**, Special Issue n° 65, p. 702-7070. Abril 2013. doi: 10.2112/SI65-119.1

DIAS, J. M. A.; NEAL, W.J. Sea Cliff retreat in Southern Portugal: Profiles, Processes, and Problems. **Journal of Coastal Research**, vol. 8, n° 3, p. 641-654, 1992.

DINIZ, R. F.; DOMINGUEZ, J.M.L. Erosão costeira no litoral oriental do Rio Grande do Norte. In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO, 7., 1999, Porto Seguro. **Anais eletrônicos...**Porto Seguro: Associação Brasileira de Estudos do Quaternário, 1999. ref. BA 03-09. Disponível em: <[http://www.abequa.org.br/mostra\\_ano.php?pageNum\\_editoria=13&ano=1999](http://www.abequa.org.br/mostra_ano.php?pageNum_editoria=13&ano=1999)> Acesso em: 21 fev. 2016.

DOODY, P.; ROONEY, P. Special issue – conservation and management of sea cliffs. **Journal of Coastal Conservation**. vol. 19, p. 757-760. 2015. doi: 10.1007/s11852-015-0420-x.

EMERY, K.O.; KUHN, G.G. Sea cliffs: their processes, profiles, and classification. **Geological Society of America Bulletin**. vol. 93, p. 644-654. 1982. doi: 10.1130/0016-7606(1982)93<644:SCTPPA>2.0.CO;2

EMPARN – Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande Norte. Monitoramento Pluviométrico. Disponível em: <<http://187.61.173.26/monitoramento/monitoramento.php>> Acesso em: 10 de jul. 2017.

ESRI. ArcGIS 10.1 Help. Redlands, California, 1995-2017.

FEAGIN, R.A.; WILLIAMS, A.M.; POPESCU, S.; STUKEY, J., ROBERT, A. WASHINGTON-ALLEN, R.A. The Use of Terrestrial Laser Scanning (TLS) in Dune Ecosystems: The Lessons Learned. **Journal of Coastal Research**, vol. 30, nº1, p. 111-119. Jan. 2014.

FERNANDES, M.C.; MENEZES, P.M.L. Avaliação de métodos de geração de MDE para a obtenção de observações em superfície real: um estudo de caso no maciço da Tijuca-RJ. In: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2005, Goiânia. **Anais...** Goiânia: INPE, 2005.

FERNANDEZ, J.C.; SINGHANIA, A.; CARCERES, J.; SLATTON, K.C.; STAREK, M.; KUMAR, R. An overview of Lidar point cloud processing software. **Geosensing Engineering and Mapping (GEM)**. Report. 001-12-2007. University of Florida, 2007.

FERREIRA JR., A. V. Mapeamento da Zona Costeira protegida por arenitos de praia (*beachrocks*) em Nísia Floresta – RN. Dissertação (mestrado). UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE, NATAL. 2015.

FRANKLIN, R. LiDAR advances and challenges. **Imaging Notes**, 23(1).2008. Disponível em: <[http://www.imagingnotes.com/go/article\\_free.php?mp\\_id=129](http://www.imagingnotes.com/go/article_free.php?mp_id=129)>. Acesso em: 01 dez. 2015.

FURLAN, A. A., **Falésias na Formação Barreiras: análise regional e proposta tipológica**. Tese (doutorado). UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, São Paulo, 2014.

GARAE, C.P. **Estimating patterns and rates of coastal Cliff retreat around Tauranga Harbour**. Thesis (degree of Masters of Science in Earth Sciences). UNIVERSITY OF WAIKATO, HAMILTON, NEW ZEALAND. 2015

GUTIERREZ, R.; GIBEAUT, J.C.; SMYTH, R.C.; HEPNER, T.L.; ANDREWS, J.R. Precise Airborne LiDAR Surveying for Coastal Research and Geohazards Applications. In: INTERNATIONAL ARCHIVES OF THE PHOTOGRAMMETRY, REMOTE SENSING AND SPATIAL INFORMATION SCIENCES, 2001, Annapolis. **Anais...** Annapolis: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2001. XXXIV-3/W4. Disponível em: <<http://www.isprs.org/publications/archives.aspx/>> Acesso em: 15 de dez. 2015.

HAYAKAWA, Y.S.; OBANAWA, H. Mapping cliff face changes around a waterfall using terrestrial laser scanning and UAS-based SfM-MVS photogrammetry. In: THE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CARTOGRAPHY IN INTERNET AND UBIQUITOUS ENVIRONMENTS, 2015, Tokyo. **Anais...** Tokyo: International Cartographic Association, 2015.

HOFFMEISTER, D.; TILLY, N.; CURDT, C.; AASEN, H.; NTAGERETZIS, K.; HADLER, H.; WILLERSHÄUSER, T.; VÖTT, A.; BARETH, G. Terrestrial laser scanning for coastal geomorphologic research in western Greece. In: INTERNATIONAL ARCHIVES OF THE PHOTOGRAMMETRY, REMOTE SENSING AND SPATIAL INFORMATION SCIENCES, 22., 2012, Melbourne, Austrália. **Anais eletrônicos** ... Melbourne: International Society for Photogrammetry and Remote

Sensing, 2012. XXXIX-B5. Disponível em :< <http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XXXIX-B5/>> Acesso em: 21 de fev. 2016.

IGARN - Instituto de Gestão das Águas do Estado do Rio Grande do Norte. Disponível em: < <http://adcon.rn.gov.br/ACERVO/IGARN/doc/DOC000000000028898.PDF> > Acesso em: 08 mar. 2017.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Informações obtidas da página do IBGE na internet. Disponível em: < [www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br) > Acesso em 01 dez 2016.

JANSEN, J.R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma perspectiva em Recursos Terrestres**. Tradução José Carlos Neves Epiphanyo (coordenador) ... et al. 2. Ed. São José dos Campos, SP: Parênteses, 2009.

KERSTING, A.P.B.; CENTENO, J.S.; FELSKY FILHO, C.E. **Geração de Modelo Tridimensional do Teatro do Paio a partir do Emprego da Tecnologia Laser Escâner Terrestre**. Curitiba, 2004. Disponível em: <[http://people.ufpr.br/~centeno/publications/download/2004/APB\\_cobrac04.pdf](http://people.ufpr.br/~centeno/publications/download/2004/APB_cobrac04.pdf)> Acesso em: 10 de dez. 2015.

KOLANDER, R.; MORCHE, D.; BIMBÖSE, M. Quantification of moraine cliff coast erosion on Wolin Island - Baltic Sea, northwest Poland. **Baltica**, vol. 26 nº 1, p. 37–44. Vilnius. Junho de 2013. ISSN 0067-3064.

KÖNIG, D. Comparação de métodos de interpolação na geração de modelos digitais de elevação: Estudo de caso em área no município de São José, Santa Catarina. In: I SIMPÓSIO MINEIRO DE GEOGRAFIA, 2014, Alfenas. **Anais eletrônicos...** Alfenas: Universidade Federal de Alfenas-MG, 2014. Disponível em: <<http://www.unifal-mg.edu.br/simgo/system/files/anexos/Derik%20K%C3%B6nig.pdf>> Acesso em: 10 set. 2016.

KUHN, D.; PRÜFER, S. Coastal cliff monitoring and analysis of mass wasting processes with the application of terrestrial laser scanning: A case study of Rügen, Germany. **Geomorphology**. Elsevier, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.01.005> > Acesso em: Ago. 2015.

LEE, H.S.; LIM, S.S.; PARK, D.W. Application of Terrestrial Laser Scanner and Raster operations to Change Detection of Beach. **Journal of Coastal Research**, Special Issue nº 64, p. 1692-1696. 2011.

LIM, M.; PETLEY, D.N.; ROSSER, N.J.; ALLISON, R.J.; LONG, A.J.; PYBUS, D. Combined digital photogrammetry and time-of-flight laser scanning for monitoring cliff evolution. **Photogrammetric Record**, vol. 17 nº9, p. 109-129. 2005.

LIMA, F. G. F. ; AMARO, V. E. ; SANTOS, M. S. T. ; SANTOS, A. L. S. . Avaliação de Métodos de Interpolação na Geração de Modelos Digitais de Elevação de Precisão em Zonas Costeiras de Alta Dinâmica Sedimentar. **RBC. REVISTA BRASILEIRA DE CARTOGRAFIA (ONLINE)**, vol. 68, p. 527-538, 2016.

LITCHI, D.D.; HARVEY, B.R. The effects of reflecting surface material properties on time-of-flight laser scanner measurements. In: SYMPOSIUM ON GEOSPATIAL THEORY, PROCESSING AND APPLICATIONS, 2002, Ottawa. **Anais...** Ottawa, 2002.

MACHUTCHON, M. Geophysical monitoring of coastal erosion and Cliff retreat os Monwabasi Beach, False Bay, South Africa. **South African Journal of Geomatics**, vol. 4, n. 2. P. 80-95. 2015.

MARQUES, F. M. S. F. Sea Cliff instability hazard prevention and plannig: examples of practice in Portugal. **Journal of Coastal Research**, SI 56, p. 856-860, Lisbon, Portugal, 2009.

MOORE, L.J.; GRIGGS, G.B. Long-term clij retreat and erosion hotspots along the central shores of the Monterey Bay National Marine Sanctuary. **Marine Geology**. n°181, p. 265-283, 2002.

MOURA-FÉ, M.M. Barreiras: Série, Grupo ou Formação?. **Revista Brasileira de Geografia Física**, vol. 7, n. 6, p. 1055-1061. 2014.

MUEHE, D. O litoral brasileiro e sua compartimentação. In: Sandra Baptista da Cunha e Antonio José Teixeira Guerra (orgs.), *Geomorfologia do Brasil*, pp.273-349, Bertrand Brasil, 4ª ed., Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2006.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. 2ed., IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) – SUPREN (Superintendência de Recursos Naturais e Meio Ambiente), Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 1989.

OLSEN, M.J. **Methodology for assessing coastal change using terrestrial laser scanning**. Thesis (degree of Doctor of Philosophy). UNIVERSITY OF CALIFORNIA, SAN DIEGO, 2009.

POULTON, C.V.L.; LEE, J.R.; HOBBS, P.R.N.; JONES, L.; HALL, M.I. Preliminary investigation into monitoring coastal erosion using terrestrial laser scanning: case study at Happisburgh, Norfolk. **British Geological Survey**, Keyworth, Nottingham, n° 56, p. 45-64. 2006.

ROCHA, C.H.B. **Geoprocessamento: tecnologia transdisciplinar**. 3ª Ed do Autor, rev. e atualizada. Juiz de Fora, MG. Brasil. 2007.

RODRIGUEZ, R.R. **Integration of Topographic and Bathymetric Digital Elevation Model using ArcGIS Interpolation Methods: A Case Study of the Klamath River Estuary**. Thesis (degree of Master of Science). UNIVERSITY OF SOUTHERN CALIFORNIA, LOS ANGELES, 2015.

SANTOS, A. L. S.; AMARO, V. E.; SANTOS, M. S. T. Laser Escâner Terrestre aplicado ao monitoramento de mudanças geomorfológicas na praia de Soledade em Macau-RN, Nordeste do Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 17., 2015, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. p. 3730-3739. 2015a.

SANTOS, A.L.S.; AMARO, V.E.; SANTOS, V.F. Laser Escâner Terrestre aplicado ao monitoramento da formação de terraços lamosos em estuário de macromaré, Rio Araguari, Costa Amazônica Brasileira. In: XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento

Remoto, 2015, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. p. 3755-3763. 2015b.

SANTOS, A. L. S.; AMARO, V.E.; SANTOS, M. S. T. Terrestrial laser scanner applied to monitoring beach morphological changes in a high energy coastal zone in northeast Brazil. In: INTERNATIONAL TERRESTRIAL LASER SCANNING USER MEETING, 7., 2014, Rome, Italy, **Proceedings...** Rome, Italy: International Terrestrial Laser Scanning User Meeting, vol. 1. p. 1-13. 2014.

SANTOS, A.L.S. **Monitoramento da Morfologia Costeira em Setores da Bacia Potiguar sob a Influência da Indústria Petrolífera Utilizando Geodésia de Alta Precisão e Laser Escâner Terrestre**. Tese (doutorado). UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE, NATAL, 2014.

SANTOS, M.S.T.; AMARO, V.E. Rede Geodésica para o monitoramento ambiental costeiro do litoral setentrional do estado do Rio Grande do Norte. **Boletim de Ciências Geodésicas**, vol. 17, p. 571-585, 2011.

SANTOS JR, O.F.; SCUDELARI, A.C.; COSTA, Y.D.; COSTA, C.M. Sea Cliff Retreat Mechanisms in Northeastern Brazil. **Journal of Coastal Research**, Curitiba, vol. 64, p. 820-824, 2011.

SCHMID, K.A.; HADLEY B.C.; WIJEKOON, N. Vertical Accuracy and Use of Topographic LiDAR Data in Coastal Marshes. **Journal of Coastal Research**, vol. 26, n° 6A, p. 116-132. 2011.

SCHUBERT, J.E.; TIMU W.G.; MAJD, M.S.; SANDERS, B.F. Terrestrial Laser Scanning of Anthropogenic Beach Berm Erosion and Overtopping. **Journal of Coastal Research**, vol. 31, n° 1, p. 47-60, 2015.

SEVERO, R.N.F. **Análise da estabilidade das falésias entre Tibau do Sul e Pipa-RN**. Dissertação (mestrado). UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE, NATAL, 2005.

SILVA, C.A.; DUARTE, C.R.; SOUTO, M.V.S.; SANTOS, A.L.S.; AMARO, V.E.; BICHO, C.P.; SABADIA, J.A.B. Avaliação da acurácia do cálculo de volume de pilhas de Rejeito utilizando VANT, GNSS e LiDAR. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, vol. 22, n.1, p. 73-94, jan/mar, 2016.

SILVA, W.S. **Estudo da Dinâmica Superficial e Geotécnico das Falésias do Município de Tibau do Sul – Litoral Oriental do RN**. Dissertação (mestrado). UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE, NATAL, 2003.

SOUZA, C.R.G. A Erosão costeira e os desafios da gestão costeira no Brasil. **Revista da Gestão Costeira Integrada**, CTTMar UNIVALI, Itajaí, 2009. Disponível em: <[http://www.aprh.pt/rgci/pdf/rgci-147\\_Souza.pdf](http://www.aprh.pt/rgci/pdf/rgci-147_Souza.pdf)>. Acesso em: 30 nov. 2015.

SOUZA, C.R.G.; SOUZA FILHO, P.W.M.; ESTEVES, S.L.; VITAL, H.; DILLENBURG, S.R.; PATCINEELAM, S.M.; ASSAD, J.E.; - Praias Arenosas e Erosão Costeira. In:

SOUZA, C.R.G.; SUGUIO, K.; OLIVEIRA, A.M.S.; OLIVEIRA, P.E. "Quaternário do Brasil", p.130-152, Holos Editora, Ribeirão Preto, SP, 2005

SUGUIO, K. **Geologia do quaternário e mudanças ambientais**. 2ª Ed. São Paulo, Oficina de Textos, p. 408. 2010.

SUGUIO, K. **Dicionário de geologia sedimentar e áreas afins**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, p.222, 1998.

TAMAR. A importância da Barreira do Inferno na proteção das Tartarugas de pente. PROJETO TARTARUGA MARINHA. 2013. Disponível em <<http://www.tamar.org.br/noticia1.php?cod=408>> Acesso em: 17 de fev. 2016.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, **Manual: Engineering and Design COASTAL GEOLOGY**. Washington, DC, 1995.

VITAL, H.; SILVEIRA, I.M.; AMARO, V.E.; MELO, F.T.L.; SOUZA, F.E.S.; CHAVES, M.S.; LIMA, Z.M.C.; FRAZÃO, E.P.; TABOSA, W.F.; ARAÚJO, A.B.; SOUTO, M.V.S.. Erosão e progradação no litoral brasileiro. Rio Grande do Norte. In: Dieter Muehe (org.). pp. 155-172, MMA, Brasília, Brasil. 2006a.

VITAL, H.; AMARO, V.E.; SILVEIRA, I.M. Coastal Erosion on the Rio Grande do Norte State (Northeastern Brazil): Causes and Factors Versus Effects and Associated Processes. **Journal of Coastal Research**, Special Issue nº 39, p. 1306-1309. 2006b.

VITAL, H. Erosão e Progradação Costeira no Estado do Rio Grande do Norte. In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO, 9., 2003, Recife. **Anais eletrônicos...** Recife: Associação Brasileira de Estudos do Quaternário, 2003. Disponível em: < [http://www.abequa.org.br/trabalhos/quatmar\\_186.pdf](http://www.abequa.org.br/trabalhos/quatmar_186.pdf) > Acesso em: 21 fev. 2016.

WALKER, R.G. Sandy Fluvial Systems. **Geoscience Canadá**, Toronto: G.A.C. Publications, vol. 3, n. 2, p. 101-109. May. 1976.

WHITWORTH, M.Z.; GILES, D.; ANDERSON, I.; CLEWETT, M. Terrestrial laser scanning for applied geoscience studies in the urban environment. **The Geological Society of London**. IAEG2006 Paper number 252. 2006.

YOUNG, A.P.; OLSEN, M. J.; DRICOLL, N.; FLICK, R.E.; GUTIERREZ, R.; GUZA, R.T.; JOHNSTONE, E.; KUESTER, F. Comparison of Airbone Lidar and Terrestrial LiDAR Estimates of Seacliff Erosion in Southern California. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**. vol. 76, Nº 4, p. 421-427. 2010

YOUNG, A.P. FLICK, R.E.; GUTIERREZ, R.; GUZA, R.T. Comparison of short-term seacliff retreat measurement methods in Del Mar, California. **Geomorphology**, Elsevier, vol. 112, p. 318-323. 2009

YOUNG, A.P.; ASHFORD, S.A. Application of airborne LiDAR for seacliff volumetric change and beachsediment budget contributions. **Journal of Coastal Research**, vol. 22, nº2, p. 307–318, 2006. ISSN 0749- 2008.

YOUNG, A.P. **Quantifying Short-Term Seacliff Morphology of a Developed Coast: San Diego County, California**. Thesis (degree of Doctor of Philosophy). UNIVERSITY OF CALIFORNIA, SAN DIEGO, 2006.

ZEILER, M. **Modeling our World: The ESRI Guide the Geodatabase Desing**. 1<sup>a</sup> Ed. Redlands, Environmental Systems Research Institute, Inc., p. 199p, 1999.

ZVIELY, D.; KLEIN, M. Coastal Cliff retreat rates at beit-yannay, Israel, in the 20th Century. **Earth Surface Processes and Landforms**, vol. 29, p. 175-184, 2004