

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS E NATURAIS PROGRAMA  
DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA AMBIENTAL**

**BRANCO MATEUS MURATA EGUCHI**

Dinâmica e o estágio evolutivo do sistema praia-falésia em Maimbá-  
ES

VITÓRIA  
2017

# BRANCO MATEUS MURATA EGUCHI

Dinâmica e o estágio evolutivo do sistema praia-falésia em Maimbá-  
ES

Dissertação de Mestrado  
apresentado ao Programa de Pós-Graduação  
em Oceanografia Ambiental da Universidade  
Federal do Espírito Santo, como requisito para a  
o título de Mestre.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Jacqueline Albino.

VITÓRIA  
2017



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**DINÂMICA E O ESTÁGIO EVOLUTIVO DO SISTEMA PRAIA-FALÉSIA NA PRAIA DE  
MAIMBÁ-ES**

por

**Branco Mateus Murata Eguchi**

Aprovado por:

---

Profa. Dra. Jacqueline Albino  
Universidade Federal do Espírito Santo

---

Prof. Dr. Dieter Muehe  
Universidade Federal do Espírito Santo

---

Prof. Dr. Renato David Ghisolfi  
Universidade Federal do Espírito Santo

Vitória, 06 de fevereiro de 2018.

Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Ambiental (PPGOAM)  
Base Oceanográfica de Aracruz-CCHN/UFES  
<http://www.oceanografia.ufes.br/pos-graduacao/PPGOAM>

## **Agradecimentos**

Agradeço ao suporte financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Ao trabalho realizado por Reguero et al. (2012) e SMC Brasil Sistema de Modelagem Costeira (SMC-Brasil) pelos dados e licenças de uso do modelo. Esta dissertação é uma contribuição ao INCT-MAR dentro do projeto Ambitropic (CNPq).

Agradeço a todos que de alguma forma acrescentaram no meu aprendizado, sem estes não chegaria a lugar algum. Sendo assim, agradeço a todos aos meus colegas que compartilharam conhecimento, dúvidas e boas discussões; aos meus professores, não só da UFES mas de toda vida, que além de ensinar despertaram em mim disciplina, curiosidade e a vontade de aprender. Agradeço especialmente meus pais, que são meus maiores professores e incentivadores nessa tarefa árdua que é fazer ciência no Brasil.

## Sumário

Resumo .....	12
Capítulo 1 - Apresentação .....	13
1.1 Introdução .....	13
1.2 Área de estudo .....	19
1.2.1 Localização e Características Gerais .....	19
1.2.2 A Praia de Maimbá .....	20
Capítulo 2 – Erosão das Falésias induzida pela ação de Ondas de gravidade incidentes .....	22
2.1 Objetivos .....	22
2.2 Materiais e métodos .....	23
2.2.1 Recuo das Falésias .....	23
2.2.2 Ondas .....	24
2.2.2.1 Variação Energética.....	24
2.2.2.2 Alturas de Ondas e Eventos Extremos .....	25
2.3 Resultados .....	25
2.3.1 Recuo das Falésias .....	25
2.3.2 Ondas .....	28
2.4 Discussão.....	31
2.5 Conclusão .....	40
Capítulo 3 – O Papel da Praia na Proteção da Falésia .....	41
3.1 Objetivos .....	41
3.2 Materiais e Métodos .....	41
3.2.1 Morfologia e variação topográfica .....	41
3.2.2 Determinação do Espriamento máximo ( <i>Run up</i> ) .....	42
3.2.3 Determinação do Papel de Proteção da Praia .....	45

3.3 Resultados .....	49
3.3.1 Morfodinâmica praial em Maimba .....	49
3.3.2 Espraimento máximo observado.....	55
3.3.3 Espraimento máximo calculado .....	56
3.3.4 Capacidade de proteção das falésias .....	58
3.4 Discussão.....	59
3.5 Conclusão .....	65
Capítulo 4 – Identificação do Estágio evolutivo do sistema praia/falésia.....	66
4.1 Objetivos .....	66
4.2 Materiais e Métodos .....	66
4.2.1 Correlação entre as taxas erosivas das falésias, ondas e espraimento total .....	66
4.2 Discussão .....	66
4.2.1 Estágio Evolutivo Atual .....	66
4.3.1 Predição do comportamento do sistema Praia/Falésia ....	71
4.3 Conclusões finais.....	73
Referencias .....	74

## **Lista de Figuras**

### **Capítulo 1**

- Figura 1. 1 – Mapa de localização da Praia de Maimbá, Falésias estudadas (Amarelo) e perfis topográficos levantados (Vermelho). ..... 20
- Figura 1. 2 - Processos erosivos constatados na área de estudo. Fotos: Jacqueline Albino em 2008. .... 22

### **Capítulo 2**

- Figura 2. 1 - Recuo acumulado extraído a partir da comparação entre as linhas de falésias dos anos em questão ..... 27
- Figura 2. 2 – Taxas de recuo anual das falésias calculadas com base nos recuos de cada período. .... 27
- Figura 2. 3 - Variação energética modelada mostrando o grau de exposição às ondas entre 1953-1970, 1970-1995 e 1995-2008. .... 29
- Figura 2. 4 - Alturas médias para cada ano entre o intervalo entre 1953-2008 (Linha sólida), Tendências (Tracejado vermelho) e altura média entre o período entre 1953-2008 (Tracejado preto)..... 30
- Figura 2. 5 – Porcentagem de ondas com valores acima da média, calculada entre 1953-2008, para cada subintervalo..... 31
- Figura 2. 6 - Comportamento erosivo de falésia modelado ao longo de 100 anos, mostrando a ocorrência episódica de eventos erosivos. Modificado de Castedo et al. (2013). .... 32
- Figura 2. 7 - Processos erosivos constatados na área de estudo danificando estrutura rodoviária (ES-060). .... 33
- Figura 2. 8 - Ciclo evolutivo de falésias no Lago Erie (EUA), ilustrando o processo erosivo intercalado por momentos de proteção do sopé por depósitos erodidos. Modificado de Amin (2001). .... 35
- Figura 2. 9 - Ciclo evolutivo proposto para as falésias sul (1) e central (2) da praia de Maimbá, baseado do modelo de Amin (2001) e no comportamento erosivo e nos dados de alturas de ondas. .... 36
- Figura 2. 10 - Ciclo evolutivo proposto para a Falésia Norte(3) baseado em Amin (2001) e no comportamento erosivo e nos dados de alturas de ondas..... 37
- Figura 2. 11 - Foto tirada em campo (2017) mostrando o depósito de material erodido das Falésias Sul (acima) e Central (abaixo). .... 39

Figura 2. 12 - Foto tirada em campo (2017) ilustrando a ausência de talus na base da Falésia NorteFalésia NorteFalésia Norte..... 40

### Capítulo 3

Figura 3. 1 - Esquematisação do perfil topográfico levantado mostrando a correção realizada. Por convenção o zero do perfil é o Nível Médio do Mar (NM). ..... 42

Figura 3. 2 - Ilustração do referencial de medição dos espraiaamentos observado e calculado, mostrando os parâmetros utilizados para a correção das alturas medidas em campo. Todas as alturas possuem o nível médio do mar (NM) como zero de referência. .... 45

Figura 3. 3 - Sobreposição dos dados de ondas obtidos pelo modelo WaveWatchIII em 1000m de profundidade (Linha cinza), Boia da Minerado Samarco em 25 metros de profundidade (Linha preta) e a transposição das ondas do modelo WW3 para águas rasas através da equação de Munk (1949) (Linha vermelha). ..... 46

Figura 3. 4 - Sobreposição dos dados de ondas obtidos pelo modelo WaveWatchIII em 1000m de profundidade (Vermelho), Boia da Minerado Samarco em 25 metros de profundidade (Preto). ..... 47

Figura 3. 5 - Perfis praias adjacentes a Falésia Sul..... 50

Figura 3. 6 - Perfis praias adjacentes a Falésia Central. .... 51

Figura 3. 7 - Perfis praias adjacentes a Falésia Norte. .... 52

Figura 3. 8 - Resultados obtidos em campos específicos para observação de espraiaamento..... 56

Figura 3. 9 - Frequência com que os espraiaamentos atingem as falésias sul (1), central (2) e norte (3), superando a altura da praia adjacente em condições máximas (max) e mínimas (min). ..... 59

Figura 3. 10 - Perfis onde foram realizados perfis topográficos por Albino et al. (2016) (Círculos) e Área de estudo com demarcação dos perfis topográficos realizados no presente estudo (Triângulos). ..... 60

Figura 3. 11 - Esquematisação da dinâmica de modificação do perfil praias frente a condições de ondas altamente energéticas. Modificado de Masselink e Hughes (2003). ..... 61



Figura 3. 12 - Localização dos perfis P3 e P4 associados aos terraços de abrasão (Manchas escuras) e ao promontório. Fonte: Google. .... 62

#### **Capítulo 4**

Figura 4. 1 – Processo erosivo da Falésia Sul. A foto mostra que a erosão ocorre sem marcas de espraiamento das ondas e há diferenças de cores entre os sedimentos da parte inferior da falésia e do talus marcando a diferença na pedogênese do sedimento. .... 68

Figura 4. 2 – Perfis de falésias segundo o agente erosivo atuante e a região de maior resistência. Modificado de Emery e Kuhn (1982). M refere-se a um controle marinho enquanto SA representa um domínio Subaéreo. .... 69

Figura 4. 3 – Fotos representando a forma das falésias estudadas e sua relação com o agente erosivo atuante (Emery e Kuhn, 1982). A forma da Falésia Sul (1) indica um maior controle de processos erosivos subaéreos sobre uma falésia de base resistente (Figura 4. 2d) enquanto a forma das falésias central (2) e norte (3) mostram um perfil relacionado à erosão pela ação de ondas sobre uma falésia de base resistente (Figura 4. 2a)..... 70

Figura 4. 4 - a) Relação entre a largura da praia e a taxa erosiva das falésias associadas (Sunamura, 1976). b) Relação entre a elevação da praia em a taxa erosiva de falésias associadas (Sunamura, 2015). Momento em que se encontra o sistema em vermelho. Modificado de Limber e Murray, 2011 (a) e Sunamura, 2015 (b)..... 71

Figura 4. 5 - Modelo evolutivo de acumulo de praia em áreas de falésias e plataformas de abrasão (Kennedy, 2015). O destaque em vermelho representa o momento atual das falésias estudadas. .... 72

## **Lista de Tabelas**

### **Capítulo 1**

### **Capítulo 2**

Tabela 2. 1 - Informações sobre as imagens utilizadas no estudo. As siglas referem-se a Instituto Jones Santos Neves (IJSN) e Sistema Integrado de Bases Geoespaciais do Estado do Espírito Santo (GEOBASES). O erro médio quadrático (EMQ) refere-se ao erro de georreferenciamento entre as imagens. .....	23
---	----

### **Capítulo 3**

Tabela 3. 1 - Datas das campanhas de campo realizadas.....	42
Tabela 3. 2 - Quadro indicando o período de dados analisado e os erros quadráticos médios antes e depois da aplicação da equação de Munk (1949) nos dados do modelo WW3.....	46
Tabela 3. 3 - Quadro indicando o período de dados analisado e os erros quadráticos médios.....	47
Tabela 3. 4 - Extensão dos perfis medidos em campo e por imagens e a correlação de Pearson entre os mesmos.....	49
Tabela 3. 5 - Quadro geral de média dos parâmetros topográficos extraídos dos perfis medidos entre 2014 e 2016.....	53
Tabela 3. 6 - Resumo das correlações entre os parâmetros morfológicos extraídos dos perfis medidos entre 2014 e 2016 ponto não perfil corrigir na tabela.....	54
Tabela 3. 7 - Resumo do coeficiente de correlação de Pearson entre os espreiamentos observados e calculados para cada modelo.....	56
Tabela 3. 8 - Quadro resumo das diferenças entre os espreiamentos observados e calculados para cada modelo.....	57
Tabela 3. 9 - Raízes dos erros médios quadráticos para cada modelo, indicando o quanto estes se aproximam da realidade.....	58
Tabela 3. 10 - Resumo dos parâmetros morfológicos calculados por Albino et al. (2016).....	61
Tabela 3. 11 - Quadro resumo com os erros quadráticos médios comparados entre as formulações propostas e os espreiamentos medidos em campo. Modificado de Mather et al. (2011).....	64

## Capítulo 4

Tabela 4. 1 - Determinação do tempo necessário para que o sistema praia/falésia atinja o equilíbrio de forma natural baseado em parâmetros geomorfológicos e oceanográficos.....	73
--	----

## RESUMO

A presente dissertação objetivou identificar o estágio evolutivo do sistema praia/falésia de três falésias com características litológicas semelhantes em um trecho da praia de Maimbá-ES, por meio da investigação do comportamento erosivo das mesmas frente à variação do clima de ondas, ao grau de exposição às ondas de gravidade incidentes e frente ao papel desempenhado pelas praias como uma barreira de proteção para as falésias. Taxas erosivas das falésias entre os anos de 1953-1970, 1970-1995, 1995-2008 e 2008-2016 foram determinadas por meio do software Digital Shoreline Analysis System (DSAS). Para avaliação do clima de ondas e sua variabilidade analisou-se o banco de dados do modelo Global Ocean Wave (GOW) com dados de alturas significativas, direções e períodos de pico modelados entre os anos de 1948-2008. O grau de exposição foi determinado utilizando as informações de ondas do modelo GOW como entrada para o modelo Sistema de Modelagem Costeira do Brasil (SMC-Brasil). Nesta etapa foram recriados os cenários com as ondas mais recorrentes entre os anos em que se tem as taxas erosivas. A determinação da atuação da praia na proteção das falésias foi feita a partir da frequência com que os espraiamentos máximos atingiram as falésias ao longo dos anos de 1948-2008, com base em levantamentos topográficos e nos dados das ondas GOW. Os resultados apontaram que processo erosivo na área de estudo é fortemente controlado pelo grau de exposição às ondas. No entanto verificou-se que ondas mais altas (energéticas) não necessariamente induziram intensos processos erosivos. Desta forma, foram propostos ciclos evolutivos para o recuo das falésias estudadas, uma vez que o material erodido é depositado em sua base oferecendo proteção ao ataque das ondas durante momentos de alta energia. De maneira geral, as praias adjacentes às falésias estudadas não foram capazes de dissipar o espraiamento e, conseqüentemente, não conferiram proteção para as falésias. O sistema praia/falésia se encontra atualmente em um momento evolutivo em que a morfologia das praias (altura e extensão) não possuem características suficientes para conter o ataque das ondas. Finalmente, foi proposto um modelo que determina o tempo necessário para que o sistema cesse naturalmente o processo erosivo e atinja uma estabilidade sob condições de ondas conhecidas.

# CAPÍTULO 1 - APRESENTAÇÃO

## 1.1 INTRODUÇÃO

A falésias costeiras atuam como potenciais fontes de sedimento para o sistema costeiros já que são depósitos naturalmente erosivos (Boak e Turner, 2005; Sunamura, 2015). No entanto, existe uma grande preocupação em âmbito mundial em relação à erosão de falésias costeiras, uma vez que este processo pode destruir propriedades e infraestruturas. Os efeitos erosivos podem se intensificar frente a um possível aumento do nível do mar e a maior recorrência de eventos de tempestades, gerado por mudanças climáticas (Castedo *et al.*, 2013). Lee (2005) ressalta a costa Inglesa como exemplo. Na Inglaterra há um gasto de cerca de 20 milhões de libras por ano com manutenção e melhorias das defesas contra a ação do oceano sobre as falésias. Desta forma, se faz necessário o entendimento do processo evolutivo das falésias a fim de minimizar danos econômicos, sociais e ambientais.

Os fatores envolvidos na erosão das falésias são divididos em subaéreos e marinhos. A erosão subaérea é regida por movimentos de massas induzidos pelo excesso de pressão exercida sobre a falésia. Este tipo de erosão deixa o topo da falésia com características convexas. Já a erosão marinha ocorre em forma de abrasão, dissolução, atividade biológica e carregamento de blocos, conferindo a base da falésia grandes declividades (Emery e Kuhn, 1982).

Sunamura (1992) afirma que a erosão marinha ao pé da falésia ocorre de acordo com o balanço entre a resistência do material componente e a energia das ondas incidentes. Sunamura (1975) identificou três tipos da ação das ondas sobre a falésia. As ondas que arrebatam sobre a falésia agem diretamente sobre a falésia exercendo pressão sobre o pé da falésia. As ondas que arrebatam na zona de arrebatamento na antepraia, seguem em direção a falésia na forma de uma massa d'água turbulenta atravessando a zona de surfe. Por fim, as ondas estacionárias, geradas pela reflexão das ondas que atingem a falésia, são marcadas pelo movimento de subida e descida no nível d'água na face da falésia. Estas ondas atuam de duas maneiras distintas sobre a falésia.

Forças normais liberam grande quantidade de energia e são responsáveis por fragilizar o material, já as forças tangenciais, que são geradas durante o processo de refluxo da onda, promovem a retirada de material da falésia. Este ciclo, descrito por Sunamura (1983), é observado em trabalhos realizados por Sunamura (1973), Sunamura (1992), Carter e Guy (1988).

Segundo Griggs e Trenhaile (1994) a ação mecânica de ondas é o principal agente erosivo em ambientes de falésia. Carter e Guy (1988) e Collins e Sitar (2008) analisaram o recuo em falésias e encontraram uma forte relação entre eventos de alta energia e processos erosivos. Os autores constataram que praticamente todos os eventos erosivos estão relacionados às tempestades. Ainda, fatores como a duração da tempestade e a maré meteorológica controlam a quantidade de energia que alcança a falésia (Carter e Guy, 1988).

O modelo erosivo de falésia dita que, a partir do momento que a força do ataque das ondas supera a resistência da falésia, inicia-se a erosão (Sunamura, 1983). Porém, o autor não explicita como as ondas incidentes continuam a agir sobre a falésia em recuo (Kamphuis, 1987). Emery e Kuhn (1982) definem sucessões de estágios de acordo com o ciclo da falésia. Segundo os autores, as falésias que estão sobre ação direta das ondas são chamadas de falésias ativas ou vivas. Aquelas que possuem cobertura em suas bases, conferindo proteção, são denominadas inativas.

De acordo com Sunamura (2015), como resultado do processo erosivo e instabilidade gerada na base na falésia, ocorre a deposição de *talus* na região do sopé. Amin (2001) e Wolters e Muller (2008) discutem que a presença deste depósito de sopé garante estabilidade à falésia e que em sua ausência, ocorre um processo severo de erosão. O estudo do sopé da falésia é crucial para o entendimento do processo erosivo. Sem a presença do material de sopé, a ação de ondas faz com que a falésia aumente seu gradiente pela retirada de material, conferindo instabilidade à face da falésia e, conseqüente, os movimentos de massa (Carter e Guy, 1988). O estado de estabilidade permanece até que o depósito seja carregado ao longo da costa ou em direção offshore pela ação de ondas e correntes costeiras (Kamphuis, 1987; Sunamura, 2015). A mobilidade deste depósito determina a velocidade com que o ciclo

erosivo ocorre e conseqüentemente a intensidade da erosão total (Castedo *et al.*, 2013).

O processo erosivo em falésias está sujeito às variações de sua intensidade, tanto em termos temporais (Hapke e Plant, 2010; Hapke, Reid e Richmond, 2009) quanto espaciais (Griggs e Savoy, 1985; Carter e Guy, 1988). Existem diversas linhas de raciocínio com o intuito de explicar o controle desta variabilidade. No entanto em costas com falésias de composição homogênea, este processo é controlado primariamente pela ação das ondas (Sunamura, 1992) ressaltando a variabilidade do grau de exposição às ondas incidentes. Valentin (1954) e Ruggiero *et al.* (2001) mostram uma relação positiva entre as taxas de recuo das falésias e o grau de exposição às ondas. O incremento na exposição às ondas pode estar associado à variação batimétrica próximo à costa. A batimetria atua no comportamento das ondas junto a costa, o que pode acarretar ondas de maior altura e energia, acarretando erosões mais intensas em trechos específicos (Fleming, 1986). Robinson (1980) encontrou uma redução significativa nas taxas erosivas em falésias relacionada ao padrão de refração das ondas, devido à redução da energia que atinge as falésias. No entanto, a modificação do clima de ondas devido às flutuações meteorológicas e climáticas também pode ser responsável pela variabilidade do grau de exposição da costa.

Alguns autores sugerem outras relações para a erosão de falésias, especialmente aquelas precedidas por praias, levando em consideração as características das mesmas como altura, largura e gradiente (Carter e Guy, 1988; Lee, 2008; Nunes *et al.*, 2011; Sunamura, 2015).

As praias controlam a dissipação de energia das ondas e assim podem conferir proteção às falésias. Everts (1991) e Amin (2001) discutem a relação entre o recuo do pé da falésia e a largura da praia adjacente. Ruggiero *et al.* (2001) apontam que, com o incremento da altura da crista de praia há uma redução da duração do impacto das ondas sobre o pé da falésia. Já Nunes *et al.* (2011), mostram menores recuos das falésias estão associados às menores larguras da praia. Por outro lado, Hapke *et al.* (2009) não encontram evidências

consistentes para a relação entre a redução do recuo das falésias e o aumento da faixa arenosa.

A discussão sobre o papel de proteção da praia na proteção da falésia move estudos que buscam esclarecer a morfologia ideal da praia na proteção das falésias. Lee (2008) e Masselink e Hughes (2003) dizem que, em condições de tempestades, o sedimento erodido desenvolve um perfil praiial com morfologia plana, larga e baixa. Enquanto, sob condições de ondas menores, o perfil da praia tende a ser estreito, íngreme e com desenvolvimento da berma. Cowell *et al.* (1999) discutem que, sob ação de tempestades, o volume de sedimento presente na praia tende a diminuir devido ao processo de erosão. A modificação do perfil praiial sob condições de tempestades representa a troca de sedimentos da praia emersa com a antepraia submersa. Como resultado dessa troca sedimentar pode-se originar bancos de areia. Os bancos representam o acúmulo de sedimento devido à convergência dos fluxos junto ao fundo nos sentidos onshore e offshore. Em condições de baixa energia (tempo bom), os bancos migram em direção à costa e podem ser agregados ao perfil praiial. Em contrapartida, sob condições extremas de alta energia (tempestades), os bancos migram em direção offshore e o perfil praiial é erodido (Masselink e Hughes, 2003).

O surgimento e estabilização de praias adjacentes às falésias, segundo modelos evolutivos, são controlados pelas características da plataforma associada, tais como: disponibilidade de sedimento e gradiente, especialmente em áreas sob regime de meso e macromaré (Trenhaile, 2004). Para regiões de micromaré tem-se a largura e elevação da plataforma, assim como a presença de uma rampa como fatores controladores (Kennedy e Milkins, 2014). Segundo os autores, a presença da rampa está ligada ao estágio inicial de acúmulo sedimentar. Uma vez que a praia se estabelece, sua manutenção se dá principalmente em função da largura da plataforma, visto que há uma dissipação da energia de ondas sobre a mesma, o que permite que o volume praiial aumente. Limber e Murray (2011) encontraram, através de modelagem, que o sistema falésia/praiia é capaz de atingir um equilíbrio natural. Inicialmente a erosão das falésias disponibiliza sedimentos, que são retidos em embaiamentos, formando praias. Neste estágio, o sedimento atua de forma



abrasiva sobre a falésia, acelerando o recuo das falésias. Porém a medida que erosão continua a disponibilizar sedimentos para a praia, sua largura e elevação aumentam até que o processo erosivo cesse devido ao amortecimento das ondas pelas praias adjacentes. Em regiões onde não houve um acúmulo sedimentar inicial, se dá a formação de promontórios com ausência de praias. Desta maneira o estágio final é composto por trechos de falésias precedidas de praias com morfologia estável e ausência de praias em regiões de promontórios.

Com o avanço nos estudos em relação a erosão de falésias, uma gama de modelos foi desenvolvida com a intenção de quantificar e prever esse processo de recuo devido à ação de ondas. A maior parte dos modelos consideram os efeitos de turbulência, abrasão e variações na pressão hidrostática ao longo da zona de surfe e zona de empinamento (*shoaling*). Porém, pouca atenção é dada ao efeito direto das ondas e ao papel da morfologia da praia em determinar a frequência e intensidade dos impactos do espraio máximo (*runup*) ao pé da falésia (Castedo *et al.*, 2013). Esta discussão foi apresentada por Ruggiero *et al.* (2001) onde é destacado o processo de erosão ao pé da falésia quando o espraio máximo, causado quando o *espraio* das ondas, somado aos níveis de maré, excedem a elevação da junção entre praia/falésia. Desta forma, a quantificação do *espraio máximo* é essencial para a determinação da intensidade do potencial erosivo de falésias que possuem praias adjacentes.

Holman e Sallenger (1985), Holman (1986), Nielsen e Hanslow (2001) e Stockdon *et al.* (2006) associam o *espraio máximo* ao gradiente praiial. Por outro lado, Douglass (1992) afirma que existe uma independência do *espraio máximo* e o gradiente da praia, dado que o gradiente da praia é um parâmetro muito variável, causando interferências nos valores calculados de *espraio máximo*. Por exemplo, Holman (1986) afirma, que o gradiente praiial varia significativamente e conclui que não é possível estimar o gradiente de praias erosivas sobre condições de tempestades. Douglass (1992) utiliza os dados de Holman (1986) para mostrar que não há correlação entre o gradiente e os níveis extremos de *espraio máximo*. Douglass (1992) sugere, então, a existência de uma relação entre o *espraio máximo* e a altura, período e profundidade de ondas em águas profundas. Seguindo o preceito da

independência com o gradiente, Mather *et al.* (2011) propuseram um modelo para o cálculo de *espraiamento máximo* que considera o gradiente da praia emersa como função do gradiente entre o nível d'água máximo e a *profundidade de fechamento*. A partir da qual não existe troca sedimentar entre a praia e a plataforma continental, definindo uma maior estabilidade do limite proposto. Com base na adoção deste modelo proposto, os resultados se mostram satisfatórios, com menores erros quadráticos médios, quando comparados aos modelos de Holman (1986); Nielsen e Hanslow (2001) e Stockdon *et al.* (2006).

No Brasil as falésias ocorrem associadas a rochas friáveis ou sedimentares representadas pelo contato do Grupo Barreiras com o oceano, principalmente no litoral do Nordeste e parte do Sudeste (Muehe, 2001). Cerca de 20% de todos eventos erosivos registrados referem-se a costas de falésias sedimentares (Muehe, 2005). De acordo com Albino *et al.* (2001), a Formação Barreiras está presente em todo o litoral do Espírito Santo e apresenta contato direto com o mar na maior parte de sua extensão, exceto o trecho entre o Delta do Rio Doce e Barra do Riacho (Albino *et al.*, 2006). O litoral sul, onde está situada a área de estudo, é caracterizado por uma faixa arenosa estreita alternada pela presença de falésias vivas (Albino *et al.*, 2001) limitada a sul pelo Terminal Portuário de Ubu e a norte por um promontório cristalino. Verifica-se a presença de processos erosivos com recuo de falésias, resultados da incidência de ondas e o reduzido aporte sedimentar (Albino *et al.*, 2001). O recuo da linha de costa é expressivo, sendo observada a destruição da Rodovia ES-060 ou Rodovia do Sol, bem como a queda de parte do sistema de rede elétrica (cabos e postes) na área de falésias (Albino *et al.*, 2006; Modolo *et al.*, 2003; Albino *et al.*, 2016).

Dentro do contexto apresentado, visto a importância de se entender o comportamento de falésias, a presente dissertação tem como objetivo principal identificar a dinâmica e o estágio evolutivo em que se enquadra o sistema praia/falésia de três falésias homogêneas em trechos com orientação, batimetria e praias com características distintas ao longo da praia de Maimbá-ES. Este objetivo é alcançado pelo desenvolvimento de 2 (dois) objetivos específicos (Capítulos 2 e 3) e pela sintetização e conclusão, desenvolvidas no capítulo 4, como a seguir:

Capítulo 2 – Recuo das Falésias induzido pela ação de Ondas de gravidade incidente

Desenvolvimento: Correlacionar as taxas erosivas de falésias e com a variabilidade temporal e espacial da energia de ondas. A partir desta correlação, propor um modelo esquemático de erosão para a área de estudo e prever, baseado neste modelo, a tendência erosiva das falésias estudadas.

Capítulo 3 – Papel da praia na proteção das falésias

Desenvolvimento: Entender a morfodinâmica local a partir da determinação e aplicação da equação de espraiamento máximo mais adequada à área de estudo. Determinar a frequência com que os espraiamentos máximos superam a altura das praias, para avaliar o papel de proteção da praia sobre as falésias.

Capítulo 4 - Dinâmica e o estágio evolutivo do sistema praia/falésia na praia de Maimbá-ES

Desenvolvimento: Identificar o estágio evolutivo do sistema, a partir dos modelos evolutivos apresentados por Sunamura (2015), Limber e Murray (2011) e Kennedy e Milkins (2014).

Estes objetivos, quando finalizados contribuirão para a compreensão do processo de recuo das falésias e destruição da Rodovia do Sol, auxiliando na tomada de decisão pelos órgãos competentes.

## 1.2 ÁREA DE ESTUDO

### 1.2.1 LOCALIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS GERAIS

O arco praias das praias de Meaípe-Maimbá possui aproximadamente 6 km, delimitado por um promontório cristalino, ao norte, e pelo Terminal Portuário de Ubu, ao sul. As praias situam-se entre as coordenadas 40° 35'26" e 40° 37'56" de longitude oeste e 20° 44'31" e 20° 47'27" de latitude, pertencente ao município de Guarapari-ES (Figura 1. 1).

O litoral estudado está inserido em um trecho de afloramentos rochosos cristalinos em alternância com depósitos de Grupo Barreiras (Martin *et al.*, 1986). A plataforma continental possui uma morfologia heterogênea,

refletindo a presença de embasamentos de naturezas diversas, como recifes submersos, bancos de algas calcárias e feições provenientes da Formação Barreiras (Delpupo, 2011).

Segundo modelagem realizada por Pianca *et al.* (2010), as ondas na região possuem, predominantemente, altura significativa de 1 a 2 metros, período de 6 a 8 segundos e proveniência do quadrante leste. O litoral, submetido a um regime de micromaré e, apresentando, segundo a Diretoria de Hidrografia e Navegação (2016), níveis de maré variando entre -0,1m e 1,6m, com nível de maré média de 0,82m.

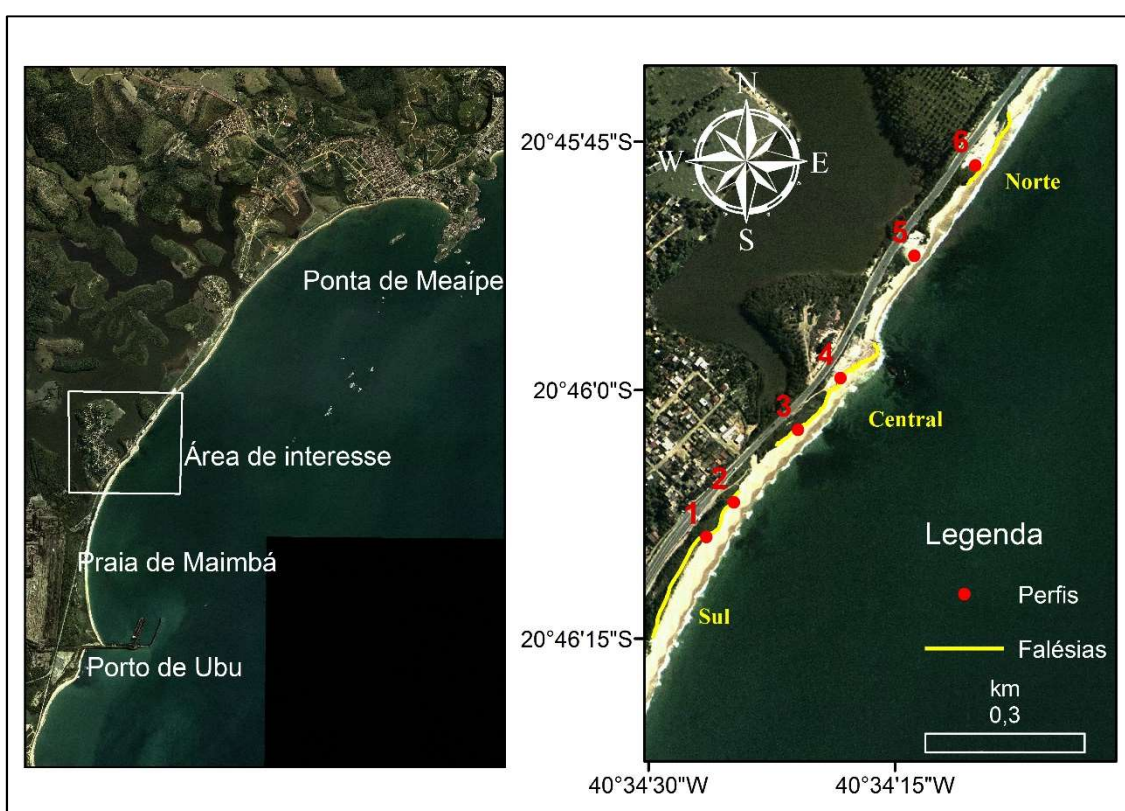


Figura 1. 1 – Mapa de localização da Praia de Maimbá, Falésias estudadas (Amarelo) e perfis topográficos levantados (Vermelho).

### 1.2.2 A PRAIA DE MAIMBÁ

O sedimento da praia é composto predominantemente por siliciclastos e minerais pesados, que podem atingir até 45% do peso das amostras na face da praia, quando há a retirada de sedimentos menos densos decorrente de eventos erosivos. As principais fontes destes sedimentos são as falésias adjacentes à praia e o material disponibilizado pelo intemperismo de

promontórios cristalinos (Coutinho, 1974; Anjos *et al.*, 2006). Os minerais pesados se concentram principalmente na porção centro norte da área de estudo (Albino *et al.* 2016), onde os processos erosivos são mais evidentes.

Segundo Albino *et al.* (2006, 2016) o setor norte da praia possui um cordão litorâneo estreito sob efeito de transposição de ondas, classificadas como unidade morfodinâmica refletiva à intermediária com presença de plataforma de abrasão rochosa, sujeito a difração de ondas causadas pela presença do promontório cristalino e de ilhas. O setor central apresenta falésias vivas precedidas de praia e recifes de arenito de praia, exposta às ondas incidentes e praia intermediária com presença de substrato sub-horizontal recoberto por concreções lateríticas. O setor sul por sua vez é composto por praia intermediária, controlada pela difração de ondas causada pelo Terminal Portuário de Ubu.

Perfis topográficos da área de estudo possuem um incremento em largura em direção ao sul da praia. Entre 2006 e 2008 perfis localizados nos setores norte e sul apresentaram respectivamente 23.56m e 38.36m de largura da praia emersa. A altura da crista do berma variou entre 1,44 e 4,10, apresentando o valor máximo na porção centro/sul (Albino *et al.* 2016). Os autores discutem a presença do Terminal Portuário de Ubu como uma barreira de retenção de sedimentos transportados pela corrente longitudinal.

As falésias encontradas na área de estudo representam depósitos sedimentares pertencentes a Formação Barreiras, compostas por minerais pesados como monazita, zircão, turmalina, rutilo e silimanita. Além disso as falésias apresentam acamamentos de sedimentos arenosos e lamosos, sendo os últimos intercalados por depósitos cascalhosos. Este tipo de *facies* indicam que o depósito está associado a fluxos gravitacionais e de suspensão relacionados a um transporte fluvial distal (Morais *et al.*, 2006).

A Figura 1. 2 ilustra os processos erosivos, principalmente no setor centro/norte constatados pela queda de estruturas associadas e ataque direto das ondas sobre a base das falésias (Oliveira *et al.*, (submetido); Modolo, Santos e Albino, 2003; Albino *et al.* 2016).

Oliveira *et al.* (submetido) modelaram, na área de estudo, as três seguintes condições de ondas a)  $H_s = 1,3$  m,  $T_p = 7,3$  s e  $Dr = 90^\circ$  b)  $H_s = 1$  m,  $T_p = 7,3$  s,  $Dr = 136^\circ$  e c)  $H_s = 1,3$  m,  $T_p = 7,3$  s e  $Dr = 165^\circ$ , onde  $H_s$  representa a altura significativa,  $Dr$  a direção preferencial e  $T_p$  o período de pico. Eguchi e Albino (2015) calcularam a taxa de variação da linha de costa em 55 anos (1953-2008) e realizaram a sobreposição da mesma à modelagem realizada, observando a correlação de trechos erosivos intensos e maiores alturas de ondas incidentes.



Figura 1. 2 - Processos erosivos constatados na área de estudo. Fotos: Jacqueline Albino em 2008.

## CAPÍTULO 2 – EROSÃO DAS FALÉSIAS INDUZIDA PELA AÇÃO DE ONDAS DE GRAVIDADE INCIDENTES

### 2.1 OBJETIVOS

- Mapear o recuo das falésias para determinação de áreas com maior potencial erosivos.

- Verificar a variação espacial e temporal da energia de ondas sobre as falésias, determinando assim o grau de exposição.
- Propor um modelo evolutivo e de predição do processo erosivo de falésias, com base na correlação entre o grau de exposição e o recuo das falésias.

## 2.2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.2.1 RECUO DAS FALÉSIAS

Araujo *et al.* (2008) destacam a utilização do sensoriamento remoto, via fotografias aéreas e imagens de satélite, como uma possível ferramenta para extração de indicadores da linha de costa. Boak e Turner (2005) propuseram uma sumarização das principais feições indicadoras da linha de costa. Muehe e Klumb-Oliveira (2014) ressaltam que um dos indicadores mais utilizado é a mudança de cor entre as faixas arenosas secas e úmidas, devido ao contraste formado. Porém a escolha deve ser adaptada às condições das imagens utilizadas e o objetivo do estudo, no caso da presente dissertação serão utilizadas as bases das falésias.

A metodologia utilizada foi a proposta por Thieler *et al.* (2005), também utilizada por Araújo *et al.* (2008) e Hapke *et al.* (2009), que consiste no uso do software *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS), desenvolvido para a plataforma ArcGIS empregada para quantificar as variações da base da falésia entre as imagens dos anos de 1953-1970, 1970-1995, 1995-2008, 2008-2016. Os recuos foram calculados e comparados para três falésias, de mesma composição sedimentar, localizadas na porção centro/sul da área de estudo (Figura 1. 1). Informações sobre as imagens utilizadas constam na (Tabela 2. 1).

*Tabela 2. 1 - Informações sobre as imagens utilizadas no estudo. As siglas referem-se a Instituto Jones Santos Neves (IJSN) e Sistema Integrado de Bases Geospaciais do*

*Estado do Espírito Santo (GEOBASES). O erro médio quadrático (EMQ) refere-se ao erro de georreferenciamento entre as imagens.*

Ano	Fonte	Escala	Resolução (pixel/m <sup>2</sup> )	EMQ (m)
1953	IJSN	1:7800	aprox. 1	
				3,8
1970	IJSN	1:7800	aprox. 1	
				3,8
1995	GEOBASES	1:7800	aprox. 1	
				2
2008	GEOBASES	1:7800	aprox. 1	
				2,1
2016	Google	1:7800	aprox. 1	

## 2.2.2 ONDAS

Dados de alturas significativas, direções e períodos de picos foram obtidos através do modelo *Global Ocean Wave (GOW)* para os anos entre 1948 e 2008. O modelo consiste em uma reanálise de dados globais de ondas realizada em Reguero *et al.* (2012). Os resultados para a área de estudo foram previamente calibrados e validados por Albino *et al.* (2016), através de comparação com dados de ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*), localizado a 25 metros de profundidade. As alturas de ondas foram tratadas e confrontadas aos dados de recuo da falésia, obtidos na sessão anterior, em seus respectivos intervalos. Desta maneira, foi possível identificar relações entre as maiores taxas de recuo e a distribuição da energia de ondas incidentes.

### 2.2.2.1 VARIAÇÃO ENERGÉTICA

Com base nos dados obtidos pelo modelo GOW, classificou-se dentro dos seguintes intervalos 1953-1970, 1970-1995, 1995-2008, as ondas mais recorrentes. Estas ondas foram então propagadas de águas profundas para área de estudo utilizando o modelo OLUCA-MC, pertencente ao módulo de dinâmica praias em curto prazo (MOPLA), parte do Sistema de Modelagem Costeira do Brasil (SMC-Brasil).

A batimetria empregada foi digitalizada a partir de CEPEMAR (2008) que realizou o levantamento utilizando um ecobatímetro digital e sistema de DGPS. Para contornar a falta de batimetrias pretéritas foram analisadas somente as



alturas de ondas em isóbatas maiores que a profundidade de fechamento da praia, definida por Hallermeier (1981). Adota-se que a partir do perfil de fechamento não há troca sedimentar entre praia emersa e submersa, reduzindo a modificação do leito oceânico ao longo do tempo.

A energia foi calculada com base na teoria linear de ondas de pequena amplitude proposta por Airy (1841), através da Equação 2.1. Posteriormente determinou-se a variação da mesma entre os períodos estudados, com intuito de avaliar a correlação entre o comportamento espaço/temporal do recuo das falésias e a variação energética das ondas.

$$E = \frac{1}{2} \rho g 2H^2 \quad (2.1)$$

Onde E representa a energia por unidade de área,  $\rho$  a densidade da água do mar e H a altura da onda.

#### 2.2.2.2 ALTURAS DE ONDAS E EVENTOS EXTREMOS

Com base no banco de dados do modelo GOW a variação anual das alturas de ondas, em relação a altura média para o período total, foi determinada. O comportamento das ondas foi correlacionado ao recuo das falésias a fim de identificar padrões entre aumento/diminuição energética e intensificação/diminuição do processo erosivo.

Além disso, realizou-se a filtragem de eventos de alta energia. Para isto, foram quantificadas a frequência das ondas acima da média total do período 1953-2008. As informações foram classificadas em cinco classes: acima da média em até 30%, 40%, 50%, 60% ou mais que 70%.

### 2.3 RESULTADOS

#### 2.3.1 RECUO DAS FALÉSIAS

A Falésia Sul (Figura 1. 1) apresentou o maior recuo acumulado, somando 51 metros entre 1953 e 2016 (Figura 2. 1). Nesta falésia a taxa anual média de recuo, calculada para o mesmo prazo de 63 anos, foi de 0,80 m/ano

(Figura 2. 2). No entanto, analisando períodos mais curtos, as taxas são superiores: 1,05; 0,89; 0,99 m/ano para os intervalos de 17, 25 e 8 anos respectivamente. Exceto a taxa estimada para os anos de 1995 e 2008, cujo valor apresentou 0,19 m/ano.

Para a Falésia Central foi calculado um recuo total de 43 metros, com uma taxa média anual de 0,69 m/ano para o período de 1953-2016 (Figura 2. 1 e Figura 2. 2). Assim como a Falésia Sul, ao dividir em subintervalos, tem-se taxas diferentes da média entre os anos de 1953-1970 e 2008-2016, totalizando 0,83 e 0,87 m/ano respectivamente. Por outro lado, as taxas entre 1970-1995 e 1995-2008 se mostraram abaixo da média para o prazo de 63 anos, sendo respectivamente 0,64 e 0,45 m/ano (Figura 2. 2).

Dentre as falésias estudadas, a falésia Norte obteve o menor recuo acumulado, de apenas 18 metros com uma taxa de 0,43 m/ano em 63 anos (Figura 2. 1 e Figura 2. 2). As taxas para cada período indicam valores de 0,03; 0,24 e 0,06 para os intervalos de 1953-1970, 1970-1995 e 1995-2008. Apesar de se verificar um pico na taxa erosiva entre 1970-1995 (Figura 2. 2), os valores de recuo da Falésia Norte são muito abaixo das demais falésias e até mesmo das taxas médias em 63 anos. Exceto entre os anos de 2008 e 2016, quando em um intervalo de 8 anos a taxa alcançou valor de 1,39 m/ano. Este valor representa mais de 200% acima da média para o período total, sendo a maior taxa de recuo calculada neste estudo (Figura 2. 2).

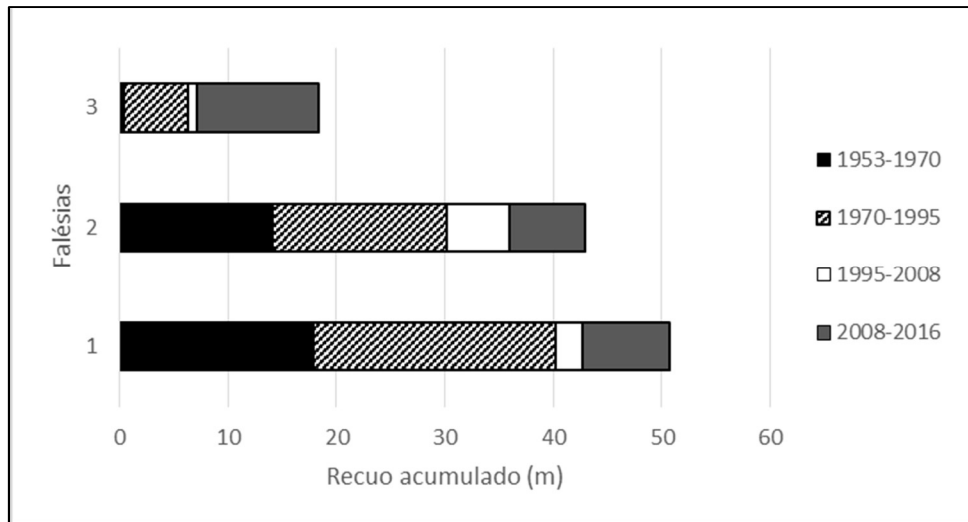


Figura 2. 1 - Recuo acumulado extraído a partir da comparação entre as linhas de falésias dos anos em questão

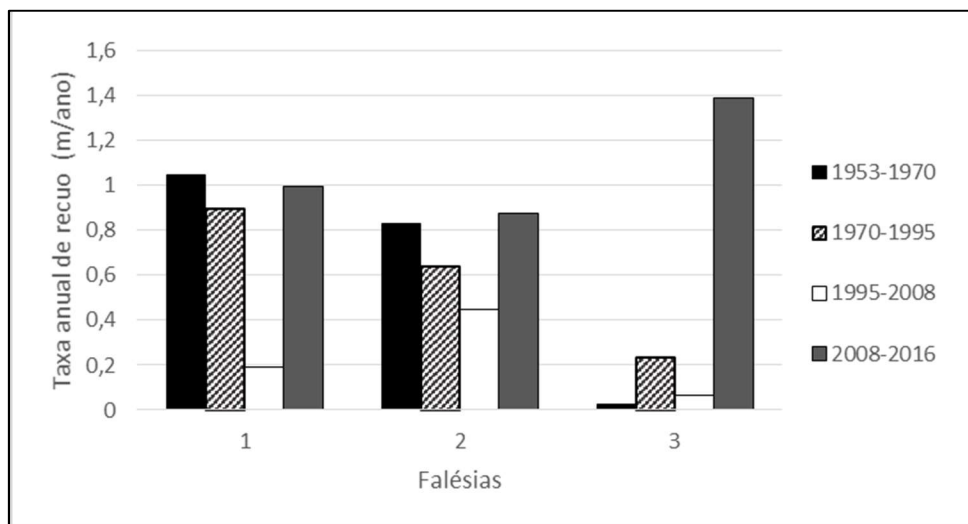


Figura 2. 2 – Taxas de recuo anual das falésias calculadas com base nos recuos de cada período.

Entre os períodos de 1953-1970 e 1970-1995, a Falésia Sul mostrou maior recuo em relação as outras (Figura 2. 1). Já entre 1995-2008, a Falésia Central recuou mais do que as demais. Este padrão se modifica novamente entre 2008-2016, quando a Falésia Norte apresentou o maior recuo. A partir da análise dos recuos acumulados em intervalos específicos é evidenciado a variabilidade espacial do comportamento erosivo das falésias.

Em geral, desde 1953 a 2008, os recuos das falésias mostram uma tendência de decréscimo das taxas erosivas. Porém, o comportamento entre 2008 e 2016 mostra um rápido aumento do processo erosivo, sugerindo a intensificação de fatores que controlam a erosão em falésias, como a ação de ondas.

### 2.3.2 ONDAS

#### *Variação da energia de ondas*

Os resultados são apresentados em forma de variações positivas e negativas que indicam respectivamente: aumento (vermelho) e diminuição (azul) da energia de ondas para o período analisado (Figura 2. 3).

O intervalo 1953-1970 apresentou a menor variação entre os períodos calculados, com valores entre 133 e -352 J/m<sup>2</sup>. Observou-se que há pequenas áreas que indicaram o aumento da energia das ondas, principalmente nos setores das falésias sul e central. Já nas proximidades da Falésia Norte, não houve aumento expressivo da energia.

Durante o período 1970-1995, a energia das ondas apresentou maior amplitude na variação, alcançando valores entre 283 e -383 J/m<sup>2</sup>. Notou-se um padrão para este intervalo diferente do anterior. As faixas de aumento energético estenderam-se de profundidades maiores, especialmente sobre as falésias central e norte. Já sobre a Falésia Sul, observou-se uma extensa faixa de diminuição energética e um pequeno trecho de incremento de energia no extremo sul.

O período entre 1995 e 2008, apresentou valores extremamente elevados entre os calculados, com mínimo de -150 J/m<sup>2</sup> e máximo de 632 J/m<sup>2</sup>. O aumento da energia de ondas foi observado, principalmente sobre a Falésia Norte. Já sobre as falésias sul e central observou-se faixas de nenhum ou pouco incremento de energia.

De modo geral, em toda a região analisada, houve um aumento energético das ondas ao longo do período analisado. Este aumento se deu de forma mais intensa nas adjacências da Falésia Norte.

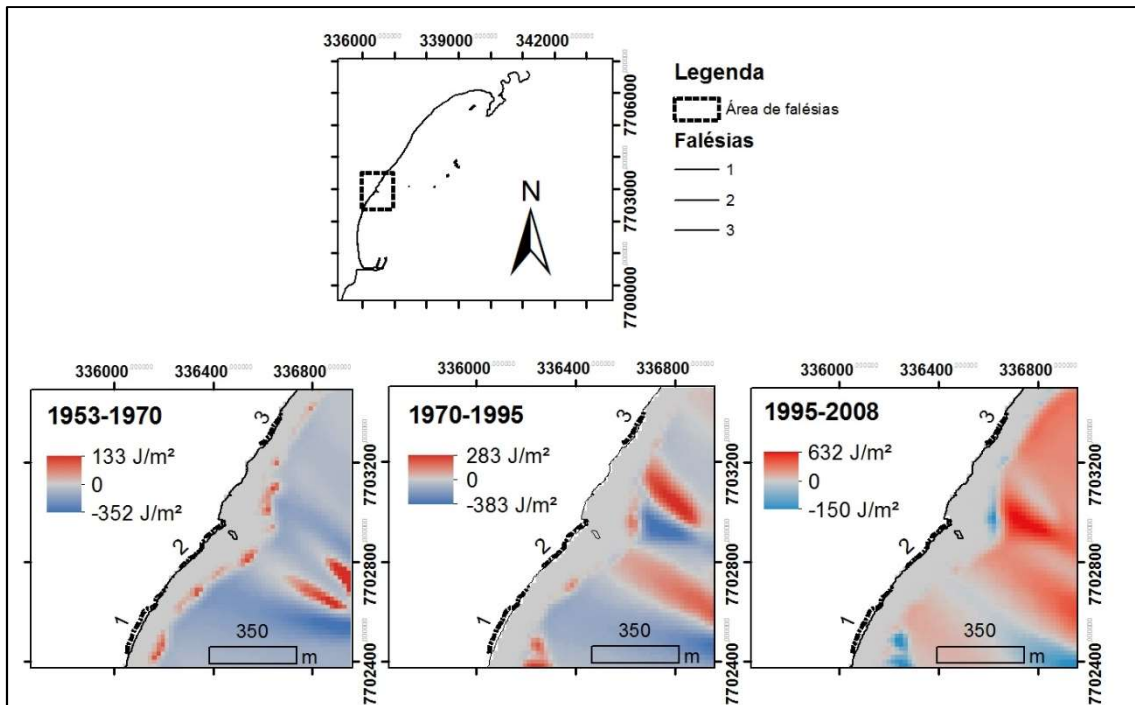


Figura 2. 3 - Variação energética modelada mostrando o grau de exposição às ondas entre 1953-1970, 1970-1995 e 1995-2008.

#### *Variação interanual das alturas de ondas (GOW)*

A análise de alturas de ondas foi feita com base na comparação entre a média do período total (1953-2008) e a média de alturas significativas para cada ano, de dados extraídos do Global Ocean Wave (GOW) (Figura 2. 4).

Durante o intervalo 1953-1970 houve 11 anos que registram valores mais altos que a média do período total. Dentre estes, o período de 6 anos seguidos (1956-1961), que se mostrou o mais longo registrado. Este período é marcado por breves momentos de médias anuais abaixo da média total.

Por outro lado, no período entre 1970-1995 foi registrado o mais longo período de alturas abaixo da média total, somando 5 anos consecutivos (1976-1980). Diferente do período anterior, este intervalo mostrou predominância de ondas com alturas significativas anuais médias abaixo da média total.

Entre 1995 e 2008, notou-se um comportamento semelhante ao do período de 1953-1970. Prevaleram momentos de maior energia, com alturas significativas anuais medias ondas acima da média total, intercalados por breves episódios de alturas abaixo da média total. Destaca-se o intervalo entre 2003-

2008, no qual houve um incremento acentuado na média anual. Esta variação indicou uma tendência de aumento energético que pôde ser projetada para os anos seguintes.

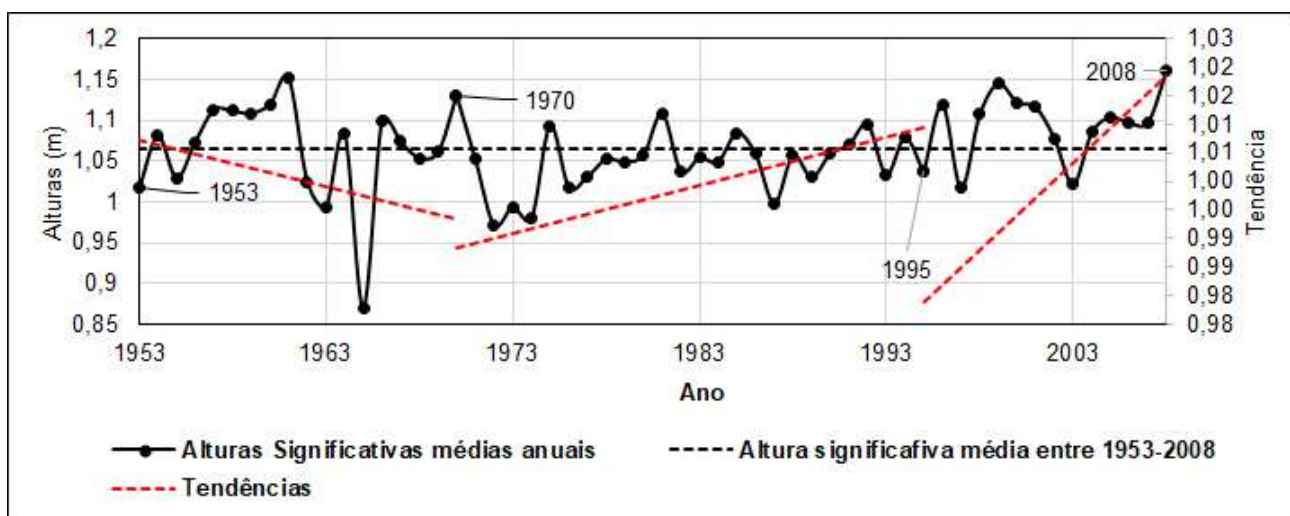


Figura 2. 4 - Alturas médias para cada ano entre o intervalo entre 1953-2008 (Linha sólida), Tendências (Tracejado vermelho) e altura média entre o período entre 1953-2008 (Tracejado preto)

#### *Frequência de eventos extremos*

Com intuito de identificar momentos de maior energia calculou-se, para os intervalos 1953-1970, 1970-1995, 1995-2008, a porcentagem de registros de alturas superiores à média do período total (1953-2008) (Figura 2. 5).

Os resultados indicaram que a maior recorrência de eventos diz respeito a ondas com de alturas acima da média total em até 30% e totalizam 5,1%, 4,7% e 6,1% dos registros horário totais para os períodos de 1953-1970, 1970-1995 e 1995-2008, respectivamente. Já eventos com maiores alturas de ondas são mais raros, no entanto, indicam o comportamento das ondas ao longo do tempo. Observou-se que em todas as classes o período de 1995-2008 prevaleceu com maior porcentagem de registros, sendo este o período mais energético dentre os demais.

Entre os anos de 1953-1970 e 1970-1995 foi observada a redução nas frequências das classes até 60%, seguida de um pico de ocorrência entre 1995-2008. Porém, esse padrão foi diferente para as classes até 60%, 70% e

80%, nas quais se observou um incremento ao longo do tempo total analisado. Já a classe até 90% e maiores que 90% apresentaram uma redução entre 1953-2008.

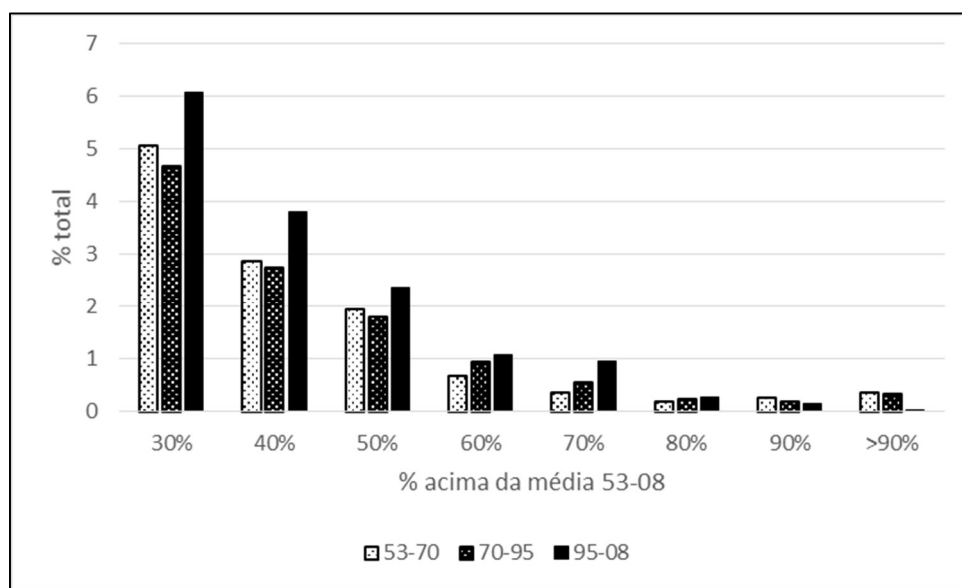


Figura 2. 5 – Porcentagem de ondas com valores acima da média, calculada entre 1953-2008, para cada subintervalo.

## 2.4 DISCUSSÃO

Estudos realizados em costas de falésias sedimentares apresentam taxas erosivas semelhantes as calculadas neste estudo (Dombusch et al., 2008; Moses e Robinson, 2008; Del Rio et al., 2016). As diferenças ao longo do tempo entre as taxas de recuo calculadas para longo prazo (63 anos) e curto prazo (8-25 anos) estão em concordância com diversos trabalhos realizados, onde as taxas em longo prazo mostram valores menores quando comparadas com taxas em curto prazo dentre eles Hapke e Plant (2010), Hapke *et al.* (2009), Griggs e Savoy (1985) e Castedo *et al.* (2013).

O fato de períodos curtos possuírem maiores taxas de erosão é explicado pelo modo como ocorre o processo erosivo em falésias. Sunamura (1992) conclui, através da relação entre a taxa de erosão média e a taxa de erosão produzida por ondas de eventos extremos, que o recuo das falésias ao longo dos anos acontece de forma episódica, em função dos breves momentos de alta energia. Logo, mesmo que haja erosões intensas durante o curto prazo,

quando o processo erosivo é avaliado em longo prazo tende a ser mascarado e percebe-se mais ameno, já que não ocorre de forma contínua. Este padrão é demonstrado por Castedo *et al.* (2013), com base em resultados de modelagem numérica. Segundo os autores, o recuo de falésias acontece em forma de patamares ao longo do tempo, evidenciando períodos de não erosão intercalados por breves momentos de erosão (Figura 2. 6).

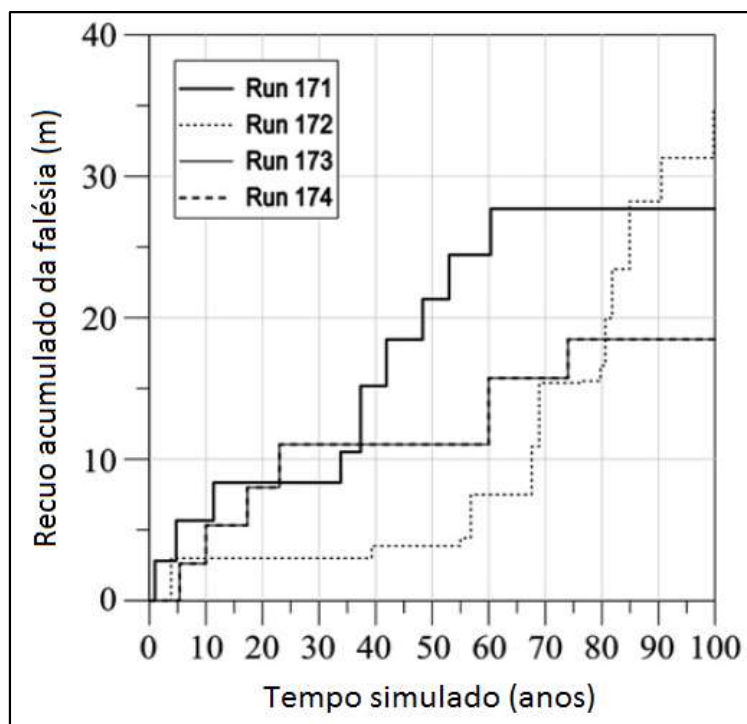


Figura 2. 6 - Comportamento erosivo de falésia modelado ao longo de 100 anos, mostrando a ocorrência episódica de eventos erosivos. Modificado de Castedo *et al.* (2013).

De forma geral, observa-se que as falésias da praia de Maimbá caminhavam para um estágio de estabilização entre os anos de 1953-2008, visto que suas taxas erosivas decaíram no período. Este estágio é seguido por um intenso processo erosivo em toda região, com elevadas taxas de recuo das falésias, no período entre 2008 e 2016. Quedas de material e danos à infraestrutura local são observados (Figura 2. 7).

Com base nos recuos acumulados e nas taxas de recuo é possível notar que, apesar das falésias seguirem um mesmo padrão, existe uma variação espacial nas intensidades de recuo, demonstrando diferentes velocidades de



erosão, o que também foi constatado por Carter e Guy (1988) e Griggs e Savoy (1985).



*Figura 2. 7 - Processos erosivos constatados na área de estudo danificando estrutura rodoviária (ES-060).*

Ao correlacionar os resultados do comportamento das ondas com as taxas erosivas, observa-se que a variação da energia de onda condiz com a variabilidade do processo erosivo sobre as falésias, uma vez que a taxa erosiva em falésias é função da ação de ondas (Collins e Sitar, 2008; Kamphuis, 1987). No primeiro período monitorado (1953-1970) tem-se menor energia sobre as falésias central e norte, refletindo em menores taxas erosivas quando comparadas com a Falésia Sul, mais exposta às ondas. Já em 1970-1995, a modelagem das ondas indica que a Falésia Sul se encontra em um período de redução energética, enquanto na Falésia Central há um aumento energético. Neste momento a Falésia Central passa a ser o setor mais erosivo. Por fim, devido ao acentuado aumento de energia sobre a Falésia Norte, esta reflete o momento de maior erosão entre 1995-2008.

A relação entre grau de exposição e erosão se evidencia principalmente na mudança de setores erosivos detectados, em concordância com Eguchi e Albino (2015), Valentin (1954), Ruggiero *et al.* (2001), Fleming (1986) e Robinson (1980a). Na área de estudo, a presença de promontórios, ilhas e o Porto de Ubu alteram significativamente a distribuição energética sobre as falésias em escala espacial e temporal. Os efeitos da difração das ondas incidentes em torno da estrutura portuária, que representa um obstáculo, dissipam radialmente a energia das ondas.

O período inicial (1953-1970) é marcado por longos períodos de alturas anuais acima da média total (Figura 2. 4). Neste intervalo registra-se também frequentes registros horários de ondas acima da média, em especial, nas classes até 90% e maiores que 90%, o que representa eventos altamente energéticos (Figura 2. 5). Este padrão se encontra em concordância com o comportamento erosivo das falésias, dado que o ataque de ondas com maior energia proporciona um aumento nas taxas de erosão (Sunamura, 1992; Griggs e Trenhaile, 1994).

Entre 1970 e 1995 se observa uma redução na taxa erosiva. Este comportamento ocorre em um período de diminuição energética. Médias anuais apontam uma redução na energia das ondas, quando registram períodos prolongados abaixo da média total (Figura 2. 4). A quantidade de registros acima da média neste período é reduzida, salvo as classes até 60% e 70% (Figura 2. 5). Observa-se também decréscimo da tendência projetada em 1953-1970, que reflete esta diminuição no potencial das ondas (Figura 2. 4).

Até o ano de 1995, o comportamento erosivo é sustentado pela variação energética das ondas. Porém, entre 1995 e 2008, apesar do incremento acentuado na energia de ondas (Figura 2. 3), das alturas anuais superando a média total por longos períodos (Figura 2. 4), da grande frequência de registros horários acima da média (Figura 2. 5), as taxas erosivas encontradas são baixas, em comparação aos outros intervalos (Figura 2. 2). No entanto, ao se analisar a frequência de eventos extremos, observa-se uma redução. Desta forma, a redução no processo erosivo pode ser associada à redução de episódios de alta

energia como as fortes tempestades, conforme discutido em Griggs e Trenhaile (1994); Castedo *et al.* (2013); Carter e Guy (1988) e Collins e Sitar (2008).

Hakpe *et al.* (2009), Sunamura (1992) e Carter e Guy (1988) discutem que a presença de *talus* no pé da falésia, originados do processo erosivo, coincide com momentos de estabilização da falésia. Assim, a proteção conferida por este depósito pode explicar o atraso no processo erosivo frente aos momentos de alta energia de ondas entre os anos de 1995 e 2016. Além disso, o contínuo aumento do registro de ondas acima da média em mais de 60%, entre 1953-2008, pode estar associado ao rápido aumento do processo erosivo no intervalo 2008-2016.

A partir da variação do grau de exposição, clima de ondas, taxas erosivas e a compilação de discussões sobre ação das ondas no processo erosivo das falésias (Sunamura, 1973; Sunamura, 1983; Kamphuis, 1987; Carter e Guy, 1988; Sunamura, 1992; Amin, 2001; Wolters e Muller, 2008; Castedo *et al.*, 2013 e Sunamura, 2015) é possível determinar o ciclo erosivo genérico de falésias discutido (Figura 2. 8).

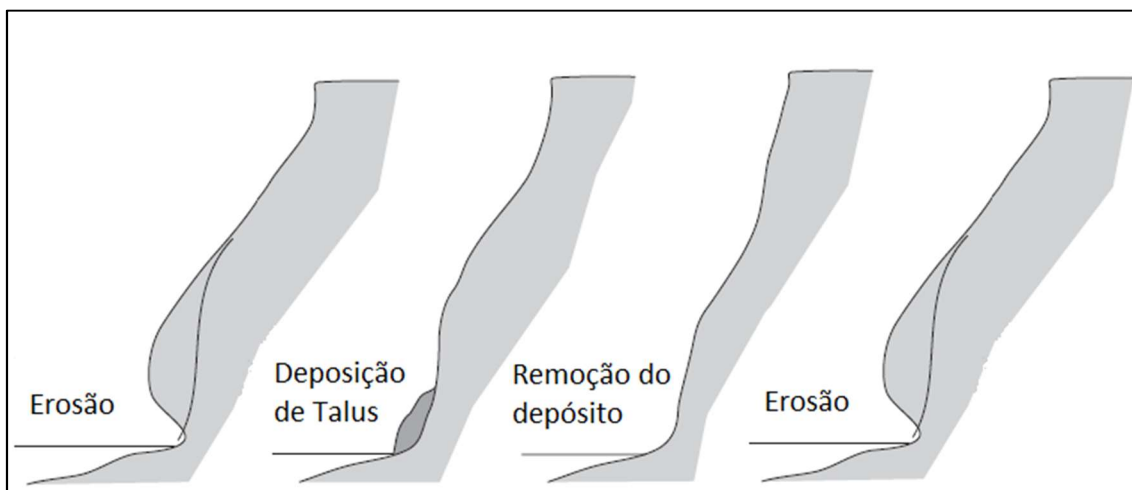


Figura 2. 8 - Ciclo evolutivo de falésias no Lago Erie (EUA), ilustrando o processo erosivo intercalado por momentos de proteção do sopé por depósitos erodidos. Modificado de Amin (2001).

Assim, pode-se inferir que o ciclo erosivo das falésias sul e central na área de estudo é representado pelo período entre 1953-1970 marcado por altas taxas erosivas relacionadas a alta energia de ondas. Já em 1970-1995 a redução

energética de ondas permite que o material erodido no período anterior se mantenha depositado e assim, conferindo proteção à falésia, reduzindo suas taxas de recuo. Mesmo com o aumento da energia de ondas entre 1995-2008 as taxas permanecem baixas, provavelmente devido ao material no pé da falésia estar sendo atingido e parcialmente remobilizado. Apesar de não haver dados de ondas para o período 2008-2016, existe uma tendência de elevação das alturas de ondas entre 2003 e 2008. Esta se mostra em concordância com as elevadas taxas erosivas calculadas entre 2008-2016, representando o período em que o *talus* possivelmente é transportado, permitindo com que as ondas alcancem novamente a base da falésia (Figura 2. 9).

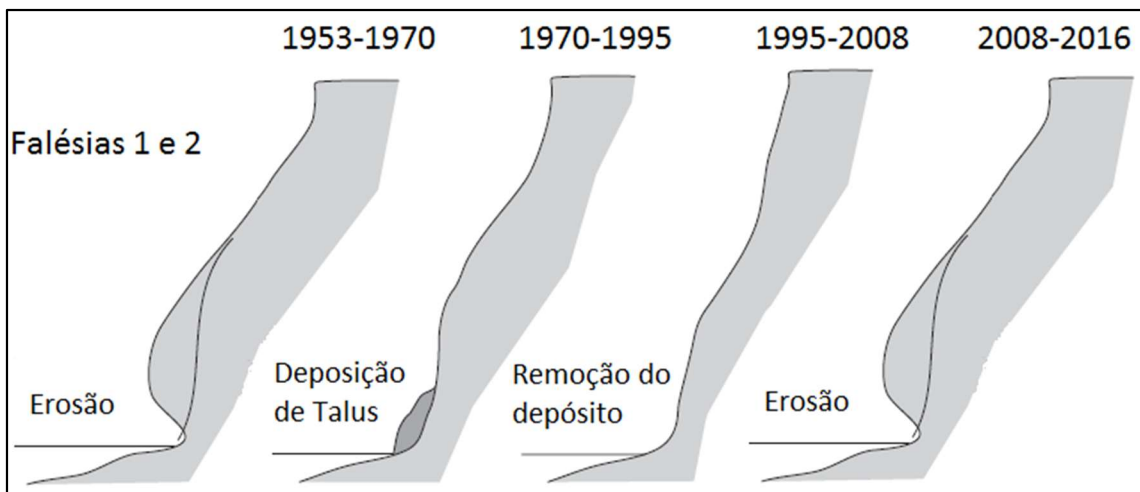


Figura 2. 9 - Ciclo evolutivo proposto para as falésias sul (1) e central (2) da praia de Maimbá, baseado do modelo de Amin (2001) e no comportamento erosivo e nos dados de alturas de ondas.

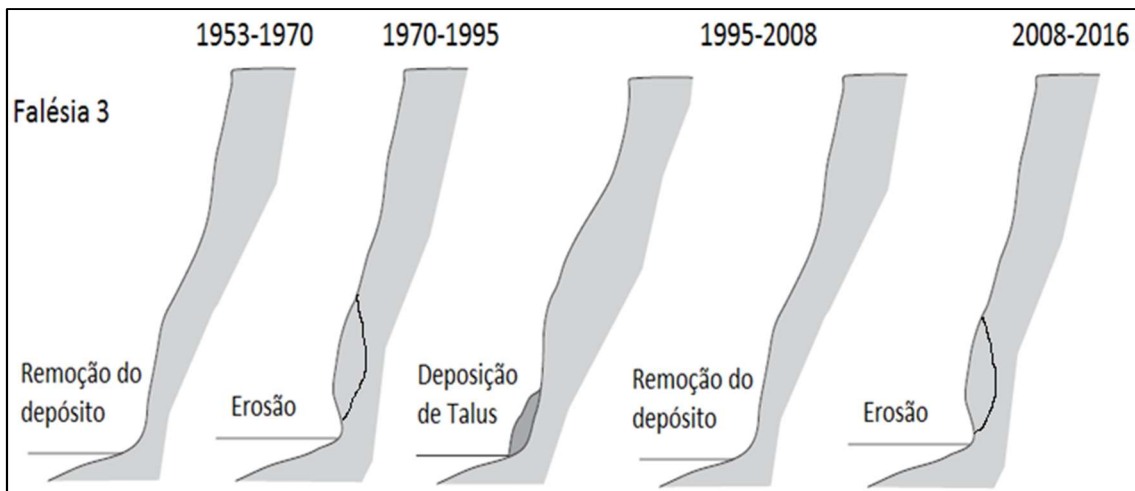


Figura 2. 10 - Ciclo evolutivo proposto para a Falésia Norte(3) baseado em Amin (2001) e no comportamento erosivo e nos dados de alturas de ondas.

A Falésia Norte, por sua vez, apresenta estágios diferentes. Sobre esta falésia observa-se um brando processo erosivo durante os períodos de 1953-1970. Portanto, pouco material deve ter sido disponibilizado na região do pé da falésia durante este período, em função de sua menor altura. Este período possivelmente representa uma fase de retirada do material do *talus*, dado as elevadas alturas de ondas. Apesar do período 1970-1995 apresentar uma redução das alturas das ondas, a ausência de *talus* induz ao aumento da erosão neste intervalo. Como produto da erosão, o depósito de material do *talus* confere certa proteção entre os anos de 1995-2008, visto a diminuição da taxa erosiva frente ao aumento energético das ondas. Por fim, entre os anos de 2008 e 2016, com a pequena atuação do talus, provavelmente retirado pela ação das ondas no período anterior, a falésia mostra o maior pico erosivo calculado para a área de estudo (Figura 2. 10). Apesar da falta de dados de ondas para este período, a tendência de aumento na altura de ondas, observada no período anterior, corrobora com o pico erosivo encontrado (Figura 2. 4).

Embora apresentem mesma composição, as falésias sul e central possuem aproximadamente 8 metros de face, enquanto a Falésia Norte mede 5 metros em média. Sob processo erosivo, falésias com menores alturas disponibilizam menos material para a base (Dombusch *et al.*, 2008; Sunamura, 2015). Desta forma, menor proteção é oferecida contra o ataque das ondas e

mais rápido é o ciclo erosivo de falésias menores (Castedo *et al.*, 2013). Atualmente nota-se que as falésias sul e central possuem uma significativa quantidade de material em sua base. Assim, pode-se inferir, com base no ciclo proposto, que estas encontram-se em um momento de estabilidade, pois a ação das ondas se concentra em remover este material ao invés de erodir a falésia (Figura 2. 11). Na Falésia Norte, por outro lado, não há presença de material protegendo sua base, já que o pequeno volume de material disponibilizado pelo processo erosivo entre 2008 e 2016 já foi remobilizado (Figura 2. 12). Desta forma, infere-se que a Falésia Norte está em um momento erosivo, visto a falta de proteção contra o ataque das ondas.





*Figura 2. 11 - Foto tirada em campo (2017) mostrando o depósito de material erodido das Falésias Sul (acima) e Central (abaixo).*



Figura 2. 12 - Foto tirada em campo (2017) ilustrando a ausência de talus na base da Falésia NorteFalésia NorteFalésia Norte.

## 2.5 CONCLUSÃO

A Falésia Sul apesar de apresentar o maior recuo acumulado, atualmente se encontra em um estágio de estabilização. Enquanto a Falésia Norte, com menor recuo acumulado ao longo do período total, passa por um momento erosivo e demanda atenção quanto as estruturas rodoviárias.

Há uma forte variação espaço-temporal do processo erosivo, dado que para mesmos intervalos temporais, as falésias mostram diferentes ritmos erosivos longo do período total. Este comportamento variável é explicado pela modificação de agentes externos que controlam o processo erosivo, entre eles, investigou-se nesta seção o grau de exposição a ondas.

A correlação entre os recuos e as ondas permite concluir que, apesar da distribuição energética de ondas e o comportamento das falésias mostrarem uma forte relação, momentos prolongados de alta energia não necessariamente induzem erosão, por exemplo 1995-2008.

Desta forma, o processo erosivo em falésias é função de eventos extremos episódicos e do estágio em que a mesma se encontra. Destaca-se a importância da presença de *talus* como agente protetor da falésia. Portanto, é



preciso entender e avaliar o ciclo evolutivo das falésias a fim de determinar áreas de potencial risco.

## **CAPÍTULO 3 – O PAPEL DA PRAIA NA PROTEÇÃO DA FALÉSIA**

### **3.1 OBJETIVOS**

- Compreender a morfodinâmica praial e identificar o papel da geomorfologia sobre os processos costeiros.
- Comparar diferentes modelos de predição de espraamentos, a fim de determinar a equação mais adequada para a área de estudo.
- Determinar a capacidade da praia em proteger as falésias contra a ação do espraimento das ondas.

### **3.2 MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.2.1 MORFOLOGIA E VARIAÇÃO TOPOGRÁFICA**

Os dados de levantamentos topográficos praial foram adquiridos através de nivelamento geométrico em 6 perfis de falésia na área de estudo (Figura 1. 1). No levantamento foram utilizados: nível ótico CST/Berger, para leitura; mira e trena. Todos os perfis possuíam como início marcos fixos (vergalhões) instalados nas falésias e se estenderam até o máximo recuo das ondas. Além disso, os perfis foram plotados, tendo como referência vertical, o nível médio da maré no local como zero (Figura 3. 1). As datas e os perfis realizados em cada campanha de campo estão listados na Tabela 3. 1.

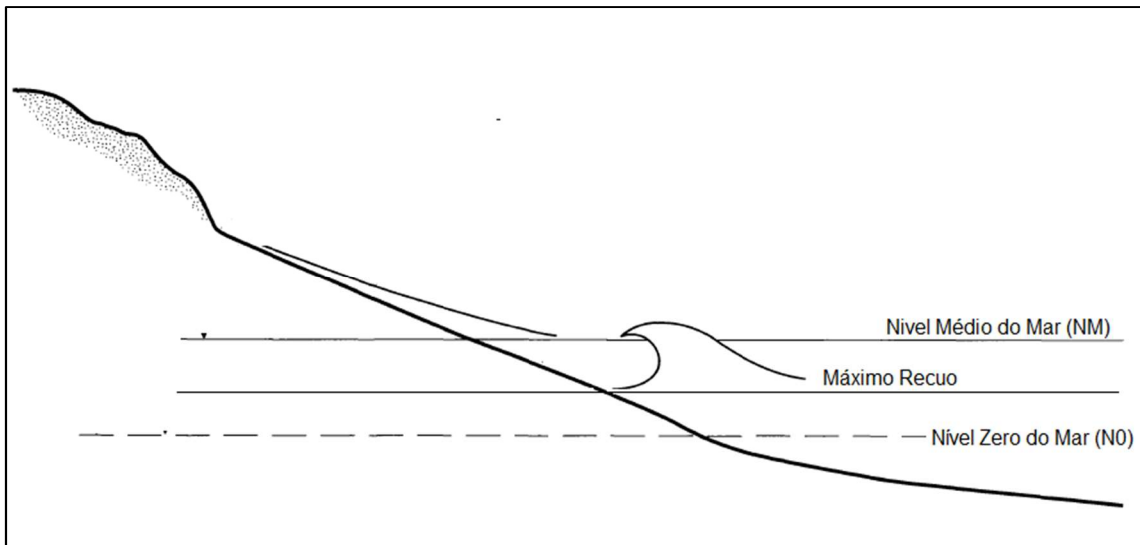


Figura 3. 1 - Esquemática do perfil topográfico levantado mostrando a correção realizada. Por convenção o zero do perfil é o Nível Médio do Mar (NM).

Tabela 3. 1 - Datas das campanhas de campo realizadas.

Data/Perfis	P1	P2	P3	P4	P5	P6
19/12/2014	✓			✓	✓	
20/01/2015	✓			✓	✓	
06/03/2015	✓			✓	✓	
17/04/2015	✓			✓	✓	
22/05/2015	✓			✓	✓	
02/07/2015	✓			✓	✓	
08/04/2016	✓	✓	✓	✓	✓	✓
06/06/2016	✓	✓	✓	✓	✓	✓
19/08/2016	✓	✓	✓	✓	✓	✓
14/10/2016	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Total	10	4	4	10	10	4

### 3.2.2 DETERMINAÇÃO DO ESPRAIAMENTO MÁXIMO (*RUN UP*)

Para que não haja erosão da base da falésia é necessário que o espraio máximo da onda não tenha alcance ao pé da falésia. Equações de *espraio máximo* podem ser estimadas utilizando as condições de onda em águas profundas (Sallenger *et al.*, 2002). Conforme proposto por Ruggiero (2001) a erosão da falésia ocorre quando:

$$(E_t + W_r) > E_{cf} \quad (3.1)$$

Onde tem-se a elevação da maré ( $E_t$ ), *espraiamento máximo* das ondas ( $W_r$ ) calculado, e a elevação da junção entre a praia e a falésia ( $E_{cf}$ ), adquiridas através de levantamentos topográficos. Desta forma, é possível identificar momentos em que a elevação da junção, medida em campo, é superada pela maré somada ao *espraiamento máximo* desencadeado o processo erosivo.

Ruggiero et al. (2001) determinam o *espraiamento máximo* através de uma relação empírica aplicando 2% excedentes dos valores máximos ( $R_{2\%}$ ), o gradiente da praia ( $S$ ), altura significativa e comprimento das ondas em águas profundas ( $H_s$  e  $L_o$  respectivamente).

$$R_{2\%} = 0.27(SH_sL_o)^{0,5} \quad (3.2)$$

Outras equações para o cálculo do *espraiamento máximo* vêm sendo propostas, dentre elas Stockdon et al. (2006) e Mather, Stretch e Garland (2011).

Stockdon et al. (2006) definem como 2% excedentes dos valores máximos do *espraiamento máximo* ( $R_{2\%}$ ):

$$R_{2\%} = 1.1(0,35\beta_f(L_oH_o)^{0,5} + \frac{[L_oH_o(0,563\beta_f^2 + 0,004)]^{0,5}}{2}) \quad (3.3)$$

Onde o gradiente da praia ( $\beta_f$ ) e altura e comprimento das ondas em águas profundas ( $H_o$  e  $L_o$  respectivamente) são levados em consideração.

A adaptação do *espraiamento máximo* ( $R_x$ ) proposto por Mather, Stretch e Garland (2011) postula que:

$$\frac{R_x}{H_o} = CS^{\frac{2}{3}} \quad (3.4)$$

Onde  $R_x$  representa o *espraiamento máximo*,  $H_o$  é a altura das ondas em águas profundas,  $S$  consiste na relação entre a profundidade de fechamento e a distância desta até a praia (nível d'água) e  $C$  representa um coeficiente não dimensional.

A profundidade de fechamento ( $h$ ) é definida por Hallermeier (1981) como a relação entre a média das alturas significativas das ondas ( $\overline{H_s}$ ) e seu desvio padrão ( $\sigma$ ).

$$h = 2\overline{H_s} + 11\sigma \quad (3.5)$$

Diante da discussão sobre a independência ou não do gradiente no cálculo de *espraiamento máximo*, os modelos de Stockdon (2006) e Mather, Stretch e Garland (2011) foram comparados aos dados observados em campo, quando foram localizados os espraiamentos máximos mais recentes. Desta forma, foi possível identificar o modelo que mais se adequa a área de estudo. Os resultados calculados necessitaram de correção, dado que os perfis estão corrigidos em relação ao nível da maré local (Figura 3. 2).

Os dados horários de alturas significativas de ondas utilizadas foram os contidos na modelagem GOW e as alturas de marés foram os previstos pela Marinha do Brasil, baseados nas constantes harmônicas. Desta forma, considerou-se apenas maré astronômica e não meteorológica. Os valores de espraiamento total foram calculados para os intervalos entre 1970-1995 e 1995-2008.

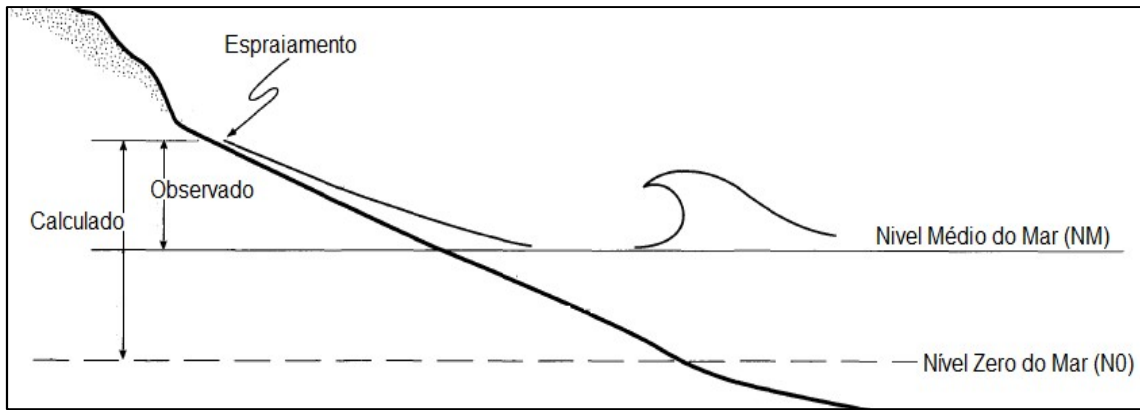


Figura 3. 2 - Ilustração do referencial de medição dos espraamentos observado e calculado, mostrando os parâmetros utilizados para a correção das alturas medidas em campo. Todas as alturas possuem o nível médio do mar (NM) como zero de referência.

### 3.2.3 DETERMINAÇÃO DO PAPEL DE PROTEÇÃO DA PRAIA

#### *Dados de Entrada para Cálculo do Espraio Máximo*

As equações do espraio máximo citadas anteriormente exigem utilização de informações de ondas em águas profundas. Segundo a definição de Airy (1841), as águas profundas são aquelas em que a profundidade é maior que metade do comprimento de onda.

Desta forma, dados de altura significativa, período e direção de pico, provenientes do modelo *WaveWatch III* foram extraídos em um ponto adjacente a área de estudo a uma profundidade de 1000m, e comparados com os dados de boia, disponibilizados pela Samarco Mineração, a 25m de profundidade, localizado em 20° 30'S e 40° 30'O. Esta comparação leva em consideração o comportamento/distribuição das ondas em águas profundas e sua relação com águas rasas. Portanto, o comportamento de ambas deve ser semelhante para que os dados do *WaveWatch III* possam ser validados e posteriormente, utilizados no cálculo dos espraimentos máximos.

A relação entre os dados de ondas realizada a partir da transposição das ondas em águas profundas para águas rasas segue a equação 3.6, proposta por Munk (1949).

$$H_b = \frac{H_0}{3.3 \left(\frac{H_0}{L_0}\right)^{0.33}} \quad (3.6)$$

Onde  $H_b$  é a altura da onda em quebra e  $L_0$  e  $H_0$  representam comprimento de onda e altura de onda em águas profundas respectivamente.

A superposição dos dados de altura significativa de ondas medidos, modelados e corrigidos para os meses de julho a dezembro de 2006 está representada pela Figura 3. 3. O valor de RMSE entre os dados medidos e modelados em 2006 passou de 0,95 para 0,37 após o ajuste (Tabela 3. 2).

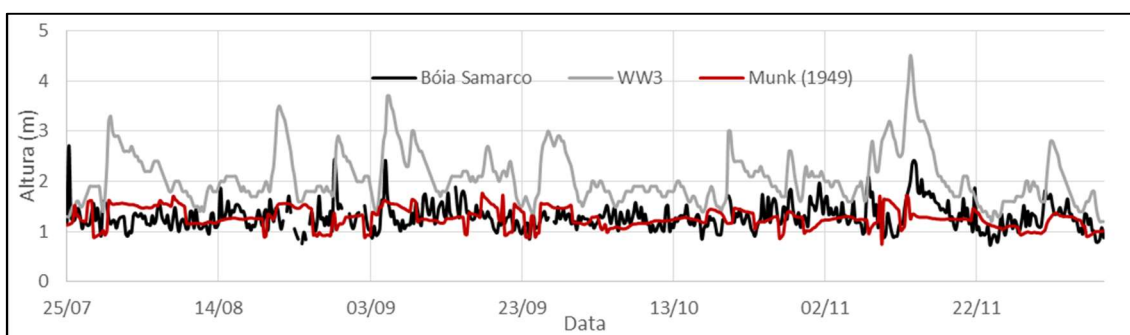


Figura 3. 3 - Sobreposição dos dados de ondas obtidos pelo modelo WaveWatchIII em 1000m de profundidade (Linha cinza), Boia da Minerado Samarco em 25 metros de profundidade (Linha preta) e a transposição das ondas do modelo WW3 para águas rasas através da equação de Munk (1949) (Linha vermelha).

Tabela 3. 2 - Quadro indicando o período de dados analisado e os erros quadráticos médios antes e depois da aplicação da equação de Munk (1949) nos dados do modelo WW3.

Data		Erro quadrático médio	
Início	Término	WW3	Munk (1949)
25/07/2006	09/12/2006	0,95	0,37

A diferença entre os dados obtidos em 1000 metros de profundidade pelo modelo *WaveWatch III* (WW3) e a medição *in situ* a 25 metros de profundidade é decorrente do fato que as ondas provenientes de águas profundas se encaminham para a costa passam pela região da plataforma continental e sentem efeitos de fricção com o leito oceânico, levando assim a uma redução de sua energia e conseqüentemente de sua altura (Masselink e

Hughes, 2003). Ao analisar o comportamento dos dados, notou-se que há uma concordância no comportamento de ambas ondas em águas rasas e profundas. No entanto, a aplicação da equação de Munk (1949) resultou em um melhor encaixe dos dados de alturas, uma vez que a transposição das ondas para águas rasas contabiliza o efeito de redução das alturas devido à interação com o leito marinho. Desta forma, os dados de ondas em águas profundas obtidos pelo WW3, foram utilizados para as equações dos espriamentos nas praias dentro do trecho de interesse na área de estudo.

A mesma análise foi feita para os períodos de ondas, com objetivo de validar os dados do WW3 para aplicação nas equações citadas. Segundo a teoria linear de ondas, o período é constante entre águas profundas e rasas, portanto não foi realizada nenhuma transformação dos dados. Assim, observa-se na Figura 3. 4 os comportamentos dos períodos modelados pelo WW3 e medidos pela boia. O erro quadrático médio, representando a diferença entre as informações modeladas e medidas se encontra na Tabela 3. 3.

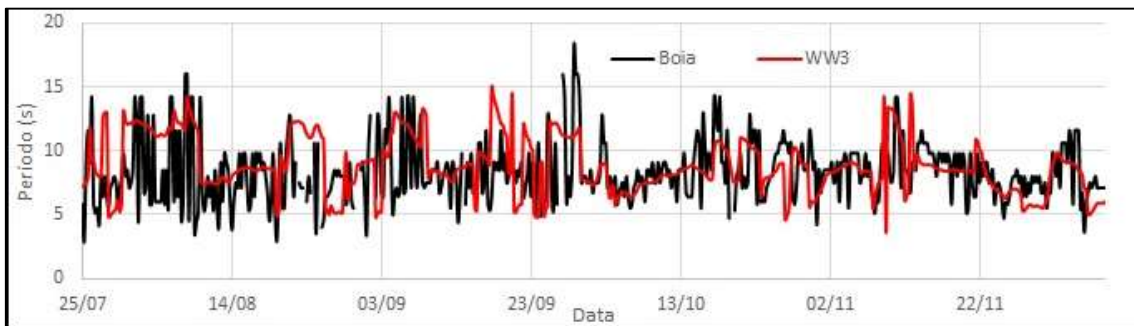


Figura 3. 4 - Sobreposição dos dados de ondas obtidos pelo modelo WaveWatchIII em 1000m de profundidade (Vermelho), Boia da Minerado Samarco em 25 metros de profundidade (Preto).

Tabela 3. 3 - Quadro indicando o período de dados analisado e os erros quadráticos médios.

Data		Erro quadrático médio
Início	Término	
25/07/2006	09/12/2006	2,88

### *Frequência de espraiaamentos acima da elevação*

Com base no modelo proposto por Ruggiero (2001), foi calculada a frequência com que o espraioamento total, definido pela soma entre o *espraioamento máximo* calculado e a maré, supera a altura da praia e atinge a falésia. Para o cálculo do *espraioamento máximo* foi utilizada a equação que melhor se adequou a área de estudo, baseada no item anterior.

A determinação da altura da praia considerou os valores máximos e mínimos de cada perfil topográfico levantado nas campanhas entre 2014 e 2016. A adoção de alturas máximas e mínimas segue a premissa que a altura instantânea da praia não pode ser determinada dentro do banco de dados de espraioamentos calculados dado a variabilidade do perfil praiial (Douglass, 1992; Mather *et al.* 2011).

Na determinação dos espraioamentos pretéritos considerou-se que as praias pretéritas podem ser representadas pela morfologia atual. Neste sentido, as extensões das praias pretéritas foram obtidas pelas imagens de satélite dos anos de 1953, 1970, 1995, 2008 e 2016, extraídas utilizando o software Digital Shoreline Analysis (DSAS). Como referência da extensão adotou-se a medida entre a linha máxima do espraioamento (linha escura úmida) e a base da falésia. Posteriormente, estas extensões foram comparadas as extensões das praias atuais. Na Tabela 3. 4 é possível observar que a correlação entre os dados extraídos das imagens de satélite/aéreas e os obtidos em campo é de 0,80, se mostrando satisfatória a adoção da morfologia pretérita e atual das praias.

A alta correlação parte do princípio que as praias na área de estudo apresentarem características refletivas/intermediárias (Albino *et al.*, 2006). Desta forma, a variabilidade de sua extensão não é muito acentuada. Portanto, pressupõe-se que altura e gradiente sigam o mesmo comportamento e, portanto, os espraioamentos calculados com base em dados pretéritos podem ser comparados a morfologia atual para a determinação do papel de proteção da praia.



Tabela 3. 4 - Extensão dos perfis medidos em campo e por imagens e a correlação de Pearson entre os mesmos.

<b>Ponto</b>	<b>DSAS</b>	<b>Campo</b>
<b>P1</b>	46,0	48,2
<b>P2</b>	38,9	46,4
<b>P3</b>	27,1	38,1
<b>P4</b>	27,8	31,7
<b>P5</b>	36,0	34,5
<b>P6</b>	27,8	23,4
<b>Pearson</b>	0,80	

### 3.3 RESULTADOS

#### 3.3.1 MORFODINÂMICA PRAIAL EM MAIMBA

Para facilitar a análise e interpretação dos resultados, dividiu-se em Falésia Sul, representada pelos perfis 1 e 2 (Figura 3. 5), Falésia, pelos perfis 3 e 4 (Figura 3. 6) e Falésia Norte, pelos perfis 5 e 6 (Figura 3. 7).

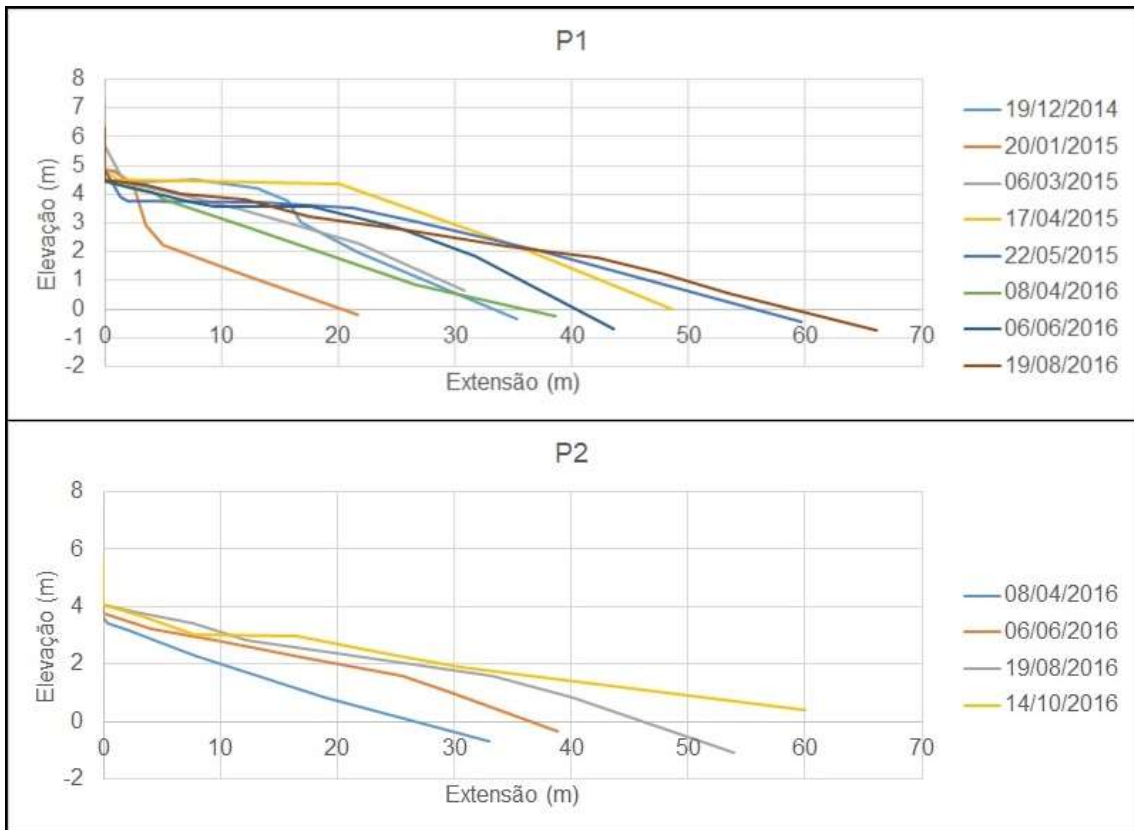


Figura 3. 5 - Perfis praias adjacentes a Falésia Sul.

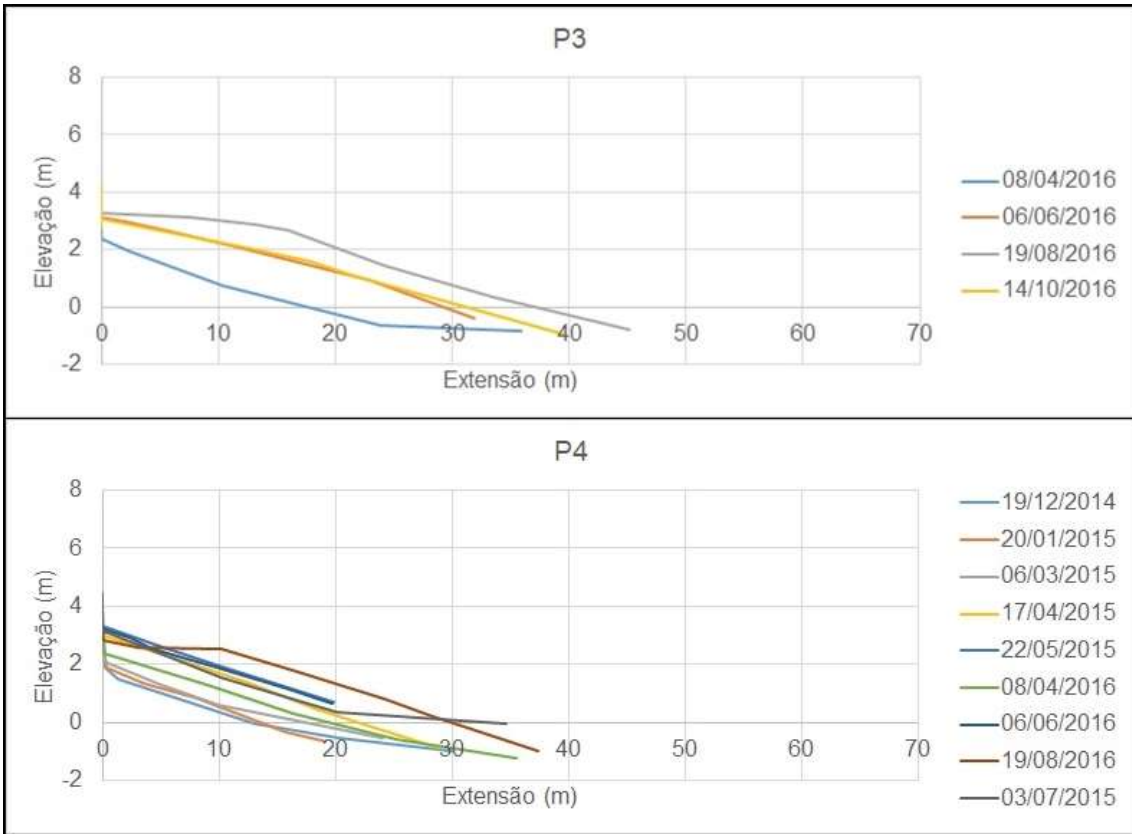


Figura 3. 6 - Perfis praias adjacentes a Falésia Central.

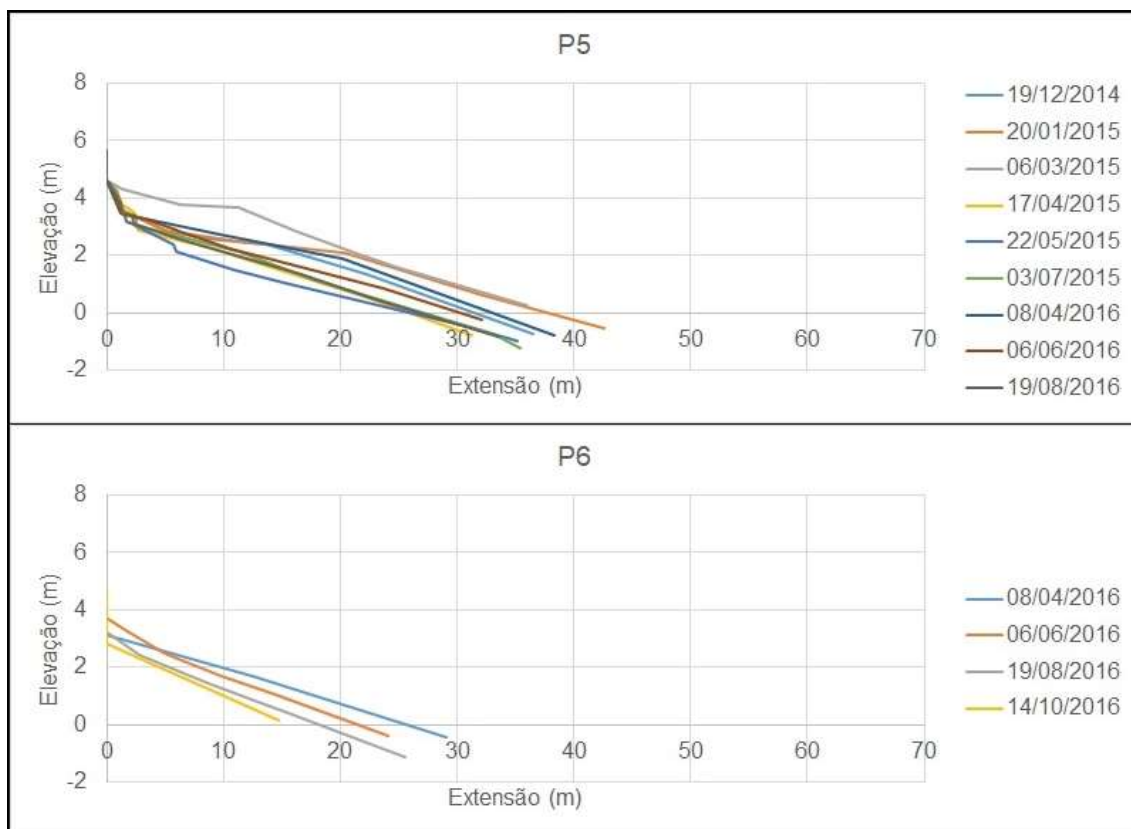


Figura 3. 7 - Perfis praias adjacentes a Falésia Norte.

Os valores médios para os parâmetros medidos em campo entre dezembro de 2014 e outubro de 2016 estão apresentados na Tabela 3. 5. Os resultados indicaram que as praias associadas à Falésia Central apresentaram menores elevações, com valor máximo de 4,59 metros em P1 e mínimo de 2,73 metros em P4. O mesmo comportamento foi observado nas extensões medidas. A largura da praia variou entre 48,22 m e 23,37 m. A praia mais estreita se encontrou nas proximidades da Falésia Norte, representada pelo perfil P6. Enquanto que, em direção a sul, o perfil tendeu a ser mais extenso com máximo em P1. O gradiente praiial medido variou de 0,09 a 0,14. Assim como as alturas, o gradiente apresentou menores valores nos perfis centrais e um incremento em direção ao norte e sul nos perfis medidos, com mínimo em P3 e máximo em P6. Em termos de volume sedimentar, as praias no ao sul apresentaram maiores valores. Os volumes variaram de forma acentuada entre os trechos analisados, passando de 113,44 para 31,61 m<sup>3</sup> em P1 e P6, respectivamente.

Tabela 3. 5 - Quadro geral de média dos parâmetros topográficos extraídos dos perfis medidos entre 2014 e 2016.

	P1	P2	P3	P4	P5	P6
<b>Elevação (m)</b>	<b>4,59</b>	<b>3,87</b>	<b>2,96</b>	<b>2,73</b>	<b>3,15</b>	<b>3,11</b>
<i>Coef de Variação (%)</i>	6,59	5,62	13,27	20,26	18,39	6,37
<b>Largura da praia (m)</b>	<b>48,22</b>	<b>46,45</b>	<b>38,09</b>	<b>31,71</b>	<b>34,55</b>	<b>23,37</b>
<i>Coef de Variação (%)</i>	31,90	27,13	14,67	20,92	13,82	26,34
<b>Gradiente (tan)</b>	<b>0,11</b>	<b>0,09</b>	<b>0,08</b>	<b>0,09</b>	<b>0,09</b>	<b>0,14</b>
<i>Coef de Variação (%)</i>	45,12	22,18	17,13	19,51	18,51	26,12
<b>Volume (m<sup>3</sup>)</b>	<b>113,44</b>	<b>83,94</b>	<b>50,23</b>	<b>33,71</b>	<b>56,48</b>	<b>31,61</b>
<i>Coef de Variação (%)</i>	34,08	41,04	41,68	36,92	27,60	25,40
<b>Coef de Variação (%) geral</b>	<b>29,42</b>	<b>23,99</b>	<b>21,68</b>	<b>24,40</b>	<b>19,58</b>	<b>21,06</b>

Na Tabela 3. 5 também é observado o potencial de modificação de cada perfil ao longo do período de levantamento topográfico. Em termos de elevação dos perfis P1, P2 e P6 apresentaram pouca variação, apesar de os perfis P3, P4 e P5 mostrarem variações maiores, os valores não foram significativos. Por outro lado, em relação a largura da praia, notou-se que os perfis apresentaram uma variação mais representativa. Os gradientes em todos os perfis apresentaram coeficientes de variação com valores expressivos, variando de 17,13% em P3 até 45,12% no perfil P1. Assim como o gradiente, a alteração de volume foi bastante significativa em todos os perfis ao longo do levantamento topográfico. Os coeficientes variaram entre 25,40 e 41,68%.

De forma geral, as praias apresentam perfis estreitos, baixos e inclinados, especialmente na porção norte (Falésia Norte). Quanto ao sul, observam-se perfis mais largos e com maiores alturas (Falésia Sul).

A Tabela 3. 6 abaixo apresenta o cálculo do coeficiente de correlação de Pearson para os parâmetros extraídos dos perfis praias.

Tabela 3. 6 - Resumo das correlações entre os parâmetros morfológicos extraídos dos perfis medidos entre 2014 e 2016 ponto não perfil corrigir na tabela.

<b>Ponto 1</b>				
Correlação (Pearson)	Elevação (m)	Largura da praia (m)	Gradiente (tan)	Volume (m <sup>3</sup> )
Elevação (m)	1,00			
Largura da praia (m)	-0,37	1,00		
Gradiente (tan)	0,45	-0,92	1,00	
Volume (m <sup>3</sup> )	-0,24	0,87	-0,90	1,00
<b>Ponto 2</b>				
Correlação (Pearson)	Elevação (m)	Largura da praia (m)	Gradiente (tan)	Volume (m <sup>3</sup> )
Elevação (m)	1,00			
Largura da praia (m)	0,98	1,00		
Gradiente (tan)	-0,99	-1,00	1,00	
Volume (m <sup>3</sup> )	0,94	0,97	-0,98	1,00
<b>Ponto 3</b>				
Correlação (Pearson)	Elevação (m)	Largura da praia (m)	Gradiente (tan)	Volume (m <sup>3</sup> )
Elevação (m)	1,00			
Largura da praia (m)	0,40	1,00		
Gradiente (tan)	0,50	-0,59	1,00	
Volume (m <sup>3</sup> )	0,90	0,68	0,17	1,00
<b>Ponto 4</b>				
Correlação (Pearson)	Elevação (m)	Largura da praia (m)	Gradiente (tan)	Volume (m <sup>3</sup> )
Elevação (m)	1,00			
Largura da praia (m)	0,57	1,00		
Gradiente (tan)	0,39	-0,53	1,00	
Volume (m <sup>3</sup> )	0,69	0,83	-0,20	1,00
<b>Ponto 5</b>				
Correlação (Pearson)	Elevação (m)	Largura da praia (m)	Gradiente (tan)	Volume (m <sup>3</sup> )
Elevação (m)	1,00			
Largura da praia (m)	0,38	1,00		
Gradiente (tan)	0,66	-0,44	1,00	
Volume (m <sup>3</sup> )	0,90	0,59	0,40	1,00
<b>Ponto 6</b>				
Correlação (Pearson)	Elevação (m)	Largura da praia (m)	Gradiente (tan)	Volume (m <sup>3</sup> )
Elevação (m)	1,00			
Largura da praia (m)	0,79	1,00		
Gradiente (tan)	-0,80	-1,00	1,00	
Volume (m <sup>3</sup> )	0,64	0,90	-0,90	1,00

Observa-se na Tabela 3. 6 que na área de estudo todos os 6 perfis apresentaram uma redução do gradiente frente ao incremento da largura da praia. Além disso, os perfis tenderam a apresentar o aumento do gradiente a

medida que a elevação do perfil aumentou, salvo os perfis P2 e P6. Nestes perfis a medida que a altura aumentou, a largura também segue o mesmo padrão, dado os altos coeficientes de correlação (Tabela 3. 6).

Foram constatados comportamentos distintos dos parâmetros extraídos em relação ao volume do perfil. O volume em todos perfis foi calculado com base nas suas elevações e larguras. Portanto, a partir da correlação foi possível determinar o nível de relevância de cada parâmetro na modificação da quantidade de sedimento no perfil. Nos perfis P1, P4 e P6 observou-se que a extensão possuiu maior influência no controle do volume sedimentar. Por outro lado, os perfis P3 e P5 apresentaram a elevação do perfil praial como fator de maior preponderância para o volume de sedimentos. O perfil P2 apresentou uma alta correlação tanto para a largura quanto para a altura. Foi observado também que a correlação do gradiente com altura e largura variou entre positiva e negativa, dependendo do perfil, não sendo possível identificar um padrão.

### 3.3.2 ESPRAIAMENTO MÁXIMO OBSERVADO

Os espraamentos máximos observados em campo variaram de 1,09 até 3,66 metros (Figura 3. 8). Observou-se na primeira campanha os maiores espraamentos na porção norte da área de estudo, nos perfis P5 e P6. Por outro lado, durante o campo 2 constatou-se espraamentos mais altos na Falésia Sul (P1), enquanto que, nos demais perfis observaram-se valores similares entre si e aproximadamente 1,5 metros menores que em P1. No campo 3, os perfis P1 e P2 apresentaram os espraamentos mais altos. No campo 4, o perfil P6 apresentou os maiores alcances do espraamento.

Em todos os campos, os maiores espraamentos estiveram associados aos maiores gradientes. Observou-se que não houve predomínio de maiores espraamentos em um único perfil, e sim a variação ao longo do tempo.



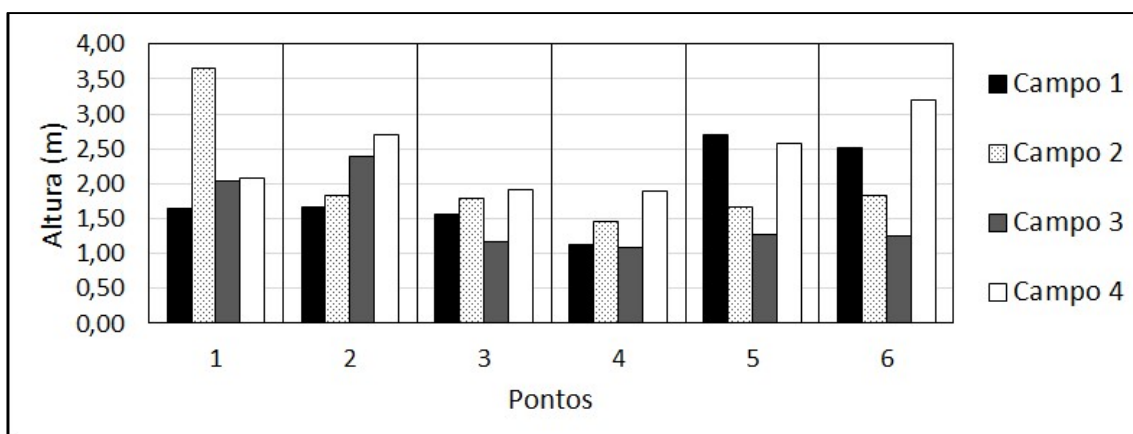


Figura 3. 8 - Resultados obtidos em campos específicos para observação de espraiamento.

### 3.3.3 ESPRAIAMENTO MÁXIMO CALCULADO

#### Resultados dos modelos

O coeficiente de correlação entre os espraiamentos medidos e calculados mostrou melhor adaptado pelo modelo de Mather *et al.* (2011), apresentando uma baixa correlação somente para o perfil P2. Em média, Stockdon *et al.* (2006) possuíram melhor correlação dos resultados quando comparado a Ruggiero *et al.* (2001), porém ambos menores do que Mather *et al.* (2011) (Tabela 3. 7).

Tabela 3. 7 - Resumo do coeficiente de correlação de Pearson entre os espraiamentos observados e calculados para cada modelo.

Pontos	Ruggiero et al (2001)	Stockdon et al (2006)	Mather et al (2011)
1	-0,26	0,21	0,85
2	-0,41	-0,63	0,13
3	0,87	0,93	0,87
4	0,19	0,23	0,96
5	0,94	0,98	0,71
6	0,90	0,97	0,90
<b>Média</b>	<b>0,55</b>	<b>0,65</b>	<b>0,74</b>

Os espraiamentos modelados apresentaram-se subestimados em todos os perfis utilizando as equações de Ruggiero *et al.* (2001) e Stockdon *et*



al. (2006). Em ambos modelos a maior diferença deu-se no perfil P1. Destaca-se os parâmetros medidos durante o campo 2 que alcançaram 2,72 e 2,54 metros abaixo do espriamento observado. O melhor encaixe dos modelos foi apresentado para o perfil P4 durante o campo 1, com valores subestimados em 0,04 e 0,12 metros. Já o modelo proposto por Mather *et al.* (2011) apresentou valores tanto acima quanto abaixo daqueles medidos em campo. As diferenças variaram de 0,03 para o perfil 1 no campo 1 e 1,70 durante o campo 4 no perfil P6 (Tabela 3. 8).

Tabela 3. 8 - Quadro resumo das diferenças entre os espriamentos observados e calculados para cada modelo.

<b>Ruggiero et al (2001)</b>						
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>Campo 1</b>	-0,35	-0,46	-0,73	-0,04	-1,12	-0,95
<b>Campo 2</b>	-2,72	-1,04	-1,01	-0,91	-0,91	-1,06
<b>Campo 3</b>	-1,27	-1,48	-0,52	-0,45	-0,49	-0,47
<b>Campo 4</b>	-1,27	-1,79	-1,03	-0,91	-1,28	-1,62
<b>Stockdon et al (2006)</b>						
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>Campo 1</b>	-0,41	-0,54	-0,75	-0,12	-1,06	-0,89
<b>Campo 2</b>	-2,54	-0,99	-0,97	-0,95	-0,89	-1,03
<b>Campo 3</b>	-1,33	-1,53	-0,54	-0,47	-0,55	-0,52
<b>Campo 4</b>	-1,33	-1,84	-1,09	-0,94	-1,13	-1,16
<b>Mather et al (2011)</b>						
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>Campo 1</b>	0,03	-0,16	-0,63	0,20	-0,51	-0,35
<b>Campo 2</b>	-0,57	0,64	0,61	0,02	0,66	0,55
<b>Campo 3</b>	-1,00	-1,07	-0,34	-0,28	-0,20	-0,19
<b>Campo 4</b>	-0,06	-0,36	0,37	0,74	1,20	1,70

Tabela 3. 9 - Raízes dos erros médios quadráticos para cada modelo, indicando o quanto estes se aproximam da realidade.

Pontos	Ruggiero et al (2001)	Stockdon et al (2006)	Mather et al (2011)
1	1,64	1,59	0,57
2	1,29	1,32	0,65
3	0,85	0,86	0,50
4	0,68	0,71	0,41
5	0,99	0,94	0,74
6	1,10	0,93	0,92
<b>Média</b>	<b>1,14</b>	<b>1,10</b>	<b>0,65</b>

De acordo com a Tabela 3. 9, a raiz quadrada do erro médio quadrático indicou que os modelos propostos por Ruggiero *et al.* (2001) e Stockdon *et al.* (2006) possuíram eficiências semelhantes. No entanto, o erro em relação aos dados medidos em campo superou em média 1,10 metros. Já o modelo de Mather *et al.* (2011) se destacou com um erro de 0,65 metros acima dos espraiaamentos observados.

#### 3.3.4 CAPACIDADE DE PROTEÇÃO DAS FALÉSIAS

O papel de proteção exercido pelas praias sobre as falésias foi determinado através da comparação entre o alcance máximo dos espraiaamentos e as alturas das praias adjacentes às falésias. Foi avaliada a frequência com que os *espraiaamentos máximos* somados as marés (espraiaamentos totais) alcançaram a base das falésias.

Os espraiaamentos totais sobre a Falésia Sul apresentaram os menores valores, em especial para o perfil P1, chegando até mesmo a não alcançar a falésia em momentos que a altura da praia é máxima. Já o perfil P2 apresentou maior recorrência de solapamento da falésia. A praia mais alta, representada pelo perfil P2, exerceu praticamente o mesmo papel de proteção que a praia mínima no perfil P1 (Figura 3. 9).

Em relação a Falésia Central, os espraiaamentos totais se mostraram mais efetivos em termos de potencial de erosão da falésia, superando a altura da praia com maior frequência. No perfil P4 as falésias foram atingidas pelas

ondas em 43,5 e 47% do tempo, para os intervalos 1970-1995 e 1995-2008, considerando a altura mínima da praia. Este comportamento foi menos frequente no perfil P3, onde apresentou valores de apenas 10 e 11,5% para os mesmos intervalos. Em ambos perfis somente 0,4% do tempo representou a superação da altura da praia máxima pelo espraçamento total (Figura 3. 9).

A Falésia Norte apresentou os maiores períodos de exposição à ação do espraçamento total. No perfil P5, observou-se que as praias mínimas protegeram as falésias em menos da metade do tempo, totalizando 56,6 e 60,7% de contato entre o espraçamento total e a base da falésia entre 1970-1995 e 1995-2008. Além disso, o perfil P6 é o que possuiu maior vulnerabilidade erosiva, visto que mesmo sob condições de alturas máximas da praia os espraçamentos totais atingiram a falésia com elevada frequência (Figura 3. 9).

Ao longo do período estudado, foi possível notar que a frequência com que os espraçamentos totais superaram a praia tendeu a aumentar, em especial em condições de praias mais baixas, salvo o perfil 1.

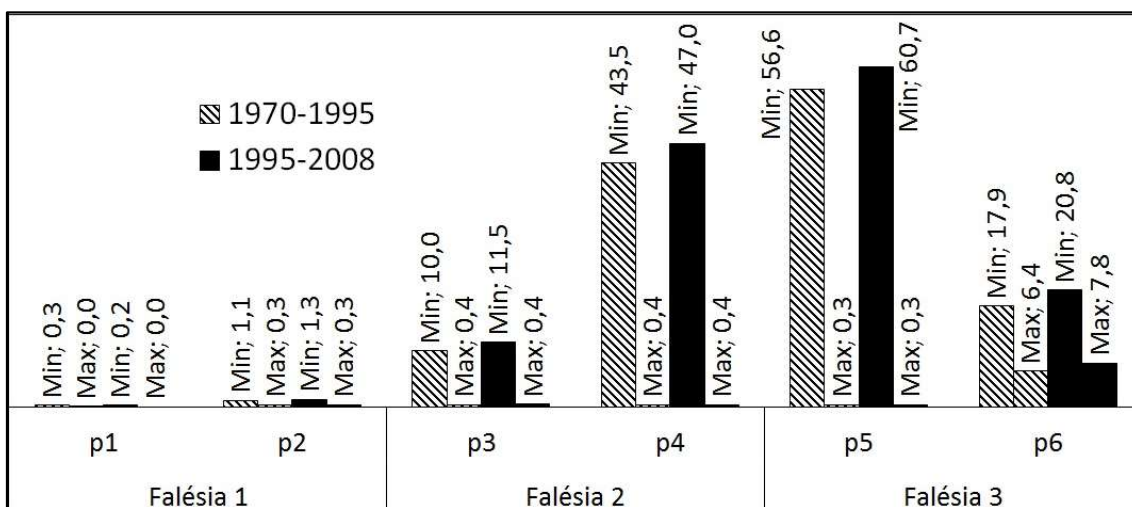


Figura 3. 9 - Frequência com que os espraçamentos atingem as falésias sul (1), central (2) e norte (3), superando a altura da praia adjacente em condições máximas (max) e mínimas (min).

### 3.4 DISCUSSÃO

#### Morfodinâmica e processos costeiros

Albino *et al.* (2016) realizaram o levantamento de perfis topográficos na mesma praia durante outubro 2006, fevereiro 2007, dezembro 2007 e fevereiro 2008 (Figura 3. 10).

Assim como os resultados encontrados no presente estudo, os autores mostram um aumento da largura e altura das praias em direção ao sul. No entanto, quanto ao gradiente observado por Albino et al. (2016) o presente trabalho apresenta um padrão oposto, com aumento apenas sentido sul. Segundo Albino et al. (2016), a porção sul da área de estudo é uma zona de deposição sedimentar e conseqüente incremento da faixa de areia. Este fato ocorre por conta do transporte longitudinal sentido sul de 400.000 m<sup>3</sup>/ano. A progradação da faixa arenosa é intensificada pela presença do Porto de Ubu que age como uma barreira para o transporte sedimentar. Por outro lado, os setores central e norte apresentam um comportamento erosivo, dado que possuem pouco espaço de acomodação sedimentar devido à presença de falésias vivas.

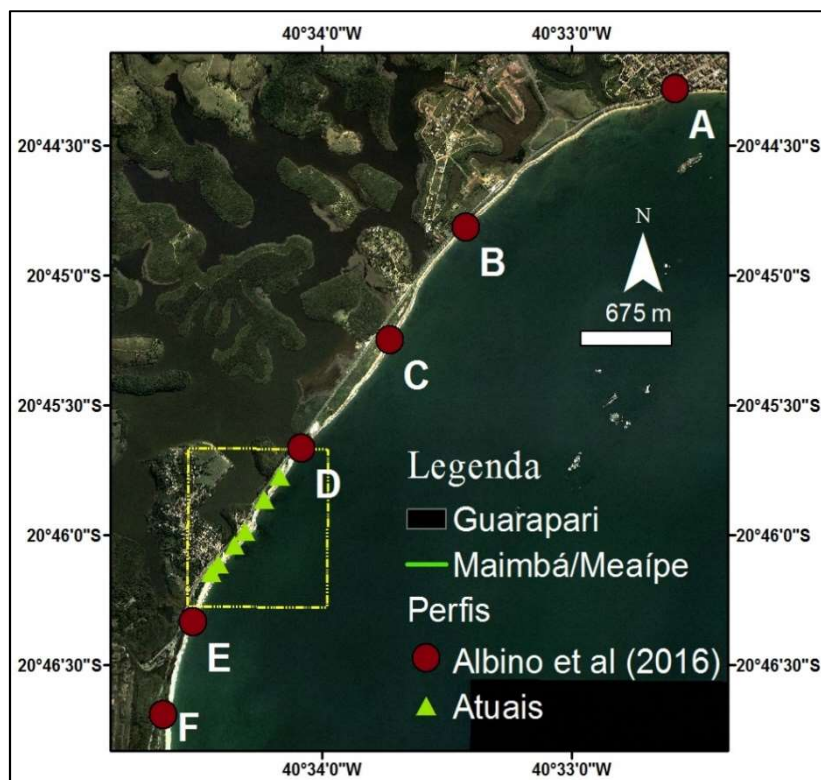


Figura 3. 10 - Perfis onde foram realizados perfis topográficos por Albino et al. (2016) (Círculos) e Área de estudo com demarcação dos perfis topográficos realizados no presente estudo (Triângulos).

Tabela 3. 10 - Resumo dos parâmetros morfológicos calculados por Albino *et al.* (2016).

Médias	A	B	C	D	E	F
Largura (m)	23.56	24.69	26.68	29.33	38.36	37.84
Crista de berma (m)	1.44	2.88	2.65	2.32	4.10	3.29
Gradiente (tan)	0.11	0.13	0.12	0.13	0.17	0.16

Conforme Albino *et al.* (2016), a praia é submetida ao transporte longitudinal e a trocas transversais de sedimento, realizado por processos oscilatórios de variabilidade do perfil praiial frente a mudanças energéticas, de acordo com o esquema ilustrado na Figura 3. 11, apresentado por Masselink e Hughes (2003). Esta dinâmica é evidenciada pela migração de bancos arenosos submersos identificados nos perfis topobatimétricos (Albino *et al.*, 2016).

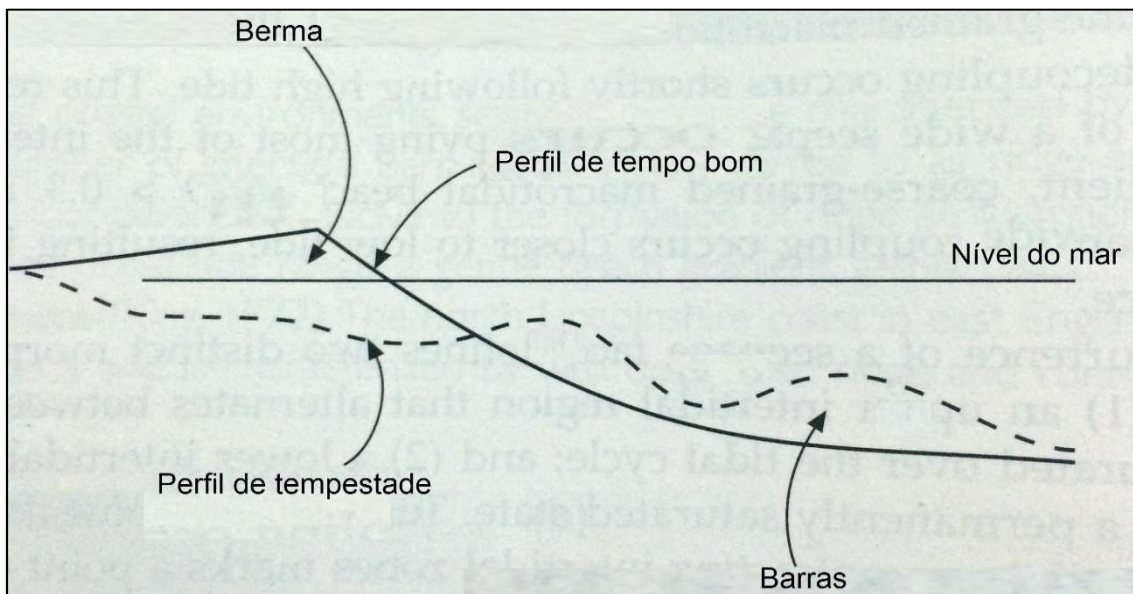


Figura 3. 11 - Esquemática da dinâmica de modificação do perfil praiial frente a condições de ondas altamente energéticas. Modificado de Masselink e Hughes (2003).

Durante períodos de alta energia de ondas é possível observar a adaptação morfológica dos perfis (Albino *et al.*, 2016). Assim, a correlação encontrada entre altura e largura bem como a alta variabilidade do volume sedimentar apresentada pelos perfis neste estudo ilustra a dinâmica de troca de material entre a praia emersa e submersa. A capacidade de adaptação do perfil é controlada pela quantidade de sedimento que a praia consegue armazenar em períodos de ondas calmas. Posteriormente, o sedimento é retirado em eventos de alta energia. Caso a praia não possua suficiente quantidade de sedimento, as ondas passam a atingir as falésias que às precedem.



Albino *et al.* (2016) ressaltam a ausência de processos erosivos no setor sul, enquanto o trecho ao norte apresenta maiores erosões. Portanto, os parâmetros estão em concordância com a dinâmica sedimentar transversal, onde praias com maiores volumes estão associadas a regiões de menor erosão das falésias precedentes. Assim, praias com menores volumes apresentam intensos processos erosivos de falésias.

A variabilidade topográfica dos setores que apresentam maiores espraamentos ressalta a importância do grau de exposição às ondas. Além disso, a geomorfologia exerce fundamental papel sobre os processos costeiros, onde espraamentos ligeiramente menores são observados na porção central, representado pelos perfis P3 e P4. Este comportamento deve estar relacionado com a presença de terraços de abrasão (Figura 3. 12), que atenuam as ondas incidentes pela quebra sobre estes (Trenhaile, 2004) e ainda, a presença de um promontório situado nas proximidades, que pode, por sua vez, alterar o padrão de refração e difração de ondas nos perfis 3 e 4.



*Figura 3. 12 - Localização dos perfis P3 e P4 associados aos terraços de abrasão (Manchas escuras) e ao promontório. Fonte: Google.*

### *Os Diferentes Espraimentos*

O fato da equação de Stockdon *et al.* (2006) subestimar os valores observados é destacado por Laudier *et al.* (2011). Os últimos autores argumentam que a equação foi desenvolvida primariamente utilizando informações de praia com bancos arenosos submersos, onde as ondas quebram sobre os bancos, seguem até a praia, empinam e quebram novamente. No entanto, Stockdon *et al.* (2006) não contabilizam o efeito de atenuação da energia das ondas na parametrização de seu modelo, o que leva a subestimação dos espraimentos em praias sem bancos. Em concordância com o argumento apresentado, os perfis P3 e P4 apresentam menores erros médios quadráticos para o modelo de Stockdon (2006), dado que estão associados aos terraços de abrasão onde ocorre uma dinâmica de dissipação da energia de ondas (Figura 3. 12). Apesar de Albino *et al.* (2016) apresentarem a dinâmica de migração de bancos arenosos na área de estudo, estas se localizam comumente em profundidades superiores a quebra de ondas e, portanto, não alteram o padrão energética da entrada de ondas.

A equação de Ruggiero *et al.* (2001) não mostra aplicação satisfatória para este caso. Os autores discutem que a inclusão do gradiente praiar se fez necessária. No entanto, o gradiente não deve ser uma variável essencial para o cálculo do espraimento (Douglass, 1992). Modelos de predição de espraimento, baseados no gradiente praiar, mostram pouca eficiência devido à complexidade do processo ao qual estão atrelados. O problema principal é a determinação correta do gradiente devido a sua sensibilidade às variações energéticas de ondas incidentes, o que leva a uma constante modificação (Mather *et al.*, 2011; Douglass, 1992).

Com base nos resultados, pode-se afirmar que o modelo que melhor se ajusta a área de estudo é o proposto por Mather *et al.* (2011). Segundo os autores, a utilização do perfil de fechamento confere ao modelo mais precisão, dado que trata de uma região estável. De acordo com a reanálise feita pelos mesmos, é bastante evidente a aplicabilidade do modelo. Os erros quadráticos médios entre os modelos dependentes do gradiente praiar (Holman, 1986; Nielsen e Hanslow, 1991 e Stockdon *et al.*, 2006) são semelhantes entre si e maiores do que o modelo baseado na profundidade de fechamento (Mather *et*

al., 2011) (Tabela 3. 11). Com uma amostra aproximadamente do mesmo tamanho, este estudo encontra um erro quadrático médio ainda menor, demonstrando a adequação do modelo à área de estudo (Tabela 3. 9).

*Tabela 3. 11 - Quadro resumo com os erros quadráticos médios comparados entre as formulações propostas e os espraiaamentos medidos em campo. Modificado de Mather et al. (2011).*

Modelo	Nº de Amostras	EQM
Holman (1986)	29	2.28
Nielsen and Hanslow (1991)	21	2.28
Stockdon <i>et al.</i> (2006)	29	2.01
Mather <i>et al.</i> (2011)	29	1.55

#### *Frequência com que o espraiaamento total atinge a falésia*

Em relação aos volumes dos perfis, nota-se que perfis que apresentam altas frequências de mais altos espraiaamentos totais sobre a falésia são aqueles que possuem os menores volumes (Tabela 3. 5). De forma análoga, maiores volumes correlacionam-se com menores exposições das falésias aos espraiaamentos.

No entanto, não se pode afirmar que o volume possui forte correlação com o grau de proteção da praia. Por exemplo, o perfil P5 que apresenta um volume relativamente grande, está associado a uma intensa frequência de espraiaamentos totais alcançando a falésia. Neste perfil, observa-se que o volume é essencialmente controlado pela sua altura, uma vez que esta não é suficiente para proteger a falésia. Logo seu volume também não será suficiente para a proteção. Além das alturas, a distância horizontal do perfil praiar percorrida pelo espraiaamento total é importante na consideração do papel de proteção das praias, como mostrado em Everts (1991). Este padrão é exemplificado pelos perfis P3 e P5 que possuem altura e gradiente semelhantes. Contudo, a frequência espraiaamentos sobre as falésias é consideravelmente menor no perfil P3, visto que sua largura garante que o espraiaamento é atenuado (Tabela 3. 5).



O coeficiente de variação da altura da praia também possui importância na determinação do papel de proteção da praia. No perfil P6, a frequência com que o espraiamento atinge a falésia, em situação de praia máxima, é maior do que nos perfis P3 e P4, mesmo possuindo altura média superior. No entanto, o fato de seu coeficiente de variação ser menor confere a este perfil menos capacidade de modificação e reduz seu potencial de adaptação à eventos extremos.

Neste estudo considerou-se apenas a maré astronômica. Desta forma, o incremento do nível d'água causado pela ação da maré meteorológica, especialmente durante eventos de alta energia como tempestades, podem agravar ainda mais a erosão das falésias (Carter e Guy, 1988; Ruggiero, 2001, Sunamura, 1992).

### 3.5 CONCLUSÃO

Modificações da morfologia dos perfis ao longo da praia são reflexo: do transporte sedimentar preferencial em direção ao sul, da presença do Terminal Portuário de Ubu, que atua como armadilha de sedimento, e do grau de exposição às ondas, associado à modificação do padrão de ondas devido à geomorfologia costeira.

Com base nos resultados obtidos, afirma-se que as equações de predição de espraiamentos máximos que utilizam o gradiente como variável possuem baixo desempenho na área de estudo. A fórmula proposta por Mather *et al.* (2011), independente do gradiente praiial, se mostra satisfatória para as praias de Maimbá.

De forma geral, as praias adjacentes não possuem características morfológicas suficientes para oferecem proteção as falésias. Pode-se afirmar que existe a possibilidade de aumento erosivo das falésias, visto a tendência de diminuição da capacidade de proteção pelas praias, especialmente sob condições de praia mínima, verificada entre 1970 e 2008.

## **CAPÍTULO 4 – IDENTIFICAÇÃO DO ESTÁGIO EVOLUTIVO DO SISTEMA PRAIA/FALÉSIA**

### **4.1 OBJETIVOS**

- Integrar os resultados obtidos nos capítulos 2 e 3, com intuito de avaliar a correlação entre o comportamento dos ambientes de falésia e das praias, em resposta a ação de ondas.
- Determinação do estágio evolutivo do sistema praia/falésia.
- Proposição de um modelo preditivo para determinação do equilíbrio natural do sistema.

### **4.2 MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **4.2.1 CORRELAÇÃO ENTRE AS TAXAS EROSIVAS DAS FALÉSIAS, ONDAS E ESPRAIAMENTO TOTAL**

A identificação do estágio evolutivo do sistema baseou-se nas respostas erosivas da falésia e na morfologia da praia associada, propostas por Sunamura (1976) e Sunamura (2015). Este comportamento foi determinado a partir da correlação entre as taxas de erosão calculadas, frequência com que os espraamentos totais alcançam as falésias, variabilidade do clima de ondas e grau de exposição. A predição do estado de equilíbrio baseia-se nos modelos propostos por Kennedy e Milkins (2014) e Limber e Murray (2011). Parte da premissa de que o controle principal da estabilização da praia é o recuo da falésia em termos de geração de espaço de acomodação foi então adotado.

### **4.2 DISCUSSÃO**

#### **4.2.1 ESTÁGIO EVOLUTIVO ATUAL**

Com base nos resultados obtidos nos capítulos anteriores observa-se que o aumento da frequência de espraamentos totais que alcançam as falésias (Figura 3. 9) está em concordância com a tendência de aumento das alturas significativas de ondas entre 1970-2008 (Figura 2. 4).

Entre os intervalos de 1970-1995 e 1995-2008 percebe-se um aumento da frequência de espraamentos atingindo as Falésias Central e Norte

(Figura 3. 9) em acordo com elevação energética de ondas modelada (Figura 2. 3). Por outro lado, para o mesmo período as menores taxas erosivas são observadas. Este comportamento sugere que os referidos períodos (1970-1995 e 1995-2008) correspondem a fase de retrabalhamento dos sedimentos existentes base da falésia, com a remoção do material depositado durante eventos erosivos passados (Amin, 2001; Wolters e Muller, 2008; Sunamura, 2015).

A correlação positiva entre o clima de ondas e os prováveis espraiaamentos totais atingindo as falésias pretéritas sugere que o aumento das taxas erosivas encontradas entre 2008-2016 é uma resposta a intensificação na frequência de ataque das ondas sobre as falésias, dado a tendência de aumento das alturas de ondas (Figura 2. 4).

Ao longo da praia, é observada uma reduzida frequência de ondas que alcançam a base da Falésia Sul. No entanto, as taxas de recuo das falésias são elevadas. Esta situação sugere que a Falésia Sul está subordinada a maior atuação de erosão subaérea. Em campo, observa-se que o processo erosivo ocorre com ausência de marcas de espraioamento junto a base da falésia e que o material do *talus* difere da composição da base da falésia, representando indícios que confirmam a atuação de agentes erosivos subaéreos, como ilustra a Figura 4. 1.



*Figura 4. 1 – Processo erosivo da Falésia Sul. A foto mostra que a erosão ocorre sem marcas de espraiamento das ondas e há diferenças de cores entre os sedimentos da parte inferior da falésia e do talus marcando a diferença na pedogênese do sedimento.*

De maneira geral, o perfil da falésia pode indicar a predominância do agente erosivo atuante (Figura 4. 2), (Emery e Kuhn, 1982). Com base nesta abordagem, reforça-se a possibilidade de a Falésia Sul encontrar-se sob atuação de processos subaéreos predominando sobre os processos marinhos quando comparada as demais falésias estudadas (Figura 4. 3).

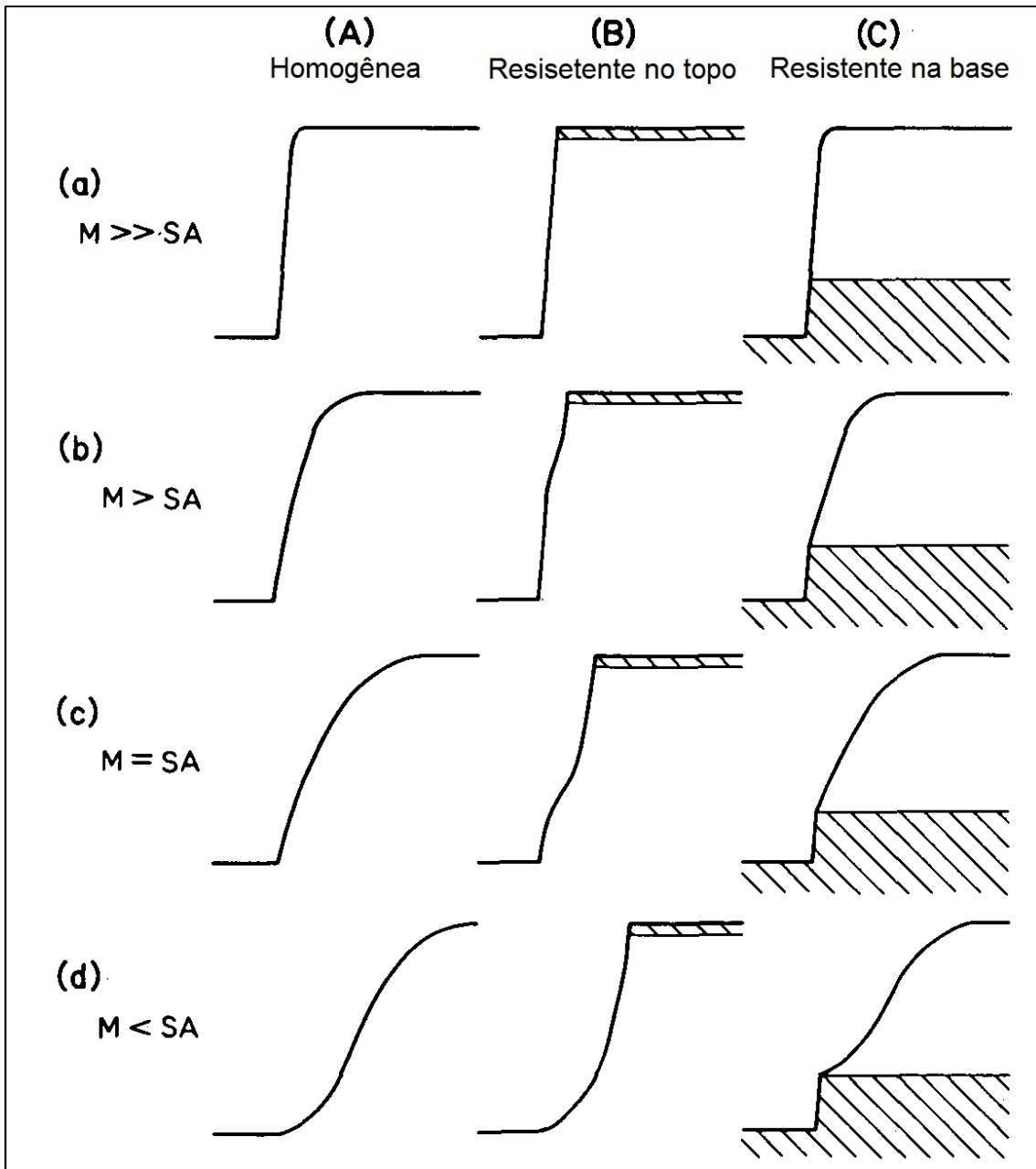


Figura 4. 2 – Perfis de falésias segundo o agente erosivo atuante e a região de maior resistência. Modificado de Emery e Kuhn (1982). *M* refere-se a um controle marinho enquanto *SA* representa um domínio Subaéreo.



*Figura 4. 3 – Fotos representando a forma das falésias estudadas e sua relação com o agente erosivo atuante (Emery e Kuhn, 1982). A forma da Falésia Sul (1) indica um maior controle de processos erosivos subaéreos sobre uma falésia de base resistente (Figura 4. 2d) enquanto a forma das falésias central (2) e norte (3) mostram um perfil relacionado à erosão pela ação de ondas sobre uma falésia de base resistente (Figura 4. 2a).*

Dado a tendência de aumento energético do clima de ondas, associada à intensificação nas taxas erosivas das Falésias Central e Norte, identificou-se o estágio que o sistema praia/falésia se encaixa. O estágio foi proposto com base nas comparações entre morfologia praial e taxas erosivas, conforme propostas por Sunamura (1976) e Sunamura (2015), (Figura 4. 4).

As praias adjacentes às falésias estudadas sob erosão marinha encontram-se em uma fase em que o incremento de altura e largura do perfil da praia leva a um aumento da taxa erosiva dado a ação abrasivas de seus sedimentos (Kennedy e Milkins, 2014; Kline *et al.* 2014). No entanto, para que o sistema atinja um equilíbrio e cesse o processo erosivo sobre as falésias, é necessário que as ondas continuem a atacar a falésia levando ao seu recuo. Desta forma, a falésia forneceria sedimento para o sistema e o espaço de acomodação aumentaria, o que proporcionaria a praia estabelecer a morfologia suficiente para oferecer proteção (Limber e Murray, 2011).

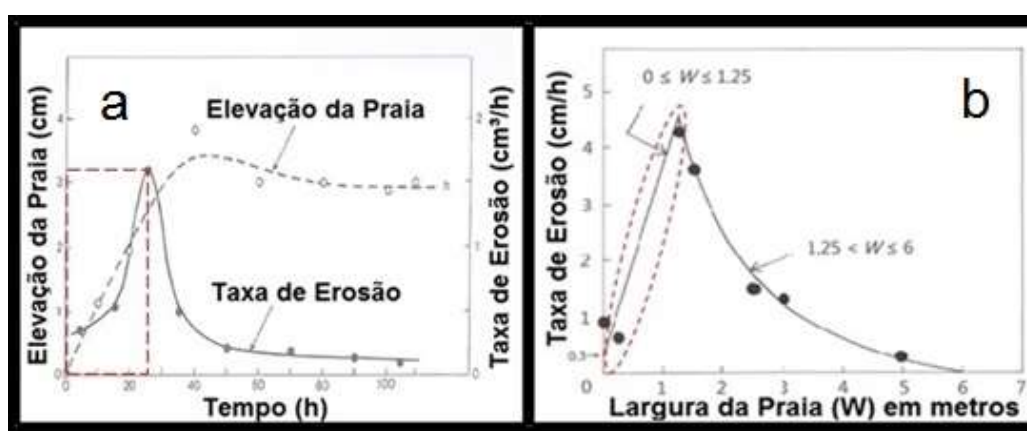


Figura 4. 4 - a) Relação entre a largura da praia e a taxa erosiva das falésias associadas (Sunamura, 1976). b) Relação entre a elevação da praia em a taxa erosiva de falésias associadas (Sunamura, 2015). Momento em que se encontra o sistema em vermelho. Modificado de Limber e Murray, 2011 (a) e Sunamura, 2015 (b).

#### 4.3.1 PREDIÇÃO DO COMPORTAMENTO DO SISTEMA PRAIA/FALÉSIA

Nesta seção considera-se que o sistema estudado se encontra entre os estágios 3 e 4 do modelo evolutivo proposto por Kennedy e Milkins (2014). Nestes estágios o controle principal da estabilização da praia é o recuo da falésia (Figura 4. 5). Desta maneira, é possível prever o momento em que a praia atingirá uma morfologia ideal para que haja um estado de não erosão. A predição foi realizada a partir dos dados de largura, altura e gradiente das praias, juntamente com a taxa erosiva das falésias e frequências de espraiamento, baseando-se nos modelos de Kennedy e Milkins (2014), Sunamura (2015) e Limber e Murray (2011).



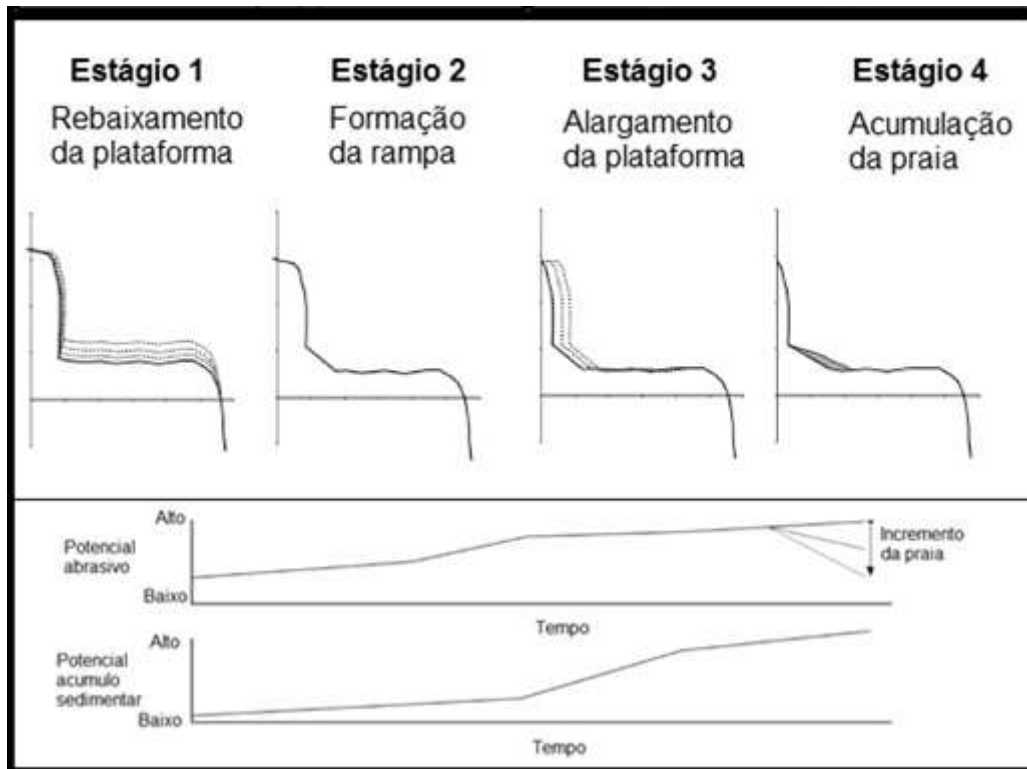


Figura 4. 5 - Modelo evolutivo de acumulo de praia em áreas de falésias e plataformas de abrasão (Kennedy, 2015). O destaque em vermelho representa o momento atual das falésias estudadas.

A morfologia ideal foi determinada de forma que a altura da praia seja superior ao maior alcance do espraiamento total, o que impediria a alcance das ondas na base das falésias. A relação entre extensão e altura da praia ideal é alcançada através do gradiente praiar (Tabela 3. 6). A equação abaixo, proposta neste estudo, representa a determinação do tempo até o estado de não erosão e os resultados obtidos através da mesma estão apresentados na Tabela 4. 1.

$$T = \left\{ \frac{\left[ \left( \frac{R_{Max}}{\beta} \right) \right] - L_m}{Tx} \right\} \quad (4.1)$$

Onde  $T$  representa o tempo estimado para que a erosão termine,  $R_{max}$  é o maior valor de *espraiamento máximo* somado à altura de maré calculado,  $\beta$  e  $L_m$  representam o gradiente e a largura média do perfil praiar adjacente e  $Tx$  a taxa erosiva anual da falésia associada calculada em longo prazo (63 anos).



*Tabela 4. 1 - Determinação do tempo necessário para que o sistema praia/falésia atinja o equilíbrio de forma natural baseado em parâmetros geomorfológicos e oceanográficos.*

Pontos	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Altura Média (m)	4,6	3,9	3	2,7	3,2	3,1
Alcance Máximo do Espraimento (m)	5,5	5,8	4,6	4,7	6,3	6,4
Gradiente (tan)	0,11	0,09	0,08	0,09	0,09	0,14
Largura da Praia (m)	48,2	46,5	38,1	31,7	34,6	23,4
Taxa Erosiva Média da Falésia Associada (m/ano)	0,78	0,78	0,7	0,7	0,43	0,43
Tempo em anos ate o equilíbrio	2	23	28	29	82	52

#### 4.3 CONCLUSÕES FINAIS

- Em uma costa de falésias homogêneas o grau de exposição às ondas de gravidade incidente é um fator importante no controle da intensidade do processo erosivo em escalas temporais e espaciais. No entanto, a intensificação energética das ondas não necessariamente induz a uma erosão mais intensa. É preciso considerar o momento em que a falésia se encontra dentro de seu ciclo evolutivo. Ao identificar este momento e sua duração é possível prever o comportamento futuro das falésias.
- De maneira geral, as praias adjacentes às falésias estudadas não possuem morfologias capazes de atenuar a energia dos espraamentos e, portanto, não oferecem proteção as falésias.
- O sistema praia/falésia estudado encontra-se em uma fase de adaptação morfológica, no qual o processo erosivo das falésias é intensificado pelas características morfológicas das praias adjacentes. O sistema depende da continuidade da erosão das falésias para atingir o equilíbrio. Este equilíbrio marca o fim do processo erosivo natural, permitindo com que a falésia forneça espaço de acomodação e sedimento para que as praias possam se estabelecer com morfologias capazes de impedir o ataque das ondas.
- Com base nas considerações iniciais, é possível prever o tempo necessário para que o sistema praia/falésia alcance o equilíbrio sem depender da intervenção humana.

## REFERENCIAS

- AIRY, G.B. Tides and waves. Encyclopedia Metropolitana (1817–1845), Mixed Sciences, Vol. 3, ed. HJ Rose, *et al.* Also Trigonometry, On the Figure of the Earth, Tides and Waves. 1841. p. 396.
- ALBINO, J., JIMÉNEZ, J. A., OLIVEIRA, T. C. A. Planform and mobility in the Meaípe-Maimbá embayed beach on the South East of Brazil. *Geomorphology*. p.110-112. 2016.
- ALBINO, J., GIRARDI, G., DO NASCIMENTO, K.A. Espirito Santo IN MUEHE, D. Org. Erosão e progradação do litoral brasileiro. Ministério do Meio Ambiente. 2006. p. 227-264.
- ALBINO, J.; PAIVA, D. de Souza; MODOLO, G.V.M. Geomorfologia, tipologia, vulnerabilidade erosiva e ocupação urbana das praias do litoral do Espírito Santo, Brasil. *Geografares* n.2, CCHN-UFES, Vitória. 2001.
- AMIN, S.M.N. Bluff Response in glacial till: South shore of lake Erie. *The Great Lakes Geographer*, Vol8, No2. 2001.
- ANJOS, R.M; VEIGA R.; MACARIO, K; CARVALHO, C.; SANCHES, N.; GOMES, P.R.C. Radiometric analysis of quaternary deposits from the southeastern Brazilian coast. *Mar. Geol.* 229, 29-42. 2006.
- ARAUJO, R.S. Morfologia do perfil praias, sedimentologia e evolução histórica da linha de costa das praias da enseada do Itapocorói-SC. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, Universidade de Vale do Itajaí, Itajaí, SC. 2008. 145p.
- BOAK, E.H. e TURNER, I.L. Shoreline Definition and Detection: A Review. *Journal of Coastal Research*, 21(4), 2005. p. 688-703.
- CARTER, C.H.; GUY, D.E. Coastal Erosion: Processes, timing and magnitudes at the bluff toe. *Marine Geology* 84. 1988. p. 1-17.
- CASTEDO, R.; FERNANDEZ, M.; TRENHAILE, A. S.; PAREDES, C. Modeling cyclic recession of cohesive clay coasts: Effects of water erosion and bluff stability. *Marine Geology*, 335. 2013. p. 162-176.
- CEPEMAR. RCA/PCA do Terminal Marítimo de Ubu- Anchieta/ES. 2008. p. 132-133.
- COLLINS, B. D.; SITAR, N. Processes of coastal bluff erosion in weakly lithified sands, Pacifica, California, USA. *Geomorphology*, v. 7. 2008. p. 483-501.
- COUTINHO, J.V.M. O Pré-cambriano do vale do Rio doce como fonte alimentadora de sedimentos costeiros. XXVIII, Anais Congresso Brasileiro de Geologia. 1974.
- COWELL, P. J.; HANSLOW, D. J; MELEO, J. F. The shoreface. *Handbook of beach and shoreface morphodynamics*, 3. 1999. p. 39-71.
- DEAN, R.G. Equilibrium beach profiles: U.S. Atlantic and Gulf coasts. Ocean Engineering Report No.12. Department of Civil Engineering, University of Delaware, Newark, Delaware. 1977.
- DELPUPPO, D. F. Dinâmica sedimentar na plataforma continental interna ao largo da enseada de Meaípe – ES. Monografia. Universidade Federal do Espírito Santo. 2011.
- DEL RÍO, L., GRACIA, F. J., BENAVENTE, J. Multiple-Source Cliff Erosion in Southern Spain: Current Risk and Future Perspectives. *Journal of Coastal Research*, 75(sp1). 2016. p. 1072-1076.
- DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO. Centro de hidrografia da marinha. Banco nacional de dados oceanográficos. Previsões de maré. Disponível em: <http://www.mar.mil.br/dhn/chm/box-previsao-mare/tabuas/40280Jan2017.htm>. Acesso em: 07 de julho de 2017.

- DORNBUSCH, U., ROBINSON, D. A., MOSES, C. A., WILLIAMS, R. B. Temporal and spatial variations of chalk cliff retreat in East Sussex, 1873 to 2001. *Marine Geology*, 249(3). 2008. p.271-282.
- DOUGLASS, S.L. Estimating extreme values of run-up on beaches. *Journal of Waterway, Port, Coastal Ocean Engineering* No. 118. 1992. p. 220-224.
- EMERY, K.O.; KUHN, G.G. Sea cliffs: Their processes, profiles and classification. *Geological Society of America Bulletin*, 93. 1982. p. 644-654.
- EVERTS, C.H. Seacliff retreat and coarse sediment yields in Southern California. *Coastal Sediments*. American Society of Civil Engineers, Seattle, WA. p. 1586-1598. 1991.
- FLEMING, C. A. Holderness coast protection project. National Research Council, Canada. 1986. p. 349-420.
- GRIGGS, G.; SAVOY, L. Sea cliff erosion. Duke University Press, Durham, North Carolina. 1985. p. 29-34.
- GRIGGS, G.; TRENHAILE, A.S. Coastal cliffs and platforms. In: CARTER, R. W. G.; WOODROFFE, C. D. *Coastal Evolution: Late quaternary shoreline morphodynamics*. Cambridge University Press. 1994. p. 425-451.
- HALLERMIEIER, R.J. A profile zonation for seasonal sand beaches from wave climate. *Coastal Engineering*, 4. 1981. p.253-277.
- HAPKE, C. J.; PLANT, N. Prediction coastal cliff erosion using a Bayesian probabilistic model. *Marine Geology*. 2010. p. 140-149.
- HAPKE, C. J.; REID, D.; RICHMOND, B. Rates and trend of coastal change in California and the regional behavior of the beach and cliff system. *Journal of Coastal Research*. 2009. p. 603-615.
- HOLMAN, R.A. Extreme value statistics for wave run-up on a natural beach. *Coastal Engineering*, 9. 1986. p.527-544.
- HOLMAN, R.A.; SALLENGER, A.H. Setup and swash on a natural beach. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 90, No C1. 1985. p. 945-953.
- KAMPHUIS, J.W. Recession rate of glacial till bluffs. *Journal of Waterway, Coastal and Ocean Engineering*, Vol.113, No.1. 1987.
- KLINE, S. W.; ADAMS, P. N.; LIMBER, P. W. The unsteady nature of sea cliff retreat due to mechanical abrasion, failure and comminution feedbacks. *Geomorphology*, 219. 2014. p.53-67.
- KENNEDY, D. M.; MILKINS, J. The formation of beaches on shore platforms in microtidal environments. *Earth Surface, Process and Landforms*. 2014. p. 34-46.
- LAUDIER, N. A.; THORNTON, E. B.; MACMAHAN, J. Measured and modeled wave overtopping on a natural beach. *Coastal Engineering*, 58(9). 2011. p. 815-825.
- LEE, E.M. Coastal Cliff behaviour: Observations on the relationship between beach levels and recession rates. *Geomorphology* 101. 2008. p. 558-571.
- LEE, E.M. Coastal Cliff recession risk: A simple judgement-based model. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrology*, 38. 2005. p. 89-104.
- LIMBER, P.W.; MURRAY, B. Beach and sea-cliff dynamics as a driver of long-term rocky coastline evolution and stability. *Geological Society of America* 39. 2011. p. 1147-1150.
- MASSELINK, G. HUGHES, M.G. Wave-dominated coastal environment - Barriers. In *Introduction to coastal processes and geomorphology*. Routledge, 2014. Cap.8, p.195-228.
- MATHER, A.; STRETCH, D.; GARLAND, G. Predicting extreme wave run-up on natural beaches for coastal planning and management. *Coastal Engineering Journal*, 53. 2011. p. 87-109.
- MATHER, A.; STRETCH, D.; GARLAND, G. Predicting extreme wave run-up on natural beaches for coastal planning and management. *Coastal engineering journal*, v. 53, n. 02. 2011. p. 87-109.

- MODOLO, G.V.M, SANTOS, M.M.S., ALBINO, J. Ocupação sobre zonas vulneráveis à erosão do litoral sul do estado do Espírito Santo: Caso das praias de Meaipe-Maimbá, Guarapari e Taoca, Itapemirim. IX Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário. 2003.
- MORAIS, R. M. O., MELLO, C. L., DE OLIVEIRA COSTA, F., DE FREITAS SANTOS, P. Fácies sedimentares e ambientes deposicionais associados aos sepósitos da Formação Barreiras no estado do Rio de Janeiro. *Geologia USP. Série Científica*, 6(2). 2006. p. 19-30.
- MOSES, C., ROBINSON, D. Chalk coast dynamics: implications for understanding rock coast evolution. *Earth-Science Reviews*, 109(3). 2011. p. 63-73.
- MUEHE, D. Critérios morfodinâmicos para o estabelecimento de limites da orla costeira para fins de gerenciamento. *Revista brasileira de geomorfologia*, 2(1). 2001.
- MUEHE, D. Aspectos gerais da erosão costeira no Brasil. *Mercator-Revista de Geografia da UFC*, 4(7). 2005.
- MUEHE, D., KLUMB-OLIVEIRA, L. Coastline displacement versus beach mobility. *Quaternary and Environmental Geosciences*, 5. 2014. p. 121-124.
- MUNK, W. H. The solitary wave theory and its application to surf problems. *Annals of the New York Academy of Sciences*, v. 51, n. 1, p. 376-424, 1949.
- NIELSEN, P.; HANSLOW, D.J. Wave Runup distributions on natural beaches. *Journal of Coastal Research*, Vol.7, No4. 1991. p.1139-1152.
- NUNES, M., FERREIRA, O., LOUREIRO, C. AND BAILY, B. Beach and Cliff Retreat Induced by Storm Groups at Forte Novo, Algarve (Portugal). *Journal of Coastal Research*, SI 64. 2011. p. 795-799.
- OLIVEIRA, T. C. A.; ALBINO, J.; VENANCIO, I.; MANSUR, M. E. F.; MAIA, L. X. Modelagem numérica da morfodinâmica de praias do ES. Submetido a publicação especial sobre o Uso do SMC no Brasil.
- PIANCA, C.; MAZZINI, P.L.F.; SIEGLE, E. Brazilian offshore wave climate based on NWW3 reanalysis. *Brazilian Journal of Oceanography*, 58(1):53-70. 2010.
- REGUERO, B. G., MENÉNDEZ, M., MÉNDEZ, F. J., MÍNGUEZ, R., LOSADA, I. J. A Global Ocean Wave (GOW) calibrated reanalysis from 1948 onwards. *Coastal Engineering*, 65. 2012. p. 38-55.
- ROBINSON, A. H. W. Erosion and accretion along part of the Suffolk coast os East Anglia, England. *Marine Geology*. 1980. p.133-146.
- RUGGIERO, P.; KOMAR, P.D.; McDOUGAL, W.G.; MARRA, J.J.; BEACH, R.A. Wave runup, extreme water levels and erosion of properties backing beaches. *Journal of Coastal Research*, Vol, 17, No2. 2001.
- SALLENGER, A. H.; KRABILL, W.; BROCK, J.; SWIFT, R.; MANIZADE, S., ; STOCKDON, H. Sea-cliff erosion as a function of beach changes and extreme wave runup during the 1997–1998 El Niño. *Marine Geology*, 187(3). 2002. p.279-297.
- STOCKDON, H. F.; HOLMAN, R. A.; HOWD, P. A.; SALLENGER, A. H. Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coastal engineering*, 53(7). 2006. p.573-588.
- SUNAMURA, T. Coastal cliff erosion due to waves – field investigations and laboratory experiments. *Journal of Engineering Faculty, University of Tokyo*. 1973. p. 1-86.
- SUNAMURA, T. A laboratory study of wave-cut platform formation. *Journal of Geology*. p. 289-397. 1975.
- Sunamura, T. Feedback relationship in wave erosion of laboratory rocky coast. *The Journal of Geology*, 84(4). 1976. p. 427-437.
- SUNAMURA, T. *Geomorphology of rocky coasts*. Chichester, John Wiley. 1992

SUNAMURA, T. Processes of sea cliff and platform erosion. Handbook of Coastal Processes, edited by P. D. Komar, cap. 12, CRC Press Inc., Fla. 1983. p. 233-265.

SUNAMURA, T. Rocky coast processes: with special reference to the recession of soft rock cliffs. Proceedings of the Japan Academy, No.91. 2015. p. 481-500.

THIELER, E.R.; HIMMELSTOSS, E.A.; ZICHICHI, J.L.; MILLER, T.L. Digital shoreline analysis system (DSAS) version 3.0: An ArcGIS extension for calculating shoreline change: U.S. Geological Survey Open-file Report. 2005.

TRENHAILE, A.S. Modeling the accumulation and dynamics of beaches on shore platforms. Marine Geology. 2004. p. 55-72.

VALENTIN, H. The land loss in Holderness. 1954.

VALLEJO, L.E.; DEGROT, R. Bluff response to wave action. Engineering Geology. 1988.

WOLTERS, G.; MÜLLER, G. Effect of Cliff shape on internal stresses and rock slope stability. Journal of Coastal Research, v. 24. 2008. p. 43-50.