



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

**A UTILIZAÇÃO DO MÉTODO GPR PARA CORRELAÇÃO DAS ATIVIDADES
ANTRÓPICAS COM EPISÓDIOS DE MOVIMENTOS DE MASSA E QUEDA DE
BLOCOS NA PRAIA DE PIPA/RN**

ANNA LUISA ESPÍNOLA DE SENA COSTA

NATAL/RN
Dezembro de 2022

ANNA LUISA ESPÍNOLA DE SENA COSTA

**A UTILIZAÇÃO DO MÉTODO GPR PARA CORRELAÇÃO DAS ATIVIDADES
ANTRÓPICAS COM EPISÓDIOS DE MOVIMENTOS DE MASSA E QUEDA DE
BLOCOS NA PRAIA DE PIPA/RN**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao
Departamento de Geologia da Universidade
Federal do Rio Grande do Norte, como requisito à
obtenção do título de Bacharel em Geologia.

Orientadora: Profa. Dra. Marcela Marques Vieira

Banca Examinadora:

Profa. Dra. Marcela Marques Vieira – Presidenta/Orientadora (DG/UFRN)

Dr. Fábio Augusto da Silva Salvador – Coorientador

Dra. Rebeca Seabra de Lima – Membro Externo

NATAL/RN

Dezembro de 2022

TERMO DE APROVAÇÃO

ANNA LUISA ESPÍNOLA DE SENA COSTA

A UTILIZAÇÃO DO MÉTODO GPR PARA CORRELAÇÃO DAS ATIVIDADES
ANTRÓPICAS COM MOVIMENTOS DE MASSA E QUEDA DE BLOCOS NA PRAIA
DE PIPA/RN

Banca examinadora composta pelos seguintes membros:



Documento assinado digitalmente

MARCELA MARQUES VIEIRA

Data: 27/12/2022 07:28:08-0300

Verifique em <https://verificador.itl.br>

1º Examinador(a): Profa. Dra. Marcela Marques Vieira
Orientadora – Departamento de Geologia da UFRN



Documento assinado digitalmente

FABIO AUGUSTO DA SILVA SALVADOR

Data: 27/12/2022 10:12:06-0300

Verifique em <https://verificador.itl.br>

2º Examinador(a): Dr. Fábio Augusto da Silva Salvador
Coorientador – Perito Criminal Federal da Polícia Federal

3º Examinador(a): Dra. Rebeca Seabra de Lima
Membro Externo

Natal, 26 de dezembro de 2022

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

Costa, Anna Luisa Espínola de Sena.

A utilização do método GPR para correlação das atividades antrópicas com episódios de movimentos de massa e queda de blocos na Praia de Pipa/RN / Anna Luisa Espínola de Sena Costa. - 2022. 120 f.: il.

Monografia (graduação) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Curso de Geologia. Natal, RN, 2022.

Orientadora: Profa. Dra. Marcela Marques Vieira.

Coorientador: Prof. Dr. Fábio Augusto da Silva Salvador.

1. Falésias de Pipa(RN) - Estudo - Monografia. 2. Ground Penetrating Radar (GPR) - Método - Monografia. 3. Geologia Forense - Monografia. 4. Movimentos de massa - Monografia. I. Vieira, Marcela Marques. II. Salvador, Fábio Augusto da Silva. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 551.435.31

Elaborado por Kalline Bezerra da Silva - CRB-15-327

AGRADECIMENTOS

A complexidade que este trabalho apresentou foi muito maior que o esperado, por isso a contribuição de várias pessoas foi fundamental, sem elas nada disso seria possível. Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus por colocar cada peça em seu devido lugar e me guiar para a resolução dos obstáculos que encontrei no caminho. Este trabalho nasceu de um sonho e eu não poderia tê-lo realizado sem os meus orientadores que acreditaram em mim e na proposta do estudo. Muito obrigada pela orientação, incentivo e apoio à Dra. Marcela Marques Vieira e Dr. Fábio Augusto da Silva Salvador. Além deles, quatro pessoas foram essenciais no processo de campo e pós-campo. Gostaria de agradecer aos peritos Msc. Jesimael Avelino da Silva e Esp. Emerson Kennedy Ribeiro de Andrade pela disponibilidade e segurança que tornou o nosso campo possível. Como também, à Dra. Carla Patrícia Queiroz Furtado e Dra. Rebeca Seabra de Lima, pela consultoria, feedbacks e todo o tempo que vocês empenharam pelo estudo e por mim.

A proposta do trabalho engloba diversas áreas do conhecimento, por se tratar de um campo real e não empírico, diversos fatores foram levados em conta. Para isto, foi preciso da contribuição de diferentes órgãos públicos para compor um panorama preciso da região. Inicialmente, agradeço a secretária Laira Sousa (Secretaria de Meio Ambiente, Urbanismo e Mobilidade Urbana/SEMURBMO SEMURB) de Tibau do Sul, que demonstrou interesse genuíno no estudo e autorizou as diárias de campo. Assim como Mateus Silva, coordenador Proteção e Defesa Civil (COMPDEC), e Marcelo Marinho Filho, agente civil da COMPDEC, que se disponibilizaram para acompanhar a atividade de campo e documentos fundamentais para o desenvolvimento do estudo. Agradeço também ao Projeto Falésias, do qual fiz parte, e a CAERN (Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte) pelo material cedido e auxílio ao trabalho. Além desses órgãos, agradeço à proprietária da residência nº485, Sra. Vanessa Leite Barreto, que concedeu acesso à sua propriedade para levantamento do estudo, compreendendo a importância da preservação do local e com intensa disposição em ajudar.

Fazer um trabalho durante a pandemia exigiu muito esforço físico e mental, e aqui agradeço aqueles que estiveram me apoiando e amparando nos momentos difíceis. Luiz José, sem você ao meu lado nada disso seria real, muito obrigada! À minha família: Helena, Lúcia e Heloisa agradeço eternamente por ter vocês. Aos meus amigos: Mariana, Rafael, Marília, Ana Lúcia, Jessica, Iasmim, Beatriz, Larissa, Gian e demais, obrigada pela preocupação e suporte que vocês me ofereceram. E, por fim, mas não menos importante, meus gatinhos: Ravena, Cher Olivia, Noah, Madalena, Bolinha, Fluffy e Snowy, obrigada ao carinho que proporcionaram quando precisei.

“The scary news is you’re on your own now. But the cool news is you’re on your own now.”

T. A. Swift

“I’ve learned that you have to choose courage each day like you choose what shirt to wear. It is not automatic.”

K. Harrington

RESUMO

O litoral oriental do Estado do Rio Grande do Norte apresenta praias com fortes atrativos paisagísticos que contribuem para o extenso fluxo de turistas na região. É onde está localizada a área de estudo na praia de Pipa, município de Tibau do Sul, a aproximadamente 86 km da capital Natal. Tabuleiros costeiros, dunas, praias arenosas e falésias são as principais morfologias encontradas na costa potiguar. As falésias contribuem bastante com a fama desta praia, pois proporcionam uma vista espetacular e panorâmica do mar. Porém, observar as belezas naturais deste ponto de vista tem se tornado cada vez mais arriscado. Isto deve-se a recorrentes movimentos de massa nas bordas das falésias oriundos da erosão. O processo erosivo destas estruturas acontece de forma natural, previsível e dinâmica, sendo a intensidade da retração diretamente relacionada com a urbanização desenfreada. Dessa forma, o presente estudo encontrou anomalias geofísicas com o método *Ground Penetrating Radar* (GPR) que foram associadas às tubulações e raízes de plantas não-nativas, em 1,3 e 0,8 metros de profundidade, respectivamente. A partir disto, somado à observação de campo, foi possível reconhecer a interferência antrópica sobre o meio, devido ao hábito comum em canalizar a drenagem pluvial sobre a falésia. Compreender o impacto da ação antrópica nesse ambiente é o principal objetivo deste trabalho, através do monitoramento das águas pluviais e drenagens ativas, visto o alto nível de vulnerabilidade proporcionado. A utilização do método GPR foi eficaz na detecção de anomalias (tubulações, raízes e fraturas associadas) oriundas de ações antrópicas. A avaliação de riscos contribui para o gerenciamento costeiro, além de integrar os ramos da geologia forense e ambiental. A área forense pode auxiliar nos inquéritos de atribuição de responsabilidade onde houve acidentes ou crimes de caráter geológico, apontando irregularidades no planejamento costeiro do município.

Palavras-chave: GPR, Geologia Forense, Falésias, Movimentos de massa.

ABSTRACT

The eastern coast of the Rio Grande do Norte state is made of beaches with scenic landscapes that contribute to the tourism in the region. The study area is located in Pipa beach Tibau do Sul city approximately 86 km from the capital Natal. Coastal tablelands, dunes, sandy beaches and sea cliffs compose the landscapes of Potiguar coast. Sea Cliffs of Pipa beach are part of its famous scene, providing a spectacular and panoramic view of the sea. However, they have become a dangerous attraction due the accesses of observation points. This caused by the recurrent mass movements on the cliff edges related to erosion processes. The erosion of these landscapes occurs through a natural, predictable and dynamic process and the intensity of the shrinkage is directly related to the massive urbanization. Therefore, the main results of the present study is the identification of geophysics anomalies a probably associated with pipes and non-native plant roots, at 1.3 and 0.8 meters depth, respectively. These data along field observation infer the anthropic interference on the environment, due the presence Rainwater channels and drainage over the cliff. The impact and consequences of anthropic action on this environment is the main objective of this work, through the monitoring of stormwater and active drainage, given the high level of vulnerability provided. The use of GPR (Ground Penetrating Radar) was effective in detecting anomalies (pipes, roots and associated fractures) that are the result of anthropic actions. Risk assessment contributes to coastal management, and integrates the branches of forensic and environmental geology. Forensic field can assist in liability inquiries where there have been accidents or crimes of a geological nature, pointing out irregularities in the coastal planning of the city.

Keywords: GPR, Forensic Geology, Sea Cliffs, Mass Movements.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa do estado do Rio Grande do Norte indicando os municípios que contém falésias	10
Figura 2: Esquema representativo dos tipos de falésias: ativas, inativas e extintas.....	11
Figura 3: Elementos que compõem as falésias de Tabatinga e Pipa/RN.	12
Figura 4: Localização da Bacia Pernambuco-Paraíba, com destaque para Sub-bacia Canguaretama, onde situa-se a área de estudo. Fonte: Modificada de Barbosa et al. (2007). .	14
Figura 5: Carta estratigráfica da Bacia Pernambuco-Paraíba.....	15
Figura 6: Perfil esquemático tectonoestratigráfico da região de Tibau do Sul/RN.....	16
Figura 7: Distribuição da pluviosidade e temperatura de Pipa/RN, ao longo de 2003 e 2020 (A), e os eventos de precipitação máxima, acima ou igual a 50mm/dia, desde 1998 a 2020 (B).	19
Figura 8: Deslizamento de massa ocasionado por chuva intensa em junho/2022, destacado em vermelho. Fonte: Silva & Marinho Filho (2022).	20
Figura 9: Demonstração da maré alta alcançando as sinalizações, promovendo desgaste e danos, sendo necessárias constantes vistorias para verificar sua conservação.....	21
Figura 10: Dinâmica costeira na Praia do Madeiro em Pipa/RN, demonstrando a influência dos processos erosivos em sua morfologia. As ondas alcançam com maior intensidade a região sem proteção natural.	25
Figura 11: Dinâmica costeira e processos erosivos que acarretam em: incisão basal (A), queda de blocos (B) e formação de depósito de talus após colapso de material (C). (NMA = Nível de Maré Alta; NMB = Nível de Maré Baixa). Fonte: Adaptado de Silva (2019) e Amorim &Maia (2021b).	26
Figura 12: Ponto de referência da área de estudo para projeções de elevação do nível do mar realizadas pelo IPCC (Acessado pela ferramenta <i>Sea Level Projection Tool</i> em 23/07/2022).	28
Figura 13: Bloco-diagramas dos movimentos de massa mais comuns no Brasil, sendo (A) deslizamento planar, (B) deslizamento rotacional, (C) fluxo de detritos e (D) queda de blocos.	29
Figura 14: Dinâmica da queda de material da Formação Barreiras com a associação dos eventos de chuvas intensas e os movimentos de massa, e subsequente formação do depósito de talus.	30
Figura 15: Evolução dos processos erosivos continentais e marinhos exercidos sobre a falésia que culminam na sua desestabilização. Fonte: Amaral et al. (1997) e Silva (2019).	31
Figura 16: Processo de análise e delimitação de perigo para um caso de deslizamento planar.	33
Figura 17: Critérios de avaliação de vulnerabilidade em imóveis abrangendo sua classificação (A), conforme tipo de material, presença de danos e informação de laudo técnico (B).....	34
Figura 18: Carta de Risco a Movimentos Gravitacionais de Massa, em escala de 1:3000.	36
Figura 19: Vistoria de 10 imóveis na área de risco da Praia de Pipa, dentre os quais, quatro apresentam risco crítico e iminência de deslizamentos, destacados pelas setas em branco.	37
Figura 20: Perfil esquemático sem escala da delimitação das áreas de instabilidade, risco e segurança.	38

Figura 21: (A) Escarpas íngremes com camadas fraturadas e blocos colapsados, a presença do material na base demonstra atividade erosiva intensa. (B) Falésias íngremes repletas de cicatrizes de colapso, fraturas, reentrância erosional basal e blocos recém colapsados indicam constantes deslizamentos. Destacada em vermelho, tem-se grave presença de transeuntes próximos à zona de risco. Fonte: Amorim & Maia (2021b).	39
Figura 22: Fotogrametria de detalhe das fraturas na falésia onde ocorreu o colapso que vitimou uma família em novembro de 2020 (destacado pelo círculo vermelho), coincidindo o local de maior densidade.	40
Figura 23: Esquema representativo de tabuleiros ou chapadas como Área de Preservação Permanente (APP) segundo o Código Florestal (Lei nº 12.651/12, Art. 4, V e VIII).	42
Figura 24: Esquema de delimitação de zonas de proteção de falésias, em laranja, de acordo com as esferas estadual de 2000 (A), federal de 2002 (B) e municipal de 2008 (C).	43
Figura 25: Descrição detalhada da classificação de uso e ocupação do solo em Pipa/RN obtida pelo Projeto Falésias. Fonte: Adaptado de Amorim & Maia (2021b).	44
Figura 26: A Pedra do Moleque foi utilizada como ponto de referência pelos portugueses, e posteriormente foi fonte de inspiração para nomear a Praia de Pipa/RN.	46
Figura 27: Mapa dos Top 100 Destinos escolhidos ao redor do mundo no seminário internacional Green Destination Day de 2020, 2021 e 2022. Destaque para o Município de Tibau do Sul, presente nos últimos dois anos. Fonte: Green Destination Foundation (2022).	47
Figura 28: Tubulação exposta na falésia drenando água da chuva proveniente da avenida, destacada em vermelho (A); foram observadas fraturas de deslocamento (traços pretos) e erosão basal (em azul) bastante proeminentes, próximos à tubulação, como referencial a proeminentes, próximos à tubulação, como referencial a placa de alerta no círculo amarelo (B).	48
Figura 29: Mapa de localização da área de estudo, que engloba o Cemitério de Pipa e a residência nº 485.	49
Figura 30: Geomorfologia da área de estudo, destacada em vermelho.	50
Figura 31: Seção estratigráfica 03 é correspondente à área de estudo.	51
Figura 32: Feições erosivas encontradas na área de estudo: fraturas de deslocamento, erosão basal (linha pontilhada amarela), formação de voçorocas nas cicatrizes de colapso vegetadas, e a porção com fácies mais friável; elas encontram-se bastante próximas do local onde está a tubulação exposta (círculo vermelho).	52
Figura 33: Blocos desagregados, destacados em vermelho, oriundos de queda do material sedimentar por meio da associação do grande volume de chuva e alto nível da maré, resultando no acidente fatal em novembro de 2020. Fonte: Jesimael Avelino (2020).	53
Figura 34: A área de estudo está inserida numa zona de risco, além de conflitar com legislações ambientais.	54
Figura 35: Faixa de 15 metros com risco às construções sobre falésias com fácies friável no topo.	54
Figura 36: As equações de Maxwell, correlação do campo eletromagnético e suas propriedades.	57
Figura 37: (A) Diferença entre as respostas geradas pelas interfaces planas e hiperbólicas no equipamento Detector Duo; (B) Visualização nos radargramas (S1, S2 e S3) das tubulações paralela (amarela) e perpendicular (vermelha) à direção de investigação.	60

Figura 38: Equipamento <i>Ground Penetration Radar</i> (GPR), modelo Detector Duo da empresa italiana <i>Ingegneria Dei Sistemi</i> (IDS), propriedade da Polícia Federal. Fonte: Autora (2022).	61
Figura 39: Imagem de drone da área de estudo com destaque para a tubulação exposta, em azul. A posição real do alvo está a 5 metros, aproximadamente, do ponto apresentado no relatório da SEMURBMO (2020a), em amarelo. Fonte: Autora (2022).	62
Figura 40: Drone Mavic-2, utilizado para capturar imagens aéreas do local de estudo, com auxílio de um iPad mini, de propriedade da Polícia Federal. Como também o GPS usado para marcação de pontos.	63
Figura 41: Mapa esquemático com a disposição dos perfis GPR realizados no primeiro dia de campo, na porção do cemitério, com destaque para a direção das linhas L (vermelho) e T (laranja).	64
Figura 42: Mapa esquemático dos perfis GPR realizados na propriedade privada, com destaque para a direção das linhas L (vermelho) e T (laranja).	65
Figura 43: Presença de outra tubulação oriunda da propriedade, que deságua na base da falésia, provavelmente da fossa interna da residência. Não é visível da parte da praia, mas ao visitar o local foi observado próximo a escada (em amarelo) uma tubulação que termina entre a vegetação, a linha branca é uma projeção dela no terreno privado. Fonte: Autora (2022).	65
Figura 44: Mapa esquemático da área de estudo, com destaque para a direção das linhas L (vermelho) e T (laranja). Fonte: Autora (2022).	66
Figura 45: Medição manual do comprimento dos perfis com fita métrica, e delimitação com piquetes de seus limites. Fonte: Autora (2022).	67
Figura 46: Fluxograma do processamento dos perfis GPR.	68
Figura 47: Esquemas de padrões de configurações de fácies sísmicas.	71
Figura 48: Esquema representativo da subsuperfície do cemitério, como no perfil T1, com presença de fraturas. Fonte: Autora (2022).	72
Figura 49: Esquema representativo da subsuperfície da propriedade privada, padrões anômalos destacados em vermelho, e alta densidade de fraturas. Fonte: Autora (2022).	72
Figura 50: Principais anomalias encontradas na subsuperfície da propriedade privada.	74
Figura 51: Drenagem pluvial do centro comercial é escoada para tubulação exposta na praia. Em (A), (B) e (C) é possível observar o caminho da drenagem até chegar na embocadura para a tubulação 1 (D); (E) desgaste na pintura do portão e desnível da residência em c comparação com a avenida; (F) estabelecimentos comerciais que fazem parte da propriedade privada. Fonte: Autora (2022); Google (2020) na imagem F.	76
Figura 52: Anomalias principais encontradas na área de estudo.	77
Figura 53: Irregularidades vistoriadas pelo IDEMA destacadas em amarelo e vermelho, respectivamente: (A) tubulação observada no U Bistrô; (B) Tubulação exposta na face da falésia.	79
Figura 54: Rede de abastecimento (A) e esgotamento sanitário (B) da praia de Pipa/RN.	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Monitoramento do balanço sedimentar (m ³) da Praia de Pipa/RN.	27
--	----

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Classificação dos níveis de Perigo.....	33
Quadro 2: Classificação dos índices de Risco.	35
Quadro 3: Matriz da análise de risco associando índice de perigo (eixo y) e graus de vulnerabilidade de construções (eixo x).	35
Quadro 4: Conjunto de Legislações que abrangem a região de Tibau do Sul.	41

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Objetivos	6
1.1.1.	Objetivos Gerais	6
1.1.2.	Objetivos Específicos	6
2.	REFERENCIAL TEÓRICO.....	7
2.1.	Geomorfologia.....	7
2.1.1.	Arenitos	7
2.1.1.1.	Beachrocks	7
2.1.1.2.	Lateritos	8
2.1.2.	Baía em Zeta.....	8
2.1.3.	Chapadas.....	9
2.1.4.	Dunas	9
2.1.5.	Falésias	9
2.1.6.	Praias Arenosas	12
2.1.7.	Tabuleiros Costeiros.....	13
2.1.8.	Terraços Marinhos.....	13
2.2.	Geologia	13
2.3.	Agentes Modeladores do Relevo.....	17
2.3.1.	Clima	17
2.3.2.	Processos Costeiros	21
2.3.2.1.	Ondas	21
2.3.2.2.	Marés	22
2.3.2.3.	Correntes Marítimas e Deriva Litorânea	22
2.3.2.4.	Ventos.....	22
2.3.3.	Vegetação	23
2.3.4.	Drenagens Fluvial e Pluvial.....	23
2.3.	Erosão	24
2.4.	Propriedades Geotécnicas.....	28
2.5.	Legislação.....	40
3.	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	45
3.1.	A Praia de Pipa	45
3.1.1	Área de estudo	47

3.2. Geologia e Geomorfologia da Área de Estudo	50
3.2.1. Geomorfologia Local.....	50
3.2.2. Geologia Local	50
3.3. Uso e Ocupação do Solo da Área de Estudo	53
4. METODOLOGIA.....	55
4.1. Introdução.....	55
4.2. O método geofísico.....	55
4.3. Resposta Geofísica de uma Tubulação	59
4.4. Aquisição dos Dados Geofísicos	61
4.5. Processamento dos Dados	67
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	70
5.1. Resultados.....	70
5.2. Discussão	77
6. CONCLUSÃO.....	84
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87
ANEXOS.....	99

1. INTRODUÇÃO

O ambiente costeiro do nordeste brasileiro é referência em atrair turistas para suas cidades litorâneas. As belezas naturais e o clima tropical contribuem para este abundante fluxo de visitantes, que aumenta exponencialmente ao longo dos anos, favorecendo também o crescimento populacional, já que a maioria da população mundial vive em zonas costeiras (BIRD, 2008). A Praia de Pipa, área de estudo, está localizada no município de Tibau do Sul, no estado do Rio Grande do Norte (RN). É considerada pelo Ministério do Turismo (MTUR) como um dos principais destinos turísticos regionais do Brasil, dentre outros 65, e o segundo do estado do RN (MTUR, 2012). Ela possui o título de maior atrativo turístico de seu município, devido à presença das falésias e dunas que formam mirantes naturais, atraindo turistas nacionais e estrangeiros para apreciar a beleza cênica local (PIÉRRRI *et al.*, 2007).

As características citadas também promovem interesse dos setores imobiliário e turístico e, de acordo com Ribeiro (2015), tornam a região mais valorizada. Atualmente, a principal rota da praia, conhecida como Avenida dos Golfinhos, está dominada por empreendimentos comerciais, principalmente de hotelaria e gastronomia (SEMURBMO, 2020b). Segundo Silva (2011) este panorama difere bastante da maneira como a comunidade da região se desenvolveu, com atividades de pesca e agricultura, visto que a partir dos anos 1980 a urbanização turística ganhou força e sobrepôs a ocupação tradicional. Toda esta visibilidade torna o município foco de conflitos socioambientais, devido ao constante embate entre desenvolvimento sustentável e os crescimentos turístico e populacional (ALVES *et al.*, 2017). Importantes legislações foram implementadas a fim de evitar esses conflitos, como a Lei Estadual nº 7.871/2000 que definiu as falésias como Áreas de Preservação e a necessidade de monitoramento especial numa faixa de 100 metros, como também a não recomendação de edificações nos primeiros 33 metros da determinada faixa. Além desta Lei, destaca-se a Resolução N°303/02 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) que reiterou a lei estadual antecessora e proibiu qualquer tipo de ocupação na faixa de monitoramento.

O Rio Grande do Norte é um pequeno estado localizado na porção do extremo nordeste do país e da placa Sul-Americana, atribuindo uma característica única: ser banhado por dois litorais, o setentrional e oriental, com cerca de 350 km totais (BARRETO *et al.*, 2004). O enfoque do estudo é o litoral oriental de direção Norte-Sul aproximadamente, pois é onde a Praia de Pipa/Tibau do Sul está situada. Segundo Muehe (2006) este litoral apresenta 166 km

de extensão total, sendo 101 km de praias arenosas planas e estreitas e 65 km de falésias ativas da Formação Barreiras. A área de estudo foi definida geológica e geomorfologicamente por Barreto *et al.* (2004), constituída pelo embasamento cristalino pré-cambriano, rochas sedimentares de idade cretáceas e depósitos sedimentares miocênicos a pliocênicos da Fm. Barreiras, todos sobrepostos pelos depósitos quaternários. Já as feições geomorfológicas são reconhecidas como “litoral das barreiras”, devido ao formato tabular dos depósitos sedimentares que culminam próximo ao mar, sob forma de falésias ativas em sua maioria. O clima da região é tropical úmido, cujo período de chuvas fortes ocorre entre os meses de fevereiro a julho, com precipitação média mensal variando de 120 a 230 mm (DINIZ, 2002).

Como foi dito acima, a feição característica de Pipa são suas falésias pois configuram uma paisagem espetacular, dada a perspectiva da vista panorâmica dos oceanos (MARQUES, 2009; DEWEZ *et al.*, 2013). As falésias estão presentes na maior parte do litoral norte-riograndense, sendo caracterizadas como estruturas íngremes, de recortes abruptos entre a terra e o mar, e com inclinações frequentemente verticais, ou maior que 40° nas suas bordas/faces (SUGUIO, 1998). Sofrem processos de erosão, seja continental ou marinho, porém sua expressividade depende da classificação tipológica da falésia em: ativa, inativa e extinta (EMERY & KUHN, 1982; SUGUIO, 1998). A primeira é exposta e fortemente influenciada pela atividade marinha e continental, gerando uma constante retração. A falésia que possui a base envolvida em material de deslizamentos antigos é considerada inativa, podendo haver presença de vegetação. Por fim, a falésia extinta é aquela que não possui influência marinha sobre seu processo erosivo. O perfil de falésia encontrado no local de estudo é do tipo ativo, com inclinação entre 80° e 90° e alturas entre 15 e 30 metros (SEMURBMO, 2020a). A associação deste desnivelamento abrupto da topografia e a grande concentração da energia de ondas ou marés configura este ambiente como altamente propício à erosão (ALMEIDA JÚNIOR, 2017).

Pacheco *et al.* (2006) afirmaram que um dos principais problemas das regiões litorâneas é o avanço da linha de costa, que intensifica o processo erosivo. A erosão costeira é um processo natural, complexo e dinâmico que ocorre no ambiente transicional entre o mar e o continente. Por isso, alguns fatores devem ser avaliados para compreendê-la, como: os ambientes continentais e marinhos, variações climáticas e temporais, implementação de propriedades e a alteração geológica da costa (POULTON *et al.*, 2006). Características internas à rocha também devem ser observadas: os sistemas de juntas, heterogeneidade litológica, posição de camada

mais e menos resistentes, presença de argila e profundidade do nível freático (DIAS & NEAL, 1992). Muitas vezes a erosão é erroneamente interpretada, tornando-se uma espécie de antagonista, mas ela desempenha um papel importantíssimo para a sedimentação de praias arenosas. O equilíbrio do balanço sedimentar, em virtude da geração de uma fonte de sedimentos, ocorre através da ação erosiva em falésias marinhas ativas (SOUZA *et al.*, 2005).

Outro fator que reforça a erosão costeira é a ocupação antrópica, principalmente se for desenfreada e em bordas de falésias (YOUNG, 2006). À medida que as regiões próximas à praia foram se tornando cada vez mais habitadas, a expansão mal planejada e o natural processo de erosão costeiro se uniram e intensificaram o processo de retração da falésia, pois aumentam a fragilidade do substrato e acentuam o impacto sobre processos que são naturais e previsíveis. O resultado disto é o desequilíbrio de ambientes em seções com potencial risco de desmoronamentos, tornando esta ação um dos principais agentes catalisadores de problemas para comunidades costeiras (DEL RIO *et al.*, 2009). O somatório destes fatores afeta também a qualidade turística da região que, conforme Piérri (2008), tem maior probabilidade de ser negativa e desempenhar influência na concepção de outros municípios costeiros. Recentemente, em novembro de 2020, o acidente que vitimou uma família local repercutiu em noticiários nacionais, incitando fortes questionamentos sobre a gestão costeira não só da Praia de Pipa, mas também de todas as praias nos arredores.

O evento sinistro foi estimulado por meio da ação simultânea de dois fenômenos naturais: o alto nível da maré e o grande volume de chuva (SEMURBMO, 2020b). Ambos fatores promovem a erosão costeira ao longo das falésias através da erosão basal, provocada pela ação das ondas diretamente na base das escarpas, e erosão superficial com infiltração e escoamento das águas pluviais no topo da encosta (RIBEIRO, 2015). Apesar de provocar a retração das falésias, a erosão é um processo inerente ao perfil praial, mas sua intensidade é consequência da intervenção humana. Segundo Melo (2013), alterações adversas são produzidas quando ocorre a modificação do ambiente nativo para atividades de lazer, moradia, extração de recursos e turismo, o que tende a impulsionar a supressão da vegetação natural e aumento de carga no topo da falésia. Infelizmente, estes efeitos negativos são apenas sinalizados quando algum bem é afetado ou destruído pela dinâmica natural. De acordo com Silva (2019), a urbanização potencializa episódios de deslizamentos e acelera o processo de recuo costeiro, alertas que já vinham sendo apontados no trabalho de Piérri (2008).

A drenagem pluvial é um elemento-chave para compreender a dinâmica do local, visto que a erosão promovida pelas chuvas foi definida como mais relevante no processo de recuo dos taludes entre Tibau do Sul e Pipa (SEVERO, 2005), superando a erosão causada pelas ondas devido à correlação entre os eventos de deslizamentos e os períodos de saturação do pacote sedimentar. Silva (2019) concluiu que o aumento da probabilidade de ruptura das rochas, na mesma área de estudo, estava ligado ao avanço da frente de umedecimento sobre a camada do topo da falésia. Assim, o padrão de drenagem amplia sua energia ao se aproximar da declividade abrupta e, conseqüentemente, promove o processo de ravinamento no topo do paredão rochoso. Observar as disposições destas feições erosivas contribui para o reconhecimento de padrões de instabilidade, como por exemplo identificar cicatrizes e depósitos recentes de movimentos de massa (FERNANDES *et al.*, 2001).

Avaliar as estruturas e drenagens também oferece respaldo para qualificação das zonas de risco e o quanto a interferência humana auxilia para degradação de uma área costeira. Isto é feito por meio do controle das águas pluviais em locais com falésia, inspeção de drenagens existentes para verificação de vazamentos e aumento da malha de drenagem, que servem para impedir a saturação e impermeabilização do solo (SEMURBMO, 2020a). De acordo com o recente laudo de inspeção da SEMURBMO (2020b), a base da falésia é rotineiramente saturada pelas águas pluviais, pois a caixa coletora carrega o conteúdo aquoso acumulado da Avenida Baía dos Golfinhos e despeja-o por meio de tubulações em local inadequado. Além disso, a maioria dos imóveis presentes nesta avenida principal não possuem sistema de drenagem adequado, sobrecarregando a rede de esgoto da via pública e a coesão do material da falésia.

Este laudo foi embasado no limite de segurança proposto por Severo (2005) para garantir a integridade dos transeuntes e imóveis, assim, uma distância de 10 metros após a borda da falésia com erosão ativa foi delimitada com o objetivo evitar piores consequências de futuros desmoronamentos na área. Porém, por se tratar de processos dinâmicos, essa zona de segurança pode ser rearranjada, caso haja mais queda de blocos ou erosão deslocada para o continente. Segundo o relatório do Projeto Falésias (AMORIM & MAIA, 2021b), onde foi realizado o mapeamento do solo em escala centimétrica, a faixa de 10 metros possui apenas 0,17% de área ocupada. A partir de análises morfológicas das áreas favoráveis à queda de blocos e/ou deslizamentos planares foram classificados graus de perigo e vulnerabilidade conforme o Projeto GIDES (2018), em: maior índice de perigo do manual (P4) e alta vulnerabilidade (V4) devido aos processos erosivos agressivos sobre a face das falésias. O grau de risco foi atribuído

através do reconhecimento desse fator em imagens aéreas, seguindo o mesmo padrão de classificação, e foram catalogados em risco muito alto (R4) quarenta imóveis presentes no topo da falésia (SEMURBMO, 2020b).

Essa avaliação permite compreender a causa do importante conflito socioeconômico, abrangendo o desenvolvimento de infraestruturas, grande densidade populacional e alterações climáticas (SILVA *et al.*, 2020) que comprometem a integridade da região e população local. Dentro deste contexto, a geologia forense propõe a utilização do método científico para embasar provas e discussões, contribuindo para concluir se a ocorrência de um evento pode ser caracterizada como crime ou acidente. O GPR (*Ground Penetrating Radar*) é frequentemente aplicado em investigações forenses (ANNAN, 2001), enquadrando-se na área de geofísica forense. Colaborando, igualmente, com a gestão costeira sustentável, já que a urbanização planejada pode gerar benefícios econômicos (SEVERO, 2005). É importante ressaltar que os estabelecimentos comerciais estão cada vez mais concorrendo entre si e com áreas de preservação ambiental em busca de espaço (ALMEIDA JUNIOR, 2017), resultando num conflito entre as legislações estaduais e federais que corroborou para a ocupação desenfreada no topo da falésia. Essa conjuntura consiste em fortes indicativos de que o monitoramento costeiro pode se tornar ineficaz, caso se mantenha da maneira que vem operando nos últimos 20 anos.

A continuidade das atividades na região não pode ser interrompida, visto que é a principal receita do município, mas necessita-se garantir segurança à população que reside ou visitantes das praias que englobam as falésias. O ideal é preservar o patrimônio natural de Pipa e, ao manter a segurança, fazer com que possamos usufruí-lo por mais tempo. Os gestores municipais já adotaram medidas imediatas para contenção de possíveis desastres naturais, como a elaboração de um estudo geológico para mapeamento de áreas de risco e isolamento de edificações e faixas de areia. Porém, permanece fundamental a execução do gerenciamento de risco recomendado no Laudo de Inspeção com Emissão do Parecer Técnico da SEMURBMO/2020b (IDEMA, 2021).

1.1 Objetivos

1.1.1. Objetivos Gerais

- Testar o método GPR como instrumento auxiliar na investigação/estudo/elucidação de eventos adversos de caráter geológico;
- Compreender o processo erosivo neste trecho de falésia ativa em Pipa/RN.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Compreender as ocorrências de deslizamentos de massa em Pipa/RN, em destaque a fatídica queda de blocos em novembro de 2020;
- Detectar a tubulação exposta e qual sua influência sobre a falésia;
- Sugerir recomendações para modelos de gestão e monitoramento para prevenir a segurança da população e dos turistas.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo abrange o contexto regional da área de estudo, com tópicos geotécnicos e legais para compreensão da dinamicidade e administração pública local, a partir de registros bibliográficos sobre caracterização geológica-geomorfológica, para então analisar os agentes externos e internos que atuam direta e indiretamente sobre as falésias. Por fim, pretende-se detalhar os efeitos e consequências gerados por estas pressões, sob perspectiva dos aparatos legislativos.

2.1. Geomorfologia

A costa litorânea oriental do Rio Grande do Norte possui extensão de 166 km, aproximadamente, sendo constituída por 101 km de praias arenosas planas e estreitas e 65 km de falésias ativas, segundo Vital *et al.* (2006). Nesta zona, cerca de 10 km pertencem ao Município de Tibau do Sul, que apresenta os seguintes componentes geomorfológicos: Arenitos de Praia (*beachrocks*), Arenitos Ferruginosos, Baía em forma de zeta (ζ), Chapadas, Dunas, Falésias, Praias Arenosas, Tabuleiro Costeiro, Terraços Marinhos, Sistema Estuarino Lagunar de Guaraíras e o Vale do Rio Catu (PIÉRRRI, 2008). Ademais, abrange importantes resquícios da vegetação de mata atlântica e restinga, *habitat* da fauna e flora endêmica (PIÉRRRI *et al.*, 2007). As feições mais importantes encontradas no município serão descritas a seguir:

2.1.1. Arenitos

2.1.1.1. *Beachrocks*

Um dos primeiros cientistas a investigar os *beachrocks* e designar sua nomenclatura foi Charles Darwin, quando veio ao Brasil em 1832 e, especificamente, no Nordeste em 1841 (MANSUR; RAMOS; GODOY; NASCIMENTO, 2011). *Beachrocks* são arenitos de praia, expostos de maneira descontínua no litoral, dispostos em faixas de até 8 km, paralelos à linha de costa atual ou submersos em pequenos corpos isolados (VIEIRA; ROS, 2006). De acordo com Pereira (1999), são arenitos cimentados por carbonatos com estratificação cruzada acanalada e plano paralelas, geradas na região de baixo estirâncio do mar. Esses arenitos representam antigas linhas de costa onde os sedimentos arenosos foram litificados, indicando qual era o nível do mar (AMARAL, 2001), ou seja, ajudam a entender as variações climáticas e a história evolutiva nos últimos milhares de anos. Quando se expõe em faixas, essas rochas

diminuem a energia da onda, reduzindo o impacto da erosão nas praias. Hoje, algumas obras de engenharia os utilizam como parâmetro para criar estruturas de contenção erosional na linha de costa, como os “espigões”. Barreto *et al.* (2004) dataram estas rochas da praia de Tibau do Sul em aproximadamente 5.600 e 7.400 anos.

2.1.1.2. Lateritos

Os lateritos ou arenitos ferruginosos são rochas avermelhadas presentes em rochas sedimentares da Formação Barreiras, formados através de processos geoquímicos que promovem o intemperismo entre as camadas geológicas (AMARAL, 2001). Essas rochas são constituídas, predominantemente, de grãos de quartzo angulosos a arredondados, pobremente selecionados de granulação arenosa (podendo chegar ao tamanho matacão) e cimentadas por óxido de ferro (AMARAL, 1999). De acordo com Amaral (2001), estes arenitos dispõem-se em formato de pontas no litoral, devido a sua resistência aos processos erosivos da região costeira, promovendo a morfologia das praias do litoral oriental em baías em forma de zeta (ζ).

2.1.2. Baía em Zeta

A presença de muitos promontórios no litoral oriental norte-riograndense deve-se ao fato dele ser esculpido por baías em forma de zeta (ζ), das quais foram contabilizadas 12 ao longo da região de Baía Formosa até o município de Touros (AMARAL, 2002). O comportamento do embasamento mais antigo está correlacionado à gênese dessas baías, porém em grau não determinado, e sua morfologia atual é resultado das modificações ambientais causadas por processos exógenos recentes.

A configuração destas baías possui ampla distribuição ao redor mundo, principalmente em regiões de baixas latitudes, pois o perfil deposicional é disposto mais homoganeamente e possui uma aproximação das ondas construtivas em direção consistente (AMARAL, 2002). Com isto, geram nas ondas um processo de difração que aumenta sua agressividade em relação à erosão marinha. As concavidades representam as zonas das enseadas mais erosivas até a demarcação por bermas ou depósitos de areia, provavelmente oriundos da erosão prévia, regiões de menor atividade erosiva devido à formação de uma praia arenosa que protege a base de falésia contra a abrasão marinha.

Outro fator que protege a base são as rampas de material colapsado dispostas em blocos de laterito, ou seja, rochas muito resistentes que funcionam como agente dispersante da energia

das ondas e, conseqüentemente, chegam mais fracas, demonstrando a correlação proposta por Davies (1972) de causa e efeito entre a forma da costa e direção das correntes de deriva litorânea.

2.1.3. Chapadas

Chapadas, ou “chapadões” são termos regionais utilizados para definir a superfície dos tabuleiros costeiros, que passaram por um processo de exumação devido às atividades dos agentes eólicos e antrópicos, resultando na sua exposição ao intemperismo e perda do recobrimento natural (AMARAL, 2001; PIÉRRRI, 2008). Possuem uma morfologia uniforme, plana e regular com suave inclinação para leste (oceano), que foi gerada pela deposição dos sedimentos da Formação Barreiras sobre rochas mais antigas durante o Mioceno até o Plioceno (AMARAL, 2001; BARRETO *et al.*, 2004). Presente no litoral de Pernambuco até o Rio Grande do Norte, esta feição como limite ocidental campos de dunas fixas com vegetação de médio porte e, na porção oriental, por falésias, que apresentam camadas de composição variadas, indicando diferentes tipos de deposição em sistemas fluviais, flúvio-estuarinos e lagunares.

2.1.4. Dunas

Dunas são formações eólicas comuns na região costeira do Rio Grande do Norte, representadas por cristas ou elevações arenosas independentes da topografia à sua volta (AMARAL, 1999). Segundo Amaral (2001), elas estão presentes na faixa de praia como dunas primárias, acima de terraços marinhos e frente às falésias, e também revestindo a superfície dos tabuleiros (chapadas), como dunas parabólicas não-vegetadas e vegetadas. As dunas primárias são classificadas em livres ou impedidas, sendo diferenciadas pela importância da vegetação, relevante apenas para o segundo tipo. Elas atuam no controle natural da erosão quando estão dispostas entre a praia e as falésias (PIÉRRRI, 2008). Já as dunas parabólicas representam feições de grande porte, e aquelas que detêm vegetação contribuem para indicar as variações climáticas e nível do mar antigos.

2.1.5. Falésias

Um dos principais componentes geomorfológicos presentes na paisagem costeira do Município de Tibau do Sul/RN são as falésias, alvo de estudo desde o século passado quando foram caracterizadas na região costeira de Natal/RN pelos naturalistas Branner e Jenkins em

1909 e 1913, respectivamente. O trabalho de Melo (2013) revela a localização das falésias no Rio Grande do Norte (Figura 1), demonstrando sua presença majoritária no litoral oriental do estado. Sucintamente, falésia é um termo denominado para definir encostas íngremes e verticalizadas localizadas junto à linha de praia, ou então, à borda litorânea da superfície dos tabuleiros exumados e expostos à lixiviação e outras intempéries, localmente conhecido como chapadão (PIÉRRRI *et al.*, 2007; SILVA *et al.*, 2003), sendo correspondente a uma quebra abrupta de altitude até o nível do mar (AMARAL *et al.*, 2001). Estas formas de relevo podem chegar até 40 metros e sua inclinação varia entre 40° a 60° com a horizontal (BRAGA, 2005).

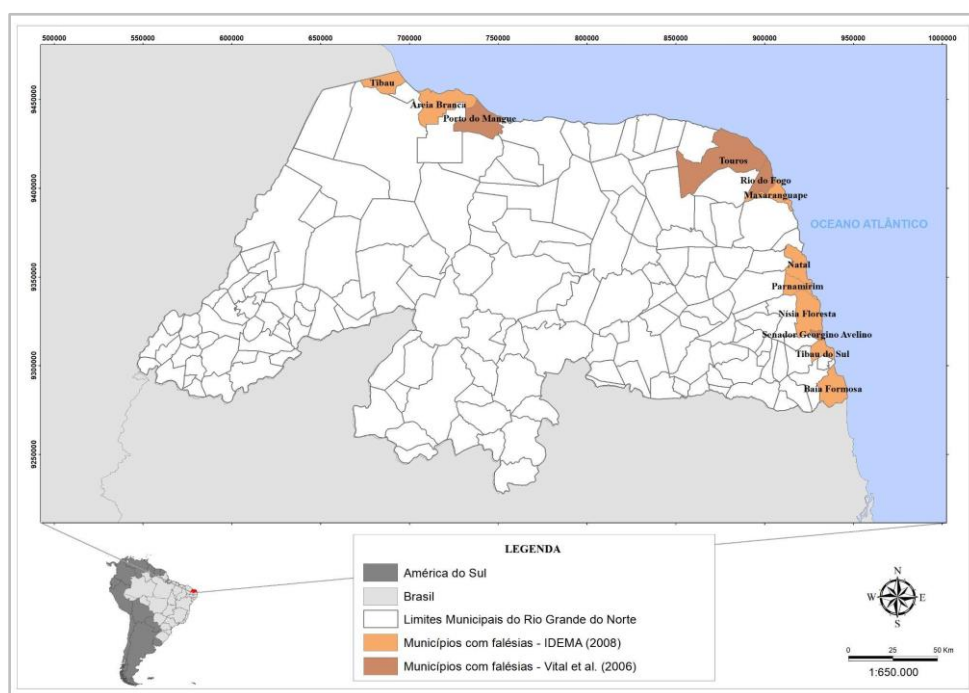


Figura 1: Mapa do estado do Rio Grande do Norte indicando os municípios que contêm falésias. Mapa do estado do Rio Grande do Norte indicando os municípios que contêm falésias.

Fonte: Modificada de Melo (2013).

Segundo Emery & Kuhn (1982) e Suguio (1998), as falésias podem ser classificadas em ativas, inativas ou extintas, como observado na figura 2. A primeira, ativa ou “viva”, é exposta e fortemente influenciada pelos processos marinhos e continentais, provocando sua constante retração. Já o estado inativo ocorre quando sua base já está envolta por material proveniente de deslizamentos anteriores, conhecido como depósito de tálus, com inclinação entre 25-30° e possível presença de vegetação. Por fim, a extinta é aquela que não sofre influência marinha: seja pela dinâmica costeira ou nível relativo do mar, a ação das ondas não a alcança, deixando de ser tão verticalizada e íngreme, sendo atingida apenas pela erosão pluvial. O desgaste cíclico

das falésias promove fonte de sedimentação para as praias, mantendo o equilíbrio no geossistema quando não há instabilidade decorrente de processos erosivos acentuados.

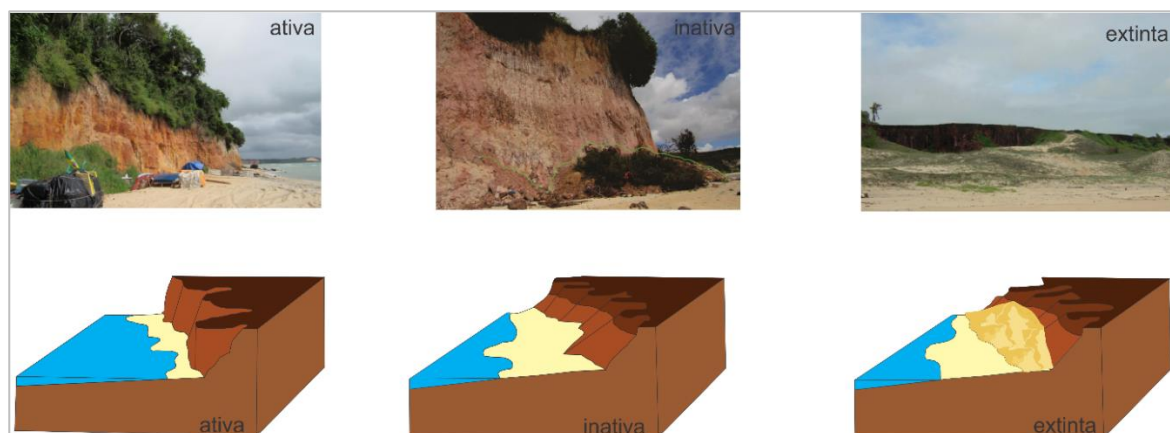


Figura 2: Esquema representativo dos tipos de falésias: ativas, inativas e extintas.
Fonte: Adaptada de IDEMA (2021) e SEMURBMO (2020a).

As falésias são esculpidas em rochas da Formação Barreiras, provenientes de sedimentos avermelhados e esbranquiçados de sistemas flúvio-deltaicos depositados durante o Mioceno (± 23 Ma), associadas a campos de dunas e terraços litorâneos, sob forma de gradação interdigitada (AMARAL, 1999; PIÉRRRI *et al.*, 2007). Severo (2005) descreveu os solos encontrados nas falésias de Tibau do Sul em três tipos: brancos com nódulos vermelhos, os de tonalidade amarelo-amarronzados e completamente vermelhos, todos oriundos da Fm. Barreiras, posteriormente a intensos processos de laterização. Laterita é um termo utilizado para descrever solos avermelhados de regiões tropicais, ricos em ferro e hidróxido de alumínio, que foram lixiviados pela percolação da água removendo sílicas e múltiplos cátions. É também relacionada às oscilações do lençol freático ao longo do tempo geológico. No Barreiras, o processo teve origem com o elevado nível de precipitação e percolação da água, que promoveu a transferência de íons de maneira vertical e horizontal no perfil, removendo os álcalis e aumentando as concentrações de ferro e alumínio, diminuindo o conteúdo de sílica (SIQUEIRA *et al.*, 2014). A presença de laterita próximo da superfície afeta o escoamento superficial, permeabilidade e percolação da rocha, como ocorre nos tabuleiros pernambucanos (ESPINDOLA & DANIEL, 2008).

Os elementos principais que compõem as falésias entre Tabatinga e Tibau do Sul foram caracterizados pelo Projeto Falésias (Figura 3), sendo eles: uma camada friável, lateritas, plano de fraturas, lateritos, arenitos de praia e depósito de tálus (AMORIM & MAIA, 2021b). O primeiro integrante corresponde a uma capa de sedimentos com diferentes espessuras de

materiais inconsolidados ou friáveis, equivalente às dunas sobrejacentes ao tabuleiro rochoso, dispostas descontinuamente na região. As lateritas aparecem de duas maneiras distintas conforme influência do lençol freático ou baixo pH (PENTEADO, 1980), em que ambas sustentam a escarpa sob forma de coluna ou nível, mantendo sua estabilidade estrutural. Em seguida, as cicatrizes de erosão são registros do plano de fraturas expostas, que contém fraturas distintas, e estão presentes na face do talude, contribuindo para a desagregação de blocos e agravamento dos processos erosivos. Os arenitos e lateritos foram descritos anteriormente e estão dispostos sob forma de blocos na areia adjacente às falésias, já o depósito de tálus é oriundo de deslizamentos recentes do material da falésia.

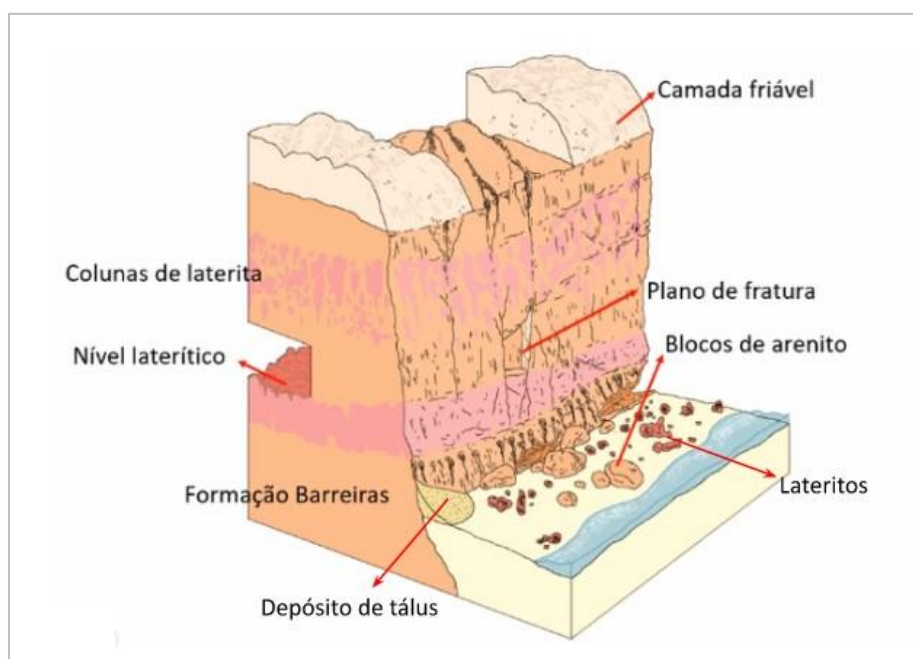


Figura 3: Elementos que compõem as falésias de Tabatinga e Pipa/RN.
Fonte: Projeto Falésias (AMORIM & MAIA, 2021b).

2.1.6. Praias Arenosas

O perfil praial emerso da área de estudo é composto por praias arenosas, que normalmente começam após a berma ou pós-praia até a linha de quebra das ondas do mar (PIÉRRRI, 2008). De acordo com Komar (1976), a praia é uma região propícia para acumulação de sedimentos inconsolidados, disposta do nível de maré baixa até encontrar uma variação fisiográfica, como dunas, falésias e até um ponto de vegetação permanente. Assim, Hoefel (1998) definiu as praias arenosas como um ambiente extremamente dinâmico e sensível, podendo apresentar diferentes composições e granulometrias de acordo com as ações promovidas pelos ventos, ondas, correntes litorâneas e clima, que esculpem a morfologia da

praia. Segundo Amaral (1999), as praias de Tibau do Sul exibem areias quartzosas, arenitos da Formação Barreiras e “*beachrocks*”.

2.1.7. Tabuleiros Costeiros

Os tabuleiros são estruturas identificadas ao longo do litoral brasileiro, entre a Ponta de Touros (RN) e o Rio Gramame (PB), tendo por volta de 12 km de extensão em relevos planos e de baixa altitude inclinados em direção ao oceano, denominados de planaltos rebaixados (SEVERO, 2005; AMARAL, 1999). Morfologicamente os tabuleiros costeiros referem-se às superfícies tabulares compostas por sedimentos arenosos da Formação Barreiras, em camadas sub-horizontalizadas depositadas ao final do Plioceno e início do Pleistoceno, dentro de sistemas fluviais de alta e baixa sinuosidades (SUGUIO *et al.*, 1985; AMARAL, 2001). De acordo com Scudelari & Freire (2005), estas feições recuaram devido ao processo erosivo e o que foi conservado (falésias mortas) representa a antiga posição da linha de costa. Ao encontrar-se exumado, sem vegetação ou cobertura eólica, é suscetível aos efeitos das variações climáticas quaternárias, ou seja, aos agentes erosivos marinhos, eólicos, pluviais e antrópicos e designado como “chapadão” (PIÉRRRI, 2008).

2.1.8. Terraços Marinhos

Os terraços marinhos correspondem a corpos arenosos localizados entre a praia atual e o sopé da falésia, resquício de uma elevação no nível relativo do mar e consequente deposição marinha “recente”, contribuindo para localização de estágios de sedimentação de uma praia ascendente (PIÉRRRI, 2008). São feições de difícil caracterização, porém desempenham papel de proteção das falésias diante da erosão costeira. Os terraços da área de estudo foram considerados os mais antigos datados por Barreto *et al.* (2004), tendo por volta de 210.000 a 214.000 anos.

2.2. Geologia

A geologia da região costeira do Rio Grande do Norte é bastante complexa, envolvendo desde rochas pré-cambrianas a depósitos do Quaternário. De acordo com Silveira (1964), a presença de dois tipos de litoral (setentrional e oriental) resultou na ocorrência de processos distintos de sedimentação e, consequentemente, diferentes composições, seja pela Bacia

Potiguar (norte) ou Bacia Pernambuco-Paraíba (PE-PB), a leste. A Bacia PE-PB apresenta-se em formato de rampa, com partes emersa e submersa, de dimensão total 33.000 Km², limitada a norte pela Bacia Potiguar (por meio do Alto de Touros) e a sul pela Bacia Sergipe-Alagoas (através do Alto de Maragogi). Esta Bacia subdivide-se em três segmentos, de sul para norte, respectivamente: Bacia de Pernambuco ou “Bacia do Cabo”, Bacia da Paraíba e a Plataforma de Natal. A porção norte é o equivalente, no continente, do Maciço São José do Campestre que integra o domínio estrutural do estado norte-rio-grandense (VAN SCHMUS *et al.*, 2003). A área de estudo está situada na costa leste, mais especificamente na Sub-bacia Canguaretama, delimitada pelas falhas Cacerengo e Canguaretama, as quais, em conjunto com a sub-bacia Natal, formam a Plataforma de Natal, observada na Figura 4 (BARBOSA & LIMA FILHO, 2006).



Figura 4: Localização da Bacia Pernambuco-Paraíba, com destaque para Sub-bacia Canguaretama, onde situa-se a área de estudo. Fonte: Modificada de Barbosa et al. (2007).

A caracterização desta bacia foi feita por Mabesoone & Alheiros (1988) como um homoclinal, com espessura do pacote sedimentar entre 1000 e 1500 metros, podendo alcançar até 3 a 4 Km sobre o Platô de Pernambuco. A história evolutiva também foi inferida pelos

autores, tendo o período posterior à regressão marinha definitiva, no início do Eoceno, como marco de uniformidade nesse processo de evolução, conforme empilhamento estratigráfico observado na Figura 5. Inicialmente, até o Plioceno, houve um extenso estágio de erosão e denudação, e curto período de acumulação de sedimentos na plataforma continental e Platô de Pernambuco. Em seguida, inicia-se o processo de sedimentação da Formação Barreiras, e por último a sequência quaternária com registros preservados no relevo e região costeira.

De acordo com Lana & Roesner (1999a, 1999b), existe a influência marinha na porção basal durante o Turoniano, que corresponde cronologicamente à Formação Jandaíra, indicando uma associação com a Bacia Potiguar no início da sua evolução. Este pacote é recoberto por uma sequência carbonática, depositada entre o Campaniano e Maastrichtiano sob forma de plataforma mista. Assim, a Bacia foi geologicamente depositada sobre rochas gnáissicas, migmatíticas, micaxísticas e granitóides do embasamento Pré-Cambriano, sendo preenchida internamente por rochas carbonáticas e areníticas do Cretáceo ao Terciário, capeadas por depósitos recentes da Fm. Barreiras e sedimentos quaternários (SILVEIRA, 1964; BARRETO *et al.*, 2004).

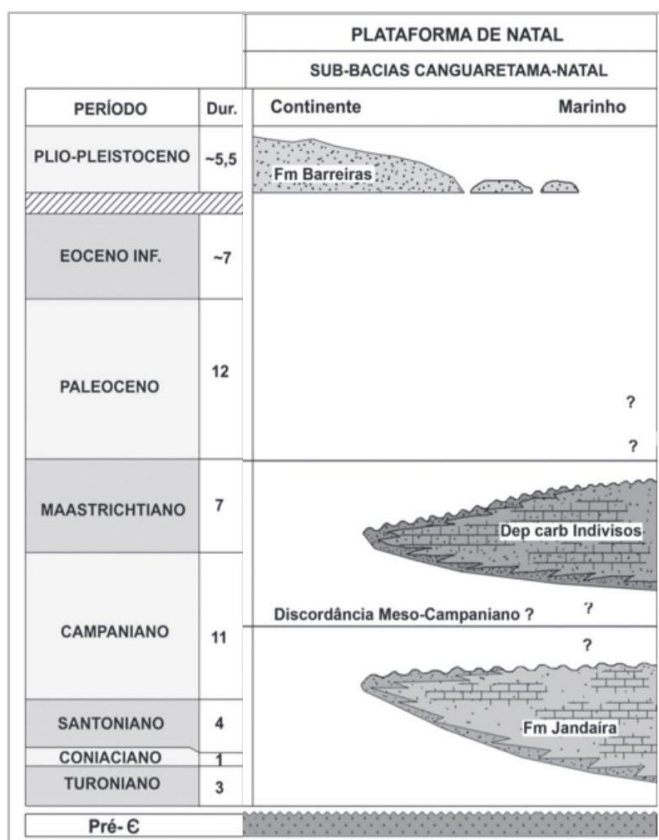


Figura 5: Carta estratigráfica da Bacia Pernambuco-Paraíba.
Fonte: Adaptada de Barbosa et al. (2007).

Em resumo, a Figura 6 representa a integração de dados elaborada por Barbosa *et al.* (2007) dos aspectos tectono-estratigráficos da região, desde as falhas e altos estruturais que delimitam a Bacia PE-PB, até correlação da sua composição sedimentar atribuída a dados do poço 2-567 (Projeto Fosfato – CPRM), com as unidades litoestratigráficas do Barreiras, Formação Jandaíra, depósitos indivisos e embasamento.

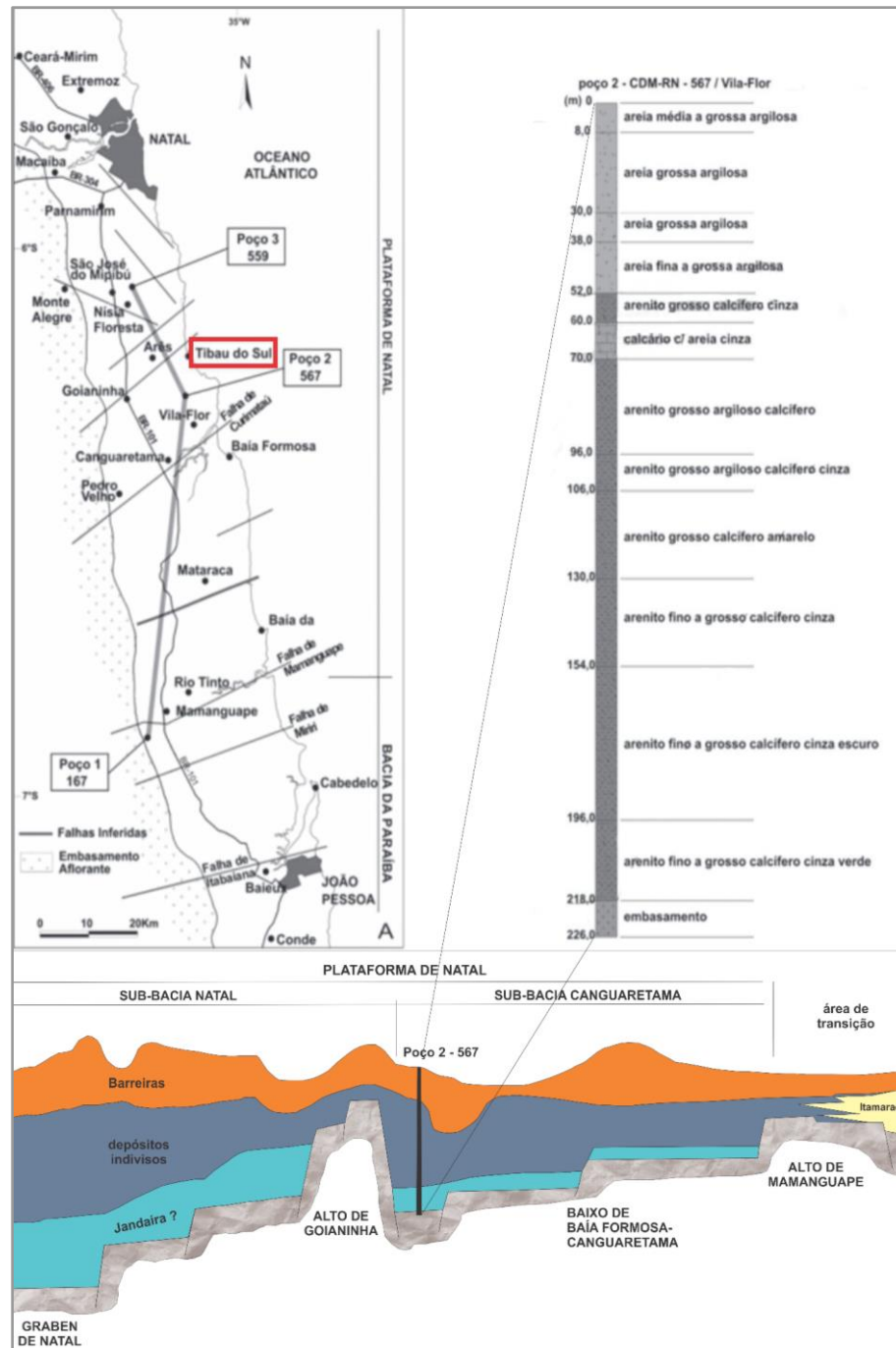


Figura 6: Perfil esquemático tectonoestratigráfico da região de Tibau do Sul/RN.
Fonte: Modificado de Barbosa *et al.*, 2007.

As falésias são feições de grande destaque paisagístico na região costeira do RN, apresentando as maiores espessuras encontradas da Formação Barreiras (BARBOSA *et al.*, 2007), realçando sua importância na constituição do patrimônio natural e local. A Formação Barreiras pode ser encontrada em três ambientes deposicionais diferentes, ao longo de Recife a Natal: fácies de leques aluviais, fácies de canais entrelaçados e fácies de planície flúvio lacustre (ALHEIROS & LIMA FILHO, 1991). Ela é composta por material sedimentar depositado entre o Plioceno e o Pleistoceno, de arenitos finos a médios avermelhados, até conglomerados e intercalações silticas, argilosas e caulínicas (PIÉRRRI, 2008).

Ressaltando sua relevância, Amaral (2001) delimitou o relevo de Tibau do Sul/RN em duas partes: superfície pré-Barreiras/Infrabarreiras e superfície pós-Barreiras. A primeira está associada às regressões marinhas, que formaram os depósitos de calcário. A segunda superfície está relacionada aos sedimentos presentes na superfície dos tabuleiros, que foram compactados em clima seco a semiárido, com chuvas fortes e constantes. Para Barreto *et al.* (2004), as planícies costeiras foram formadas pelas falésias da Fm. Barreiras, como também por depósitos eólicos, marinhos e planícies de maré em forma de terraços marinhos e paleodunas, além de arenitos holocênicos. Outro fator expressivo, principalmente na área de estudo, é a cimentação ferruginosa das rochas que formam camadas lateríticas, oferecendo maior resistência aos processos abrasivos e possibilitam a configuração do promontório (SILVA, 2019; SEMURBMO, 2020a).

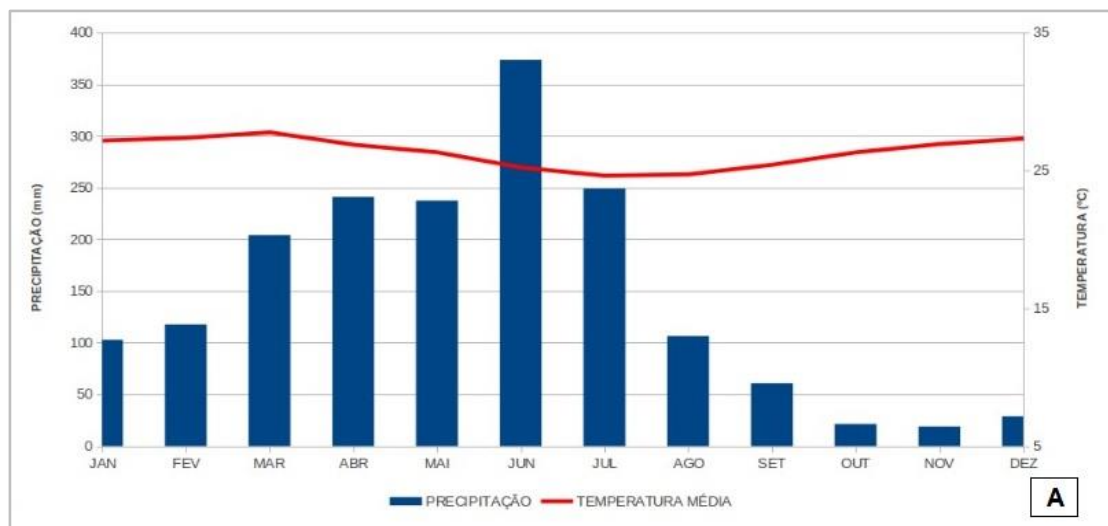
2.3. Agentes Modeladores do Relevo

Existem diversos fatores que corroboram em conjunto para modelar o relevo. Nas regiões costeiras, os principais são: clima, regime de ondas e marés, ventos, correntes marítimas, deriva litorânea, vegetação, drenagem fluvial e pluvial. Os ambientes de falésia ativa são mais susceptíveis em transformar os processos naturais ou induzidos em fenômenos adversos para as faixas litorâneas, devido aos seus recortes abruptos e alta concentração de energia das ondas e marés. Abaixo, serão descritos os agentes presentes na manutenção e alteração do relevo de Tibau do Sul/RN.

2.3.1. Clima

O clima da região de Tibau do Sul foi descrito como tropical quente sub-úmido por Nimer (1989), responsável pelas alterações superficiais que mantêm o equilíbrio dinâmico entre

o relevo e seus processos externos (AMARAL, 2001). Conforme Severo (2005), a temperatura média anual ocorre na faixa dos 25,7°C e a umidade relativa média anual entre 74-80%. Com relação à pluviometria para o distrito de Pipa, os dados da EMPARN (Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte), apurados pelo Projeto Falésias informaram que o período chuvoso ocorre nos meses de março a julho, com média de 296,3 mm e temperatura de 25,2°C, no mês de junho (AMORIM & MAIA, 2021b). A estação seca atinge os meses de outubro a dezembro, com média pluviométrica em 13 mm e temperatura de 26,9°C, em novembro. Na Figura 7A observa-se a média de pluviosidade mensal do período entre 2003 e 2020. Foram também identificados eventos de pluviosidade máxima, somando 163 com precipitação igual a 50mm/dia e 34 com precipitação maior ou igual a 100mm/dia em Pipa/RN (Figura 7B).



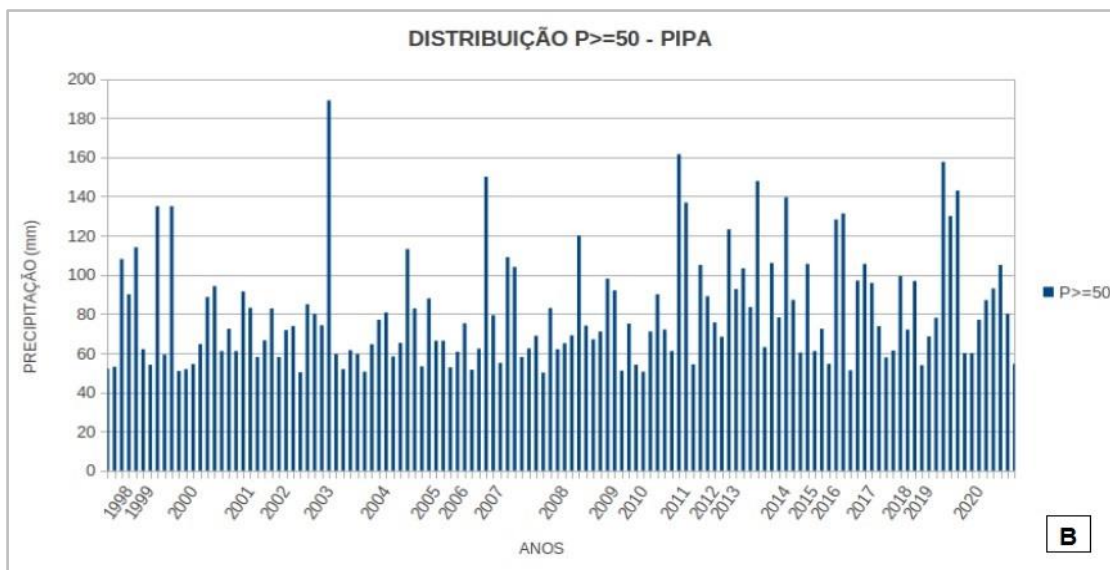


Figura 7: Distribuição da pluviosidade e temperatura de Pipa/RN, ao longo de 2003 e 2020 (A), e os eventos de precipitação máxima, acima ou igual a 50mm/dia, desde 1998 a 2020 (B).

Fonte: Amorim & Maia (2021b).

As chuvas possuem uma correlação importante com as análises de risco, principalmente em seus eventos de máxima precipitação ou precipitações anômalas que influenciam diretamente na estabilidade do talude (AMARAL, 2001). Elas naturalmente promovem o escoamento superficial, infiltração e desagregação das rochas da Formação Barreiras (PIÉRRRI, 2008), representando um importante catalisador dos movimentos de massa comuns na região. Exemplo disto foram os recentes deslizamentos ocorridos em 02/06/2022 na praia de Pipa/RN após excepcional volume de chuva (Figura 8).



Figura 8: Deslizamento de massa ocasionado por chuva intensa em junho/2022, destacado em vermelho.
Fonte: Silva & Marinho Filho (2022).

A Coordenadoria Municipal de Proteção e Defesa Civil (COMPDEC) realizou uma vistoria e identificou a queda de blocos num volume da ordem de 300 m^3 , tendo o INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) classificado a região nordeste neste período em grande perigo de possíveis deslizamentos devido às variáveis climáticas (SILVA & MARINHO FILHO, 2022). Os colaboradores da COMPDEC sinalizaram as áreas e orientaram os funcionários da prefeitura e dos empreendimentos próximos sobre os riscos existentes, além de registrar o evento ocorrido na plataforma do Sistema Integrado de Informações sobre Desastres (S2id). Silva (2022) ressaltou a incidência de maior intensidade das marés na base das falésias como fator atenuante na desintegração das sinalizações existentes (Figura 9).



Figura 9: Demonstração da maré alta alcançando as sinalizações, promovendo desgaste e danos, sendo necessárias constantes vistorias para verificar sua conservação.

Fonte: Silva & Marinho Filho (2022).

2.3.2. Processos Costeiros

Os processos costeiros envolvem os elementos presentes nos sistemas litorâneos que possuem especificidades próprias. A modelagem do litoral norte-rio-grandense possui um controle tectônico evidenciado, com regime climático que fornece ventos e ondas unidirecionais no quadrante sudeste (SE) e transporte litorâneo de sul para norte (DINIZ & DOMINGUEZ, 1999). Eles estão diretamente relacionados à erosão marinha, exposto na área de estudo. Assim, foram reservados para este tópico os seguintes componentes costeiros: ondas, marés, ventos, correntes marítimas e deriva litorânea.

2.3.2.1. Ondas

As ondas atuam no transporte de sedimentos e, conseqüentemente, na abrasão marinha, conferindo importante função no desenvolvimento da zona costeira (DAVIS & FITZGERALD, 2004). De acordo com Davies (1972), a geração das ondas é proveniente do cinturão de ventos alísios que possuem forte influência no litoral do nordeste brasileiro, reconhecido por sua alta frequência de ventos com velocidades acima de 4 m/s. As ondas formadas neste arranjo chegam com mais energia na costa oriental do Rio Grande do Norte, com direção E-SE, altura entre 1-

1,5 metros, com duração de 5 a 7 segundos, ao longo do ano (AMARAL, 2001). Estas ondulações, ao alcançarem as porções mais rasas, são afetadas pelas formas naturais ou estruturas artificiais implementadas pelo homem, alterando a sua direção de propagação e distribuição de energia conforme os efeitos de refração, difração e reflexão (PIÉRRRI, 2008).

2.3.2.2. *Marés*

A classificação de Davies (1972) para as marés em ambientes marinhos com amplitudes médias em 1,5 metros, sendo capazes de alcançar 2,2 metros nas marés de sizígia, configura de micro a meso maré a região de Tibau do Sul/RN. Em conjunto com as ondas representam a “energia oceânica”, atuante no processo erosivo costeiro, principalmente nos períodos de máximas marés que potencializam a ação das ondas, que quebram diretamente no sopé das falésias (AMARAL, 2001; BIRD, 2008).

2.3.2.3. *Correntes Marítimas e Deriva Litorânea*

As correntes costeiras são geradas pela ação dos ventos que circulam pelo Oceano Atlântico, a corrente sul equatorial que flui para o oeste em direção ao litoral brasileiro subdivide-se na corrente Norte do Brasil e corrente do Brasil, para norte e sul respectivamente. Essas correntes atuam na topografia local e dinâmica dos fluidos pois contribuem para formação da deriva litorânea, que durante o ano transporta os sedimentos na direção de sul para norte (COWELL & THOM, 1994; AMARAL, 2001). A onda é outro elemento determinante para geração da deriva litorânea de sedimentos: quando ela quebra na linha de costa, fatores como ângulo de incidência, tamanho da crista, batimetria local e tipo de sedimento influenciam na extensão do transporte (DAVIS & FITZGERALD, 2004). As correntes de retorno podem movimentar sedimentos de praia até porção posterior à zona de arrebentação de ondas, mas apenas quando há a combinação da incidência de ondas paralelas à costa, 0° em relação à praia, e ondas incidentes com ângulo acima de 5°, que produzem correntes contínuas (KOMAR, 1983).

2.3.2.4. *Ventos*

Amaral (2001) utilizou dados da estação climatológica de Natal para inferir a direção dos ventos no litoral oriental do RN, medindo 3,8 e 5,4 m/s oriundos do quadrante SE do cinturão de ventos alísios, apresentando a mesma configuração nos últimos milhares de anos.

Os ventos auxiliam na estabilidade das temperaturas médias anuais para esta região, entre 24°-26°C, como também geram os depósitos eólicos, as correntes costeiras, movimentam as ondas contra o litoral e controlam o deslocamento das chuvas (PIÉRRRI, 2008).

2.3.3. Vegetação

A cobertura vegetal nativa presente no litoral leste do RN foi caracterizada pela Mata Atlântica, mata esparsa em dunas costeiras e pela vegetação dos ecossistemas do entorno, tabuleiro litorâneo e mangue (IDEC, 1994). A Mata Atlântica apresenta grande importância para a região, pois agrupa a cobertura densa nas dunas fixas e a mata ciliar, e seus remanescentes secundários auxiliam na captação e proteção hídrica, além de servirem de abrigo para espécies de fauna e flora endêmicas, como por exemplo a árvore Pau-Brasil e o macaco Saguí (AMARAL, 2001). Segundo Scudelari & Freire (2005), elementos climáticos e costeiros, como ventos, chuvas e temperatura atuam diretamente no comportamento da cobertura vegetal. Dependendo desta configuração, a vegetação pode influenciar favorável ou desfavoravelmente na estabilidade das falésias.

De acordo com Piérri (2008), a presença de vegetação nas escarpas inconsolidadas representa um forte indicador de estabilidade e baixo potencial de risco, protegendo contra ação do vento e retendo sedimentos em períodos chuvosos, reduzindo o processo erosivo. Ela mantém uma participação expressiva na Praia de Pipa/RN, compondo 56,53% da ocupação do solo (AMORIM & MAIA, 2021b). Porém, esta cobertura também consegue mascarar o intemperismo biológico, que acontece no interior da rocha através da dissolução de fraturas, e aumento de carga sobre o material rochoso já instável (OLSEN, 2009).

2.3.4. Drenagens Fluvial e Pluvial

As drenagens no terreno exercem influência na sua morfologia pois participam do processo de erosão e transporte do material sedimentar; essa água “continental” contribui tanto na definição do relevo principalmente da porção superior, como na superfície dos tabuleiros costeiros. Segundo Amaral (2001), a drenagem fluvial da área de estudo está relacionada aos vales dos rios Curimataú, Jacu e Trairi, que correspondem às regiões de baixa declividade entre Natal e Baía Formosa, de sul para norte, respectivamente. O autor ainda definiu que a rede principal de drenagem fluvial ocorre perpendicular à linha de costa, possui vales amplos,

retilíneos, com talvegues de até 4 km de largura e direção SW/NE, que dissecam os tabuleiros. A superfície Pré-Barreiras estaria interligada a esses vales, que posteriormente foram recobertos por sedimentos recentes, indicando que esta rede de drenagem estaria associada às linhas estruturais do embasamento (BEURLIN, 1967).

A drenagem pluvial, por sua vez, é proveniente dos processos de dinâmica externa da Terra, ou seja, das chuvas. De acordo com Severo (2005), eventos de precipitações pluviométricas de grande intensidade são os principais responsáveis pelo processo de instabilidade em falésias, pois a saturação no solo é mais eficiente na desagregação das rochas do que a incisão basal gerada pelas ondas. Além disso, a ação da água superficial, em conjunto das intervenções antrópicas no meio, intensifica localmente o poder erosivo das chuvas, podendo resultar em catástrofes geológicas, ambientais e naturais (FERNANDES & FONSECA, 2015). Em Tibau do Sul/RN, já existem problemas relacionados ao sistema de drenagem das águas superficiais em imóveis no topo da encosta, apontados pelo Laudo de Inspeção da SEMURBMO (2020b). Ambas as drenagens, fluvial e pluvial, induzem a erosão devido ao aumento de energia quando o corpo aquoso atinge a declividade abrupta dos taludes, provocando sulcos, ravinamentos e voçorocas nos “chapadões” (PIÉRRRI, 2008).

2.3. Erosão

Os agentes modeladores do relevo interagem em conjunto no ambiente complexo e dinâmico costeiro e, conseqüentemente, desenvolvem fortes processos de erosão. Vital *et al.* (2006) definiram os fatores e causas da erosão no Rio Grande do Norte em: dinâmica da circulação litorânea, evolução holocênica da planície costeira, suprimento sedimentar ineficiente, fatores tectônicos e construção de estruturas de concreto perpendiculares à linha de costa. Segundo Dominguez & Bittencourt (1996), os registros erosivos evidenciados no litoral leste do RN possuem origem principal na redução do aporte fluvial de sedimentos, devido ao pequeno tamanho das bacias fluviais regionais e à formação de campos dunares, que retém os sedimentos no continente. Já em escala local, Piérri (2008) elencou os principais agentes erosivos das falésias de Tibau do Sul/RN como as erosões pluviais e marinhas. Os fatores oceanográficos representados pela ação das ondas, amplitude das marés, velocidade e direção dos ventos, desestabilizam as encostas pela corrosão da sua base (POULTON *et al.*, 2006), bem como os fatores meteorológicos promovem o recuo através do intemperismo físico, químico e

biológico, e a sua velocidade depende do volume e concentração da precipitação pluviométrica e o tipo de sedimentos carregados pela drenagem superficial (SEVERO, 2005).

As baías em forma de zeta (ζ), expressiva característica do litoral da área de estudo, garantem esta morfologia através dos padrões de difração e refração das ondas, erosão diferencial dos sedimentos da Formação Barreiras e origem associada à atividade tectônica (DINIZ, 1998). Esses “embaixamentos” resultam num litoral cheio de pontas, denominadas de promontórios, que amparam o maior impacto da energia das ondas em sua porção mais côncava e, conseqüentemente, é a região mais erosiva observada na Figura 10 (AMARAL, 2001). Apesar desse padrão erosivo, existem elementos que dissipam a força da onda e diminuem a erosão na base das falésias mantendo o equilíbrio na natureza, são eles: extensa faixa de praia arenosa, bermas, blocos de lateritas, arenitos com cimentação ferruginosa, *beachrocks* e material colapsado de deslizamentos recentes. Segundo Amorim & Maia (2021b), os principais fatores que definem o grau de erodibilidade do talude ou sua fonte dominante (abrasão marinha ou processos superficiais) são os graus de laterização, diagênese e fraturamento do substrato rochoso.



Figura 10: Dinâmica costeira na Praia do Madeiro em Pipa/RN, demonstrando a influência dos processos erosivos em sua morfologia. As ondas alcançam com maior intensidade a região sem proteção natural.
Fonte: Projeto Falésias (AMORIM & MAIA, 2021b).

A morfodinâmica praial contribui para compreensão dos momentos erosivos relacionados à abrasão marinha de maior intensidade. O recuo da base é gerado pela escavação das ondas no sopé das falésias, que geram incisões basais e pontos de instabilidade e, posteriormente, desestabilizam as porções média e superior em forma de queda de blocos ou tombamentos (Figura 11). Os blocos são vulneráveis a deslizamentos por qualquer alteração no material das falésias, seja por ações antrópicas ou processos de desagregação naturais desencadeados pela erosão pluvial (PIÉRRRI, 2008). O material mais friável é incorporado à dinâmica costeira e transportado pela deriva litorânea, diferentemente do que acontece com os blocos mais resistentes que, permanecem no local da queda e absorvem parte da energia das ondas contra a base das encostas (SILVA, 2019). A combinação da progressão da incisão basal com esforços de tração acima dela acarreta um aumento na inclinação da falésia e na sua instabilidade, principalmente em períodos de chuva (SILVA *et al.*, 2016; TAQUEZ, 2017).

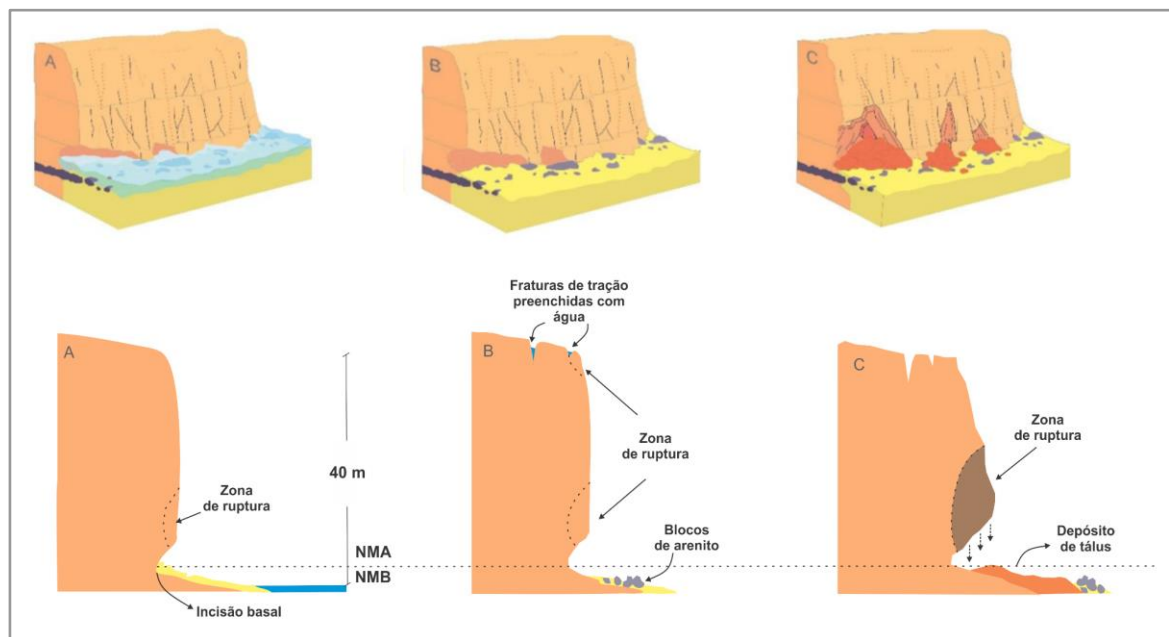


Figura 11: Dinâmica costeira e processos erosivos que acarretam em: incisão basal (A), queda de blocos (B) e formação de depósito de tálus após colapso de material (C). (NMA = Nível de Maré Alta; NMB = Nível de Maré Baixa). Fonte: Adaptado de Silva (2019) e Amorim &Maia (2021b).

Na praia do centro de Pipa/RN foi observada uma dinâmica intensa de deposição, erosão/progradação e erosão da linha da costa entre os meses de fevereiro/outubro de 2021 e fevereiro de 2022, obtendo uma diferença de 3 metros (AMORIM & MAIA, 2021b; AMORIM & MAIA, 2022). Isso significa que no período onde há menos areia, a praia está mais erosiva, a ação das ondas age diretamente na base da escarpa com abrasão mais violenta, visto que ela não é erodida ao longo de todo o ano, apresentando picos de maior erosão. O monitoramento

reforçou a ciclicidade entre os períodos de sedimentação e erosão ao longo do ano, apresentando balanço sedimentar negativo na maioria dos perfis analisados (Tabela 1).

Tabela 1: Monitoramento do balanço sedimentar (m3) da Praia de Pipa/RN.

Mês	P1	P2	P3	P4	P5	P6
fev/21	18.04	81.75	62.06	109.20	138.82	96.76
mar/21	*	*	*	*	*	*
abr/21	17.00	51.83	65.00	114.12	80.22	59.76
mai/21	24.06	53.50	94.74	118.45	90.79	55.62
jun/21	18.79	37.98	82.70	116.06	88.68	66.40
jul/21	*	*	*	*	*	*
ago/21	42.63	62.61	81.69	84.00	111.86	69.25
set/21	53.35	58.70	78.59	32.56	79.38	91.14
out/21	97.20	32.83	51.41	36.55	111.97	92.85
nov/21	*	*	*	*	*	*
dez/21	*	*	*	*	*	*
jan/22	*	*	*	*	*	*
fev/22	53.14	63.05	58.13	32.67	125.56	111.41
Balanço Sedimentar	35.10	-18.71	-3.93	-76.52	-13.26	14.64

Fonte: Amorim & Maia (2022). *Dados descartados por falha na inicialização do GNSS.

Como pôde ser observado, a erosão é um fenômeno natural oriundo de diversas fontes diferentes, mas pode ser intensificada por meio do desequilíbrio causado pela interferência humana. Fernandes & Fonseca (2015) afirmam que as mudanças antrópicas geradas no uso e ocupação do solo, especialmente o desmatamento para ocupação de encostas, acentuam a ação erosiva das águas superficiais e subterrâneas. Isto resulta em deslizamentos ou movimentação de terra associados ao desmoronamento de moradias, interdição/desabamento de estradas, formação de cicatrizes no terreno (voçorocamentos) e ruptura de tubulações de esgotos e águas pluviais.

Essa conjuntura, aliada à previsão de mudanças climáticas é ainda mais grave, com elevações dos níveis do mar em função do aumento do derretimento das calotas polares e da expansão térmica dos oceanos. No RN, os modelos gerados pelo IPCC (Grupo Intergovernamental de Mudanças Climáticas) indicam uma elevação do nível do mar de 0,69 metros até 2100, observado na Figura 12 (IPCC, 2022). Atualmente, ação das marés de sizígia já expressam grande impacto na região, pois cerca de 60% de todo litoral do RN apresenta um comportamento erosivo, intensificado nos últimos 20 anos e agravando o risco das ocupações no topo da falésia (VITAL *et al.*, 2018).

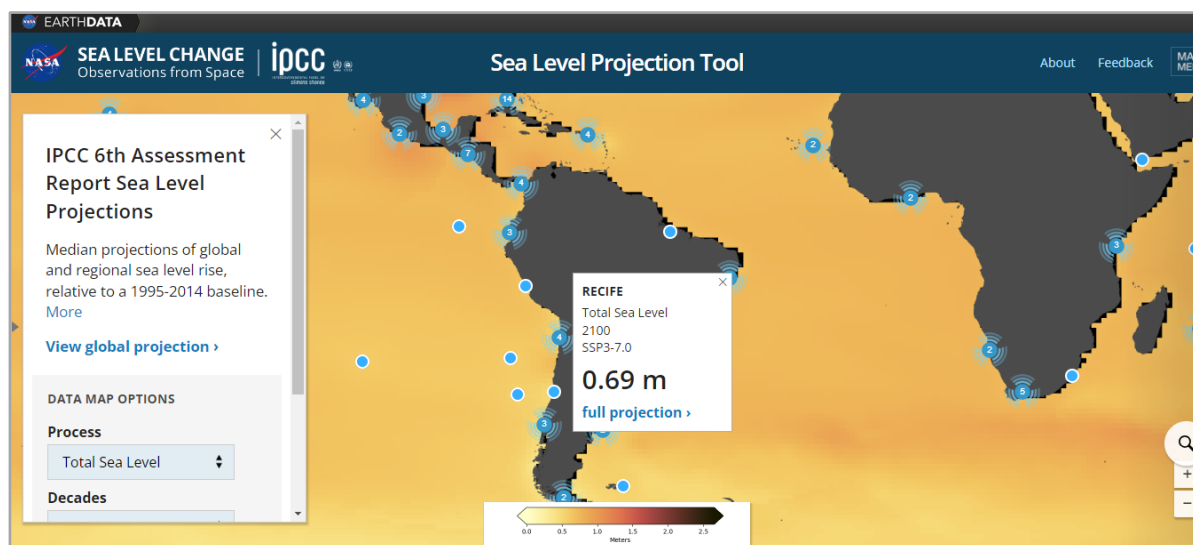


Figura 12: Ponto de referência da área de estudo para projeções de elevação do nível do mar realizadas pelo IPCC (Acessado pela ferramenta *Sea Level Projection Tool* em 23/07/2022).
Fonte: IPCC (2022).

2.4. Propriedades Geotécnicas

As propriedades geotécnicas interferem na estabilidade do talude, principalmente em locais com falésias, como é o caso de Tibau do Sul/RN. Elas envolvem características de coesão, permeabilidade, resistência à compressão e cisalhamento, peso específico e susceptibilidade aos movimentos de massa de um corpo rochoso. Os movimentos de massa consistem no deslocamento descendente e gravitacional dos materiais decompostos de regiões íngremes em direção à porção mais baixa, potencializados pela presença de água que reduz a resistência dos materiais e promove um comportamento plástico e fluido (BROLLO; TOMINAGA, 2012). No Brasil, eles comumente ocorrem sob forma de deslizamentos planar e rotacional, fluxo de detritos e queda de blocos, podendo ocorrer mais de um tipo no mesmo local (AUGUSTO FILHO, 1992; HIGHLAND; BOBROWSKY, 2008).

Os deslizamentos em geral atingem médias a altas velocidades e mobilizam grande volume de material, sendo o planar desenvolvido em ou após episódios de chuva no solo pouco desenvolvido (Figura 13A). Já o rotacional é oriundo de movimentos contínuos em superfícies de ruptura curvas com concavidade para cima, observada na Figura 13B (TOMINAGA, 2012b). Os deslocamentos de massas fluidas de alta viscosidade e energia provocados por intensos eventos de chuva é denominado fluxo de detritos, pois carrega todo material que encontra em seu longo percurso, seja solo, rocha, vegetação, água ou detritos de origem antrópica, verificada na Figura 13C (AUGUSTO FILHO, 1992; TOMINAGA, 2012a). Por fim, a queda de blocos é

caracterizada pelo desabamento de blocos desagregados do maciço em regiões inclinadas por queda livre, saltação ou rolamento (Figura 13D), considerados um dos principais agentes de danos e fatalidades em zonas habitadas pelo homem (YILMAZ, YILDRIM & KESKIN, 2008; RIBEIRO, 2013).

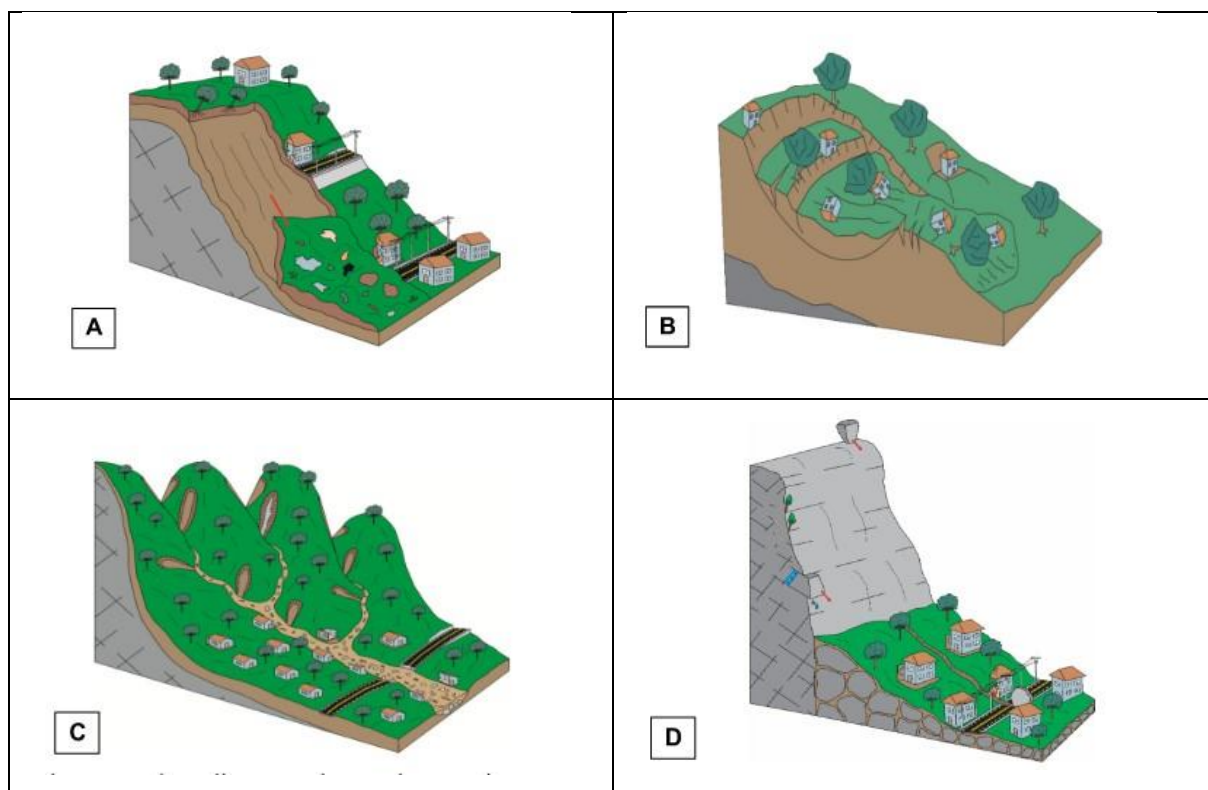


Figura 13: Bloco-diagramas dos movimentos de massa mais comuns no Brasil, sendo (A) deslizamento planar, (B) deslizamento rotacional, (C) fluxo de detritos e (D) queda de blocos.

Fonte: Projeto GIDES (2018).

Conforme Santos Jr. & Nóbrega (2000), é frequente a ocorrência de movimentos de massa complexos, ou seja, mais de um ao mesmo tempo no litoral do RN. Entretanto, os principais movimentos que ocorrem em falésias são as quedas de blocos dos sedimentos da Formação Barreiras, responsáveis pelo acúmulo de material em seus sopés, denominado depósito de tálus (SANTOS JR. et al., 2006). As falésias sofrem influências erosivas marinhas e continentais, mas, nas porções onde o mar não as alcança, essas encostas apresentam inclinações mais suaves, em torno de 40° a 60°, destacando a ação das águas pluviais como principal mecanismo deflagrador de quedas de blocos, deslizamentos e tombamentos em episódios de fortes chuvas (Figura 14).

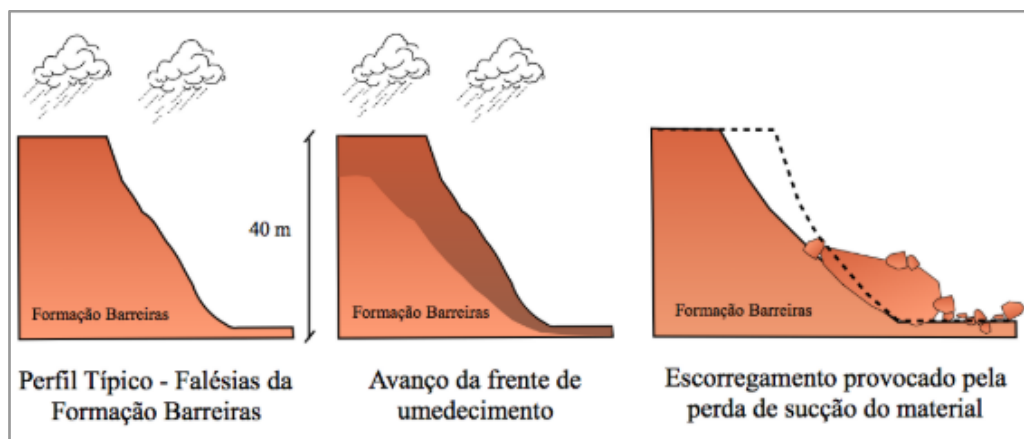


Figura 14: Dinâmica da queda de material da Formação Barreiras com a associação dos eventos de chuvas intensas e os movimentos de massa, e subsequente formação do depósito de talus.
Fonte: Silva (2019).

Severo (2005) afirma que a saturação dos solos é mais eficiente na desestabilização das falésias do que a incisão basal provocada pelas ondas do mar, após análises de ensaios com sedimentos da Formação Barreiras e associação da erosão pluvial com os eventos de movimentos de massa. A infiltração e escoamento superficial das águas pluviais no terreno elevam o grau de saturação do material, como também as poro-pressões na superfície potencial de ruptura e, consequentemente, diminuem a coesão do solo e a resistência ao cisalhamento (AMARAL, 2001; SANTOS JR. *et al.*, 2011; TAQUEZ, 2017). Nesse contexto, o fator de segurança diminui com o aumento da frente de umedecimento.

De acordo com Terzaghi (1950), as fontes de instabilização das encostas podem ser externas ou internas, sendo elas: o aumento das tensões cisalhantes sobre a superfície de ruptura (externa) ou a perda de resistência do material que constitui o talude (interna). Por este motivo, é importante também observar as feições erosivas no topo das falésias, como sulcos, ravinas ou voçorocas formadas pela erosão pluvial, principalmente em locais destituídos de cobertura vegetal (SILVA, 2019). Taquez *et al.* (2016) e Taquez (2017) enfatizam o caráter potencializador das fendas de tração e fraturas preenchidas por água pluvial no processo de movimentos de massa e queda de blocos.

O somatório desses mecanismos erosivos pode gerar aceleração ou retardamento do recuo da falésia. Os componentes citados anteriormente claramente estimulam esse recuo, mas a formação do acúmulo de detritos e a presença de arenitos com cimentação ferruginosa protegem o sopé e aliviam estas pressões (AMARAL *et al.*, 1997). A Figura 15 representa a evolução da taxa de retração costeira através da ação conjunta dos componentes erosivos, continental ou marinho, que sofre alteração na sua dinâmica natural com a presença da

ocupação antrópica. Além de induzir o aumento das tensões cisalhantes, sobrecarga do maciço e rupturas no talude, as construções adjacentes e estradas de acesso próximas à crista da falésia apresentam graus de risco e perigo elevados.

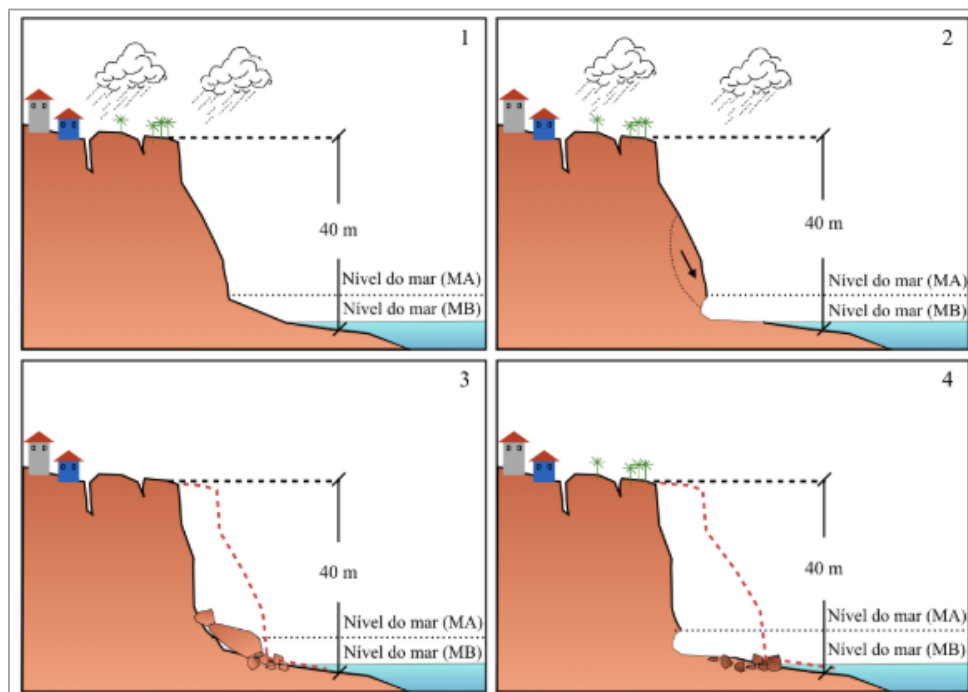


Figura 15: Evolução dos processos erosivos continentais e marinhos exercidos sobre a falésia que culminam na sua desestabilização. Fonte: Amaral et al. (1997) e Silva (2019).

De acordo com o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 1991) os critérios utilizados para caracterizar a instabilidade são: relevo, propriedades geológico-geotécnicas do terreno, vegetação, clima, profundidade do lençol freático e intervenção humana. A classificação morfológica foi produzida por Santos Jr. *et al.* (2005) em areia argilosa e argila de baixa compressão, onde a porção superior da falésia de Tibau do Sul é composta por areia argilosa pouco coesa com presença de óxido de ferro, enquanto na região inferior está presente uma argila esbranquiçada, mais rígida e com pontos de óxidos de ferro. Ao entrar em contato com a água, essa porção basal se liquefaz e o material é carregado em direção ao mar. Severo (2005) identificou os solos da Fm. Barreiras como de baixa permeabilidade e impermeáveis/drenagem impedida. Em relação à cimentação, o material do topo das falésias de Tibau do Sul e Barreira do Inferno apresentam segmentos moderadamente cimentado e fortemente cimentados, à medida que na base as rochas encontram-se fortemente cimentadas (COLLINS & SITAR, 2009). Conforme Silva (2019), as probabilidades de ruptura intensificam-se com a evolução da frente de umedecimento no topo da falésia, podendo variar de 42% a 99%.

O intemperismo biológico foi abordado no tópico anterior, mas vale reforçar que a presença de vegetação pode contribuir para desestabilizar a encosta, além de indicar a proximidade do lençol freático. Como exemplos de ação prejudicial da vegetação, citam-se: ao adicionar peso no substrato, a vegetação pode gerar tensões de 2,5 kPa a 5 kPa no substrato; ao desenvolver-se em fendas/fraturas, podem romper sedimentos fracos; o conteúdo de serrapilheira na superfície (matéria orgânica) aumenta a acidez da água, elevando o potencial de solubilidade dos argilominerais; e promover um caminho preferencial de infiltração da água, acelerando a poro-pressão no solo (DIAS & NEAL, 1992; BIRD, 2008; OLSEN, 2009; CARMIGNANI & FIORI, 2009; AMORIM & MAIA, 2021b). O poder público carece de recursos, dados e ferramentas para avaliar os processos erosivos complexos (OLSEN, 2009). A partir de pesquisas, projetos e monitoramento contínuo que identifiquem os processos de retração e manutenção da estabilidade do talude, permitirá o fornecimento de orientações para o gerenciamento urbano e costeiro, como também minimizar os cenários de risco (SANTOS JR. *et al.*, 2011; ALMEIDA JR., 2017).

A delimitação dos critérios de perigo, risco e vulnerabilidade estão intimamente ligados aos processos de movimentos de massa e à presença de imóveis na orla da Praia de Pipa. O perigo é caracterizado como uma condição ou fenômeno geológico negativo num certo período de tempo, que apresenta potencial de gerar danos materiais, ambientais e vitais (TOMINAGA *et al.*, 2004). Não existe risco sem perigo, entretanto, o risco envolve a possibilidade de ocorrência de tais processos ou eventos e a classificação de suas magnitudes, causando prejuízos socioeconômicos a um grupo ou comunidade (BRASIL, 2007). A vulnerabilidade abrange agentes físicos, econômicos, sociais e ambientais que podem intensificar a susceptibilidade de eventos perigosos para uma população (ONU, 2004).

O risco equivale à conjunção dos fatores de perigo e vulnerabilidade associados ao dano potencial (TOMINAGA, 2012). A metodologia para análise desses elementos baseia-se no “*Manual de Mapeamento de Perigo e Risco a Movimentos Gravitacionais de Massa*” do Projeto GIDES (2018), onde a qualificação do perigo é determinada pela presença dos índices de instabilidade (trincas, árvores inclinadas, saturação do solo, subsidência e cicatrizes de deslizamentos) e a ocorrência deles (ausente, presente ou marcante) nas áreas crítica e de dispersão. Ademais, sua classificação segue o Quadro 1, iniciando em P1 até o perigo máximo ou muito alto (P4). Como exemplo proposto para compreender a delimitação do perigo a Figura 16 mostra este método para o deslizamento planar.

Quadro 1: Classificação dos níveis de Perigo.

PERIGO	APE	APC	Descrição
P1	AD	P1d	São atendidas as condições topográficas e/ou aos critérios de delimitação atingimento dos movimentos gravitacionais de massa. Entende-se que a energia potencial do movimento ocorra dispersa na área delimitada. O terreno não deve apresentar feições de instabilidades, entretanto casos raros podem ocorrer, de acordo com o tipo de movimento de massa. Não se espera registros de geração ou depósitos de movimentos gravitacionais pretéritos na área delimitada, entretanto casos raros podem ocorrer. Mantidas as condições existentes no terreno é baixa a possibilidade de deposição do material transportado e/ou ocorrência de movimentos gravitacionais de massa, no período compreendido por uma estação chuvosa normal.
P2	AC	P2c	Atende a todas as condições topográficas e/ou aos critérios de geração dos movimentos gravitacionais de massa. Entende-se que a energia potencial do movimento ocorra concentrada na área de atingimento. Não é comum o terreno apresentar feições de instabilidades, mas podem ocorrer casos isolados, de acordo com o tipo de movimento de massa. Não se espera registros de geração ou depósitos de movimentos gravitacionais pretéritos na área delimitada, mas podem ocorrer casos isolados. Mantidas as condições existentes no terreno é moderada a possibilidade de ocorrência de movimentos gravitacionais de massa e/ou deposição do material transportado, no período compreendido por uma estação chuvosa normal.
	AD	P2d	São atendidas as condições topográficas e/ou aos critérios de delimitação atingimento dos movimentos gravitacionais de massa. Entende-se que a energia potencial do movimento ocorra dispersa na área delimitada. Não é comum o terreno apresentar feições de instabilidades, mas podem ocorrer casos isolados, de acordo com o tipo de movimento de massa. Não se espera registros de geração ou depósitos de movimentos gravitacionais pretéritos na área delimitada, mas podem ocorrer casos isolados. Mantidas as condições existentes no terreno é moderada a possibilidade de deposição do material transportado e/ou ocorrência de movimentos gravitacionais de massa, no período compreendido por uma estação chuvosa normal.
P3	AC	P3c	Atende a todas as condições topográficas e/ou aos critérios de geração dos movimentos gravitacionais de massa. Entende-se que a energia potencial do movimento ocorra concentrada na área de atingimento. O terreno pode apresentar feições de instabilidades evidentes de acordo com o tipo de movimento de massa. Podem ocorrer registros de geração ou depósitos de movimentos gravitacionais pretéritos na área delimitada. Mantidas as condições existentes no terreno é alta a possibilidade de ocorrência de movimentos gravitacionais de massa e/ou deposição do material transportado, no período compreendido por uma estação chuvosa normal.
	AD	P3d	São atendidas as condições topográficas e/ou aos critérios de delimitação atingimento dos movimentos gravitacionais de massa. Entende-se que a energia potencial do movimento ocorra dispersa na área delimitada. O terreno pode apresentar feições de instabilidades evidentes de acordo com o tipo de movimento de massa. Podem ocorrer registros de geração ou depósitos de movimentos gravitacionais pretéritos na área delimitada. Mantidas as condições existentes no terreno é alta a possibilidade de deposição do material transportado e/ou ocorrência de movimentos gravitacionais de massa, no período compreendido por uma estação chuvosa normal.
P4	AC	P4c	Atende a todas as condições topográficas e/ou aos critérios de geração dos movimentos gravitacionais de massa. Entende-se que a energia potencial do movimento ocorra concentrada na área de atingimento. O terreno pode apresentar feições de instabilidades marcantes de acordo com o tipo de movimento de massa. É comum registros de geração ou depósitos de movimentos gravitacionais pretéritos na área delimitada. Mantidas as condições existentes no terreno é muito alta a possibilidade de ocorrência de movimentos gravitacionais de massa e/ou deposição do material transportado, no período compreendido por uma estação chuvosa normal.

Fonte: Projeto GIDES (2018).

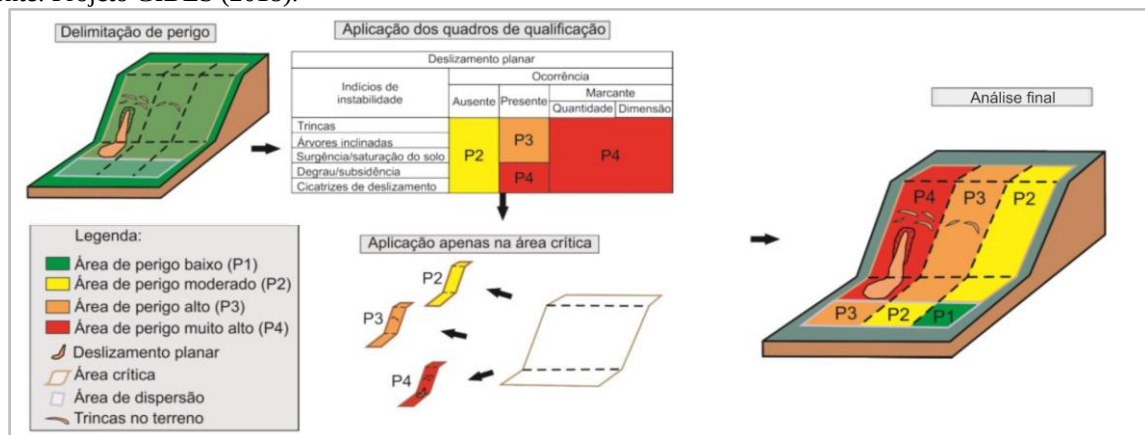


Figura 16: Processo de análise e delimitação de perigo para um caso de deslizamento planar.

Fonte: Modificado do Projeto GIDES (2018).

O grau de vulnerabilidade analisa o impacto dos perigos nas edificações, levando em consideração o tipo de material que foi utilizado e visualização de danos estruturais aparentes, marcantes ou ausentes, classificados conforme Figura 17. Os proprietários dos imóveis devem apresentar ao poder público municipal laudos que comprovem a resistência da construção mediante os movimentos de massa identificados na região, pois esta documentação também participa dos critérios de avaliação de vulnerabilidade (Figura 17B).

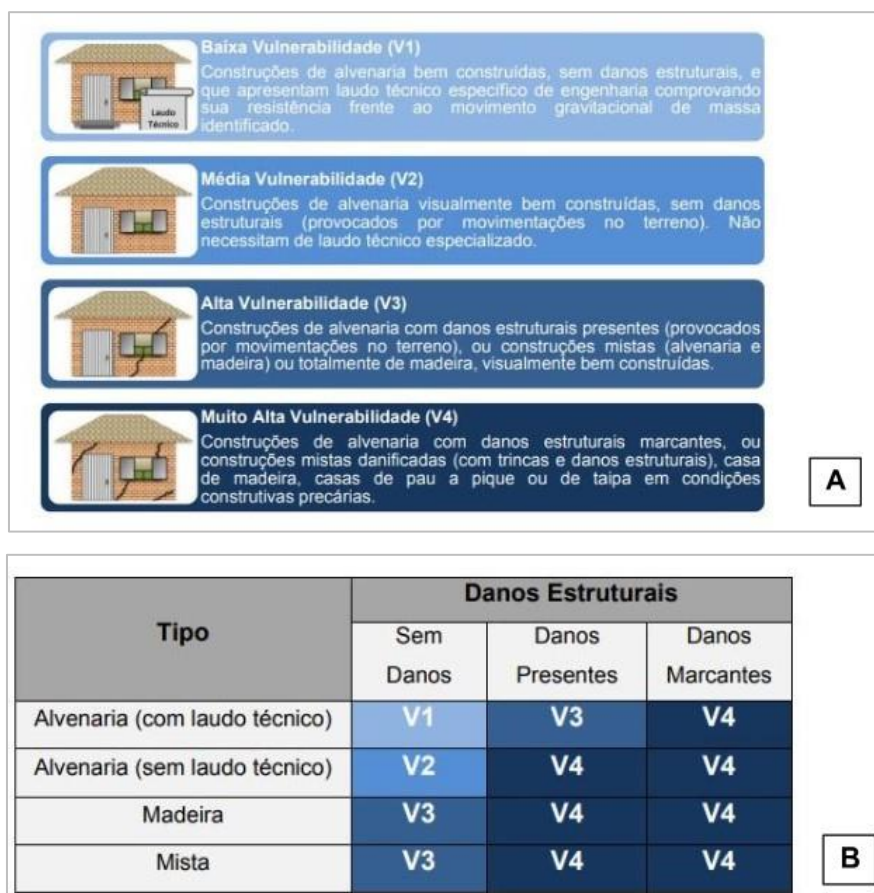


Figura 17: Critérios de avaliação de vulnerabilidade em imóveis abrangendo sua classificação (A), conforme tipo de material, presença de danos e informação de laudo técnico (B).

Fonte: Projeto GIDES (2018).

A zona de risco é avaliada por meio do Quadro 2, que identifica o histórico de ocorrências, tipos de movimentos gravitacionais de massa atuantes, delimitação estimada do alcance dos eventos, reconhecimento das feições de instabilidade e a resistência das construções (BRASIL, 2007). A qualificação do risco ocorre após a posse dos dados de perigo e vulnerabilidade, correlacionados entre vulnerabilidade das construções (V) e índice de perigo local (P), observada no Quadro 3. Amorim & Maia (2022) qualificaram os riscos na Praia de Pipa em: ocorrência de movimento de massa gerando o desabamento de construções e ferimentos ou morte de pessoas na borda da escarpa, dano à infraestrutura pela erosão pluvial

ou marinha, queda de pessoas e veículos do topo da falésia e redução da atividade turística local.

Quadro 2: Classificação dos índices de Risco.

Risco	Descrição
Baixo (R1)	Ausência de indícios de instabilidade no terreno; alto nível de resistência das construções. Mantidas as condições médias de chuvas para o local, é baixa a possibilidade de destruição das construções por movimento gravitacional de massa.
Moderado (R2)	Há indícios pouco claros de instabilidade no terreno; alto a moderado nível de resistência das construções. Mantidas as condições médias de chuvas para o local, é moderada a possibilidade de destruição das construções por movimento gravitacional de massa.
Alto (R3)	Indícios claros de instabilidade no terreno; baixo a moderado nível de resistência das construções. Mantidas as condições médias de chuvas para o local, é alta a possibilidade de destruição das construções por movimento gravitacional de massa.
Muito Alto (R4)	Presença marcante de indícios de instabilidade no terreno; baixo nível de resistência das construções. Mantidas as condições médias de chuvas para o local, é muito alta a possibilidade de destruição das construções por movimento gravitacional de massa.

Fonte: Projeto GIDES (2018).

Quadro 3: Matriz da análise de risco associando índice de perigo (eixo y) e graus de vulnerabilidade de construções (eixo x).

Análise de Risco			Vulnerabilidade			
			V1	V2	V3	V4
Análise de Perigo APE [AC/AD] + APC [P1-P4]	P4	P4c	R4	R4	R4	R4
	P3	P3c	R3	R4	R4	R4
		P3d	R3	R4	R4	R4
	P2	P2c	R2	R3	R4	R4
		P2d	R2	R3	R4	R4
	P1	P1d	R1	R2	R3	R4

Fonte: Projeto GIDES (2018).

Após a fatalidade que ocorreu em novembro de 2020, a Secretaria de Meio Ambiente e Mobilidade Urbana do Município de Tibau do Sul (SEMURBMO/PMTS) produziu dois relatórios voltados para este tema, seguindo a metodologia exposta acima: “Análise do Cenário de Risco da Costa do Município de Tibau Do Sul/RN - Trecho I” (2020a) e “Laudo de Inspeção com Emissão de Parecer Técnico” (2020b). O trecho da borda de falésia analisado foi

faixa de proteção. Ambos os relatórios apontaram recomendações para reorganização da drenagem das águas pluviais e projetos amplos para reduzir os impactos dela na erosão da encosta.



Figura 19: Vistoria de 10 imóveis na área de risco da Praia de Pipa, dentre os quais, quatro apresentam risco crítico e iminência de deslizamentos, destacados pelas setas em branco.

Fonte: MEMURBMO (2020b).

A proposta de dividir a região em áreas de instabilidade, risco ou segurança contém o objetivo de fornecer amparo para órgãos de fiscalização e a comunidade que habita o topo da falésia. Conforme o laudo, os critérios aferidos para esta delimitação incluem a erosão basal marítima, drenagem urbana e particular dos imóveis, assim como a influência da força vertical aplicada pelo peso dos imóveis sobre a borda do talude. Todos esses fatores contribuem negativamente para a ruptura e, por conseguinte, a queda de blocos ou tombamentos.

Então, foi definida a Linha de Limite Único (LLU) em torno de 2 metros que seria a porção mais profunda da incisão da base da falésia traçada em superfície, servindo de ponto de partida para as demais marcações (Figura 20). Em seguida, da LLU até 3 metros está a área de instabilidade, onde não pode haver nenhum tipo de uso/ocupação por ser uma área diretamente afetada por qualquer tipo de movimento de massa na encosta. A área de risco é alocada logo após a de instabilidade mais 7 metros, totalizando 10 metros da LLU, que não é diretamente

afetada pelo movimento de massa, mas não é passível de construção. Por fim, a zona de segurança ou “Linha de Vida” está disposta atrás dos 10 metros da LLU (SEVERO, 2005; SEMURBMO, 2020b). É importante destacar que essas linhas são dinâmicas, ou seja, se houver queda de blocos e a erosão invadir mais para o continente, um novo ponto deverá ser projetado na superfície como nova LLU e, por esta razão, as outras demarcações serão deslocadas.

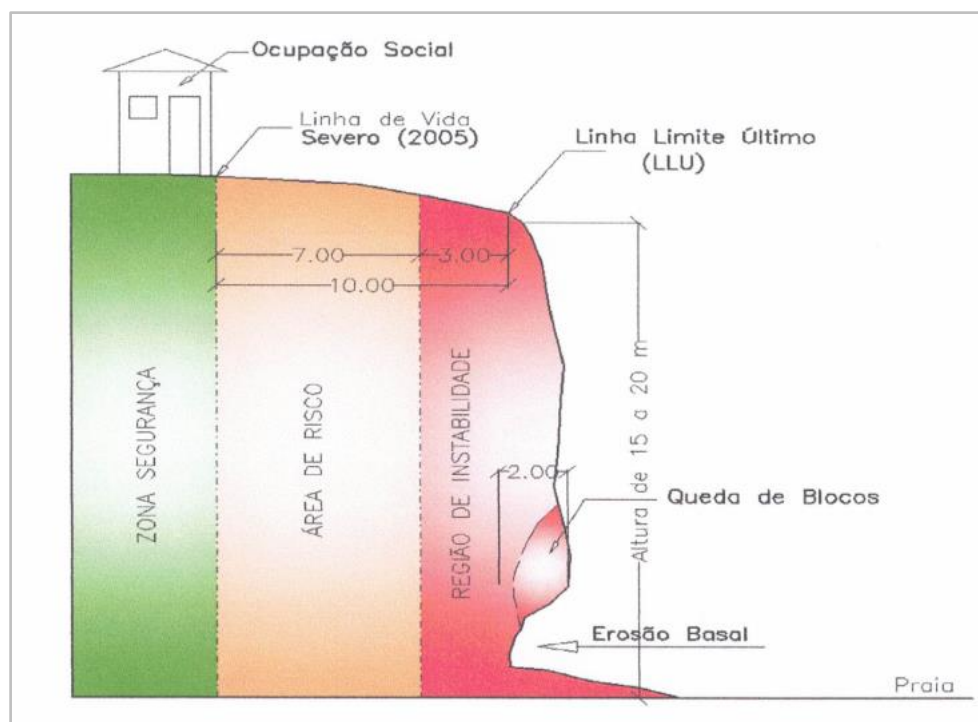


Figura 20: Perfil esquemático sem escala da delimitação das áreas de instabilidade, risco e segurança.
Fonte: SEMURBMO (2020b).

Amorim & Maia (2021b) destacaram as feições erosivas na face da falésia como um retrato da instabilidade da Praia de Pipa/RN. A presença de cicatriz de colapso/colúvio (Figura 21A), fraturas e blocos recém colapsados estabelecem uma dinâmica perigosa para os visitantes da região (Figura 21B). Inclusive houve queda de blocos após intensa chuva em junho/2022, sem vítimas ou feridos, exposto no tópico 2.3.1 deste capítulo. A análise das fraturas no local do acidente mencionado demonstra que a densidade do fraturamento contribuiu para o deslizamento fatídico, como pode ser observado no modelo 3D produzido pelo Projeto Falésias (Figura 22), o qual mostra que a evolução dos sets de fraturas obteve forte contribuição dos eventos de chuva. Apesar de não haver dados pluviométricos do posto TELEPLU/TIBAU DO SUL no período do acidente, existem registros de leve chuvisco (0,2-1,8 mm) nos dias 16 e 17 de novembro de 2020, nos municípios adjacentes, visto que esse mês é considerado de seca (EMPARN, 2022). Isto pode indicar que outros fatores desencadearam o movimento de massa.

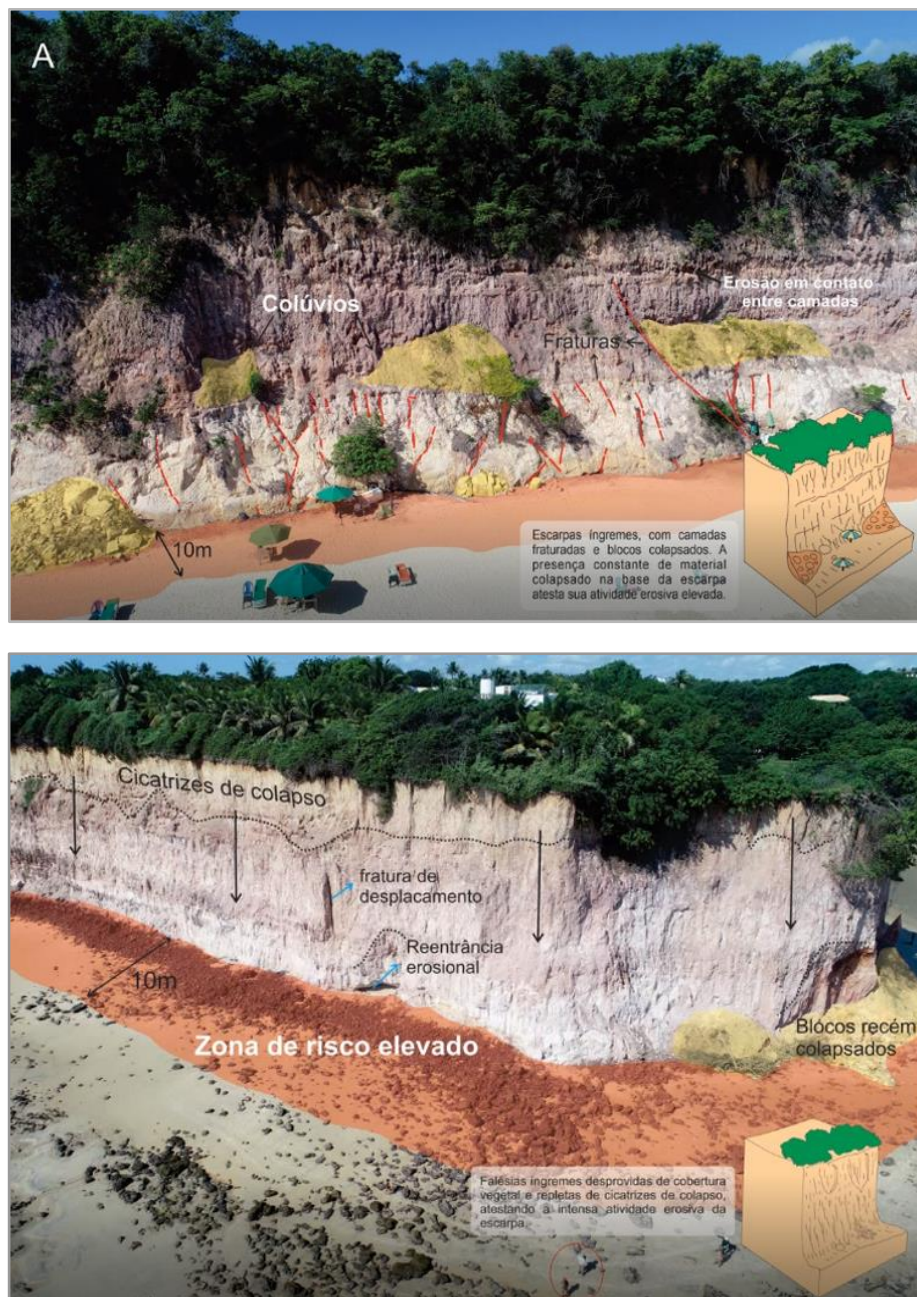


Figura 21: (A) Escarpas íngremes com camadas fraturadas e blocos colapsados, a presença do material na base demonstra atividade erosiva intensa. (B) Falésias íngremes repletas de cicatrizes de colapso, fraturas, reentrância erosional basal e blocos recém colapsados indicam constantes deslizamentos. Destacada em vermelho, tem-se grave presença de transeuntes próximos à zona de risco. Fonte: Amorim & Maia (2021b).

Quadro 4: Conjunto de Legislações que abrangem a região de Tibau do Sul.

Normas	Funções
Lei Federal nº 6.766 de 19 de dezembro de 1979	Dispõe sobre o Parcelamento do Solo Urbano e dá outras providências.
Lei Federal nº 12.608 de 10 de abril de 2012	Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil - PNPDEC, dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil - CONPDEC, autoriza a criação de sistema de informações e monitoramento de desastres e dá outras providências.
Novo Código Florestal: Lei Federal nº 12.651 de 25 de maio de 2012	Estabelece normas gerais sobre a proteção da vegetação, áreas de Preservação Permanente e áreas de Reserva Legal.
Resolução CONAMA nº 369 de 28 de março de 2006	Dispõe sobre os casos excepcionais de utilidade pública, interesse social ou baixo impacto ambiental, que possibilitam a intervenção ou supressão de vegetação em Área de Preservação Permanente (APP).
Resolução CONAMA nº 303 de 20 de março de 2002	Dispõe sobre parâmetros, definições e limites de Área de Preservação Permanente.
Lei Estadual (RN) nº 7.871 de 2000	Dispõe sobre o Zoneamento Ecológico-Econômico do Litoral Oriental do Rio Grande do Norte e dá outras providências.
Decreto nº 14.369 de 22 de março de 1999	Cria a Área de Proteção Ambiental (APA) Bonfim/Guaraira.
Lei Complementar nº 06 de 30 de dezembro de 2008	Dispõe sobre o Plano Diretor de Tibau do Sul e dá outras providências.
Código de Meio Ambiente de Tibau do Sul: Lei Municipal nº 383 de 31 de dezembro de 2008	Dispõe sobre a Política Municipal de Meio Ambiente e o Código de Meio Ambiente do Município de Tibau do Sul e cria o Sistema Municipal de Meio Ambiente.
*A Constituição Federal de 1988 serve de base para todas as normas.	

Fonte: Dantas (2021).

A instalação de empreendimentos e residências no topo da falésia imprimem forte pressão de uso, visto que são consideradas áreas impróprias para ocupação em consequência da alta velocidade do recuo da encosta, promovido pelos processos erosivos marinho e pluvial (AMARAL, 1999; 2001). Os danos não são apenas gerados nas falésias, mas também nas propriedades privadas que necessitam de constantes reparos (PIÉRRRI, 2008). Conforme Silva *et al.* (2020), o aumento de tensões cisalhantes no maciço e ruptura dos taludes são induzidos pela presença de construções próximas à crista das falésias e da vegetação, que propicia o intemperismo biológico através do crescimento de raízes ao longo de zonas fraturadas. Este panorama se enquadra na resolução CONAMA Nº001/86, Art. 1, que avalia o impacto negativo no ambiente como fenômenos que alteram as propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, afetando direta ou indiretamente: saúde e segurança da população, atividades sociais e econômicas, biota, condições sanitárias e qualidade dos recursos naturais.

De acordo com a Informação Técnica Nº6/2021/SUGERCO produzida pelo IDEMA (2021), é necessária a manutenção das ocupações incidentes em Áreas de Preservação Permanente (APP), atendendo o contexto histórico da ocupação urbana no núcleo central de Pipa e as atividades que impulsionaram o desenvolvimento local. A regularização fundiária, urbanística e rural deve seguir os preceitos normativos do Código Florestal na Lei nº 12.651/12, art. 4º, que definem uma área de APP como tabuleiros ou chapadas até a linha de ruptura do relevo, com 100 metros e declividades superior a 45º (Figura 23). Em especial, a Lei nº

13.465/17 (Gestão de Riscos), Art. 39 e seus §1º e 2º, ressalta a importância da mitigação, minimização e administração monitorada das áreas de risco em APP a serem regularizadas. Outra legislatura que auxiliaria essa normalização é a Lei Nacional nº 6.766/79, conhecida como Lei Lehmann de parcelamento do solo para fins urbanos, dispondo sobre a implementação de sistema de captação de águas pluviais na crista da falésia, sistema de coleta e tratamento de esgotos, além de políticas públicas para fiscalização efetiva da região, impedindo novas ocupações.

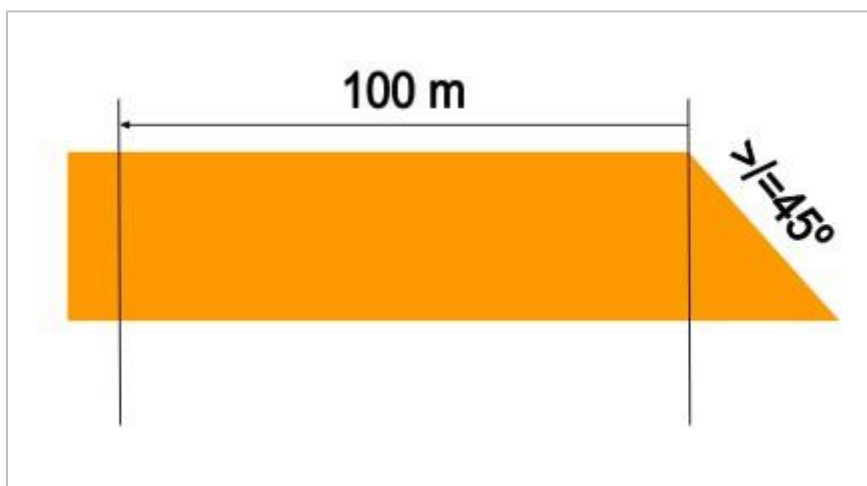


Figura 23: Esquema representativo de tabuleiros ou chapadas como Área de Preservação Permanente (APP) segundo o Código Florestal (Lei nº 12.651/12, Art. 4, V e VIII).

Fonte: Autora (2022).

O embate entre as legislações é bastante significativo, inicialmente com a Lei Estadual nº 7.871/00 que reconheceu a falésia como Zona Especial Costeira (ZEC) e, no Art.9 §2º, delimitou uma faixa de monitoramento especial de 100 metros suscetível à ocupação, exceto nos primeiros 33 metros do sopé em direção ao continente, áreas de vegetação nativa, dunas vegetadas e terrenos geologicamente instáveis (Figura 24A). Esta faixa de 33 metros equivale às áreas de domínio da União, presentes no Decreto-Lei nº 9.760/46 e, posteriormente instituídas no Art. 20 da Constituição de 1988. Em seguida, o lançamento da Resolução nº 303/02 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) passou a proibir qualquer intervenção na região de 100 metros até a borda das falésias, definidas aqui como APP, como observado na Figura 24B. Esta determinação encontra divergências com a Resolução nº 369/06 (CONAMA), a qual autoriza a supressão de vegetação ou intervenção em áreas de APP caso haja comprovação do requerente sobre a falta de risco de agravamento de processos erosivos, movimentos de massa ou enchentes.

O Código de Meio Ambiente do Município de Tibau do Sul, por sua vez, dispõe a Lei Municipal nº 383/08 (Art. 43), que reduz a região de proteção para 50 metros a partir da linha de preamar definida pela Gerência Regional do Patrimônio da União GRPU/SPU/MPOG (Figura 24C). As leis municipal e estadual são menos restritivas do que a federal e, como as áreas de APP não são passíveis de ocupação, essa discordância entre as normas permitiu brechas para construções baseadas em diretrizes mais convenientes, mediante admissão das pressões imobiliárias por parte do órgão responsável. Especialistas do IDEMA afirmam que uma solução seria uma maior autonomia dos municípios para as etapas de eliminação, contenção e monitoramento dos riscos. Atualmente, SEMURBMO e COMPDEC realizam o monitoramento frequente das falésias e enviam relatórios de atividade para o Ministério Público Federal, conforme Inquérito Civil nº 1.28.000.001930/2020-04 (SILVA, 2022).

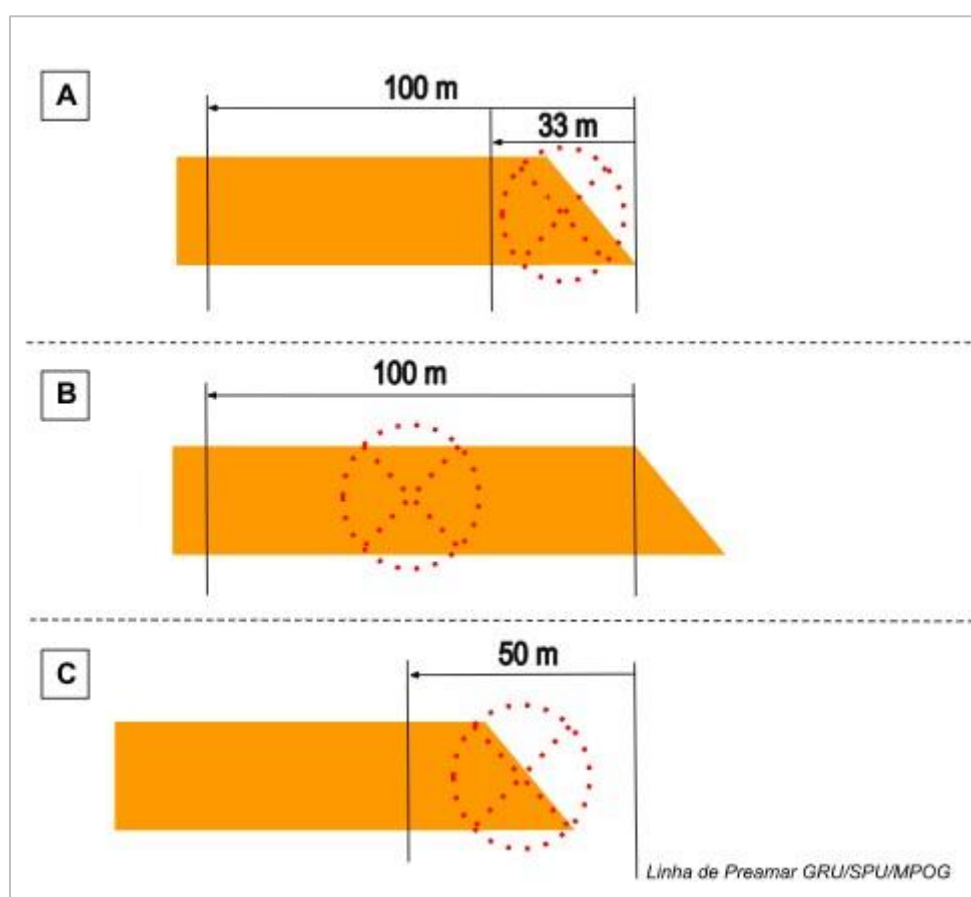


Figura 24: Esquema de delimitação de zonas de proteção de falésias, em laranja, de acordo com as esferas estadual de 2000 (A), federal de 2002 (B) e municipal de 2008 (C).

Fonte: Autora (2022).

Diante das restrições expostas, o detalhamento de uso e ocupação das falésias de Pipa foi executado pelo Projeto Falésias, o qual demonstrou as irregularidades que esse conflito de legislações provoca. Foram definidas faixas de 10, 33, 50 e 100 metros para análises das

seguintes classes: Acostamento, Área Edificada, Arruamentos, Calçadas, Cemitério, Construções, Dunas, Escadas, Estacionamentos, Faixa de Praia, Guarda-Sol, Piscinas, Solo Exposto, Tendras, Vegetação e Vegetação Rasteira, observadas na Figura 25 (AMORIM & MAIA, 2021b).

Os resultados obtidos demonstram que a faixa de 10 metros, que segundo SEMURBMO (2020b) corresponde a uma área de risco e deveria formar um limite de segurança, é majoritariamente recoberta de vegetação rasteira e arbórea (73%), com poucas construções (<1%), o que não a qualifica como insignificante pois abrange até uma pequena porção do Cemitério de Pipa. Em seguida, a faixa de 33 metros foi caracterizada por aproximadamente 1 ha de construções (4,83%), incluindo grande parte do Cemitério de Pipa. Na zona de 50 metros foram detectados 37% de área ocupada por classes não naturais. Destes 37%, 2 ha (6,65%) apenas de construções, e vegetação reduzindo para 19 ha (63%). Por último, na faixa de 100 metros a vegetação representa 56,53% e as classes não naturais contabilizam 26,4%, com maior expressividade da classe de piscinas. Todas as áreas descritas pelo Projeto Falésias não poderiam conter ocupação humana, o que implica uma ilicitude perante as normas citadas.

10 metros

Classe	Área (ha)	Área (km²)	%
Área Edificada	0,0103	0,000103	0,17
Cemitério	0,0255	0,000255	0,42
Construções	0,0602	0,000602	0,99
Escadas	0,0046	0,000046	0,08
Estacionamentos	0,0016	0,000016	0,03
Faixa de Praia	0,0077	0,000077	0,13
Piscinas	0,0005	0,000005	0,01
Solo Exposto	1,5284	0,015284	25,19
Tendas	0,0020	0,000020	0,03
Vegetação Arbórea	4,1431	0,041431	68,29
Vegetação Rasteira	0,2828	0,002828	4,66
TOTAL	6,0667	0,060667	100

C

50 metros

Classe	Área (ha)	Área (km²)	%
Acostamento	0,43	0,004	1,43
Área Edificada	0,18	0,002	0,60
Arruamentos	2,01	0,020	6,65
Calçadas	0,23	0,002	0,76
Cemitério	0,11	0,001	0,36
Construções	2,02	0,020	6,67
Dunas	1,38	0,014	4,56
Escadas	0,01	0,000	0,02
Estacionamentos	0,26	0,003	0,88
Faixa de praia	0,06	0,001	0,21
Guarda-sol	0,01	0,000	0,02
Piscinas	0,09	0,001	0,29
Solo Exposto	4,40	0,044	14,53
Tendas	0,00	0,000	0,01
Vegetação	16,34	0,163	54,00
Vegetação Rasteira	2,72	0,027	9,01
TOTAL	30,25	0,303	100

C

33 metros

Classe	Área (ha)	Área (km²)	%
Acostamento	0,10	0,001	0,50
Área Edificada	0,11	0,001	0,57
Arruamentos	1,13	0,011	5,63
Calçadas	0,11	0,001	0,57
Cemitério	0,11	0,001	0,54
Construções	0,97	0,010	4,83
Dunas	0,25	0,002	1,24
Escadas	0,01	0,000	0,03
Estacionamentos	0,16	0,002	0,82
Faixa de Praia	0,03	0,000	0,14
Guarda-sol	0,00	0,000	0,01
Piscinas	0,03	0,000	0,15
Solo Exposto	3,94	0,039	19,69
Tendas	0,00	0,000	0,02
Vegetação	11,49	0,115	57,37
Vegetação Rasteira	1,58	0,016	7,91
TOTAL	20,02	0,200	100

B

100 metros

Classe	Área (ha)	Área (km²)	%
Acostamento	0,67	0,007	1,11
Área Edificada	0,48	0,005	0,80
Arruamentos	3,27	0,033	5,42
Calçada	0,50	0,005	0,83
Cemitério	0,11	0,001	0,18
Construções	4,32	0,043	7,16
Dunas	5,18	0,052	8,58
Escadas	0,01	0,000	0,01
Estacionamentos	0,40	0,004	0,66
Faixa de praia	0,28	0,003	0,47
Guarda-sol	0,02	0,000	0,03
Piscinas	0,17	0,002	0,28
Solo Exposto	4,47	0,045	7,41
Tendas	0,01	0,000	0,01
Vegetação	34,10	0,341	56,53
Vegetação Rasteira	6,34	0,063	10,51
TOTAL	60,32	0,603	100

D

Figura 25: Descrição detalhada da classificação de uso e ocupação do solo em Pipa/RN obtida pelo Projeto Falésias. Fonte: Adaptado de Amorim & Maia (2021b).

3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1. A Praia de Pipa

O Município de Tibau do Sul possui raízes indígenas da tribo Potiguara, alcançou status de vila em 1911 e obteve sua emancipação política em 1963, através da Lei nº 2.863/63 (GALVÃO, 2018). Remetendo às suas origens, recebeu o nome de Tibau pois localiza-se cercado pela Lagoa de Guaraíras e o Oceano Atlântico, visto que em tupi a palavra significa “entre duas águas” (CAVALCANTI NETO, 2006). De acordo com a Prefeitura Municipal de Tibau do Sul/PMTS (2022), o município abrange uma área total de 102.680 km², ocupada por 14.440 habitantes, segundo estimativa feita em 2020. Em meados da década de 1980, houve intensas mudanças na região, principalmente pelo asfaltamento da estrada RN 003 ou Rodovia Hélio Galvão, que permitiu o desenvolvimento do turismo. Segundo Galvão (2018), concomitante a esse fenômeno, iniciaram-se as fazendas de carcinicultura que substituíram as criações de peixe, sendo atualmente a segunda maior economia local, perdendo apenas para o turismo.

A Praia de Pipa prontamente se destacou nesse processo de avanço turístico. Anteriormente, era uma aldeia isolada de pescadores, passou a destino de veraneio para turistas e surfistas, devido a sua beleza cênica, arrematada pela presença de golfinhos, na conhecida Baía dos Golfinhos. De acordo com Cavalcanti Neto (2006), a praia teve seu nome inspirado em uma rocha próxima à beira mar avistada pelos navios portugueses, a atual Pedra do Moleque, com formato similar a uma pipa (vasilha de guardar bebidas/barril), conforme observada na Figura 26.



Figura 26: A Pedra do Moleque foi utilizada como ponto de referência pelos portugueses, e posteriormente foi fonte de inspiração para nomear a Praia de Pipa/RN.

Fonte: Zale di Paula, 2010 (A); Felipe Mamede, 2008 (B); Freepik, 2022 (C)

A concentração do turismo ocorre na avenida principal, a avenida Baía dos Golfinhos, palco de uma grande variedade de atividades gastronômicas, festivais, hotelaria, passeios, entre outros (PMTS, 2022). Em 2018, Tibau do Sul foi nomeada a categoria “A” pelo Ministério do Turismo, sendo a praia de Pipa o maior atrativo turístico, com reconhecimento internacional (SEMURBMO, 2020b; GALVÃO, 2018). O *Travellers’ Choice Best of the Best*, premiação que considera a opinião dos viajantes ao redor do mundo durante 12 meses no site TripAdvisor®, elegeu a Baía dos Golfinhos/Pipa/RN na nona posição em 2022, subindo uma posição em relação ao ano anterior (G1, 2022; AGORA RN, 2021; TRIPADVISOR, 2022). Outro segmento do turismo, o ecoturismo, também obteve reconhecimento nos seminários internacionais *Green Destinations Day* de 2021 e 2022 (Figura 27), formado pela fundação holandesa *Green Destinations Foundation* (2020), cujo objetivo é incentivar a sustentabilidade através do combate à crise climática, degradação ambiental e a poluição, preservando paisagens cênicas, *habitats* naturais e a fauna regional (PRESERVE PIPA, 2021; GREEN DESTINATIONS, 2022).

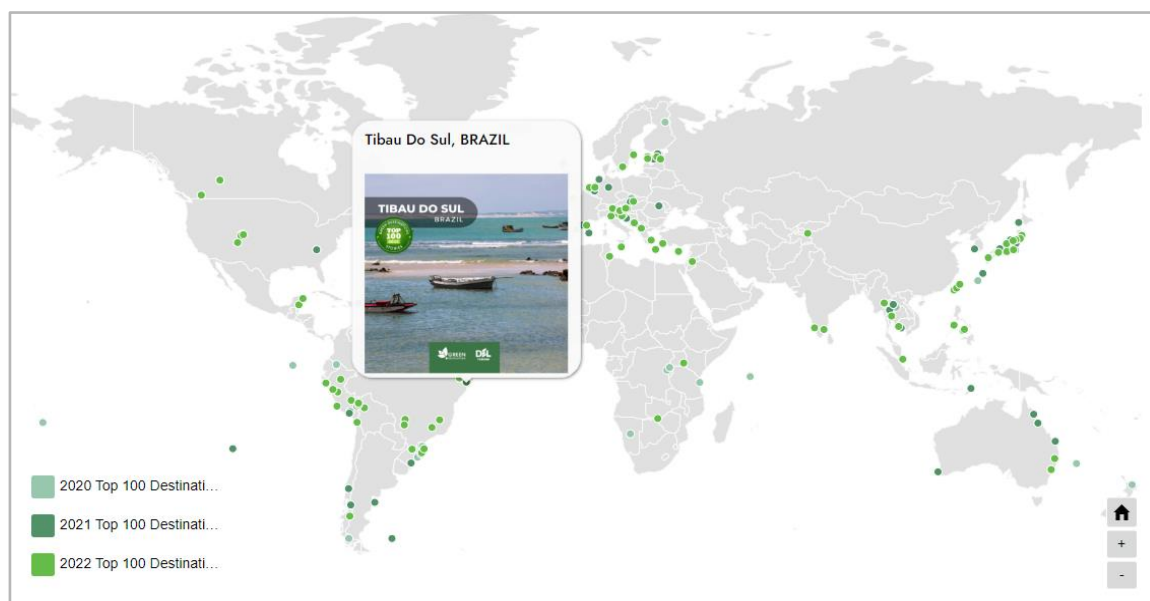


Figura 27: Mapa dos Top 100 Destinos escolhidos ao redor do mundo no seminário internacional Green Destination Day de 2020, 2021 e 2022. Destaque para o Município de Tibau do Sul, presente nos últimos dois anos. Fonte: Green Destination Foundation (2022).

3.1.1 Área de estudo

A busca por uma área que tivesse uma influência direta dos impactos antrópicos sobre a falésia e sua relevância para contribuição no monitoramento costeiro resultou na escolha do local onde havia uma tubulação escoando água pluvial na base da falésia (Figura 28A), observada durante uma visita de campo feita em setembro de 2021, próxima a fraturas e com erosão basal bem destacada na face da encosta (Figura 28B). Coincidentemente, esta tubulação estava descrita no relatório da SEMURB (2020a), realizado logo após o acidente em novembro de 2020, como Ponto 004, e suas coordenadas condizem com o Cemitério de Pipa. O Cemitério foi construído em 22/12/1969, sob administração do Prefeito João M. Moura, conforme observado na placa de entrada. Ele continua em atividade, tendo sido, inclusive, o local de sepultamento da família afetada pelo acidente (TRIBUNA DO NORTE, 2020). A realização da atividade de campo deste trabalho contou com apoio da Secretária Laira Sousa (Secretaria de Meio Ambiente, Urbanismo e Mobilidade Urbana/SEMURBMO); da Defesa Civil de Tibau do Sul, através do coordenador e do agente Municipal de Proteção e Defesa Civil (COMPDEC), respectivamente: Mateus Silva e Marcelo Marinho; dos peritos da Polícia Federal: Geólogo Jesimael Avelino e o Engenheiro Eletricista Emerson Andrade; e, por fim, da proprietária da residência nº485, Sra. Vanessa Leite Barreto (ANEXOS I, II, III).



Figura 28: Tubulação exposta na falésia drenando água da chuva proveniente da avenida, destacada em vermelho (A); foram observadas fraturas de deslocamento (traços pretos) e erosão basal (em azul) bastante proeminentes, próximos à tubulação, como referencial a proeminentes, próximos à tubulação, como referencial a placa de alerta no círculo amarelo (B).

Fonte: Autora (2022).

Entretanto, a tubulação observada está enterrada entre o cemitério e a residência privada, num segmento de difícil acesso, como será explicado no capítulo 4. Portanto, a área de estudo precisou englobar o cemitério e a propriedade privada, cuja proprietária disponibilizou a passagem do equipamento em seu terreno. Ao todo, a área abrange 1030,5 m² (Figura 29), localizada na Av. Baía dos Golfinhos próxima da borda da falésia, aproximadamente a 70 metros da região do acidente.



Figura 29: Mapa de localização da área de estudo, que engloba o Cemitério de Pipa e a residência nº 485.
Fonte: Autora (2022).

3.2. Geologia e Geomorfologia da Área de Estudo

3.2.1. Geomorfologia Local

A área de estudo localiza-se numa praia arenosa em formato de baía em zeta, com presença de tabuleiros vegetados, falésias íngremes e blocos de laterita. Na área de estudo, localizada na Praia do Centro de Pipa, observado na Figura 30, são encontradas as seguintes feições geomorfológicas: tabuleiros vegetados e intensamente habitados, falésias íngremes e face de praia estreita plana, arenosa e sem presença de bermas (AMORIM & MAIA, 2021b).



Figura 30: Geomorfologia da área de estudo, destacada em vermelho.
Fonte: Modificada de AMORIM & MAIA (2021b).

3.2.2. Geologia Local

A partir dos dados de perfilagem de raios gama (γ) e descrição de campo feitas pelo Projeto Falésias, a seção estratigráfica da área de estudo corresponde à Seção 03, localizada ao lado do cemitério (AMORIM & MAIA, 2021b). Foram identificadas 5 camadas ao longo de 16,40 metros, respectivamente da base para o topo: conglomerado de matriz lamosa, com presença de fraturas verticais lixiviadas; arenito médio com matriz lamosa; arenito médio com matriz lamosa, e planos de fraturas com lixiviação do óxido de ferro, aumentando a presença de concreções ferruginosas; lamito maciço com fraturas ortogonais e verticais; e, arenito médio com matriz lamosa, de coloração branca, indicando intenso lixiviamento (Figura 31).

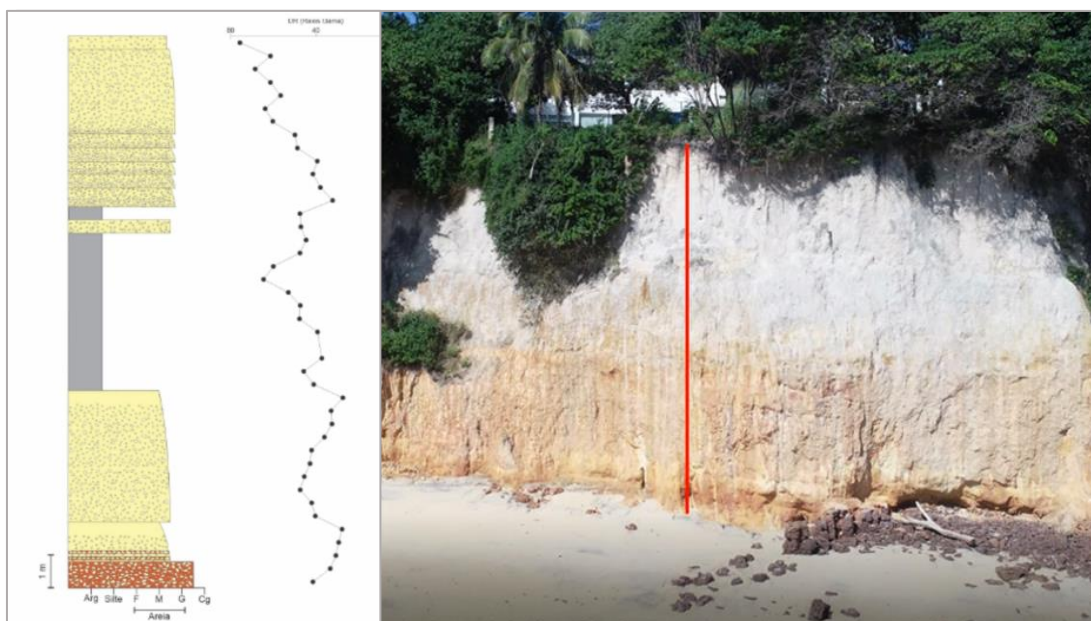


Figura 31: Seção estratigráfica 03 é correspondente à área de estudo.
Fonte: Amorim & Maia (2021b).

As fraturas observadas na descrição da seção estratigráfica acompanham o padrão das feições erosivas expostas na face da falésia, que na área de estudo estão atreladas às cicatrizes de colapso vegetadas (algumas formando voçorocas), reentrância erosional basal e fácies friáveis (Figura 32). A interseção dos planos de fraturas facilita a percolação de fluídos, desenvolvimento de raízes e lixiviação, devido à formação de condutos verticais e, consequentemente, trechos com alta permeabilidade que aumentam o peso na borda da falésia (AMORIM & MAIA, 2021b; OLSEN, 2009).



Figura 32: Feições erosivas encontradas na área de estudo: fraturas de deslocamento, erosão basal (linha pontilhada amarela), formação de voçorocas nas cicatrizes de colapso vegetadas, e a porção com fácies mais friável; elas encontram-se bastante próximas do do local onde está a tubulação exposta (círculo vermelho).

Fonte: Jesimael Avelino & Autora (2022).

A combinação destas feições erosivas com a circulação de fluidos promove a perda de coesão da rocha e, conseqüentemente, os movimentos de massa em forma de blocos prismáticos, como aconteceu no acidente de 2020 (Figura 33), ou fluxo de detritos. Esta configuração representa um retrato da instabilidade estampada na falésia. O comportamento morfodinâmico é um fator importante para compreender a dinâmica costeira, pois ele caracteriza o período de sedimentação/erosão e, como resultado, a intensidade da retração basal na escarpa. A área de estudo está entre os perfis P3 e P4 do monitoramento morfodinâmico realizado pelo Projeto Falésias. Foi observado nos perfis que nos meses de fevereiro a junho predomina o estágio de sedimentação, maior no P3, com deposição de $20,6\text{m}^3$, porém, nos meses consecutivos prevalece a remoção de sedimentos, em ambos perfis, sumarizando um balanço sedimentar negativo ao longo do ano (AMORIM & MAIA, 2022). Uma reflexão importante é que, no período do acidente (novembro), o perfil praial estava em retração: mais um fator desfavorável que contribuiu para a queda dos blocos.



Figura 33: Blocos desagregados, destacados em vermelho, oriundos de queda do material sedimentar por meio da associação do grande volume de chuva e alto nível da maré, resultando no acidente fatal em novembro de 2020. Fonte: Jesimael Avelino (2020).

3.3. Uso e Ocupação do Solo da Área de Estudo

Conforme explicitado no capítulo anterior (seção 2.5 sobre legislações, a área costeira de Tibau do Sul está inserida numa região de diversas irregularidades. Isto entra em conflito com as delimitações legislativas de proteção ambiental, tendo a faixa de 10 metros até a borda da falésia uma zona de risco alto, onde parte da propriedade e do cemitério foram instalados (Figura 34). No mapeamento de uso e ocupação do solo produzido pelo Projeto Falésias, foram descritas 11 classes nessa faixa de 10 metros em Pipa (AMORIM & MAIA, 2021b). A área de estudo está muito próxima da linha de ruptura do relevo, e a dimensão do risco envolvido é um fator determinante para exigir medidas mais efetivas dos órgãos responsáveis, a fim de evitar eventos adversos.



Figura 34: A área de estudo está inserida numa zona de risco, além de conflitar com legislações ambientais.
 Fonte: Amorim & Maia (2021b).

Amorim & Maia (2022) delimitaram uma faixa de 15 metros em direção ao continente como de maior risco para construções sobre ela (Figura 35), pois em escarpas que possuem a camada superior de baixo grau diagenético, como no caso da área de estudo, existe maior probabilidade de enfrentar danos às edificações e infraestrutura viária devido aos recorrentes movimentos de massa, reforçando a importância do constante monitoramento e fiscalização costeiro para diagnosticar possíveis disfunções na integridade de imóveis, avenidas, entre outros.

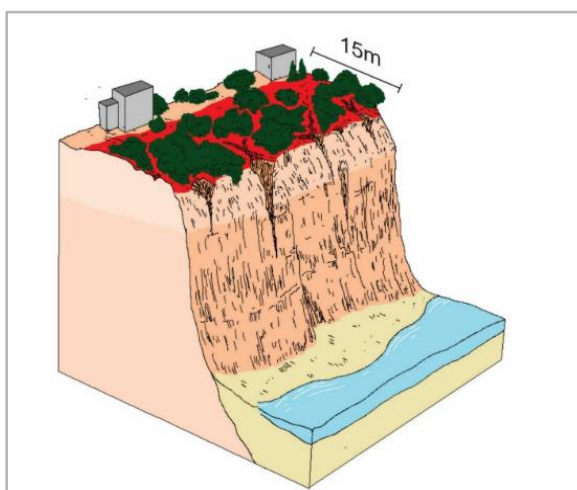


Figura 35: Faixa de 15 metros com risco às construções sobre falésias com fácies friável no topo.
 Fonte; Amorim & Maia (2022).

4. METODOLOGIA

4.1. Introdução

A área de estudo, localizada em Praia de Pipa/RN, é uma região costeira que está submetida a intensas pressões antrópicas, as quais favorecem o aumento da velocidade de retração das falésias. Este cenário permite o desenvolvimento de riscos e vulnerabilidades no local que afetam diretamente a comunidade e os turistas. Diante disso, o objetivo da pesquisa é identificar as tubulações e fraturas presentes na borda da falésia, cujo propósito é auxiliar na inspeção estabilidade do terreno.

Assim, o método escolhido foi o *Ground Penetration Radar* (GPR), utilizado como um meio de investigação indireta para encontrar materiais perdidos, detectar estruturas e alterações nas propriedades dos materiais em profundidades rasas (DAVIS & ANNAN, 1989). Annan (2002) informa que a entrada do GPR no mercado foi na década de 70 pela empresa Geophysical Survey System Inc. (GSSI). Antes disso ele era utilizado em expedições militares, observação do lençol freático e monitoramentos glaciais. Após sua comercialização geraram-se novas possibilidades de aplicação devido à diminuição dos custos dos equipamentos e a difusão do método ao redor do mundo, incentivando maiores quantidades de pesquisa e demonstrando a versatilidade do método nas mais diferentes áreas. Atualmente, esse método possui uma grande variedade de aplicações cotidianas, podendo ser utilizado em madeira, concreto e asfalto (JOL, 2009), além dos materiais geológicos. Ao permitir esse caráter investigativo, gerou-se também a oportunidade de auxiliar no conjunto de provas dos inquéritos policiais, principalmente nas áreas de engenharia, geofísica e geologia forense, como será proposto neste trabalho.

4.2. O método geofísico

O GPR é um método eletromagnético não destrutivo que trabalha com ondas em radiofrequência, entre 10-1000 MHz conforme antena escolhida, para identificar com alta resolução os elementos presentes na subsuperfície rasa da Terra (ANNAN, 2002). O seu modo de operação ocorre através da emissão e propagação de ondas pela antena transmissora e captação do sinal por uma antena receptora, que são deslocadas sobre a superfície examinada e retorna suas reflexões naturais como resposta (BRISTOW & JOL, 2003; JOL, 2009). De acordo

com Paixão (2006) a resolução e profundidade de penetração são as principais informações adquiridas pelo GPR para captar a assinatura do alvo específico, sendo diretamente correlacionadas à frequência do sinal transmitido e as propriedades elétricas do meio. Essas propriedades são: permeabilidade magnética, condutividade elétrica e permissividade dielétrica.

A permeabilidade magnética corresponde à resposta dos átomos e momentos magnéticos sob influência de um campo magnético. Já a condutividade elétrica refere-se ao fluxo de cargas livres que geram uma corrente na presença de um campo elétrico. De acordo com a natureza do material, essa condutividade pode gerar uma maior ou menor atenuação do sinal, influenciando na profundidade de investigação. Por fim, a permissividade dielétrica representa o comportamento das cargas oriundas do material diante de um campo elétrico, controlando a velocidade que a onda atravessa o meio. A variação da velocidade ocorre idealmente através das mudanças bruscas causadas pelas descontinuidades das camadas do subsolo, possibilitando uma boa reflexão. Portanto, o sinal é equivalente a essas descontinuidades do meio, visíveis apenas se houver um bom contraste que modifique a velocidade da onda entre as interfaces, visto que ambas possuem constantes dielétricas (ϵ_r) distintas (DAVIS & ANNAN, 1989).

O equipamento baseia-se nos princípios semelhantes ao da sísmica de reflexão, porém ao invés de trabalhar com a onda elástica (acústica), o GPR utiliza a onda eletromagnética (EM). À medida que a onda atravessa diferentes interfaces com propriedades eletromagnéticas distintas modifica-se seu campo original e sua energia será em parte refletida e em outra, refratada, podendo penetrar até certa profundidade antes de ser completamente absorvida (ANNAN, 2003). A porção refletida tem um tempo de retorno na ordem de nanosegundos, captada pela antena receptora em escala vertical, conectando esse tempo com a amplitude da onda e formando uma sequência de traços ou scans. Esta sequência compõe o produto final do imageamento, um radargrama, que trabalha com a polaridade da amplitude do sinal a partir da resposta enviada pela onda ao se deparar com a passagem entre camadas de maior para menor energia, ou vice-versa, contribuindo para visualização do meio (BRASIL, 2013).

A física fundamental para constituir o GPR envolve as forças eletromagnéticas descritas por Maxwell em 1864, combinadas com a similaridade cinemática da sísmica de reflexão. A teoria demonstra que os campos elétricos e magnéticos possuem a mesma natureza, se

propagam com a velocidade da luz e, em determinado referencial, um pode transformar-se no outro. Através das equações do físico e matemático britânico, pode-se quantificar matematicamente os sinais do GPR, representando o equipamento como um subconjunto do campo eletromagnético envolvendo a física com as propriedades dos materiais (ANNAN, 2001). São ao todo quatro equações (Figura 36), que correspondem à lei de indução de Faraday, a lei de Gauss e lei de Ampère, porém nomeadas como “Equações de Maxwell” em honra à James Clerk Maxwell (1831-1879), que foi o primeiro a descrevê-las (BRASIL, 2013). Porém, apenas em 1904, o físico alemão Hülsmeyer foi pioneiro em utilizar os sinais eletromagnéticos para identificar objetos metálicos, criando o primeiro radar; mas, a primeira descrição do fenômeno foi produzida através da patente alemã atribuída a Leimbach e Lowy, em 1910 (DANIELS, 2004).

$$\begin{aligned}\nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} & (1) \\ \nabla \times \vec{H} &= \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} & (2) \\ \nabla \cdot \vec{D} &= q & (3) \\ \nabla \cdot \vec{B} &= 0 & (4)\end{aligned}$$

Onde:

- $\vec{E}$ - força do campo elétrico
- $\vec{B}$ - densidade do fluxo eletromagnético
- $\vec{D}$ - campo de deslocamento elétrico
- $\vec{H}$ - intensidade do campo magnético
- q - densidade da carga elétrica
- $\vec{J}$ - densidade da corrente elétrica

Figura 36: As equações de Maxwell, correlação do campo eletromagnético e suas propriedades.
Fonte: Modificado de Annan (2003).

Essas equações detalham o transporte, a dissipação, o armazenamento e a geração da energia eletromagnética, tanto nos meios materiais quanto em espaços livres. A primeira equação relaciona as cargas elétricas e o campo magnético, em função das variações do campo no tempo, possibilitando a movimentação das cargas, resumindo a hipótese de Faraday. A equação 2 equivale à observação de Ampère, onde correntes elétricas geram campos magnéticos subjacentes, como um ímã na presença de um objeto elétrico. A terceira equação representa as cargas elétricas oriundas dos campos elétricos, indicando que estas cargas são

fontes ou dissipadoras deste campo específico. Por fim, a equação 4 demonstra a lei Gauss para o campo magnético, distinguindo seu fluxo do campo elétrico, visto que as cargas magnéticas livres nunca foram observadas na natureza (ANNAN, 2003; PAIXÃO, 2006).

Conhecer a velocidade da onda em cada meio permite converter a escala temporal em profundidade, possibilitando uma melhor qualidade da análise, respondendo com exatidão questões importantes como a distância do alvo e do lençol freático. Annan (2001) propõe que devem existir ajustes de parâmetros no equipamento e na forma de aquisição, para definir o levantamento e atingir o alvo proposto. Os parâmetros são: frequência, janela temporal, intervalo de amostragem do tempo, o distanciamento entre os pontos amostrais, o espaçamento entre antenas, grid/sistema de coordenadas e orientação da antena. A escolha da frequência central está intimamente ligada às propriedades do alvo, já que interfere na resolução dele. Influenciam, igualmente, na profundidade observada no radargrama pois baixas frequências aumentam a profundidade de investigação, e as altas geram refletores mais definidos, apesar da pouca profundidade (HANNINEN, 1992). Exercendo uma proporcionalidade indireta entre os componentes: profundidade e frequência da antena.

A janela temporal da frequência representa o período de abertura da antena para transmissão, reflexão e captação do sinal, registrado em tempo duplo pela antena receptora e facilitando o reconhecimento da subsuperfície, pois a resposta do sinal de retorno é semelhante ao que foi emitido (ANNAN, 2003). O tempo decorrente entre duas amostragens seguidas, com objetivo de medir a energia refletida, equivale ao intervalo de amostragem temporal. Já a distância entre os pontos de cada amostragem corresponde a um quarto do comprimento de onda emitido pelo GPR, conforme o princípio de amostragem espacial de Nyquist.

Em geral, as antenas do equipamento são separadas e exercem uma ligação bioestática entre si. Esta distância serve para maximizar o contato com o alvo e deve representar 20% da profundidade a ser investigada, normalmente especificada no manual do equipamento (ANNAN, 1992). Porém, para que o registro do espaço esteja padronizado é necessário estabelecer um sistema de coordenadas para as linhas de pesquisa, que devem ser distribuídas de maneira equidistante de acordo com a direção do ponto de interesse. O último parâmetro é a orientação das antenas, dispostas perpendicularmente às estruturas que o operador deseja mapear, possuindo uma variação de arranjos entre elas em conformidade com a forma de aquisição.

Segundo Jol (2009), as formas de aquisição de dados, por meio desses arranjos entre as antenas, são divididas em duas categorias: perfis de reflexão e transiluminação/tomografia de radar. Os perfis de reflexão são subdivididos em: Afastamento Constante (*Common Offset*), *Common Mid Point* (CMP) e *Wide Angle Reflection and Refraction* (WARR), sendo os dois últimos relacionados às sondagens de velocidade. A forma mais comum utilizada nos levantamentos de GPR é a de afastamento constante, que mantém a distância fixa entre as antenas de transmissão e reflexão ao longo do perfil, do qual o eixo horizontal equivale à posição das antenas e o eixo vertical ao tempo duplo de reflexão do sinal (ida e volta). O CMP e o WARR são técnicas adotadas para estimar a velocidade da onda, através da conversão do tempo duplo (ns) em profundidade (m) para uma localização determinada. A diferença entre eles é a atuação das antenas: no CMP, deslocam-se as duas de maneira simétrica e no WARR, mantém-se fixa uma das antenas, enquanto a outra afasta-se sucessivamente ao longo do alinhamento. O método de aquisição menos comum é a transiluminação, usada em situações específicas como investigação de poços, galerias de minas e construções humanas, onde desloca-se verticalmente as antenas em sentidos opostos por toda extensão a ser investigada.

4.3. Resposta Geofísica de uma Tubulação

O equipamento Detector Duo é utilizado especificamente para encontrar estruturas estendidas ou muito pequenas, auxiliando em análises de tubulações paralelas ou perpendiculares à direção da investigação (IDS, 2010), como observado na Figura 37B. Geralmente, o GPR é composto por quatro elementos principais: as antenas transmissora e receptora, a unidade de controle e a unidade de visualização. Essa última é disposta através de um notebook conectado ao equipamento que facilita a observação dos perfis geofísicos, e na presença de tubulações, apresentam feições hiperbólicas nos radargramas. A emissão do pulso eletromagnético em direção ao solo promove reflexões de retorno captadas pela antena receptora ao detectar anomalias, que podem ser objetos enterrados ou camadas estratigráficas distintas.

De acordo com Xavier Neto (2006), a radiação emitida possui um formato de cone, visto que os sinais são enviados com 15° graus sobre a horizontal, tanto à frente como atrás da antena. Esse padrão altera o real tamanho da anomalia, pois ela pode ser captada antes da antena estar diretamente sobre ela. Superfícies planas apresentam o mesmo sinal de retorno ao longo do

caminhamento. Já, as hipérboles são características de objetos cilíndricos, uma vez que o tempo de retorno do sinal na lateral é mais lento que o da porção superior, gerando essas feições distintas de dutos ou tubulações (Figura 37A). A abertura da hipérbole é variável e depende de diversos fatores, como velocidade de propagação do meio ou profundidade do alvo.

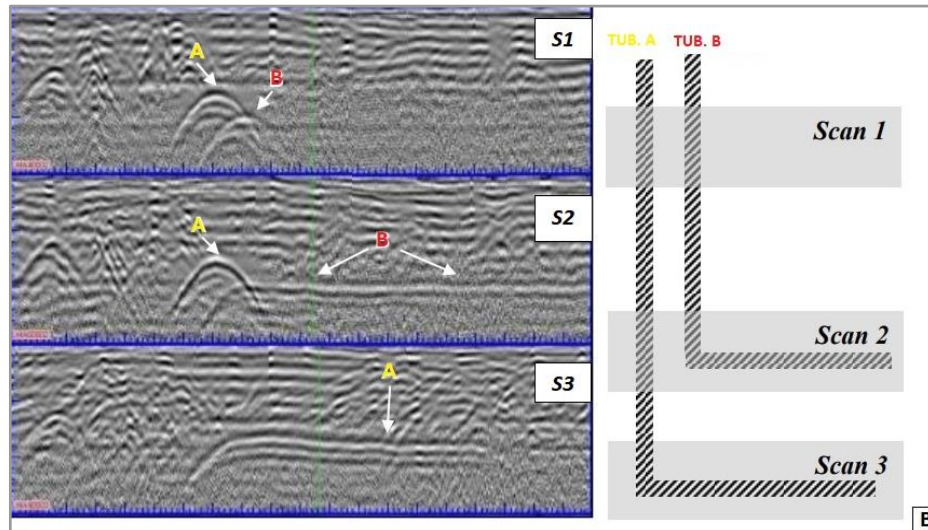
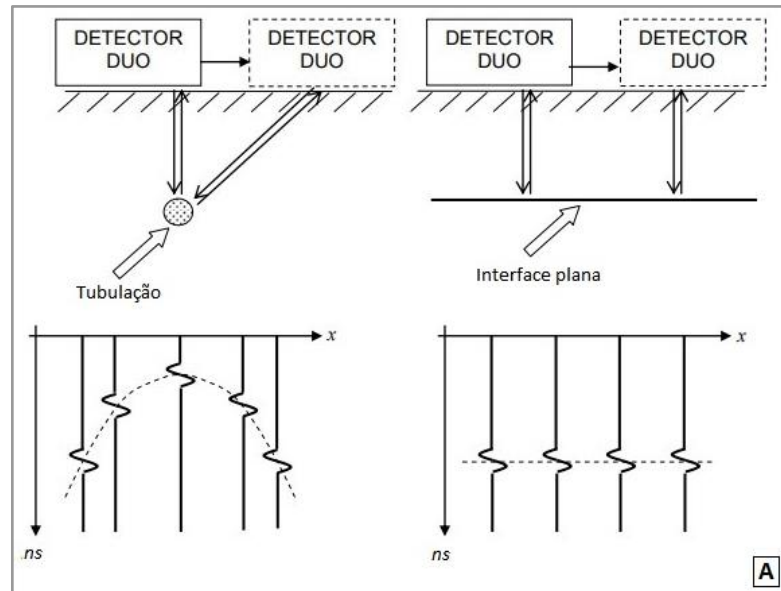


Figura 37: (A) Diferença entre as respostas geradas pelas interfaces planas e hiperbólicas no equipamento Detector Duo; (B) Visualização nos radargramas (S1, S2 e S3) das tubulações paralela (amarela) e perpendicular (vermelha) à direção de investigação.

Fonte: Modificado de IDS (2010).

4.4. Aquisição dos Dados Geofísicos

A etapa metodológica deste trabalho foi composta por três fases: (a) pesquisa bibliográfica e pré-campo, (b) campo para aquisição de dados e (c) processamento e interpretação dos perfis GPR. Na primeira, foram feitas análises por sensoriamento remoto e preparação para o campo, a fim de obter as informações do local (dimensão e profundidade) e natureza do alvo, além da definição dos seguintes critérios: número de linhas, espaçamento entre as linhas, orientação dos perfis, entre outros. O equipamento utilizado para aquisição dos dados geofísicos é o GPR Detector Duo, fabricado pela Ingegneria Dei Sistemi (IDS), pertencente à Polícia Federal (Figura 38). Ele possui duas antenas blindadas com frequências de 250 e 700 MHz próprias para localização de tubulações (IDS, 2010). No momento da aquisição, é possível visualizar o perfil com ambas as antenas, pois a leitura é simultânea entre elas, permitindo que o aparelho salve um arquivo para cada. Desta forma, tem-se um ganho na resolução do sinal e profundidade de penetração.



Figura 38: Equipamento *Ground Penetration Radar* (GPR), modelo Detector Duo da empresa italiana *Ingegneria Dei Sistemi* (IDS), propriedade da Polícia Federal. Fonte: Autora (2022).

Ao todo foram realizadas duas idas ao campo com acompanhamento da Defesa Civil e peritos da Polícia Federal. O alvo, a princípio, era uma tubulação exposta na face da falésia em frente ao cemitério, baseado no posicionamento do ponto 004 descrito no relatório da SEMURBMO (2020a). Mas, na etapa preliminar de reconhecimento de campo, verificou-se

que sua localização estava deslocada para esquerda em torno de 5 metros, como mostra a Figura 39, e foi verificado que ele deriva da residência privada que compartilha o muro com o espaço público. Ao pavimentar a avenida principal, o escoamento superficial foi comprometido e, consequentemente, o fluxo da drenagem pluvial estendeu-se para a área privada. A tubulação foi uma alternativa para direcionar a água proveniente da avenida e transferi-la para a base da falésia, uma medida imediatista que, a médio/longo prazo, canaliza o fluxo para um ponto determinado e intensifica a erosão, sendo capaz de provocar tombamentos e deslizamento das rochas do Barreiras. O objetivo converteu-se em comparar e analisar os dados dos terrenos do cemitério e da propriedade privada, buscando compreender o impacto da atividade antrópica no ambiente.



Figura 39: Imagem de drone da área de estudo com destaque para a tubulação exposta, em azul. A posição real do alvo está a 5 metros, aproximadamente, do ponto apresentado no relatório da SEMURBMO (2020a), em amarelo. Fonte: Autora (2022).

O primeiro campo aconteceu no dia 15/02/2022 e teve duração das 8h às 12h30. Inicialmente, foi feito o levantamento de drone (Figura 40), para fotos mais precisas da área de estudo, utilizadas posteriormente no geoprocessamento. Em seguida, a aquisição com o GPR

teve um total de 11 linhas, com pontos de início e fim marcados com o GPS Garmin Etrex 30x. Devido ao irregular alinhamento entre as covas, o comprimento das linhas variou entre 9 e 2,15 metros, como observado na Figura 41.

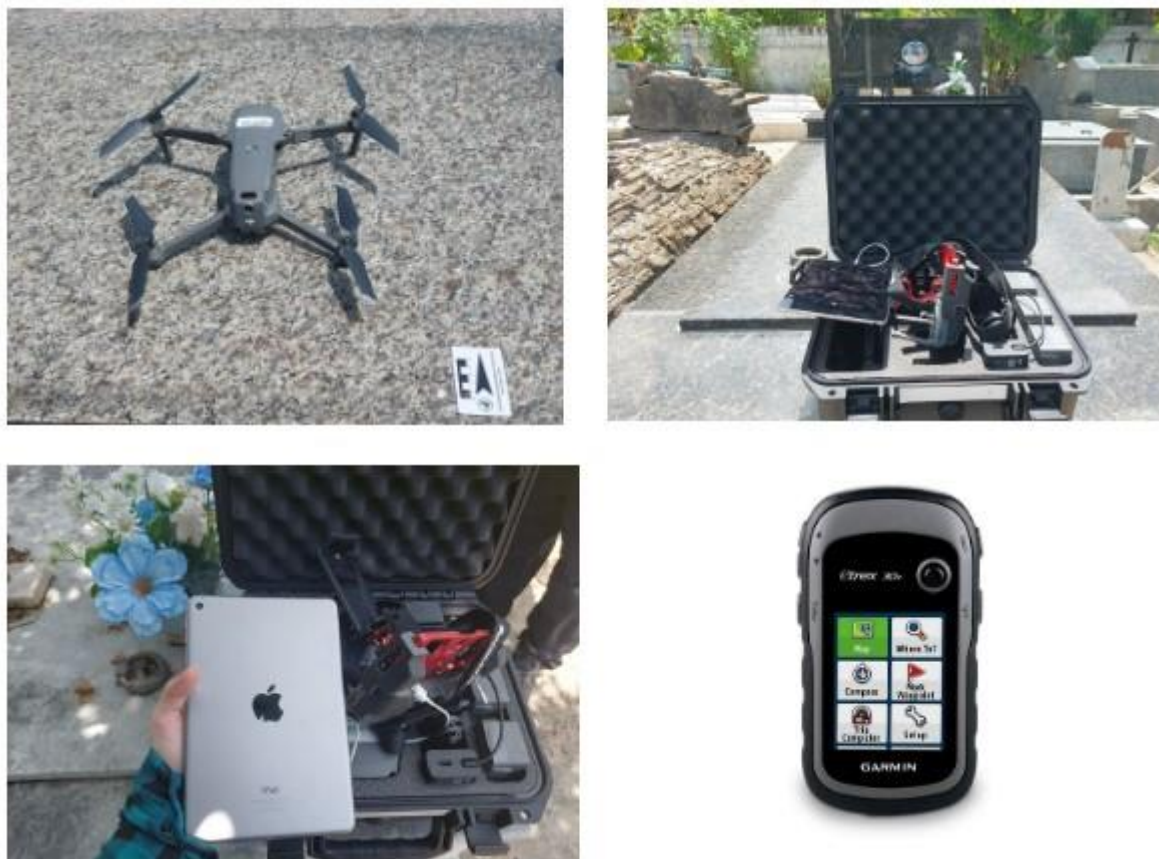


Figura 40: Drone Mavic-2, utilizado para capturar imagens aéreas do local de estudo, com auxílio de um iPad mini, de propriedade da Polícia Federal. Como também o GPS usado para marcação de pontos.
Fonte: Autora (2022) & Google (2022).



Figura 41: Mapa esquemático com a disposição dos perfis GPR realizados no primeiro dia de campo, na porção do cemitério, com destaque para a direção das linhas L (vermelho) e T (laranja).

Fonte: Autora (2022).

O segundo campo ocorreu no dia 22/03/2022, em propriedade privada localizada na Avenida Baía dos Golfinhos, nº485, da Sr^a Vanessa Leite Barreto. Foram executados 10 perfis análogos aos do cemitério, e utilização do GPS para marcar os pontos de início e fim de cada linha. Os perfis possuem o comprimento entre 1,44 e 28,20 metros, de acordo com a área disponível para passagem do equipamento (Figura 42). Além da tubulação “alvo”, que drena a água da avenida até a borda da falésia, foi encontrada outra que não fica visível na praia e está exposta em meio à vegetação, denominada tubulação 2 (Figura 43). A proprietária relatou constantes problemas de infiltrações de drenagem pluvial e derramamento de esgoto em sua propriedade, oriundos da avenida principal.

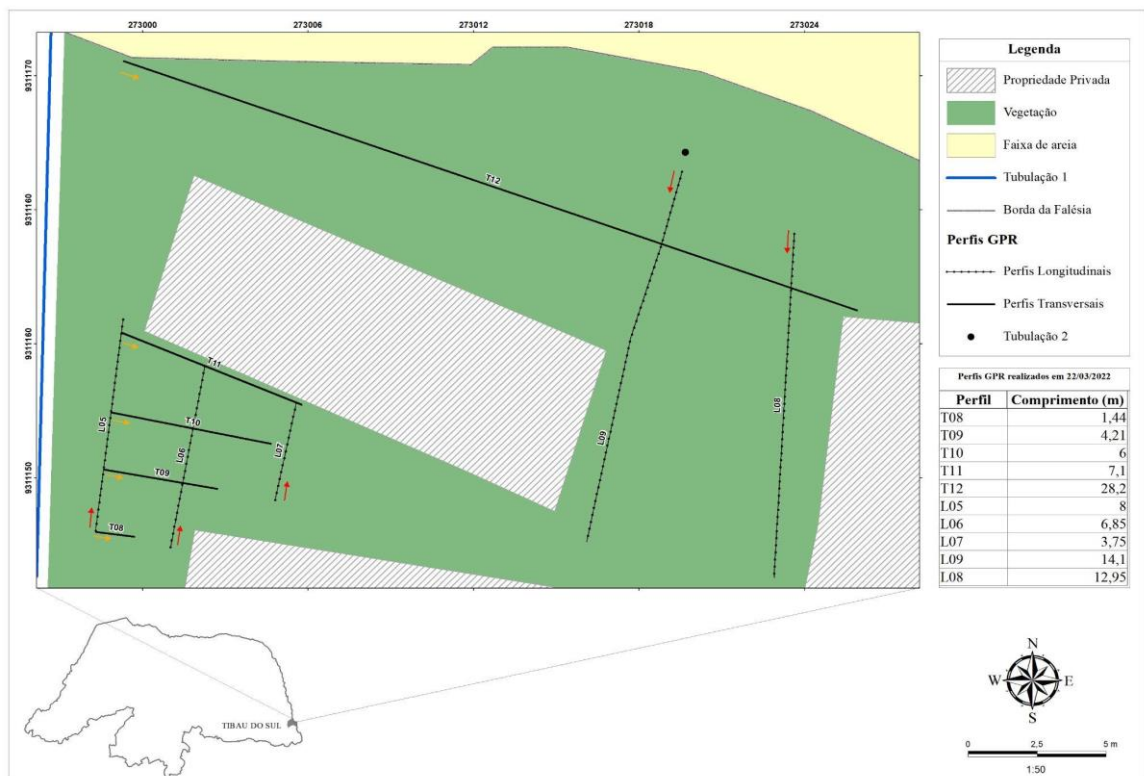


Figura 42: Mapa esquemático dos perfis GPR realizados na propriedade privada, com destaque para a direção das linhas L (vermelho) e T (laranja).
Fonte: Autora (2022).



Figura 43: Presença de outra tubulação oriunda da propriedade, que deságua na base da falésia, provavelmente da fossa interna da residência. Não é visível da parte da praia, mas ao visitar o local foi observado próximo a escada (em amarelo) uma tubulação que termina entre a vegetação, a linha branca é uma projeção dela no terreno privado. Fonte: Autora (2022).

Ao todo, foram executados 21 perfis com o equipamento GPR, sendo 12 com direção NW-SE (E-W) e 9 N-S divididos em transversais e paralelas à orientação da tubulação exposta na falésia, observada na praia (Figura 44). A revelação desta tubulação é um indicativo da constante ação do processo erosivo, tanto de sua frequência quanto na aceleração deste fenômeno. Segundo relatos, a tubulação possui cerca de 30 anos, demonstrando seu grande potencial para deterioração dos bens privados, como já acontece ao bem natural. A aquisição dos dados não contou com odômetro. Desse modo, a medição do comprimento de todos os perfis foi realizada de forma manual com fita métrica. Os perfis foram alocados nas áreas disponíveis para passagem do equipamento e a delimitação do comprimento sucedeu do mesmo modo; a identificação do início e o fim dos perfis foi feita com piquetes de madeira, conforme Figura 45.

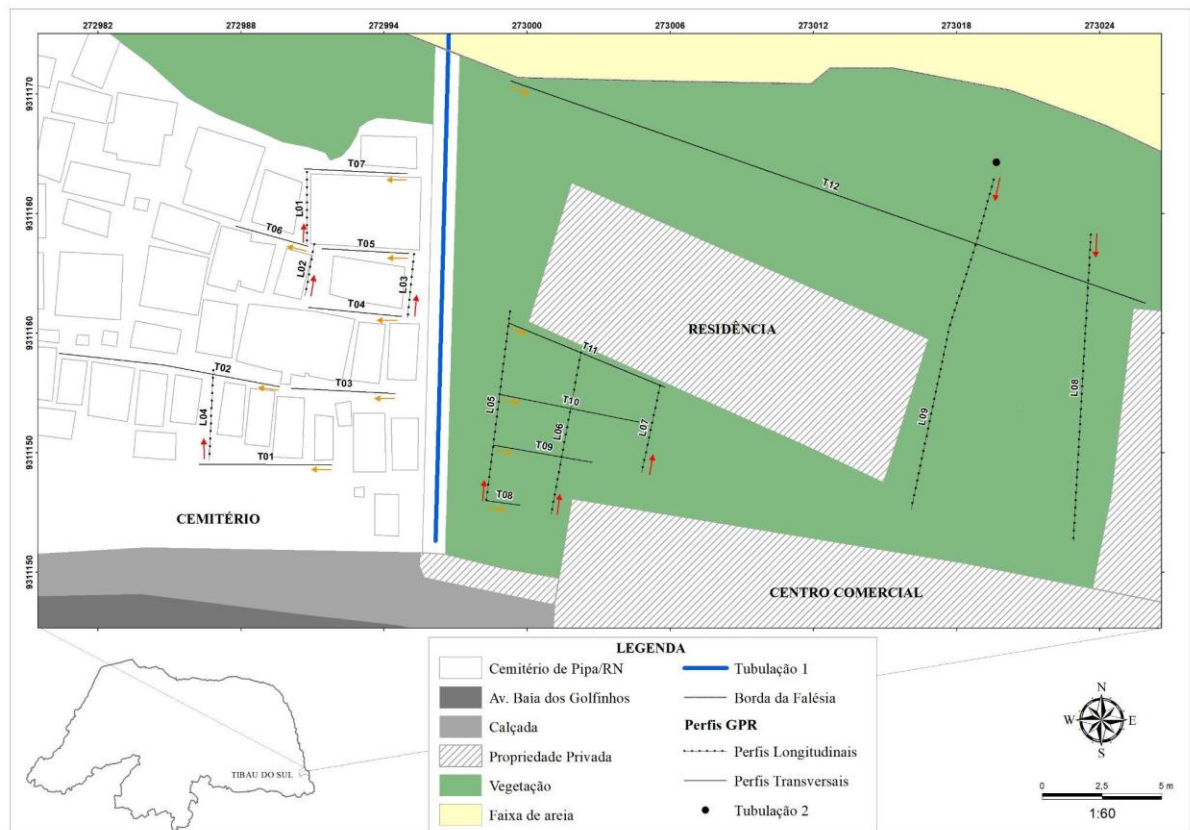


Figura 44: Mapa esquemático da área de estudo, com destaque para a direção das linhas L (vermelho) e T (laranja). Fonte: Autora (2022).



Figura 45: Medição manual do comprimento dos perfis com fita métrica, e delimitação com piquetes de seus limites. Fonte: Autora (2022).

4.5. Processamento dos Dados

O processamento dos perfis geofísicos é composto por uma série de técnicas de tratamento de sinal aplicadas ao dado digitalizado, gerando seções mais nítidas e melhor resolução temporal das camadas em subsuperfície (DOURADO, 2004). Esta etapa foi executada no software *ReflexW*, versão 8.5.8 da empresa Sandmeier (SANDMEIER, 2020). Após a importação dos dados, foram realizadas diferentes análises de aplicações de filtros para melhorar a sua visualização e razão sinal/ruído, culminando em um fluxo de processamento de 8 etapas (Figura 46), para posterior interpretação. A sequência do processamento seguiu esta ordem: Correção do Tempo Zero ou Estática, *Dewow*, *Background Removal*, Remoção do Ganho, *Energy Decay*, Filtro F-k e o Balanceamento Espectral. A topografia do terreno é de baixa inclinação, portanto não foi necessário a correção topográfica. Devido à ausência do odômetro verificou-se uma incompatibilidade entre o comprimento dos perfis apontado pelo software e seus tamanhos reais. Assim, conforme SANDMEIER (2020) foi executada a reamostragem que corrige o espaço entre os traços sem alterar sua quantidade, através do incremento medido pelo tamanho real do perfil dividido pela quantidade de traços menos um, por meio da equação:
$$i = \frac{\text{distância real do perfil}}{(n^{\circ} \text{ de traços} - 1)}.$$

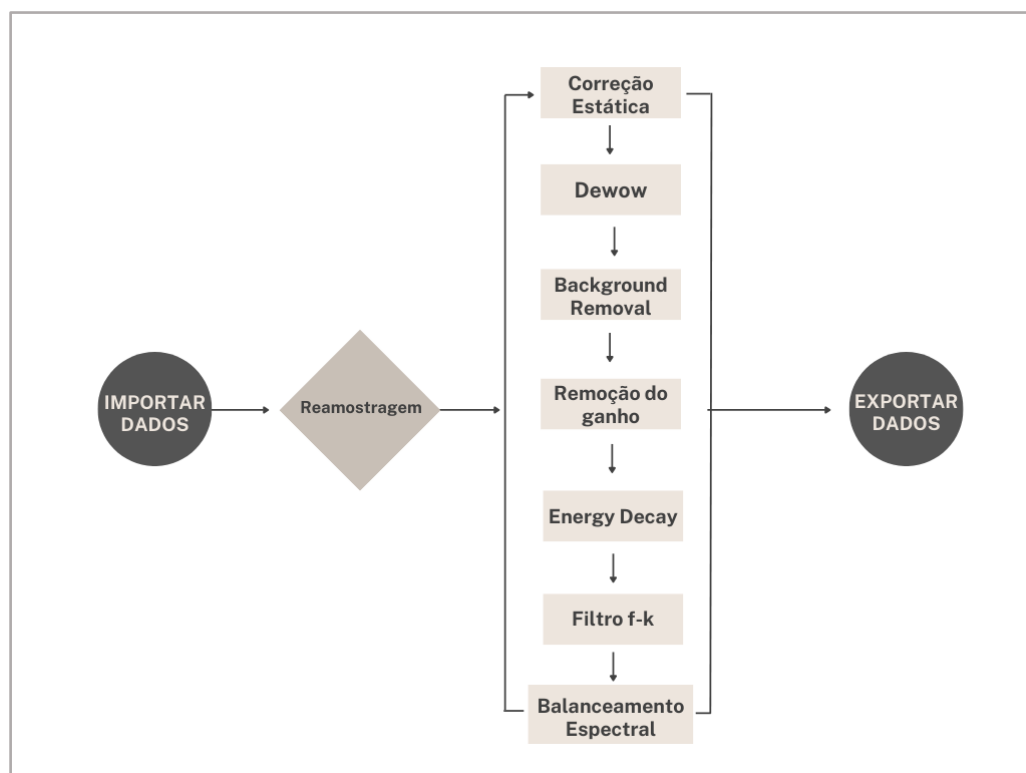


Figura 46: Fluxograma do processamento dos perfis GPR.
Fonte: Autora (2022).

A correção estática é utilizada para remover os registros nulos, causados pelo atraso do sinal de retorno na antena receptora (CIAMPOLI; TOSTI; ECONOMOU; BENEDETTO, 2019), alinhando-se o tempo zero para a posição da superfície analisada. Em seguida, foi aplicado o filtro *Dewow* para eliminar as componentes de baixa frequência produzidas pela indução eletromagnética entre as antenas, ou seja, ruídos eletrônicos e estáticos inerentes ao sistema GPR (SZYMCZYK; SZYMCZYK, 2013). De acordo com SZYMCZYK; SZYMCZYK (2013), às variações espaciais geradas pelo deslocamento das antenas promovem efeitos da onda direta (aéreas e terrestres) no dado. Para neutralizar esses ruídos de alta frequência aplica-se o *Background Removal*. Já, para melhorar a visualização do dado e intensificar sua amplitude durante a aquisição, foi adicionado um ganho artificial, que corrige a atenuação natural, porém, no processamento, remove-se este ganho, pois ele tende a mascarar o sinal. Assim, a aplicação do ganho apropriado foi executada com o filtro *Energy Decay*, do tipo *Spreading Exponential Compensation* (SEC-gain). Esse filtro corrige os efeitos da perda de sinal relacionados à propagação das ondas e realça os refletores de interesse, atenuando o espalhamento geométrico da onda (CIAMPOLI; TOSTI; ECONOMOU; BENEDETTO, 2019).

O filtro f-k foi adotado para suavizar as ondas de interferência provenientes dos refletores inclinados e realçar os mergulhos almejados, por meio do domínio frequência-número da onda e seu *spectrum* f-k correspondente (SANDMEIER, 2020). Posteriormente, foi realizado o balanceamento espectral do dado com o filtro passa-banda, retirando os ruídos que estão fora da faixa de frequência central da antena utilizada. Esse filtro elimina os componentes de baixa e alta frequências permitindo manter a amplitude dos refletores reais próximos aos valores centrais da frequência (PINTO & SILVA, 2017; SANDMEIER, 2020). Foram definidos valores de cortes diferentes para cada antena, visto que o Detector Duo opera com duas, 0-550 MHz para antena de 250 MHz e 300-1000 MHz para antena de 700 MHz.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Resultados

As análises dos radargramas foram baseadas no capítulo de sismoestratigrafia do livro “Estratigrafia de Sequências: Fundamentos e Aplicações”, organizado por Ribeiro (2001). A identificação da geometria externa caracterizou as seguintes fácies na área de estudo: subparalelas, caóticas, lenticulares e contorcidas, conforme Figura 47. Segundo o autor citado, as feições subparalelas são indicativas de deposição uniforme dos estratos, relacionadas a processos sedimentares de tração, decantação, flocculação e precipitação, e podem estar presentes em sistemas fluviais, plataformas clásticas e carbonáticas, entre outros. Os sistemas deposicionais progradantes são associados a processos de escorregamentos e deformações posteriores ao período de sedimentação, que podem ocorrer em cânions submarinos e taludes continentais (RIBEIRO, 2001). Já a desordem dos refletores no radargrama é caracterizada pelas feições caóticas.

O GPR forneceu perfis de 250 e 700 MHz para todas as linhas executadas, mas, para a interpretação detalhada dos dados, as de 250 MHz foram escolhidas, pois ainda apresentam sinais até os 6 metros de profundidade que a janela temporal do equipamento atingiu. Entretanto, os perfis de 700 MHz foram importantes para confirmação das feições mais superficiais, por volta dos 3 metros de profundidade. Ao todo, os 42 perfis realizados em campo apresentaram fraturas verticalizadas por toda sua extensão que sugerem instabilidade e falta de coesão e competência do material rochoso.

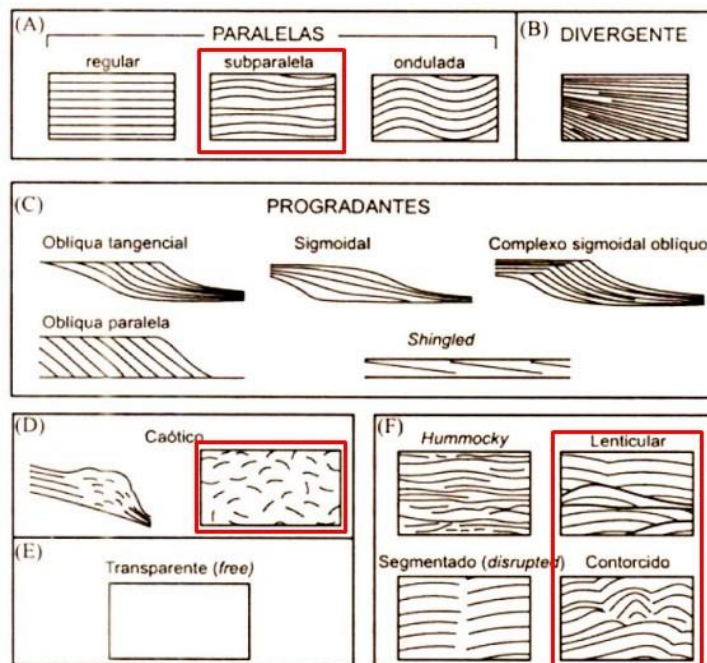


Figura 47: Esquemas de padrões de configurações de fácies sísmicas.
Fonte: Modificada de Ribeiro (2001).

O retrato da subsuperfície da área de estudo apresenta configuração similar entre o cemitério e a propriedade privada. Ambas possuem uma camada superficial de solo residual por volta de 10 ns ou 0,6 metros de profundidade. Entretanto, no cemitério foram identificadas 4 fácies sismoestratigráficas, da base para o topo. São elas: caótica (entre 6-4,2 metros), subparalela (4,2-2,5 metros), lenticular (2,5-0,6 metros) e subparalela (até 0,6 metros), conforme Figura 48. Na propriedade, classificaram-se 3 fácies, respectivamente: caótica (4-6 metros), contorcida (0,6- 4 metros) e subparalela (até 0,6 metros), observadas na Figura 49. As fraturas estão presentes ao longo de todos os perfis, variando o seu comprimento entre 10 cm a 1 metro, aproximadamente, mas na propriedade elas apresentam maior densidade e dimensões, como nos perfis L8 (1,6 metros) e L9 (1,75 metros).

Além da propriedade ter mais fraturas, há anomalias mais frequentes no intervalo de 0,5-2 metros de profundidade, em média entre os perfis, mas apenas o T11 não foi identificado com refletores anômalos. Já no cemitério, poucos registros de anomalias foram detectados, somente nos perfis T7 e T2, ambos em 1,25 metros de profundidade. Uma importante distinção entre o cemitério e a propriedade são as camadas de fácies contorcidas e lenticulares, depositadas em regime progradante, pois nos casos que apresentaram anomalias foram classificadas como contorcidas:, como nos perfis T2 e T7 (cemitério), L5-L9 e T8-T12 (exceto T11) na propriedade privada.

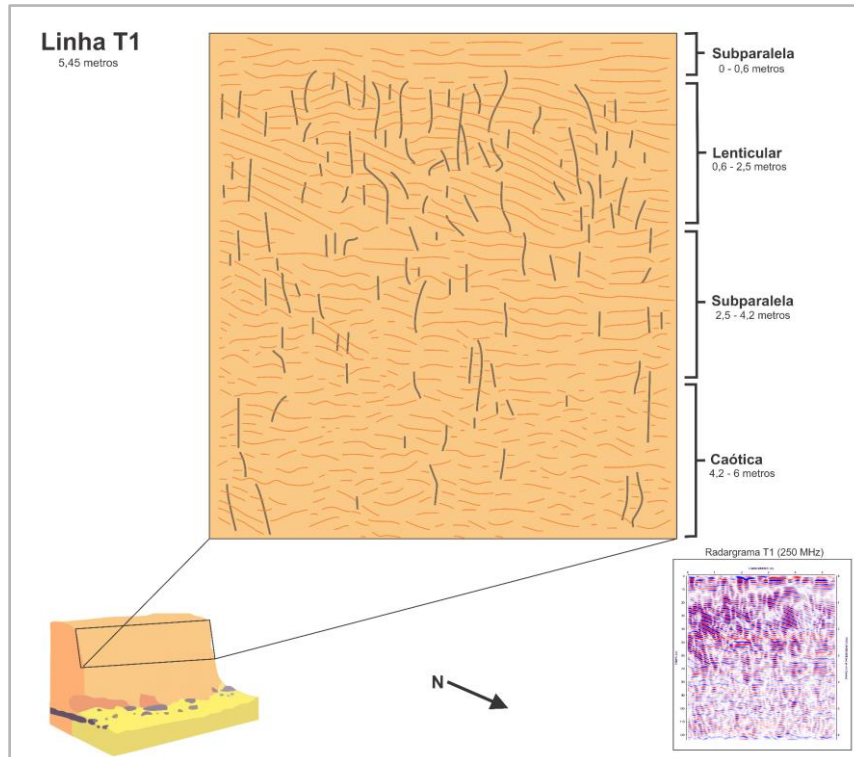


Figura 48: Esquema representativo da subsuperfície do cemitério, como no perfil T1, com presença de fraturas. Fonte: Autora (2022).

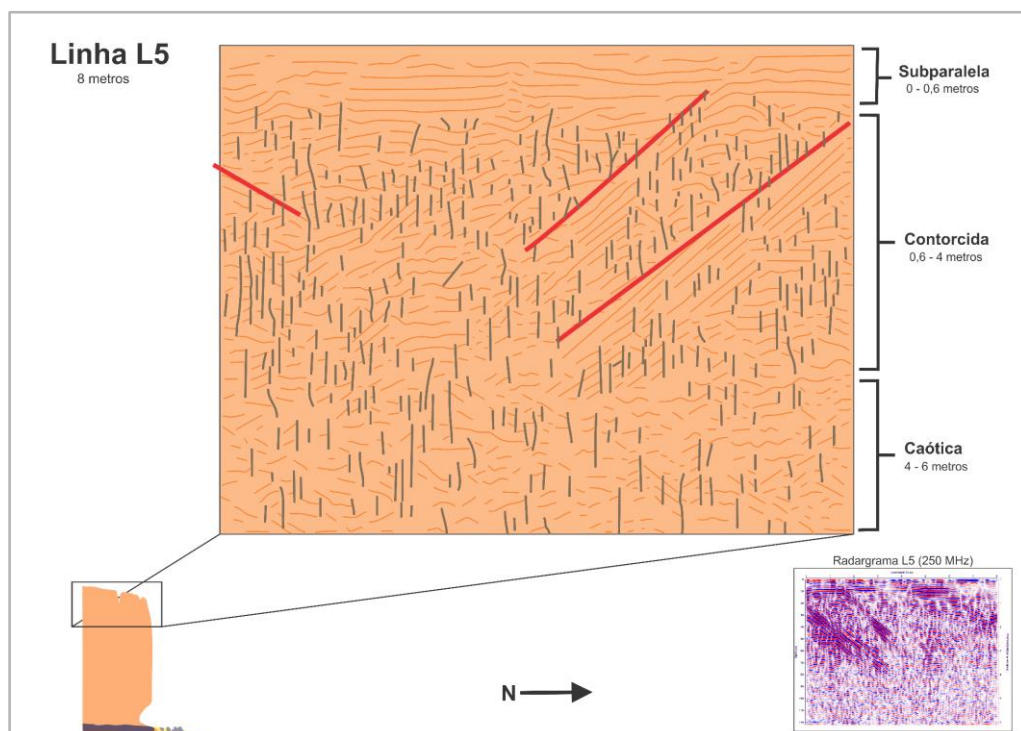


Figura 49: Esquema representativo da subsuperfície da propriedade privada, padrões anômalos destacados em vermelho, e alta densidade de fraturas. Fonte: Autora (2022).

As anomalias podem ser tubulações ou raízes de plantas, pois ambas apresentam sinais hiperbólicos parecidos no radargrama. O que auxilia na distinção é a avaliação de campo, caso haja presença de vegetações ou indícios de drenos no local. Na área de estudo, o alvo em encontrar a tubulação exposta (Tubulação 1) por meio do GPR foi inviabilizado, mas outra tubulação foi observada em campo, a Tubulação 2. No processamento de dados, sua presença foi confirmada através do cruzamento de duas linhas na propriedade privada, a linha L9 que cruza em 20,8 metros da T12. Ambas as linhas apresentaram anomalias, aproximadamente, a 1,3 metros de profundidade. Conclui-se que esta seja a localização da tubulação 2.

Todavia, um padrão anômalo similar foi encontrado na linha L8, que ao cruzar com a T12 também se verificou uma sobreposição de anomalias (Figura 50), o que pode indicar uma outra tubulação, devido a sua profundidade por volta de 1,2 metros. Próximo da linha T12, no final da propriedade, havia 3 árvores (uma mangueira e dois coqueiros, respectivamente do início para o fim), sendo a última delas um coqueiro entre as linhas L8 e L9. Ao observar a intensidade do sinal no radargrama da linha T12, pode-se inferir que suas raízes contribuíram para acentuar o sinal nesta região. A primeira anomalia destacada na Figura 50(lado esquerdo) está associada ao outro coqueiro mencionado acima, com sua raiz alcançando as profundidades de 0,6 a 0,8 metros.

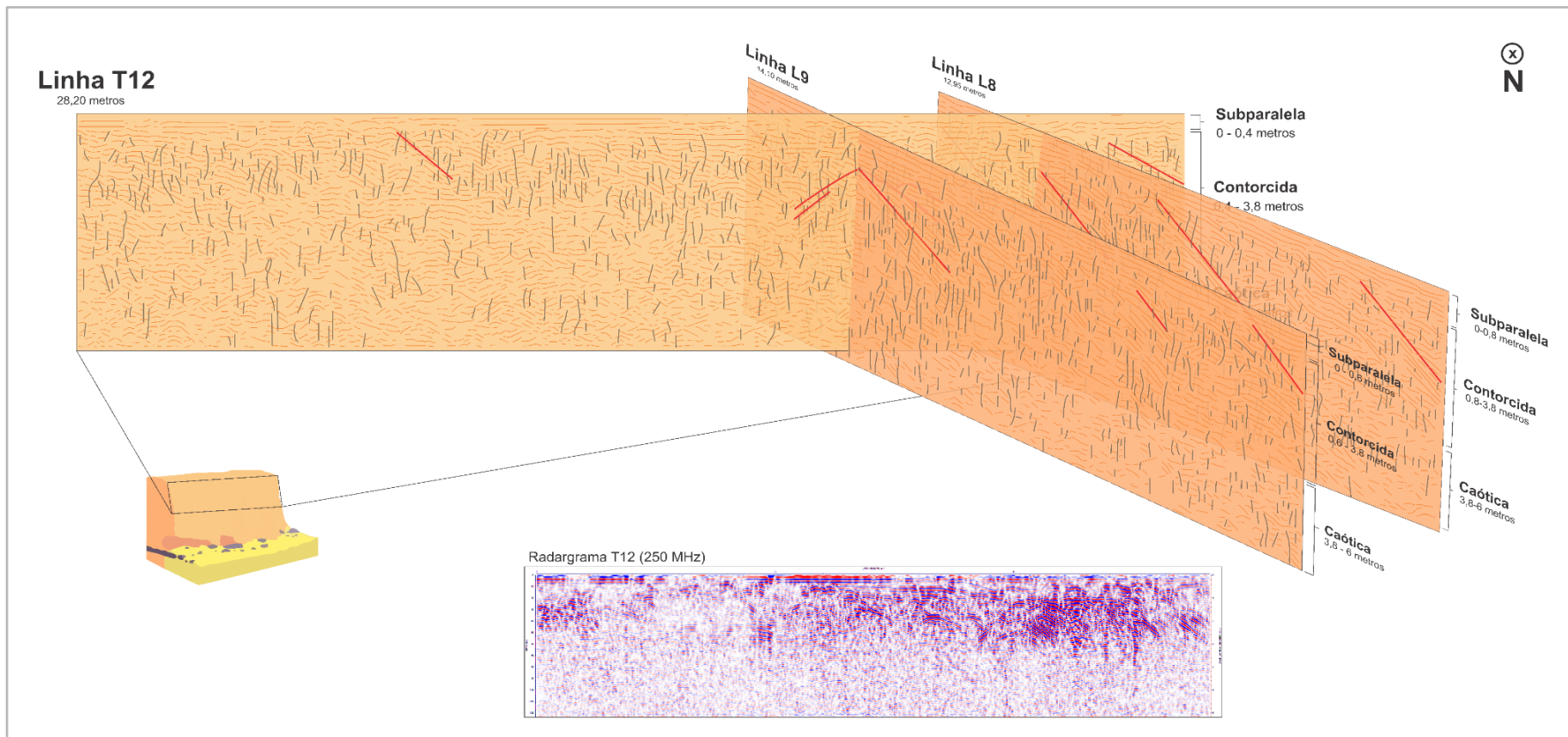


Figura 50: Principais anomalias encontradas na subsuperfície da propriedade privada.
Fonte: Autora (2022).

A avaliação de campo é extremamente importante pois contribui para explicar o melhor panorama das informações. Apenas os dados de GPR não são conclusivos para afirmar qual objeto está gerando a anomalia observada no radargrama. Ao analisar fatores externos que afetam o meio físico, na propriedade foram encontradas outras fontes do escoamento pluvial que se ligam à tubulação exposta na face da falésia. A propriedade possui um centro comercial, na região voltada para a avenida, e uma residência, na porção mais próxima da borda da falésia. Conforme exposto na Figura 51, foi possível notar que o sistema de drenagem pluvial dos estabelecimentos é drenado para a grade no portão de entrada que retém a água da avenida e a direciona para a tubulação 1. Na Figura 51E, é possível observar que a cota da residência é inferior à da Avenida e, quando chove, a água é naturalmente escoada para esta depressão no terreno. Além disso, as lascas na pintura do portão de entrada são registros de onde o nível da água alcançou em chuvas pretéritas, sendo ele alinhado à calçada. A prática de escoar a água pluvial para a falésia é nociva para intensificação da sua retração e, quando repetida por outros estabelecimentos, pode gerar eventos adversos com mais frequência. Isto também é acrescido nos fatores que influenciam os níveis de risco, perigo e vulnerabilidade da região.





Figura 51: Drenagem pluvial do centro comercial é escoada para tubulação exposta na praia. Em (A), (B) e (C) é possível observar o caminho da drenagem até chegar na embocadura para a tubulação 1 (D); (E) desgaste na pintura do portão e desnível da residência em c comparação com a avenida; (F) estabelecimentos comerciais que fazem parte da propriedade privada. Fonte: Autora (2022); Google (2020) na imagem F.

Em resumo, ao analisar os dados da área de estudo, é perceptível uma maior interferência no terreno na região da propriedade privada que no cemitério. A perturbação antrópica promove uma regularidade de anomalias nos radargramas da propriedade. Estas anomalias podem estar correlacionadas com a intensidade de fraturamento da rocha, visto que promovem atividades erosivas mais potentes. As principais anomalias destacadas são a tubulação 2 e a anomalia na linha L8 (Figura 52), e assim como a tubulação exposta, estão associadas com as voçorocas formadas na face da falésia e blocos de lateritas na base. A junção

desses elementos (fraturas, canalização de água pluvial, voçorocas e resquícios de deslizamentos anteriores) é uma combinação que estimula futuras quedas de blocos.



Figura 52: Anomalias principais encontradas na área de estudo.
Fonte: Autora (2022).

5.2. Discussão

A erosão é o fator determinante para retração da falésia no caso de Pipa/RN, visto que a erosão pluvial apresenta grau elevado e acelerado pelas ações antrópicas, resultando em eventos mais frequentes de movimentos de massa (PIERRI, 2008, SILVA, 2019; IDEMA, 2021). A ocupação desordenada no topo da falésia gera conflitos socioeconômicos e ambientais, envolvendo riscos potenciais à população (SILVA *et al.*, 2020). Segundo o IDEMA (2021) a ausência de sistemas de drenagens e a impermeabilização acentuada do solo somados à ocupação da falésia favorecem negativamente para sua falta de estabilidade e degradação. A queda de blocos que resultou no acidente em 2020 foi influenciada também por estes fatores. Desta forma, a SEMURBMO (2020a & 2020b) classificou a faixa onde ocorreu o acidente e seu entorno em grau de risco crítico, e diversos empreendimentos apresentam vulnerabilidade

e risco de colapso do talude. Esta faixa estende-se para a área de estudo, que está a apenas 70 metros de distância do local do acidente.

O grau de fraturamento do arenito foi outro fator importante para a causa do acidente, feições que também estão presentes na área de estudo. Essas fraturas podem ser comparadas às grandes concentrações de sets de fraturas encontrados pelos perfis de GPR realizados pelo Projeto Falésias na Praia de Cacimbinhas, além da caracterização geológica em depósitos eólicos, rochas da unidade Pós-Barreiras (até 6 metros de espessura) e Formação Barreiras, com feições de erosão pluvial nas descontinuidades (AMORIM & MAIA, 2021b). Em relação a seção estratigráfica produzida pelo mesmo estudo, a camada acessada pelo GPR na área de estudo representa a camada superior da perfilagem de raios gama (γ) do Projeto Falésias, ou seja, um arenito médio com matriz lamosa, de coloração branca e com intenso lixiviamento da unidade Pós-Barreiras.

O topo da falésia de Pipa apresenta um conjunto de irregularidades encontradas pelo IDEMA (2021), em sua maioria atribuídas à ação antrópica. As mais preocupantes são: edificações muito próximas à borda da falésia, encostas íngremes com cicatrizes de deslizamentos, vegetação de grande porte que pode gerar instabilidade no solo, escadarias de acesso às praias destruídas ou interditadas, e ausência ou ineficiência de calhas de drenagem das águas pluviais dos imóveis. Estes fatores promovem ações de fiscalização, em nível federal (MELO, 2013), como por exemplo a interdição parcial em setembro de 2022 da Pousada Marajoara pelo Ministério Público Federal do Rio Grande do Norte, devido aos riscos de deslizamentos na área das falésias da Praia de Pipa (MPF RN, 2022). Situação similar ocorreu com o embargo da obra do Cais de Pipa pelo mesmo órgão, em 2018, também pelo risco de movimentação de massa (SEMURBMO, 2020b), investigado pelo Ministério Público do RN (MPF RN, 2020).

Após a tragédia de 2020, vários empreendimentos e propriedades foram alvo de vistorias com base no Anexo Único da Resolução N°04/2006 (versão outubro/2011) com alterações da Resolução CONEMA N°02/2014, que estabelece parâmetros de classificação do porte e potencial poluidor de empreendimentos que promovam a degradação ambiental (IDEMA, 2021). Muitas destas edificações deixaram de informar sua situação de regularidade pois os documentos necessários estavam associados ao período em que o Município de Tibau do Sul exerceu competência para o licenciamento ambiental, o que promoveu incongruências e

conflitos com normas anteriores (vide tópico 2.6 Legislações do capítulo de Referencial Teórico). Em relação ao método de drenagem ou relativo a este tema, o qual influencia o vigente estudo, foram elencados os seguintes locais vistoriados pelo IDEMA: Espaço Lampião, local sem calhas de drenagem de água pluvial, indicativo de que esta é despejada na crista da falésia; U Bistrô, onde foram observadas tubulações pluviais com incidência direta em direção à falésia (Figura 53A); Cemitério de Pipa, área com muita infiltração no topo e base da falésia, vegetação inclinada remetendo sinal de deslizamentos, e tubulação exposta na face de praia (corrigido pelo vigente trabalho como sendo da propriedade privada, vide capítulos 3 e 4).



Figura 53: Irregularidades vistoriadas pelo IDEMA destacadas em amarelo e vermelho, respectivamente: (A) tubulação observada no U Bistrô; (B) Tubulação exposta na face da falésia.

Fonte: IDEMA (2021).

A vistoria do IDEMA foi embasada na avaliação de campo promovida pela SEMURBMO (2020b) que, no caso de irregularidades com drenagem, constatou uma “boca de lobo” em frente ao ponto comercial Raio de Sol, na Avenida dos Golfinhos, que coleta água pluvial e apresenta ligações clandestinas, e está relacionada à erosão lateral na residência privada N°506. Além disso, notaram desvios nos empreendimentos U Bistrô (despejo de água no todo da encosta) e Espaço Lampião (ausência de calhas coletoras, direcionando a água para a falésia). Ainda, apontaram relatos de rompimento de tubulações com danos observados no muro de arrimo do imóvel N°506. A CAERN disponibiliza informações da rede de abastecimento e esgotamento sanitário da Praia de Pipa (Figura 54), onde nota-se que as tubulações direcionadas para a face da falésia possuem caráter privado. Todos estes dados reforçam que a prática em escoar a drenagem pluvial para a falésia é bastante comum, muitos

imóveis destinam essa água de maneira não padronizada também para via pública e rede de esgoto, visto que a caixa coletora de água pluvial da Av. Baía dos Golfinhos despeja todo conteúdo na base da falésia, gerando uma sobrecarga de um sistema já precário e tornando-o impróprio ao uso (SEMURBMO, 2020b).

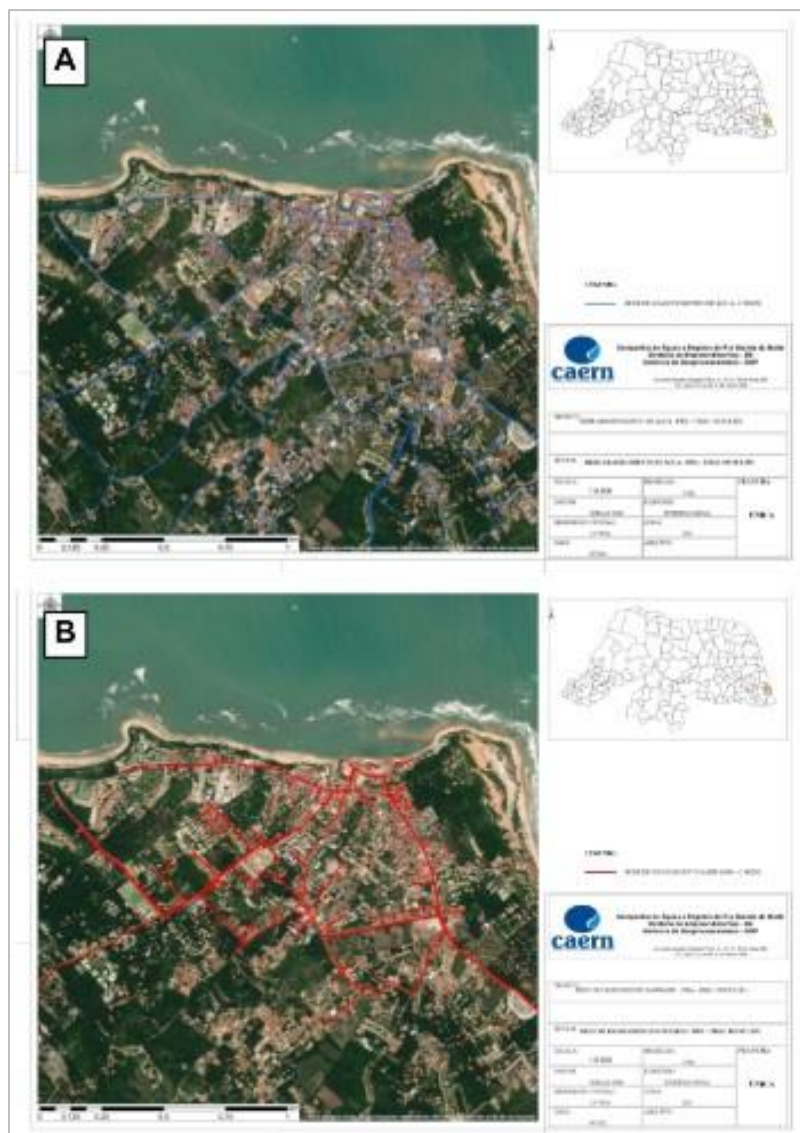


Figura 54: Rede de abastecimento (A) e esgotamento sanitário (B) da praia de Pipa/RN.
Fonte: CAERN (2021).

A necessidade da reorganização da rede de drenagem de águas pluviais é apontada nessas vistorias, onde a maioria dos imóveis não possui um sistema de drenagem eficaz, e seu fluxo desordenado é responsável por gerar erosão e saturação do solo (IDEMA, 2021). O tubo de PVC, que faz parte da área de estudo, não pode ser deixado a céu aberto devido sua fragilidade, sem qualquer amparo para diminuir a força que a água chega ao solo

(SEMURBMO,2020a). Recentemente, houve requerimentos propostos pelos vereadores Adaebson Silva e Ilana Barbosa voltados para solucionar alagamentos nas vias do município, principalmente em períodos chuvosos. O requerimento N°002/2021 solicita a adoção de medidas preventivas para o escoamento de águas pluviais, manutenção de galerias das vias contempladas com sistema de drenagem e serviços paliativos para aquelas não contempladas (ANEXO IV). A indicação conjunta N°002/2021 propõe a implementação da pavimentação e criação do sistema de drenagem nas ruas do distrito de Pipa (ANEXO V). Contudo, também é fundamental a criação de projetos que diminuam o impacto no maciço rochoso, como por exemplo as escadas com dissipadores de energia, eliminando soluções individuais e paliativas de curto prazo (SEMURBMO, 2020b; IDEMA, 2021).

O cemitério de Pipa foi um local destacado pelas vistorias que, apesar de não apresentar anomalias preocupantes nos radargramas analisados neste estudo, está muito próximo do ponto de ruptura do relevo. A presença de jazigos na borda da falésia entra em conflito com a faixa de segurança de 10 metros, o que, adicionando à situação da drenagem pluvial e erosão basal persistente, torna o local extremamente perigoso (SEVERO, 2005; SEMURBMO, 2020b, IDEMA, 2021). Previsões de realocação de toda essa faixa foram propostas pela SEMURBMO (2020b) e Amorim & Maia (2021b) como medidas de médio a curto prazo dependendo da velocidade de retração da encosta. As obras de realocação não são novidade na região, pois o Cemitério da Praia Santa Cruz das Areias de Baía Formosa/RN, Município ao sul de Tibau do Sul, foi transferido em 2010 para ceder espaço a um empreendimento do grupo português B.F. Investimentos Turísticos Imobiliários LTDA (TRIBUNA DO NORTE, 2010). O processo teve início em 2004, com a venda de 20,5 hectares, que incluía o cemitério, autorizada pelo prefeito da época.

As anomalias encontradas na propriedade privada da área de estudo foram associadas à tubulação ou raízes de vegetação na linha T12, que faz parte do presente estudo, foram utilizados os seguintes critérios para amparar os resultados: as profundidades alcançadas pelas raízes do coqueiro-anão variam entre 0,2 a 0,6 metros (DE MIRANDA *et al.*, 2003); raízes de mangueiras, em solo arenoso de tabuleiro costeiro, podem atingir até 0,8 metros (COELHO *et al.*, 2001); e tubos de PVC utilizados para saneamento e redes coletoras são alocados até 1,5 metros de profundidade (SANEPAR, 2012). Assim, as anomalias projetadas em profundidades acima de 1 metro de profundidade foram consideradas possíveis tubulações, como as encontradas nas linhas L8, L9 e T12. A vegetação na propriedade é bastante abundante,

principalmente na borda da falésia, onde encontram-se as espécies mais robustas, como as árvores citadas. De acordo com Olsen (2009), o avanço desta vegetação, principalmente a não nativa, em terrenos íngremes e costeiros podem atuar diretamente no intemperismo biológico, promovendo dilatação de fraturas já existentes ou criando novas, além de adicionar carga sobre a rocha.

A instabilização dos taludes costeiros é gerada por um somatório de fatores, sejam muitas construções, presença/ausência de vegetação, impermeabilização e saturação do solo, e rompimento de tubulações próximos à crista da falésia, que em conjunto configuram riscos de ruptura do talude, principalmente em períodos chuvosos. A tentativa de estabilizar encostas usando plantas tem se mostrado um impacto negativo (OLSEN, 2009), e os níveis de coesão das rochas das falésias de Tibau do Sul e Pipa decaem por volta de 80%, em condições de elevada umidade natural (SEVERO, 2005). O conjunto desses fatores, que aumenta as tensões cisalhantes no maciço, também é agravado pela erosão marinha, e essa, por conseguinte, é influenciada pelo aumento do nível relativo do mar e as mudanças climáticas, que da mesma forma afetam o regime de chuvas. O processo erosivo é um processo natural mas sua intensidade, nas falésias de Pipa, tem sido agravada pela ação antrópica. Esta dinâmica causa alterações adversas, percebidas apenas quando algum bem é ameaçado ou destruído (MELO, 2013). Logo, o monitoramento costeiro deve abranger a fiscalização do despejo das águas servidas, para inibir o excesso de percolação de água no solo e proteger as falésias da incidência direta das águas pluviais (IDEMA, 2021).

Garantir a qualidade ambiental em regiões litorâneas é fundamental para evitar conflitos nas esferas sociais, turísticas e econômicas locais (SCUDELARI, 2007). O papel da prefeitura é preservar vidas e restabelecer as atividades econômicas, impondo limites baseados em critérios técnicos (SEMURBMO, 2020b). Amorim & Maia (2022) indicaram medidas mitigadoras conforme Informação Técnica N°06/2021 para o Distrito de Pipa, dentre as quais a execução de um sistema de drenagem e plano de desinvestimento estariam viáveis nos âmbitos técnico, ambiental e econômico. O IDEMA (2021) ressalta a importância de atribuir responsabilidade pelo custeio das medidas adotadas ou responsabilidade da administração dos riscos nas áreas já afetadas, conforme texto da Lei 13.465/17, art. 33, II. A utilização do método GPR é uma forte ferramenta para integrar futuros estudos e projetos de inspeção de infraestruturas, pleiteados pela referida Lei. O processo investigativo envolve a geologia forense por trabalhar com interdisciplinaridade, principalmente numa região costeira onde

informações geológicas são indispensáveis para embasar decisões, pois é uma ferramenta de parâmetros para auditorias em áreas irregulares, visto que ao longo dos anos, essa área de pesquisa produziu laudos e informações técnicas de alta qualidade para policiais, promotores, procuradores e juízes (SALVADOR & SILVA, 2018).

A Praia de Pipa é destaque mundial no âmbito turístico e as falésias são extremamente importantes para identidade local. Além disso, preservá-las deve ser foco principal dos gestores municipais, e reduzir o impacto antrópico sobre elas fará com que possam ser aproveitadas por mais tempo. Com relação aos resultados do vigente estudo, novas vertentes podem ser exploradas, visto a limitação da janela espectral de penetração do equipamento em até 6 metros. Além disso, a correção topográfica do terreno pode ser aperfeiçoada através da aplicação de um GPS RTK que possui maior resolução que o GPS Garmin Etrex 30x utilizado. Outro ponto importante foi as dificuldades em realizar mais avaliações de campo, devido à pandemia do Covid-19, que restringiu o tempo das atividades externas à área de estudo para aprimorar os dados já existentes.

6. CONCLUSÃO

As falésias de Pipa são patrimônio natural e paisagístico de Tibau do Sul, concebendo a identidade do município e representando um dos pontos turísticos mais famosos do Brasil, com reconhecimento em diversas premiações internacionais de turismo. A conservação deste patrimônio deve ser considerada meta de gestão nas políticas públicas, devido sua relevância nos setores da economia local. Esta configuração destaca uma relação direta entre o fascínio da paisagem, interesse turístico e problemas de instabilidade nas encostas. A ocupação desordenada no topo das falésias promove alterações geomorfológicas e estruturais, expressivas principalmente nas regiões mais adensadas, incluindo a drenagem pluvial como um fator significativo para análise da estabilidade do talude. A erosão é um processo natural, mas o desvio de águas pluviais para as falésias, não. O recuo do talude vem intensificando-se à medida que as ações antrópicas são mais efetivas sobre o terreno, além de gerarem conflitos socioeconômicos e riscos à população. Como exemplo, o acidente em novembro de 2020 que vitimou uma família nativa da região.

O ambiente costeiro é cíclico e dinâmico, compreender sua configuração e fatores que agravam suas consequências é fundamental para manter a segurança nessas áreas, seja para turistas ou habitantes e comerciantes locais. A presença de tubulações escoando água em áreas de proteção são potenciais agravantes para a retração das falésias. Os deslizamentos de massa e queda de blocos são bastante comuns na Praia de Pipa em períodos chuvosos, como o caso transcorrido em junho de 2022 descrito no tópico 2.3.1, capítulo 2 do presente trabalho. Os impactos dos fenômenos naturais somados à intervenção antrópica podem resultar em episódios catastróficos mais frequentes. O efeito bastante famoso da evolução deste somatório são as mudanças climáticas, que também afetam diretamente as taxas de erosão marinha e pluvial, devido ao aumento do nível do mar e alterações nos regimes de chuvas.

O presente trabalho utilizou o método GPR para analisar a possível correlação entre a atividade antrópica (desvio da drenagem pluvial em direção à falésia) e os eventos adversos (deslizamento de terra e blocos), e se esta informação geológica-geofísica contribui para determinação de responsabilidade sobre o evento ocorrido. Foi constatado que a atividade antrópica atua na porção Pós-Barreiras, em um arenito bastante fraturado, em até 1,3 metros de profundidade, onde raízes de vegetação e tubulações são alocadas. Além disso, há uma maior ocorrência de fraturas e anomalias na porção da propriedade privada. A presença das tubulações

1 e 2 na propriedade privada e outras irregularidades, em vistorias ao longo da Avenida Baía dos Golfinhos produzidas pelos órgãos públicos IDEMA e SEMURB, demonstram que é um hábito comum a canalização da drenagem pluvial sobre a falésia entre os residentes da Praia de Pipa. Observadas na face da falésia, voçorocas e blocos de lateritas estão associados a estas tubulações, o que induz a existência de deslizamentos antigos. Dessa forma, toda a porção em até 15 metros da borda da encosta deveria estar incluída numa faixa de segurança, principalmente a área de estudo que apresenta fácies friáveis no topo (AMORIM & MAIA, 2022). Assim, apesar do Cemitério (outra porção da área de estudo) não apresentar anomalias condizentes às tubulações de água pluvial, boa parte do seu espaço está inserido nesta faixa de 15 metros e seria vantajoso realocá-lo (sob a perspectiva geológica da área).

O incentivo aos contínuos monitoramentos costeiros na região de Pipa é extremamente importante, mas também é preciso avaliar os pontos com drenagem pluvial escoada para a falésia, e expandir as avaliações de campo para toda área ocupada do topo da encosta. Os conflitos nas legislações na região da praia de Pipa permitiram essa apropriação em áreas de proteção, mas a manutenção e aprimoramento em pesquisas ou vistorias contribuem para o controle de riscos costeiros e políticas de uso e ocupação do solo (SILVA, 2019). O grande objetivo do monitoramento contínuo é auxiliar as investigações em situações que ocorram riscos à integridade física da população, e fiscalizar onde há irregularidades com drenagem pluvial evita a pressão delas sobre a falésia.

É necessário reconhecer que houve um acidente para realizar todos os esforços para que não ocorra novamente. Muitos não sabem que a prática de jogar água sobre a encosta provoca danos graves, e essa falta de informação precisa ser erradicada. Assim, aconselha-se instrução técnica aos funcionários de empresas e *resorts* que atuam na região, promovendo palestras educativas para a população geral. Reforça-se a demanda em implantar uma rede de drenagem adequada e que impeça infiltrações na borda da falésia. E, caso ocorra a desocupação do Cemitério, recomenda-se a instalação de um memorial à família que sofreu o acidente, tornando um lembrete dos riscos similar às cruzes nas autoestradas.

Conclui-se que o método escolhido é eficaz e não-destrutivo ao meio para constatar anomalias (tubulações, raízes e fraturas associadas) que sejam oriundas de ações antrópicas. Além de recorrer à geologia forense como ferramenta na elucidação de inquéritos com eventos adversos, desastres, acidentes ou até crimes em ambientes costeiros. Para fins comparativos,

novos estudos podem utilizar outros modelos de equipamentos de GPR visando caracterizar os tipos de fraturas e as profundidades que ocorrem; a identificação do contato entre a Formação Barreiras e o Pós-Barreiras; e se as fraturas que ocorrem entre essas unidades estão interligadas e associadas à atividade antrópica. Outra contribuição é comparar o recuo da falésia nos locais que apresentam tubulações com aqueles que não apresentam, ao longo de toda borda da falésia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALHEIROS, M. M.; LIMA FILHO, F. M. **Revisão Geológica da Faixa Costeira de Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte e do seu Embasamento - A Formação Barreiras**. BOLETIM DGEO/UFPE - Série Estudos e Pesquisas, v. 10, 1991. 77-88 p.
- ALMEIDA JÚNIOR, J. E. **Avaliação da retração no curto prazo da falésia marinha ativa da Barreira do Inferno com o uso do Laser Escâner Terrestre**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. UFRN. Natal. 2017. 111 p.
- ALVES, J. A.; RIBEIRO, M. M. R.; DE MIRANDA, L. I. B. **Conflitos socioambientais e desenvolvimento turístico em zonas costeiras: o caso da Praia da Pipa, Brasil**. Revista de Gestão Costeira Integrada-Journal of Integrated Coastal Zone Management, v. 17, n. 2, 2017. 151-161 p.
- AMARAL, R. F. **Contribuição ao Estudo da Evolução Morfodinâmica do Litoral Oriental Sul do Rio Grande do Norte, entre Ponta de Búzios e Baía Formosa**. Tese de doutorado. Curso de Pós-Graduação em Geociências. UFRGS. Porto Alegre. 1999. 252p.
- AMARAL, R. F. **A Dinâmica Ambiental e o Problema da Erosão na Zona Costeira do Município de Tibau do Sul**. IDEMA. Relatório interno. 2001. 43 p.
- AMARAL, R. F.; SANTOS JÚNIOR, O. F.; PEREIRA, D. A. **O uso de técnicas de geoprocessamento para a avaliação da ocupação humana na zona costeira. A construção de um hotel pousada próximo à borda de falésias no Município de Tibau do Sul**. In: VIII Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário, Mariluz, Imbé (RS). Anais (SUBMETIDO), 2001. p. 1-2.
- AMARAL, R. F.; SANTOS JR., O. F.; MENDONÇA, F. J. **A utilização de fotografias aéreas de pequeno formato no monitoramento da falésia de Tabatinga**. In: GIS Brasil 97, 1997. Anais em CD-ROM.
- AMARAL, R. F. **Problema da Erosão na Zona Costeira do Município de Tibau do Sul Projeto PVB 455-01**. Circulação Interna. 2002. 25 p.
- AMORIM, R. F.; MAIA, R. P. **Diagnóstico preliminar das falésias de Pipa e Barra de Tabatinga-RN**. Volume 2. Natal: UFRN, 2021b. 182 p.
- AMORIM, R. F.; MAIA, R. P. **Prognóstico e Medidas Mitigadoras para o Contexto de Riscos nas Falésias de Pipa e Barra de Tabatinga - RN**. Natal: UFRN, 2022. 86 p.
- ANNAN, A. P. **Transmission dispersion and GPR**. Journal of Environmental and Engineering Geophysics. v.0, n.2, 1992. p. 125-136.
- ANNAN, A. P. **Ground Penetrating Radar Workshop Notes**. Sensors & Software Inc., Internal Report, 2001. 197p.
- ANNAN, A. P. **GPR—History, trends, and future developments**. Subsurface sensing technologies and applications, v. 3, n. 4, 2002. 253-270 p.

ANNAN, A. P. **Ground penetrating radar: Principles, procedures & applications**. Sensors & Software Inc. Technical Paper. 2003. 286 p.

AUGUSTO FILHO, O. **Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica**. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS. Anais. Rio de Janeiro: 1992. 721-733 p.

BAÍA DOS GOLFINHOS, EM PIPA, É ELEITA UMA DAS 10 MELHORES PRAIAS DO MUNDO EM PREMIAÇÃO INTERNACIONAL. Agora RN, Natal, 28/07/2021. Disponível em: <<https://agorarn.com.br/ultimas/baia-dos-golfinho-em-pipa-e-eleita-uma-das-10-melhores-praias-do-mundo-em-premiacao-internacional/>>. Acesso em: 20 de out. de 2022.

BARBOSA, J. A. & LIMA FILHO, M. F. **Aspectos estruturais e estratigráficos da faixa costeira Recife-Natal: observações em dados de poços**. Boletim de Geociências da Petrobras, 14(1), 2006. 287-306 p.

BARBOSA, J. A., NEUMANN, V. H., LIMA FILHO, M., SOUZA, E. D., & MORAES, M. D. **Estratigrafia da faixa costeira Recife-Natal (Bacia da Paraíba e Plataforma de Natal), NE Brasil**. Estudos geológicos, v. 17, n. 2, 2007. 3-30 p.

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**. In: Revista do Instituto de Geociências da USP. V.4, n. 2, 2004. 1-12 p.

BEURLIN, K. **A estrutura geológica do Nordeste brasileiro**. In: Congresso Brasileiro de Geologia. Anais. Curitiba: [s.n.], 1967. 151-158 p.

BIRD, E. C. F. **Coastal Geomorphology: An Introduction**. 2ª Ed. Wiley, Chichester, 2008. 436 p.

BRAGA, K. G. **O uso de checklist na identificação de processos erosivos costeiros**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária), Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2005. 109p.

BRASIL, D. L. **Investigação Geofísica Forense e Antropológica com o Método GPR no Cemitério do Tapanã e no Cemitério Perdido de Mosqueiro (Belém, Pará)**. Dissertação (Doutorado) - Curso de Geofísica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2013. 94 p.

BRASIL. Ministério das Cidades; IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Mapeamento de riscos em encostas e margem de rios. Ministério das Cidades e IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas, Brasília., 2007.

BRASIL, R. F. Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 369, de 28 de março de 2006. Brasília. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, 2006.

BRASIL, R. F. Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 303, de 20 de março de 2002. Brasília. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, 2002.

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil**. Brasília, DF: Senado Federal: Centro Gráfico, 1988. BRASIL. Lei nº 12.608 de 10 de abril de 2012. Política Nacional de Proteção e Defesa Civil. 2012.

BRASIL. Lei Nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis Nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Brasil, [2012].

BRASIL. Lei nº 6.766, de 19 de dezembro de 1979. Lei Lehmann, Lei Federal de Parcelamento do solo Urbano. Brasil, 1979. BRASIL.

BRISTOW, C. S.; JOL, H. M. **Ground Penetrating Radar in Sediments**, Geological Society, London, Special Publications, 2003, 211p.

BROLLO, M. J.; TOMINAGA, L. K. (Org.). **Desastres Naturais e Riscos Geológicos no Estado de São Paulo: Cenário de Referência - 2012**. São Paulo: Instituto Geológico, 2012.

CARMIGNANI, L.; FIORI, A. P. **Fundamentos de Mecânica dos Solos e das Rochas: aplicações na estabilidade de taludes**. Rev. e Ampl. Curitiba: Ed. UFPR, 2009.

CAVALCANTI NETO, M. D. **Praias Potiguaras: a 100 beaches from Rio Grande do Norte**/Miguel Dantas Cavalcanti Neto - Natal. 3ª edição, 2006.

CIAMPOLI, Luca Bianchini; TOSTI, Fabio; ECONOMOU, Nikos; BENEDETTO, Francesco. **Signal Processing of GPR Data for Road Surveys**. Geosciences, [S.L.], v. 9, n. 2, 19 fev. 2019. MDPI AG. 96 p. <http://dx.doi.org/10.3390/geosciences9020096>.

COELHO, E. F.; OLIVEIRA, F. C.; ARAÚJO, E. C. E.; VASCONCELOS, L. F. L.; LIMA, D. M. **Distribuição do Sistema Radicular da Mangueira Sob Irrigação Localizada em Solo Arenoso de Tabuleiros Costeiros**. Revista Brasileira de Fruticultura, [S.L.], v. 23, n. 2, ago. 2001. FapUNIFESP (SciELO). 250-256 p. <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-29452001000200009>.

COLLINS, B. D.; SITAR, N. **Geotechnical properties of cemented sands in steep slopes**. **Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering**, v. 135, n. 10, 2009. 1359-1366 p.

CORPOS SÃO TRANSFERIDOS DE CEMITÉRIO HISTÓRICO. Tribuna do Norte, Natal, 19/09/2010. Disponível em: <<http://www.tribunadonorte.com.br/noticia/corpos-sao-transferidos-de-cemiterio-historico/160115>>. Acesso em: 30 de nov. de 2022.

COWELL P. J.; THOM B. G. **Morphodynamics of Coastal Evolution**. In: Carter R. W. G., & Woodroffe C. D., (eds.). Coastal Evolution. Cambridge University Press, 1994. 33-86 p.

DANIELS, D. J. **Ground Penetration Radar**. 2ª ed. The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom, 2004. 300p.

DANTAS, A. L. F. **Dinâmica e cobertura da terra entre 1998 e 2018 e avaliação de risco a movimentos gravitacionais de massa na praia de Pipa, Rio Grande do Norte**. Monografia

(Bacharelado em Geologia) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Departamento de Geologia. Natal, 2021. 118p.

DAVIES, J. L. **Geographical variations in coastal development**. New York: Longman Group. 204p. 1972.

DAVIS, R. A.; FITZGERALD, D. M. **Beaches and Coasts**. Oxford - UK: Blackwell Science Ltd. 2004. 419 p.

DAVIS, J. L. and ANNAN, A. P. **Ground penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy**. Geophysical Prospecting, Vol. 37, 1989. 531–551 p.

DARWIN, C. **On a remarkable bar of sandstone of Pernambuco on the coast of Brazil**. Magazin & Journal Sciences, London, 1841. 257 – 261 p.

DE MIRANDA, F. R.; FREITAS, J. A. D.; MONTENEGRO, A. A. T.; CRISÓSTOMO, L. A. **Distribuição das raízes do coqueiro-anão verde para o manejo da irrigação e a aplicação de fertilizantes**. Embrapa Agroindústria Tropical-Circular Técnica (INFOTECA-E), 2003. 5 p.

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

DEWEZ, T. J. B.; ROHMER, J.; REGARD, V.; CNUUDE, C. **Probabilistic coastal cliff collapse hazard from repeated terrestrial laser surveys: case study from Mesnil Val**. Journal of Coastal Research, Special Issue n° 65, abril 2013. 702-707 p. doi: 10.2112/SI65-119.1

DI PAULA, Z. 2010. Fotografia. Formato PNG. Disponível em: <https://detudoquantoha.wordpress.com/>. Acesso: 21 de out. de 2022.

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, 1992. 641-654 p.

DINIZ, R. F. **Erosão costeira e o desenvolvimento de costa com baías em forma de zeta no litoral oriental do Estado do Rio Grande do Norte**. Resumos - 50ª Reunião Anual da SBPC, Natal – RN, 1998. 1041 p.

DINIZ, R.F. **A Erosão Costeira ao Longo do Litoral Oriental do Rio Grande do Norte: Causas, Consequências e Influências nos Processos de Uso e Ocupação da Região Costeira**. Salvador. Tese (Doutorado em Geociências) Instituto de Geociências. 2002.

DINIZ, R. F.; DOMINGUEZ, J. M. L. **Erosão costeira no litoral oriental do Rio Grande do Norte**. Anais: VII Congresso da ABEQUA. Porto Seguro. 1999.

DOMINGUEZ, J. M. L. & BITTENCOURT, A. C. S. P. **Regional assessment of long-term trends of coastal erosion in Northeastern Brazil**. An. Acad. bras. Ci., 68(3): 355-371. 1996.

DOURADO, Tiago C. **Aplicação de Técnicas Clássicas do Processamento Sísmico de Reflexão em Dados de Radar (GPR) para Detecção de Hidrocarbonetos em Sedimentos**

Arenosos. Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Universidade Federal da Bahia, Instituto de Geociências, Curso de Pós Graduação em Geofísica, Salvador, 2004. 132 p.

EMERY, K. O.; KUHN, G. G. **Sea cliffs: their processes, profiles, and classification.** Geological Society of America Bulletin. vol. 93, 1982. 644-654 p. 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: 20 de jul. 2022.

ESPINDOLA, C. R.; DANIEL, L. A. **Laterita e solos lateríticos no Brasil.** Boletim Técnico da FATECSP, vol. 24, 2008. 21 p.

FERNANDES, E.; FONSECA, V. P. **Relatório Técnico Ambiental Sobre o Desastre nos Bairros de Mãe Luiza e Areia Preta,** 2015. Circulação Interna. 38 p.

FERNANDES, N. F.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T.; VIEIRA, B. C.; MONTGOMERY, D. R. & GREENBERG, H. **Condicionantes geomorfológicos dos deslizamentos nas encostas: avaliação de metodologias e aplicação de modelo de previsão de áreas susceptíveis.** Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 2, n. 1, 2001. 51-71p.

FREEPIK. Figura. Formato JPEG. Disponível em: https://br.freepik.com/vetores-premium/conjunto-de-barris-e-elementos-de-design_7512676.htm#query=wine%20barrel&position=26&from_view=search&track=sph Acesso em: 21 de out. de 2022.

GALVÃO, R. A. História da cidade. Câmara Municipal de Tibau do Sul, Tibau do Sul, 24 de abril de 2018. Disponível em: <<https://www.tibaudosul.rn.leg.br/institucional/historia-da-cidade>>. Acesso em: 4 de out. de 2022.

GIDES. Projeto de Fortalecimento da Estratégia Nacional de Gestão Integrada de Desastres Naturais -PROJETO GIDES. CPRM, Rio de Janeiro 2018. https://www2.senado.leg.br/bdsf/bitstream/handle/id/518231/CF88_Livro_EC91_2016.pdf. Acesso em: 23 jul. 2022.

GREEN DESTINATIONS FOUNDATION. Green Destinations, 2022. Our Story. Disponível em: <<https://greendestinations.org/about/>>. Acesso em: 21 de out. de 2022.

HANNINEN, P. **Application of Ground Penetrating Radar and Radio Wave Moisture Probe Technique to Peatland Investigations.** Geological Survey of Finland, Espoo, Finland, Bulletin 361. 1992.

HIGHLAND, L.M.; BOBROWSKY, P. **The landslide handbook: a guide to understanding landslides.** Reston, Virginia, U.S. Geological Survey Circular 1325, 2008. 129p.

HOEFEL, F. G. **Morfodinâmica de Praias Arenosas Oceânicas: uma revisão bibliográfica.** Itajaí: Ed. UNIVALI. 1998. 92p.

IDEMA - Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente do Rio Grande do Norte. Falésias. Rio Grande do Norte, junho/2021.

IDEMA - Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente do Rio Grande do Norte. Informação Técnica nº06/2021/SUGERCO. Processo SEI 02810010.0036882020-1. Praia do Centro, Pipa, Tibau do Sul - RN. 2021.

IDEC - Fundação Instituto de Desenvolvimento do Rio Grande do Norte. (1994) Diagnóstico Ambiental e Socioeconômico do Litoral Oriental do Estado do Rio Grande do Norte. Natal: v. 1, 1994. 165p.

IDS INGEGNERIA DEI SISTEMI, S.P.A. **Detector Duo System – User manual**. IDS Ingegneria dei Sistemi S.p.A. – GeoRadar Division, N doc: MN/2009/028 - Rev. 1.1, Ospedaletto (PISA) – Itália. 2010.

IPCC. Assessment Report 6 Climate Change 2022: The Physical Science Basis. 2022.

IPT, Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Manual de ocupação de encostas, São Paulo: USP, 1991.

JOL, M. H. **Ground Penetrating Radar Theory and Applications** / H. M. Joy. – Elsevier, 2009. 574 p. ISBN: 978-0-444-53348-7.

KOMAR, P. D. **Handbook of Coastal Processes and Erosion**. CRC Press Inc., Boca Raton, FL. 1983. 320 p.

KOMAR, P. D. **Beach Processes and Sedimentation**. Ed. Prentice Hall, Inc. Englewood Cliffs, n. j. 1976. 429 p.

LANA, M. C. C., & ROESNER, E. H. **Palinologia do Cretáceo Superior marinho subaflorante na região de Natal, RN**. Anais da Academia Brasileira de Ciências, 71(1), 1999a. 149-50 p.

LANA, M. C. C., & ROESNER, E. H. **O Cretáceo Superior na região de Natal, RN: novas interpretações com base na palinologia**. In: SBP XVI Cong. Bras. Paleont. Anais, 1999b. 55-56 p.

MABESOONE, J. M.; ALHEIROS, M. M. **Origem da bacia sedimentar costeira Pernambuco/Paraíba**. Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, v. 18, n. 4, dez. 1988. 476-482 p.

MAMEDE, F. 2008. Fotografia. Formato PNG. Disponível em: <http://www.overmundo.com.br/overblog/documentando-a-praia-da-pipa#-overblog-7647>. Acesso em: 21 de out. de 2022.

MANSUR, K. L.; RAMOS, R. R. C.; GODOY, J. M. de O.; NASCIMENTO, V. M. R. **Beachrock de Jaconé, Maricá e Saquarema - RJ: importância para a história da ciência e para o conhecimento geológico**. Revista Brasileira de Geociências, [S.L.], v. 41, n. 2, 1 jun. 2011. Sociedade Brasileira de Geologia. p. 290-303p. <http://dx.doi.org/10.25249/0375-7536.2011412290303>.

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

MELO, M. **Falésias–revisão bibliográfica e ocorrência no estado do Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil**. Rio Grande do Norte, 2013.

MTUR MINISTÉRIO DO TURISMO. **Índice de Competitividade do Turismo Nacional – 65 Destinos Indutores do Desenvolvimento Turístico Regional** – Relatório Brasil 2011 / Luiz Gustavo Medeiros Barbosa (Organizador) –Brasília, DF: SEBRAE, 2012. 88 p. ISBN: 978-85-7333-582-8

MINISTÉRIO PÚBLICO FEDERAL NO RIO GRANDE DO NORTE. Falésias de Pipa (RN): após pedido do MPF, Justiça determina interdição parcial de pousada, Natal, 21/09/2022. Disponível em: <<https://www.mpf.mp.br/rn/sala-de-imprensa/noticias-rn/falesias-de-pipa-rn-apos-pedido-do-mpf-justica-determina-interdicao-parcial-de-pousada>>. Acesso em: 23 out. de 2022.

MINISTÉRIO PÚBLICO FEDERAL NO RIO GRANDE DO NORTE. MPF acompanha conclusão dos estudos sobre queda de falésia em Pipa, Natal, 19/11/2020. Disponível em: <<https://www.mpf.mp.br/rn/sala-de-imprensa/noticias-rn/mpf-acompanha-conclusao-dos-estudos-sobre-queda-de-falesia-em-pipa>>. Acesso em: 23 de out. de 2022.

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

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. 1989. 422p.

ONU. **Living with Risk: a global review of disaster reduction initiatives**. Inter-Agency Secretariat International Strategy for Disaster Reduction (ISDR), Genebra, Suíça, Vol. 1. 2004.

OLSEN, M. J. **Methodology for assessing coastal change using terrestrial laser scanning**. Thesis (degree of Doctor of Philosophy). UNIVERSITY OF CALIFORNIA, SAN DIEGO, 2009. 294 p.

PACHECO, G. H. S.; DE FREITAS NETO, O.; SEVERO, R. N. F. **Análise da Estabilidade das Falésias de Tibau do Sul Por Métodos de Equilíbrio-limite**. HOLOS, v. 2, 2006. 78-100 p.

PAIXÃO, M. S. G. **Análise da acurácia das estimativas de posicionamento do nível freático e dos teores de umidade do solo com o emprego dos métodos de sísmica de refração rasa e georadar a partir de um estudo no campus da USP, São Paulo/SP**. Revista Brasileira de Geofísica, [S.L.], v. 24, n. 1, mar. 2006. 143 p. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0102-261x2006000100014>.

PENTEADO, M. **Fundamento de Geomorfologia**. IBGE, Rio de Janeiro , 1980.

PEREIRA, L. B. F. **Mapeamento Geológico, Estratigrafia Cenozóica e Estruturação Neotectônica da Região Costeira entre Ponta Negra e Redinha e Estuário do Rio Potengi**. Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Relatório de Graduação, 1999. 62 p.

PIÉRRRI, G. C. S.; NASCIMENTO, M. A. L.; AMARAL, R. F.; NÓBREGA, A.; NESI, J. de R. N.; CUNHA, E. M. S. **A beleza das Falésias e Dunas de Pipa**. Anais do XXII Simpósio de Geologia do Nordeste. Natal RN. 2007.

PIÉRRRI, G. C. S. **Análise de Risco à Erosão Costeira na Região de Tibau do Sul/RN Através de Mapeamento Geoambiental e Análise Morfodinâmica**. Tese de Mestrado da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2008. 174 p.

PINTO, G. P.; SILVA, M. W. C. **O método GPR aplicado à localização de tubulações utilizadas no abastecimento de água no município de Belém-Pará**. Geotecnia, n. 140, 2017. 31-42 p.

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

PORSANI, J. L. **Ground Penetrating Radar (GPR): proposta metodológica de emprego em estudos geológico-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado- SP**. Tese (Doutorado em Geofísica) – UNESP, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Campos de Rio Claro-SP, 1999. 145 p.

PREFEITURA MUNICIPAL DE TIBAU DO SUL. Prefeitura Municipal de Tibau do Sul, 2022. Tibau do Sul. Disponível em: <<https://prefeituratibaudosul.com/tibau-do-sul/>>. Acesso em: 4 de out. de 2022.

PRESERVE PIPA. Preserve Pipa, 2021. Green Destinations: Tibau do Sul recebe certificação internacional inédita no Brasil e única na América do Sul. Disponível em: <<https://preservepipa.com.br/green-destinations-tibau-do-sul-recebe-certificacao-internacional-inedita-no-brasil-e-unica-na-america-do-sul/>>. Acesso em: 21 de out. de 2022.

RIBEIRO, H. J. P. S. **Estratigrafia de Sequências: Fundamentos e Aplicações/** Idealizado e organizado por Hélio J. P. Severiano Ribeiro - São Leopoldo, RS: Editora da Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2001. 428 p.: il. ISBN 85-7431-072-7.

RIBEIRO, J. R. C. **Análise paramétrica da estabilidade de falésias e estudo de caso da Ponta do Pirambu em Tibau do Sul/RN**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 2015.

RIBEIRO, R. S. **Simulação do processo de queda de blocos em encostas com aplicação da mecânica do contato e do método dos elementos discretos**. Tese (Doutorado em Ciências (Geologia)) – Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013. 265 p.

SALVADOR, F. A. S.; SILVA, M. P. N. **A Importância Social do Ensino Acadêmico de Geologia Forense**. Anais do 49º Congresso Brasileiro de Geologia, Rio de Janeiro, 2018. 2055 p. ISBN: 978-85-99198-20-9.

SANDMEIER, K. J. **REFLEXW Version 9.5 for Windows XP/7/8/10**. Program for the processing of seismic, acoustic or electromagnetic reflection, refraction and transmission data. Manual do Software. Karlsruhe, 2020.

SANEPAR - COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARANÁ. Manual de Obras de Saneamento: Assentamentos. 4ª Ed. Módulo 09. Curitiba, Paraná, Junho/2012. 92p. Disponível em: <https://site.sanepar.com.br/sites/site.sanepar.com.br/files/informacoes-tecnicas/mos-4a-edicao/modulo_9_4ed_v00_-_assentamentos.pdf>. Acesso em: 30 de nov. de 2022.

SANTOS JR., O. F.; AMARAL, R. F.; SCUDELARI, A. C. **Failure mechanisms of a coastal cliff in Rio Grande do Norte State, NE, Brazil**. Journal of Coastal Research, SI 39 (Proceedings of the 8th International Coastal Symposium), Itajaí, SC, Brazil, 2006. 629-632 p. ISSN 0749-0208.

SANTOS JR., O. F.; SEVERO, R. N. F.; FREITAS NETO, O.; FRANÇA, F. A. N. **Análise da Estabilidade nas Falésias entre Tibau do Sul e Pipa – RN**. In: IV COBRAE - Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas, Salvador, 2005.

SANTOS JR., O. F.; SCUDELARI, A. C.; COSTA, A. C.; COSTA, C. M. **Sea Cliff retreat mechanisms in northeastern Brazil**. Journal of Coastal Research, SI 64 (Proceedings of the 11th International Coastal Symposium), Szczecin, Poland, 2011. ISSN 0749-0208.

SCUDELARI, A. C.; FREIRE, L. C. S. **Determinação dos impactos ambientais na construção de um sistema hoteleiro nas falésias em Tibau do Sul-RN**. 2005.

SEMURBMO, Secretaria Municipal de Meio Ambiente e Urbanismo e Mobilidade Urbana - Prefeitura Municipal de Tibau do Sul. CORTEZ, N.S.F. **ANÁLISE DE RISCO DA COSTA DO MUNICÍPIO DE TIBAU DO SUL-RN (TRECHO-I)** - SEMURBMO/PMTS. 2020a. 42p.

SEMURBMO/PMTS. **Carta de Risco da Praia no Centro de Pipa**, Município de Tibau do Sul - RN. 2020.

SEMURBMO, Secretaria Municipal de Meio Ambiente e Urbanismo e Mobilidade Urbana - Prefeitura Municipal de Tibau do Sul. LIMA, T.J.M., COSTA, S.R.A., LIBERATO, M.A.T., CAMPELO, M.S. **Laudo de Inspeção com Emissão de Parecer Técnico. Análise de Estabilidade de 10 Edificações**. 2020b. 52p.

SEVERO, R. N. F. **Análise da estabilidade das falésias entre Tibau do Sul e Pipa–RN**. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária. 2005.

SILVA, B. M. F.; FREITAS NETO, O.; SANTOS JÚNIOR, O. F.; BARBOSA, N. M.; FRANÇA, F. A. N.; ARAÚJO, E. E. B. **Stability Evolution with Basal Erosion Increase in Cliffs on the Coast of Rio Grande do Norte, Brazil**. In Applied Mechanics and Materials, ISSN: 1662-7482, Vol. 858, 2016. 342-347 p.

SILVA, B. M. F. **Análise probabilística de estabilidade de falésias no litoral do RN** / Breno Marques Ferreira da Silva: il. Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal do Rio Grande do

Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Natal, 2019. 271 p.

SILVA, B. M. F.; SANTOS JÚNIOR, O. F.; FREITAS NETOS, O.; SCUDELARI, A. C. **Erosão em Falésias Costeiras e Movimentos de Massa no Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil**. São Paulo, UNESP, Geociências, v. 39, n. 2, 2020. 447-461 p.

SILVA, E. F. **Influência sobre a atividade pesqueira do município de Tibau do Sul - RN/** Edilma Fernandes da Silva. - Natal, RN. 2011. 89 p: vol:II.

SILVA, M. T. F. **Relatório de Vistoria**. Defesa Civil, [s. l.], nº013/2022, 2022. 6 p.

SILVA, M. T. F.; MARINHO FILHO, M. F. **Relatório de Vistoria**. Defesa Civil, [s. l.], nº011/2022, p. 12, 2022.

SILVA, W. S. E.; SANTOS JUNIOR, O. F.; AMARAL, R. F. ; SCUDELARI, A. C. **Erosão Costeira nas Falésias de Tibau do Sul- Litoral Leste do Rio Grande Do Norte**. In: II Congresso Sobre Planejamento e Gestão da Zona Costeira dos Países de Expressão Portuguesa, 2003, Recife. II Congresso Sobre Planejamento e Gestão da Zona Costeira dos Países de Expressão Portuguesa, 2003. v. 1. 1-10 p.

SILVEIRA, J. D. **Morfologia do Litoral Brasileiro**. In: Azevedo, A. (ed). Brasil: a terra e o homem. Companhia Editora Nacional, São Paulo. Volume 1, 1964. 253-305 p.

SIQUEIRA, A. C. A.; MAGINI, C.; DANTAS, E. L.; FUCK, R. A.; SASAKI, J. M. **Lateritas do Domínio Médio Coreaú – Comportamento geoquímico de mantos lateríticos do Noroeste do Estado do Ceará**. Brazilian Journal of Geology, v. 44, n. 2, 2014. 249-264 p.

SKEMPTON, A.W; HUTCHINSON, J. **Stability of Natural Slopes and Foundations**. 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, State-of-the-Art Report, Mexico, 1969. 291-339 p.

SOB FORTE COMOÇÃO FAMÍLIA MORTA EM FALÉSIA É SEPULTADA EM PIPA. Tribuna do Norte, Natal, 18/11/2020. Disponível em: <<http://www.tribunadonorte.com.br/noticia/sob-forte-comoa-a-o-fama-lia-morta-em-fala-sia-a-sepultada-em-pipa/495597>>. Acesso em: 4 de out. de 2022.

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”, Holos Editora, Ribeirão Preto, SP, 2005. 130-152 p.

SUGUIO, K., MARTIN, L.; BITTENCOURT, A. C. S. P.; DOMINGUEZ, J. M.; FLEXOR, J. M.; & AZEVEDO, A. D. **Flutuações do nível relativo do mar durante o Quaternário Superior ao longo do litoral brasileiro e suas implicações na sedimentação costeira**. Revista Brasileira de Geociências, 15(4), 1985. 273-286 p.

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

SZYMCZYK, M.; SZYMCZYK, P. **Preprocessing of GPR data**. Ipc, [S.L.], v. 18, n. 2-3, 1 dez. 2013. 83-90 p. Walter de Gruyter GmbH. <http://dx.doi.org/10.2478/v10248-012-0082-3>.

TAQUEZ, D. E. D.; BARBOSA; SILVA, B. M. F; FREITAS NETO, O.; SANTOS JÚNIOR, O. F. **Estabilidade de Falésias no Litoral do RN Submetidas a Fendas de Tração e Incisão Basal**. XIII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. 2016.

TAQUEZ, D. E. D. **Susceptibilidade à ocorrência de movimentos de massa e avaliação da estabilidade de falésias sob condição não saturada: Estudo de caso no Centro de Lançamentos da Barreira do Inferno – Brasil**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 2017.

TERZAGHI, K. **Mechanisms of Landslides**. Berkey: The Geological Society of America - Engineering Geology, 1950.

TOMINAGA, L. K.; FERREIRA, C. J.; VEDOVELLO, R.; TAVARES, R.; SANTORO, J. & SOUZA, C. R. G. **Cartas de perigo a escorregamentos e de risco a pessoas e bens do Litoral Norte de São Paulo: conceitos e técnicas**. Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica e Geoambiental, 5º, São Carlos (SP), 2004.

TOMINAGA, L.K. **Análise e mapeamento de risco**. In: TOMINAGA, L.K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. do (Org.). Desastres naturais: conhecer para prevenir. 2. ed. São Paulo: Instituto Geológico, cap. 9, 2012a. 147-160 p.

TOMINAGA, L.K. **Escorregamentos**. In: TOMINAGA, L.K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. do (Org.). Desastres naturais: conhecer para prevenir. 2. ed. São Paulo: Instituto Geológico, cap. 2, 2012b. 25-38 p.

TRIPADVISOR. Tripadvisor, 2022. Tripadvisor Awards. Disponível em: <https://www.tripadvisor.com.br/Trust-lAkEadpFVLyU-Tripadvisor_awards.html>. Acesso em: 4 de out. de 2022.

VAN SCHMUS, W. R., BRITO NEVES, B. B., WILLIAMS, I. S., HACKSPACHER, P. C., FETTER, A. H., DANTAS, E. L., BABINSKI, M. **The Seridó Group of NE Brazil, a late Neoproterozoic pre- to syn-collisional basin in West Gondwana: insights from SHRIMP U–Pb detrital zircon ages and Sm–Nd crustal residence (TDM) ages**. Precambrian Research, vol. 127, 2003. 287–327 p.

VEJA AS 10 MELHORES PRAIAS DO MUNDO PARA VIAJAR EM 2022. G1 - Notícias Globo, 23/02/2022. Disponível em: <<https://g1.globo.com/turismo-e-viagem/noticia/2022/02/23/veja-as-10-melhores-praias-do-mundo-para-viajar-em-2022-segundo-o-tripadvisor.ghml>>. Acesso em: 20 de out. de 2022.

VIEIRA, M. M.; ROS, L. F. **Cementation patterns and genetic implications of Holocene beachrocks from northeastern Brazil**. Elsevier BV. Sedimentary Geology, [S.L.], v. 192, n. 3-4, dez. 2006. 207-230 p.

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.). MMA, Brasília, Brasil. 2006a. 155-172 p.

VITAL, H., PINHEIRO, L. S., PESSOA, P. R. S., FREIRE, G. S. S., CARVALHO, A. M. M., AQUINO DA SILVA, A. G., SOUZA, F. E. S., CHAVES, M. S., GOMES, M. P. **Panorama da Erosão Costeira no Brasil: Rio Grande do Norte**, in: MUEHE, D. (Ed.), Panorama da Erosão Costeira no Brasil. Ministério do Meio Ambiente, Brasília-DF, 2018. 761 p.

XAVIER NETO, P. **Processamento e interpretação de dados 2D e 3D de GPR: Aplicações no imageamento de feições cársticas e estruturas de dissolução no campo de petróleo de Fazenda Belém-CE.** Tese (Doutorado) - Curso de Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006. 191 p.

YILMAZ, I.; YILDIRIM, M.; KESKIN, I. **A method for mapping the spatial distribution of rockfall computer program analyses results using ArcGIS software.** Bulletin of Engineering Geology and the Environment, v. 67, n. 4, 2008. 547-554 p.

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.

ANEXOS

ANEXO I: Autorização para visita de viabilidade técnica no Cemitério de Pipa/RN.



ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE
GOVERNO MUNICIPAL DE TIBAU DO SUL
Rua Dona Vila Isabel, nº 41 – Centro – Fone (84) 3246-4384
59178-000 – Tibau do Sul/RN

OFÍCIO Nº025/2022-SEMURBMO/UFRN

Tibau do Sul, 08 de fevereiro de 2022.

A Senhora
MARCELA MARQUES VIEIRA
Professora do Departamento de Geologia UFRN

Assunto: Resposta sobre permissão para atividade de campo no Cemitério de Pipa/RN

Prezada Professora,

Cumprimentando-a cordialmente, venho externar que esta Municipalidade zela pelas ações de pesquisa e as entende como atividades essenciais para o desenvolvimento seguro e sustentável.

Complemento ainda que em virtude aos movimentos de massa se apresentarem como características inerentes às Falésias, visualizamos a necessidade de acompanhamento contínuo, de forma a incentivar os mais diversos estudos para fundamentações científicas.

No que tange ao pedido de uso do equipamento GPR, como o Cemitério é um ambiente com características sensíveis, e se apresenta como um Patrimônio Cultural do Município, **INFORMO QUE AUTORIZO A REALIZAÇÃO DE UMA VISITA DE VIABILIDADE TÉCNICA NO DIA 09/02/2022, ÀS 9:00 HORAS.**

Na oportunidade estará presente um dos agentes da Defesa Civil Municipal, que junto a equipe interessada analisará o pedido. Após o levantamento de informações o Gabinete do executivo será consultado e em seguida informaremos sobre a viabilidade ou não da ação.

Sem mais para o momento, elevamos nossos votos de estima e consideração, e nos colocamos à disposição.

Atenciosamente,

LAIRA ROBERTA CAMPOS DE SOUSA
Secretária Municipal de Meio Ambiente,
Urbanismo e Mobilidade Urbana.

ANEXO II: Autorização para realização da atividade de campo no interior do cemitério de Pipa/RN.



ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE
GOVERNO MUNICIPAL DE TIBAU DO SUL
Rua Dona Vila Isabel, nº 41 – Centro – Fone (84) 3246-4384
59178-000 – Tibau do Sul/RN

OFÍCIO Nº032/2022-SEMURBMO/UFRN

Tibau do Sul, 11 de fevereiro de 2022.

A Senhora
MARCELA MARQUES VIEIRA
Professora do Departamento de Geologia UFRN

Assunto: Resposta sobre permissão para atividade de campo no Cemitério de Pipa/RN

Prezada Professora,

Cumprimentando-a cordialmente, venho externar que considerando a visita de viabilidade técnica realizada no dia 09/02/2022, **AUTORIZO A REALIZAÇÃO DA AÇÃO DO MÉTODO GPR NO INTERIOR DO CEMITÉRIO MUNICIPAL DE PIPA, NO DIA 15/02/2022, A SE REALIZAR DAS 08:30 ÀS 12:00, DESDE QUE ACOMPANHADA POR UM COLABORADOR DA DEFESA CIVIL MUNICIPAL QUE FICARÁ A DISPOSIÇÃO.**

Sem mais para o momento, elevamos nossos votos de estima e consideração, e nos colocamos à disposição.

Atenciosamente,


LAIRA ROBERTA CAMPOS DE SOUSA
Secretária Municipal de Meio Ambiente,
Urbanismo e Mobilidade Urbana.

ANEXO III: Autorização da Proprietária da residência nº485 para realização da atividade de campo.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
Campus Universitário - R. das Engenharias, s/n - Lagoa Nova – Fone (84)3342-2277
59078-970, Natal/ RN

Tibau do Sul, 21 de março de 2022.

À Senhora

Marcela Marques Vieira

Professora do Departamento de Geologia

Assunto: Solicitação de campo para Propriedade privada em Pipa/RN

Cumprimentando-a cordialmente, venho externar que autorizo a realização da ação do método GPR no interior de minha propriedade, localizada na Avenida Baía dos Golfinhos, nº , Tibau do Sul/RN – CEP: 59178-000. A ser realizada no dia 22/03/2022 das 9h00 até 12h00, acompanhada da estudante Anna Luisa Espinola de Sena Costa, dois técnicos do equipamento e um colaborador da defesa civil municipal, que ficará à disposição. Sendo assim, coloco-me à disposição para assistir a atividade.

Respeitosamente,

Vanessa Leite Barreto
Proprietária

ANEXO IV: Requerimento solicitado pelo Vereador Adacbson Silva para manutenção do sistema de drenagens em Pipa/RN.



CÂMARA MUNICIPAL DE TIBAU DO SUL

PALÁCIO FEBRÔNIO SOARES DE LIRA

Vila Dona Isabel, 26 – Centro – Tibau do Sul – RN

CEP 59178-000 / FONE: (84) 3246-4294

CNPJ 09.428.749/0001-09

GABINETE DO VEREADOR ADAEBSON SANTOS DA SILVA

Requerimento nº 002/2021

Tibau do Sul, 01 de março de 2021.

Ao Ilustríssimo Sr.
Josue Gomes de Moura Junior
Presidente da Câmara Municipal de Tibau do Sul

Assunto: **Manutenção do sistema de drenagem, limpeza e desobstrução de galerias e escoamento pluvial no distrito da Praia de Pipa.**

Senhor Presidente,

Apresento a Vossa Excelência, nos termos do § 7º do Art. 2 do Regimento Interno, o presente Requerimento, a ser encaminhada à Secretaria Municipal de Serviços Urbanos, ouvindo o Plenário desta Casa, **solicitando que seja adotada ações preventivas para o escoamento das águas pluviais no município, realizando manutenção nas galerias das vias contempladas com o sistema de drenagem e serviços paliativos para melhoramento do escoamento nas vias não contempladas com sistema de drenagem.**

JUSTIFICATIVA

Considerando os transtornos ocasionados pelos diversos pontos de alagamentos registrados ao longo de tantos anos em todas as localidades do município nos períodos chuvosos, é de extrema necessidade que o Governo Municipal através da Secretaria Municipal de Serviços Urbanos mapeie e adote ações preventivas objetivando mitigar tais transtornos causados pelos alagamentos de vias no nosso município.

Câmara Municipal de Tibau do Sul - RN

Recebido em 01/03/2021

Adacbson Santos da Silva
Vereador

Assinado pelo Funcionário
E-mail: adacbson@yahoo.com.br

Instagram: @nino.adacbson
Site: www.ninoadacbson.com.br

ANEXO V: Requerimento solicitado pelos Vereadores Adaebson Silva e Ilana Barbosa para pavimentação e drenagem de ruas no distrito de Pipa/RN.



CÂMARA MUNICIPAL DE TIBAU DO SUL
PALÁCIO FEBRÔNIO SOARES DE LIRA

Vila Dona Isabel, 26 – Centro – Tibau do Sul – RN
CEP 59178-000 / FONE: (84) 3246-4294
CNPJ 09.428.749/0001-09

GABINETE DO VEREADOR ADAEBSON SANTOS DA SILVA

Indicação Conjunta nº 002/2021

Tibau do Sul, 15 de março de 2021.

Ao Ilustríssimo Sr.

Josué Gomes de Moura Junior

Presidente da Câmara Municipal de Tibau do Sul

Assunto: **Pavimentação e drenagem de ruas no distrito de Pipa.**

Senhor Presidente,

A vereadora Ilana Inácio da Silva Barbosa e o vereador Adaebson Santos da Silva apresentam a Vossa Excelência, nos termos do art. 97 do Regimento Interno, a presente Indicação, a ser encaminhado ao Exmo. Sr. Prefeito Valdenício José da Costa, ouvindo o Plenário desta Casa, indicando-lhe a pavimentação e drenagem das ruas localizadas no distrito de Pipa, relacionadas a seguir: Rua dos Gafanhotos, Rua Murici, Rua da Cancela, Rua das Pedrinhas, Rua Império do Sol, Travessa Cioba, Rua das Gaivotas, Rua das Andorinhas, Rua das Graúnas, Travessa dos Flamingos, Rua dos Cisnes, Rua das Águias, Rua Fidelis, Rua da Albacora (e as ruas transversais), Rua do Cação, Rua Praia do Amor, Rua das Borboletas e Rua das Acácias.

Câmara Municipal de Tibau do Sul/RN

Recebi Em 15 / 03 / 2021


Assinatura do Funcionário

Cel.: (84) 99458-7096
E-mail: vereador.nino.tibaudosul@gmail.com

Instagram: @nino.adaebson
Site: www.ninoadaebson.com.br



CÂMARA MUNICIPAL DE TIBAU DO SUL
PALÁCIO FEBRÔNIO SOARES DE LIRA

Vila Dona Isabel, 26 – Centro – Tibau do Sul – RN

CEP 59178-000 / FONE: (84) 3246-4294

CNPJ 09.428.749/0001-09

GABINETE DO VEREADOR ADAEBSON SANTOS DA SILVA

JUSTIFICATIVA

As ruas relacionadas nesta Indicação, localizadas no distrito de Pipa, atualmente tem grande movimentação diariamente, entretanto, elas não têm as condições de circulação devido às irregularidades, estando muitas das vezes com buracos, dificultando a trafegabilidade de veículos e causando transtornos aos transeuntes. Além disso, a ocorrência de chuvas causa alagamentos, evidenciando ainda mais a necessidade da resolução dessa problemática nesses locais.

Para tanto, devido às necessidades apresentadas acima sobre a melhoria da infraestrutura de acesso e deslocamento dessas ruas, buscando-se ainda, evitar possíveis complicações na saúde da população, em virtude do acúmulo de água das chuvas e/ou lama podendo acarretar riscos à saúde, com doenças, e à segurança dos transeuntes. Com o atendimento a esta Indicação, ela trará o desenvolvimento urbano e social dessas localidades.

Ilana Inácio da Silva Barbosa
Vereadora

Adaebson Santos da Silva
Vereador

Cel.: (84) 99458-7096
E-mail: vereador.nino.tibaudozul@gmail.com

Instagram: @nino.adaebson
Site: www.ninoadaebson.com.br