



ANÁLISE DA VARIABILIDADE MORFODINÂMICA DE UMA PRAIA ARENOSA  
ATRAVÉS DO USO DE FUNÇÕES ORTOGONAIS EMPÍRICAS

Larissa Luana Lopes Lima

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Orientador: Marcos Nicolás Gallo

Rio de Janeiro  
Agosto de 2018

ANÁLISE DA VARIABILIDADE MORFODINÂMICA DE UMA PRAIA ARENOSA  
ATRAVÉS DO USO DE FUNÇÕES ORTOGONAIS EMPÍRICAS

Larissa Luana Lopes Lima

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO  
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA  
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE  
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE  
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA OCEÂNICA.

Examinada por:

---

Prof. Marcos Nicolás Gallo, D.Sc.

---

Prof. Josefa Varela Guerra, D.Sc.

---

Prof. Jean David Job Emmanuel Marie Caprace, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

AGOSTO DE 2018

Lima, Larissa Luana Lopes

Análise da variabilidade morfodinâmica de uma praia arenosa através do uso de funções ortogonais empíricas/  
Larissa Luana Lopes Lima. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

XIII, 71 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Marcos Nicolás Gallo

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Oceânica, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 56-59.

1. Feições morfológicas. 2. Perfis de praia. 3. EOF. I. Gallo, Marcos Nicolás. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica. III. Título.

## Dedicatória

Esta dissertação é dedicada a minha Mãe, Cícera Maria Lopes de Sousa.

## Agradecimentos

Talvez a parte mais difícil de escrever seja esta. Sou agradecida por inúmeras coisas e pessoas ao longo dessa jornada carioca e acadêmica de dois anos e quatro meses. Quero primeiramente agradecer ao grande espírito que tudo rege, que materializou nesse universo uma porção de acontecimentos bons e pessoas extraordinárias colocadas no meu caminho. Atribuo a esta força, a esta Mãe universal que cuida e nos oferece tudo que necessitamos, a esse ser divino, o nome de Deus.

Não menos importante, minha Mãe, Cícera Maria Lopes de Sousa e meu Pai, José Edilson de Lima, nunca foi só eu e nunca foi só por mim. Toda honra a eles que sempre me apoiaram e deram o suporte necessário para eu chegar até aqui. E as minhas irmãs Daia e Ju e irmão Jorge, minha prima Nayara que sempre me incentivou a ingressar na vida acadêmica e que tenho como exemplo.

Ao amor da minha vida, minha cachorrinha Brisa, que eu adotei aqui no Rio de Janeiro, um ser de luz, que eu jamais vou saber definir em palavras o amor incondicional que ela me transmite e transmitiu durante esse período.

Aos meus amigos de graduação, em especial ao Thiago Parente, Nina Dorian, Nayanna Maia, que estiveram presentes na maior parte deste período. À minha turma de mestrado, principalmente à Aline Freitas e Luana Bueno.

A todos da Ananab Guest House em Laranjeiras, pelo convívio diário, pela alegria compartilhada, por dividirem todos os dias o mesmo espaço e tempo comigo, pelo conforto de ter um lar fora da minha cidade natal, em especial ao Marcelo Casé, o melhor designer que já conheci na minha vida.

Ao Douglas Nemes, que me concedeu os dados para a realização deste trabalho, que sempre esteve a disposição para esclarecer minhas dúvidas e por todas as inúmeras considerações para este trabalho.

Ao professor Marcos, por aceitar ser meu orientador, sempre muito acessível, e que também sempre esteve a disposição para esclarecer minhas dúvidas e por todas as inúmeras considerações para este trabalho.

A mim mesma, por todo o esforço e dedicação, pelo autocuidado físico, mental e emocional durante esta fase.

E a todos que não foram citados, mas que de alguma maneira contribuíram e estiveram presentes nesta jornada.

*“O estado mental que possibilita a um homem fazer um trabalho desse tipo... é semelhante ao de um religioso ou amante; o esforço diário vem de uma intenção não deliberada ou programada, mas diretamente do coração”.*  
Albert Einstein

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ANÁLISE DA VARIABILIDADE MORFODINÂMICA DE UMA PRAIA ARENOSA  
ATRAVÉS DO USO DE FUNÇÕES ORTOGONAIS EMPÍRICAS

Larissa Luana Lopes Lima

Agosto/2018

Orientador: Marcos Nicolás Gallo

Programa: Engenharia Oceânica

A zona costeira comporta-se como um sistema ambiental dinâmico. Um dos maiores desafios que a comunidade científica enfrenta é deter sobre a correta compreensão do funcionamento deste ambiente. Uma análise bastante perspicaz requer não somente observações da natureza, como também o conhecimento dos processos que atuam no ambiente em conjunto com metodologias estatísticas. O método estatístico EOF (empirical orthogonal function) foi utilizado para analisar perfis de praia obtidos ao longo de aproximadamente um ciclo sazonal completo, com o objetivo de identificar padrões de modificações espaciais e temporais de topografia em uma praia arenosa com a presença de um afloramento rochoso submerso da cidade do Rio de Janeiro (Praia da Reserva). Por meio da análise espacial, foi identificada uma saliência de aproximadamente 150 m longitudinais na zona da retaguarda do afloramento rochoso submerso. Além disso, foi possível perceber que o lado oeste e a região da retaguarda do afloramento rochoso apresentaram maiores variações morfodinâmicas. A análise temporal mostrou que as maiores mudanças erosivas ocorreram no período de maior altura significativa das ondas. O método foi eficiente na identificação de padrões morfológicos no tempo e ainda pode ser aplicado para analisar a resposta dos perfis à ação das ondas, se for encontrada alguma forte relação entre ambos.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

ANALYSIS OF THE MORPHODYNAMIC VARIABILITY OF A SANDY  
BEACH THROUGH THE USE OF EMPIRICAL ORTOGONAL FUNCTIONS

Larissa Luana Lopes Lima

August/2018

Advisor: Marcos Nicolás Gallo

Department: Oceanic Engineering

The coastal zone behaves as a dynamic environmental system. One of the greatest challenges facing the scientific community is to hold a correct understanding of the functioning of this environment. A rather insightful analysis requires not only observations of nature, but also knowledge of the processes that work in the environment together with statistical methodologies. The empirical orthogonal function (EOF) was used to analyze beach profiles obtained during approximately a complete seasonal cycle, with the objective of identifying patterns of spatial and temporal changes of topography on a sandy beach with the presence of a rocky outcrop submerged in the city of Rio de Janeiro (Reserve Beach). Through the spatial analysis, a protrusion of approximately 150 m longitudinal was identified in the rear zone of the submerged rock outcrop. In addition, it was possible to notice that the western side and the rear region of the rock outcrop showed larger morphodynamic variations. The temporal analysis showed that the greatest erosive changes occurred in the period of higher significant wave height ( $h_s$ ). Although EOF is a tool used for the analysis of random data, it is possible to obtain physical interpretations of the predominant patterns in time, for example, from the relationship between periods of erosion with variables that act on the dynamics of the praial system ( $h_s$ ). Therefore, this method was efficient in the identification of morphological patterns in the time and can still be applied to analyze the response of the profiles to the action of the waves, if some strong relation between them is found.

## ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE TABELAS.....	xiii
1. Introdução.....	1
1.1. Motivação.....	3
2. Objetivo Geral.....	4
2.1. Objetivos Específicos.....	4
3. Revisão da Literatura.....	5
3.1. Equações Ortogonais Empíricas.....	5
4. Área de Estudo.....	8
5. Metodologia.....	14
5.1. Levantamento Topográfico.....	14
5.2. Escolha dos perfis para análise espacial longitudinal à costa.....	16
5.3. Escolha dos perfis para análise espacial transversal à costa.....	17
5.4. Elaboração do código para processar as funções ortogonais empíricas (EOF).....	18
5.5. Variação da linha de costa.....	22
5.6. Análise da mobilidade de sedimento.....	23
6. Resultados e Discussão.....	24
6.1. Análise Espacial das Funções Ortogonais Empíricas (EOF).....	24
6.1.1. Análise espacial transversal à costa.....	26
6.1.2. Análise espacial longitudinal à costa.....	35
6.2. Variação da linha de costa.....	39
6.2.1. Variação da linha de costa através da ferramenta de imagens históricas do Google Earth Pro.....	39
6.2.2. Análise da mobilidade de sedimento.....	40
6.3. Análise temporal das Funções Ortogonais Empíricas (EOF).....	46
7. Conclusões.....	54
8. Referências.....	56
ANEXOS.....	61
Anexo I.....	61
Anexo II.....	64

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diferença entre o método EOF e o método de Dean (1977) (PRUSZAK, 1993).....	3
Figura 2. Localização da área de estudo. Praia da Reserva, zona oeste da cidade do Rio de Janeiro. Destaque em vermelho para estrutura rochosa submersa com formato de <i>V-shape</i> .....	10
Figura 3. Zoneamento proposto por NEMES (2016) da linha de costa em função da formação dos vetores de quebra de ondas com incidência normal a praia. As zonas 4 e 2 são onde a energia de ondas atinge a linha de costa. A Zona 3 é a zona de sombra. As zonas 1 e 5 não apresentam relevante influência.....	11
Figura 4. Zoneamento da linha de costa proposto por NEMES (2016) em função da formação dos vetores de quebra de ondas com incidência oblíqua em relação à praia. A zona 4 e 2 são onde a energia de ondas atinge a linha de costa. A Zona 3 é a zona de sombra. Nota-se, para este caso, a migração das zonas para porção mais oeste da praia.....	12
Figura 5. Esquema ilustrativo das feições morfológicas normalmente encontradas em uma praia arenosa do tipo intermediária (modificado de SOUZA <i>et al.</i> , 2005).....	12
Figura 6. Ilustração do esforço amostral de um ano (2015-2016) na Praia da Reserva, indicadando as feições morfológicas juntamente com os pontos de topografia e a interpolação dos níveis, banco arenoso a sotamar do banco rochoso, além dos domínios leste, sotamar e oeste e o limite do banco distal. Fonte: NEMES, 2016.....	15
Figura 7. Resultado de 26 nivelamentos de topografia da Praia da Reserva entre 09 de janeiro de 2015 e 31 de janeiro de 2016 (NEMES, 2016). Destacam-se as sete campanhas que não conseguiram abranger o domínio de interesse descrito na área de estudo, marcadas com um x.....	16
Figura 8. Indicação das posições dos 20 perfis (de leste para oeste - P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12, P13, P14, P15, P16, P17, P18, P19 e P20), transversais à linha de costa, que serão analisados na área de estudo.....	17
Figura 9. Zona Vulnerável (vermelho) e Zona de Sombra (verde) representadas no Diagrama de Zoneamento da linha de costa proposto por NEMES (2016). A frente de onda incidente deve ser posicionada sobre o eixo plano do cosseno, nesse caso a frente de ondas está normal à costa.....	19

Figura 10. Representação esquemática da decomposição de um perfil de praia pelo método de autofunção empírica. O perfil original pode ser descrito pela soma de cada autofunção multiplicada por seu coeficiente correspondente (DICK E DALRYMPLE, 1984).....	22
Figura 11. Comparação entre os resultados retirados do Livro: “Costal Processes with Engineering Applications” (lado esquerdo) e os resultados obtidos por meio das rotinas ajustadas neste estudo (lado direito), aplicando-se o método EOF nos dados de elevação de perfis. Na parte superior (a) são mostrados os quatro perfis que estão sendo analisados. Na parte inferior (b) são mostrados os autovetores associados a este cenário.....	23
Figura 12. Variação da forma dos 5 perfis (Extremo Leste, Leste, Retaguarda, Oeste, Extremo Oeste) ao longo da série temporal do estudo, selecionados para a análise espacial das feições que aparecem transversais á linha de costa.....	27
Figura 13. Primeira autofunção ou função média da praia que representa o formato do perfil médio (média de um perfil variando nas diferentes datas de amostragem) de cada um dos perfis.....	28
Figura 14 - Disposição das amostras coletadas ao longo do perfil e composição granulométrica para cada amostra analisada realizada por alunos da disciplina de processos litorâneos em parceria com o Laboratório de Dinâmica de Sedimentos Coesivos (LDSC).....	31
Figura 15. Máximos do segundo modo estatístico que representam a localização da berma e mínimos que representam a localização dos bancos de areia nos perfis de forma transversal à costa. O eixo y do gráfico representa o coeficiente espacial da segunda função (segundo modo estatístico) variando ao longo dos 140 m transversais (eixo x - comprimento dos perfis) durante a série temporal do estudo (variação espaço-tempo).....	32
Figura 16. Máximos da função terraço que representam a localização do terraço de maré baixa nos perfis de forma transversal à costa. O eixo y do gráfico representa o coeficiente espacial da terceira função (terceiro modo estatístico) variando ao longo dos 140 m transversais (eixo x - comprimento dos perfis) durante a série temporal do estudo (variação espaço-tempo).....	33
Figura 17. Análise da localização da berma e do terraço de maré realizada separadamente para cada perfil. As barras verticais azuis estão indicando os valores máximos da função barra-berma e as barras verticais vermelhas estão indicando os	

valores máximos da função terraço. O eixo y do gráfico representa o coeficiente espacial da segunda e terceira função (segundo e terceiro modo estatístico) variando ao longo dos 140 m transversais (eixo x - comprimento dos perfis) durante a série temporal do estudo (variação espaço-tempo).....	35
Figura 18. Máximos do coeficiente espacial da segunda função (segundo modo estatístico) variando ao longo dos 500 m longitudinais para cada um dos perfis analisados durante a série temporal do estudo (variação espaço-tempo), representando assim a posição da berma ao longo da costa.....	36
Figura 19. Gráfico 3D da localização da berma onde o eixo z do gráfico representa o coeficiente espacial da segunda função (segundo modo estatístico), o eixo y representa a porção transversal que corresponde ao pico da função barra-berma (aproximadamente entre 50 a 100 m), ou seja, onde está localizada a berma, e o eixo x a localização dos 5 perfis longitudinais à praia.....	37
Figura 20. Imagens históricas da área de estudo mostrando a variação na linha de costa e a presença da saliência em diferentes períodos.....	39
Figura 21. Média e o desvio padrão da variação das distâncias transversais entre a pista de asfalto e a linha de costa para cada um dos perfis longitudinais á praia.....	41
Figura 22. Áreas compreendidas pela diferença entre o perfil mais acrescido e mais erodido para os perfis analisados no estudo.....	44
Figura 23. Histograma referente a estimativa de mobilidade de sedimento para cada perfil ao longo da área de estudo, somando todas as campanhas.....	45
Figura 24. Direção predominate das ondas que incidiram na praia da Reserva entre janeiro de 2015 até janeiro de 2016 (dados de reanálise extraídos do era interim dataset referentes à direção média das ondas).....	46
Figura 25. Coeficientes temporais da terceira autofunção durante a série temporal deste estudo, referente aos cinco perfis (Extremo Leste, Leste, Retaguarda, Oeste e Extremo Oeste).....	47
Figura 26. Análise temporal do Perfil localizado no Extremo Leste da posição do afloramento rochoso submerso. O coeficiente temporal da segunda autofunção apresentou valores positivos (acima da linha do zero) nas datas em que houve acreção, representando o transporte de sedimento para o nível da berma. Já nas datas em que houve erosão, essa função apresentou valores negativos, indicando o transporte de	

sedimento para o nível dos bancos.....	48
Figura 27. Análise temporal do Perfil localizado a Leste da posição do afloramento rochoso submerso. O coeficiente temporal da segunda autofunção apresentou valores positivos (acima da linha do zero) nas datas em que houve acreção, representando o transporte de sedimento para o nível da berma. Já nas datas em que houve erosão, essa função apresentou valores negativos, indicando o transporte de sedimento para o nível dos bancos.....	49
Figura 28. Análise temporal do Perfil localizado na Retaguarda do afloramento rochoso submerso. O coeficiente temporal da segunda autofunção apresentou valores positivos (acima da linha do zero) nas datas em que houve acreção, representando o transporte de sedimento para o nível da berma. Já nas datas em que houve erosão, essa função apresentou valores negativos, indicando o transporte de sedimento para o nível dos bancos.....	50
Figura 29. Análise temporal do Perfil localizado a Oeste da posição do afloramento rochoso submerso. O coeficiente temporal da segunda autofunção apresentou valores positivos (acima da linha do zero) nas datas em que houve acreção, representando o transporte de sedimento para o nível da berma. Já nas datas em que houve erosão, essa função apresentou valores negativos, indicando o transporte de sedimento para o nível dos bancos.....	51
Figura 30. Análise temporal do Perfil localizado no Extremo Oeste da posição do afloramento rochoso submerso. O coeficiente temporal da segunda autofunção apresentou valores positivos (acima da linha do zero) nas datas em que houve acreção, representando o transporte de sedimento para o nível da berma. Já nas datas em que houve erosão, essa função apresentou valores negativos, indicando o transporte de sedimento para o nível dos bancos.....	52
Figura 31. (1) Coeficientes temporais da segunda autofunção durante a série temporal deste estudo, referente aos cinco perfis (Extremo Leste, Leste, Retaguarda, Oeste e Extremo Oeste). (2) Média e desvio padrão de Hs desde um dia antes da data da campanha topográfica. (3) Média e desvio padrão de Hs por sete dias antes da data da campanha topográfica. (4) Série de Hs completa para o período do estudo. As marcações em vermelho são referentes às datas das campanhas topográficas.....	53

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Dados fictícios de elevações realizados em quatro campanhas ( $k = 4$ ), ou seja, quatro perfis em um ponto fixo variando com o tempo, com três pontos em $x$ ( $i=1, i=2$ e $i =3$ ), que foram utilizados para rodar as rotinas ajustadas neste estudo. Dados retirados do livro “Costal Processes with Engineering Applications”.....	20
Tabela 2. Valores da variância dos autovetores para cada uma das quatro campanhas $k$ expressos por $C_{nk}$ .....	21
Tabela 3. Percentual da variância representada pelos três primeiros modos de variabilidade espacial da EOF aplicada para cada um dos 20 perfis analisados.....	25
Tabela 4. Valores da variância utilizando o dado bruto e da variância com a média extraída para os 5 perfis (Extremo Leste, Leste, Retaguarda, Oeste, Extremo Oeste).....	28
Tabela 5. Valores do coeficiente empírico $A$ dos perfis analisados.....	30
Tabela 6. Datas das campanhas topográficas, datas correspondentes das imagens extraídas do Google Earth Pro e as distâncias transversais entre a pista de asfalto e a linha de costa nos 5 perfis para todas as datas.....	40

## 1. Introdução

Em decorrência de uma série de processos geológicos continentais e marinhos que são determinantes em sua formação, a zona costeira comporta-se como um sistema ambiental dinâmico (SILVA *et al.*, 2004). Um dos maiores desafios que a comunidade científica enfrenta é deter sobre a correta compreensão do funcionamento deste ambiente. A análise empírica pode contribuir fortemente para esse desafio. Porém, uma análise bastante perspicaz requer não somente observações da natureza, como também o conhecimento dos processos que atuam no ambiente em conjunto com metodologias estatísticas. Dessa forma, será possível alcançar uma compreensão mais robusta dos sistemas dinâmicos.

No estudo da dinâmica costeira é possível se obter um rico acervo de observações diretas. A oportunidade para a aplicação de uma vasta gama de métodos estatísticos está sendo cada vez mais levada em consideração. Essas observações diretas podem ser processos de amostragem que evoluem em escala de espaço e tempo. Uma referência relevante é a aplicação de técnicas estatísticas para o estudo da variação temporal dos perfis de praia para diferentes épocas do ano (sazonalmente) e da variação espacial, transversal e longitudinal à costa. Um desafio especial é obter uma quantidade suficiente de dados, onde é preciso ter uma amostragem relativamente grande e confiável para extrair algumas pistas sobre o funcionamento do sistema.

A estatística Empirical Orthogonal Function (EOF) é uma técnica poderosa e robusta que vem sendo amplamente utilizada em diversos campos do conhecimento, que se destaca por determinar um padrão espaço-temporal de variabilidade. Existe desde o início do século XX e foi introduzida no campo da engenharia costeira por WINANT *et al.* (1975), que usaram EOFs para analisar uma série de medidas de perfis de praia, a fim de analisar o comportamento sazonal.

Destaca-se por ser um método de análise que consegue descrever variações espaço-temporais de feições morfológicas, associadas aos fenômenos naturais (DEAN e DALRYMPLE, 2002).

Os dados necessários para a aplicação da EOF na variabilidade morfodinâmica de praias consistem em múltiplos perfis transversais, ao longo do tempo em um local fixo ou longitudinalmente em um tempo fixo, considerando-se a medição do perfil começando em uma posição estável e, em seguida, em direção à profundidade de fechamento.

Assim, a principal vantagem da EOF está na capacidade de descrever padrões morfológicos tanto no espaço quanto no tempo, dentro de uma série temporal, transformando os dados em um número menor de funções ortogonais e coeficientes associados (coeficientes espaciais e temporais), ou seja, é capaz de reduzir um conjunto de dados contendo um grande número de variáveis para um conjunto contendo um número bem menor de novas variáveis (DEAN e DALRYMPLE, 2002).

Outra vantagem do método EOF, é que não exige que os dados sejam amostrados regularmente em tempo e distância, assim como exigem os métodos que utilizam a análise de Fourier (BRACEWELL, 1986). A forma dessas funções é determinada pelas correlações dentro do conjunto de dados, em contraste com uma série de Fourier em que a forma das funções é especificada no início da análise (REEVE; CHADWICK; FLEMING, 2004).

A finalidade da análise EOF é expressar os dados dispostos em ordem decrescente de magnitude. Os três maiores autovalores, também chamados de modos estatísticos, na maior parte dos casos, conseguem descrever as feições que aparecem ao longo do perfil transversal a linha de costa, como terraço de maré, bancos e berma. As autofunções de ordem superior (o restante dos modos estatísticos) representam uma porcentagem muito pequena da variância da configuração do perfil (geralmente menos de 1%), portanto, são desprezadas. Dessa forma, a maior parte da variação da configuração do perfil pode ser explicada por três autofunções correspondentes aos três maiores autovalores (REEVE; CHADWICK; FLEMING, 2004). Por essa razão, se torna uma ótima ferramenta para estudos que analisam a morfodinâmica de praias. Cabe aqui ressaltar a diferença entre a equação que expressa a EOF e a que expressa o método de DEAN *et al.* (1977). Este último é capaz de nos mostrar apenas o perfil de equilíbrio da praia.

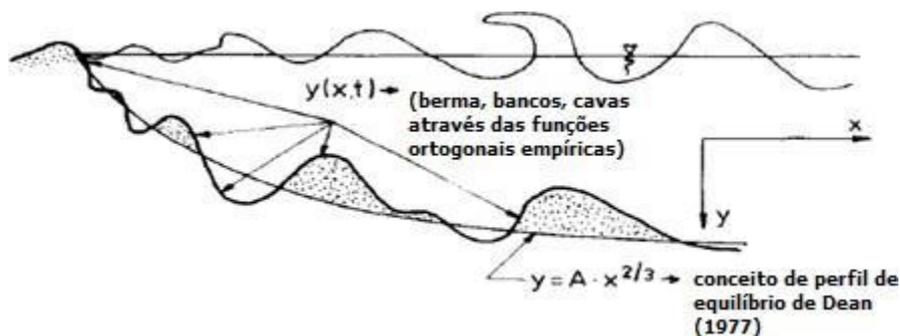


Figura 1. Diferença entre o método EOF e o método de Dean (1977) (modificado de PRUSZAK, 1993).

### 1.1. Motivação

As praias são o produto de um complexo sistema de forças e processos. Apesar dos recentes avanços obtidos em pesquisas, o problema relativo à compreensão da dinâmica dos sistemas praias, bem como prever suas respostas às mudanças das forças atuantes sobre o perfil praias, são muito rudimentares. Um melhor entendimento do comportamento do perfil praias com relação às forças indutoras e aos mecanismos associados, podem aumentar o grau de confiança em prever as respostas do perfil, como por exemplo, ao incremento do nível do mar.

Pesquisas recentes realizadas por BARNARD *et al.* (2017) indicam que as necessidades de planejamento das comunidades costeiras baseiam-se na avaliação dos impactos dos fenômenos climáticos extremos que podem influenciar as alterações do nível do mar.

Em todo o mundo pode-se presenciar exemplos de perdas de áreas litorâneas que são densamente povoadas (SHORT e KLEIN, 2016a; CASTELLE *et al.*, 2015; NEUMANN *et al.*, 2015; GRIGGS, 2015; SILVA *et al.*, 2014; MUEHE, 2006; WALKER, 1988). Os governos e as empresas estão cada vez mais interessados em identificar soluções que podem ser utilizadas de forma rentável, baseadas no comportamento da natureza, como parte da estratégia de defesa costeira (VAN DER HOEK *et al.*, 2012).

Ainda, conforme ROSSETTI (2008) o ambiente costeiro se caracteriza pelas frequentes mudanças, tanto espaciais quanto temporais, que resultam em uma grande variedade de feições geomorfológicas e geológicas. Assim, este estudo foi motivado pelo interesse em apresentar uma caracterização morfológica da área de estudo, capaz de determinar padrões morfológicos predominantes em escala de espaço e tempo através de um método estatístico (EOF). Dentro desse contexto, a Praia da Reserva se mostra um excelente laboratório natural para este tipo de estudo, visto que existe a presença de um afloramento rochoso que pode ter a mesma funcionalidade de um recife de coral, em relação à proteção costeira. Além da disponibilidade de dados referentes a

elevações de perfis de praia durante aproximadamente um ciclo sazonal completo (2015-2016). Estes padrões morfológicos poderão evidenciar a influência causada na costa pelo afloramento rochoso submerso, oriundo da herança geológica da área de estudo.

Tendo em vista que cada perfil é o produto de todas as forças passadas e presentes que atuam no sistema, a morfologia dos perfis pode conter uma abundância de informações em sua geometria, ou seja, padrões morfológicos predominantes no tempo. Embora seja uma ferramenta utilizada para análise de dados aleatórios, pode ser possível obter interpretações físicas destes padrões resultantes da análise por meio da EOF. Também é possível se obter o posicionamento das feições morfológicas na praia, tanto transversalmente como longitudinalmente, e ainda pela verificação da existência de períodos erosivos ou acrescivos. Ademais, a partir da relação encontrada entre estes padrões com a morfologia da região e com variáveis que atuam na dinâmica do sistema praias como, por exemplo, a altura significativa de onda, este método pode ser aplicado para analisar a resposta dos perfis à ação das ondas, se for encontrada alguma forte relação entre ambos (variação dos perfis de praia e distribuições de altura de onda). Dessa forma, este trabalho poderá contribuir para futuros estudos em estratégias de engenharia costeira, baseadas no comportamento da natureza (*building with nature*), e/ou como metodologia a ser aplicada em outras praias.

## **2. Objetivo Geral**

Identificar a existência de padrões morfológicos em escala de tempo e de espaço, através da aplicação do método estatístico Empirical Orthogonal Function (EOF) em uma base de dados topográficos, de aproximadamente um ano (2015-2016), de uma praia arenosa com a presença de um afloramento rochoso submerso.

### **2.1. Objetivos Específicos**

- a) Descrever através da EOF as principais feições morfológicas que aparecem ao longo dos perfis, como berma, bancos e terraço de maré baixa;
- b) Análise espacial por meio da EOF:

- x Análise transversal à linha de costa a fim de identificar a localização espacial das feições morfológicas;

- x Análise longitudinal à linha de costa para verificar a evolução da posição da berma paralelamente à praia e assim estimar a zona de influência na costa causada pelo afloramento rochoso submerso;

c) Análise temporal por meio da EOF:

- x Avaliar a existência de algum padrão morfológico no tempo (períodos de acreção e erosão);

### **3. Revisão da Literatura**

#### **3.1. Equações Ortogonais Empíricas**

A análise da função ortogonal empírica (EOF) ou ainda em inglês, empirical orthogonal functions, é uma análise de componentes principais (PCA), aplicada a um grupo de dados aleatórios. Este método estatístico foi utilizado como uma forma de identificar padrões morfológicos predominantes no tempo durante as pesquisas. Essas funções também são chamadas de modos de variabilidade. Cada um desses modos é composto por um componente espacial e temporal, em que o primeiro modo explica a maior porcentagem de variação dentro do conjunto de dados, com cada modo sucessivo representando cada vez menos a variação (LEMKE et al., 2014).

PEARSON (1901) e HOTELLING (1933), independentemente, iniciaram as aplicações da técnica, com o objetivo de determinar padrões em dados aparentemente aleatórios. Foi popularizada mais tarde como EOF por oceanógrafos e cientistas atmosféricos.

É uma ferramenta capaz de reduzir um conjunto de dados com grande número de variáveis para um conjunto de dados contendo menos variáveis, mas que ainda representa a maior fração da variabilidade contida no conjunto de dados original. Embora seja uma ferramenta utilizada para análise de dados aleatórios, é possível obter uma interpretação física dos padrões predominantes no tempo resultantes de uma

análise de EOF a partir da relação encontrada entre estes padrões com a morfologia da região e com variáveis que atuam na dinâmica do sistema praial, como por exemplo a altura significativa de onda. Por esse motivo, têm sido amplamente utilizados em estudos costeiros (LEMKE *et al.*, 2017).

Na década de 1970, os dados topográficos coletados em Torrey Pines Beach, Califórnia, foram analisados usando EOF, por WINANT *et al.* (1975). Em seus resultados, mostrou que quando o método EOF é aplicado aos dados de perfil de praia, as autofunções possuem uma interpretação física. A primeira autofunção, que corresponde ao maior autovalor, é chamado de "função média da praia", pois representa o perfil médio. A segunda autofunção, denominada "função berma-barra", tem um número máximo na localização da berma, e um mínimo na localização dos bancos de areia submersos. A terceira função, que representa a terceira maior parte da variância, é referida como "função terraço", uma vez que mostra um máximo na localização do terraço de maré baixa, porção do perfil de praia compreendido entre a crista da berma de praia (ou, na ausência desta, o limite superior do estirâncio de maré), e o limite da maré baixa.

PRUSZAK (1993) também demonstrou que as autofunções possuem uma interpretação física. Segundo ele a primeira função representa a geometria média do perfil transversal à costa. A segunda função identifica as localizações e intensidade de ocorrência de barras e outras formas acumulativo-erosivas.

AUBREY (1978, 1979), BOWMAN (1981) também aplicaram essa técnica para análise de perfis de praia. DICK E DALRYMPLE (1984), analisaram treze perfis transversais em Bethany Beach, contando com 11 pesquisas entre Maio de 1982 e Maio de 1983. Segundo eles, o máximo e o mínimo do segundo modo estatístico denotam os locais da maior mudança. A segunda autofunção identificou a berma e a barra como regiões com maior desvio da média. O grande valor positivo no berma significa que esta feição estava aumentando durante o verão e início do outono e o valor negativo durante os meses de inverno indica que a berma estava em erosão, havendo acúmulo de sedimento na região das barras. Como a terceira função representa uma porcentagem tão pequena da variância total, ela descreveu desvios mais fracos da média, de modo que as configurações correspondentes foram, em geral, menos consistentes ao longo da praia do que as configurações das segundas funções.

A pesquisa de características de perfis da costa, principalmente a determinação

de locais de barras submarinas, locais e intensidade de erosão ou acreção no perfil, predominância sazonal de transporte de sedimentos *onshore-offshore*, foram tópicos dos trabalhos como o de OSTROWSKI *et al.* (1990) e PRUSZAK (1990), em que foi mostrado que as funções ortogonais empíricas são muito úteis em análises deste tipo.

WIJNBERG E TERWINDT (1995) usaram o método EOF para analisar mudanças na batimetria próximo à costa da Holanda ao longo de várias décadas, que também foi utilizada posteriormente em diversos campos da oceanografia.

Desde então, as aplicações incluíram o estudo de engorda de praias em termos de respostas de curto, médio e longo prazo de perfis (LARSON *et al.*, 1999) e linhas de contorno (MUNOZ-PEREZ *et al.*, 2001).

As aplicações foram estendidas a praias com estruturas costeiras, como quebra-mares (ARANUVACHAPUM e JOHNSON (1979), FAIRLEY *et al.*, 2009) e os afloramentos rochosos (MUNOZ- PEREZ, *et al.*, 2010). ARANUVACHAPUM e JOHNSON (1979) analisaram as medidas de perfil de praia com EOF para investigar as diferenças no comportamento de perfil de praia em ambos os lados de um quebra mar. Uma praia na Espanha com a presença de um afloramento rochoso foi o cenário escolhido para aplicação da EOF por MUNOZ PEREZ *et al.* (2010). Um monitoramento topográfico de 5 anos, que teve como resultado, a identificação de diversos fenômenos morfológicos, como erosão generalizada, inclinação sazonal verão-inverno do perfil, desenvolvimento de bermas e sua posterior destruição, entre outros. Segundo este autor, a atenuação da energia das ondas provocada pela existência de um afloramento rochoso submerso agiu como um controle geológico para a evolução do perfil. De acordo com RANASINGHE e TURNER (2005), a função primária dessas estruturas submersas é reduzir a quantidade de energia das ondas em sua retaguarda e iniciar processos de deposição de sedimentos através da modificação das correntes locais.

HORRILLO-CARABALLO E REEVE (2011) aplicaram este método estatístico em Walcott, UK, onde há registros de perfis de praia e condições de ondas por mais de uma década, a fim de investigar a correlação entre o clima de ondas e a resposta do perfil de praia nas proximidades de um quebra-mar. Os resultados do presente estudo indicam que a análise estatística mostrou potencial como um método de previsão, visto que houve bastante relação entre a resposta dos perfis com diferentes parâmetros de onda. Assim, através da previsão de ondas seria possível prever também

o comportamento dos perfis.

Mais recentemente, LEMKE e MILLER (2017), investigaram a evolução morfológica de um projeto de engorda de praia construído em Long Branch, New Jersey, EUA, usando o método das funções ortogonais empíricas (EOF). A análise com EOF foi utilizada como uma ferramenta para ajudar a identificar os padrões dominantes de variabilidade associados às mudanças na linha costeira. Os três primeiros modos, determinados a partir do conjunto de dados de posição da linha costeira, explicam mais de 90% da variação da linha de costa média.

#### 4. Área de Estudo

A Praia da Reserva (23° 0'50.48" S e 43°23'9.78" O) está localizada na zona oeste da cidade do Rio de Janeiro (RJ), e foi escolhida por ser um excelente laboratório natural para o desenvolvimento do presente estudo (figura 2), visto que a presença de um afloramento rochoso pode estar influenciando a morfodinâmica da costa (SUDAU, 2016, NEMES, 2016). Apresenta orientação geográfica aproximadamente E-W e é classificada como uma praia intermediária, oceânica, dominada por ondas de alta energia e com regime de micromaré (< 1,5m) com granulometria equivalente a areia média (D50 - 0,319 mm) (MUEHE e LINS-DE-BARROS, 2016, CRIADO-SUDAU, 2016, NEMES, 2016). Segundo WRIGHT e SHORT (1984), estas características constituem o tipo de praia mais encontrada ao redor do planeta.

A praia da Reserva é muito frequentada por turistas e comunidade local. Existem construções urbanas muito próximas à costa (pista e quiosques), onde a faixa de areia da praia, em algumas épocas do ano, se torna pequena e a água do mar aproxima-se bastante destas construções. Outro fato que se pode chamar atenção é a herança geológica da praia. Existe uma formação rochosa com a geometria aproximadamente triangular (NEMES, 2016), forma conhecida como *V-shape*, apresentado pela primeira vez na literatura por WALKER *et al.* (1972).

O domínio de interesse foi de aproximadamente 500 m longitudinais e de 140 m transversais (aproximadamente 70.000 m<sup>2</sup>). Isto foi definido por causa das características do tipo de praia (intermediária) e pelo o comprimento de onda formado pelas cúspides de praia nos eventos de alta energia de ondas, observados com menos de 500 m (NEMES, 2016).

Para a escala transversal, a utilização apenas do método de topografia, sem o auxílio de embarcações específicas para a zona de surfe, foi o que limitou o monitoramento da variabilidade morfológica da Praia da Reserva em até 140 m (esta é a distância entre o sopé da duna e a base do banco rochoso longitudinal à praia), sem que houvesse comprometimento do estudo (NEMES, 2016).

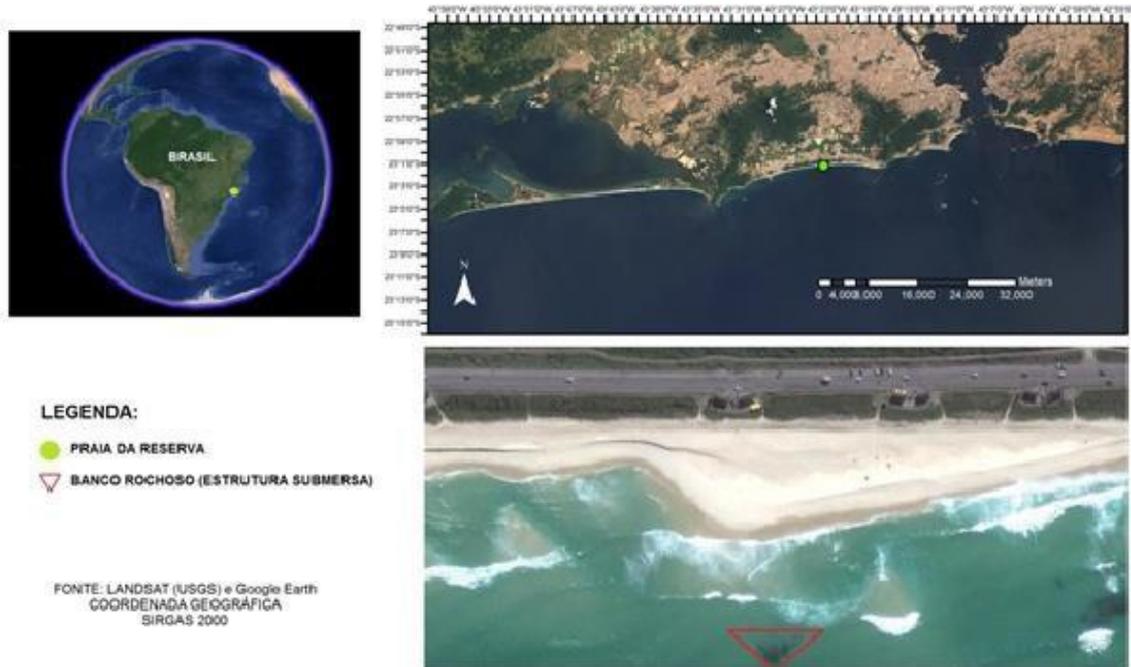


Figura 2. Localização da área de estudo. Praia da Reserva, zona oeste da cidade do Rio de Janeiro. Destaque em vermelho para estrutura rochosa submersa com formato de *V-shape*.

De acordo com WRIGHT *et al.*, (1979), as praias intermediárias podem exibir feições morfológicas tanto com características de processos dissipativos quanto refletivos. Isto está fundamentado pelo clima de ondas de águas profundas do local, isto é, pela incidência de um campo de ondas que sofreu dispersão por uma área de geração distante da costa. Em consequência, pode-se observar a chegada de ondas de mais baixa frequência e, após dias, a parcela de ondas com mais alta frequência (NEMES, 2016). As dimensões e os formatos das feições do sistema praial estão intimamente ligados ao espectro de densidade de energia de ondas incidente ao longo de uma escala temporal (SHORT, 1999). Pensando nisto, NEMES (2016) observou que a organização topográfica parece ser a assinatura dos vetores de quebra de ondas. Segundo o autor, a vulnerabilidade da linha de costa com a presença de uma estrutura submersa é definida

pelo modo de formação do sistema de vetores de quebra de ondas. A incidência dos raios de ondas normal ( $\pm 5^\circ$ ) ou oblíqua ( $> 10^\circ$ ) sobre a estrutura submersa na praia é o mecanismo que estabelece, deforma ou erode uma feição arenosa deposicional a sotamar.

As figuras 3 e 4 ilustram duas situações típicas que ocorrem na Praia da Reserva. Na primeira figura foi demonstrado o caso de incidência normal das ondas em relação à praia. Percebe-se a vulnerabilidade da linha de costa com a presença da estrutura submersa, onde provavelmente está havendo acúmulo de sedimento a sotamar da estrutura (Zona 3) e erosão na região em que os vetores de quebra de onda encontram a costa (Zona 4 e 2).

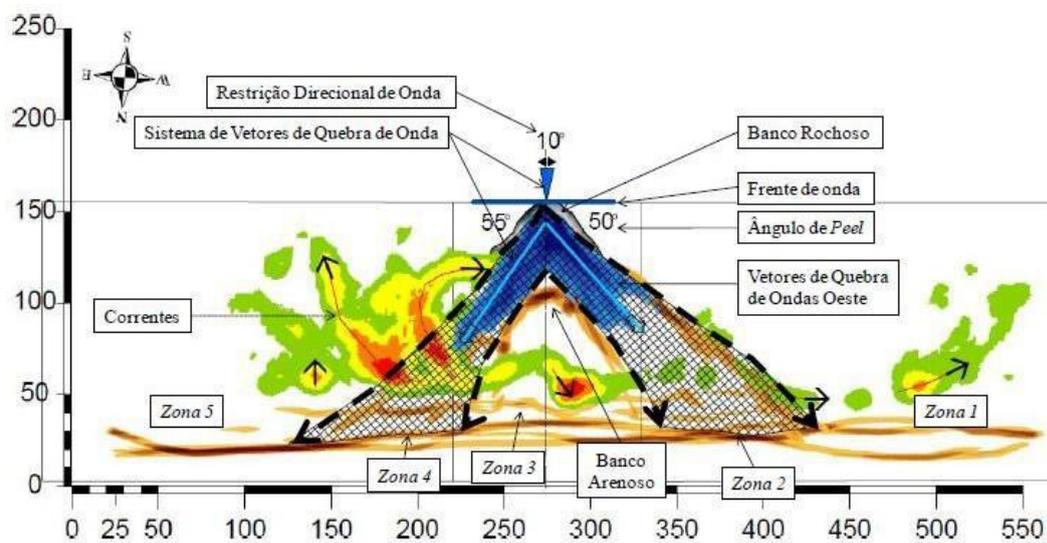


Figura 3. Zoneamento proposto por NEMES (2016) da linha de costa em função da formação dos vetores de quebra de ondas com incidência normal a praia. As zonas 4 e 2 são onde a energia de ondas atinge a linha de costa. A Zona 3 é a zona de sombra. As zonas 1 e 5 não apresentam relevante influência.

É importante enfatizar que para o exemplo da figura 3, a frente de onda incidente posicionada sobre o eixo plano do cosseno está entrando normal à linha de costa. Se as ondas entram oblíquas à linha de costa, as zonas mudam como demonstradas na figura 4. As zonas 4 e 2 são onde a energia de ondas atinge à linha de costa e, onde provavelmente, está havendo erosão. Porém nota-se que houve uma migração das zonas para a porção oeste. Dessa maneira, a zona 4, agora, está a sotamar da estrutura submersa e a zona 3 passou a ser a zona de sombra. Portanto, está havendo

erosão na região onde anteriormente estava havendo acreção na retaguarda do afloramento. Este é o mecanismo capaz de deformar e erodir uma feição acrescida a sotamar de uma estrutura submersa no sistema praiial (NEMES, 2016).

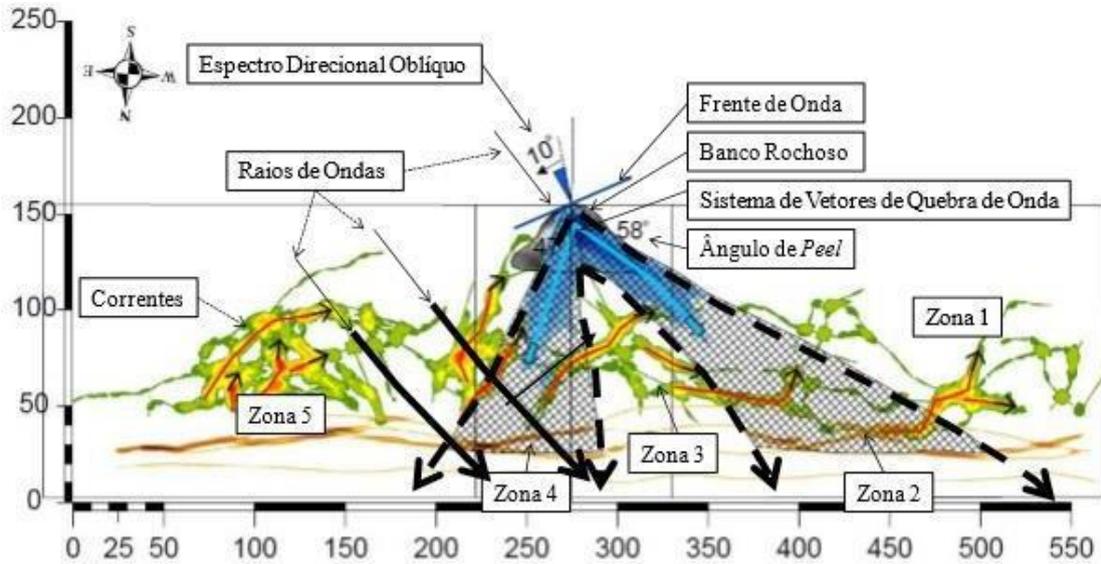


Figura 4. Zoneamento da linha de costa proposto por NEMES (2016) em função da formação dos vetores de quebra de ondas com incidência oblíqua em relação à praia. A zona 4 e 2 são onde a energia de ondas atinge a linha de costa. A Zona 3 é a zona de sombra. Nota-se, para este caso, a migração das zonas para porção mais oeste da praia.

Na figura 5 estão ilustradas as feições morfológicas normalmente encontradas em uma praia arenosa do tipo intermediária. As dimensões e os formatos destas feições do sistema praiial estão intimamente ligados ao espectro de densidade de energia de ondas incidente ao longo de uma escala temporal (SHORT, 1999).



Figura 5. Esquema ilustrativo das feições morfológicas normalmente encontradas em uma praia arenosa do tipo intermediária (modificado de SOUZA *et al.*, 2005).

O termo praia foi utilizado para nomear a região da zona de arrebentação de ondas até a base da duna, onde ocorrem as maiores modificações morfológicas do sistema (WRIGHT e SHORT, 1984).

As modificações na praia são, em parte, causadas pela troca bidirecional de sedimentos entre dois limites, através da zona de arrebentação. Portanto, o termo “sistema praial”, nomeia o ambiente sedimentar que está compreendido entre a feição morfológica mais interna, base da duna frontal, e a zona mais externa do sistema, chamada "camada limite costeira". Dependendo do clima de ondas, esta camada se estende a profundidades de uma a duas dezenas de metros e tem a praia como limite mais interno (CALLIARI *et al.*, 2003).

Variações temporais do estado da praia dependem fundamentalmente do regime ondulatório de águas profundas, ao passo que, mudanças espaciais dependem principalmente das variações na modificação das ondas à medida que as mesmas se propagam para águas rasas. Estas modificações são controladas pela geologia e configuração da costa. Tanto a variabilidade temporal como a espacial são dependentes do tipo e da disponibilidade do material que compõe a praia (CALLIARI *et al.*, 2003).

As feições chamadas de berma e terraço de maré baixa serão mencionadas bastante durante as explicações. O terraço de maré baixa é caracterizado por uma face de praia relativamente íngreme, a qual é conectada, no nível de maré baixa, a um terraço

plano que se prolonga de alguns metros a dezenas de metros em direção ao mar continuando ligado à praia ao longo da costa. Segundo SHORT (1993), durante a baixamar, especialmente a de sizígia, o terraço é totalmente exposto, podendo apresentar um relevo de bancos de areia e calhas dispostos paralelamente à praia.

O pacote sedimentar do sistema praial superior, zona emersa da praia, é chamado de berma (SHORT, 1999). As dimensões, transversal e longitudinal, desta feição morfológica são controladas pela energia das ondas e, visualmente, são as referências para as classificações da variabilidade morfodinâmica das praias arenosas. A crista da berma é uma feição morfológica resultante da última ação da energia da onda sobre a face da praia, formando um pequeno banco emerso devido aos sedimentos deslocados pelas ondas.

A linha de costa pode ser observada com vários tipos de definições na literatura (SHORT, 1999). Assim, neste trabalho, foi definida como o alcance máximo da linha d'água no espraiamento das ondas na face de praia, onde as marcas mais recentes são indicadas pela diferença entre areia seca e molhada deixadas pela última maré (AMARO *et al.*, 2012).

## 5. Metodologia

### 5.1. Levantamento Topográfico

A matriz utilizada para desenvolver a estatística EOF neste estudo foi composta por dados de topografia coletados por NEMES (2016), obtidos dentro de um ciclo sazonal completo (2015-2016), totalizando 26 campanhas de monitoramento topográfico (figura 6).

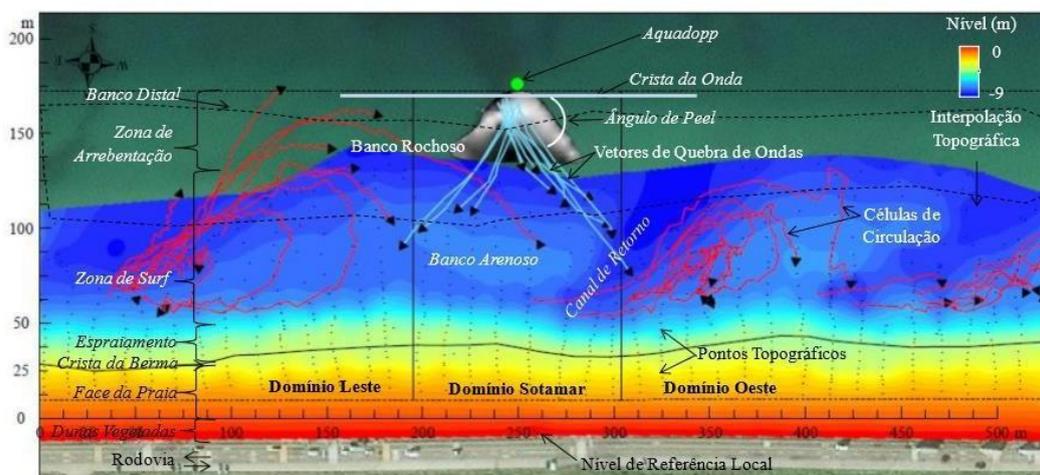


Figura 6. Ilustração do esforço amostral de um ano (2015-2016) na Praia da Reserva, indicadando as feições morfológicas juntamente com os pontos de topografia e a interseção dos níveis, banco arenoso a sotamar do banco rochoso, além dos domínios leste, sotamar e oeste e o limite do banco distal. Fonte: NEMES, 2016.

Porém, destas 26 campanhas somente foram satisfatórias para este trabalho 19 delas. Sete, destas campanhas, não conseguiram abranger os 500 m longitudinais propostos para o domínio de interesse deste trabalho, como está ilustrado na figura 7.

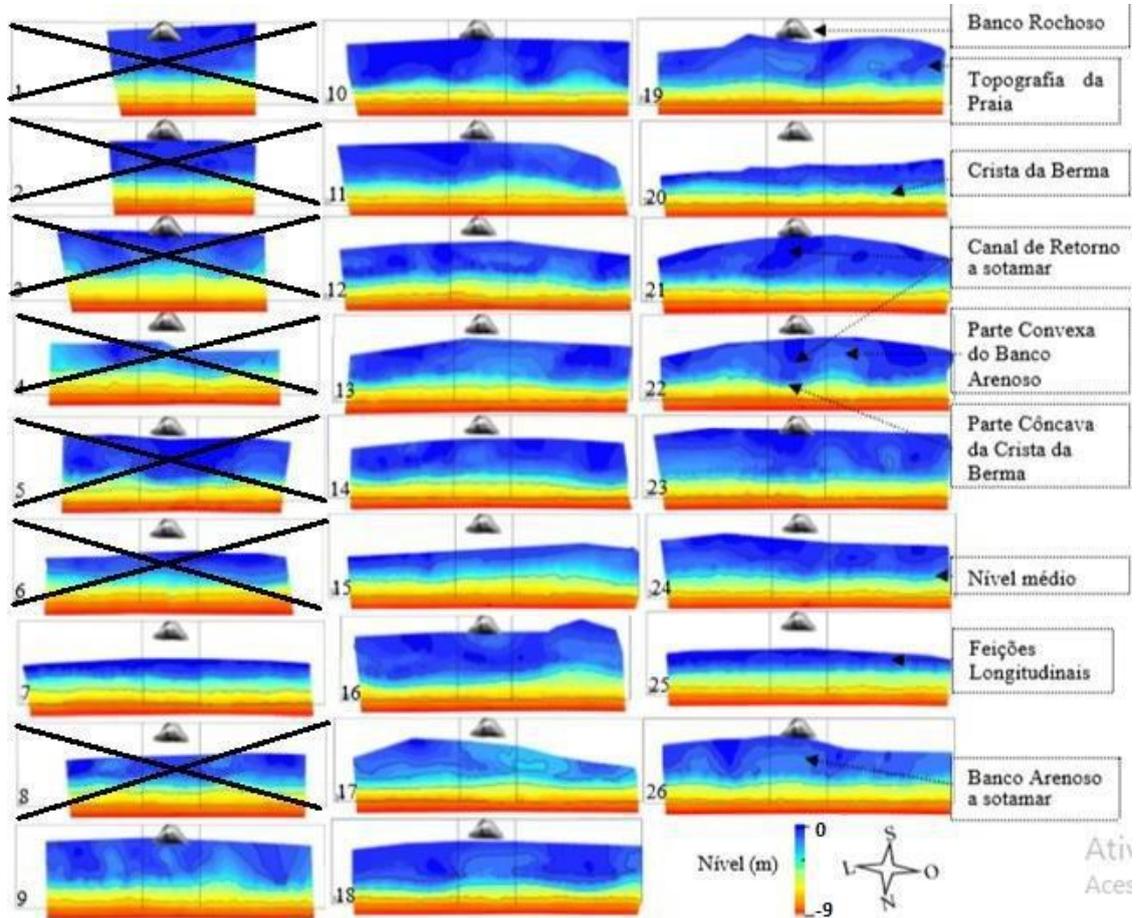


Figura 7. Resultado de 26 nivelamentos de topografia da Praia da Reserva entre 09 de janeiro de 2015 e 31 de janeiro de 2016 (NEMES, 2016). Destacam-se as sete campanhas que não conseguiram abranger o domínio de interesse descrito na área de estudo, marcadas com um x, totalizando em 19 campanhas topográficas analisadas neste estudo.

Para este estudo, os dados de topografia foram coletados através do método de nivelamento geométrico transversal da praia. Para isto, utilizou-se um nível óptico (20x, Northwest), régua graduada e um receptor GPS (Garmin Etrex10). Assim, o nivelamento ocorreu pela diferença entre a altura do nível óptico e a visada da mira sob a régua graduada e, ainda, com o receptor GPS, foi obtida a referência geográfica espacial (latitude e longitude) de cada ponto de desnível topográfico. Estes instrumentos foram escolhidos devido à disponibilidade dos equipamentos no Laboratório de Dinâmica de Sedimentos Coesivos (LDSC).

Para a referência vertical do nível topográfico adota-se uma base fixa, que para este caso, especificamente, foi utilizada uma base de concreto para sustentação de um poste localizada no limite interno da praia (aproximadamente +7 m em relação ao nível médio do mar). Já o limite externo de nivelamento topográfico, foi de até -3 m em relação ao nível médio do mar ou até quando a topografia e a ação das ondas permitissem (NEMES, 2016).

## **5.2. Escolha dos perfis para análise espacial longitudinal à costa**

O conjunto de perfis transversais à praia foi medido no domínio de interesse de 500 m longitudinais e 140 m transversais (descrito na área de estudo), havendo um espaço de aproximadamente 25 m entre cada um deles. Dessa forma, as alterações longitudinais da morfologia da praia causadas por estas ondas serão registradas.

Durante as campanhas foram obtidos, em média, 872 pontos de nivelamento georeferenciados na praia. Para realização da análise longitudinal da costa, foram investigados 20 perfis com localização fixa (de leste para oeste - P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12, P13, P14, P15, P16, P17, P18, P19 e P20). Estes pontos ao longo dos perfis foram interpolados com a ferramenta do software ArcGIS 10.1., conforme figura 8.



Figura 8. Indicação das posições dos 20 perfis (de leste para oeste - P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12, P13, P14, P15, P16, P17, P18, P19 e P20), transversais à linha de costa, que serão analisados na área de estudo.

### 5.3. Escolha dos perfis para análise espacial transversal à costa

Já a escolha dos perfis para análise espacial transversal à costa, foi baseada no diagrama de zoneamento da praia da Reserva (Figura 6), proposto do NEMES (2016).

Uma mesma feição submersa na praia pode formar diferentes modos de refração da frente de onda e gerar vetores de quebra de ondas com orientações e extensões diferentes. O espectro direcional de ondas de uma praia exposta é significativamente amplo. O que ocasiona amplos modos de refração da frente de onda sobre a estrutura submersa.

Basicamente, o diagrama divide a área de estudo em duas zonas: Zona de Sombra e Zona Vulnerável. A elaboração deste baseou-se nas características direcionais de incidência dos raios de ondas em relação à abertura angular do banco rochoso da praia da Reserva e dos vetores de quebra de ondas gerados sobre a estrutura submersa.

Segundo o diagrama, a Zona de Sombra apresenta 150 m de comprimento, sendo 75 m a leste do afloramento e 75 m a oeste do afloramento, como está representada em verde na Figura 6. A Zona Vulnerável também tem 150 m. Porém, são 75 m após a Zona de Sombra para leste, e 75 m após a zona de sombra para oeste, como está representado em vermelho na Figura 6. O raio de onda incidente deve ser posicionado sobre o eixo plano do cosseno, normal à costa.

Foram analisados 5 perfis com localização fixa (Perfis em amarelo na Figura 8). Os perfis estão posicionados com 100 m de distância entre eles. Dessa maneira, cada uma das zonas descritas no diagrama da Figura 9 irá contar com um perfil para investigação da influência dos vetores de quebra de ondas na localização das feições transversais a linha de costa.

Sendo assim, o P3 equivale ao perfil localizado no Extremo Leste da praia. O P7 será o Perfil Leste, o P11, será o perfil localizado exatamente na Retaguarda do afloramento rochoso. O P15 será o Perfil Oeste e, o P19, localizado no Extremo Oeste da praia.

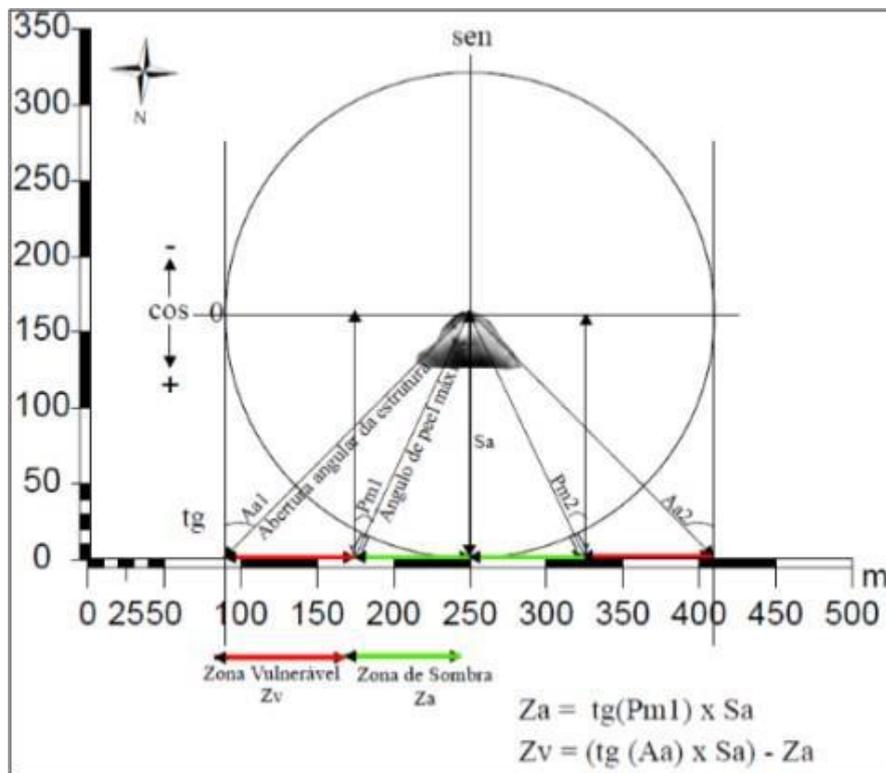


Figura 9. Zona Vulnerável (vermelho) e Zona de Sombra (verde) representadas no Diagrama de Zoneamento da linha de costa proposto por NEMES (2016). A frente de onda incidente deve ser posicionada sobre o eixo plano do cosseno, nesse caso a frente de ondas está normal à costa.

#### 5.4. Elaboração do código para processar as funções ortogonais empíricas (EOF)

Foram usados como referência os resultados obtidos no livro “Costal Processes with Engineering Applications”, os quais, foram comparados aos resultados obtidos através da rotina desenvolvida no software MatLab R2016a usada neste estudo (Anexo II). A matriz de dados de elevações topográficas, usada em ambos os casos descritos acima, foi exibida na tabela 1.

As campanhas de amostragem realizadas devem ser expressas no tempo, por exemplo, por  $k$ , e para cada campanha, as medições são tomadas, por exemplo, em  $i$  pontos ao longo de cada perfil. A combinação linear dessas funções resulta na elevação em  $h$  do perfil, denotada por  $h(i,k)$ . Funciona, basicamente, de forma que através da matriz profundidade oriunda dos dados de elevações  $h(i,k)$ , obtém-se uma matriz de correlação ( $A$ ), e através da transformação ortogonal desta, são produzidas uma matriz diagonal  $S$  (matriz identidade) de autovalores e uma matriz completa  $M$  onde as colunas correspondem aos autovetores, de modo que  $A \times M = M \times S$  (ortogonalidade). Desta forma, os dados que se pretende estudar são decompostos em termos de componentes principais na forma de autovetores e autovalores, de modo que a representatividade da variância dos dados originais é mantida.

Tabela 1. Dados fictícios de elevações realizados em quatro campanhas ( $k = 4$ ), ou seja, quatro perfis em um ponto fixo variando com o tempo, com três pontos em  $x$  ( $i=1$ ,  $i=2$  e  $i=3$ ), que foram utilizados para rodar as rotinas ajustadas neste estudo. Dados retirados do livro “Costal Processes with Engineering Applications”.

Elevações ( $h_{ik}$ )			
Campanhas ( $k$ )	$i=1$	$i=2$	$i=3$
1	1	2	3
2	1	2	2
3	0	1	2
4	1	3	4

Formada essa referência teórica, primeiramente foi definida uma matriz profundidade com os valores das elevações ( $h_{ik}$ ). Em seguida, determinou-se a matriz de

correção ( $A_{im}$ ) que é simplesmente a multiplicação da matriz transposta da profundidade pela própria matriz profundidade e divididos pela multiplicação da quantidade de ponto em x, I pela quantidade de campanhas, K ( $D^T \hat{A} D^{\alpha+}$ ; . Como resultado, foi obtida a matriz de correlação ( $A_{im}$ ) abaixo:

$$\begin{matrix} r_{\hat{a}w} & r_{\hat{a}vzuuu} & r_{\hat{a}yw} \\ r_{\hat{a}vzuuu} & s_{\hat{a}v} & t_{\hat{a}} \\ r_{\hat{a}yw} & t_{\hat{a}} & t_{\hat{a}yw} \end{matrix}$$

O problema é solucionado a partir do comando  $[M,S] = \text{eig}(A)$  utilizando o software MatLab R2016a, produzindo uma matriz diagonal S (matriz identidade) de autovalores ( $\lambda$ ) e uma matriz completa M onde as colunas correspondem aos autovetores, de modo que  $A \times M = M \times S$ . Após isto, foi feito o somatório dos autovalores ( $\lambda$ ) para então ser obtida a variância total (4,5) :

$$\hat{\sigma}^2 = \sum \lambda_i$$

A partir da variância total (4,5), obteve-se a variância para cada autovalor (são os autovalores divididos pela variância total e multiplicados por 100).

Por fim, a variância dos autovetores para cada campanha é determinada pelo coeficiente  $C_{nk}$ , expresso por:

$$C_{nk} = \frac{\lambda_k}{\sum \lambda_i} \cdot \frac{A_{nk}}{\sum A_{nk}}$$

São eles:

Tabela 2. Valores da variância dos autovetores para cada uma das quatro campanhas k expressos por  $C_{nk}$ .

$C_{nk}$			
Campanhas (k)	n=1	n=2	n=3
1	3.7335	-0.017397	-0.245975
2	2.94857	-0.548184	0.0735851
3	2.14859	0.617671	0.0450341
4	5.09717	0.0694875	0.118619

O perfil original pode ser descrito pela soma de cada autofunção multiplicadas pelo seu coeficiente correspondente, assim como está ilustrado na figura 10.

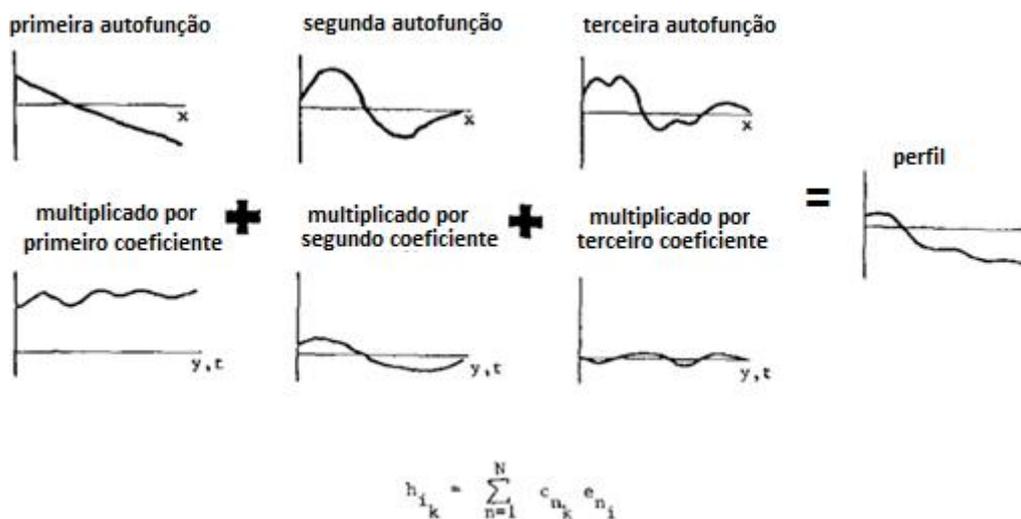


Figura 10. Representação esquemática da decomposição de um perfil de praia pelo método de autofunção empírica. O perfil original pode ser descrito pela soma de cada autofunção multiplicada por seu coeficiente correspondente (modificado de DICK E DALRYMPLE, 1984).

Após todos esses cálculos, foi feita a plotagem dos gráficos para as quatro campanhas (quatro perfis em um ponto fixo variando com o tempo) e as autofunções associadas. Nota-se que o resultado do livro está exatamente igual ao resultado obtido através da rotina desenvolvida no software MatLab R2016a usada neste estudo (Figura 11).

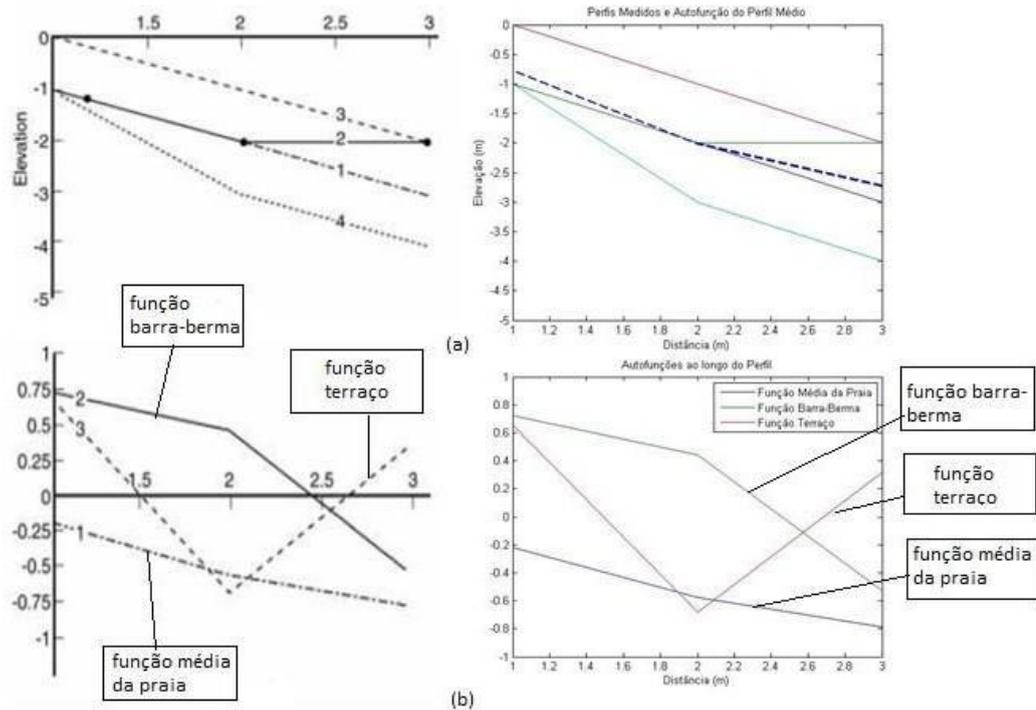


Figura 11. Comparação entre os resultados retirados do Livro: “Costal Processes with Engineering Applications” (lado esquerdo) e os resultados obtidos por meio das rotinas ajustadas neste estudo (lado direito), aplicando-se o método EOF nos dados de elevação de perfis. Na parte superior (a) são mostrados os quatro perfis que estão sendo analisados. Na parte inferior (b) são mostradas as autofunções associadas a este cenário.

A rotina usada no programa MatLab R2016a foi testada com os dados fictícios obtidos no livro “Costal Processes with Engineering Applications”. Portanto, posteriormente aos testes, é que foi realizada a rodada com os dados reais da topografia da área de estudo.

A partir disto, serão utilizados os coeficientes espaciais e temporais oriundos das rodadas com os dados reais da topografia, para realização das análises espacial e temporal propostas nos objetivos deste estudo.

### 5.5. Variação da linha de costa

Através da ferramenta de imagens históricas do Google Earth Pro, foram utilizadas as imagens do dia de cada campanha topográfica para medir a variação da distância entre a pista de asfalto, construída sobre a duna, que é o ponto fixo durante todas as campanhas, e a linha de costa, que é o ponto variável entre as campanhas em

cada um dos perfis analisados (P3, P7, P11, P15, P19).

Porém, as datas das imagens do Google Earth Pro, não corresponderam exatamente ao mesmo dia das campanhas em campo. Dessa forma, foram selecionadas as datas mais próximas para realização da análise (Anexo I).

As distâncias foram medidas para cada um dos perfis nas diferentes datas das campanhas, desde a pista de asfalto até a linha de costa, que neste trabalho, foi definida como o alcance máximo da linha d'água no espriamento das ondas na face de praia, onde as marcas mais recentes são indicadas pela diferença entre areia seca e molhada deixadas pela última maré (AMARO *et al.*, 2012). A partir disto, foram feitas as médias e os desvios padrões das variações das distâncias para cada um dos perfis, a fim de investigar se há determinadas zonas da área de estudo em que há maior variação da linha de costa.

## 5.6. Análise da mobilidade de sedimento

Foi observado que existem dois períodos com perfis extremos para cada perfil, isto é, o mais erodido e o mais acrecido de toda a série temporal do estudo. Sendo assim, foram calculadas as áreas compreendidas entre a área do perfil mais acrecido pela diferença da área do perfil mais erodido do período.

Para o cálculo da área entre os perfis extremos, foi calculada a diferença entre as integrais das funções que limita a área correspondente às duas curvas que representam o perfil mais acrecido e o mais erodido. Como  $f$  e  $g$  são funções contínuas no intervalo  $[a,b]$  e  $f(x) \geq g(x)$  para todo  $x$  em  $[a,b]$ , sendo o limite de integração entre  $x = 0$  até  $x = 140$  (tamanho do perfil), a área da região limitada acima por  $y = f(x)$ , abaixo por  $y = g(x)$  foi obtida através da seguinte equação:

$$A = \int_a^b [f(x) - g(x)] dx$$

Após isto, multiplicaram-se as áreas pelo espaço compreendido entre cada perfil (25 m) para estimar a mobilidade de sedimento em cada porção longitudinal da praia.

## 6. Resultados e Discussão

### 6.1. Análises das Funções Ortogonais Empíricas (EOF)

A EOF foi aplicada na matriz profundidade de dados topográficos. Este tipo de análise apresenta-se como um método robusto para se obter uma descrição compacta da variabilidade espacial e temporal das séries de dados em termos de “modos” estatísticos (EMERY E THOMSOM, 2001). Tais modos são extraídos a partir de matrizes que irão definir as regiões com padrões de variabilidade espacial e temporal similares.

Observou-se que a maior parte da variação da configuração do perfil pôde ser explicada por três autofunções correspondentes aos três maiores autovalores (três maiores variâncias), ou ainda, os três primeiros “modos” estatísticos. São elas a função média da praia, função barra-berma e função terraço, mostradas na Tabela 3. LEMKE e MILLER (2017) também constataram que os três primeiros modos, determinados a partir do conjunto de dados de posição da linha costeira, explicam a maior parte da variação da configuração do perfil.

Tabela 3. Percentual da variância representada pelos três primeiros modos de variabilidade espacial da EOF aplicada para cada um dos 20 perfis analisados.

PERFIL 1		PERFIL 2		PERFIL 3	
	variância(%)		variância(%)		variância(%)
função média da praia	99,5109	função média da praia	99,4579	função média da praia	99,49
função barra-berma	0,3227	função barra-berma	0,3334	função barra-berma	0,3345
função terraço	0,1074	função terraço	0,1482	função terraço	0,1149
PERFIL 4		PERFIL 5		PERFIL 6	
	variância(%)		variância(%)		variância(%)
função média da praia	99,5072	função média da praia	99,5207	função média da praia	99,5398
função barra-berma	0,3521	função barra-berma	0,3236	função barra-berma	0,2873
função terraço	0,0979	função terraço	0,1079	função terraço	0,1056
PERFIL 7		PERFIL 8		PERFIL 9	
	variância(%)		variância(%)		variância(%)
função média da praia	99,5938	função média da praia	99,6048	função média da praia	99,5789
função barra-berma	0,2378	função barra-berma	0,2149	função barra-berma	0,2515

função terraço	0,1118	função terraço	0,1076	função terraço	0,0911
<b>PERFIL 10</b>		<b>PERFIL 11</b>		<b>PERFIL 12</b>	
	variância(%)		variância(%)		variância(%)
função média da praia	99,5709	função média da praia	99,4957	função média da praia	99,5591
função barra-berma	0,2805	função barra-berma	0,3637	função barra-berma	0,3485
função terraço	0,0721	função terraço	0,0720	função terraço	0,0541
<b>PERFIL 13</b>		<b>PERFIL 14</b>		<b>PERFIL 15</b>	
	variância(%)		variância(%)		variância(%)
função média da praia	99,5296	função média da praia	99,5968	função média da praia	99,6060
função barra-berma	0,3235	função barra-berma	0,2222	função barra-berma	0,2427
função terraço	0,0840	função terraço	0,1160	função terraço	0,0957
<b>PERFIL 16</b>		<b>PERFIL 17</b>		<b>PERFIL 18</b>	
	variância(%)		variância(%)		variância(%)
função média da praia	99,6673	função média da praia	99,5274	função média da praia	99,6375
função barra-berma	0,2417	função barra-berma	0,3027	função barra-berma	0,2200
função terraço	0,0451	função terraço	0,0775	função terraço	0,0689
<b>PERFIL 19</b>		<b>PERFIL 20</b>			
	variância(%)		variância(%)		
função média da praia	99,6056	função média da praia	99,7024		
função barra-berma	0,1982	função barra-berma	0,1610		
função terraço	0,0929	função terraço	0,0664		

A variância da primeira função variou entre 99,4579% e 99,7024%, da segunda entre 0,1610% e 0,3637% e da terceira entre 0,0451% e 0,1482%. WINANT *et al.*(1975), um dos pioneiros a estudar este método, apresentou resultados bastante similares. Eles examinaram perfis de três praias durante dois anos com o método EOF, e demonstraram que a maior parte da variância dos dados foi também explicada pela função média da praia, variando entre 99,70% e 99,75%, a função barra-berma, variou entre 0,09% a 0,18%, e a função terraço representou 0,05% a 0,11% da variância.

### 6.1.1. Análise espacial transversal à costa

De acordo com o zoneamento proposto por NEMES (2016), 5 perfis foram selecionados para a análise espacial das feições que aparecem transversais à linha de costa, o P3, que equivale ao perfil localizado no Extremo Leste da praia, o P7, que é o Perfil Leste, o P11, que é o perfil localizado exatamente na Retaguarda do afloramento rochoso, o P15 que é o Perfil Oeste e, o P19, localizado no Extremo Oeste da praia.

A figura 12 exibe a variação da forma destes perfis ao longo da série temporal do estudo. Vale ressaltar que a linha tracejada representa aproximadamente o nível d'água, que foi estimado através do cálculo da média do nível de água entre todas as campanhas topográficas. Portanto o que está acima desta linha representa a zona emersa do perfil, e o que está abaixo desta linha, representa a zona do perfil que está submersa.

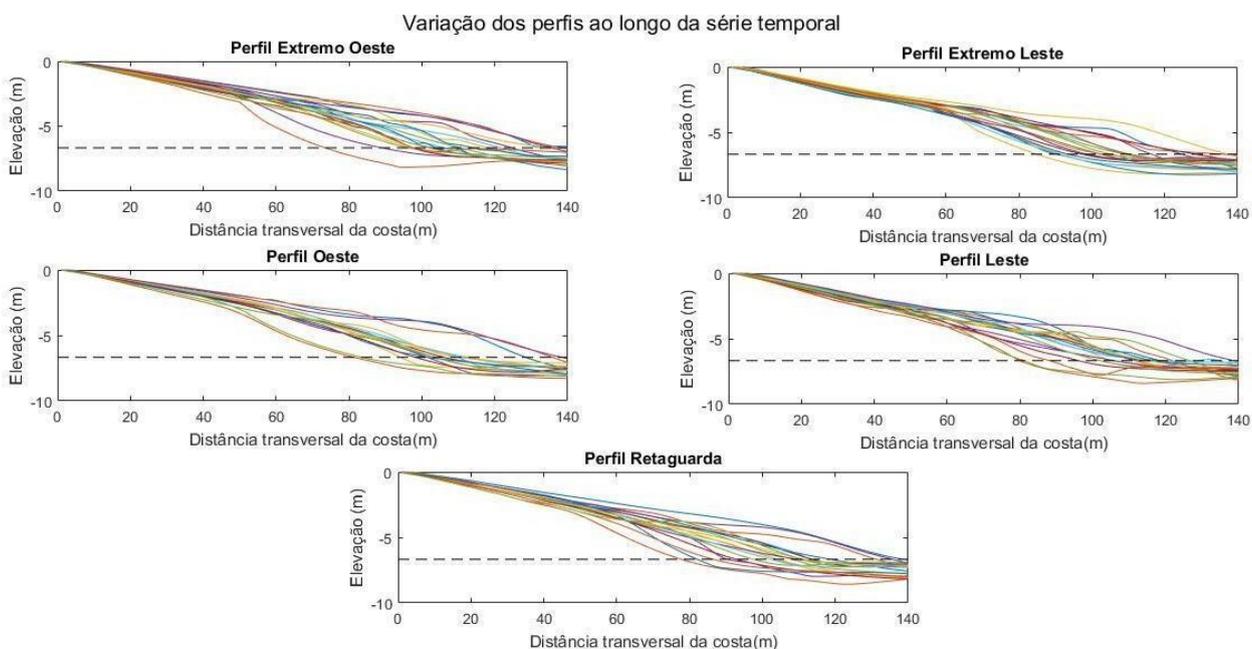


Figura 12. Variação da forma dos 5 perfis (Extremo Leste, Leste, Retaguarda, Oeste, Extremo Oeste) ao longo da série temporal do estudo, selecionados para a análise espacial das feições que aparecem transversais á linha de costa.

A tabela 4 apresenta dos valores da variância utilizando o dado bruto e da variância com a média extraída para os 5 perfis. Em alguns casos, antes de achar a matriz de correlação, é retirada a média da função para que seja avaliada amplitude da função pois, dessa maneira, a função vai variar em torno do zero.

Tabela 4. Valores da variância utilizando o dado bruto e da variância com a média extraída para os 5 perfis (Extremo Leste, Leste, Retaguada, Oeste, Extremo Oeste).

Perfil Extremo Oeste – Perfil 19

modos	variância_dado_bruto	variância_media_extraída
'primeiro autovalor'	99.49	63.449
'segundo autovalor'	0.3345	7.3623
'terceiro autovalor'	0.1149	1.6393

Perfil Oeste – Perfil 15

modos	variância_dado_bruto	variância_media_extraída
'primeiro autovalor'	99.594	55.213
'segundo autovalor'	0.2378	4.1059
'terceiro autovalor'	0.1118	1.6702

Perfil Retaguada – Perfil 11

modos	variância_dado_bruto	variância_media_extraída
'primeiro autovalor'	99.496	52.504
'segundo autovalor'	0.3637	3.3685
'terceiro autovalor'	0.072	2.0609

Perfil Leste – Perfil 7

modos	variância_dado_bruto	variância_media_extraída
'primeiro autovalor'	99.606	46.106
'segundo autovalor'	0.2427	3.2343
'terceiro autovalor'	0.0957	1.0502

Perfil Extremo Leste – Perfil 3

modos	variância_dado_bruto	variância_media_extraída
'primeiro autovalor'	99.606	48.325
'segundo autovalor'	0.1982	3.2902
'terceiro autovalor'	0.0929	2.8607

Como visto na tabela 3 e 4, o primeiro autovalor (primeiro modo estatístico) foi a que apresentou a maior variância. O primeiro modo explica a maior porcentagem de variação dentro do conjunto de dados, com cada modo sucessivo representando cada vez menos a variação (LEMKE *et al.*, 2017). Esta alta porcentagem é geralmente o caso de perfis de praia. Esta função demonstrou o formato do perfil médio entre todas as campanhas (média de um perfil variando nas diferentes datas de amostragem), conforme a figura 13.

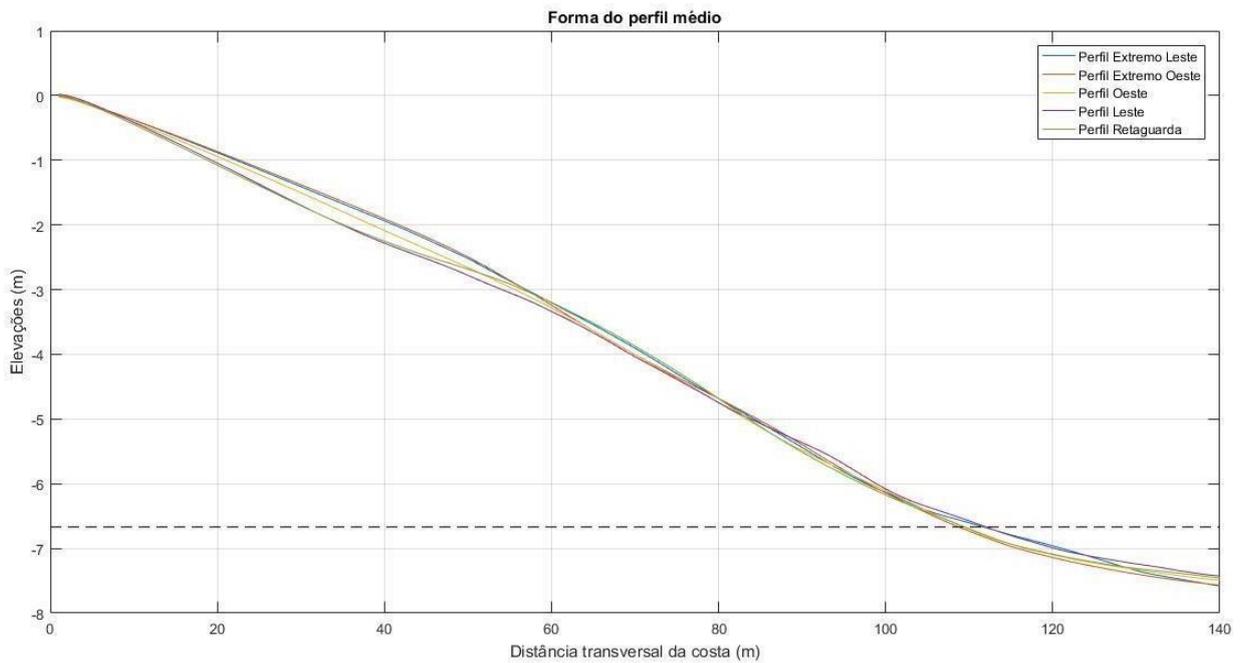


Figura 13. Primeira autofunção ou função média da praia que representa o formato do perfil médio (média de um perfil variando nas diferentes datas de amostragem) de cada um dos perfis.

Nota-se que nesta função não existe a presença das feições que aparecem ao longo do sistema praiar. Conforme PRUSZAK (1993), o perfil transversal á costa, sendo um dos principais indicadores de mudanças de praias, pode ser analisado através da função que descreve um perfil de equilíbrio médio (sem a presença das feições). Dessa maneira, o perfil médio encontrado por meio da EOF foi comparado ao perfil de equilíbrio médio descrito por Dean (1977). A função tem a seguinte fórmula geral:

$$h(y) = A y^m$$

onde  $h(y)$  é a profundidade,  $y$  é a distância horizontal do início do perfil e  $A$  e  $m$  são

coeficientes empíricos baseados em perfis representativos. DEAN (1977) propôs para  $m$  valor igual a  $2/3$ . Já o parâmetro  $A$  corresponde aos valores entre os extremos de 0,079 e 0,378.

Vale ressaltar que os valores estipulados por Dean somente são usados como referência, visto que os parâmetros utilizados foram fruto de uma pesquisa realizada em 504 perfis ao longo da costa leste norte americana, e cada praia tem suas características específicas que alteram esses parâmetros. Formas alternativas do perfil de equilíbrio foram desenvolvidas por outros autores, mas elas têm mais parâmetros livres e, portanto, são menos adequadas para fazer previsões, já que as calibrações tendem a ser específicas para cada local (DEAN et al., 2002).

A tabela 5 demonstra os valores do coeficiente empírico  $A$ , encontrados a partir da função da curva do perfil médio encontradas neste estudo, onde fixou-se o valor de  $m$  ( $2/3$ ) e verificou-se a variação do  $A$  em cada um dos perfis (Extremo Leste, Leste, Retaguarda, Oeste, Extremo Oeste).

Tabela 5. Valores do coeficiente empírico  $A$  para os perfis analisados.

	<b>A</b>
<b>Perfil Extremo Leste ± P3</b>	0,3
<b>Perfil Leste ± P7</b>	0,2
<b>Perfil Retaguarda ± P11</b>	0,2
<b>Perfil Oeste ± P15</b>	0,2
<b>Perfil extremo Oeste ± P19</b>	0,3

Conforme a tabela 5 foi possível perceber que os valores de  $A$  estão dentro do limite estipulado por Dean (1977) verificando-se, portanto, a relação entre a função média da praia e o perfil de equilíbrio. Este parâmetro tem sido empiricamente relacionado ao tamanho do grão da praia (MOORE, 1982) e a sua velocidade de queda (DEAN, 1977). Utilizando os valores do coeficiente  $A$  encontrados, foi possível calcular aproximadamente o diâmetro do sedimento que, neste trabalho, foi de 0,285 mm, caracterizado como areia média (ABNT, 1995). Os valores encontrados foram coerentes com os resultados encontrados por NEMES (2016) e com os resultados da granulometria de amostras coletadas posteriormente em 2017. A figura 14 mostra o

resultado destas amostras que foram coletadas de forma transversal ao longo de um perfil de praia na área de estudo, localizado á leste do afloramento rochoso, aproximadamente na localização do P7. Esta granulometria foi realizada pelos alunos da disciplina de Processos Litorâneos em parceria com o Laboratório de Dinâmica de Sedimentos Coesivos (LDSC), com o objetivo de realizar uma discretização espacial das características dos sedimentos ao longo do perfil de praia e suas diferentes feições.

	40 - 44	45 - 46	47	48	49
Tamanho médio	Areia grossa	Areia média	Areia grossa	Areia grossa	Areia grossa
Grau de Seleção	muito bem selecionado	muito bem selecionado	muito bem selecionado	bem selecionada	muito bem selecionado

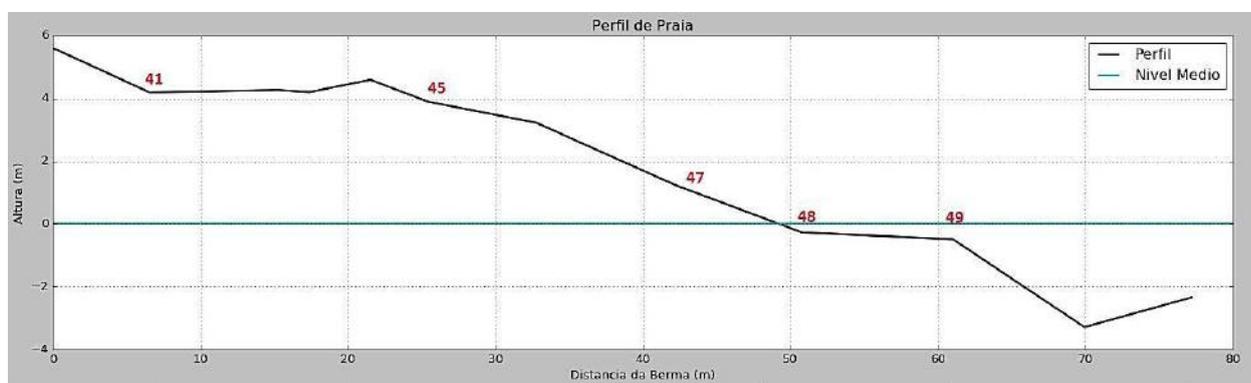


Figura 14 - Disposição das amostras coletadas ao longo do perfil e composição granulométrica para cada amostra analisada realizada por alunos da disciplina de processos litorâneos em parceria com o Laboratório de Dinâmica de Sedimentos Coesivos (LDSC).

De acordo com o tamanho médio dos sedimentos mostrado na figura 14, é possível observar que as amostras foram predominantemente compostas por areia grossa, com exceção da amostra 45 que é classificada como areia média. É interessante observar a relação das curvas granulométricas com a posição das amostras ao longo do perfil de praia. As amostras em ordem crescente (41 a 49) acompanham o sentido praia-mar estando as duas últimas em regiões submersas. Verificou-se um aumento na percentagem de grãos com granulometria mais grossa à medida que se aproxima da zona molhada. Isto indica que nesta zona há uma maior energia envolvida devido, principalmente, a quebra de ondas, o que favorece a permanência de sedimentos maiores e o transporte de sedimentos mais finos.

O segundo autovalor (segundo modo estatístico) foi o que apresentou a segunda maior variância (tabela 3 e 4). Este modo apresentou um pico (ponto de maior amplitude), o qual foi interpretado como a localização da feição de praia chamada berma, e um mínimo que foi interpretado como a localização dos bancos (ou também chamados de barras), indicando a sua relação com o movimento sazonal *onshore-offshore* de sedimento (WINANT *et al.*, 1975, DICK E DALRYMPLE, 1984, PRUSZAK, 1993).

Esses máximos apareceram na porção transversal (que vai de 0 a 140 m) entre aproximadamente 65 até 85 m, indicando que a berma nos diferentes perfis aparece nesse intervalo transversal à costa. Enquanto que os mínimos variaram entre 105 m e 115 m transversais à costa, indicando assim a porção transversal à costa onde estão dispostos os bancos submersos (figura 15).

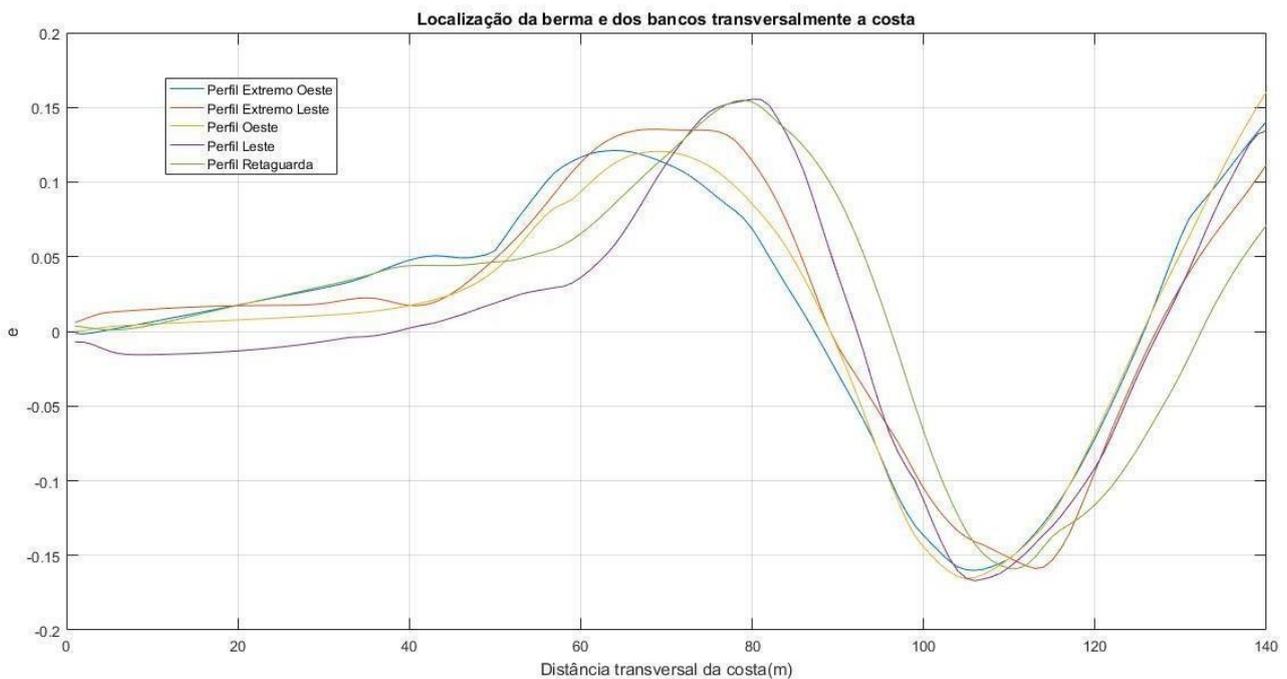


Figura 15. Máximos do segundo modo estatístico que representam a localização da berma e mínimos que representam a localização dos bancos de areia nos perfis de forma transversal à costa. O eixo y do gráfico representa o coeficiente espacial da segunda função (segundo modo estatístico) variando ao longo dos 140 m transversais (eixo x - comprimento dos perfis) durante a série temporal do estudo (variação espaço-tempo).

Foram observados alguns padrões. O Perfil Retaguarda tem pico similar ao Perfil Leste e, em relação a distância transversal à costa, indicou que a posição da berma

apareceu na porção mais ao largo. Os perfis da porção oeste da praia (Perfil Oeste e Perfil Extremo Oeste) e o Perfil Extremo Leste, têm comportamento bastante similares e estão dispostos, em relação a distância transversal à costa, menos ao largo do que os Perfis de Retaguarda e Leste. Contudo, nota-se que o Perfil Extremo Oeste é um mais curto dentro os 3. Isto pode se derivar do fato de que, naturalmente, a feição berma no perfil localizado na retaguarda do afloramento será mais protegida, e por existir uma pré-disposição a ocorrer maior erosão na porção oeste da praia, em decorrência da incidência dos raios de ondas que em algumas épocas do ano entram oblíquos a costa, a feição berma nos perfis da porção oeste estão mais expostas susceptíveis à ação das ondas.

Em relação aos mínimos, que caracterizam a posição dos bancos de areia submersos, houve pouca variação em relação à localização destas feições transversalmente à costa (de 105 m até 115 m).

O terceiro autovalor (terceiro modo estatístico) foi o que apresentou a terceira maior variância (tabela 3 e 4), e mostra um máximo na localização do terraço de maré baixa (zona entre marés). Estes máximos apareceram na porção transversal que vai de aproximadamente 70 até 100 m (figura 16).

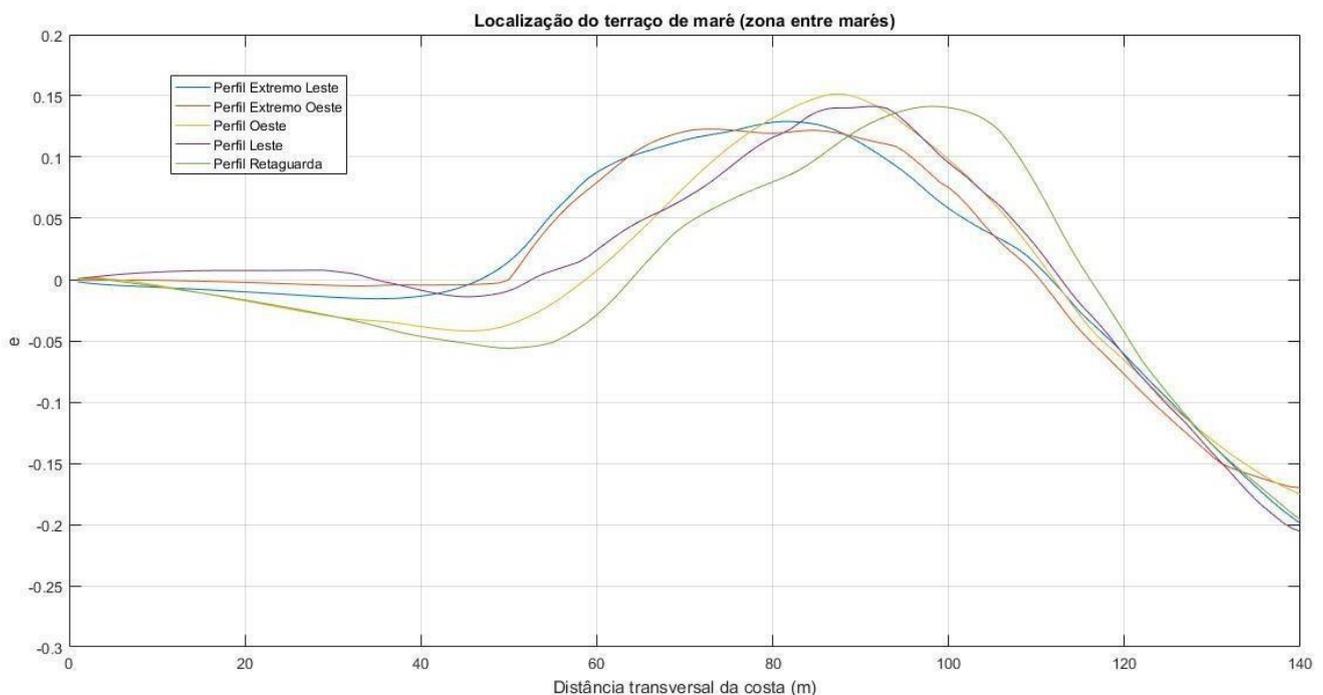


Figura 16. Máximos do terceiro modo estatístico que representam a localização do terraço de maré baixa nos perfis de forma transversal à costa. O eixo y do gráfico representa o coeficiente espacial da terceira função (terceiro modo estatístico) variando

ao longo dos 140 m transversais (eixo x - comprimento dos perfis) durante a série temporal do estudo (variação espaço-tempo).

Na análise separada de cada perfil, a figura 17 mostra barras verticais azuis que estão indicando os valores máximos do segundo modo estatístico, em outras palavras, estão indicando a localização da berma transversalmente á costa. Já as barras verticais vermelhas, estão indicando a posição onde aparece o valor máximo do terceiro modo estatístico, ou seja, a localização do terraço de maré.

Foi possível observar que estas funções apresentaram um comportamento progressivo a partir do perfil mais a leste até o perfil de retaguarda, e depois um comportamento regressivo do perfil de retaguarda até o perfil mais a oeste da praia. No Perfil Extremo Leste a berma apareceu em torno dos 70 m no perfil, e o terraço por volta dos 90 m. Em seguida, no Perfil Leste, a berma apareceu nos quase 80 m e o terraço aproximadamente aos 90 m. No Perfil Retaguarda, foi o ponto em que as feições apareceram mais externas à costa em direção ao mar, a berma apareceu na porção de um pouco mais que 80 m e o terraço por volta de 100 m. A partir do Perfil Oeste, a localização das feições começa a regredir transversalmente, tendo a berma aparecendo por volta dos 70 m e o terraço em torno de 85 m. Por fim, no Perfil Extremo Oeste, a berma apareceu por volta dos 65 m e o terraço um pouco mais que 80 m de distância.

Esta disposição das feições pode evidenciar a influência do afloramento rochoso submerso na morfologia da praia, mostrando que quanto mais próximo ao perfil localizado na retaguarda da estrutura submersa, mais ao largo estão dispostas as feições e, portanto, demonstrando que nesta porção da praia pode haver maior quantidade de sedimento acumulado.

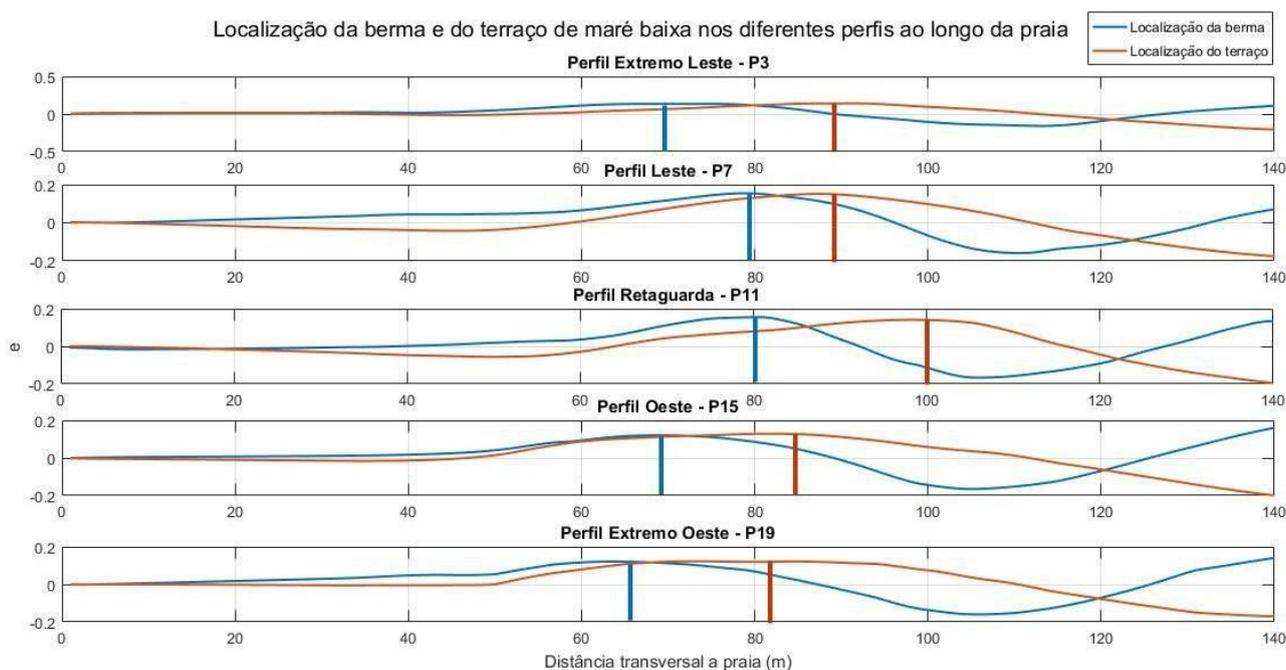


Figura 17. Análise da localização da berma e do terraço de maré realizada separadamente para cada perfil. As barras verticais azuis estão indicando os valores máximos da função barra-berma e as barras verticais vermelhas estão indicando os valores máximos da função terraço. O eixo y do gráfico representa o coeficiente espacial da segunda e terceira função (segundo e terceiro modo estatístico) variando ao longo dos 140 m transversais (eixo x - comprimento dos perfis) durante a série temporal do estudo (variação espaço-tempo).

Nota-se que em todos os perfis os bancos aparecem paralelamente mais ao largo do que o terraço, que por sua vez, aparece mais ao largo do que a berma. Na porção transversal que está sendo estudada, que vai de 0 a 140 m, os bancos apareceram entre 105 m e 115 m, o terraço se estende desde 70 m até 100 m, e a berma entre 65 até 85. Sabe-se que a ordem das 3 feições dispostas no perfil transversal (em direção ao largo) aparece primeiramente a berma, em seguida o terraço (zona entre marés) e, posteriormente, os bancos submersos (SOUZA *et al.*, 2005).

Levando em consideração o nível da água no perfil médio (Figura 13), a partir de aproximadamente 108 m do perfil transversal começa a zona submersa da praia. Foi possível perceber que a berma se encontrou na porção emersa da praia (65 até 85m), e os bancos na porção submersa da praia (105 m até 115 m). Em relação ao terraço, que apresentou uma localização mais ampla (de 70 a 100 m), este pode aparecer tanto emerso quanto submerso, pois está localizado na zona entre marés. Na figura 12, que

mostra a variação da forma do perfil em todas as campanhas, pode-se perceber que em algumas campanhas a zona submersa começou antes dos 108 m do perfil transversal (aproximadamente em 80 m) e que, portanto, o terraço de maré aparece tanto submerso como emerso em determinados momentos.

Portanto, a partir da relação encontrada entre estes padrões com a morfologia da região foi possível obter uma interpretação física dos coeficientes espaciais extraídos por meio da EOF referentes aos três primeiros modos estatísticos. Como demonstrado, o primeiro modo foi equiparado ao perfil de equilíbrio de Dean, comprovando que a esta função representa o perfil médio (média de todos os perfis ao longo da série temporal) da praia está correta. O segundo mostrou a posição da berma no perfil e o terceiro mostrou a localização do terraço de maré baixa. Comparando a localização encontrada neste estudo com o que foi descrito na literatura e por meio de observações e medições empíricas da área de estudo, também pode-se afirmar que a interpretação física deste resultado está coerente com a realidade.

Diante disto, pode-se afirmar que a partir da análise dos coeficientes espaciais da EOF foi possível se obter uma caracterização transversal dos cenários de forma satisfatória, conseguindo identificar a forma do perfil médio e a localização espacial das feições morfológicas transversais à linha de costa.

As autofunções de ordem superior (o restante dos modos estatísticos) representam uma porcentagem muito pequena da variância da configuração do perfil, portanto, foram desprezadas.

### **6.1.2. Análise espacial longitudinal à costa**

O pico da função barra-berma, ou seja, os máximos do coeficiente espacial da segunda função (segundo modo estatístico) representam a localização da berma no perfil transversal (WINANT et al., 1975). De posse desta informação, foram plotados os maiores valores desta função em cada um dos perfis ao longo de toda extensão da área referente a toda série temporal do estudo (variação espaço-tempo). Dessa maneira foi possível perceber um padrão na posição da berma paralelamente à costa, como mostra a figura 18.

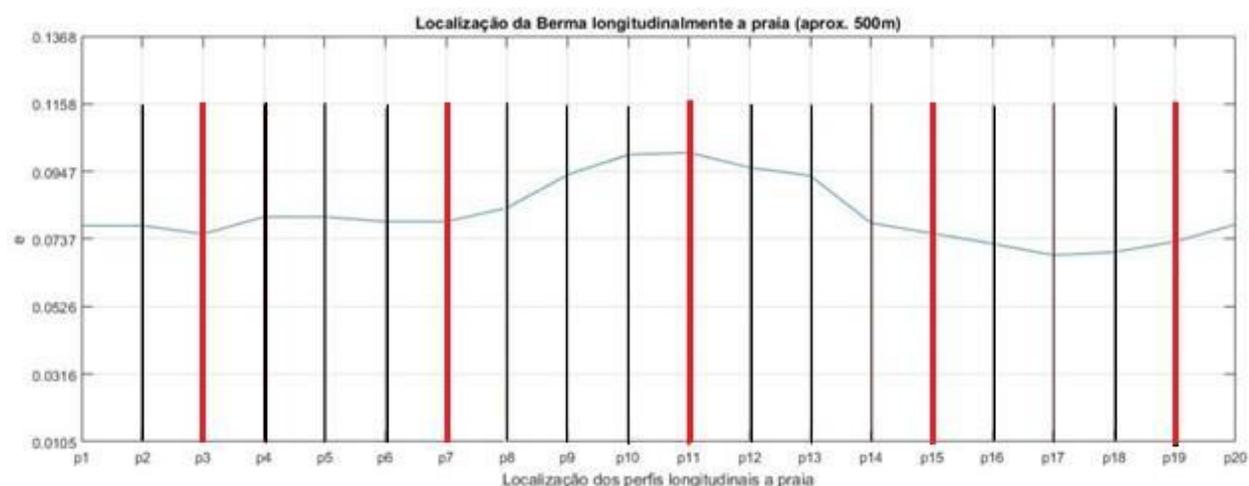


Figura 18. Máximos do coeficiente espacial da segunda função (segundo modo estatístico) variando ao longo dos 500 m longitudinais para cada um dos perfis analisados durante a série temporal do estudo (variação espaço-tempo), representando assim a posição da berma ao longo da costa.

Percebe-se que aparece uma saliência entre o Perfil 8 (P8) e o Perfil 14 (P14) na forma longitudinal da praia, a qual apresenta um ápice posicionado no Perfil 11 (P11), que se encontra posicionado exatamente na retaguarda do afloramento rochoso submerso, e vai sendo suavizada gradativamente ao se afastar deste perfil tanto para Leste quanto para Oeste.

Os 5 perfis que aparecem em vermelho na figura 17 (P3, P7, P11, P15, P19) foram plotados em um gráfico 3D, onde o eixo z do gráfico representa o coeficiente espacial da segunda função (segundo modo estatístico), o eixo y representa a porção transversal que corresponde ao pico da função barra-berma (aproximadamente entre 50 a 100 m), ou seja, onde está localizada a berma, e o eixo x a localização dos 5 perfis longitudinais á praia (figura 19).

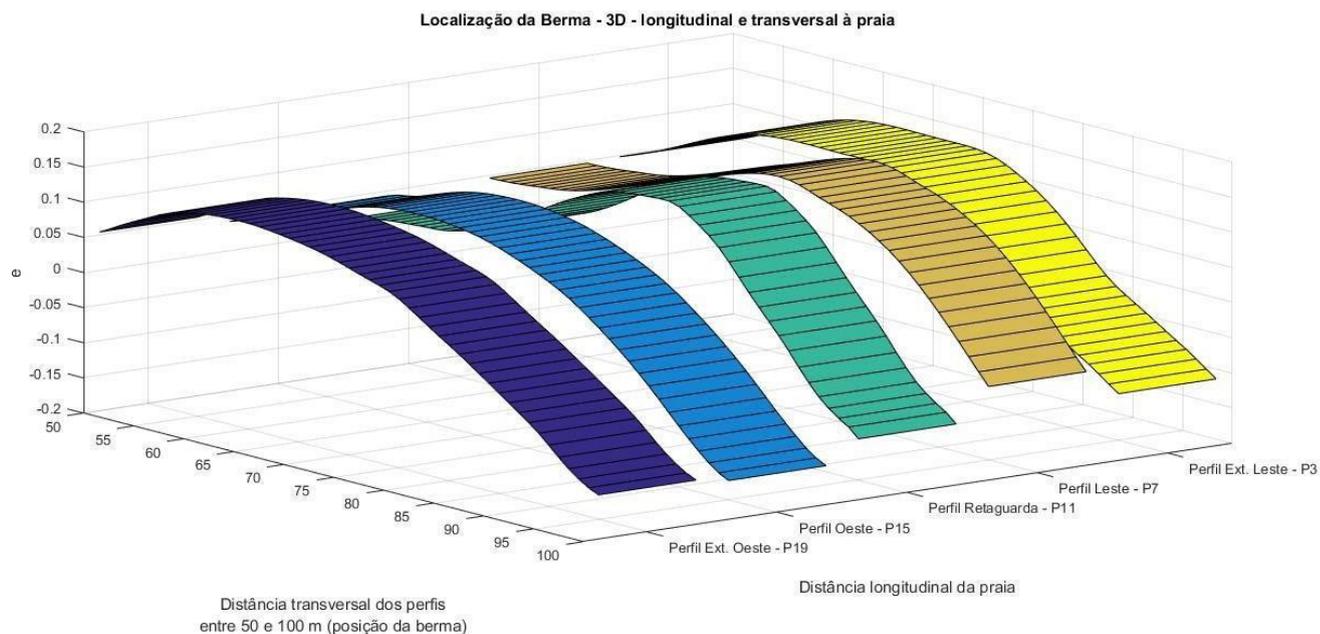


Figura 19. Gráfico 3D da localização da berma onde o eixo z do gráfico representa o coeficiente espacial da segunda função (segundo modo estatístico), o eixo y representa a porção transversal que corresponde ao pico da função barra-berma (aproximadamente entre 50 a 100 m), ou seja, onde está localizada a berma, e o eixo x a localização dos 5 perfis longitudinais à praia.

No gráfico 3D foi possível identificar com nitidez a saliência que aparece junto ao perfil localizado na retaguarda do afloramento rochoso. Ainda, foi possível estimar o tamanho da porção longitudinal onde aparece a saliência. Sabendo que a distância longitudinal entre cada perfil é de 25 m e que a partir do P8 até o P14 (zona que aparece a saliência) existem 6 perfis, o comprimento desta zona foi estimado em 150 m.

Segundo NEMES (2016), a vulnerabilidade da linha de costa com uma estrutura submersa no sistema é definida pelo modo de formação do sistema de vetores de quebra de ondas sobre feições costeiras submersas. A incidência dos raios de ondas normal ( $\pm 5^\circ$ ) ou oblíqua ( $> 10^\circ$ ) sobre estrutura submersa na praia é o mecanismo que estabelece, deforma ou erode uma feição arenosa deposicional a sotamar de um banco rochoso, por exemplo.

Embora a erosão e acreção seja um processo que faz parte do ciclo natural retroalimentado de praias arenosas, algumas épocas esses processos aparecem de forma mais acentuada no litoral. As imagens de satélite históricas demonstraram que pode haver erosão na região da praia localizada na retaguarda do afloramento, que seria a

zona supostamente “protegida”, pois a energia das ondas seria dispersa pelo afloramento (NEMES, 2016), aparecendo uma acreção de sedimento nessa mesma região.

A saliência que aparece a sotamar do banco rochoso é um indício que está ocorrendo algum processo costeiro relacionado com a feição submersa e a hidrodinâmica gerada pelas ondas. O resultado desta análise reforça que o afloramento rochoso influencia na forma da praia, visto que esta saliência representa um padrão encontrado durante toda a série temporal do estudo, isto é, mesmo que ocorram períodos de erosão ou de acreção, existe um padrão de sedimento que se acumula na porção da praia localizada na retaguarda do afloramento em decorrência dos diferentes tipos de ondas que entram na costa (figura 20).



Figura 20. Imagens históricas da área de estudo mostrando a variação na linha de costa e a presença da saliência em diferentes períodos.

## 6.2 Variação da linha de costa

### 6.2.1. Variação da linha de costa através da ferramenta de imagens históricas do Google Earth Pro

A Tabela 6 dispõe da variação das distâncias entre a pista de asfalto (ponto fixo) e a linha de costa (ponto variável) para cada perfil, as datas das imagens históricas, extraídas do Google Earth Pro e as datas correspondentes das campanhas topográficas realizadas em campo.

Tabela 6. Datas das campanhas topográficas, datas correspondentes das imagens extraídas do Google Earth Pro e as distâncias transversais entre a pista de asfalto e a linha de costa nos 5 perfis para todas as datas.

Datas das campanhas topográficas	Datas das imagens Google Earth Pro	Distâncias(m) P3	Distâncias(m) P7	Distâncias(m) P11	Distâncias(m) P15	Distâncias(m) P19
28/04/2015	17/04/2015	56	73	90	45	48
25/05/2015	-	-	-	-	-	-
08/06/2015	04/06/2015	71	64	64	76	63
10/07/2015	15/07/2015	61	63	69	66	46
20/07/2015	-	-	-	-	-	-
29/07/2015	31/07/2015	58	71	82	60	50
05/08/2015	-	-	-	-	-	-
14/08/2015	16/08/2015	42	48	47	46	36
31/08/2015	22/08/2015	63	52	57	57	47
10/09/2015	17/09/2015	53	45	70	50	48
16/09/2015	22/09/2015	45	45	62	55	45
14/10/2015	15/10/2015	61	66	62	60	55
21/10/2015	-	-	-	-	-	-
11/11/2015	18/11/2015	55	65	50	56	52
20/11/2015	27/11/2015	65	71	67	67	61
14/12/2015	14/12/2015	69	66	59	62	57
21/12/2015	22/12/2015	70	67	62	63	62
13/01/2016	08/01/2016	64	63	65	58	60
28/01/2016	01/02/2016	57	54	66	60	61

Além da tabela, estão em anexo as imagens extraídas do Google Earth Pro com as respectivas datas (Anexos I).

Na figura 21 estão dispostas a média das distâncias e o desvio padrão para cada um dos perfis. O perfil Extremo Leste contou com a menor variação da distância, apresentando uma média no valor de aproximadamente 52 m. Já O perfil Leste e Perfil Extremo Oeste, variaram praticamente o mesmo, contando com uma média de 60 m. E, finalmente, os perfis Oeste e de Retaguarda foram os que apresentaram maior variação, aproximadamente 65 m.

Nota-se que há uma assimetria, onde a porção leste da praia variou menos em relação à porção oeste. Isto pode evidenciar que a região na retaguarda do afloramento rochoso e a porção oeste da praia estão sendo mais afetadas pelos raios de onda incidentes (figuras 3 e 4), isto é, a energia das ondas que chega nestas zonas da praia pode ser maior e, conseqüentemente, há mais variação da costa (NEMES,2016). O desvio padrão nestas zonas também foi maior indicando, portando, que os valores das distâncias variaram mais afastados da média, isto é, nestas regiões tanto a acreção quanto a erosão são maiores.

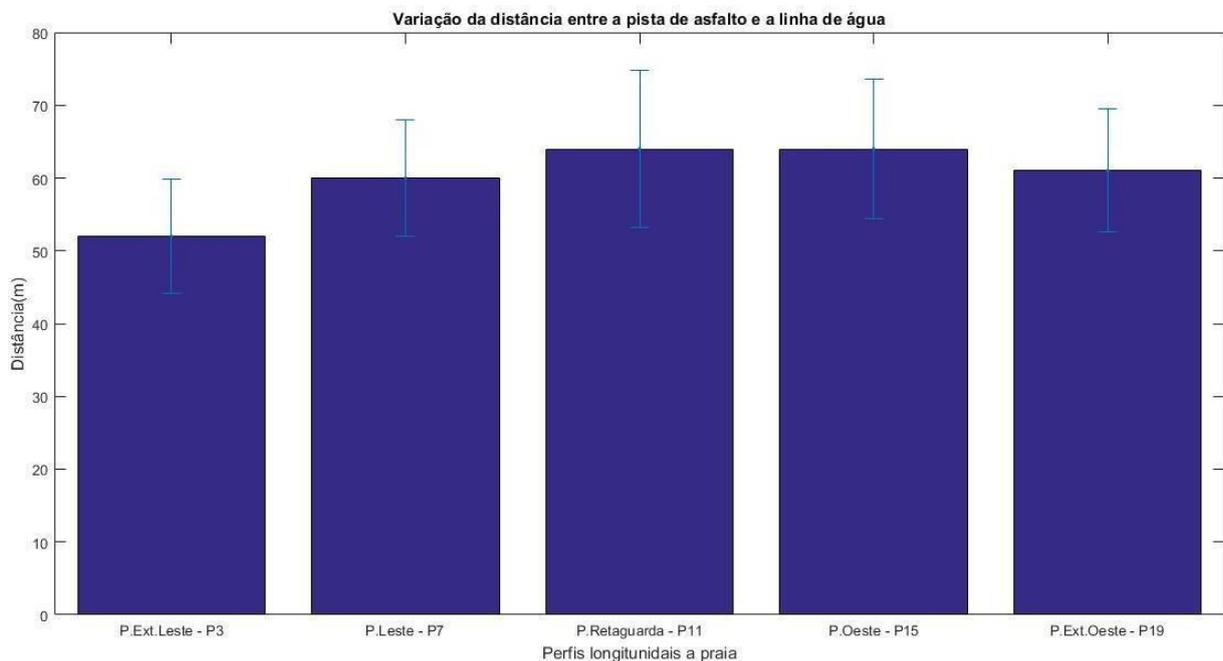
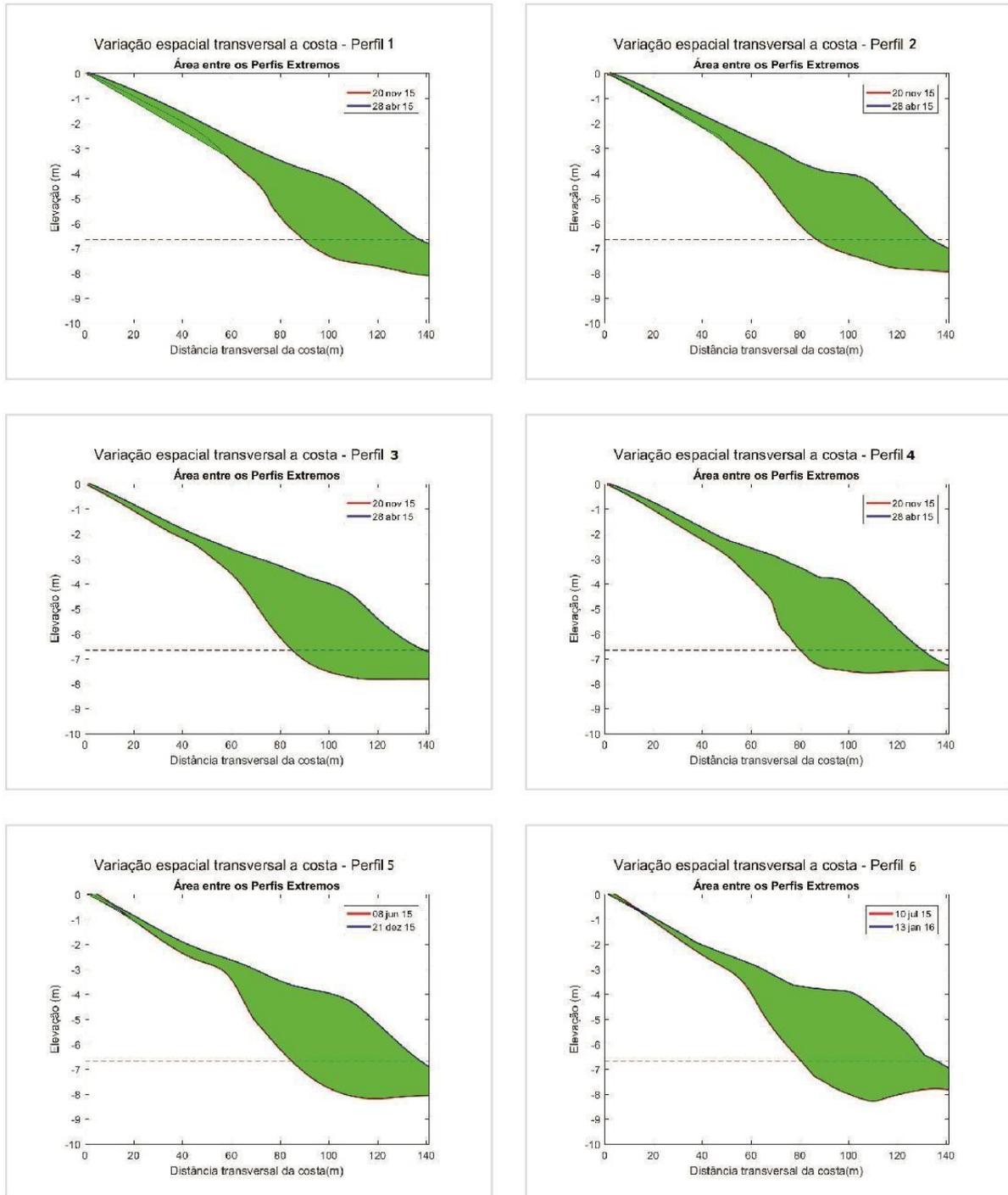


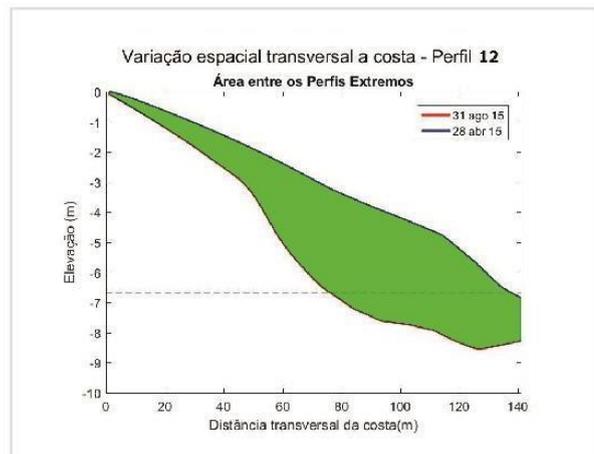
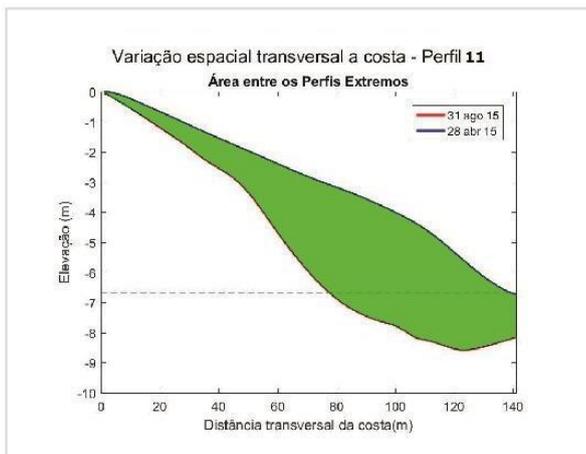
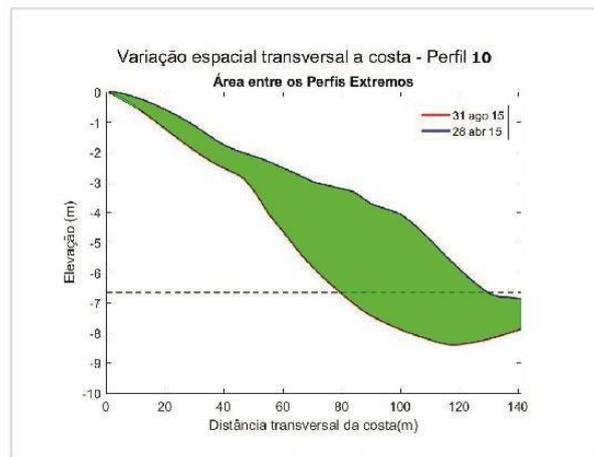
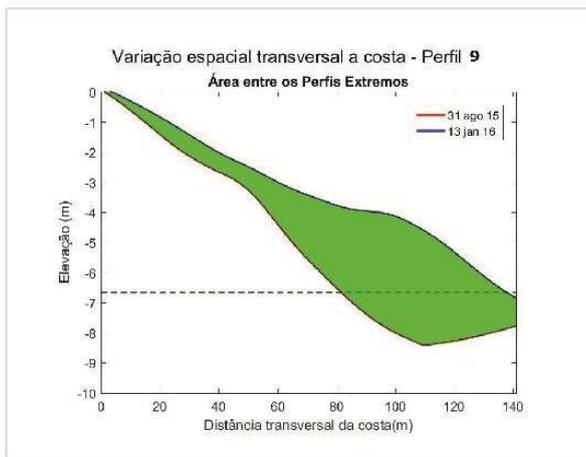
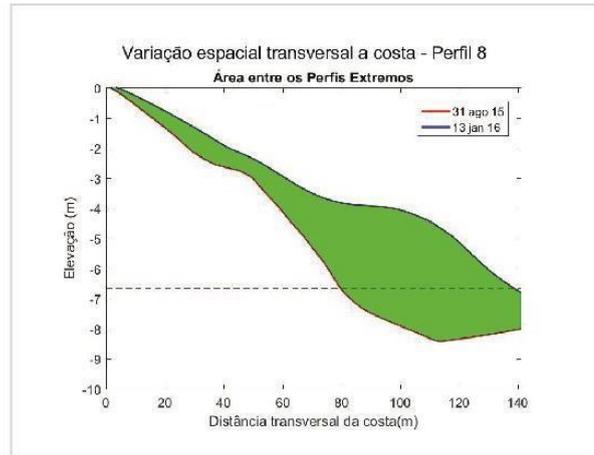
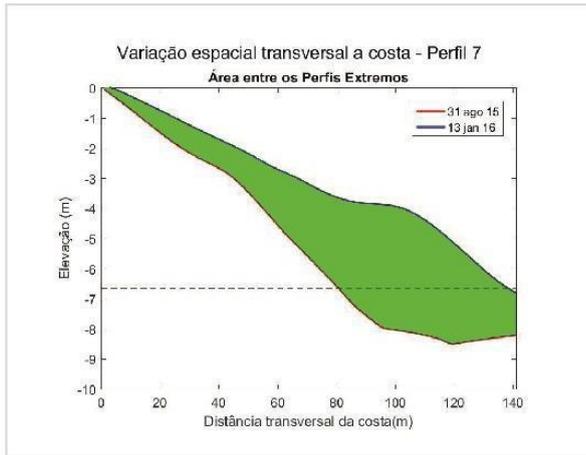
Figura 21. Média e o desvio padrão da variação das distâncias transversais entre a pista de asfalto e a linha de costa para cada um dos perfis longitudinais à praia.

### 6.2.2. Análise da mobilidade de sedimento

Outro resultado importante foi a análise de dois perfis extremos. Observa-se que dentre todos os perfis de toda a série temporal do estudo, existe um perfil mais erodido do período, indicando a possível existência de um banco submerso decorrente da areia “retirada” da praia, como também, existe um perfil de maior acreção, evidenciando dessa vez uma cava submersa e a reconstituição do perfil pelo transporte

de sedimento que estava formando o banco. A figura 22 exibe as áreas correspondentes entre estes perfis extremos, para cada um dos perfis ao longo da área de estudo (do P1 ao P20).





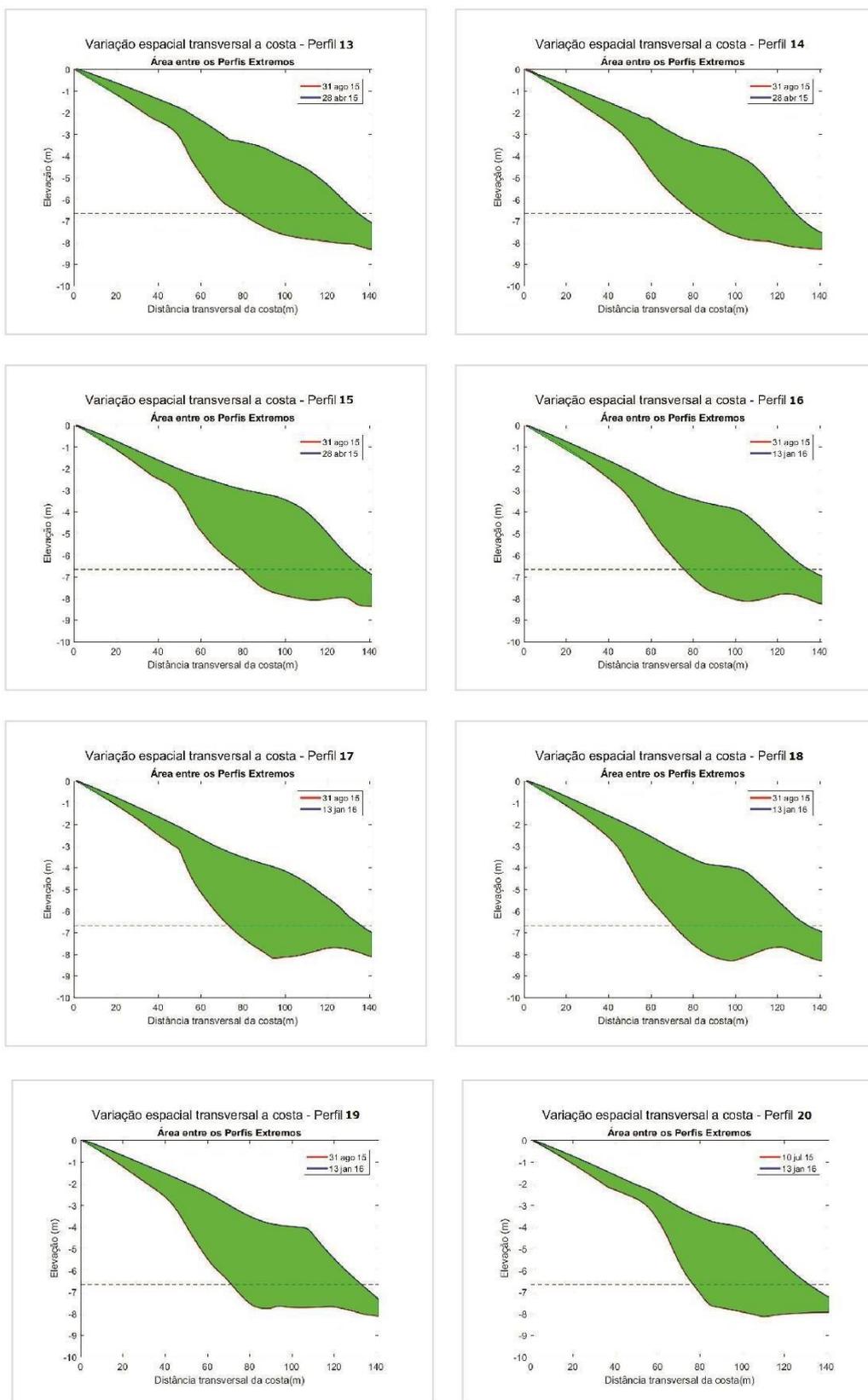


Figura 22. Áreas compreendidas pela diferença entre o perfil mais acrescido e mais erodido para os perfis analisados no estudo.

A partir do cálculo da área entre estes perfis extremos, foi possível estimar o a mobilidade de sedimento de cada perfil ao longo da área de estudo, somando todas as campanhas. A figura 23 mostra um histograma referente à estimativa do volume de sedimento que é transportado transversalmente à costa em cada porção longitudinal numa escala anual (série temporal do estudo).

Pode-se perceber que a porção leste de praia (do P1 até o P10) apresentou menores volumes, em outras palavras, a mobilidade desta porção da praia foi menor do que na porção oeste (do P12 ao P20), que contou com a maior mobilidade de sedimento. Este resultado ainda é mais significativo comparando com o resultado anterior (variação da linha de costa através da ferramenta de imagens históricas do Google Earth Pro), em que a porção leste também contou com uma variação menor de distância, isto é, houve menor erosão e, portanto, um menor volume de sedimento sendo transportado. A porção oeste da praia representou 57,93% do volume de sedimento e a porção leste representou 42,07%, isto é, a porção oeste apresentou 15,86% mais mobilidade de volume do que a porção leste.

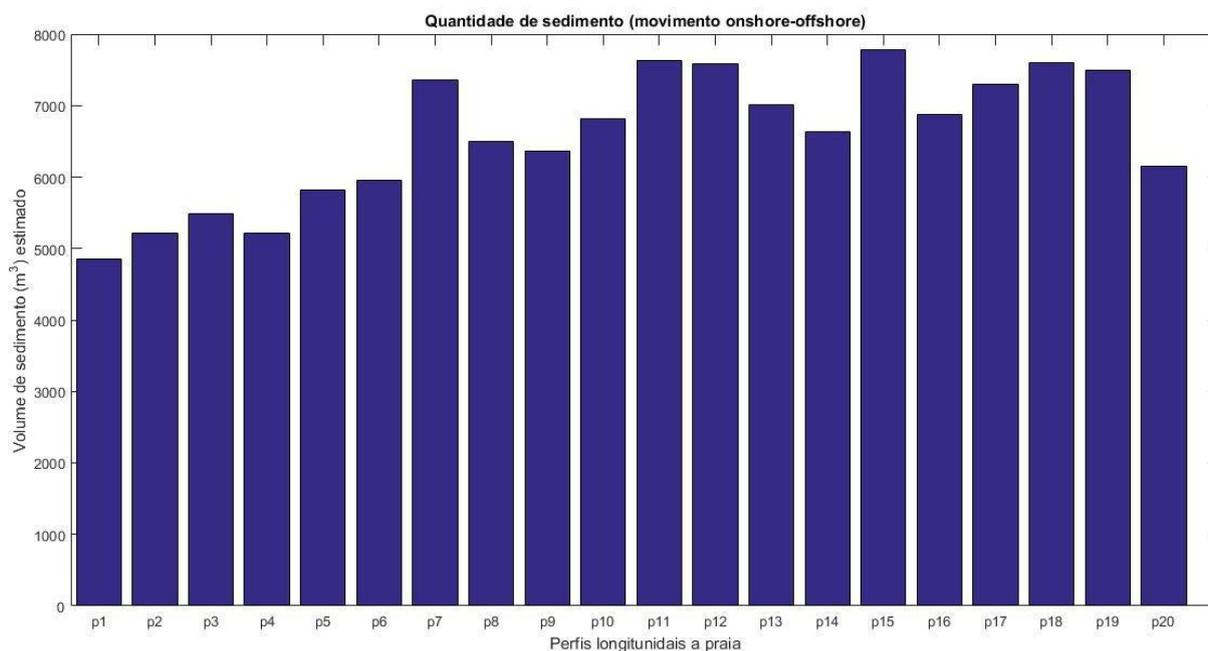


Figura 23. Histograma referente a estimativa de mobilidade de sedimento para cada perfil ao longo da área de estudo, somando todas as campanhas.

Afim de tornar estes resultados mais robustos, a figura 24 mostra o resultado dos dados de reanálise extraídos do ERA-Interim dataset com resolução de três horas,

referentes à direção média das ondas que incidiram na praia da Reserva entre janeiro de 2015 até janeiro de 2016.

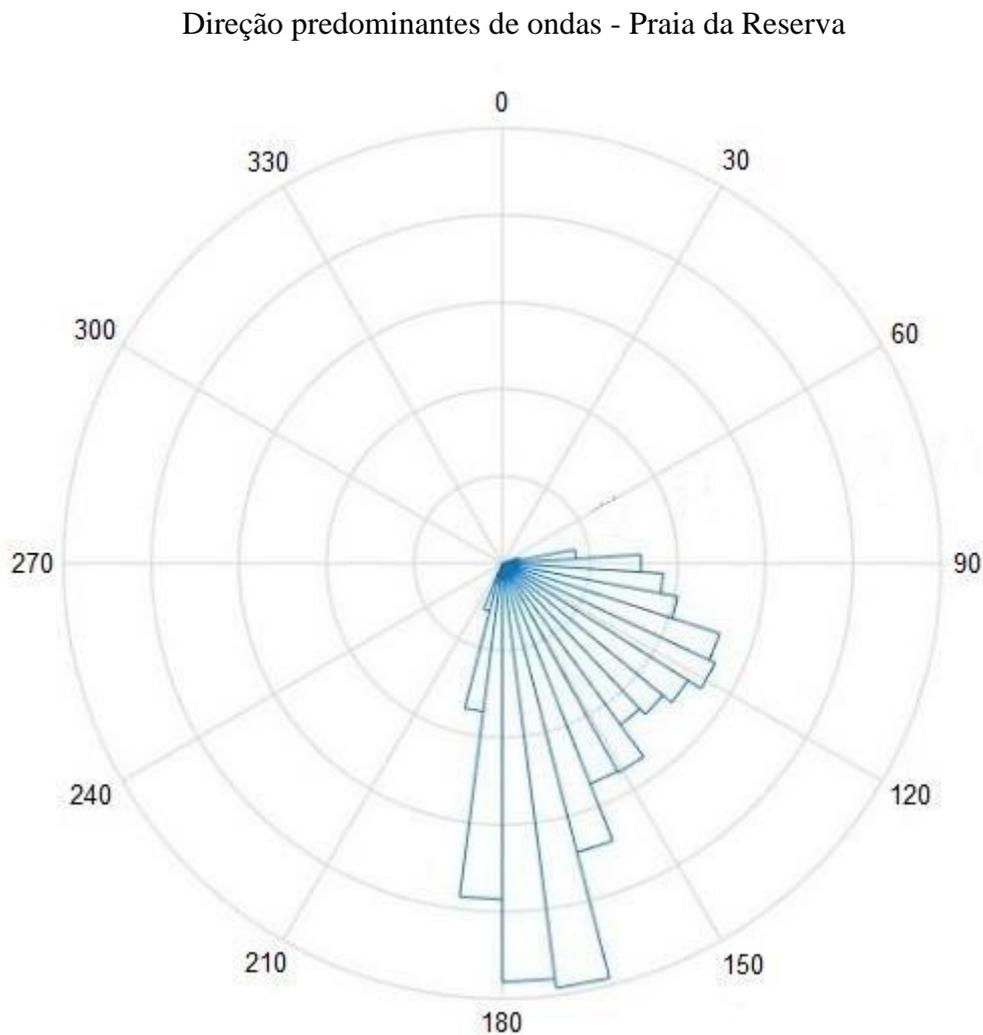


Figura 24. Direção predominante das ondas do quadrante sul e sudeste que incidiram na praia da Reserva entre janeiro de 2015 até janeiro de 2016 (dados de reanálise extraídos do ERA-Interim dataset referentes à direção média das ondas).

Foi possível perceber que há predominância de ondas de Sul (S) e, principalmente, Sudeste (SE). Por conta da orientação geográfica da praia, ondas vindas de Sul tendem a entrar normais à linha de costa. A presença da estrutura submersa causa a formação de vetores de quebra de ondas como a que foi demonstrada na figura 3 deste trabalho, onde provavelmente está havendo acúmulo de sedimento a sotamar da estrutura e erosão na região em que os vetores encontram a costa (lado oeste e leste da estrutura submersa). Já ondas de SE tendem a entrar oblíquas à linha de costa, causando

a migração dos vetores de quebra de onda para o lado oeste da praia e, portanto, maior influência nas modificações morfodinâmicas neste lado da praia (figura 4). Assim, o resultado da análise da direção média das ondas indicou uma predominância de ondas do quadrante Sudeste (de 90° a 180°) dando maior robustez aos resultados das figuras 22 e 23 que apontam uma maior variação morfodinâmica no lado oeste da área de estudo.

### 6.3. Análise temporal das Funções Ortogonais Empíricas (EOF)

Em relação ao coeficiente temporal da função terraço (terceiro modo estatístico), não foi observada nenhuma forte periodicidade (figura 25).

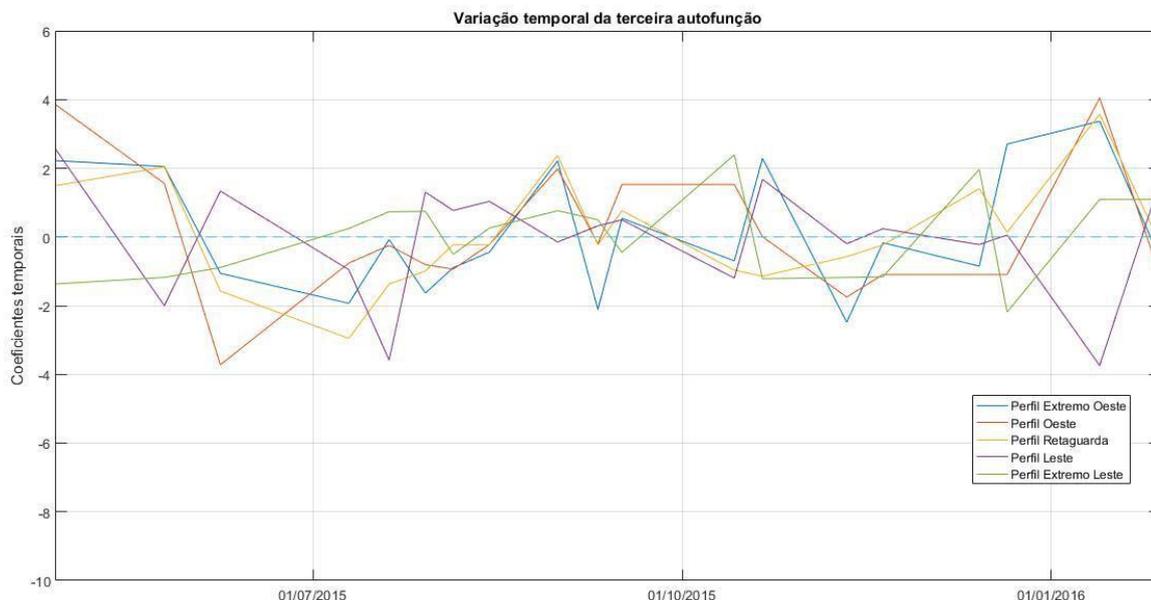


Figura 25. Coeficientes temporais da terceira autofunção durante a série temporal deste estudo, referente aos cinco perfis (Extremo Leste, Leste, Retaguarda, Oeste e Extremo Oeste).

A variação dessa função pode ocorrer em escalas de tempo menores, por exemplo, na ordem de dias, o que implica que dependendo do caso, a amostragem mensal pode não ser satisfatória para caracterizar essa função. Uma vez que a terceira autofunção é responsável por uma porcentagem tão pequena da variância total, descreve desvios mais fracos da média, então as configurações e os coeficientes correspondentes podem ser, em geral, menos consistentes ao longo da praia do que as configurações das segundas funções (DICK E DALRYMPLE, 1984). Isto pode ser explicado pela pouca influência da maré, visto que um litoral de micromaré exhibe baixas variações de

amplitudes.

Através da análise dos coeficientes temporais da segunda autofunção, foi possível encontrar um padrão morfológico relacionado aos eventos de erosão e acreção. Conforme o gráfico em que foram plotados os coeficientes temporais da segunda autofunção, (coeficientes temporais variando em todas as campanhas ao longo do tempo) nos 5 perfis (Extremo Leste, Leste, Retaguarda, Oeste, Extremo Oeste), pode-se perceber que os coeficientes apresentaram valores positivos (acima da linha do zero) nas datas em que houve acreção, representando o transporte de sedimento para o nível da berma, e nas datas em que houve erosão, essa função apresentou valores negativos (abaixo da linha do zero), indicando o transporte de sedimento para o nível dos bancos. Além dos coeficientes temporais, também foram plotados no gráfico, as cotas das campanhas que apresentaram as maiores acreções e maiores erosões durante o período, conforme as figuras 26, 27, 28, 29 e 30.

A figura 26 apresenta o resultado da análise temporal do Perfil Extremo Leste (P3). As datas em que houve maior acumulo de sedimento neste perfil foram nos dias 28/04/15, 10/07/15 e 21/12/15, já as datas registradas para os períodos com maior erosão foram dias 08/06/15, 11/11/15 e 20/11/16.

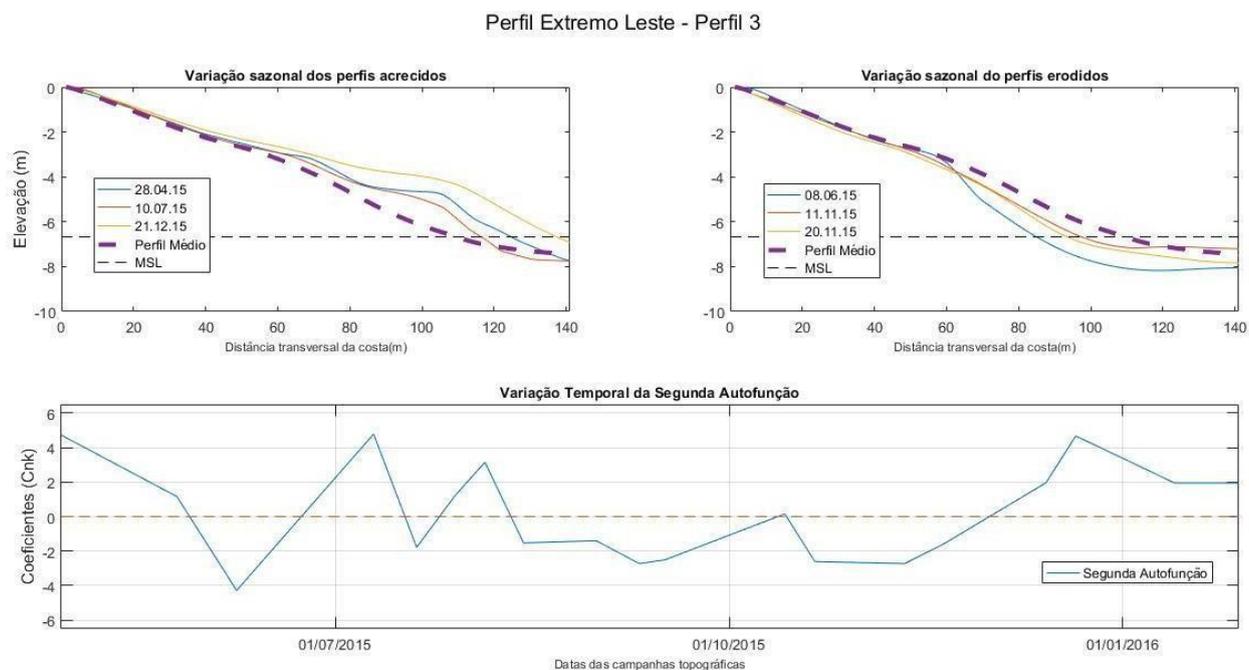


Figura 26. Análise temporal do Perfil localizado no Extremo Leste da posição do afloramento rochoso submerso. O coeficiente temporal da segunda autofunção apresentou valores positivos (acima da linha do zero) nas datas em que houve acreção, representando o transporte de sedimento para o nível da berma. Já nas datas em que

houve erosão, essa função apresentou valores negativos, indicando o transporte de sedimento para o nível dos bancos.

O mesmo foi feito para o restante dos perfis. A figura 27 apresenta o resultado da análise temporal do Perfil Leste (P7). Para este perfil, as datas com maior acúmulo de sedimento foram nos dias 28/04/15, 25/10/15 e 13/01/16, e as datas registradas para os períodos com maior erosão foram dias 31/08/15, 14/10/15 e 14/12/15.

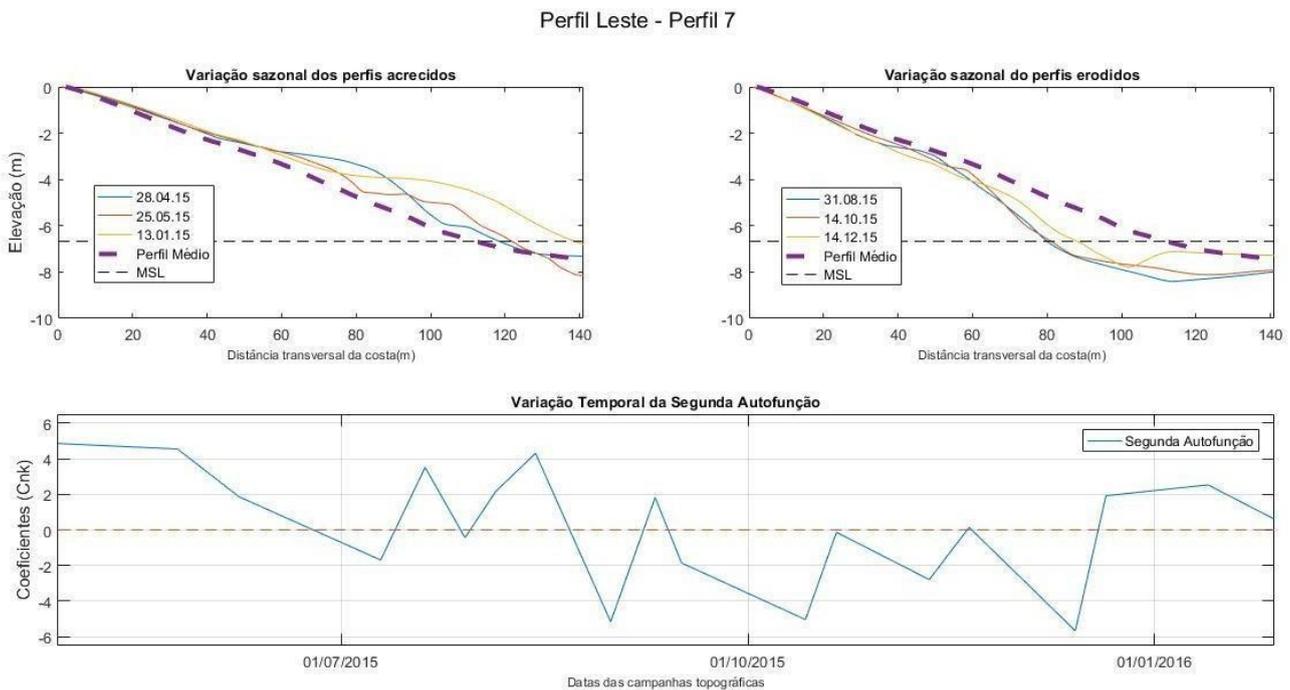


Figura 27. Análise temporal do Perfil localizado a Leste da posição do afloramento rochoso submerso. O coeficiente temporal da segunda autofunção apresentou valores positivos (acima da linha do zero) nas datas em que houve acreção, representando o transporte de sedimento para o nível da berma. Já nas datas em que houve erosão, essa função apresentou valores negativos, indicando o transporte de sedimento para o nível dos bancos.

A figura 28 exhibe o resultado da análise temporal do Perfil Retaguarda (P11). Para este perfil, as datas com maior acúmulo de sedimento foram nos dias 28/04/15, 25/10/15 e 28/01/16, e as datas registradas para os períodos com maior erosão foram dias 31/08/15, 20/11/15 e 14/12/15.

### Perfil Retaguarda - Perfil 11

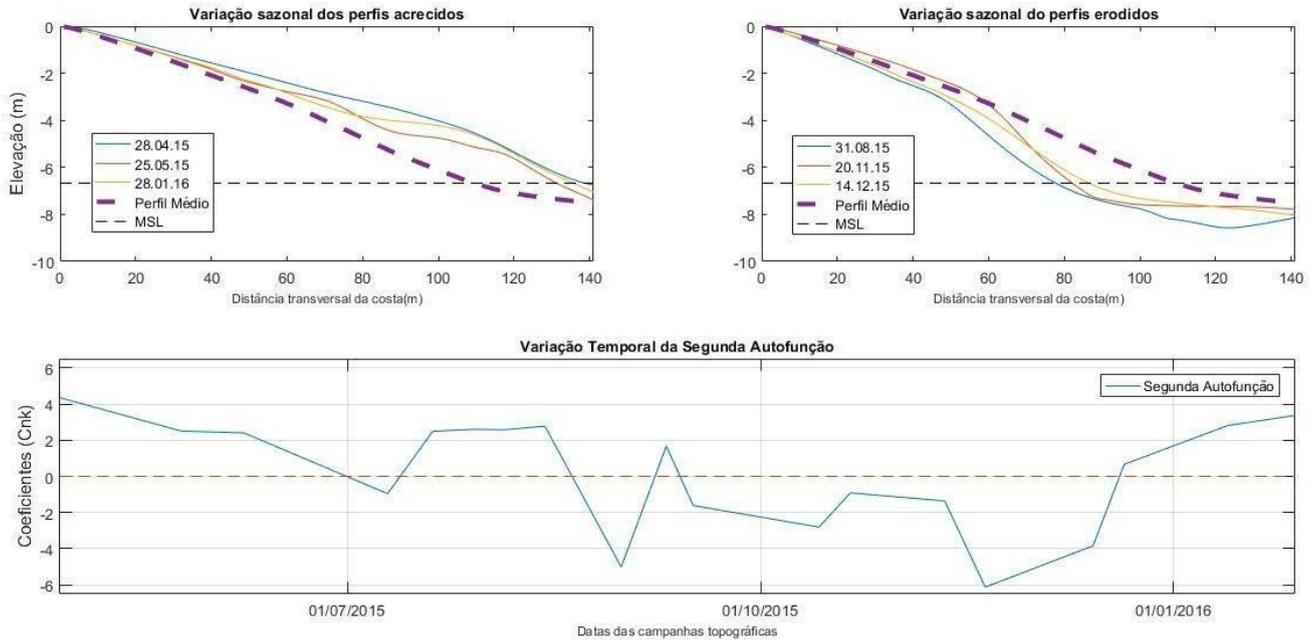


Figura 28. Análise temporal do Perfil localizado na Retaguarda do afloramento rochoso submerso. O coeficiente temporal da segunda autofunção apresentou valores positivos (acima da linha do zero) nas datas em que houve acreção, representando o transporte de sedimento para o nível da berma. Já nas datas em que houve erosão, essa função apresentou valores negativos, indicando o transporte de sedimento para o nível dos bancos.

A figura 29 é referente ao o resultado da análise temporal do Perfil Oeste (P15). Para este perfil, as datas com maior acúmulo de sedimento foram nos dias 28/04/15, 25/10/15 e 13/01/16, e as datas registradas para os períodos com maior erosão foram dias 31/08/15, 16/09/15 e 14/12/15.

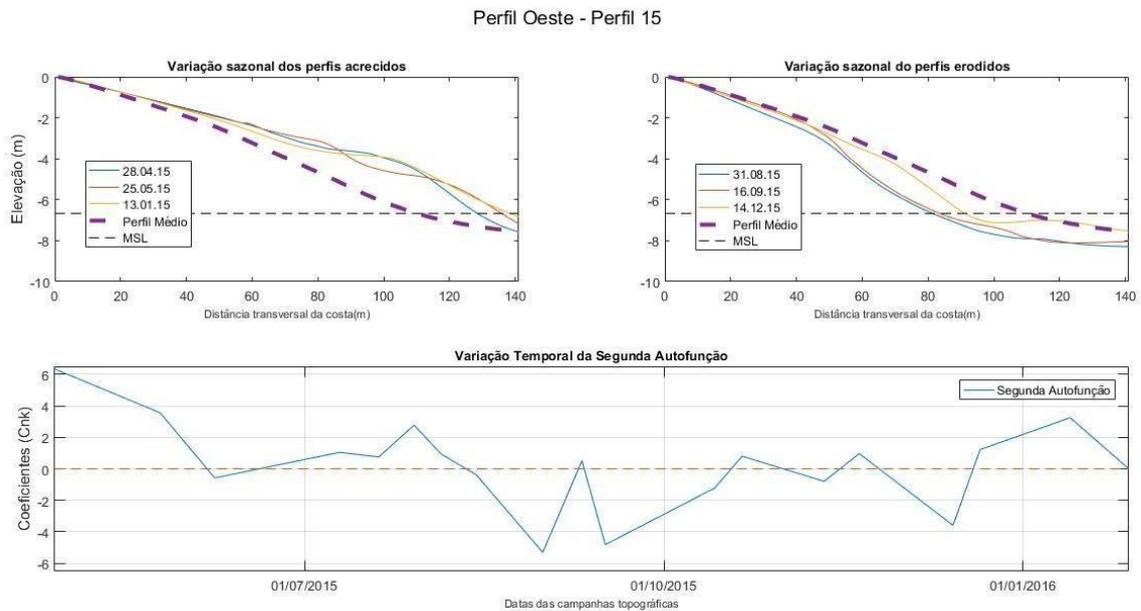


Figura 29. Análise temporal do Perfil localizado a Oeste da posição do afloramento rochoso submerso. O coeficiente temporal da segunda autofunção apresentou valores positivos (acima da linha do zero) nas datas em que houve acreção, representando o transporte de sedimento para o nível da berma. Já nas datas em que houve erosão, essa função apresentou valores negativos, indicando o transporte de sedimento para o nível dos bancos.

A figura 30 é referente ao o resultado da análise temporal do Perfil Extremo Oeste (P19). Para este perfil, as datas com maior acúmulo de sedimento foram nos dias 28/04/15, 25/10/15 e 13/01/16, e as datas registradas para os períodos com maior erosão foram dias 31/08/15, 16/09/15 e 14/12/15.

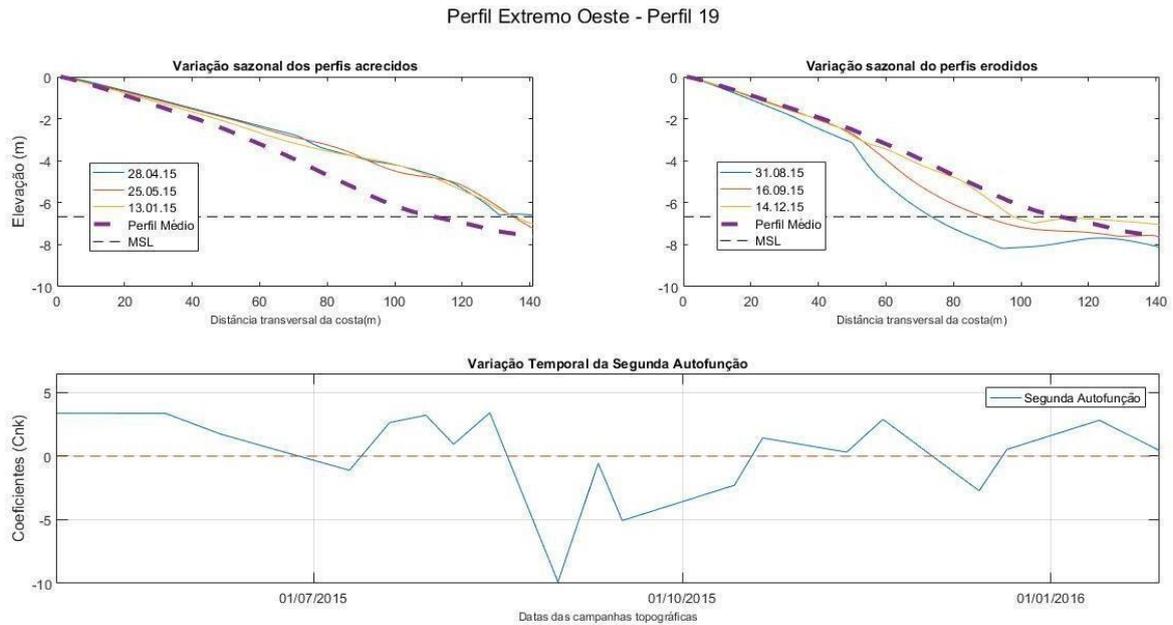


Figura 30. Análise temporal do Perfil localizado no Extremo Oeste da posição do afloramento rochoso submerso. O coeficiente temporal da segunda autofunção apresentou valores positivos (acima da linha do zero) nas datas em que houve acreção, representando o transporte de sedimento para o nível da berma. Já nas datas em que houve erosão, essa função apresentou valores negativos, indicando o transporte de sedimento para o nível dos bancos.

Os coeficientes para a segunda autofunção foram consistentes para os perfis, o que indica que as variações sazonais de acreção e erosão são bem descritas pela análise temporal da segunda autofunção. Identificou-se um padrão em que a grande maioria dos coeficientes positivos, ou seja, de acreção, apareceram nas datas referentes aos meses de verão- outono e a grande maioria dos coeficientes negativos (erosão) apareceram nas datas referentes ao inverno-primavera, apontando uma sazonalidade nas variações morfodinâmicas.

Variações temporais na morfologia da praia dependem fundamentalmente do regime ondulatório de águas profundas, ao passo que mudanças espaciais dependem principalmente das variações na modificação das ondas à medida que as mesmas se propagam para águas rasas. Estas modificações são controladas pela geologia e configuração da costa. De acordo com TESSLER e GOYA (2005); MUEHE (2006) e GOIS e OLIVEIRA (2010), processos hidrodinâmicos como ondas, marés e correntes, são responsáveis pela origem, desenvolvimento e modificações das feições

morfológicas costeiras, sendo o clima de ondas a principal variável indutora dos processos costeiros de curto e médio prazo.

A figura 31 dispõe da comparação entre os períodos de acreção e erosão com a altura significativa referênte ao período da série temporal do estudo. No primeiro gráfico da figura foram plotados os coeficientes temporais da segunda autofunção durante toda a série temporal deste estudo, referentes aos cinco perfis (Extremo Leste, Leste, Retaguarda, Oeste e Extremo Oeste). No segundo gráfico foram apresentadas as médias e os respectivos desvios padrões das alturas significativas de onda (Hs) desde um dia antes da data das medições (dois dias). Já o terceiro gráfico corresponde aos valores da média e do desvio padrão de Hs dos sete dias antecedentes aos dias em que foram realizadas as medições da topografia. Isto se deve ao fato de que demanda-se um tempo até a praia responder à ação das ondas. No quarto gráfico da figura, foi exibida a série de Hs completa para o período do estudo. As marcações em vermelho são referentes às datas das campanhas topográficas.

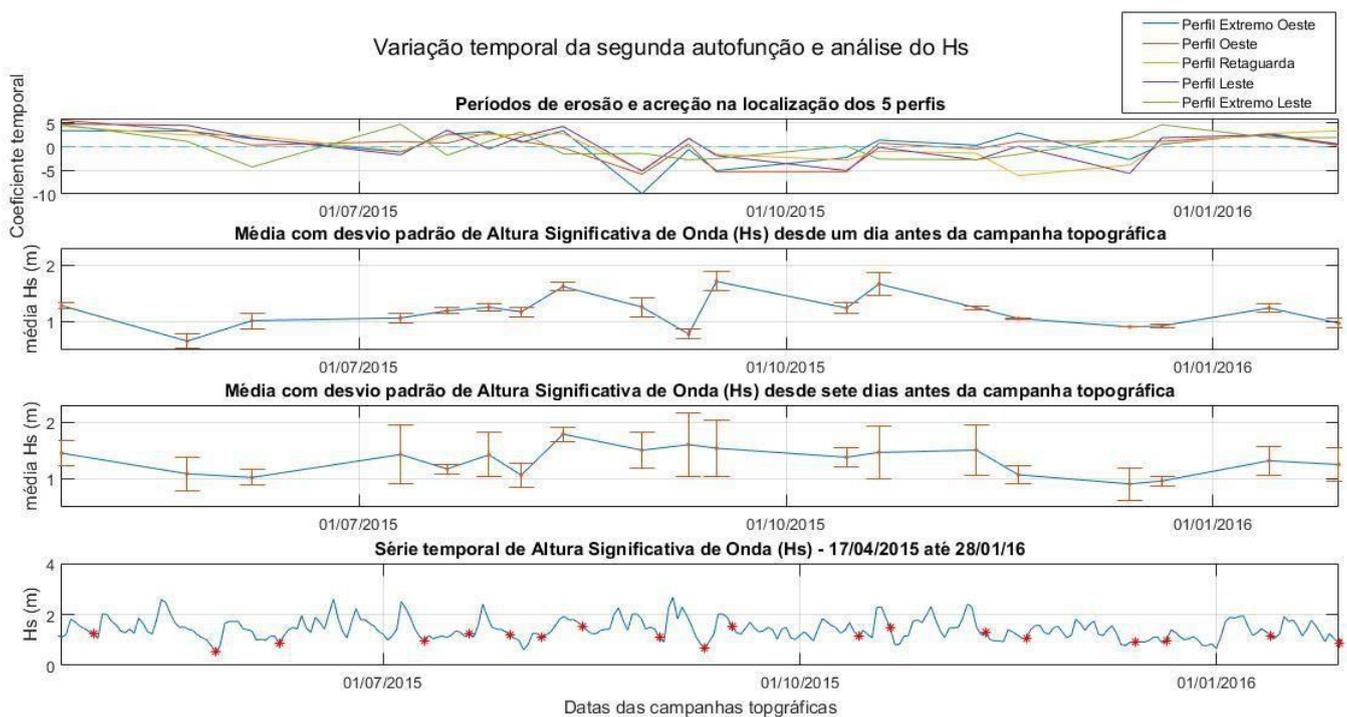


Figura 31. (1) Coeficientes temporais da segunda autofunção durante a série temporal deste estudo, referente aos cinco perfis (Extremo Leste, Leste, Retaguarda, Oeste e Extremo Oeste). (2) Média e desvio padrão de Hs desde um dia antes da data da campanha topográfica. (3) Média e desvio padrão de Hs por sete dias antes da data da campanha topográfica. (4) Série de Hs completa para o período do estudo. As marcações em vermelho são referentes às datas das campanhas topográficas.

Foi possível perceber, no primeiro gráfico da figura, que o período em que houve maior erosão (período em que a linha do coeficiente se manteve abaixo da linha do zero), foi de 14/08/2015 até 11/11/2015, englobando uma parte do inverno e primavera.

Depreendeu-se que o desvio padrão do gráfico em que foram obtidas as médias para sete dias se mostrou maior do que o desvio do segundo gráfico onde está demonstrada a média para dois dias. Durante 7 dias o valor de Hs pode variar consideravelmente e, dessa forma, a média realizada desde apenas um dia antes das medições apresentou desvio menor e, conseqüentemente, valores mais consistentes e homogêneos da média. Correlacionando-se visualmente o segundo gráfico com os períodos de erosão e acreção do primeiro gráfico, foi possível observar que o momento antecedente ao dia 31/08/15, data em que 4 dos 5 perfis apresentaram uma acentuada erosão (linha do coeficiente se manteve bastante abaixo da linha do zero), os valores de Hs do segundo gráfico foram elevados. Ao decorrer da série temporal (a partir do dia 31/08 até por volta do dia 10/09/15), os valores de Hs começam a diminuir enquanto que os valores dos coeficientes temporais aumentam, apontando, dessa maneira, acreção no período em que o Hs foi menor. A partir data da próxima campanha (16/09/15) até o final da primavera, os valores de Hs permanecem acima da média geral, e os coeficientes temporais, em sua grande maioria, permanecem abaixo da linha do zero (períodos de erosão).

Realizando a mesma comparação, porém utilizando o terceiro gráfico da figura, foi possível perceber que no primeiro gráfico, o período em que houve maior erosão (período em que a linha do coeficiente se manteve por mais tempo abaixo da linha do zero), que foi de 14/08/2015 até 11/11/2015, englobando uma parte do inverno e primavera, coincidiu com o período em que a média de Hs apresentou os maiores valores (terceiro gráfico da figura). Contudo, a resposta da ação das ondas na costa se mostrou mais evidente no segundo gráfico (com a média dos valores de Hs de dois dias). Percebe-se que há uma forte relação entre os coeficientes e o parâmetro de onda, pois quando os valores de Hs estão elevados, os valores dos coeficientes estão baixos (houve erosão) e, por outro lado, quando os valores de Hs estão reduzidos, os valores dos coeficientes se elevam (houve acreção) de forma mais simultânea mostrando que, de fato, utilizar a média desde um dia antes da medição é o melhor método a ser considerado para esta análise.

## 7. Conclusões

A partir dos resultados obtidos pela aplicação do método estatístico EOF, foi possível identificar padrões morfológicos tanto em escala espacial quanto em escala temporal.

Por meio da análise do coeficiente espacial foi identificado o posicionamento das feições morfológicas transversais à linha de costa (berma, terraço de maré baixa e bancos), ratificando que os bancos apareceram paralelamente mais ao largo do que o terraço, que por sua vez, aparece mais ao largo do que a berma.

Além disso, a técnica EOF demonstrou como a berma está disposta longitudinalmente ao longo da área de estudo, identificando uma porção mais larga da praia, como uma saliência, numa zona estimada em 150 m que fica na retaguarda do afloramento rochoso submerso. Foi possível constatar estatisticamente que quanto mais próximo ao perfil localizado na retaguarda da estrutura submersa, mais ao largo estão dispostas as feições, o que indica que nesta porção da praia pode haver maior quantidade de sedimento acumulado.

Apesar de já ter sido descrita a ocorrência de acreção e de erosão na porção da praia localizada na retaguarda do afloramento rochoso, explicadas pelos vetores de quebra de onda (NEMES, 2016), foi observado um padrão predominante de acreção (presença da saliência) ao longo da série temporal desse estudo. Esta saliência pode evidenciar um indício de que está ocorrendo algum processo costeiro relacionado com a feição submersa e com a hidrodinâmica gerada pelas ondas.

Em relação à variação da linha de costa, foi observada uma assimetria ao longo da área de estudo, em que a retaguarda do afloramento rochoso e o lado oeste da praia apresentaram maiores variações da linha de costa, tanto na média como no desvio padrão. Ademais, foi possível estimar a mobilidade de sedimento por toda porção longitudinal da área de estudo, onde pôde-se constatar que a porção na retaguarda do afloramento rochoso e a porção oeste da praia, também apresentaram maior mobilidade do que a porção leste. Estes resultados podem estar apontando uma região que provavelmente sofre uma maior influência dos processos hidrodinâmicos.

A partir da análise da autofunção temporal da EOF pôde-se identificar a transição sazonal entre os perfis de acreção e erosão na área de estudo, demonstrando que existe forte relação entre os coeficientes temporais e o parâmetro de onda, em que as maiores mudanças erosivas ocorreram no período de maior altura significativa das

ondas ( $H_s$ ), que foi de 14/08/2015 até 11/11/2015, englobando uma parte do inverno e da primavera.

Os resultados do presente estudo indicaram que os dados por meio da análise estatística podem ser úteis para analisar a resposta do perfil à ação das ondas, visto que houve uma boa relação entre as mudanças erosivas e acrescivas dos perfis com a variável de altura significativa de onda ( $H_s$ ). Vale ressaltar que a série temporal desta pesquisa foi de apenas aproximadamente um ano, enquanto que no trabalho de HORRILLO-CARABALLO E REEVE (2011), na qual propuseram a previsão do comportamento dos perfis de praia através da correlação com a previsão de ondas, foram utilizados registros para mais de uma década, o que seria uma proposta interessante a ser desenvolvida em futuras pesquisas.

As previsões e medições de ondas são, em geral, muito mais disponíveis do que as informações sobre comportamento dos perfis de praias. Encontrar um link confiável entre ambos resultaria em um meio de previsão, e, portanto, um fator crucial na avaliação dos riscos na zona costeira.

## 8. Referências

- ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Análise Granulométrico – Rochas e Solos. NBR 6502, 1995.
- AMARO, V.E., SANTOS, M.S.T., SOUTO, M.V.S., 2012. *Geotecnologias Aplicadas ao Monitoramento Costeiro: Sensoriamento Remoto e Geodésia de Precisão*. 1ª Ed. Natal, Edição dos Autores, 118p.
- AUBREY, D.G., 1979. “Seasonal patterns of onshore-offshore sediment movement”. *Journal of Geophysical Research*, v. 84, n. C10, pp. 6347-6354.
- AUBREY, D.G., 1978. *Statistical and dynamic prediction of changes in natural sand beaches*. Tese de Doutorado, Universidade da Califórnia, San Diego, 193 pp.
- BARNARD P. L. et al., 2017. “Extreme oceanographic forcing and coastal response due to the 2015–2016 El Niño”. *Nature Communications*, pp. 1-8.
- BOWMAN, D., 1981. “Efficiency of eigenfunctions for discriminant analysis of subaerial non-tidal beach profiles”. *Marine Geology*, v. 39, pp. 243-258.
- CALLIARI, L. J.; MUEHE, D.; HOEFEL, F. G.; TOLDO JÚNIOR., E., 2003. “Morfodinâmica: uma breve revisão”. *Revista Brasileira de Oceanografia*, v. 51, n. 1, p. 63-78.
- CASTELLE, B., MARIEU, V., BUJAN, S., SPLINTER, K. D., ROBINET, A., SÉNÉCHAL, N., FERREIRA, S., 2015. “Impact of the Winter 2013–2014 Series of Severe Western Europe Storms on a Double-Barred Sandy Coast: Beach and Dune Erosion and Megacusps Embayments”. *Geomorphology*, v.238, pp.135–148.
- CRIADO-SUDAU, F. F., 2016, *Mapeamento e Caracterização da Hidrodinâmica de uma Praia Intermediária de Morfologia Complexa*, Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia Oceânica, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 102p.
- DEAN, R. G., DALRYMPLE, R. A., 2002. *Coastal Processes with Engineering Applications*, Cambridge: Cambridge University Press, 475p.
- DEAN, R.G., 1977. *Equilibrium Beach Profiles: U.S. Atlantic and Gulf Coasts*. Department of Civil Engineering, Ocean Engineering, n. 12, University of Delaware, Newark, Delaware.
- DIAS, G.T.M., SILVA C.G., 1984. *Geologia de depósitos arenosos costeiros emersos – exemplos ao longo do litoral fluminense*. In: Lacerda L.D., Araújo D.S.D., Cerqueira R., Turcq B. (Eds.). *Restingas: origem, estrutura e processos*.

- Universidade Federal Fluminense. Anais do Simpósio sobre Restingas Brasileiras, pp. 47-60.
- DICK, J.E., DALRYMPLE, R.A., 1984. “Coastal changes at Bethany Beach”, *Delaware. Proc. 29th Coastal Engineering Conf. (ASCE)*, pp. 1650-1667.
- EMERY, W. J., THOMSON, R. E., 2001. “Data Analysis Methods in Physical Oceanography”, *Elsevier Science*, pp. 597-619.
- FERRARIO, F., BECK, M. W., STORLAZZI, C. D., MICHELI, F., SHEPARD, C.C., AIROLDI, L., 2014. “The effectiveness of coral reefs for coastal hazard risk reduction and adaptation”, *Nature Communications*, v. 5, n. 3794, pp. 1-9.
- GOIS, L.A., OLIVEIRA, N.M.G.A., 2010. “A Contribuição do Escoamento Superficial e da Drenagem de Águas Pluviais para os Processos Erosivos no Litoral de Olinda, Pernambuco, Brasil”. *Revista da Gestão Costeira Integrada*, v. 10, n. 4, pp. 457-481.
- GRIGGS, G. B., 2015. “Lost Neighborhoods of the California Coasts”. *Journal of Coastal Research*, v.31, pp.129–147.
- HORRILLO-CARABALLO, J. M., REEVE D.E., 2011. “Application of a Statistical Method to investigate patterns of beach evolution in the vicinity of a seawall.” *Journal of Coastal Research*, 2011.
- LEMKE, L; MILLER, J. K., 2017. “EOF analysis of shoreline and beach slope variability at a feeder beach constructed within a groin field at Long Branch, New Jersey”, *Coastal Engineering*, v. 121, p. 14-25.
- MUEHE, D., 2006. “Erosion in the Brazilian coastal zone: an overview”. *Journal of Coastal Research*, v.39, pp.43–48, 2006.
- MUEHE, D., LINS-DE-BARROS, F. M., 2016. “The Beaches of Rio de Janeiro”, In: SHORT, A., D., KLEIN, A. H. F. K. *Brazilian Beach Systems*. Coastal Research Library, v.17, pp.363-396.
- MUÑOZ-PÉREZ J. J., MEDINA, R., TEJEDOR, B., 2011. “Evolution of longshore beach contour lines determined by E.O.F. method”. *Scientia Marina*, v. 65, n. 4.
- NEMES, D. D., 2016. *Variabilidade morfodinâmica de uma praia intermediária com a presença de um afloramento rochoso submerso*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, 244p.
- NEUMANN, J. E., EMANUEL, K., RAVELA, S., LUDWIG, L., KIRSHEN, P., BOSMA, K., MARTINICH, J., 2015. “Joint Effects of Storm Surge and Sea-

- Level Rise on US Coasts: New Economic Estimates of Impacts, Adaptation, and Benefits of Mitigation Policy”. *Climatic Change*, v.129, pp.337–349.
- PRUSZAK, Z., 1993. “The analysis of beach profile changes using Dean’s method and empirical orthogonal functions”. *Coastal Engineering*, v. 19, pp. 245-261.
- RANASINGHE, R., TURNER, I. L., 2006. “Shoreline Response to Submerged Structures: A Review”. *Coastal Engineering*, v. 53, pp. 65-79.
- REEVE, D., CHADWICK, A., FLEMING, C. 2004. *Coastal Engineering: Processes, Theory and Design Practice*, New York: Spon Press, 461p.
- ROSSETTI, D. F. “Ambientes Costeiros”, In: FLORENZANO, T. G. *Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais*, cap. 9. Oficina de Textos, São Paulo, 2008.
- SHORT, A. D., KLEIN, A. H. F., 2016a. “Brazilian Beach Systems: Review and Overview”, In: SHORT, A. D., KLEIN, A. H. F. (eds.), *Brazilian Beach System*, Coastal Research Library, v.17, pp.573-608.
- SILVA, R., MARTÍNEZ, M. L., HESP, P. A., CATALAN, P., OSORIO, A. F., MARTELL, R., FOSSATI, M., SILVA, G. M., MARIÑO-TAPIA, I., PEREIRA, P., CIENGUEGOS, R., KLEIN, A.; GOVAERE, G., 2014. “Present and Future Challenges of Coastal Erosion in Latin America”. *Journal of Coastal Research*, v.71, pp.1–16.
- SOUZA, C.R. de G.; SOUZA FILHO, P.W.M.; ESTEVES, SL.; VITAL, H. DILLENBURG, S.R.; PATCHINEELAM, S.M. & ADDAD, J.E. 2005. Praias Arenosas e Erosão Costeira. In: C.R. de G. Souza et al. (eds.). *Quaternário do Brasil*. Holos, Editora, Ribeirão Preto (SP). pp.130-152.
- TESSLER, M. G., GOYA, S. C., 2005. “Processos Costeiros Condicionantes do Litoral Brasileiro”. *Revista do Departamento de Geografia*, v. 17, p. 11-23.
- VAN DER HOEK, E. E. et al., 2012. “Shifting to ecological engineering in flood management: Introducing new uncertainties in the development of a building with nature pilot project”. *Environmental Science Policy*, v.22, p. 85–99.
- WALKER, H. J., 1988. “Artificial Structures and Shorelines”. *GeoJournalLibrary*, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, v.10, p.699.
- WALKER, J. R., PALMER, R.Q., KUKKA, J. K. “Recreational Surfing on Hawaiian Reefs”, In: *Proceedings for the 13th Coastal Engineering Conference*, ASCE, Vancouver, pp.2609–2628, 1972.
- WENTWORTH, C.A. 1922. “A scale of grade and class terms for clastic sediments”. *Journal of Geology*, v. 30, pp. 377-392.

- WIJNBERG, KATHELIJNE & H.J. TERWINDT, JOOST., 1995. "Extracting decadal morphological behaviour from high-resolution, long-term bathymetric surveys along the Holland coast using eigenfunction analysis". *Marine Geology*, v. 126, pp. 301-330.
- WINANT, C. D. et al., 1975. "Description of seasonal beach changes using empirical eigenfunctions". *Journal Geophysical Research*. v.80. n.15. p. 1979–1986.
- WRIGHT, L. D., CHAPPELL, J., THORN, B. G., BRADSHAW, M. P., COWELL, P., 1979. "Morphodynamics of reflective and dissipative beach and inshore systems: Southeastern Australia". *Marine Geology*, v.32, pp.105-140.
- WRIGHT, T. D., SHORT, A. D., 1984. "Morphodynamics Variability of Surf Zones and Beach: A Synthesis". *Marine Geology*, v.56, p.93-118.

# ANEXOS

## Anexo I



**22 AGO 2015**



**17 SET 2015**



**22 SET 2015**



**15 OUT 2015**



**18 NOV 2015**



**27 NOV 2015**



**14 DEZ 2015**



**22 DEZ 2015**



**08 JAN 2016**



**01 FEV 2016**



## Anexo II

%Análise de perfis de praia usando EOF

% Legenda de variáveis

% K (numero de campos)

% I (pontos ao longo do perfil)

% x (distancia ao longo do perfil)

% Y (distancia perpendicular ao perfil)

% z (profundidade em cada ponto I medido)

% Z (matriz de profundidades)

% A (matriz de correlacao)

% M (autovetores)

% M1 = fliplr (M)

% Eigval (lambda - autovalores)

% SortEigval = flipud(Eigval)

% S (matriz diagonal de lambda)

% tr (soma dos termos diagonais da matriz)

% PRe (porcentagem da variancia)

% Enx (Cnk - variacao dos auovetores em cada campo)

% T (matriz das campanhas)

% Perfil Retaguarda – Nome do Perfil analisado close all

clear all clc

filename = 'perfil11\_167.xlsx'; %dados topográficos de cada perfil extraídos do  
excel

K=19;

```

I= 141; %número de pontos do perfil n=I;
T = [2457141, 2457168, 2457182, 2457214, 2457224, 2457233, 2457240,
2457249,
2457266, 2457276, 2457282, 2457310, 2457317, 2457338, 2457347, 2457371,
2457378, 2457401, 2457416] %em dias julianos T1= T-2457200

```

```

%campo 1

```

```

z1Range = 'A3:C143';
subsetA = xlsread(filename,1,z1Range);
% subsetA(subsetA == 0) = NaN
% Convert the variables x to z in matrices x=subsetA(:,3);
y=subsetA(:,2);
z=subsetA(:,1);

```

```

%campo 2

```

```

z2Range = 'E3:G143';
subsetA = xlsread(filename,1,z2Range);
% subsetA(subsetA == 0) = NaN
% Convert the variables x to z in matrices x2=subsetA(:,3);
y2=subsetA(:,2);
z2=subsetA(:,1);

```

```

%campo 3

```

```

z3Range = 'I3:K143';
subsetA = xlsread(filename,1,z3Range);
% subsetA(subsetA == 0) = NaN

```

```
% Convert the variables x to z in matrices x3=subsetA(:,3);
y3=subsetA(:,2);
z3=subsetA(:,1);
```

```
%campo 4
```

```
zlRange = 'M3:O143';
subsetA = xlsread(filename,1,zlRange);
% subsetA(subsetA == 0) = NaN
% Convert the variables x to z in matrices x4=subsetA(:,3);
y4=subsetA(:,2);
z4=subsetA(:,1);
```

```
%campo 5
```

```
zlRange = 'Q3:S143';
subsetA = xlsread(filename,1,zlRange);
% subsetA(subsetA == 0) = NaN
% Convert the variables x to z in matrices x5=subsetA(:,3);
y5=subsetA(:,2);
z5=subsetA(:,1);
```

```
%campo 6
```

```
zlRange = 'U3:W143';
subsetA = xlsread(filename,1,zlRange);
% subsetA(subsetA == 0) = NaN
% Convert the variables x to z in matrices x6=subsetA(:,3);
```

```
y6=subsetA(:,2);
```

```
z6=subsetA(:,1);
```

```
%campo 7
```

```
zlRange = 'Y3:AA143';
```

```
subsetA = xlsread(filename,1,zlRange);
```

```
% subsetA(subsetA == 0) = NaN
```

```
% Convert the variables x to z in matrices x7=subsetA(:,3);
```

```
y7=subsetA(:,2);
```

```
z7=subsetA(:,1);
```

```
%campo 8
```

```
zlRange = 'AC3:AE143';
```

```
subsetA = xlsread(filename,1,zlRange);
```

```
% subsetA(subsetA == 0) = NaN
```

```
% Convert the variables x to z in matrices x8=subsetA(:,3);
```

```
y8=subsetA(:,2);
```

```
z8=subsetA(:,1);
```

```
%campo 9
```

```
zlRange = 'AG3:AI143';
```

```
subsetA = xlsread(filename,1,zlRange);
```

```
% subsetA(subsetA == 0) = NaN
```

```
% % Convert the variables x to z in matrices x9=subsetA(:,3);
```

```
y9=subsetA(:,2);
```

```
z9=subsetA(:,1);
```

```
%campo 10
```

```
zlRange = 'AK3:AM143';  
subsetA = xlsread(filename,1,zlRange);  
% subsetA(subsetA == 0) = NaN  
% Convert the variables x to z in matrices x10=subsetA(:,3);  
y10=subsetA(:,2); z10=subsetA(:,1);
```

```
%campo 11
```

```
zlRange = 'AO3:AQ143';  
subsetA = xlsread(filename,1,zlRange);  
% subsetA(subsetA == 0) = NaN  
% Convert the variables x to z in matrices x11=subsetA(:,3);  
y11=subsetA(:,2); z11=subsetA(:,1);
```

```
%campo 12
```

```
zlRange = 'AS3:AU143';  
subsetA = xlsread(filename,1,zlRange);  
% subsetA(subsetA == 0) = NaN  
% Convert the variables x to z in matrices x12=subsetA(:,3);  
y12=subsetA(:,2); z12=subsetA(:,1);
```

```
%campo 13
```

```
zlRange = 'AW3:AY143';  
subsetA = xlsread(filename,1,zlRange);
```

```
% subsetA(subsetA == 0) = NaN
% Convert the variables x to z in matrices x13=subsetA(:,3);
y13=subsetA(:,2); z13=subsetA(:,1);
```

```
%campo 14
```

```
zlRange = 'BA3:BC143';
subsetA = xlsread(filename,1,zlRange);
% subsetA(subsetA == 0) = NaN
% Convert the variables x to z in matrices x14=subsetA(:,3);
y14=subsetA(:,2); z14=subsetA(:,1);
```

```
%campo 15
```

```
zlRange = 'BE3:BG143';
subsetA = xlsread(filename,1,zlRange);
% subsetA(subsetA == 0) = NaN
% Convert the variables x to z in matrices x15=subsetA(:,3);
y15=subsetA(:,2); z15=subsetA(:,1);
```

```
%campo 16
```

```
zlRange = 'BI3:BK143';
subsetA = xlsread(filename,1,zlRange);
% subsetA(subsetA == 0) = NaN
% Convert the variables x to z in matrices x16=subsetA(:,3);
y16=subsetA(:,2);
```

```
z16=subsetA(:,1);
```

```
%campo 17
```

```
z1Range = 'BM3:BO143';
```

```
subsetA = xlsread(filename,1,z1Range);
```

```
% subsetA(subsetA == 0) = NaN
```

```
% Convert the variables x to z in matrices x17=subsetA(:,3);
```

```
y17=subsetA(:,2); z17=subsetA(:,1);
```

```
%campo 18
```

```
z1Range = 'BQ3:BS143';
```

```
subsetA = xlsread(filename,1,z1Range);
```

```
% subsetA(subsetA == 0) = NaN
```

```
% Convert the variables x to z in matrices x18=subsetA(:,3);
```

```
y18=subsetA(:,2); z18=subsetA(:,1);
```

```
%campo 19
```

```
z1Range = 'BU3:BW143';
```

```
subsetA = xlsread(filename,1,z1Range);
```

```
% subsetA(subsetA == 0) = NaN
```

```
% Convert the variables x to z in matrices x19=subsetA(:,3);
```

```
y19=subsetA(:,2); z19=subsetA(:,1);
```

```
Z = [z z2 z3 z4 z5 z6 z7 z8 z9 z10 z11 z12 z13 z14 z15 z16 z17 z18 z19];
```

```

Z=Z'; %matriz das profundidades A=zeros (I,n);

for i=1:I; for j=1:n;
for k=1:K;
A(i,j) = A(i,j)+ Z(k,i)*Z(k,j); end
A(i,j) = A(i,j)/(I*K);% matriz de correlação end
end

% Eigenvalues calculation

%A=sym(A);
[M,S]=eig(A); %produz uma matriz diagonal S (matriz identidade) de
autovalores e uma matriz completa M onde as colunas correspondem aos autovetores
A*M = M*S
%%% A*M-M*S = 0 não dá zero mas da aproximado
Eigval = eig(A); %é um vetor contendo os autovalores da matriz A (3x3) tr =
sum(Eigval);

[SortEigval,Idx]= sort(Eigval);
SortEigval = flipud(Eigval);% lambda - eigenvalues Idx = flipud(Idx);

M1 = fliplr(M);
M1=M1';% eigenvector - spacial

% percentage of relevance

```

Pre = (SortEigval/tr)\*100; % variance - são os autovalores divididos pela soma deles multiplicados por 100

%98.5756 % primeiro autovetor 4,43 em 4,5

%1.2725 % segundo autovetor

%0.1519 % terceiro autovetor

% Pre = (ev\*100)

%temporal

Enx=zeros (K,I); for j=1:n

for k=1:K for i=1:I

Enx(k,j)= Enx(k,j) + Z(k,i)\* M1(j,i); %Cnk end

end end

%variancia dos autovetores com cada pesquisa é determinada pelo Enx OU

Cnk