

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Isadora da Silva Santos

**Caracterização morfossedimentar e os efeitos das ondas
de tempestade no arco praiial do Leblon ao
Arpoador (Rio de Janeiro)**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Geografia do Departamento de Geografia e Meio Ambiente da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Sérgio Cadena de Vasconcelos

Rio de Janeiro
Maio de 2023.



Isadora da Silva Santos

**Caracterização morfossedimentar e os efeitos das ondas
de tempestade no arco praiado do Leblon ao
Arpoador (Rio de Janeiro)**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Geografia do Departamento de Geografia e Meio Ambiente da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo:

Prof. Sérgio Cadena de Vasconcelos

Orientador

Departamento de Geografia e Meio Ambiente – PUC-Rio

Prof. Rodrigo Wagner Paixão Pinto

Departamento de Geografia e Meio Ambiente – PUC-Rio

Prof. André Luiz Carvalho Silva

Departamento de Geografia – UERJ-FFP

Prof. Rodrigo Coutinho Abuchacra

Departamento de Geografia – UERJ-FFP

Rio de Janeiro, 8 de maio de 2023

Todos os direitos reservados. A produção, total ou parcial o trabalho, é proibida sem a autorização da universidade, da autora e do orientador.

Isadora da Silva Santos

Graduada em Geografia pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em 2020, com Pós-Graduação em Geografia na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro concluída em 2023.

Ficha Catalográfica

Santos, Isadora da Silva

Caracterização morfossedimentar e os efeitos das ondas de tempestade no arco praial do Leblon ao Arpoador (Rio de Janeiro) / Isadora da Silva Santos ; orientador: Sérgio Cadena de Vasconcelos. – 2023.

120 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Geografia e Meio Ambiente, 2023.

Inclui bibliografia

1. Geografia e Meio Ambiente – Teses. 2. Morfodinâmica costeira. 3. Eventos de tempestade. 4. Sedimentologia. I. Vasconcelos, Sérgio Cadena de. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Geografia e Meio Ambiente. III. Título.

CDD: 910

Agradecimentos

À Deus, por me dar forças para aguentar firme todo o período turbulento da pesquisa e mostrar que minha fé é maior do que qualquer obstáculo.

Agradeço a minha mãe Marilene, meu pai Raimundo, meu irmão Rodrigo e sua esposa Noemy, por serem o pilar da minha força, o meu refúgio e os meus maiores incentivadores.

Ao meu namorado Pedro, por todo apoio em campo e fora dele. Por sempre me ouvir e me ajudar em tudo o que podia. Seu colo foi fundamental.

Ao Departamento de Geografia e Meio Ambiente da PUC-Rio, pela estrutura oferecida durante o mestrado.

Ao meu orientador Sérgio, por não ter deixado eu desistir do mestrado e ter sido um verdadeiro pai durante todo o período da pesquisa.

As minhas amigas Maíne Gonçalves, Mariana Barbosa e Jane Carolina do NEAC PUC-Rio (Núcleo de Estudos em Ambientes Costeiros PUC-Rio), pelos anos de estudo, apoio em trabalhos de campo, suporte nas atividades de laboratório e por toda troca que tivemos. Mulherada dominando com excelência os estudos costeiros do Rio de Janeiro.

Aos meus amigos de trabalho: Carlos Eduardo, Eduarda Mulinari, Enzo Caravello, Felipe Moura, Manuela Mattos, Sabrina Candate e José Luis Hernandez por tornarem meus dias mais divertidos e me apoiarem em tudo. Em especial aos meus queridos amigos Júlia Schoenche e Thomas Bannell, por dedicarem parte de seu tempo em me ajudar no laboratório, na produção de mapas, por nunca desacreditarem do meu potencial e enxugar todas as lágrimas que caíram. Sem vocês parte do meu trabalho não seria realizado, muito obrigada. Agradeço ao meu amigo Guilherme Lopes por ser tão atencioso e verdadeiro.

As minhas queridas amigas Mariana Oliveira, Mariana Rocha e Milena Nascimento, por ouvirem sempre minhas reclamações e indagações da pesquisa e que mesmo sem saber de muita coisa do assunto me ajudaram com os melhores conselhos. Vocês me inspiram a ser uma mulher ainda mais forte.

A minha amiga de turma e a mais nova mestre em Geografia, Carla Lubanco. Sua amizade foi o maior presente que o mestrado me proporcionou. Obrigada por ouvir todos os meus problemas, me acalmar nos momentos mais difíceis e por nunca ter soltado minha mão mesmo estando em outro bairro.

Agradeço ao professor André Luiz Carvalho da Silva (UERJ-FFP) por toda paciência e disponibilidade em ensinar sobre morfoscopia, além de conceder o espaço do laboratório do GECOST para aprender mais sobre análises morfoscópicas.

Agradeço imensamente toda disponibilidade e paciência da Débora Araújo em ensinar todo passo a passo das análises morfoscópicas, além da Ana Beatriz Pinheiro que me ensinou o detalhamento dos cálculos de volume emerso. Todo amor e paciência que vocês tiveram em me ajudar foram essenciais para a conclusão dessa pesquisa. Gratidão eterna meninas.

Ao projeto InfraCidades e à TECGRAF pela oportunidade em desenvolver pesquisas para a cidade do Rio de Janeiro e toda estrutura fornecida. Um agradecimento em especial aos coordenadores Ana Cristina, Rafael Nunes e Marcelo Motta por terem sido tão solícitos e por confiarem em mim para a produção de pesquisas voltadas para as zonas costeiras no Rio de Janeiro.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desse trabalho.

Resumo

Santos, Isadora da Silva. Cadena, Sérgio. **Caracterização morfosedimentar e os efeitos das ondas de tempestade no arco praiial do Leblon ao Arpoador (Rio de Janeiro)**. Rio de Janeiro, 2023. p.120. Dissertação de Mestrado – Departamento de Geografia e Meio Ambiente, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Atrelado à densa ocupação dessas áreas, identifica-se que parte de suas feições naturalmente protetoras da linha de costa são recorrentemente suprimidas da paisagem, dando lugar a obras de engenharia rígidas que passam a ocupar o perfil dinâmico das praias. Com isso, em casos de eventos de tempestades, as praias tornam-se susceptíveis a ação das ondas, bem como a população que habita a beira mar. Nesse sentido, o presente trabalho tem como objetivo caracterizar sazonalmente o comportamento morfodinâmico e sedimentar do arco praiial localizado entre o Leblon e Arpoador e sua susceptibilidade aos efeitos das ressacas, fornecendo subsídios para a gestão do litoral. Para a obtenção dos dados foram aquiritados 32 perfis topográficos de praia entre 2018-2021, com o método das balizas de Emery; análises nas areias das praias (granulometria e morfoscopia); análises morfoscópicas; cálculos do volume emerso dos sedimentos e levantamento de alertas de ressacas emitidos pela Marinha do Brasil e demais veículos midiáticos. As extremidades do arco praiial (pontos LB01 e AR01) apresentaram maior variabilidade morfológica e na largura da praia variação da largura da praia.; o ponto LB02 (próximo ao canal de Jardim de Alah) apresenta-se como o mais susceptível às ondas de tempestades; e o ponto IP01 (localizado no meio do arco), é considerado o mais estável devido à presença de ilhas em sua frente. Os sedimentos emersos do arco praiial exibiram uma sazonalidade marcada por acúmulo no verão e perda subsequente dos mesmos no inverno. O papel das ondas é essencial na dinâmica do arco praiial, com incidência predominante de Sudoeste (tempestade) e Sudeste (tempo bom), o que possibilita a formação de correntes de deriva litorânea importantes na distribuição Leste-Oeste rotacional de sedimentos no arco praiial. Conclui-se que o arco praiial apresenta certo equilíbrio dinâmico, uma vez que os perfis topográficos mostram grande variabilidade de largura e tal dinâmica pode ser corroborada pela relação de ganha e perda do volume de sedimentos do arco. A areia média é predominante porém percebe-se uma distinta distribuição dos grãos no arco praiial: observou areias médias a grossas na porção oeste (Leblon) e areias médias a finas na porção leste

(Arpoador). A distribuição sedimentar se mostra diferente também em termos de grau de arredondamento (no pós-praia os grãos são subarredondados e na face de praia são subangulares), seleção do grão e maturidade.

Palavras-chave: Morfodinâmica Costeira; Eventos de tempestade; Sedimentologia.

Abstract

Santos, Isadora da Silva. Cadena, Sérgio (advisor) **Morphosedimentary characterization and the effects of storm waves on Leblon-Arpoador coast (Rio de Janeiro)**. Rio de Janeiro, 2023. p.120. Dissertação de Mestrado – Departamento de Geografia e Meio Ambiente, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Linked to the dense occupation of these areas, it is identified that part of its features that naturally protect the coastline are recurrently suppressed from the landscape, giving way to rigid engineering works that begin to occupy the dynamic profile of the beaches. With that, in cases of storm events, the beaches become susceptible to wave action, as well as the population that inhabits the seaside. In this sense, the present work aims to seasonally characterize the morphodynamic and sedimentary behavior of the coast located between Leblon and Arpoador and its susceptibility to the effects of storm surges, providing subsidies for the management of the coast. To obtain the data, 32 topographic beach profiles were acquired between 2018-2021, using the Emery method; beach sand analyzes (granulometry and morphoscopy); morphoscopic analysis; calculations of the emerged volume of sediments and survey of storm surge alerts issued by the Brazilian Navy and other media outlets. The ends of the beach (points LB01 and AR01) showed greater morphological variability and variation in beach width in beach width.; point LB02 (close to the Jardim de Alah channel) is the most susceptible to storm waves; and point IP01 (located in the middle of the arc), is considered the most stable due to the presence of islands in front of it. Emerged sediments from the coast exhibited a seasonality marked by accumulation in summer and subsequent loss in winter. The role of waves is essential in the dynamics of the beach arc, with predominant incidence from the Southwest (storm) and Southeast (clear weather), which enables the formation of longshore drift currents that are important in the rotational East-West distribution of sediments in the beach arc. It is concluded that the Leblon-Arpoador coast presents a certain dynamic balance, since the topographic profiles show great variability in width and such dynamics can be corroborated by the relationship between gain and loss in the volume of sediments in the arch. Medium sand is predominant, but a distinct distribution of grains can be seen in the coast: medium to coarse sand was observed in the western portion (Leblon) and medium to fine sand in the eastern portion (Arpoador). The sedimentary distribution is also different in terms of degree of roundness (in the backshore the grains are

subrounded and in the beach face they are subangular), grain selection and maturity.

Keywords: Coastal Morphodynamic; Storm Events; Sedimentology.

RESUMO

INTRODUÇÃO	15
1. OBJETIVOS	16
1.1. Objetivos Específicos	16
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1. Praias Arenosas	17
2.2. Morfodinâmica Costeira	19
2.3. Sedimentos Costeiros	23
2.4. Eventos Extremos	29
3. ÁREA DE ESTUDO	34
3.1. Contexto Tectônico Regional	34
3.2. Contexto Geomorfológico Regional	37
4. MATERIAIS E MÉTODOS	42
4.1. Perfis topográficos transversais à praia	42
4.2. Coleta de sedimentos em campo	44
4.3. Análises granulométricas	45
4.4. Análise Morfoscópica	48
4.5. Cálculo de volume emerso	50
4.6. Análise de ressacas emitidas pela mídia	51
5. RESULTADOS	51
5.1. Perfis topográficos transversais à praia	52
5.2. Balanço sedimentar	56
5.2.1. Balanço sedimentar do ponto LB01	56
5.2.2. Balanço sedimentar do ponto LB02	57
5.2.3. Balanço sedimentar do ponto IP01	58
5.2.4. Balanço sedimentar do ponto AR01	59
5.3. Caracterização das ressacas	61
5.4. Granulometria	64
5.4.1. Granulometria do ponto LB01	64
5.4.2. Granulometria do ponto LB02	68
5.4.3. Granulometria do ponto IP01	71
5.4.4. Granulometria do ponto AR01	73
5.5. Morfoscopia	75
5.1. Condições de tempo bom	75
5.2. Condições de tempestade	79
6. DISCUSSÕES	82
6.1. Perfil topográfico: largura de praia e volume	83
6.1.1. Verão 2018	83
6.1.2. Inverno 2018	84

6.1.3. Verão 2019	85
6.1.4. Inverno 2019	87
6.1.5. Verão 2020	89
6.1.6. Verão 2021	91
6.1.7. Inverno 2021 (20/07/2021)	93
6.1.8. Inverno 2021 (20/08/2021)	96
6.2. Distribuição granulométrica do arco praial Leblon-Arpoador	101
6.3. Morfoscopia	103
7. CONCLUSÃO	105
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribuição global de linhas costeiras arenosas; a escala de cores representa a maior ou menor presença de linhas costeiras arenosas (quanto mais clara maior a porcentagem de praias arenosas). Fonte: LUIJENDIJK et al. (2018).	17
Figura 2. Sistema praial e seus subambientes e zonas. Fonte: MUEHE, 1994.	18
Figura 3. Perfis sazonais de praia. Fonte: CARVALHO (2019) apud KOMAR (1976).....	20
Figura 4. Representação dos estágios morfodinâmicos. Modificado de SHORT e JACKSON (2013) pela autora.....	22
Figura 5. Tamanho do grão de areias. Fonte: LOPÉS (2016)	24
Figura 6. Categorias de arredondamento para grãos de sedimentos. Para cada categoria, é mostrado um grão de baixa e alta esfericidade. Fonte: Modificado de Tucker (2003) pela autora.....	25
Figura 7. Grau de selecionamento dos grãos. Modificado de TUCKER (2013) pela autora.	28
Figura 8. Muros de contenção encontrados no arco praial do Leblon ao Arpoador. A: Muro formado por escadas na praia do Leblon. B: Muro rígido localizado na praia do Arpoador.....	31
Figura 9. Mobiliário do quiosque Azul é atingido após ondas de tempestades atingirem o litoral. Através da imagem também é possível identificar a transposição de sedimentos na ciclovia da orla. Fonte: O Globo.....	33
Figura 10. Transposição de sedimentos na ciclovia e na rua Delfim Moreira no Leblon.	33
Figura 11. Mapa de localização da área de estudo.	34
Figura 12. Mapa tectônico regional do Estado do Rio de Janeiro, com destaque em vermelho da área de estudo. Fonte: HEILBRON et al. (2016).....	35
Figura 13. Presença dos enxames de diques toleíticos e derrames nas bacias marginais. Fonte: HEILBRON et al. (2016).....	36
Figura 14. Mapa Geomorfológico do estado do Rio de Janeiro, com destaque em vermelho na área de estudo. Fonte: DANTAS (2001).	37
Figura 15. Unidades Morfoesculturais do estado do Rio de Janeiro, com destaque em vermelho na área de estudo. Fonte: Dantas (2001).	39
Figura 16. Compartimento da Baía de Guanabara. Fonte: MUEHE et al. 2018.	41
Figura 17. Compartimento de Jacarepaguá. Fonte: MUEHE et al. 2018.	41
Figura 18. Utilização das balizas de Emery em campo. Fonte: A autora.	43
Figura 19. Local dos quatro perfis de monitoramento ao longo do arco praial entre Leblon e Arpoador.	44
Figura 20. Coleta de amostra granulométrica em campo. Fonte: A autora.	45
Figura 21. Quarteador tipo Jones. Fonte: A autora.	46
Figura 22. Agitador de peneiras ACS Gold e as respectivas malhas utilizadas. Fonte: A autora.....	47
Figura 23. Análises morfooscópicas realizadas no LAGEFI PUC-Rio. Fonte: A autora.....	49

Figura 24. . Esquema representativo do cálculo de volume emerso. Fonte: OLIVEIRA FILHO et al., 2020.....	50
Figura 25. Variações sazonais observadas no ponto LB01, com informações referentes ao maior perfil (90,88 metros) e o menor perfil (33,7 metros).....	53
Figura 26. Variações sazonais observadas no ponto LB02, com informações referentes ao maior perfil (107,21 metros) e o menor perfil (33,28 metros).....	53
Figura 27. Variações sazonais observadas no ponto IP01, com informações referentes ao maior perfil (105,5 metros) e o menor perfil (49,2 metros).....	54
Figura 28. Variações sazonais observadas no ponto AR01, com informações referentes ao maior perfil (70,54 metros) e o menor perfil (26,1 metros).....	54
Figura 29. A força das ondas invade e impacta as estruturas do quiosque La Carioca (A). Equipes da Comlurb trabalham removendo areias do calçadão e da ciclovia do Leblon (B). Esbeltez das ondas observadas no ponto LB01 (C). Extensão da faixa de areia observada no Arpoador (D).	55
Figura 30. Cálculo de volume emerso observado no ponto LB01.....	57
Figura 31. Cálculo de volume emerso observado no ponto LB02.	58
Figura 32. Cálculo de volume emerso observado no ponto IP01.....	59
Figura 33. Cálculo de volume emerso observado no ponto AR01.	61
Figura 34. Ressacas registradas pelos veículos midiáticos entre os anos de 2018 e 2021.	62
Figura 35. Frequência da ocorrência das alturas das ondas incidentes no arco praiial entre o período analisado.	62
Figura 36. Frequência da direção de incidência das ondas registradas entre 2018 e 2021 na área de estudo.	63
Figura 37. Escarpa erosiva identificada no dia 20/08/2021 no LB01.....	67
Figura 38. Coluna estratigráfica observada na escarpa erosiva do ponto LB01 evidenciando deferentes episódios de aumento da energia das ondas registrados nos depósitos de sedimentos mais grossos.....	67
Figura 39. Degrau erosivo percebido em campo no ponto LB02 (20/08/2021).....	69
Figura 40. Degrau erosivo visto de cima (LB02 - 20/08/2021).	69
Figura 41. Morfoscopia do dia 13/04/2018 nos diferentes setores praiiais.	76
Figura 42. Morfoscopia do dia 12/03/2019 nos diferentes setores praiiais.	77
Figura 43. Morfoscopia do dia 18/03/2020 nos diferentes setores praiiais.	78
Figura 44. Morfoscopia do dia 15/03/2021 nos diferentes setores praiiais.	79
Figura 45. Morfoscopia do dia 13/09/2018 nos diferentes setores praiiais.	80
Figura 46. Morfoscopia do dia 20/09/2019 nos diferentes setores praiiais.	81
Figura 47. Morfoscopia do dia 20/08/2021 nos diferentes setores praiiais.	82
Figura 48. Perfil topográfico, volume emerso e ressacas percebidas no dia	

13/09/2018.	85
Figura 49. Perfil topográfico, volume emerso e ressacas percebidas no dia 12/03/2019.	87
Figura 50. Perfil topográfico, volume emerso e ressacas percebidas no dia 20/09/2019.	89
Figura 51. Perfil topográfico, volume emerso e ressacas percebidas no dia 18/03/2020.	91
Figura 52. Perfil topográfico, volume emerso e ressacas percebidas no dia 15/03/2021.	93
Figura 53. Mobiliário do quiosque afetado pelas ondas de tempestade (A); presença de maquinários da Comlurb para retirar as areias que se encontravam na ciclovia (B); transposição das areias no calçadão e ciclovia (C); presença de minerais pesados (D).	95
Figura 54. Perfil topográfico, volume emerso e ressacas percebidas no dia 20/07/2021.	96
Figura 55. Perfil topográfico, volume emerso e ressacas percebidas no dia 20/08/2021.	98
Figura 56. Variabilidade dos perfis topográficos do arco praial.	99
Figura 57. Susceptibilidade dos perfis topográficos do arco praial.	101
Figura 58. Condições observadas em que o Arpoador é atingido por ondas diretamente no calçadão. Fonte: A autora.	101
Figura 59. Distribuição granulométrica durante o arco praial.	104

LISTA DE TABELA

Tabela 1. Tabela utilizadas nas análises morfoscópicas. Retirado de ARAÚJO (2020).	49
--	----

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Fenômenos de alteração das partículas. Fonte: SUGUIO (1973, pg. 125)	27
Quadro 2. Fenômeno de alterabilidade das partículas. Fonte: SUGUIO (1973, pg. 125).	27
Quadro 3. Classificação granulométrica segundo Wentworth (1922).....	48

INTRODUÇÃO

As zonas costeiras têm historicamente atraído seres humanos devido à abundante amenidade, valor estético e diversos serviços ecossistêmicos que fornecem. Como resultado, tornaram-se densamente povoadas, com a presença de 15 das 20 megacidades do mundo localizadas nesta região (LUIJENDIJK *et al.*, 2018). Aproximadamente 600 milhões de pessoas vivem em zonas costeiras de baixa elevação (ou seja, regiões costeiras a menos de 10 m acima do nível médio do mar), que geram aproximadamente US\$ 1 trilhão de riqueza global (ZIREZCI *et al.*, 2020).

Mediante a esse crescimento populacional na zona costeira, as mesmas tendem a estar mais vulneráveis aos desastres naturais associados às mudanças climáticas (Helderop & Grubestic, 2019). Em um estudo recente, Vousdouskas *et al.* (2020) analisaram estimativas do nível do mar e mudanças futuras nos fatores meteorológicos (por exemplo, intensidade e frequência de tempestades), e afirmam que de 13,6 a 15,2% das praias arenosas do mundo podem enfrentar erosão até 2050.

As ondas de tempestades são apontadas como um dos maiores problemas vinculados às mudanças climáticas em litorais ocupados (BUKVIC *et al.*, 2020) podendo gerar impactos nas infraestruturas costeiras, ecossistemas e no setor econômico (KIM, 2020). Esses impactos já são sentidos nas zonas costeiras mundiais (TSOUKALA *et al.* 2015; LEATHERMAN, 2017; GIBBS, 2020; FLAYOU *et al.*, 2021; CHOI *et al.*, 2021).

Luijendijk *et al.* (2018), ao realizarem um amplo estudo sobre o estado das praias do mundo, mostram que 24% das praias arenosas mundiais estão persistentemente sofrendo erosão a taxas superiores a 0,5 m/ano, enquanto 28% estão acumulando (progradando) e 48% estão estáveis.

Na cidade do Rio de Janeiro observa-se um cenário não diferente das demais cidades mundiais, em que a expansão urbana transformou a orla carioca ao longo do tempo (LINS- DE-BARROS *et al.*, 2019). De forma geral, os amortecedores naturais frente ao impacto das ondas, como as dunas frontais e restingas, foram removidas do espaço costeiro e, conseqüentemente, os litorais se tornaram menos protegidos das ondas de tempestade. Na presente área de estudo, a orientação da linha de costa, deixa-a exposta a incidência de ondas de tempestade, associadas a passagem de sistemas frontais pelo oceano impactando a infraestrutura urbana que

se projeta sobre o perfil dinâmico da praia.

Embora exista na literatura estudos que evidenciem os impactos provenientes de ondas de tempestades na dinâmica costeira da cidade do Rio de Janeiro, como por exemplo os trabalhos de Rosman *et al.* (2007); Fortunato *et al.* (2008); Pena (2017); Chalerge-Touceira (2018); Costa (2020) e Carvalho *et al.* (2021), percebe-se que o arco praial do Leblon ao Arpoador ainda carece de conhecimento mais detalhada a respeito da sua dinâmica praial. Análises mais aprofundadas a respeito da área de estudo auxiliam na compreensão do comportamento morfológico e sedimentar e são fundamentais para uma boa gestão da orla, principalmente em um dos locais mais densamente ocupados e valorizados da cidade.

Portanto, a presente pesquisa tem como objetivo principal caracterizar sazonalmente o comportamento morfodinâmico e sedimentar do arco praial localizado entre as praias do Leblon e Arpoador, na cidade do Rio de Janeiro e sua susceptibilidade aos efeitos das ressacas.

1. OBJETIVOS

A presente pesquisa tem como objetivo geral caracterizar sazonalmente o comportamento morfodinâmico e sedimentar do arco praial localizado entre as praias do Leblon e Arpoador no município do Rio de Janeiro, e sua susceptibilidade aos efeitos das ressacas, fornecendo subsídios para a gestão do litoral.

1.1. Objetivos Específicos

- Caracterizar a variabilidade morfológica e da largura do perfil dinâmico da praia, por meio da aquisição de perfis topográficos 2D;
- Realizar cálculos dos volumes emersos dos sedimentos;
- Caracterizar a textura dos sedimentos superficiais presentes nos diferentes setores do arco praial para análise granulométrica e morfoscópica;
- Correlacionar os eventos de ressaca com a morfologia e sedimentação dos perfis de monitoramento, gerando um mapa de susceptibilidade a impactos costeiros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Praias Arenosas

As praias são ambientes dinâmicos que fornecem proteção contra as ondas de tempestade, absorvendo o impacto das mesmas no litoral (FLAYOU *et al.*, 2021; PUCINO *et al.*, 2021). Para Muehe (2004), as praias são consideradas abrigadas quando protegidas da ação direta das ondas por promontórios, cordões litorâneos, ilhas, quebra-mares e consideradas expostas, quando não protegidas.

As praias arenosas ocupam mais de um terço do litoral global e têm alto valor socioeconômico relacionado à recreação, ao turismo e aos serviços ecossistêmicos. As praias são a interface entre a terra e o oceano, proporcionando proteção costeira contra tempestades (MENTASCHI *et al.*, 2018; VOUSDOUKAS *et al.*, 2020; LUIJENDIJK & DE VRIES, 2020).

Segundo Bird (2008), as praias são constituídas pela acumulação de sedimentos que variam de diâmetro médio, sendo transportados e depositados por ondas e correntes. As de praia lidam com as interações entre as praias e os processos (ondas, correntes, marés e ventos) que atuam sobre elas (MÉNDEZ & RUEDA, 2020; DAVID- ARNOTT, 2010).

O trabalho de Luijendijk *et al.* (2018) mostrou que 31% da costa mundial sem gelo é arenosa. O continente com maior presença de praias arenosas é a África (67%), enquanto na Europa apenas 23% da costa é arenosa (Figura 1).

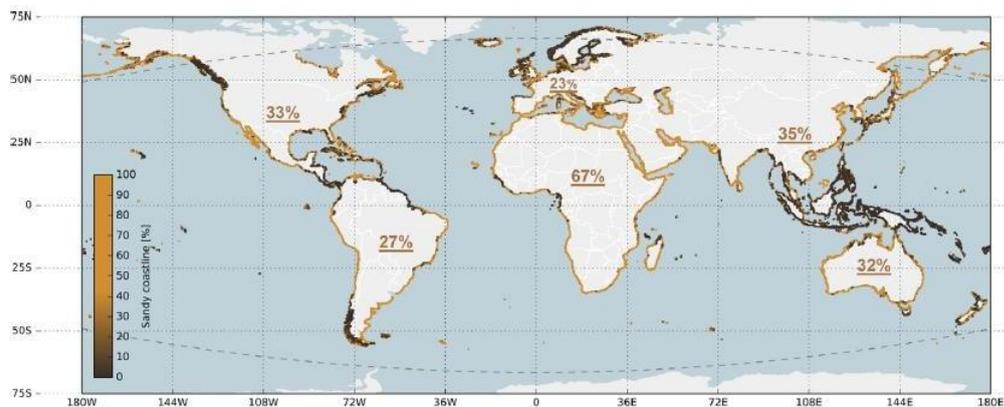


Figura 1. Distribuição global de linhas costeiras arenosas; a escala de cores representa a maior ou menor presença de linhas costeiras arenosas (quanto mais clara maior a porcentagem de praias arenosas). Fonte: LUIJENDIJK *et al.* (2018).

O sistema praial pode ser subdividido em zonas ou setores. Ele geralmente é apresentado em duas dimensões, por meio da diferenciação dos ambientes e respectivos processos ao longo de um perfil transversal à linha de costa (SOUZA *et al.*, 2005). Apresenta uma porção submersa e outra emersa marcada pela dinâmica associada a interação com ondas correntes e marés, sendo chamado também de perfil dinâmico da praia. Esses ambientes são denominados como: pós-praia, onde se encontram as bermas; face de praia e antepraia (composta pela zona de surfe e arrebentação).

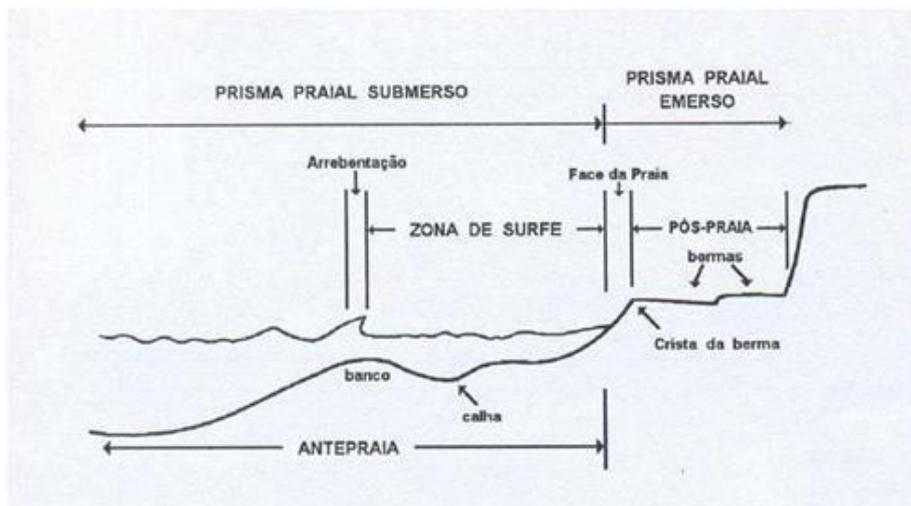


Figura 2. Sistema praial e seus subambientes e zonas. Fonte: MUEHE, 1994.

De acordo com David-Arnott (2010), o **pós-praia** seria a parte da praia sujeita à ação das ondas apenas durante as tempestades. Durante condições sem tempestade, a areia dessa área pode ser retrabalhada por ação eólica. essa zona da praia é formada por uma ou mais superfícies horizontais a sub-horizontais, denominadas de **berma**, podendo apresentar uma ou mais bermas vegetadas denominadas de bermas de tempestade (mais interior). A parte da praia emersa termina (em direção ao oceano) numa rampa de espraiamento-refluxo da onda, denominada de **face praial**. Adentrando o mar, encontramos o que constitui a parte submersa do prisma praial, denominado de **antepraia**, se subdivide em dois subcompartimentos: a antepraia superior e a antepraia inferior, podendo a **zona de surfe** e **arrebentação** ser considerada como parte da antepraia superior ou como compartimento independente. A zona de arrebentação e surfe se inicia com o aumento da esbelteza da onda em função da redução da profundidade, tornando-a

instável e levando à ruptura, quando se desloca em direção à praia, perdendo energia pela fricção com o fundo até se espriar na rampa que constitui a face praial para, a seguir, refluir em direção à próxima onda incidente (MUEHE, 2020).

2.2. Morfodinâmica costeira

As forçantes costeiras como as ondas, ventos, correntes e marés além de moldar as praias arenosas, também contribuem para a construção da morfodinâmica das mesmas (MENDEZ e RUEDA, 2020).

Para Fernandez *et al.* (2020) o modelo morfodinâmico desenvolvido por Wright e Thom (1977) abrangia a ação dos processos e a inter-relação das escalas, e o centro da discussão para os autores era pautada no entendimento de processos costeiros determinados por ondas. De fato, as ondas exercem papel importante na morfologia das praias e a ação das mesmas no litoral exercem a função de engordar ou encurtar este ambiente (BIRD, 2008). Ondas mais esbeltas tendem a remover os sedimentos da porção emersa e transportar os mesmos para a zona submarina e costumam estar associadas à tempestades (ondas destrutivas, predominam no inverno), já as ondas de baixa energia (ondas construtivas), aumentam o aporte sedimentar das praias e ocorrem durante o tempo bom (predominantemente no verão) (COCO *et al.*, 2020; MURRAY *et al.*, 2020).

Dependendo da energia da incidência da onda, os sedimentos irão ser mais finos ou grossos. Se a energia das ondas for baixa, os sedimentos geralmente apresentam-se mais finos devido a baixa interação com o fundo do mar (FOLK, 1980), já em casos de ondas de alta energia, encontram-se dispostos na parte emersa da praia sedimentos mais grossos e pesados em função da maior agitação do ambiente que tende a resuspender o material mais fino e depositá-lo em um ambiente menos energético (BIRD, 2008).

Associada às ações das ondas, a dinâmica das correntes também controla a magnitude e a direção do transporte de sedimentos (DE VRIES *et al.*, 2020). Segundo Bird (2008), as correntes podem ser geradas de várias maneiras e ter múltiplas origens, sendo conhecidas como correntes geradas por ondas; correntes de maré; correntes oceânicas:

As correntes geradas pelas ondas fluem ao longo da costa quando as ondas atingem o litoral formando um ângulo em relação a costa. Já as correntes de maré são correntes de vazante e fluxo (inundação). Por fim, as correntes oceânicas são movimentos lentos de massa de água em resposta a variações na temperatura e salinidade da água, pressão atmosférica e estresse do vento.

Além das três correntes supracitadas, existem ainda as correntes de retorno que, segundo Castelle *et al.* (2016), são fluxos estreitos e concentrados direcionados para o mar que se estendem perto da costa, através da zona de arrebentação. Por último, existem as correntes geradas pelo vento que, por definição são a “força primária que levam à modificação da costa e à criação de formas de relevo erosivas e deposicionais” (DAVID-ARNOTT, 2010).

A relação entre ondas, marés, correntes e transporte de sedimentos, influenciam no perfil dinâmico de uma praia. Os perfis são moldados em grande parte pela ação das ondas. As variações morfológicas que ocorrem nos perfis de praia resultam das mudanças sazonais na energia das ondas incidentes (Figura 3). Assim, os perfis de tempo bom (verão) de uma praia serão mais largos devido à baixa energia das ondas que tendem a transportar sedimentos da zona submarina para a parte emersa da praia, enquanto os perfis de tempestade (inverno) serão mais estreitos por conta da esbeltez das ondas incidentes no litoral, que irão retirar sedimentos da parte emersa e transportá-los em direção a zona submarina (PATCH e GRIGGS, 2006; FLEMMING, 2011). Para Senechal *et al.* (2020), a sazonalidade morfológica das praias será impulsionada pela sazonalidade das forçantes de entrada (por exemplo, vento, onda, correntes, chuva e marés).

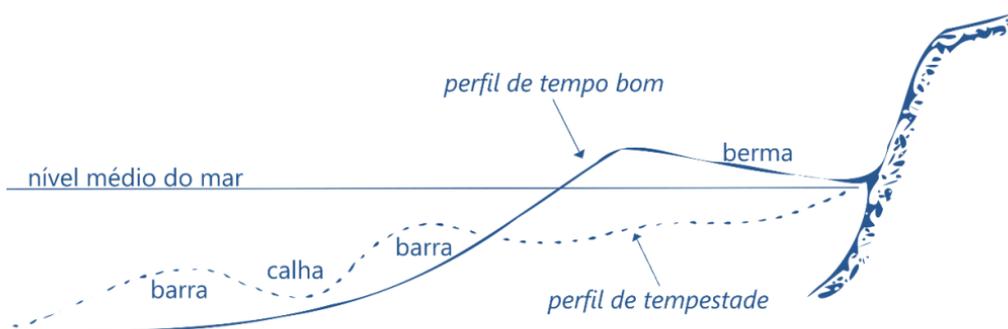


Figura 3. Perfis sazonais de praia. Fonte: CARVALHO (2019) apud KOMAR (1976)

A sazonalidade presente do arco praial estudado é descrita por Rosman *et al.* (2007):

As ondas do quadrante Sudoeste estão ligadas aos perfis de tempestade (inverno), e transportam os sedimentos do Leblon para a praia do Arpoador, tornando o Leblon deficitário de aporte sedimentar, já as ondas de tempo bom (verão), estão atreladas ao quadrante Sudeste e incidem na praia do Arpoador, transportando os sedimentos desta área para o Leblon, fazendo com que haja um superavit no Leblon e um deficit sedimentar no Arpoador.

A interação entre os processos costeiros (ondas, ventos, correntes e marés) e a morfologia dos perfis topográficos de praia fez com que Wright e Short (1979, 1981 e 1984) criassem uma classificação morfodinâmica das praias arenosas da costa australiana, mas que podem ser aplicada a outras praias ao redor do mundo. A morfodinâmica da praia foi classificada através de seis estágios (Figura 4): dois extremos: dissipativo (*dissipative*) e refletivo (*reflective*), e quatro intermediários: banco e calha longitudinal (*longshore bar and trough*); banco e praia rítmicos ou de cúspides (*rhythmic bar and beach*); mega cúspides ou bancos dispostos transversalmente à praia (*transverse bar and rip*) e terraço de baixa-mar (*low tide terrace*).

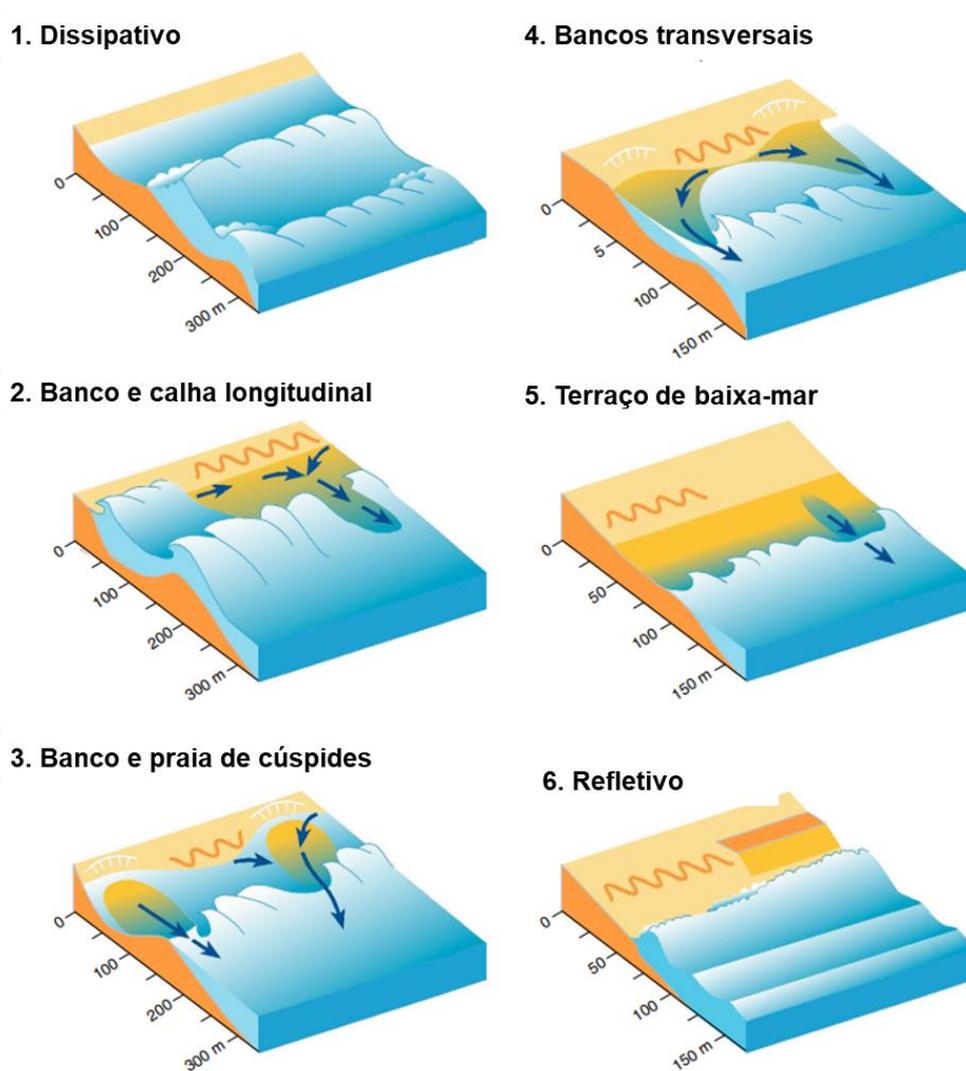


Figura 4. Representação dos estágios morfodinâmicos. Modificado de SHORT e JACKSON (2013) pela autora.

O estágio dissipativo é marcado pela dispersão da energia das ondas de alta magnitude ao longo da zona de surf até perto da costa (face de praia), ocorrendo uma zona de arrebenção extensa (AAGAARD *et al.*, 2013). A medida que energia das ondas diminui próxima à face de praia (em decorrência da relação com o fundo do mar), as praias podem apresentar sedimentos finos e muito finos (PUJOL e ORFILA, 2020). Segundo Fernandez *et al.* (2022), nas praias dissipativas não são notadas alterações significativas no perfil em função da dissipação da energia das ondas ao longo da linha de surfe.

Já nas praias refletivas pode-se observar uma face de praia relativamente íngreme (FLEMMING, 2011) devido à quebra das ondas perto da costa (SHORT e JACKSON, 2013). A quebra das ondas próximo à face de praia está atrelada aos

elevados gradientes de praia e fundo marinho adjacente, reduzindo a largura da zona de surfe (WRIGHT *et al.*, 1979). Os sedimentos encontrados nestas praias são mais grossos pois segundo Aagaard *et al.* (2013):

Além da pequena assimetria da velocidade orbital, as concentrações de sedimentos suspensos e as velocidades constantes das correntes são significativamente menores quando a altura relativa da onda (e, portanto, a tensão de cisalhamento do leito) é pequena e também é provável que o sedimento geralmente mais grosso presente nas praias reflexivas sirva para reduzir as concentrações de sedimentos suspenso na coluna de água.

Bulhões (2006) descreveu os estágios morfodinâmicos presentes na área de estudo, e relata que na praia de Ipanema os estágio refletivo; terraço baixa-mar; bancos transversais e banco e calha longitudinal variam de acordo com a escala temporal. Já na praia do Leblon, o mesmo autor apresenta que os estágios refletivos e terraço baixa-mar são os que predominam.

2.3. Sedimentos Costeiros

A maior parte das feições e ambientes costeiros são sedimentares. Esses sedimentos estão constantemente em trânsito ao longo da costa. Por causa disto, este é um ambiente em que ocorrem, por diversas vezes, erosão (remoção de material, devido a ação de ondas, marés, correntes marinhas e ventos) (CASTELLE e HARLEY, 2020) e acumulação sedimentar (entrada de material de rios próximos, erosão de falésias ou extensões de linha costeira) (NORDSTROM e JACKSON, 2012). A soma dessas entradas e saídas é o chamado balanço de sedimentos da costa, que causa impacto direto sobre a dinâmica e forma do litoral.

Os sedimentos que constituem uma praia, segundo Davis (1985), variam significativamente, tanto temporal quanto espacialmente, em: tamanho, composição e morfologia.

Os sedimentos da praia consistem em partículas de areia ou cascalho de vários tamanhos (Figura 5), cujas proporções podem ser determinadas por análise de tamanho de grão (granulometria). Muitas das praias do mundo são arenosas, mas partículas mais grossas estão frequentemente presentes e podem estar espalhadas por uma praia arenosa ou dispostas em padrões como cúspides ou cristas paralelas à costa (BIRD, 2008).

Escala granulométrica de Wentworth		Escala em "mm"	Escala em "phi"
Bloco > 256 mm (-8 a -12 Φ)	Seixo	256 to 4	-8 to -2
	Cascalho	4 to 2	-2 to -1
	Areia grossa e muito grossa	2 to 0.5	-1 to 1
	Areia média	0.5 to 0.25	1 to 2
	Areia fina e muito fina	0.25 to 0.06	2 to 4
	Silte	0.06 to 0.004	4 to 8
	Argila	< 0.004	> 8.00

Figura 5. Tamanho do grão de areias. Fonte: LOPÉS (2016)

Uma série de análises podem ser realizadas quanto a morfologia dos grãos, tais como: grau de arredondamento, textura superficial (brilho vítreo e fosco), maturidade e selecionamento. Segundo Boggs Jr. (2006), o arredondamento das partículas se refere ao grau de nitidez dos cantos e bordas de um grão. A ação dos ventos e da água auxilia no arredondamento dos grãos (SUGUIO, 1973) devido à diferença da densidade entre os elementos: areias eólicas arredondam-se mais rápido do que as areias em ambiente aquoso (FOLK, 1980).

Para Suguio (1973), o arredondamento apresenta cinco graus distintos: angular, subangular, subarredondado, arredondado, bem-arredondados (Figura 6):

Angular: cantos agudos e grandes reentrâncias fortemente definidas e pequenas reentrâncias mais lisas e menos numerosas. Praticamente não mostram sinais de retrabalhamento; **Subangular:** já mostra efeitos definidos de retrabalhamento. Os fragmentos ainda possuem suas formas originais e as faces permanecem virtualmente intocadas. Ocorre incipiente desgaste dos cantos; **Subarredondado:** os grãos já mostram retrabalhamento considerável. Os cantos são bem arredondados e a área das faces originais é consideravelmente reduzida, mas em forma original do grão ainda permanece distinta; **Arredondado:** as faces originais estão quase completamente destruídas. Os cantos originais estão suavemente arredondados, as grandes reentrâncias são apenas sugeridas e as pequenas reentrâncias estão ausentes; **Bem-arredondados:** neste caso não estão presentes faces, arestas ou cantos originais. A superfície toda é construída de curvas amplamente abertas e áreas planas estão geralmente ausentes. Mas ainda podem ser reconhecidos traços da forma original do grão. O contorno é uniformemente convexo, mas as vezes estão presentes seções planas subordinadas.

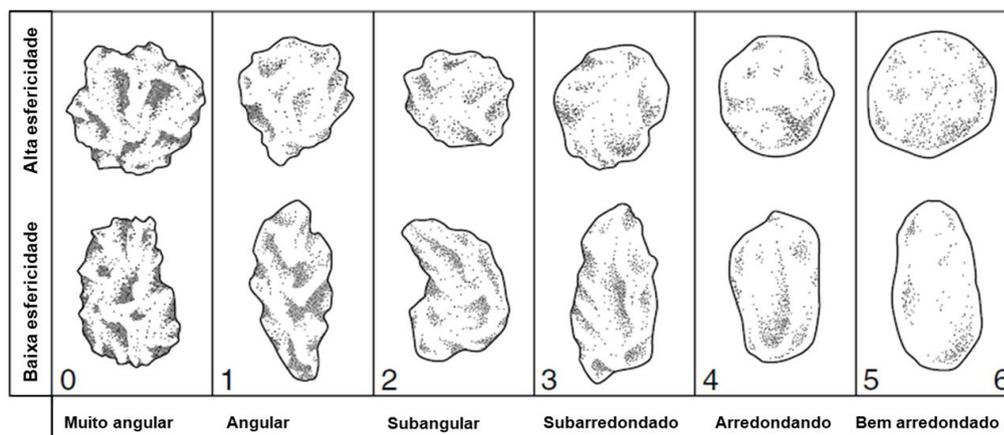


Figura 6. Categorias de arredondamento para grãos de sedimentos. Para cada categoria, é mostrado um grão de baixa e alta esfericidade. Fonte: Modificado de Tucker (2003) pela autora.

Para Wadell (1932), o arredondamento das partículas sedimentares é um tipo especial de desintegração atribuído ao atrito e à solução. Com isso, Folk (1980)

explica que os mais grossos se arredondam com maior facilidade do que os finos pois estes rolam ao longo da superfície, enquanto os finos são transportados por suspensão.

A textura superficial está além da forma, tamanho ou composição mineralógica dos grãos (SUGUIO, 1973) e podem se originar de diversas maneiras, de acordo com Boggs Jr. (2006):

Abrasão mecânica: ocorre durante o transporte de sedimentos; **polimento tectônico:** durante a deformação; e **corrosão química:** oriunda de ataque químico e precipitação de crescimentos autigênicos em superfícies de grãos durante diagênese e intemperismo.

Os efeitos e ações dos ventos e da água (semelhante aos graus de arredondamento), também molda a textura superficial dos grãos, em que grãos de origem eólica apresentam superfícies foscas e os de origem aquosa já evidenciam superfícies lisas e polidas (SUGUIO, 2003). No que tange ao brilho das partículas, as polidas se apresentam brilhante enquanto as foscas são aquelas sem brilho (SUGUIO, 1973).

As informações referentes a textura superficial dos grãos são importantes pois são capazes de registrar o último ciclo de transporte de sedimentos ou o último ambiente de deposição (BOGGS JR. 2006). Para Bond (1954), mudar a forma de uma partícula do tamanho de areia pode exigir um período de transporte muito longo, mas mudar a textura de sua superfície provavelmente requer apenas uma jornada comparativamente curta.

O tamanho, a forma e a textura superficial dos grãos, de acordo com Wentworth (1919) são controlados por diferentes processos: tamanho da partícula; angularidade; tipo da rocha; tipo do movimento; violência do movimento; distância; tamanho das partículas associadas e número de partículas associadas. Suguio (1973) divide esses fenômenos de alteração das partículas em dois grupos: os próprios do meio gerador (fenômenos de alteração) e os ligados à natureza das partículas (fatores de alterabilidade das partículas). A seguir serão ilustradas duas tabelas que indicam estes dois grupos.

Quadro 1. Fenômenos de alteração das partículas. Fonte: SUGUIO (1973, pg. 125)

Ações mecânicas e físicas	
Pré-deposicionais	Característica da erosão: <ul style="list-style-type: none"> • Natureza do agente de transporte • Regime de transporte • Distância de transporte • Papel da população associada
Pós-deposicionais	<ul style="list-style-type: none"> • Retrabalhamentos mecânicos • Efeitos de pressão e temperatura • Papel da população associada

Quadro 2. Fenômeno de alterabilidade das partículas. Fonte: SUGUIO (1973, pg. 125).

Ações físico-químicas	
Pré-deposicionais	<ul style="list-style-type: none"> • Características físico-químicas do meio gerador inicial • Características físico-químicas do meio de transporte
Pós-deposicionais	<ul style="list-style-type: none"> • Características físico-químicas do meio de deposição (diagênese = adição, recristalização e substituição)

Com a explanação dos dois grupos, as ações mecânicas e físicas explicarão a alteração morfológica dos grãos, e são definidas por Suguio (1973) da seguinte forma:

O meio de transporte: traduzido pela natureza do agente de transporte, pelo regime de transporte (laminar ou turbulento). A distância de transporte pode ser relacionada com a distância unidirecional ou distância real resultante da integração de todos os caminhamentos da partícula, desde o local da fonte até o sítio de deposição. Já o papel da população seria o papel do substrato de transporte e interferência do meio de transporte por intermédio de outras partículas.

Bem como todos os processos citados anteriores, o grau de selecionamento de um grão também é influenciado pela ação das ondas e dos ventos. De acordo

com Folk e Ward (1957), os grãos podem ser classificados em: muito bem selecionados; bem selecionados; moderadamente selecionados; pobremente selecionado; muito pobremente selecionado e extremamente mal selecionados (Figura 7).

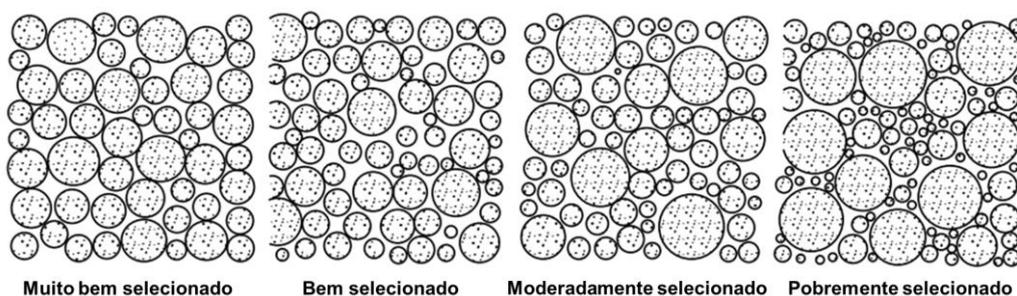


Figura 7. Grau de selecionamento dos grãos. Modificado de TUCKER (2013) pela autora.

Segundo Nichols (2009), o selecionamento do grão está relacionado com a origem e o histórico de transporte dos detritos, uma vez que os grãos tendem a apresentar tamanhos diferentes devido o aumento da distância do transporte ou agitação dos sedimentos. Os sedimentos de uma praia são moderadamente a bem selecionados (MARTINS, 2003) enquanto que sedimentos fluviais são moderadamente a mal selecionados (FOLK, 1980). Para Boggs, Jr (2006):

Sedimentos mal selecionados tendem a ter porosidades e permeabilidades mais baixas do que sedimentos bem selecionados porque os grãos são compactados mais firmemente nesses sedimentos devido a sedimentos mais finos preenchendo os espaços dos poros entre os grãos maiores.

Por fim, a maturidade dos grãos pode ser dividida em textural e composicional (BOGGS, JR. 2006) e é definida segundo Suguio (1973) como o registro combinado do tempo através do qual os processos genéticos foram efetivos e da intensidade de ação desses processos. A maturidade textural aumenta com a quantidade de retrabalho ou distancia percorrida (TUCKER, 2003) e podem ser divididos em quatro estágios de acordo com Folk (1951), através da ocorrência de três eventos: remoção da argila, seleção da fração arenosa e arredondamento dos grãos arenosos de quartzo:

1. **Estágio imaturo**: a porção não-argilosa é pobremente selecionada e os grãos são angulares; 2. **Estágio submaturo**: a porção não-argilosa (silte, areia e cascalho) é ainda pobremente selecionada e os grãos são angulares; 3. **Estágio maturo**: o sedimento não contém argila e os grãos de areia são bem selecionados, mas ainda subangulares; 4. **Estágio supermaturo**: o sedimento não contém argila, a fração arenosa é bem selecionada e os de grãos são bem arredondados.

Já a maturidade composicional é raramente atingida sem a correspondente maturidade textural (SUGUIO, 1973) e refere-se, segundo Boggs Jr (2006), à abundância relativa de grãos de estrutura estáveis e instáveis em um arenito:

Um arenito composto principalmente de quartzo é considerado composicionalmente maduro, enquanto um arenito que contém abundantes minerais instáveis (por exemplo, feldspatos) ou fragmentos de rocha instáveis é composicionalmente imaturo.

2.4. Eventos extremos

Na literatura percebe-se definições distintas do que seria uma tempestade costeira, e isto pode resultar em uma interpretação errônea do fenômeno. Dentre as definições desse fenômeno (Murty, 1984; Bird, 2008; David-Arnott, 2010; Alburquerque *et al.*, 2018; Castelle e Harley, 2020), optou-se pela definição de Harley (2017) para nortear as discussões no presente trabalho, em que:

A **tempestade costeira** é uma perturbação induzida meteorologicamente nas condições marítimas locais (ou seja, ondas e/ou níveis de água) que tem o potencial de alterar significativamente as condições subjacentes da morfologia e expor o pós-praia a ondas, correntes e/ou inundações. Elas geralmente estão associadas à passagem de sistemas ciclônicos, como ciclones tropicais ou extratropicais, que podem atingir o litoral diretamente ou seguir a uma distância suficiente do litoral para influenciar as condições marítimas locais.

O aumento da ocupação populacional nas zonas costeiras, gerará vulnerabilidades frente aos impactos de ondas de tempestades (GUTIERREZ *et al.*, 2009) e estudos recentes mostram que as inundações costeiras estarão atreladas à estes impactos nas regiões costeiras (BUKVIC *et al.*, 2020). Para Kim (2020), as comunidades costeiras:

Correm o risco de sofrer inundações piores no futuro próximo devido aos efeitos combinados do aumento do nível do mar e dos futuros cenários de mudanças climáticas globais, afetando infraestruturas costeiras, ecossistemas, sistemas de transporte e infraestruturas de energia.

Nota-se que a intervenção humana nas zonas costeiras trouxe transformações nos padrões morfológicos e sedimentares a partir da construção de estruturas de engenharia, como por exemplo, esporões, anteparos, muros e quebra-mares, que influenciam negativamente no estoque sedimentar das praias (THOM, 2020). A interferência na morfologia e no balanço sedimentar de uma praia pode ser alarmante frente aos extremos, pois a praia é inibida de se recuperar (resiliência) e as ondas de tempestades começam a ser um problema para a infraestrutura urbana. Segundo Aouiche *et al.* (2016), as tempestades extremas são um dos mais importantes agentes de erosão das praias e também são responsáveis pela destruição de propriedades costeiras e estruturas de engenharia.

A imposição dessas estruturas de “contenção” nas praias arenosas interfere na dinâmica natural de incidência das ondas no litoral, trazendo até perigo para os banhistas em eventos de ressacas (Koerner *et al.*, 2013; Paula 2015). No arco praiial estudado neste trabalho, também é perceptível que estruturas de contenção, principalmente os muros, são geradores de certos impactos na morfologia costeira. Na área de estudo é possível observar dois tipos de muros: um constituído por escadas, que serve para facilitar o acesso aos banhistas (localizado na praia do Leblon) e um muro rígido comum (localizado na praia do Arpoador) (Figura 8).

Pena (2017), descreve um dos muros encontrados no arco praiial entre o Arpoador e o Leblon:

O muro que atualmente sustenta o calçadão foi construído com o propósito inicial de sustentar o maquinário e a estrutura do emissário de Ipanema, fazendo com que as dunas outrora existentes ali fossem aterradas.



Figura 8. Muros de contenção encontrados no arco praial do Leblon ao Arpoador. A: Muro formado por escadas na praia do Leblon. B: Muro rígido localizado na praia do Arpoador.

Em muitos casos, a combinação da perda líquida de sedimentos e a influência de eventos extremos de tempestades gera a erosão de uma praia (Castelle e Harley, 2020). Essas erosões costeiras oriundas de intervenções antrópicas podem ser notadas no mundo e geram segundo Semeoshenkova e Newton (2015):

Ampla variedade de impactos ecológicos e socioeconômicos negativos, como aumento da perda de propriedade e potencial perda de vidas; danos à infraestrutura; perda de turismo e recreação; contaminação ou desaparecimento de poços de armazenamento de água; perda de áreas costeiras e bentônicas (flora e fauna).

A erosão costeira no mundo pode ser agravada pelas mudanças climáticas (VOUSDOUKAS *et al.*, 2020). Nas áreas costeiras da África, a pressão antrópica e das atividades econômicas como a pesca, turismo, comércio e serviços (THIOR *et al.*, 2019) faz com que a erosão seja um problema para a gestão costeira (KASMI

et al., 2020).

O aumento da população costeira nos Estados Unidos e na Austrália expõe a fragilidade destas áreas ao risco à eventos de tempestade e ao aumento do nível do mar (GUTIERREZ *et al.*, 2009; GIBBS, 2020). Em ambos os países se percebe que as vulnerabilidades costeiras estão atreladas aos impactos econômicos pois os imóveis mais caros desses países se localizam próximos ao mar (Harley, 2017; Leatherman, 2017). Voudouskas *et al.* (2020) cita que a Austrália emerge como o país mais afetado pelas erosões de praias arenosas, com cerca de 11.426 km de litoral, enquanto os Estados Unidos apresentarão entre 3.945 a 5.530 km de litoral.

Diante das problemáticas que a erosão pode trazer às praias arenosas, gestores costeiros em todo o mundo buscam criar políticas que amenizem estes impactos (THOM, 2020) e pensar em medidas de mitigação e adaptação mais baratas, como:

Revegetação dos ecossistemas costeiros, que contribuem para a atenuação das ondas, captura de sedimentos e que se auto-adaptam ao nível da água. Em última análise, em alguns locais, medidas mais drásticas, como a realocação estratégica de estruturas e pessoas ou o abandono de terras, podem revelar-se a única solução sustentável (MENTASHI *et al.*, 2018).

Na área de estudo, a erosão costeira é oriunda de eventos de tempestade que incidem no arco praial, normalmente no período do inverno-outono, e retiraram os sedimentos emersos da praia tornando o perfil de praia mais estreito e conseqüentemente mais vulnerável as ondas de alta esbeltez, principalmente em trechos localizados na praia do Leblon (Figura 9 e 10).



Figura 9. Mobiliário do quiosque Azul é atingido após ondas de tempestades atingirem o litoral. Através da imagem também é possível identificar a transposição de sedimentos na ciclovia da orla. Fonte: O Globo.



Figura 10. Transposição de sedimentos na ciclovia e na rua Delfim Moreira no Leblon.

3. ÁREA DE ESTUDO

Localizada no município do Rio de Janeiro, a área de estudo está inserida entre os bairros do Leblon e de Ipanema (Zona Sul). Os bairros localizam-se entre a Lagoa Rodrigues de Freitas, o Morro Dois Irmãos e a Pedra do arpoador, fazendo divisa com os bairros da Gávea, Lagoa, Vidigal e Copacabana. Segundo Bulhões (2006), trata-se de um arco praial arenoso apoiado sobre cordões litorâneos holocênicos, exposto a regimes de micro-maré e dominadas por ondas. A orientação geral do litoral é Leste-Oeste.



Figura 11. Mapa de localização da área de estudo.

3.1. Contexto tectônico regional

O arco praial estudado está situado na Região Sudeste do Brasil. Essa região sofreu deformações do ciclo termo-tectônico Brasileiro (450-700 Ma). Segundo Schobbenhaus e Campos (1984), o ciclo Brasileiro representa o mais expressivo e importante evento ou conjunto de eventos tectono-magmáticos de formação de unidades litoestruturais supracrustais ocorrido na plataforma Sul-Americana, no

Proterozóico Superior constituindo faixas ou regiões dobradas e cobertura plataformais correlatas.

Dentre as oito faixas de dobramentos, a área de estudo está inserida na Faixa de Dobramento Sudeste, ou como é mais conhecida, Faixa Móvel Ribeira. Para Heilbron e Machado (2003), o Cinturão Ribeira do Sudeste do Brasil ocupou uma posição central no Gondwana Ocidental e é uma das unidades-chave para reconstruir a história deste supercontinente.

A Faixa Móvel Ribeira foi subdividida em quatro terrenos tectono-estratigráfico: Ocidental, Paraíba do Sul, Oriental e Cabo Frio. Dentro dos terrenos, o que é identificado como de interesse para a pesquisa é o Terreno Oriental. Segundo Heilbron *et al.*, (2016), o Terreno Oriental compreende as rochas de arco magmático da faixa e está limitado por uma zona de cisalhamento complexamente redobrada com mergulhos subverticais a moderados para NW na porção centro-sul do estado, e mergulhos para SE na porção noroeste.

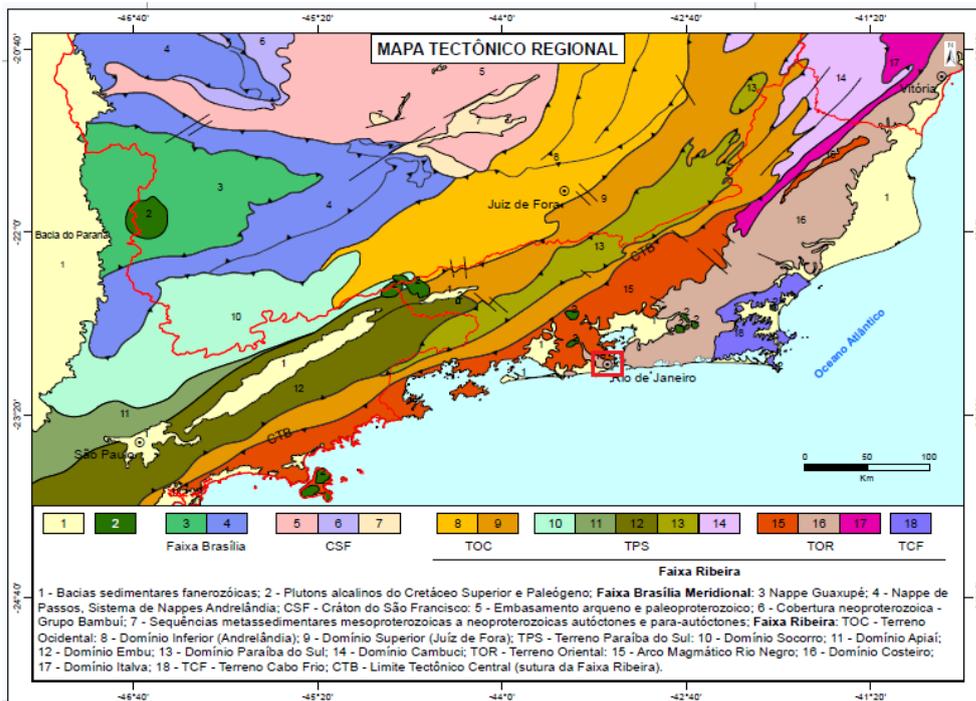


Figura 12. Mapa tectônico regional do Estado do Rio de Janeiro, com destaque em vermelho da área de estudo. Fonte: HEILBRON et al. (2016).

Uma das unidades metassedimentares inserida na área de estudo é a Unidade São Fidelis. O Grupo São Fidélis aflora em uma faixa entre a escarpa da Serra do Mar e a planície costeira, desde a região metropolitana do Rio de Janeiro até ao norte

junto à divisa com o estado do Espírito Santo (Heilbron *et al.*, 2016 *apud* Valeriano *et al.*, 2012). No topo do Grupo São Fidélis ocorre gnaisse bandado (NPsfbgn) com intercalações, ou lentes, de rocha calcissilicática, anfibolito e quartzito puro ou feldspático. Seu litotipo predominante é um (sillimanita) - (granada) - biotita gnaisse de composição tonalítica, migmatítico, mesocrático, de grão médio. Apresenta textura bandada ou arranjos com porfiroblastos de feldspato. Além da biotita, contém granada, sillimanita e, ocasionalmente, muscovita (TUPINAMBÁ, 2012).

A área de estudo está inserida na Bacia de Santos e segundo Almeida (1976) é uma depressão meso-cenozóica, tectônica repleta de basaltos e sedimentos, localizada na margem continental entre o estado do Rio de Janeiro e Santa Catarina. Em frente à bacia, o planalto atlântico do sudeste do Brasil termina em escarpas litorâneas, de 800 a 2.200 metros de altura, em uma cadeia montanhosa de 1.200 quilômetros, genericamente conhecida como Serra do Mar. A Bacia de Santos é uma bacia de margem passiva gerada durante o processo de ruptura do continente Gondwana (Figura 13), no Neocomiano, culminando com a abertura do Oceano Atlântico Sul e a separação dos continentes americano e africano (Mio *et al.*, 2005).

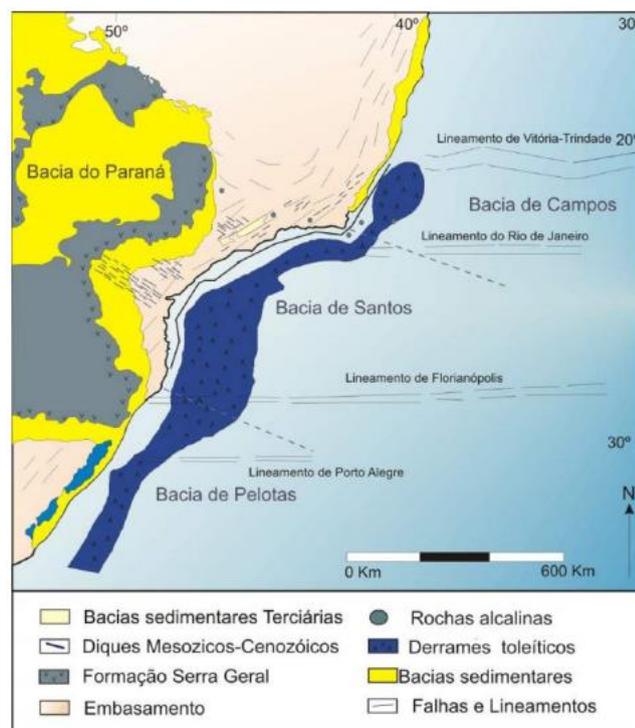


Figura 13. Presença dos enxames de diques toleíticos e derrames nas bacias marginais. Fonte: HEILBRON *et al.* (2016).

3.2. Contexto Geomorfológico Regional

No estado do Rio de Janeiro ocorre uma diversidade de unidades litoestratigráficas associadas às coberturas sedimentares do Quaternário. Constituem em sua maioria depósitos de sedimentos inconsolidados relacionados a processos geológicos continentais, costeiros e marinhos recentes ou atuais, que atuam sobre um relevo composto de serras, planaltos, maciços dissecados e um extenso litoral (HEILBRON *et al.*, 2016).

De acordo com o mapa geomorfológico do Rio de Janeiro (Dantas, 2001), a localização da área de estudo (Figura 14), está inserido no Sistema de Relevos de Agradação Litorâneos. Segundo Dantas (2001) as planícies costeiras (Terrenos Arenosos de Terraços Marinhos, Cordões Arenosos e Campos de Dunas) seriam definidas como superfícies sub-horizontais, com micro relevo ondulado de amplitudes topográficas inferiores a 20 metros, geradas por processos de sedimentação marinha e/ou eólica. Terrenos bem drenados com padrão de drenagem paralelo, acompanhando as depressões intercordões.

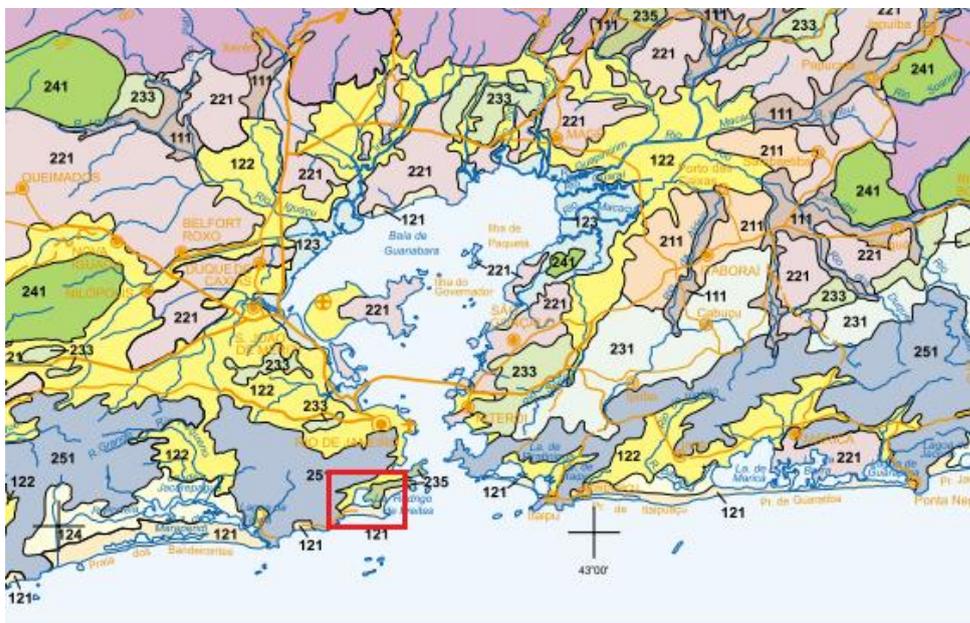


Figura 14. Mapa Geomorfológico do estado do Rio de Janeiro, com destaque em vermelho na área de estudo. Fonte: DANTAS (2001).

Já as planícies colúvio-alúvio-marinhas (Terrenos Argilo-Arenosos das Baixadas) segundo o autor foram classificados sendo superfícies sub-horizontais, com gradientes extremamente suaves e convergentes à linha de costa, de interface

com os Sistemas Depositionais Continentais (processos fluviais e de encosta) e marinhos. Terrenos mal drenados com padrão de canais meandrante e divagante. Presença de superfícies de aplainamento e pequenas colinas ajustadas ao nível de base das Baixadas (DANTAS, 2001).

Para entendermos a origem do sedimento disposto no arco praial se faz necessário entender a evolução geológica da área de estudo, mas também analisar e entender como a geomorfologia do entorno e da própria área de estudo influenciaram para tal origem. Nos parágrafos anteriores foram evidenciadas informações da geomorfologia do arco praial em sim, e portanto nos parágrafos a seguir serão apresentadas informações e dados a fim de entender a evolução geomorfológica do entorno e identificar influência dessas feições no sedimento das praias.

Segundo Dantas (2001), o estado do Rio de Janeiro pode ser compartimentado em duas unidades morfoestruturais: o Cinturão Orogênico do Atlântico e as Bacias Sedimentares Cenozóicas. No que tange o interesse do artigo, a unidade “Cinturão Orogênico” será incorporada à discussão, mais especificamente a unidade morfoescultural denominada “Maciços Costeiros” (Figura 15). Essa unidade morfoescultural compreende um conjunto diversificado de rochas metamórficas e ígneas de idade pré-cambriana a eopaleozóica. Essas rochas, incluídas na Faixa de Dobramentos Ribeira, foram submetidas a diferentes ciclos orogênicos, culminando, no final do Proterozóico, com o Evento Brasileiro (Heilbron et al., 1995). Além disso, essa unidade morfoescultural compreende um conjunto de maciços montanhosos relativamente alinhados sob direção WSW-ENE, desde o Maciço da Juatinga ao maciço da Região dos Lagos, estando situados em meio às baías e baixadas litorâneas (Dantas, 2001).

Após um longo período de estabilidade tectônica no Paleozóico e início do Mesozóico, esses terrenos sofreram uma tectônica extensional associada à reativação Wealdeniana a partir do Jurássico (Almeida, 1967). Essa tectônica extensional prolongou-se pelo Terciário, gerando uma série de falhamentos normais, que produziram os maciços costeiros e as escarpas serranas, tais como as serras do Mar e da Mantiqueira (Asmus & Ferrari, 1978). Segundo Asmus & Ferrari (1978), tanto os maciços costeiros, quanto os escarpamentos das cadeias montanhosas das serras do Mar e da Mantiqueira são resultantes do soerguimento e basculamento de blocos escalonados de direção WSW-ENE. Essa tectônica

paragnaisses intercalados com rochas supracrustais; Rochas granitóides intrusiva. O conjunto de ortognaisses está incluído na unidade denominada de gnaiss *archer*, onde predomina a composição do tipo hornblenda-biotita gnaiss bandado migmatítico (ICMBIO, 2008 *apud* HEILBRON *et al.*, 1993).

As Ilhas Cagarras também podem ser incorporadas no contexto da geomorfologia do entorno. As ilhas que compõem o Monumento Natural das Ilhas Cagarras são constituídas por rochas granítico-gnaíssicas da Suite Rio de Janeiro. São rochas sin a tardi-colisionais, de idade Neoproterozóica (Brasiliano II, cerca de 560 Milhões de anos atrás). Têm por característica uma estrutura oftálmica, dada por megacrístais lenticulares de microclina de 3 a 5 cm, em matriz granítica de quartzo, plagioclásio e abundante biotita.

Podem apresentar teores expressivos de granada e hornblenda. Em zonas menos deformadas é observado fluxo magmático. As rochas da Suite Rio de Janeiro são cortadas por diques de diabásio do Enxame da Serra do Mar, datados em outras localidades como de idade Cretácea (cerca de 130 milhões de anos atrás), com direção geral L-O, visíveis especialmente na Ilha Comprida (Dantas, 2001).

Além da classificação proposta por Dantas (2001), a área de estudo está situada no Macro-compartimento dos Cordões Litorâneos, que incorpora cinco compartimentos descritos por Muehe e Valentini (1998): Compartimento Região dos Lagos (do cabo Frio [Arraial do Cabo]) a Niterói; Compartimento baía de Guanabara (entorno da baía de Guanabara); Compartimento de Jacarepaguá (de Ipanema à Pedra de Guaratiba); Compartimento baía de Sepetiba (da Pedra de Guaratiba à ilha da Marambaia e orla da baía de Sepetiba); Compartimento baía da Ilha Grande (da ilha da Marambaia à ponta do Juatinga). Em trabalho recente, Muehe *et al.* (2018) incluiu as praias oceânicas do Rio de Janeiro no Compartimento Baía de Guanabara (Figura 16), e conseqüentemente a área de estudo se enquadra também neste compartimento, além do Compartimento de Jacarepaguá (Figura 17).

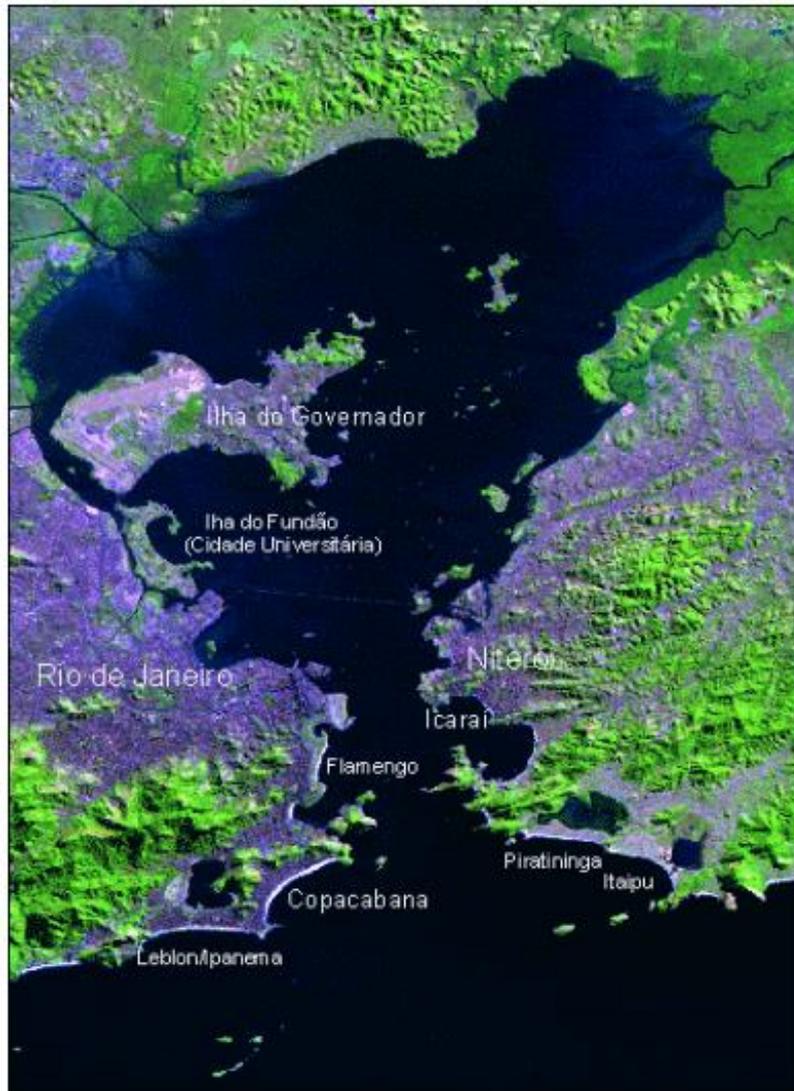


Figura 16. Compartimento da Baía de Guanabara. Fonte: MUEHE et al. 2018.

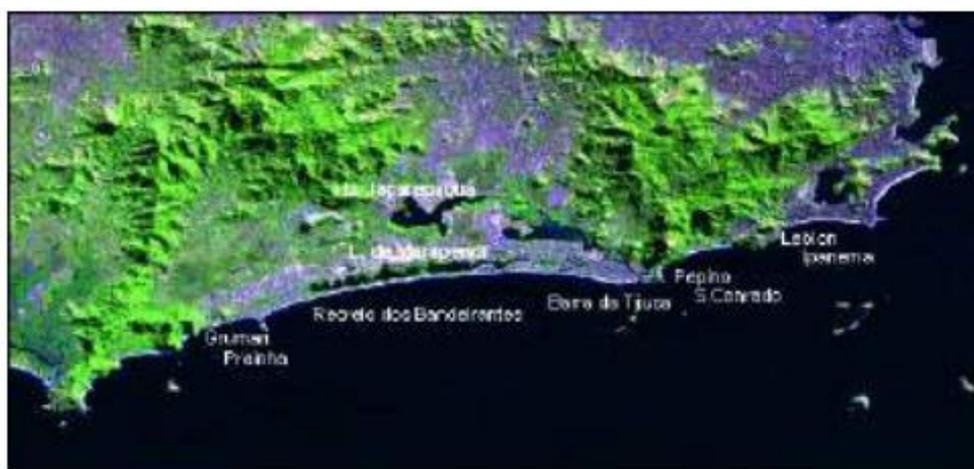


Figura 17. Compartimento de Jacarepaguá. Fonte: MUEHE et al. 2018.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A presente pesquisa contou com quatro anos de monitoramento (2018, 2019, 2020 e 2021), em que se sucedeu levantamentos topográficos e coletas de sedimentos nos trabalhos de campo, que ocorreram inicialmente de forma mensal e, eventualmente, durante as ressacas incidentes ao litoral. Os campos sob condição de ressaca se realizaram nos meses de agosto de 2018 e julho de 2019. A coleta dos sedimentos ocorreu somente nos anos de 2018 e 2019, nos setores do pós-praia, berma, escarpa de tempestade (caso sinalizada), face de praia e zona de surfe (caso as condições de mar fossem favoráveis para tal coleta).

Em 2020, devido à pandemia da Covid-19, os trabalhos de campo foram realizados apenas nos três meses iniciais do ano (janeiro, fevereiro e março). Neste período, o acesso às praias foi restrito e a continuidade dos levantamentos ficou comprometida. Já em 2021, os levantamentos puderam ser feitos normalmente, porém o foco da pesquisa mudou: analisar as variações sazonais e coletar amostras somente no pós-praia e face de praia. Diante disso, os trabalhos de campo ocorreram somente no verão e no inverno. Em 2021 também sucedeu-se campos extras no mês de julho.

Na conjuntura final, foram realizados 32 levantamentos com aproximadamente 128 perfis topográficos no total. Perante esta vasta gama de dados, decidiu-se focar em perfis mais expressivos durante os quatro anos de monitoramento e estes decorreram-se no final de cada estação do ano, uma vez que ilustrariam as transformações e possíveis impactos ocorridos durante os meses de inverno e verão. Foram selecionados então os dias 13/04/2018; 12/03/2019; 18/03/2020 e 15/03/2021 (perfis de tempo bom) e os dias 13/09/2019; 20/09/2019; 20/07/2021; 20/08/2021 (perfis de tempestade).

4.1. Perfis Topográficos transversais à praia

O levantamento topográfico para a caracterização da morfologia praial foi realizado por meio de perfis transversais à praia com o método das balizas proposto por Emery (1967) (Figura 18). Essa técnica consiste na realização de perfis perpendiculares à linha de praia, começando no limite interno da praia (vegetação, dunas ou estrutura rígida de engenharia), indo até o nível do recuo máximo das

ondas, para registrar a topografia da praia no momento da observação. No caso do presente estudo, o limite mais interno do perfil foi determinado pelo calçadão.



Figura 18. Utilização das balizas de Emery em campo. Fonte: A autora.

Foram definidos quatro perfis de monitoramentos aproximadamente equidistantes entre si no arco praiado estudado, com o intuito de identificar os pontos mais suscetíveis a ações de ondas e seus respectivos impactos na infraestrutura urbana da orla, bem como os pontos mais estáveis a estas transformações (Figura 19). Delimitou-se, portanto, 2 pontos à oeste do Canal do Jardim de Alah (LB01 e LB02) e 2 pontos à leste do mesmo ponto de referência (IP01 e AR01). O ponto LB01 localiza-se na praia do Leblon e encontra-se próximo à Rua Venâncio Flores e ao Baixo Bebê ($22^{\circ}59'15.22495''S/ 43^{\circ}13'27.29884''W$). O ponto LB02 também no Leblon, encontra-se próximo à Rua Afrânio de Melo e em frente ao quiosque La Carioca ($22^{\circ}59'11.73885''S/43^{\circ}13'02.12989''W$). Já o ponto IP01, encontra-se na praia de Ipanema e se localiza próximo à Rua Joana Angélica e ao prédio número 402 ($22^{\circ}59'11.76590''S/43^{\circ}12'24.26634''W$). Por fim, o ponto AR01 encontra-se na praia do Arpoador, próximo ao prédio número 91 e no alinhamento do poste de iluminação de numeração L03 no calçadão ($22^{\circ}59'18.27313S/43^{\circ}11'35.28631$).



Figura 19. Local dos quatro perfis de monitoramento ao longo do arco praiado entre Leblon e Arpoador.

As cotas dos perfis topográficos foram decididas de forma arbitrária: no ponto LB01 e LB02 a cota foi de 5 metros, assim como na praia do Arpoador (ponto AR01). Já no ponto IP01 a cota atribuída foi de 7 metros.

4.2. Coleta de sedimentos em campo

Seguindo a mesma escala temporal de levantamento dos perfis topográficos, sucederam-se as coletas de amostras nos respectivos pontos de monitoramento. As amostras foram coletadas por setores da praia entre 2018-2020, sendo realizadas no pós-praia, escarpa de tempestade (se presente em campo), berma, face de praia e zona de surf. A partir de 2021, as amostras foram coletadas apenas nos setores do pós-praia e da face de praia, trechos onde se observaram as principais variações nos anos anteriores. Vale ressaltar que a coleta no subambiente “zona de surfe” em condições de mar agitado se apresentou por vezes inviável, sendo realizada apenas em condição de tempo bom. Na parte final do trabalho optou-se por utilizar apenas os setores emersos da praia. As amostras foram devidamente ensacadas com a identificação de seu subambiente e o nome do ponto de monitoramento (Figura 20).



Figura 20. Coleta de amostra granulométrica em campo. Fonte: A autora.

4.3. Análise Granulométrica

No Laboratório de Geografia Física da PUC-Rio (LAGEFI), as amostras foram lavadas para a retirada do sal (procedimento repetido por quatro vezes) e secas em estufa a 50°C. Posteriormente as mesmas foram quarteadas no quarteador tipo Jones (Figura 21).



Figura 21. Quarteador tipo Jones. Fonte: A autora.

Após secas e quarteadas, as amostras passam pelo processo de peneiramento a seco. Nesta etapa são usadas treze peneiras com diferentes aberturas de malhas, segundo normas da ABNT: 4,000 mm; 2,830 mm; 2,000 mm; 1,410 mm; 1,000 mm; 0,710 mm; 0,500 mm; 0,350 mm; 0,250 mm; 0,177 mm; 0,125 mm; 0,088 mm; 0,062 mm (Figura 22)



Figura 22. Agitador de peneiras ACS Gold e as respectivas malhas utilizadas. Fonte: A autora.

Após o processo de peneiramento, as informações são analisadas estatisticamente no software GRADISTAT versão 8.0 (2007-2010). Além de obter média, mediana e outros atributos, o GRADISTAT é capaz de classificar os sedimentos analisados de acordo com o tamanho do grão, como sugere a classificação de Wentworth (1922) (Quadro 3).

Quadro 3. Classificação granulométrica segundo Wentworth (1922).

Classificação	Φ	<i>mm</i>
Areia muito grossa	-1 a 0	2 a 1
Areia grossa	0 a 1	1 a 0,5
Areia média	1 a 2	0,5 a 0,25
Areia fina	2 a 3	0,25 a 0,125
Areia muito fina	3 a 4	0,125 a 0,0625
Silte	4 a 8	0,0625 a 0,0039
Argila	>8	<0,0039

Através de informações da classificação granulométrica, como predominância dos grãos para determinado setor praiial (pós-praia e face de praia), foi possível identificar o grau de selecionamento dos grãos bem como seu grau de maturidade.

4.4. Análise morfooscópica

Nessa etapa, são exploradas as respectivas morfologias dos grãos: grau de arredondamento e textura superficial das partículas (brilho e fosqueamento). Esses parâmetros foram escolhidos a fim de analisar o tipo da energia da onda, a ação do vento nesses grãos e o local onde esses sedimentos foram analisados (pós-praia e face de praia). Para a obtenção dos dados morfológicos dos grãos, foi adotado um método de amostragem proposto por Folk (1980) em que a fração da areia média é selecionada para o estudo e posteriormente análise do grau de arredondamento de cerca de 100 grãos em um microscópio binocular (Figura 23 – FOLK, 1980) (Tabela 1). Para este processo, o grão de quartzo foi selecionado para análise devido à sua abundância, dureza e estabilidade (DIAS, 2004).

Foram selecionadas 48 amostras coletas entre os anos de 2018 e 2021 referentes aos dias 13/08/2019, 20/09/2019 e 20/08/2021 (condição de tempestade) e dias 13/04/2018, 12/03/2019 e 18/03/2020 (condição de tempo bom).



Figura 23. Análises morfoscópicas realizadas no LAGEFI PUC-Rio. Fonte: A autora.

Tabela 1. Tabela utilizadas nas análises morfoscópicas. Retirado de ARAÚJO (2020).

Amostra: _____ Local: _____ Fração analisada: _____

Bem arredondado	Arredondado	Subarredondado	Subangular	Angular	Muito Angular
		<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>		
		40	21		
Brilho vítreo			Brilho Fosco		
			<input type="checkbox"/>		43

4.5. Cálculo de volume emerso

O volume é definido como a área da seção transversal multiplicada por uma unidade de largura, 1 pé ou 1 m, de praia. As alterações de volume podem ser usadas para determinar o efeito de um erro de referência ou correção de maré, ou para indicar o movimento de sedimentos no perfil (BIRKEMEIER, 1984). Esse tipo de análise e cálculo já vem sendo utilizada por outros autores, como Oliveira Filho *et al.* (2016); Pinto (2018); Oliveira Filho *et al.* (2020); Pinheiro *et al.* (2021) e Dutra *et al.* (2022) para um melhor entendimento sobre a morfodinâmica da praia. Para a obtenção dos valores do volume emerso da praia, os autores utilizaram dados como altimetria e distância dos perfis topográficos (Figura 24). Foi considerado o valor da cota inicial (X_{on}) e o da cota final (X_{off}) e a altimetria de 0 m (baseado no nível médio do mar – N.M.M.) com elevação de referência para o cálculo de volume (PINTO, 2018; OLIVEIRA FILHO *et al.*, 2020).

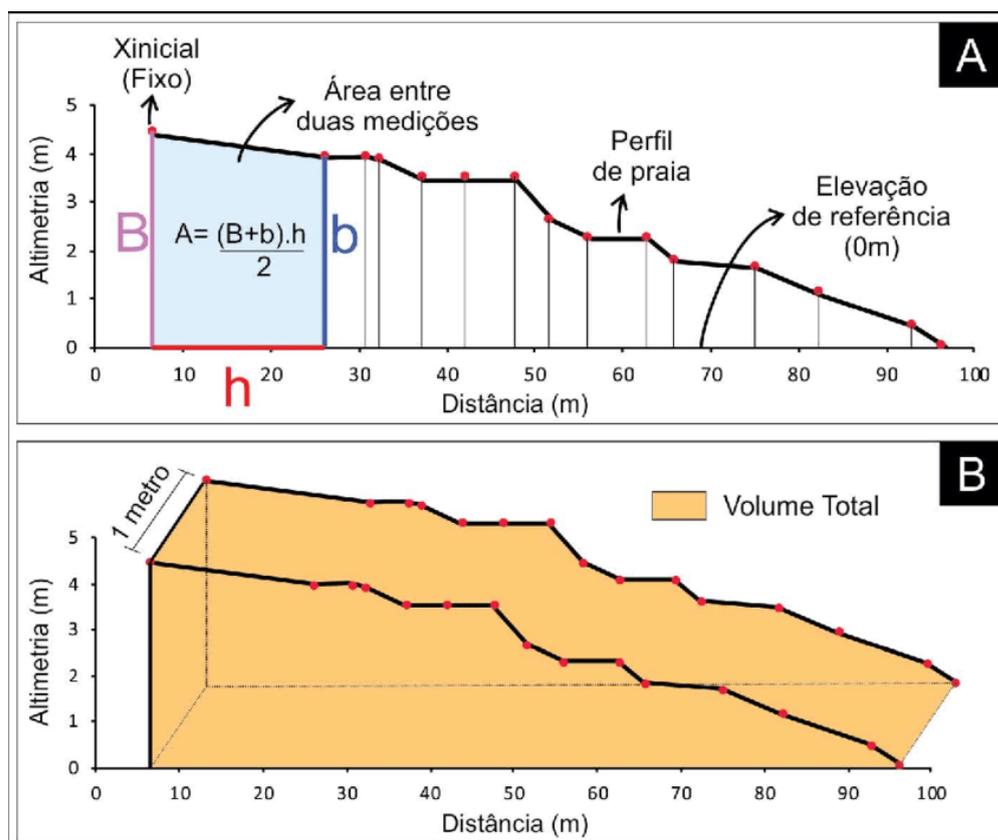


Figura 24. . Esquema representativo do cálculo de volume emerso. Fonte: OLIVEIRA FILHO *et al.*, 2020.

4.6. Análise de alertas de ressacas emitidos pela mídia

A fim de melhor compreender a morfologia da praia observada nos levantamentos de campo, fez-se necessário listar os principais eventos extremos que atingiram o litoral da área de estudo no intervalo temporal analisado, identificando assim o grau de influência desses eventos na dinâmica mapeada.

Como base de dados para identificarmos estes eventos, foram analisados avisos emitidos pela Marinha do Brasil através de notas à imprensa. Outros meios midiáticos também foram incorporados, como: twitter do Alerta Rio; facebook da COR (Centro de Operações do Rio de Janeiro); facebook do Serviço Meteorológico da Marinha; portal G1 (com as palavras chaves “ressacas” e “mar”).

5. RESULTADOS

Os resultados a seguir apresentam dados sobre a dinâmica do arco praial, bem como elementos que permitem identificar a susceptibilidade e fragilidade do mesmo à chegada de eventos de tempestades, além da variabilidade sedimentar. Ao longo de quatro anos (2018-2021), a pesquisa focou em mostrar e discutir os eventos mais expressivos com a finalidade de apresentar conexões entre as variáveis estudadas.

Debruçou-se sobre os dias 13/09/2018; 20/09/2019; 20/07/2021 e 20/08/2021 para identificar as mudanças ocorridas nos perfis de tempestade. Já os dias 13/04/2018; 12/03/2019; 18/03/2020 e 15/03/2021 foram escolhidos para observar os perfis de tempo bom. O dia 13/04/2018 foi preferido pelo fato da ausência de ressacas no início de 2018 (janeiro, fevereiro e março), sendo identificado em campo perfis topográficos extensos.

Os resultados apresentados no referido tópico serão divididos em subtópicos: perfis topográficos transversais à praia; cálculo do volume emerso; alertas de ressacas emitidas pela mídia; granulometria e morfoscopia.

5.1. Perfis Topográficos Transversais à Praia

Ao decorrer de quatro anos de monitoramento, mais de 30 perfis topográficos foram analisados. Primeiramente, os perfis foram levantados mensalmente (2018-2019), posteriormente em 2020 somente os perfis de tempo bom foram monitoramento devido à pandemia de Covid-19 e por fim, o levantamento se sucedeu de forma trimestral, com o intuito desta vez de observar os perfis de tempo bom e tempestade em 2021.

Com extensos dados referentes aos perfis topográficos, notou-se que dentre os quatros pontos de monitoramentos, os posicionados nos extremos do arco praial (LB01 e AR01) foram os que apresentam maior dinâmica em termos de largura de praia; o ponto LB02 pode ser considerado como o mais vulnerável à ação de ondas de tempestade, e o ponto IP01 é considerado pouco vulnerável às ações de ondas de tempestades, devido sua localização geográfica (no meio do arco praial), fazendo com que o mesmo sempre receba sedimentos oriundos do trânsito gerado pela deriva litorânea, além da presença de ilhas localizadas bem a frente deste trecho da praia que conferem certa proteção a costa. Em linhas gerais, as variações sazonais os perfis de tempestade tendem a ser mais curtos e perfis de tempo bom mais largos em função da variação sazonal da energia das ondas.

Em relação à variação de largura da praia, os perfis de tempo bom foram detectados na sua maioria no final de períodos de influência do verão e com ausência significativa de ressacas no arco praial, culminando conseqüentemente na acumulação dos sedimentos provocados por ondas de baixa energia que tendem a transportar sedimentos da zona submarina para a parte emersa da praia. Já os perfis de tempestade mais significativos foram, quase todos, identificados no dia 20/07/2021, com ressalva para o ponto LB01 que apresentou seu menor perfil no dia 20/08/2021, final da estação onde ocorrem mais perdas sedimentares, tanto pela ação direta das ondas quanto pela inversão da deriva, conforme descrito acima.

Nos gráficos ilustrados a seguir, é evidente a dinamicidade dos pontos de monitoramento, principalmente dos pontos LB01 e AR01, localizados nas extremidades do arco praial. Além disso, os gráficos apontam para a época em que a praia mais se desenvolve (muitas das vezes no verão) e os momentos em que o arco praial é impactado por ressacas (comuns no inverno).

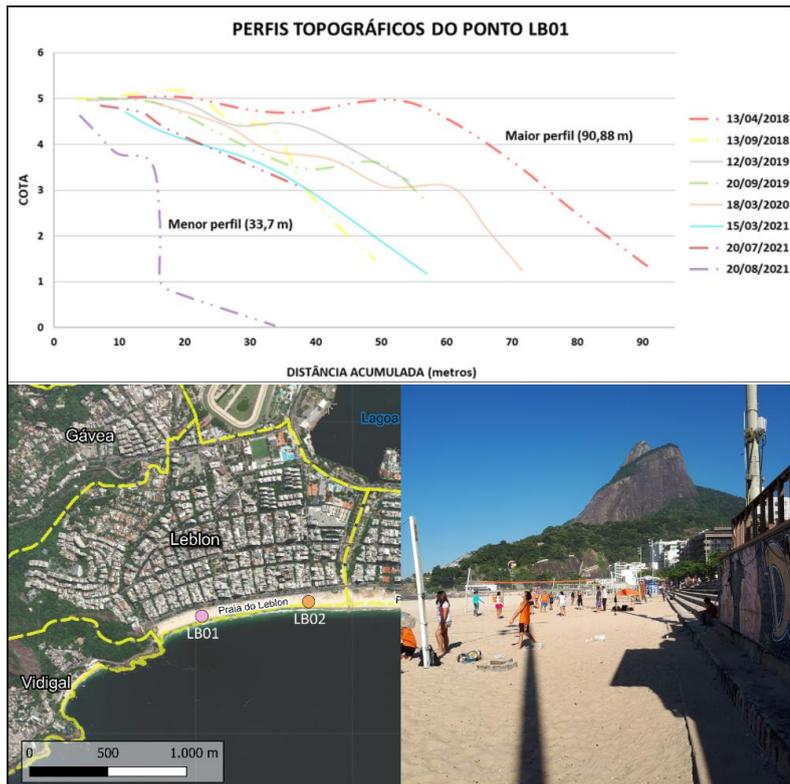


Figura 25. Variações sazonais observadas no ponto LB01, com informações referentes ao maior perfil (90,88 metros) e o menor perfil (33,7 metros).

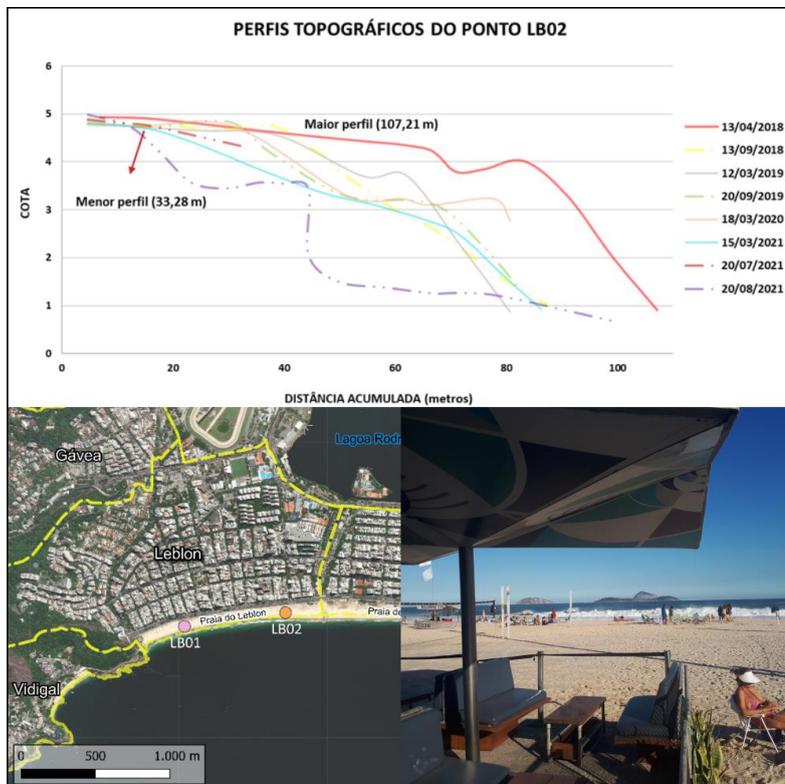


Figura 26. Variações sazonais observadas no ponto LB02, com informações referentes ao maior perfil (107,21 metros) e o menor perfil (33,28 metros).

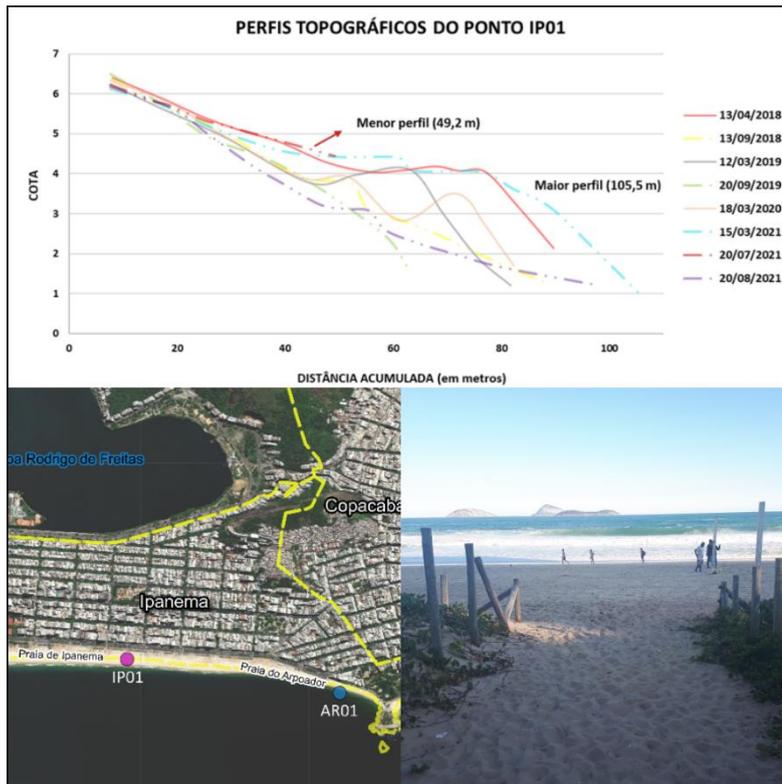


Figura 27. Variações sazonais observadas no ponto IP01, com informações referentes ao maior perfil (105,5 metros) e o menor perfil (49,2 metros).

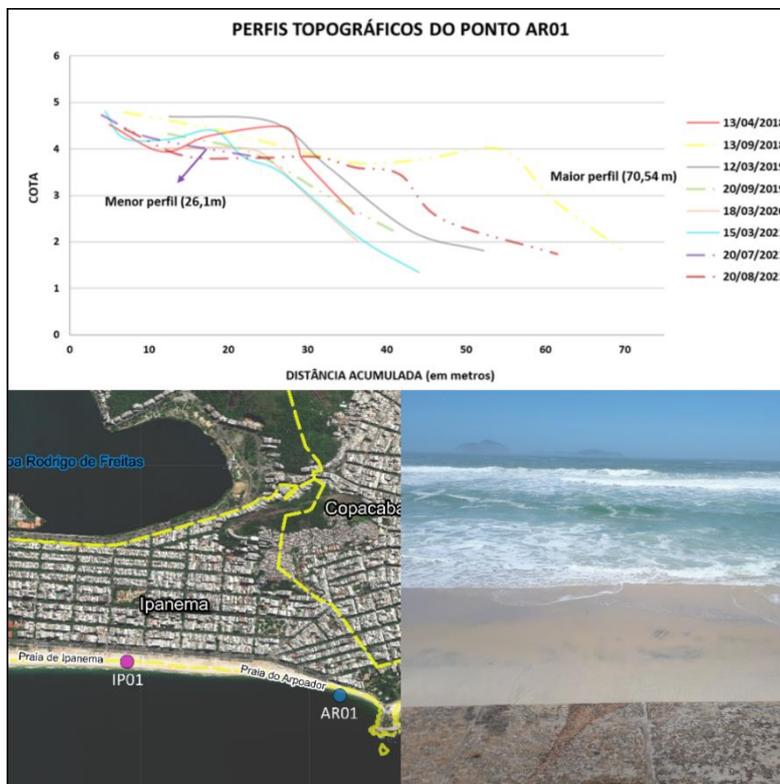


Figura 28. Variações sazonais observadas no ponto AR01, com informações referentes ao maior perfil (70,54 metros) e o menor perfil (26,1 metros).

Observa-se que o dia 20/07/2021 destaca-se ao longo de todo o arco praial, sendo o momento em que os perfis topográficos se mostraram mais estreitos. Cabe destacar que entre os dias 19/07/2021 e 21/07/2021, foi emitido pela Marinha do Brasil, a passagem de uma ressaca com ondas de até 3,0 metros do quadrante Sudoeste a Sul. Em campo foi possível observar o impacto das ondas de tempestade tanto no perfil de praia quanto no quiosque La Carioca (ponto de referência do ponto LB02). Na figura 29 é possível observar o quiosque atingido, bem como as equipes da Comlurb retirando areia presente no calçadão e ciclovia, além da esbeltez das ondas e o reflexo no encurtamento dos perfis.



Figura 29. A força das ondas invade e impacta as estruturas do quiosque La Carioca (A). Equipes da Comlurb trabalham removendo areias do calçadão e da ciclovia do Leblon (B). Esbeltez das ondas observadas no ponto LB01 (C). Extensão da faixa de areia observada no Arpoador (D).

5.2. Balanço sedimentar

Para o cálculo de volume emerso foram incorporados 18 perfis topográficos. Nesta metodologia a informação dos perfis nos fornece os índices de acúmulo e retirada de sedimento, necessitando assim de uma variedade de resultados para uma compreensão geral do balanço sedimentar de cada ponto. Diante disso, focar somente nos resultados mais expressivos, como foi feito quanto aos dados de largura da praia e serão feitos nas análises a seguir, acarretaria na interpretação errônea dos resultados.

As ilustrações a seguir mostraram como os pontos de monitoramento se distribuem, pontuando períodos de perda ou acúmulo de sedimentos para determinadas épocas do ano. Esses dados inclusive são fruto da subtração entre os valores totais dos volumes de cada levantamento, representados na parte superior de cada dia.

5.2.1. Balanço sedimentar do ponto LB01

As informações apresentadas na Figura 30 demonstram que o maior volume total ($352,47 m^3$) corresponde ao dia 10/02/2020, levantamento realizado em um período que não foi registrada a passagem de ressacas no litoral, favorecendo assim o acúmulo de sedimentos. Já o menor volume total ($83,74 m^3$), se deu no dia 15/02/2019, um dia após uma ressaca com ondas de até 2,5 metros e direção Sul a Sudeste. Além de apresentar o menor volume total, este dia também é o que apresentou significativa perda de sedimento emerso ($258,34 m^3$). Na diferença absoluta entre o maior e menor volume identificados no ponto LB01, obtêm-se cerca de $268,73 m^3$.

Em relação aos perfis de tempestade e de tempo bom (destacados na Figura 30), nota-se episódios em que ocorre perda de sedimentos nos perfis de tempo bom bem como acúmulo de sedimentos nos perfis de tempestade (dificuldade em correlacionar as variações sazonais com o aporte sedimentar). Observa-se também como o balanço sedimentar é dinâmico, indicando a capacidade de recuperação do ponto pós eventos de tempestade.

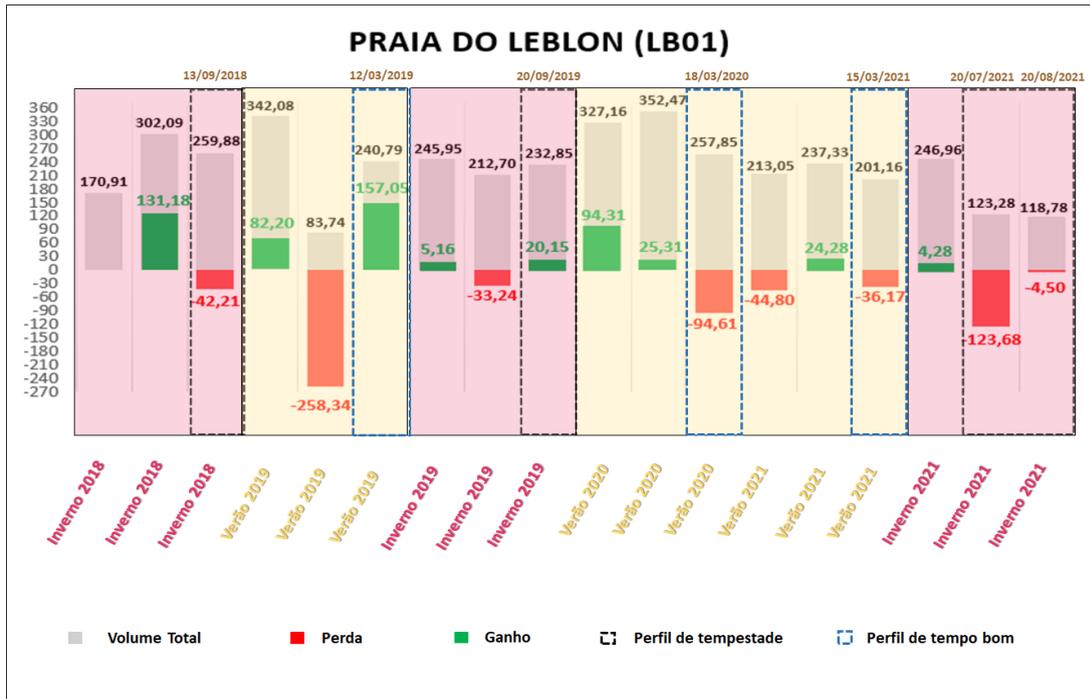


Figura 30. Cálculo de volume emerso observado no ponto LB01.

5.2.2. Balanço sedimentar do ponto LB02

De acordo com os dados do ponto LB02, percebe-se que o dia 8/08/2018 corresponde ao maior volume total ($666,73 \text{ m}^3$). Este acúmulo está atrelado a ausência de passagens de ressacas no dia do monitoramento. Em contrapartida, o menor volume total ocorre sob influência de uma ressaca no arco praiial, com ondas de até 3,0 metros e direção Sudoeste a Sul. Além de apresentar o menor volume total, o dia também é o que mostrou significativa perda de sedimento emerso ($272,04 \text{ m}^3$). A diferença absoluta entre o maior e menor volume total do ponto LB02 é de $588,42 \text{ m}^3$.

Os volumes expressivos representados na Figura 31, expõem uma dinâmica similar a explicitada no perfil LB01, em que existe perda de sedimentos nos perfis de tempo bom e acúmulo dos mesmos nos perfis de tempestade. Igualmente identificado no ponto anterior, os perfis topográficos apontam para a capacidade do ponto LB02 de se recuperar à eventos de ressacas e também de engordar a porção emersa em épocas de tempo bom.

No perfil LB02 é possível reconhecer o processo de resiliência do arco praiial. No mês de julho ocorreram dois levantamentos, um no dia 15/07/2021, e um

extra no dia 20/07/2021. Em agosto o levantamento acontece no dia 20/08/2021. Para uma avaliação de resiliência, o esperado é que haja um levantamento pretérito à um evento de ressaca (15/07/2021), um levantamento durante ou após a passagem de uma ressaca (20/07/2021), a fim de observar possíveis transformações na praia, e um levantamento após estes dois cenários para identificar a recuperação da praia (20/08/2021).

O levantamento realizado no dia 15/07/2021 não apresentou influência de ressacas no arco praial, o que gerou perfis topográficos mais largos e um “engordamento” do ponto em termos sedimentares. O monitoramento do dia 20/07/2021 reflete a influência da mais expressiva ressaca identificada na pesquisa e o campo realizado no dia 20/08/2021, transcorreu exatamente um mês após a ressaca descrita anteriormente, onde não se observou a influência de outras ressacas desde então.

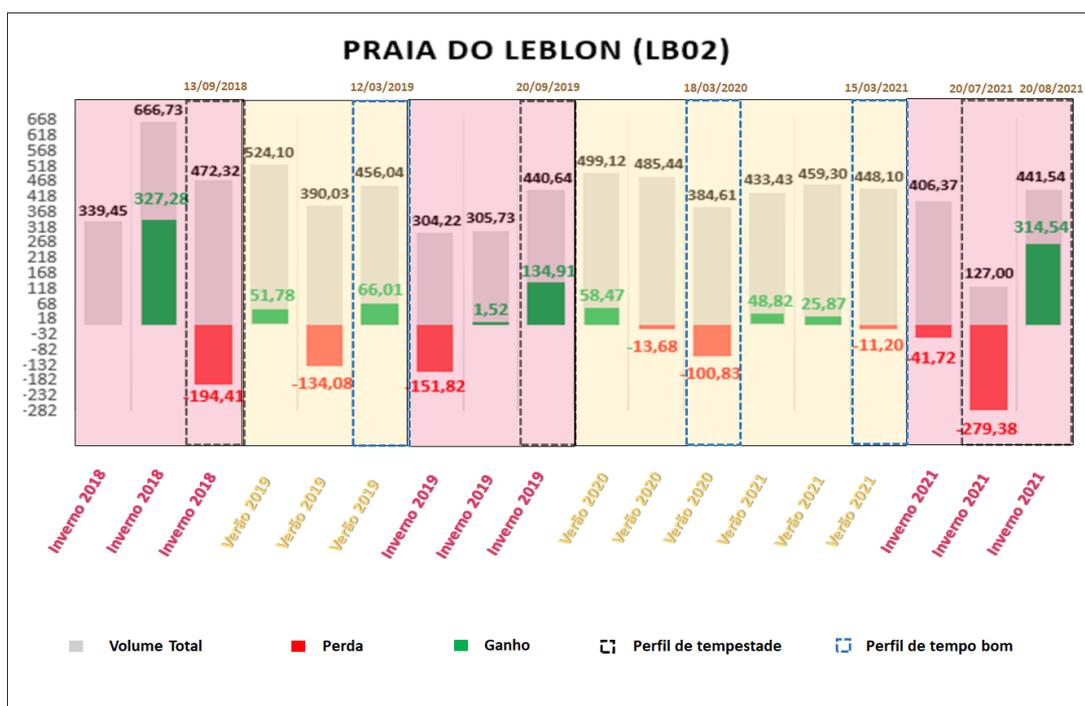


Figura 31. Cálculo de volume emerso observado no ponto LB02.

5.2.3. Balanço sedimentar do ponto IP01

Através da Figura 32, verifica-se que o maior volume emerso total do ponto IP01 ocorre no dia 15/03/2021 e corresponde a $580,81 \text{ m}^3$. Semelhante ao que ocorre nos pontos LB01 e LB02, a ausência das influências de ressacas no arco

praial, pode ter proporcionado um aumento de sedimentos na porção emersa da praia. Já o menor volume total ($109,10 \text{ m}^3$) ocorre no dia 20/07/2021, sob a influência de ondas de até 3,0 metros e direção Sudoeste a Sul. Além do menor volume total, a ressaca associada a este levantamento gerou também a maior perda de sedimentos do ponto IP01 ($258,43 \text{ m}^3$). Tal condição levou a uma diferença absoluta entre o maior e menor volume total observados no ponto IP01 de $417,71 \text{ m}^3$.

Perante os valores expressivos do ponto IP01, notou-se mais acúmulos do que perdas no pacote sedimentar. Isso pode ser relacionado à sua posição central no arco praial, além da presença de ilhas (Cagarras, Redonda e Rasa) localizadas na frente do ponto que dificultam a incidência direta das ondas. O ponto IP01 também conta com a influência da deriva litorânea, que é responsável pelo constante trânsito de sedimentos neste trecho da costa, favorecendo tal deposição. Como pontuado anteriormente, a resiliência entre os dias 20/07/2021 e 20/08/2021 também é ilustrada na Figura 32 uma vez que o ponto foi severamente impactado durante a ressaca do dia 20/07/2021 e no período de um mês a praia conseguiu recuperar seu aporte sedimentar (20/08/2021).

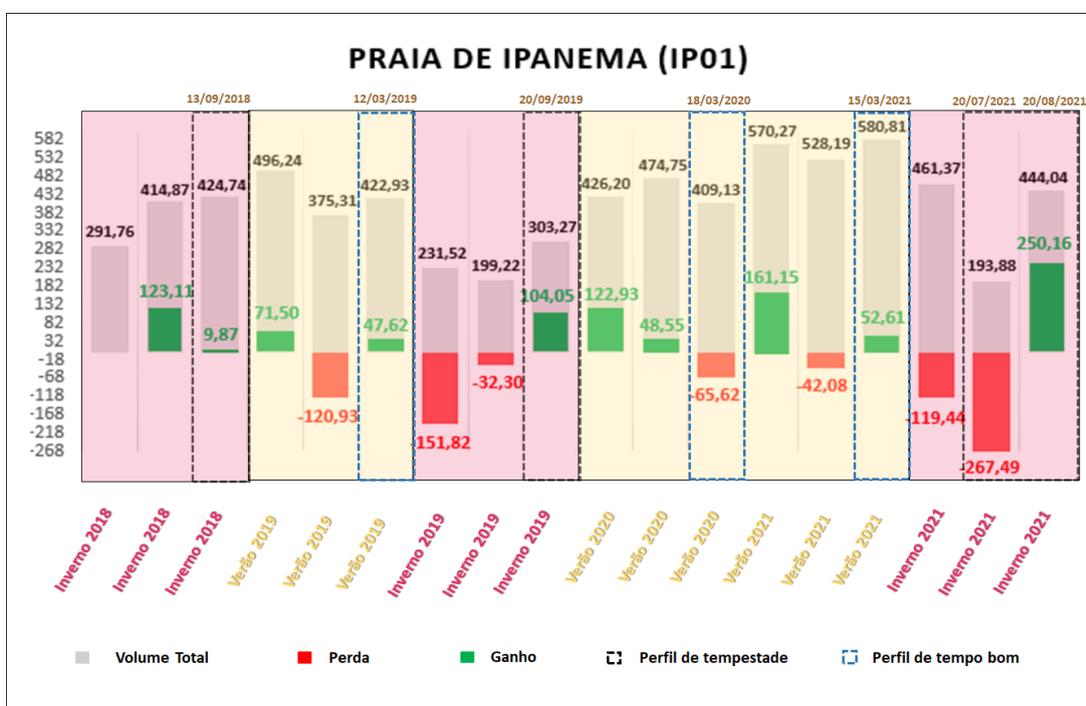


Figura 32. Cálculo de volume emerso observado no ponto IP01.

5.2.4. Balanço sedimentar do ponto AR01

Diante das informações expressas no gráfico (Figura 33), foi possível identificar que o maior volume total ($234,62 m^3$) foi observado no dia 13/09/2018, ou seja, no fim da temporada de inverno. Vale destacar que devido a incidência de ondas de tempestades no extremo oeste do arco praiial neste período, o Arpoador tende a receber os sedimentos advindos do Leblon por deriva litorânea, o que pode contribuir para a chegada de sedimentos e o maior volume total observado. Entre os dias 26/08/2018 e 27/08/2018 ocorreu uma ressaca que atingiu o arco praiial com ondas de 2,5 a 3,0 metros e direção Sudoeste a Sul. Após duas semanas, o ponto conseguiu se recuperar, mostrando a resiliência da praia neste ponto de monitoramento. O menor volume total exibiu a mesma dinâmica dos demais pontos, ocorrendo no levantamento do dia 20/07/2021 ($19,60 m^3$). Realizando a diferença absoluta entre o maior e menor volumes totais do ponto AR01, observou-se $215,02 m^3$.

No ponto AR01 foi identificada a mesma dificuldade em relacionar o estoque sedimentar a sazonalidade, contudo, a inversão da direção predominante da deriva entre inverno e verão e sua posição localizada na extremidade do arco praiial, podem explicar os valores observados. Um processo de rotação de sedimentos de leste para oeste no verão e de oeste para leste no inverno fica marcado na dinâmica sedimentar do arco praiial.

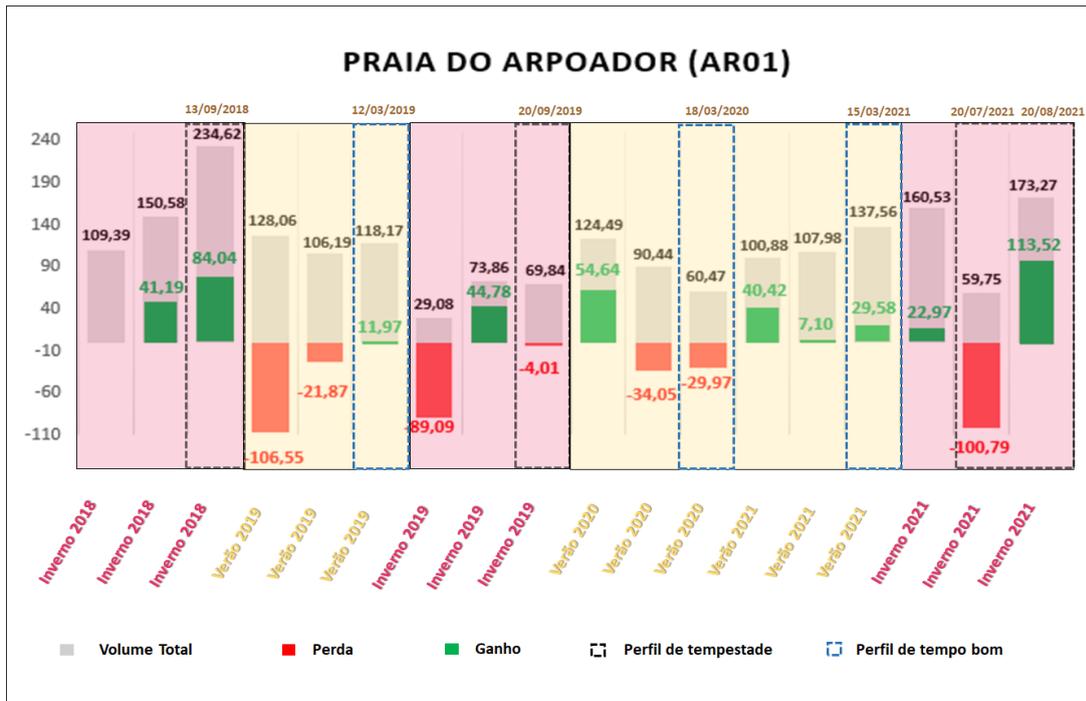


Figura 33. Cálculo de volume emerso observado no ponto AR01.

5.3. Caracterização das ressacas

As ondas são consideradas como uma das principais forçantes que moldam uma praia, além das correntes e ventos. Nesse subtópico, é demonstrado a compilação das informações das ressacas emitidas por veículos midiáticos e pela Marinha do Brasil. Através dessas informações é possível evidenciar época do ano em que as ondas atingem o arco praiial (Figura 34), a altura das mesmas (Figura 35) e a direção de incidência das ondas (Figura 36). Essas informações são cruciais para as análises de todas as variáveis aqui levantadas (perfil topográfico, volume emerso, granulometria e morfoscopia).

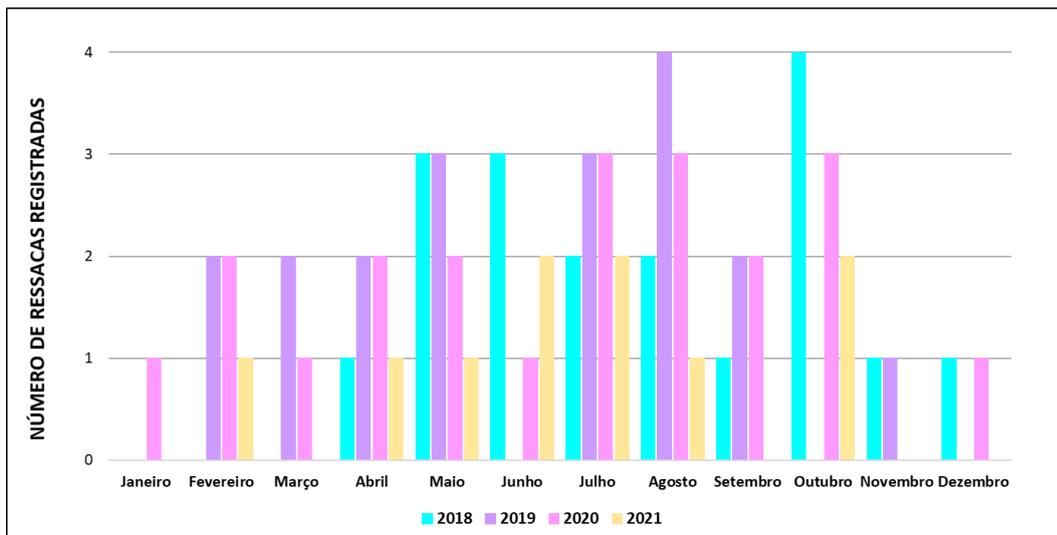


Figura 34. Ressacas registradas pelos veículos midiáticos entre os anos de 2018 e 2021.

Mediante as informações fornecidas pela Figura 34, nota-se uma diminuição das ressacas no litoral entre novembro e abril (final da primavera e verão) e um aumento das mesmas entre maio e outubro (outono e inverno). Através da mesma figura, também fica evidente porque é necessário abandonar as denominações “perfis de inverno” e “perfis de verão”, uma vez que é possível observar eventos de tempestades que ocorrem em campanhas de verão e a ausência desses mesmos eventos durante o inverno. Isso afirma ainda mais a importância de se classificar os perfis topográficos como “perfis de tempestade” e “perfis de tempo bom”.

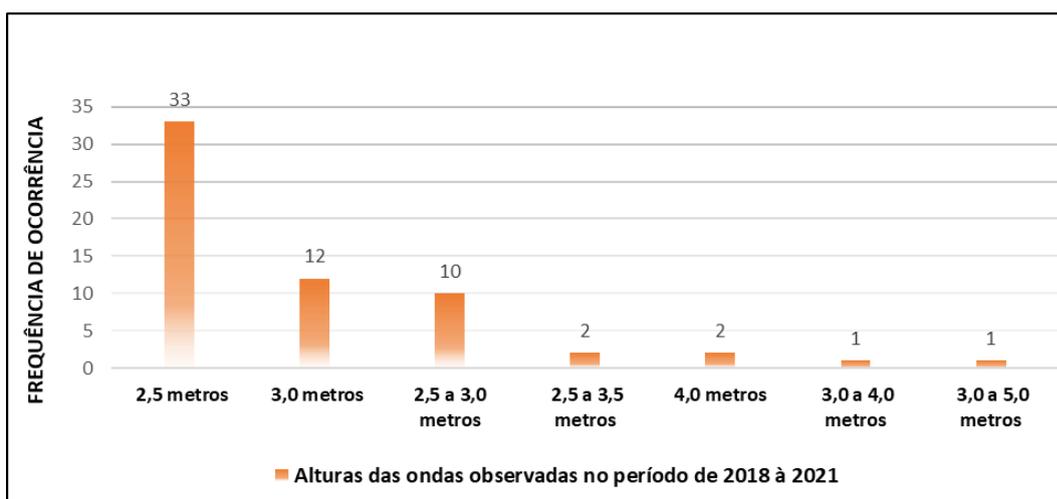


Figura 35. Frequência da ocorrência das alturas das ondas incidentes no arco praial entre o período analisado.

Analisando os dados apresentados na Figura 35, ondulações de 2,5 metros se mostram predominante na maioria dos levantamentos realizados durante o período da pesquisa, seguido por ondulações de 2,5 a 3,0 metros e ondulações de 3,0 metros. Em menor número, apresentam-se ondas de magnitudes maiores (4,0 metros e 5,0 metros). Nos eventos de ondas de alta esbeltez (4,0 e 5,0 metros) que atingiram o arco praial, não foram identificados nos veículos midiáticos como jornais, por exemplo, matérias que tratassem de transposição de areias no calçadão ou impactos de ondas de ressacas no mobiliário de quiosque. Porém, a ressaca mais expressiva aqui analisada (20/07/2021) foi oriunda de ondas de até 3,0 metros, mostrando que no arco praial estudado, ondas de esbeltez nem sempre irão trazer impactos significativos para a estrutura urbana localizada próxima ao mesmo.

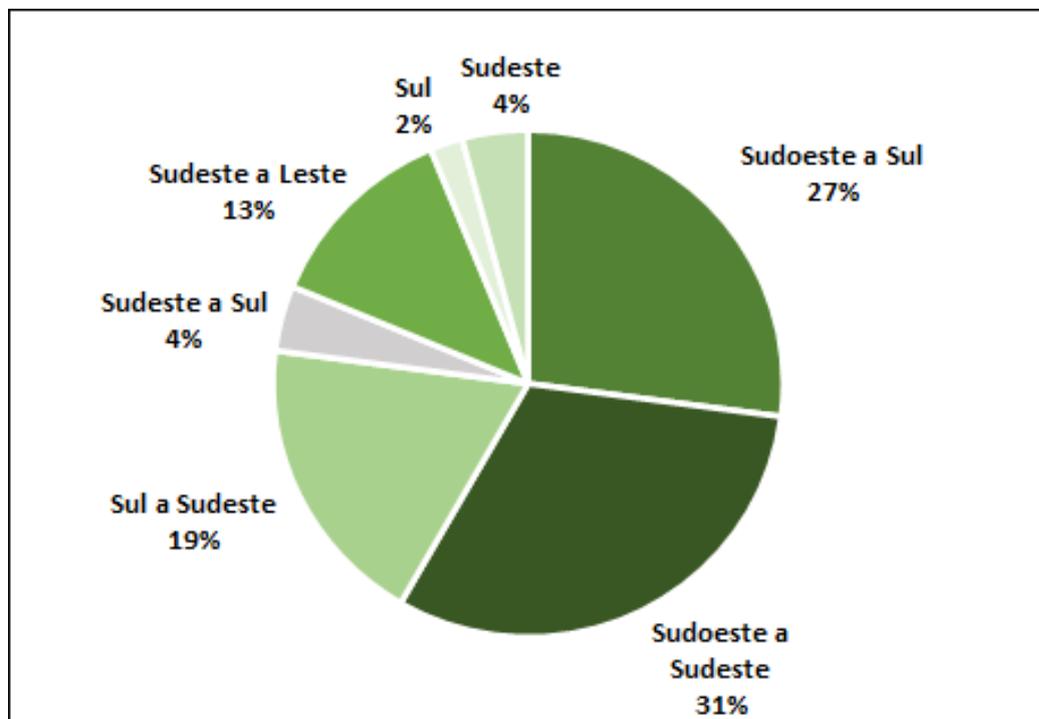


Figura 36. Frequência da direção de incidência das ondas registradas entre 2018 e 2021 na área de estudo.

Através da Figura 36, pode-se identificar a distribuição da direção de incidência das ondulações de tempestade registradas ao decorrer do período da pesquisa. Nota-se a predominância das incidências advindas do quadrante Sul, tendo a direção “Sudoeste a Sudeste” como destaque dentre as demais. Em relações às variações sazonais, durante os levantamentos identificou que os perfis de tempestades tendem a predominar do quadrante Sudoeste e os perfis de tempo bom

são oriundos do quadrante Sudeste. Essa dinâmica que muda de acordo com a época do ano também influencia na deriva litorânea e na distribuição sedimentar do arco praial.

5.4. Granulometria

Nas análises granulométricas, como explicado anteriormente, o foco foi observar o comportamento dos sedimentos em ambientes distintos de energia. A escolha dos setores do pós-praia e da face de praia partiu da interpretação das vastas informações a respeito da granulometria dos pontos de monitoramento. Embora a fração média tenha aparecido como maioria nos resultados, observou-se que em épocas de eventos de tempestade, a fração de areia grossa aparecia como predominante no ambiente da face de praia. Nos quatro anos de monitoramento, foram coletadas mais de 300 amostras porém para a presente pesquisa, somente 56 amostras foram analisadas neste procedimento.

Seguindo a mesma linha de interesse analítico dos perfis topográficos e do volume emerso de sedimentos, debruçou-se sobre a avaliação granulométrica referente aos levantamentos mais expressivos. O dia 20/07/2021 não foi incorporado as análises granulométricas devido as condições de mar agitado durante a realização do trabalho de campo, impossibilitando a coleta no setor da face de praia. A seguir serão demonstradas as análises granulométricas referentes aos quatro pontos de monitoramento ao longo do arco praial.

5.4.1. Granulometria do ponto LB01

Identifica-se que a fração de areia média é predominante no setor do pós-praia e no setor da face de praia, observa-se predominância de areias grossas em três levantamentos: 13/09/2018; 12/03/2019 e 18/03/2020. O levantamento do dia 20/08/2021 é o único dentre os demais em que a granulometria aparece diferente, com a predominância de areia grossa tanto no pós-praia quanto na face de praia.

A predominância das areias grossas está relacionada diretamente com a incidência de ondas no arco praial, uma vez que em épocas de perfis de tempo bom as ondas de Sudeste tendem a impactar diretamente o Arpoador e por deriva litorânea, o ponto LB01 tende a receber os sedimentos oriundos dessa praia. Já em

condições de tempestade, ondas de Sudoeste atingem diretamente o ponto LB01 fazendo com que a porção emersa do mesmo se encontre deficitária e por deriva litorânea a praia do Arpoador passa a receber tais sedimentos. Vale acrescentar que nas areias grossas é observado a presença de fragmentos de conchas e pedaços de rochas.

Nos perfis de tempo bom (12/03/2019 e 18/03/2020) é nítido a contribuição dos sedimentos oriundos da porção Leste (Arpoador) ao ser identificado a predominância das areias grossas no setor da face de praia. Vale ressaltar que no levantamento do dia 12/03/2019 verificou-se a passagem de uma ressaca pelo litoral com ondas de até 2,5 m e direção Sul a Sudeste e no dia 18/03/2020, a predominância dos grãos grossos é relacionada diretamente à deriva litorânea uma vez que não identificou passagem de ressacas até o levantamento.

Já nos perfis de tempestade (13/09/2018 e 20/08/2021) a predominância de areias grossas é associada ao fato desse ponto ser o primeiro a ser impactado por ondas de ressaca. Essa predominância está mais ligada com a época do ano (inverno) e a predominância da incidência de onda (Sudoeste) do que com a influência direta de eventos de tempestades, visto que para ambos os levantamentos não ocorreu passagens de ressacas pelo litoral.

Como dito anteriormente, o levantamento do dia 20/08/2021 foi o único em que areias grossas foram encontradas em ambos setores praias. Este cenário ocorre em um contexto de um levantamento sem influência de ressacas no arco praial. E mesmo sem essa influência, foi registrado em campo a presença de uma escarpa erosiva de mais de 1 metro de altura, onde observou-se uma coluna estratigráfica que apresentava os eventos (tempo bom ou tempestades) pretéritos no ponto LB01 (Figura 37 e 38). Vale lembrar que esta data apresenta o menor perfil topográfico do ponto LB01 (33,7 metros). Assim, a presença de granulometria associada a areia grossa nos dois setores da praia pode ainda ser resultado de eventos recentes de alta energia.

Em relação ao grau de selecionamento, os grãos dispostos no pós-praia estão moderadamente bem selecionados e os grãos dispostos na face de praia são bem selecionados. Quanto à maturidade dos grãos, esses também variam: os grãos do pós-praia são supermaturo e os da face de praia são maduros.

■ Areia Muito Grossa
 ■ Areia Grossa
 ■ Areia Média
 ■ Areia Fina
 ■ Areia Muito Fina

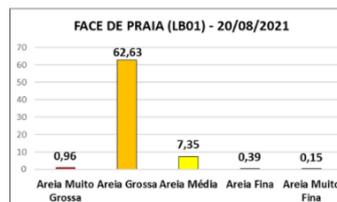
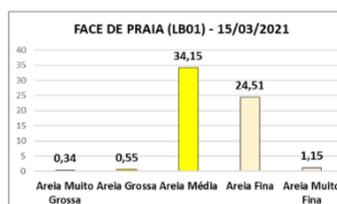
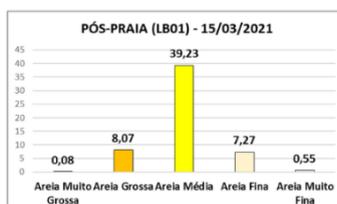
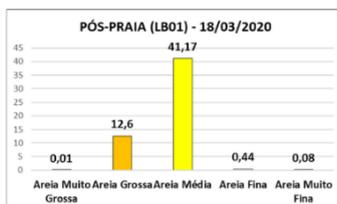
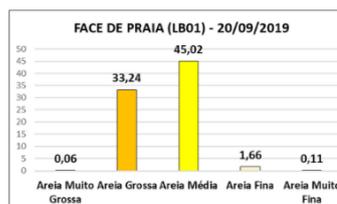
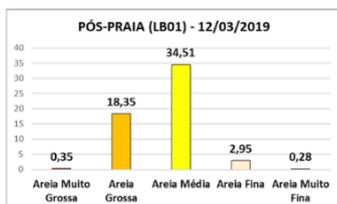
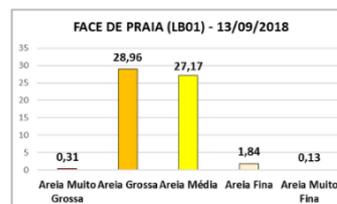
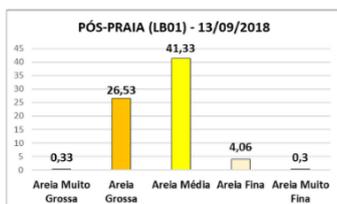
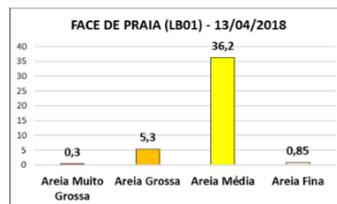
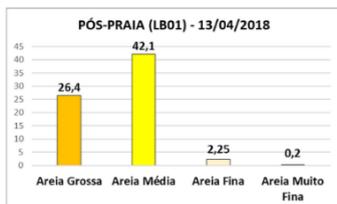




Figura 37. Escarpa erosiva identificada no dia 20/08/2021 no LB01.



Figura 38. Coluna estratigráfica observada na escarpa erosiva do ponto LB01 evidenciando diferentes episódios de aumento da energia das ondas registrados nos depósitos de sedimentos mais grossos.

5.4.2. Granulometria do ponto LB02

A fração de areia média se mostra predominante nas datas analisadas e as areias grossas se apresentam predominante no levantamento do dia 18/03/2020 no setor da face de praia e no dia 20/08/2021 em ambos os setores praias.

A presença da areia grossa para o setor da face de praia no dia 18/03/2020 é explicada pela intensificação do transporte realizado pela deriva litorânea presente no arco praial. Por se tratar de eventos de tempo bom, as ondulações incidentes advêm do quadrante Sudeste e transportam os sedimentos em direção à porção extrema do arco praial, mais especificamente na praia do Leblon. A intensificação do transporte pela deriva pode ter selecionado sedimentos de maior tamanho junto a face de praia.

No levantamento realizado no dia 20/08/2021 foi possível ainda constatar a influência de um evento recente de aumento na energia das ondas que, embora não estivesse associado à ressaca no momento do levantamento, foi impactante na morfologia e sedimentação dos pontos da praia do Leblon. Nas figuras abaixo (39 e 40) é possível perceber uma escarpa erosiva, parcialmente suavizada no ponto LB02, é possível que reflexos deste evento tenham contribuído para a presença de areia grossa em ambos os setores analisados.

Em relação ao grau de selecionamento, os grãos dispostos no pós-praia estão moderadamente bem selecionados e os grãos dispostos na face de praia são bem selecionados. Quanto à maturidade dos grãos, esses também variam: os grãos do pós-praia são supermaturo e os da face de praia são maduros.

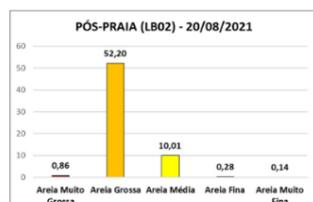
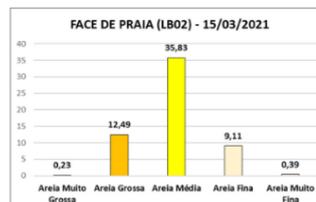
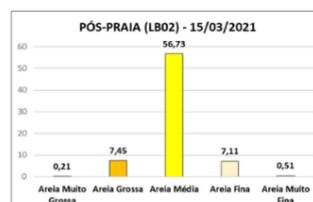
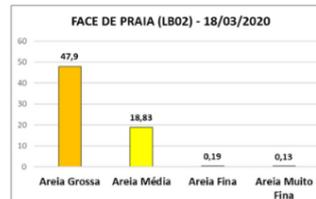
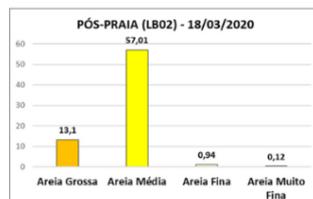
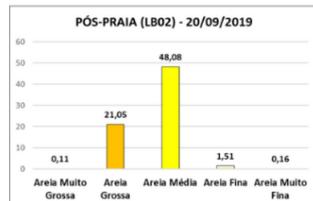
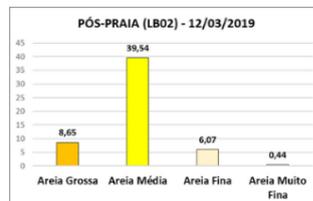
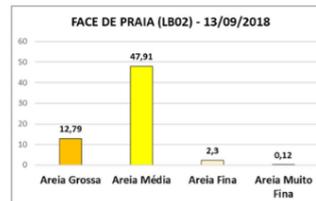
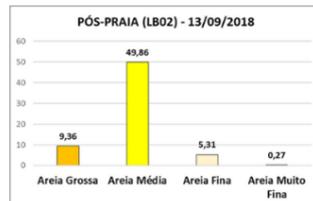
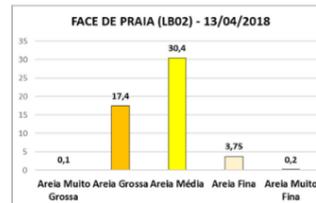
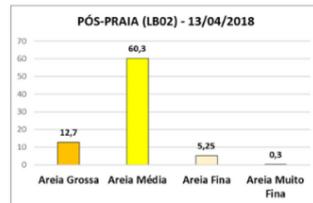


Figura 39. Degrau erosivo percebido em campo no ponto LB02 (20/08/2021).



Figura 40. Degrau erosivo visto de cima (LB02 - 20/08/2021).

■ Areia Muito Grossa
 ■ Areia Grossa
 ■ Areia Média
 ■ Areia Fina
 ■ Areia Muito Fina



5.4.3. Granulometria do ponto IP01

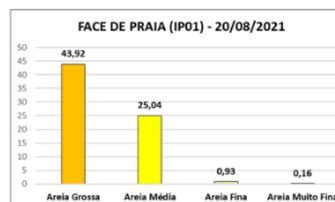
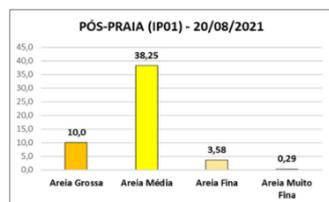
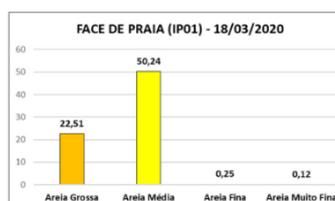
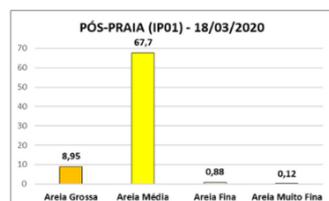
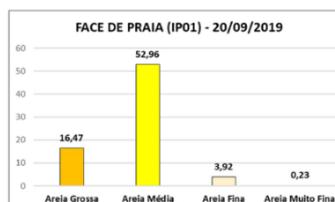
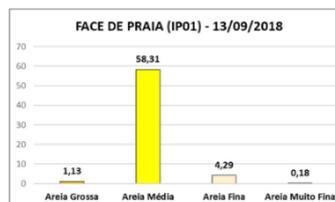
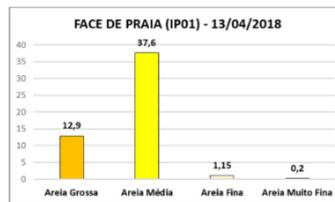
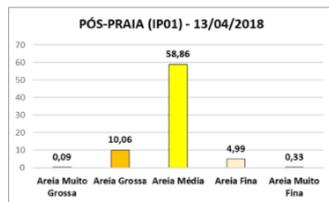
A posição geográfica torna o ponto IP01 menos vulnerável a impactos de ondas de tempestades, devido a presença das Ilhas Cariocas que funcionam como um obstáculo a entrada das ondas nesta área. O estoque sedimentar do ponto IP01 tem influência direta da deriva litorânea predominante de Leste-Oeste que costuma sempre alimentar esse trecho da praia.

O levantamento realizado no dia 20/08/2021 é o único a apresentar areias grossas dentre todas as datas aqui analisadas. Percebe-se que diferente do cenário encontrado nos pontos localizados na praia do Leblon, no IP01 a fração de areia grossa aparece somente no setor da face de praia, o que já pode ser um reflexo da função protetiva das ilhas sobre essa região da orla, mesmo no contexto de impactos mais significativos, como os observados na praia do Leblon. Nos demais dias analisados, percebe-se a predominância de areias médias.

O ponto IP01 pode ser retratado como um ponto de transição, onde o mesmo recebe sedimentos tanto de Leste quanto de Oeste, que são distribuídos de forma rotacional por deriva litorânea ao longo do arco praiial, variando sazonalmente em função da direção das ondas.

Em relação ao grau de selecionamento, os grãos dispostos no pós-praia e na face de praia são bem selecionados. Quanto à maturidade dos grãos, no pós-praia são supermaturo e na face de praia são maduros.

■ Areia Muito Grossa
 ■ Areia Grossa
 ■ Areia Média
 ■ Areia Fina
 ■ Areia Muito Fina



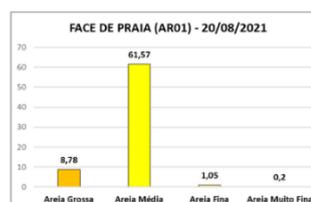
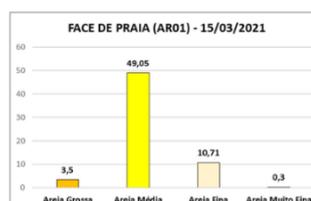
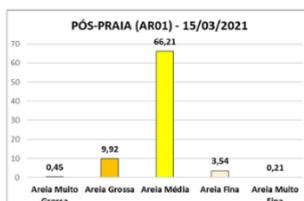
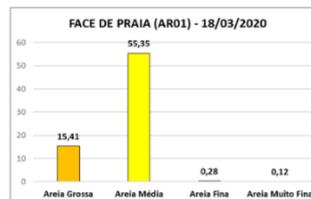
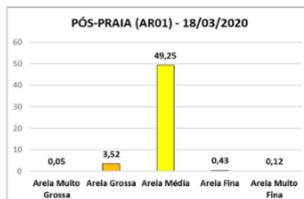
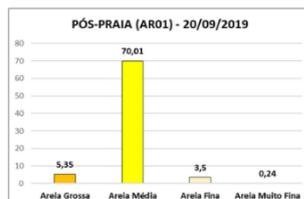
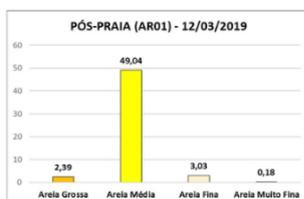
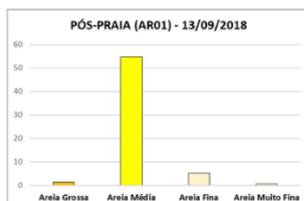
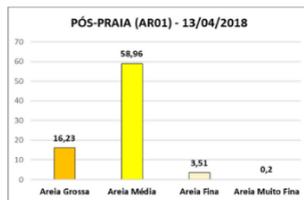
5.4.4. Granulometria do ponto AR01

O ponto AR01 é o único dentre os pontos de monitoramento em que não há predominância da fração de areia grossa em nenhum dos dias analisados. Neste ponto a predominância dos grãos é equivalente à fração areia média.

As ondas de baixa energia provenientes de sudeste durante o verão parecem não ter a capacidade de depositar sedimentos com granulometria maior do que areia média. Chama atenção ainda o fato do ponto não apresentar presença de grãos mais grossos mesmo quando o mesmo é atingido por ondas de ressaca, como as que atingiram o arco praial no dia 12/03/2019, vindas de Sudeste. Parece que a energia dessas ondas de tempestade tendem a se dissipar ao longo do arco praial, impactando mais o Leblon do que o Arpoador.

Em relação ao grau de selecionamento, os grãos dispostos no pós-praia e na face de praia são bem selecionados. Quanto à maturidade dos grãos, no pós-praia são supermaturo e na face de praia são maduros.

■ Areia Muito Grossa
 ■ Areia Grossa
 ■ Areia Média
 ■ Areia Fina
 ■ Areia Muito Fina



5.5. Morfoscopia

De forma semelhante ao descrito para as amostras granulométricas, o dia 20/07/2021 não foi investigado devido as condições de mar agitado que impossibilitaram a coleta de dados referentes a face de praia durante o trabalho de campo. Devido à uma base de dados extensa para todos as variáveis estudadas na pesquisa, os resultados da morfoscopia serão divididos por setor da praia e data, a fim de averiguar semelhanças, divergência, ações mecânicas e físicas identificadas nos grãos sedimentares.

Não foi identificado significativa discrepância entre as variações sazonais analisadas nas amostras, mas sim uma tendência de graus de arredondamentos das partículas do pós-praia e face de praia além de observar uma diferença nas texturas superficiais dos grãos. Nas ilustrações mostradas a seguir, percebe-se a presença de feldspatos e fragmentos de conchas para ambos os setores praias e em todas as amostras.

5.1. Condição de tempo bom

Nos dados de morfoscopia do dia 13/04/2018, nota-se uma prevalência de grãos subangulares tanto no pós-praia quanto na face de praia. Esse levantamento ocorreu após um período de três meses (janeiro, fevereiro e março) sem interferências de ressacas no arco praial. Através das imagens trazidas na Figura 41, identifica-se a presença de fragmentos de conchas e feldspato (coloração alaranjada e rosada) em ambos os setores praias. Em relação a textura superficial dos grãos, identifica-se que a presença de partículas polidas (brilho vítreo) se sobressai.

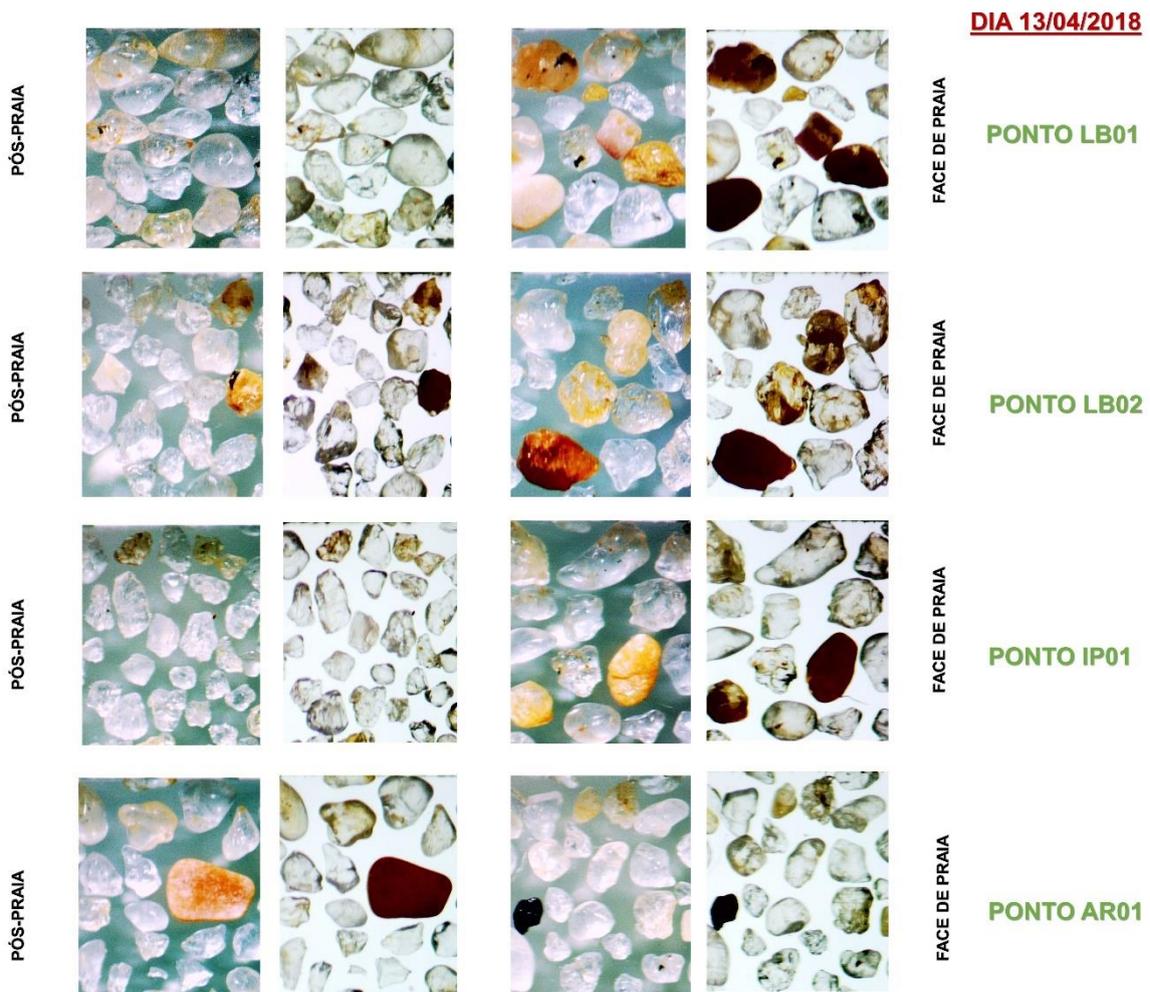


Figura 41. Morfoscopia do dia 13/04/2018 nos diferentes setores praias.

Os dados da análise morfoscóptica dos sedimentos coletados no dia 12/03/2019 mostram um predomínio de grãos subarredondados no setor do pós-praia e um domínio de grãos subangulares no setor da face de praia. Esse levantamento realizou-se sob vigência de ressaca no arco praias. Analisando a Figura 42, notam-se fragmentos de conchas em ambos os setores (pós-praia e face de praia), bem como feldspato (representadas através da coloração alaranjada e rosada na figura). Quanto a sua textura superficial, os grãos apresentaram em sua maioria um brilho fosco.

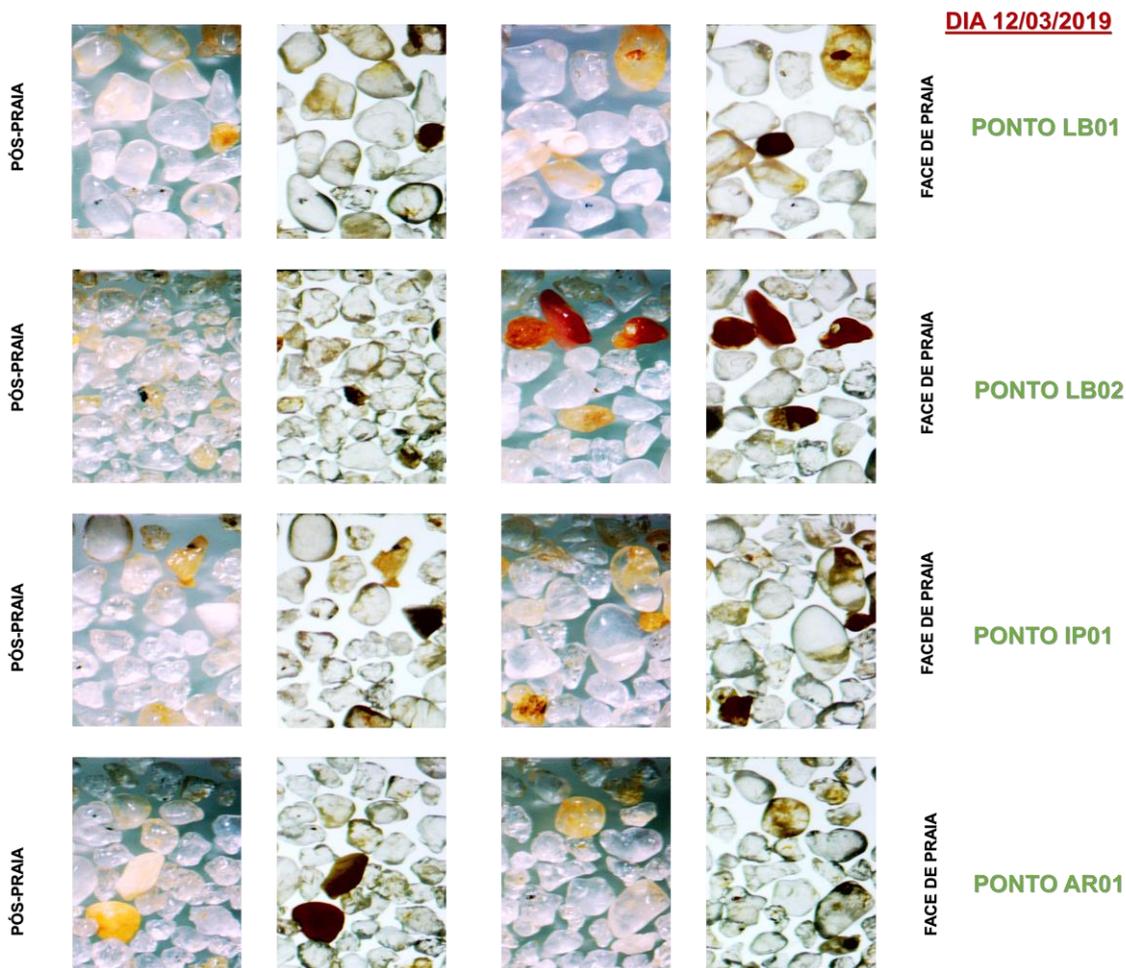


Figura 42. Morfoscopia do dia 12/03/2019 nos diferentes setores praias.

Na análise morfoscóptica referente ao dia 18/03/2020 predomina-se grãos subarredondados no setor do pós-praia e um domínio de grãos subangulares no setor da face de praia. Nesse levantamento não identificou-se entrada de ressacas no arco praias por onze dias. Analisando a Figura 43, notam-se também a presença de fragmentos de feldspato em ambos os setores (pós-praia e face de praia). Quanto a sua textura superficial, os grãos apresentaram em sua maioria um brilho vítreo.

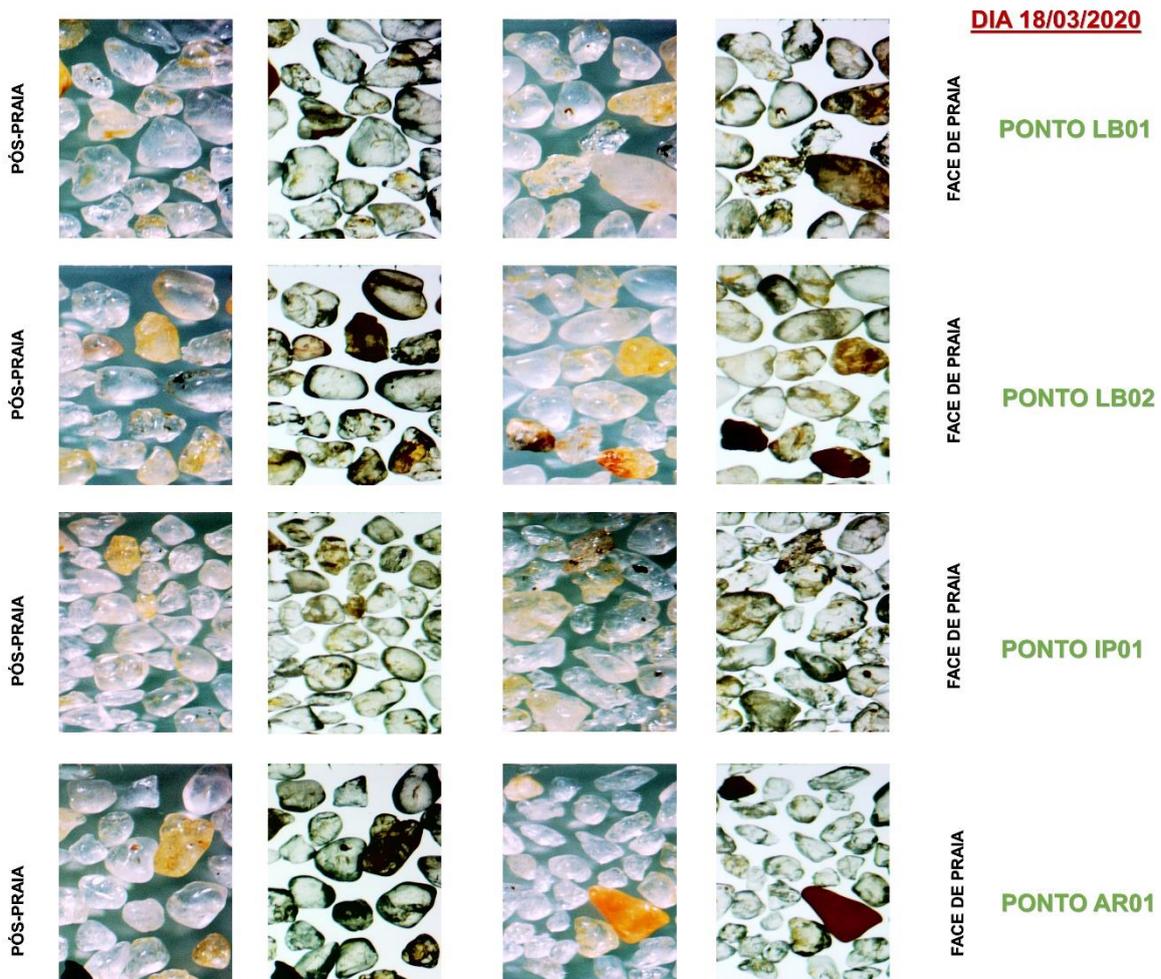


Figura 43. Morfoscopia do dia 18/03/2020 nos diferentes setores praias.

No dia 15/03/2021, os grãos subarredondados predominam no setor do pós-praia e grãos subangulares no setor da face de praia. Para o mês de março, não foi observada a passagem de ressacas pelo litoral. Analisando a Figura 44, notam-se fragmentos de conchas em ambos os setores (pós-praia e face de praia), bem como de feldspato representadas através da coloração alaranjada e rosada na figura). Quanto a sua textura superficial, os grãos apresentaram em sua maioria um brilho fosco.

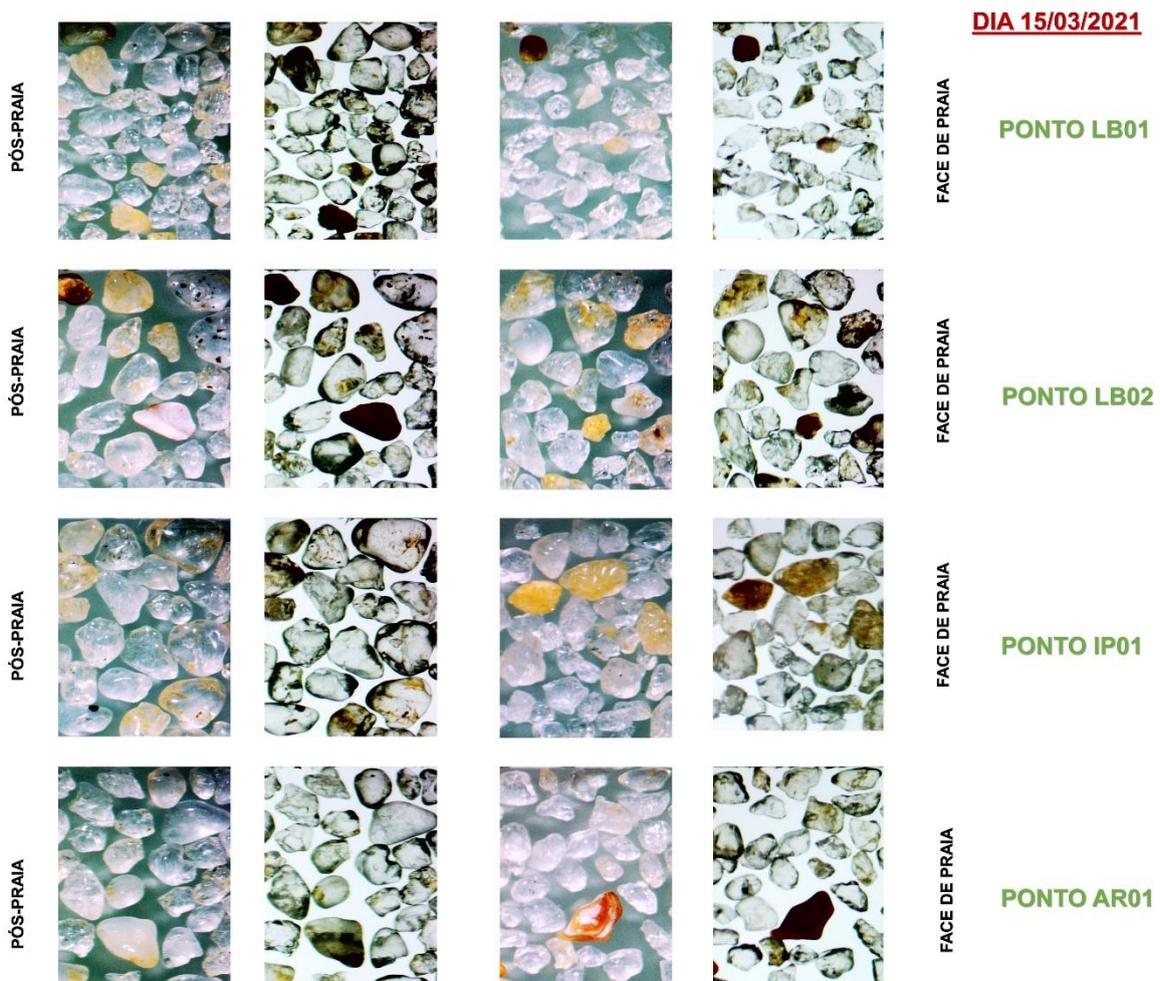


Figura 44. Morfoscopia do dia 15/03/2021 nos diferentes setores praias.

5.2. Condições de tempestade

Os dados da análise morfoscóptica do dia 13/09/2018 mostram um predomínio de grãos subarredondados no setor do pós-praia e um domínio de grãos subangulares no setor da face de praia. Nesse levantamento não identificou-se entrada de ressacas no arco praias por dezesseis dias. Analisando a Figura 45, nota-se fragmentos de conchas em ambos os setores (pós-praia e face de praia), bem como feldspato (representadas através da coloração alaranjada e rosada na figura). Quanto a sua textura superficial, os grãos apresentaram em sua maioria um brilho fosco.

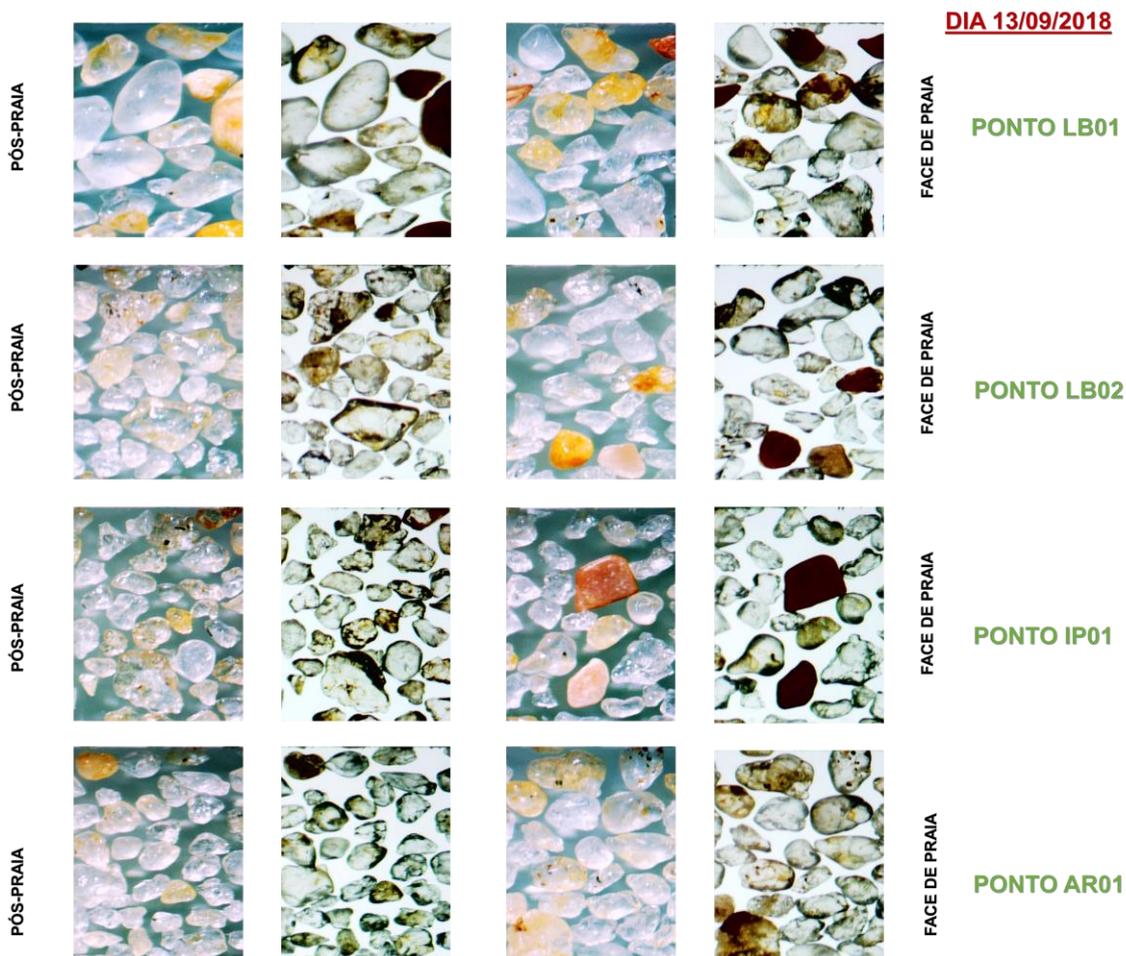


Figura 45. Morfoscopia do dia 13/09/2018 nos diferentes setores praias.

Nas análises morfoscópicas do dia 20/09/2019 predomina-se grãos subarredondados no setor do pós-praia e um domínio de grãos subangulares no setor da face de praia. Nesse levantamento não identificou-se entrada de ressacas no arco praias por dezesseis dias. Analisando a Figura 46, notam-se fragmentos de conchas em ambos os setores (pós-praia e face de praia), bem como feldspato representadas através da coloração alaranjada e rosada na figura). Quanto a sua textura superficial, os grãos variam entre partículas polidas e foscas, sendo que no setor do pós-praia os grãos apresentam-se polidos (vítreos) e na face de praia eles se mostraram foscas.

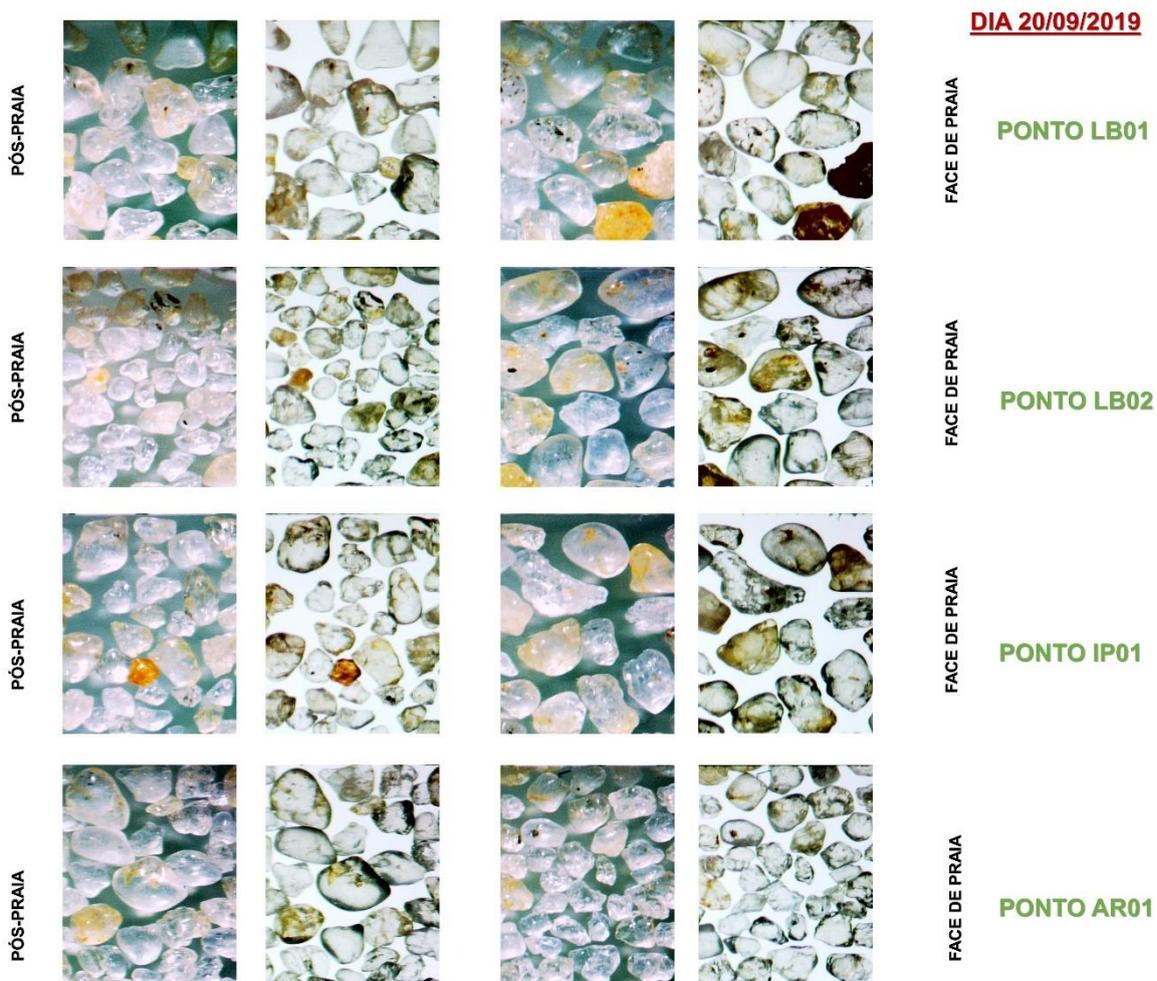


Figura 46. Morfoscopia do dia 20/09/2019 nos diferentes setores praias.

Os dados da análise morfoscópica do dia 20/08/2021 mostram predomínio de grãos subarredondados no setor do pós-praia e um domínio de grãos subangulares no setor da face de praia. Nesse levantamento não identificou-se entrada de ressacas no arco praias por seis dias. Analisando a Figura 47, se observa a presença de fragmentos de conchas em ambos os setores (pós-praia e face de praia), bem como de feldspato representadas através da coloração alaranjada e rosada na figura). Quanto a sua textura superficial, os grãos apresentaram em sua maioria um brilho fosco.

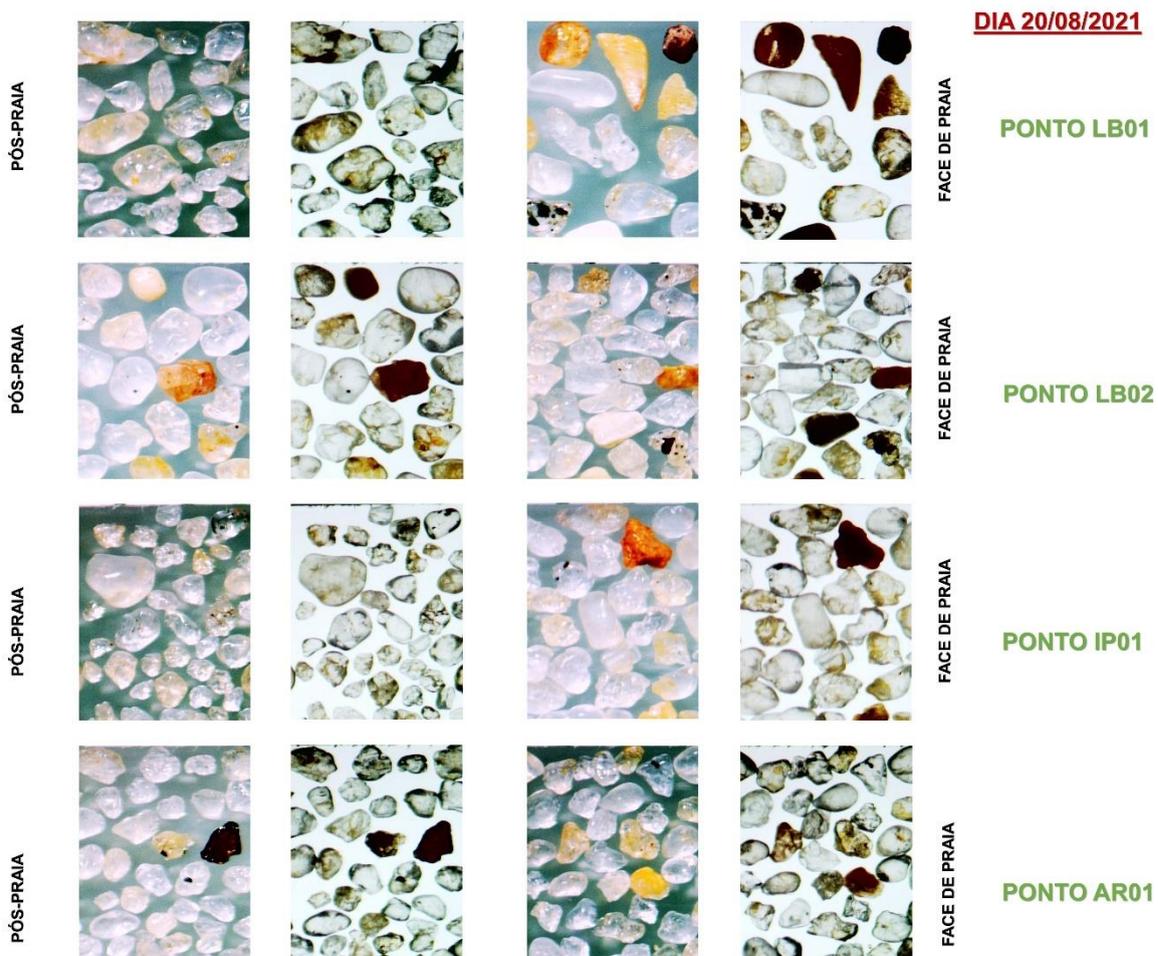


Figura 47. Morfoscopia do dia 20/08/2021 nos diferentes setores praias.

6. DISCUSSÕES

No capítulo anterior foi apontado, de forma individual, como as cinco variáveis investigadas nessa pesquisa (topografia da praia, volume emerso, incidência de ressacas, granulometria e morfoscopia dos grãos) se comportaram ao decorrer do período estudado (2018-2021), interagindo com os processos costeiros que moldam o litoral como as ondas, correntes, marés e ventos.

A partir de uma vasta quantidade de dados levantados durante o período analisado, optou-se por direcionar o interesse para as variações sazonais, assim, foram selecionadas datas que representassem o final das estações de verão e inverno, a fim de identificar as transformações mais significantes ocorridas no arco praias.

6.1. Perfil topográfico: Largura de praia e volume

Durante os quatros anos de levantamento de dados pode-se perceber que o arco praiial do Leblon ao Arpoador apresenta grande dinâmica em relação a largura dos perfis topográficos e sua morfologia. Essas transformações são mais evidentes quando comparadas as características entre o verão e o inverno, com a clara alteração na energia das ondas que atingem o litoral, promovendo a retirada ou acúmulo dos sedimentos na parte emersa da praia. Logo, fatores que influenciam na largura e morfologia são: ação das ondas de tempestade e de tempo bom; influência da deriva litorânea; presença de um obstáculo a ação das ondas representado pelas ilhas (Cagarras, Redonda e Rasa) e dos promontórios localizados nas extremidades do arco praiial.

6.1.1. Verão de 2018

Através da busca sobre alertas de ressacas emitidos pela Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil – DHN, para os meses iniciais de 2018 (janeiro, fevereiro e março), foi identificado que nestes meses não houve a incidência de ondas de tempestade (ressacas) para o litoral da cidade do Rio de Janeiro. Esse cenário é o mais comum para essa época do ano e é citado por diversas vezes na literatura referente a dinâmica praiial, onde no verão as ondas tendem a apresentar baixa energia, transportando sedimentos da zona submarina em direção à praia e tornando os perfis topográficos mais extensos (FLEMMING, 2011).

De fato, em campo (13/04/2018) notou-se que os perfis topográficos apresentavam longas extensões de faixa de areia, devido à incorporação de sedimentos na porção emersa. O perfil LB01 apresentou largura de 90,88 metros; o LB02 107,21 metros; o ponto IP01 89,66 metros e o ponto AR01 35,84 metros. Perfis extensos associados à baixa energia também são descritos no trabalho de Shariful *et al.* (2020), onde os autores descrevem as variações morfológicas observadas em praias arenosas da Malásia (Terengganu). Neste levantamento fica evidente a influência das ondas de tempo bom oriundas do quadrante Sudeste que retiraram parte dos sedimentos da praia do Arpoador transportando-os em direção a oeste do arco praiial (BULHÕES, 2006).

6.1.2. Inverno de 2018

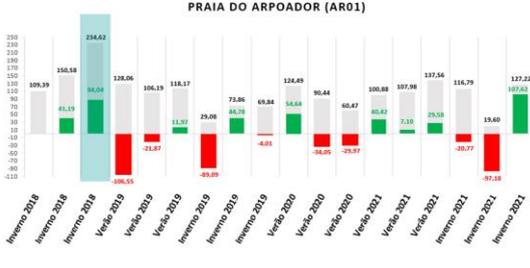
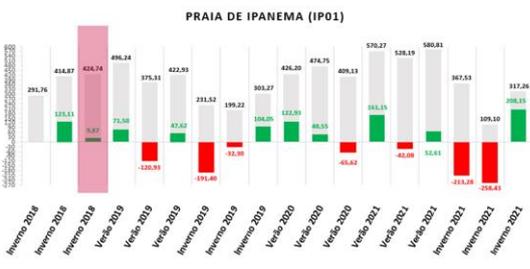
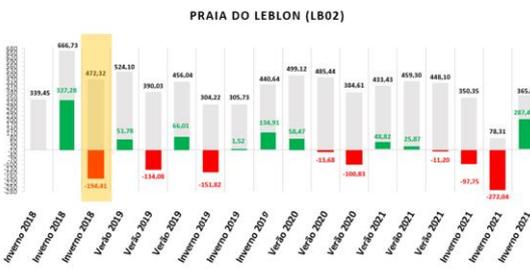
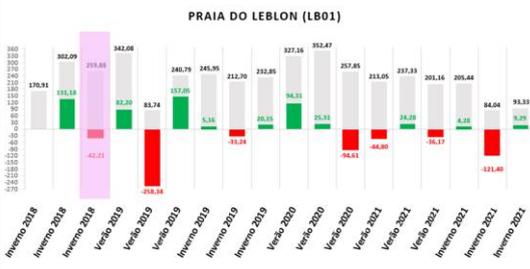
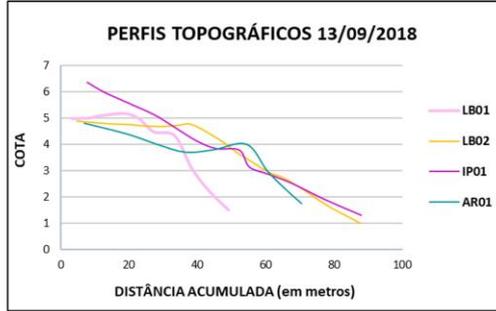
Os dados referentes à essa campanha (13/09/2018), são influenciados pela ausência de ondas de ressaca no litoral por dezesseis dias e a predominância de ondas advindas do quadrante Sudoeste. Trabalhos como Lins-de-Barros *et al.* (2018), Costa (2021) e Lima *et al.* (2021), mostram que o aumento das ressacas no período entre o outono e inverno está associado a entradas de frentes frias no Estado do Rio de Janeiro. Esta constatação é corroborada por Bulhões *et al.* (2014) ao se referir aos meses de abril e setembro (início do outono e inverno) como a “temporada de ondas de tempestade”.

Diante deste cenário, o perfil LB01 por estar menos protegido por ondas de Sudoeste é o primeiro a ser atingido e apresentou 49,18 metros, enquanto os demais perfis mostraram-se largos já em função da recuperação desses perfis ao longo de duas semanas de condições menos energéticas de ondas (LB02 apresentou de 87,64 metros; o IP01 87,87 metros e AR01 70,54 metros). Dinâmica similar é identificada por Bulhões *et al.* (2014) no arco Arraial-Cabo Frio, em que perfis protegidos da incidência ondas de tempestades são maiores e depositam mais sedimentos.

No balanço sedimentar dos pontos, nota-se um decréscimo na porção oeste do arco praiado (LB01 e LB02), ao passo que na porção leste nota-se acúmulo de sedimentos. Esses dados reforçam a interferência da deriva litorânea e comprova o efeito rotatório dos sedimentos, e também evidenciado por Rosman *et al.* (2007):

Ondas do quadrante Sudeste transportam areia em direção ao Leblon, assim ao final do verão, a tendência é o Arpoador estar deficitário de areia e o Leblon superavitário. Opostamente no inverno, há maior ocorrência e dominância de ressacas, que usualmente provem do quadrante Sudoeste e transportam areia em direção ao Arpoador. Assim, ao final do inverno, o Arpoador tende a estar superavitário de areia e o Leblon deficitário.

Em estudo realizado por Santos *et al.* (2012) no Litoral Setentrional do Estado do Rio Grande do Norte (entre os municípios de Macau e Guamaré), a deriva litorânea empenha papel importante na dispersão dos sedimentos na linha de costa no sentido leste-oeste, evidenciando assim episódios de remoção e acresção nas praias analisadas pelos autores.



LEVANTAMENTO 13/09/2018
 Sem registros de ressacas até a realizando do campo.
 Ressaca noticiada entre os dias 17/09/18 e 19/09/2018 (pós campo).
 16 dias sem influências de ressacas no arco praial (última 27/08/2018).

Figura 48. Perfil topográfico, volume emerso e ressacas percebidas no dia 13/09/2018.

6.1.3. Verão de 2019

Entre os dias 10/03/2019 e 12/03/2019, a passagem de uma ressaca atingiu o litoral da cidade do Rio de Janeiro com ondas de até 2,5 metros e direção Sul a Sudeste. Segundo o Centro de Hidrografia da Marinha (CHM, 2019), esse evento

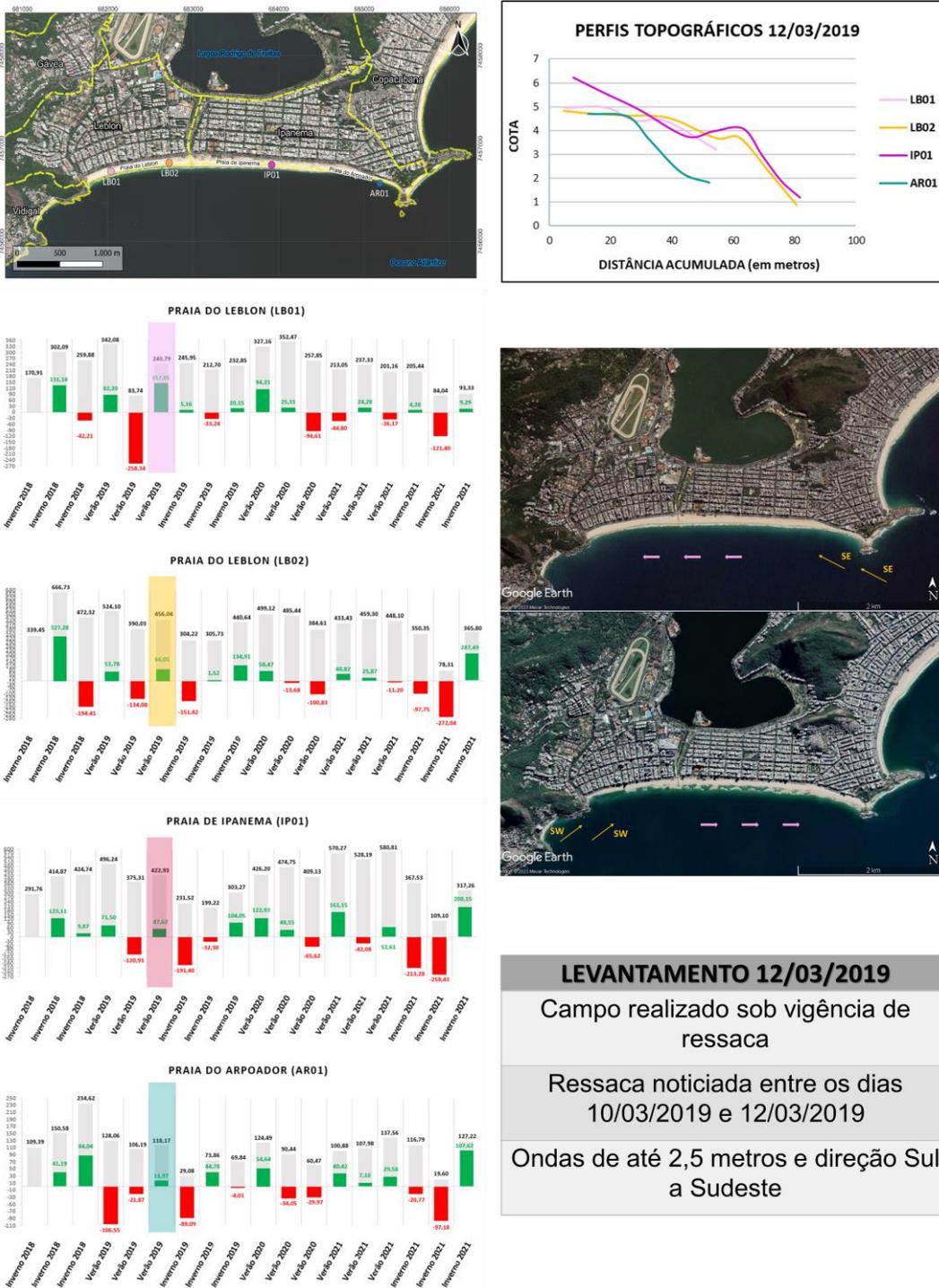
foi proveniente de uma passagem de frente fria pelo oceano. Em campo foi possível observar condições de mar agitado, presença de cúspides e correntes de retorno.

Por se tratar de ondas advindas do quadrante Sul a Sudeste, o perfil topográfico mais impactado foi o AR01 (52,2 metros) devido a sua posição geográfica mais a leste no arco praial. Os demais pontos acabaram recebendo os sedimentos por deriva litorânea e tiveram perfis mais extensos (LB01 apresentou de 54,24 metros; o LB02 80,68 metros e IP01 70,54 metros).

Observa-se que em todos os pontos de monitoramento ocorreu uma recuperação do aporte sedimentar em relação ao evento anterior (15/02/2019). O levantamento em questão sucedeu-se um dia após a passagem de uma ressaca no litoral, com ondas de até 2,5 metros e direção Sul a Sudeste. De acordo com a Figura x, é possível identificar a perda de sedimentos em todos os pontos de monitoramento. Do levantamento realizado no dia 15/02/2019 até o evento da ressaca entre 10/03/2019-12/03/2019, o arco praial exibiu uma rápida recuperação volumétrica, em apenas 21 dias.

A recuperação dos sedimentos pós eventos de alta energia foi apontada por Oliveira *et al* (2020) nas praias oceânicas de Rio das Ostras e Mar do Norte. O processo de perda de sedimentos em eventos de tempestades e uma rápida recuperação em condições de tempo bom também é mostrada por Dutra *et al*. (2022). Nesse trabalho, os autores ainda discutem a respeito de um equilíbrio dinâmico em relação as condições de nível do mar atual identificado no arco praial Jaconé-Saquarema e as evidências para tal constatação é baseada na variabilidade dos perfis topográficos e nos dados de volume emerso (relação de perda e ganho).

Essas condições são demonstradas nas variáveis aqui analisadas: elevada variabilidade dos perfis topográficos; relação de perda e ganho dos sedimentos, relevando a fragilidade do arco praial bem como sua capacidade de se recuperar frente à eventos de tempestade e um efeito rotacional de sedimentos impulsionada por deriva litorânea. Com isso, pode se constatar que o arco praial Leblon-Arpoador demonstra um equilíbrio dinâmico em relação as condições de nível do mar atual.



LEVANTAMENTO 12/03/2019

Campo realizado sob vigência de ressaca

Ressaca noticiada entre os dias 10/03/2019 e 12/03/2019

Ondas de até 2,5 metros e direção Sul a Sudeste

Figura 49. Perfil topográfico, volume emerso e ressacas percebidas no dia 12/03/2019.

6.1.4. Inverno de 2019

Este levantamento foi realizado após o arco praiial passar por um período de cerca de duas semanas sem eventos de ressaca. O último registro de ressaca remonta

ao dia 07/09/2019. O ponto LB01 aparece com uma largura da faixa de areia considerada pequena (57,38 metros), todavia, o ponto AR01 é o perfil que se apresenta mais curto dentre os pontos monitorados (41,2 metros). Embora não haja ressaca atingindo o litoral próximo a data do levantamento, o encurtamento dos perfis pode ser resultado de uma temporada de ressacas mais expressivas (em intensidade e frequência), visto que os dados foram coletados no final do inverno.

Por estar mais exposto ao impacto de ondas provenientes de Sudoeste (comuns nessa época do ano), é esperado observar mudanças na morfologia do ponto LB01, contudo, o ponto AR01 geralmente apresenta-se um pouco mais largo em função da sedimentação trazida pela deriva que inverte seu sentido de deslocamento nestas situações. O fato do ponto AR01 ter apresentado a menor largura de todos os quatro pontos pode ser também reflexo de uma temporada de ressacas mais intensas que teriam impactado todo o arco praiial levando esses sedimentos para zona submarina.

Diante dos dados referentes ao volume dos sedimentos, o ponto de monitoramento AR01 foi o único que expressou perda de sedimentos na ordem de $4,01 \text{ m}^3$. Já o ponto LB01, que seria o mais afetado pelas ondas advindas de Sudoeste e que apresentou um perfil topográfico curto, acumulou cerca de $20,15 \text{ m}^3$ de sedimentos na porção emersa do ponto. Tal comportamento já pode expressar o início da recuperação da praia ao longo dessas duas semanas de ondas de tempo bom, mostrando a resiliência da praia.

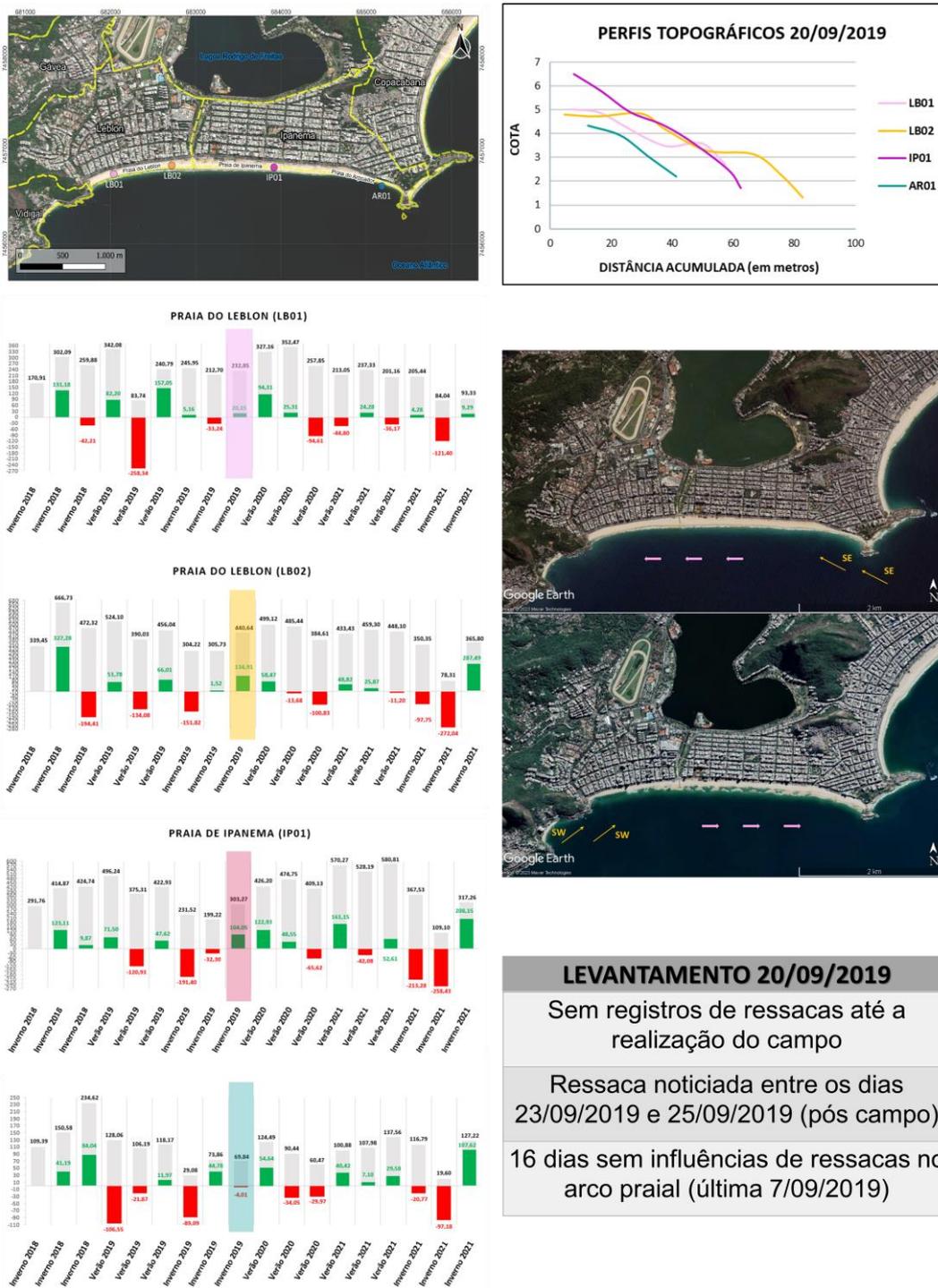


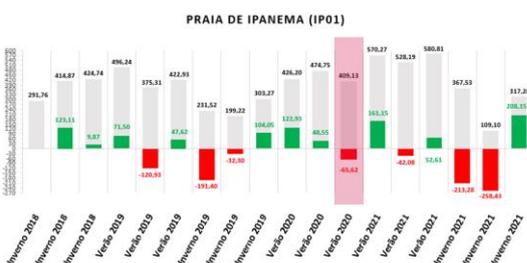
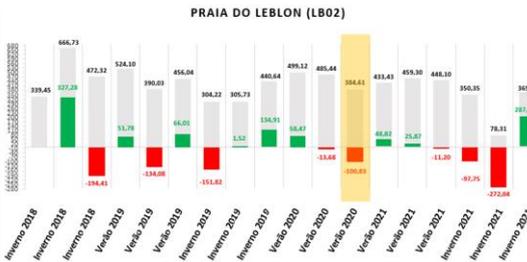
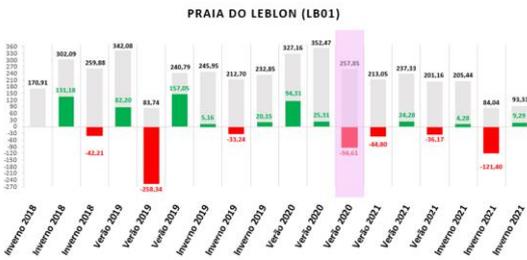
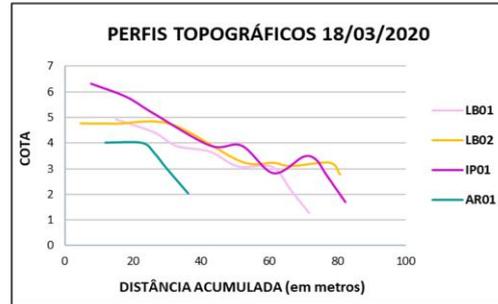
Figura 50. Perfil topográfico, volume emerso e ressacas percebidas no dia 20/09/2019.

6.1.5. Verão de 2020

Entre a última ocorrência de ressaca no mês de março (7/03/2020) e o dia do levantamento (18/03/2020), contabilizou-se onze dias sem registros de ondas de tempestade pelo litoral do Rio de Janeiro. Por se tratar de condições de tempo bom,

os perfis topográficos se comportarão conforme o esperado, conforme descrito por Flemming (2011). O perfil AR01 apresenta a menor largura do perfil topográfico (36,25 metros), já os demais pontos se apresentam maiores por conta da deriva litorânea que tende a carregar sedimentos de leste para oeste neste período, associados a presença de ondas construtivas de tempo bom, que levam sedimentos da zona submarina para a parte emersa da praia (IP01 com 82,31 metros, LB02 com 80,74 metros e ponto LB01 apresenta 71,66 metros de largura de faixa de areia). Tal comportamento é levantado no trabalho realizado por Casamayor *et al.* (2022) na praia de San Felipe (Grã Canária - Espanha), uma vez que a sazonalidade é marcante nessa praia. Segundo os autores, a praia tende a apresentar volume de sedimentos e consequente largura maiores em tempo bom do que em condições de tempestade, e o padrão sedimentar também é influenciado pela baixa energia de ondas.

Conforme ilustrado nos resultados do balanço sedimentos dos pontos de monitoramento, verificou-se um decréscimo. Como já pontuado anteriormente, antes da realização de tal levantamento, houve a passagem de uma ressaca entre os dias 6/02/2020 e 7/02/2020 com ondas de até 2,5 metros e direção Sul a Sudeste. Essa perda do volume sedimentar dos pontos pode estar associada a incapacidade do arco em se recuperar após esse evento (11 dias após). A não recuperação da praia após uma ressaca segundo Pinheiro (2018) ocorre devido ao fornecimento restrito de sedimentos ao longo ds costa e à energia insuficiente das ondas após uma tempestade para reposição de materiais.



LEVANTAMENTO 18/03/2020
 Sem registros de ressacas até a realização do campo
 Ressaca noticiada entre os dias 6/03/2020 e 7/03/2020 (antes do campo)
 11 dias sem influências de ressacas no arco praial (última 7/09/2019)

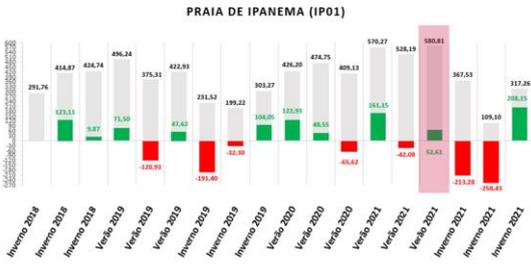
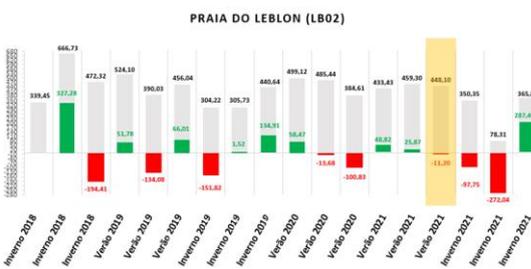
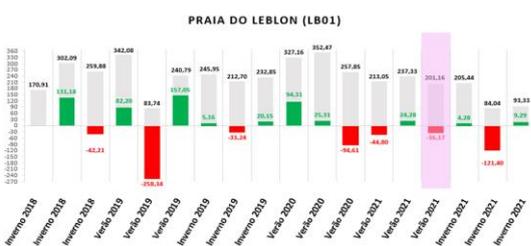
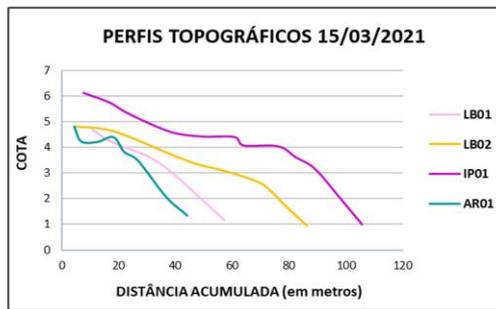
Figura 51. Perfil topográfico, volume emerso e ressacas percebidas no dia 18/03/2020.

6.1.6. Verão de 2021

Este é o único levantamento em que não foi emitido nenhum aviso de ressaca para a região do arco praial. O ponto AR01 apresentou a menor largura do perfil topográfico (44,05 metros), essa condição está associada a atuação de ondas

de Sudeste e a retirada de sedimentos pela deriva litorânea. Já o ponto IP01 apresentou a maior largura (105,5 metros), sendo esse comportamento relacionado ao aporte de sedimentos via deriva e a proteção da costa promovida pela ação das ilhas, retendo sedimentos neste ponto. O perfil central da praia do Rio das Ostras apresenta dinâmica similar e foi tido por Oliveira *et al.* 2020 como o “perfil que apresenta as menores variações topográficas e volumétricas”. No arco Arraial-Cabo Frio, o perfil central também é o mais estável.

Quanto ao volume dos sedimentos, percebe-se que os pontos na praia do Leblon (LB01 e LB02) perderam parte do seu volume sedimentar, enquanto os pontos de Ipanema e Arpoador (IP01 e AR01) acumularam sedimentos na porção emersa da praia. Essa dinâmica sedimentar evidencia a atuação das ondas de tempo bom no arco praial, uma vez que as mesmas podem incorporar sedimentos em um período onde não há interferência direta de ressacas, além do papel da deriva litorânea leste-oeste. Biauxque e Senechal (2018) mostram que a recuperação não é impulsionada apenas pelas trocas de sedimentos transversais, mas também pelo transporte litorâneo.



LEVANTAMENTO 15/03/2021
Sem registros de ressacas para o litoral durante o mês de março

Figura 52. Perfil topográfico, volume emerso e ressacas percebidas no dia 15/03/2021.

6.1.7. Inverno de 2021 (20/07/2021)

Entre os dias 19/07/2021 e 21/07/2021 o arco praiial foi atingido por uma ressaca com ondas de 3,0 metros e direção Sudoeste a Sul. A realização deste campo foi motivada pela exposição na mídia dos impactos que as ondas causaram no

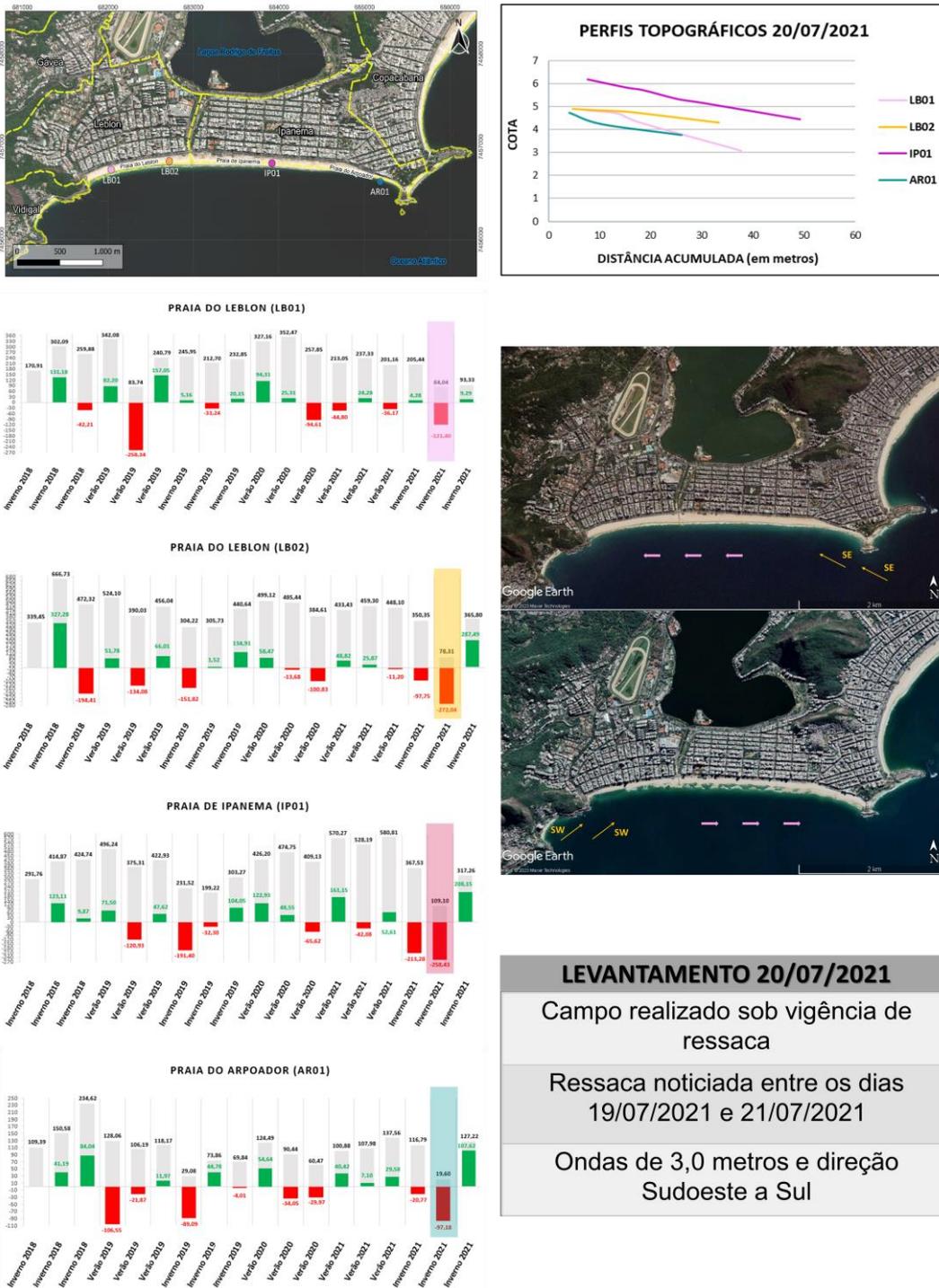
quiosque localizado próximo ao ponto LB02 (La Carioca), além da transposição das areias nas ruas da Delfim Moreira (bairro do Leblon). Em campo notou-se mar agitado, ondas chegando até o posto 11, impactos no quiosque, presença de equipes e maquinários da Comlurb para retirar as areias que se encontravam no calçadão, ciclovia e na rua, cúspides de praia e a presença de minerais pesados junto a face de praia (Figura 56).

Essa não foi a única ressaca em que foi registrada a transposição das ondas sobre as estruturas urbanas e impactos no mobiliário do quiosque La Carioca (ponto LB02) ao longo do estudo, porém foi a ressaca que mais impactou morfologicamente a praia onde pôde ser observado uma redução significativa da largura dos perfis. O ponto LB01 apresentou 37,7 metros; o ponto LB02 exibiu 33,28 metros de largura; o ponto IP01 49,2 metros e por fim, o ponto AR01 apresentou 26,1 metros de largura da faixa de areia durante a passagem desta ressaca. Ao longo dos quatro anos de monitoramento, esta foi a ressaca que gerou modificações mais expressivas em termos de morfodinâmica.

A ação deste evento também pode ser observada no volume sedimentar da parte emersa, pois em todos os pontos de monitoramento percebe-se a retirada de sedimentos da porção emersa da praia. O ponto em que mais se perdeu sedimentos foi o ponto LB02 com $-279,38 m^3$, ponto mais afetado pelas ondas de tempestade. No arco praial de Piratininga (Niterói), Pereira *et al.* (2017) mostraram que duas ressacas atingiram a região em 2016, sendo uma expressiva e outra que não apresentou perdas significativas no aporte sedimentar. A ressaca que mais impactou sucedeu-se em junho de 2016 e atingiu todos os pontos de monitoramento, sendo a porção oeste e central as mais erodidas.



Figura 53. Mobiliário do quiosque afetado pelas ondas de tempestade (A); presença de maquinários da Comlurb para retirar as areias que se encontravam na ciclovia (B); transposição das areias no calçadão e ciclovia (C); presença de minerais pesados (D).



LEVANTAMENTO 20/07/2021

Campo realizado sob vigência de ressaca

Ressaca noticiada entre os dias 19/07/2021 e 21/07/2021

Ondas de 3,0 metros e direção Sudoeste a Sul

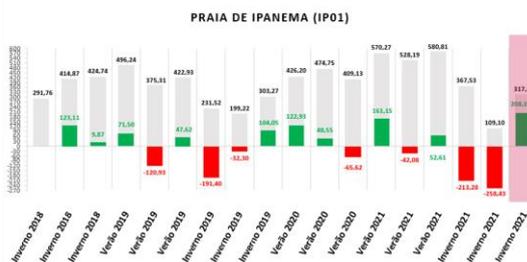
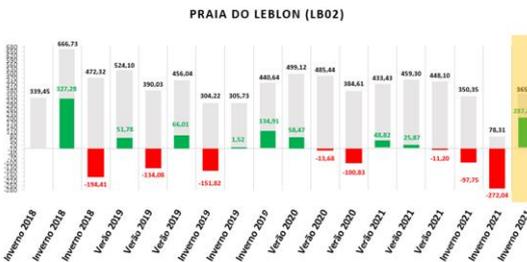
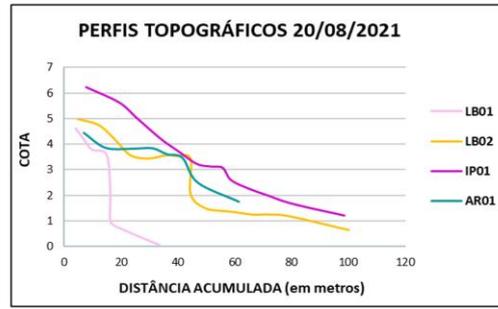
Figura 54. Perfil topográfico, volume emerso e ressacas percebidas no dia 20/07/2021.

6.1.8. Inverno de 2021 (20/08/2021)

Entre a última ocorrência de ressaca no mês de agosto (14/08/20201, única ressaca registrada no mês) e o dia do levantamento (20/08/2021), contabiliza-se seis

dias sem registros de passagens de ressacas pelo litoral do Rio de Janeiro. A predominância das ondas de tempestade para essa época do ano é observada na variação da largura apresentada pelos perfis topográficos: o ponto LB01 apresenta a menor largura em relação aos demais, com 33,7 metros e a presença de uma expressiva escarpa erosiva de mais de 1,50 metros de altura. O ponto LB02 é o que apresenta a maior largura do perfil, com 100,08 metros, enquanto que o ponto IP01 apresenta 98,4 metros e o AR01 exibiu 61,5 metros de largura de praia. A menor largura identificada no LB01 está associada a ação mais efetiva das ondas de tempestade sobre este trecho da praia, transportando os sedimentos para leste e causando o aumento do ponto LB02.

Diante dos dados referentes ao volume dos sedimentos, constata-se que o balanço sedimentar segue o padrão de comportamento observado na variação da largura dos perfis topográficos: no ponto LB01 verifica-se ganho de $9,29 m^3$; o ponto LB02 acumulou cerca de $314,54 m^3$; o ponto IP01 acumulou $250,16 m^3$ e no ponto AR01 observa-se $113,52 m^3$ de ganho de sedimentos na porção emersa da praia. A recuperação da praia pós evento de tempestade também é observada em Biscarrosse (França) por Biauxque e Senechal (2019). Esse evento aponta mais uma vez para o estado de equilíbrio dinâmico que o arco praiado estudado evidencia.



LEVANTAMENTO 20/08/2021

Sem registros de ressacas até a realização do campo

Ressaca noticiada entre os dias 13/08/2021 e 14/08/2021 (antes do campo)

6 dias sem influências de ressacas no arco praiial (última 27/08/2018)

Figura 55. Perfil topográfico, volume emerso e ressacas percebidas no dia 20/08/2021.

Através das informações a respeito no tópico 6.1, percebe-se que os pontos de monitoramento do arco praial apresentam uma dinamicidade em termos de largura de praia e demonstram uma grande variabilidade no pacote sedimentar da porção emersa, influenciados diretamente pela ação das ressacas que atingem o litoral. O ponto LB01 e AR01, localizados nas porções extremas do arco praial, foram os que apresentaram maior mobilidade sazonal em função da rotação de sedimentos de um lado ao outro do arco, a medida que a direção de incidência das ondas muda. Eles também são alimentados pela deriva litorânea de Leste-Oeste. O ponto IP01 é o menos dinâmico em termos de largura e apresenta um certo equilíbrio da morfologia, possivelmente influenciado pela proteção gerada pelas ilhas presentes em frente ao ponto. Por fim, o ponto LB02 é tido como o mais susceptível, principalmente no caso de ressacas mais expressivas, embora no geral demonstre certa estabilidade nos perfis topográficos e nos volumes dos sedimentos. (Figura 56).

Como já explicado anteriormente, a susceptibilidade do ponto é atrelada à retirada constante de sedimentos localizados na porção emersa do mesmo, fazendo com que o perfil de praia torne-se cada vez menor e ondas de alta energia tenham maior facilidade em impactar as estruturas urbanas localizadas na orla carioca.



Figura 56. Variabilidade dos perfis topográficos do arco praial.

A susceptibilidade do arco praial à impactos de ondas de tempestade é considerada mediana (Figura 58) Não é observado nenhum ponto que apresente uma erosão severa ou contínua, mas sim uma capacidade significativa de recuperação e resiliência dos pontos de monitoramento. Essa dinâmica também já foi explicada anteriormente ao apontar que o arco praial Leblon-Arpoador apresenta um certo equilíbrio dinâmico às condições do nível do mar atual.

Diante disso, a susceptibilidade do arco à eventos de tempestade é identificada somente no ponto LB02, e o ponto AR01 apresenta uma susceptibilidade mediana pois é uma praia que apresenta pouco estoque sedimentar regularmente e em episódios de ondas de alta energia, nota-se que a faixa de areia é “engolida” e as ondas impactam diretamente o calçadão (Figura 59). Quando ocorre esse tipo de evento, a circulação dos pedestres próximo à praia do Arpoado é limitada, chegando a ser impedida muitas das vezes. Essa dinâmica é noticiada em veículos de imprensa quando há a passagem de ressacas pelo litoral

As menores susceptibilidades foram percebidas no meio do arco praial e no extremo oeste. A presença das ilhas auxiliam na baixa dinâmica sedimentar e na largura dos perfis topográficos, uma vez que as mesmas impedem a entrada direta de ondas nesse ponto (Figura 57). Além disso, o ponto IP01 faz parte do sistema rotacional evidenciado na presente pesquisa.

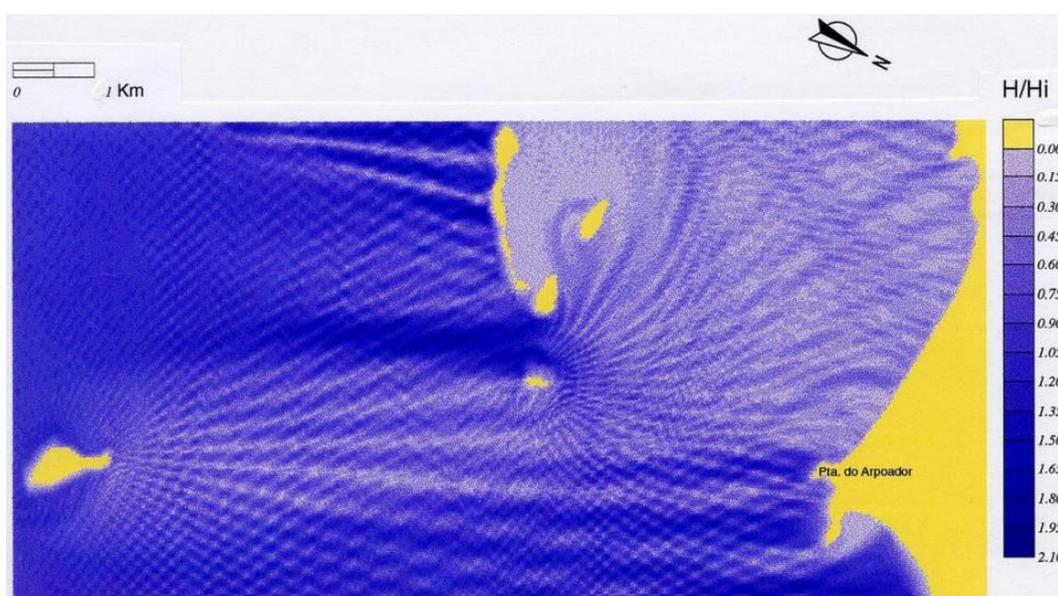


Figura 57. Propagação da agitação marítima desde o largo até às praias de Leblon, Ipanema e Arpoador. Exemplo de resultados obtidos com um modelo matemático. Fonte: FORTUNATO *et al.* (2008).

O ponto da extremidade oeste (LB01), embora aponte uma significativa dinamicidade no pacote sedimentar e na variação da largura da praia, está protegido pelo promontório localizado próximo ao mesmo, e apresenta uma disponibilidade maior de sedimentos.



Figura 58. Susceptibilidade dos perfis topográficos do arco praial.

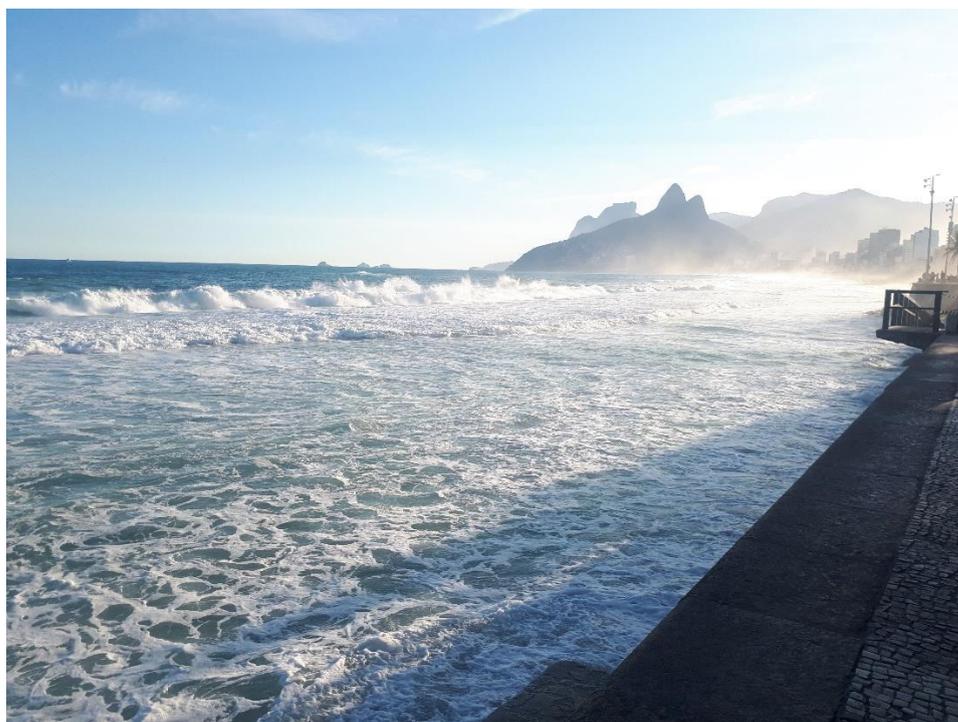


Figura 59. Arpoador sendo atingido por ondas diretamente no calçadão. Fonte: A autora.

6.2. Distribuição granulométrica do arco praial Leblon-Arpoador

Os grãos dispostos em uma praia são moldados e transportados constantemente pela ação das ondas, dos ventos e pelas correntes. A dispersão e o tamanho do grão também são controlados por esses três fatores (ondas, ventos e correntes). Mediante a disponibilidade de sedimentos, ondas de baixa energia são responsáveis por depositar grãos mais finos, já ondas de altas energias tendem a agitar o fundo resuspendendo os sedimentos finos e depositando os sedimentos mais grossos na porção emersa da praia (SUGUIO, 2003; DAVID-ARNOTT, 2010).

Como bem mostrado nos resultados granulométricos, o arco apresenta uma distribuição granulométrica distinta. O tamanho do grão diminui de oeste para leste, com o predomínio de areias médias a grossas na praia do Leblon e areias médias a finas em direção ao Arpoador (diminuição da granulometria).

Nas praias da enseada de Itaipu (Piratininga, Sossego, Cambainhas e Itaipu) é identificada uma dinâmica similar. A enseada é parcialmente abrigada e as ondas de tempestades incidem do quadrante Sudoeste e as de tempo bom, são provenientes de Sul e principalmente Sudeste (ECCARD *et al.*, 2017). Além disso, a presença das Ilhas Pai, Mãe e Menina apresentam influencia direta na entrada das ondas na enseada, uma vez que ondas de tempo bom sofrem o processo de difração devido a presença das mesmas (SILVA *et al.*, 2009) e as ondas de tempestade atingem o litoral causando expressivas variações na morfologia da praia (RODRIGUES *et al.*, 2015). A areia média é predominante nas praias localizadas na enseada de Itaipu, e a distribuição granulométrica é decorrente da energia das ondas que incidem na enseada, uma vez que a fração grossa é observada na porção oeste (área mais atingida pelas ondas por ser menos abrigada), e a fração fina é encontrada na porção leste da enseada devida a baixa energia das ondas (SILVA *et al.*, 2009; ECCARD *et al.*, 2017).

Essa mesma distribuição granulométrica é identificada na praia de São Conrado por Pena (2017), em que areias médias são predominantes mas encontram-se areias grossas e finas no arco praial. As areias grossas encontradas no arco praial de São Conrado estão associadas à variabilidade morfológica nos pontos analisados pela autora e em sua maioria, são percebidas no setor da face de praia (PENA, 2017).

No arco praial do Leblon ao Arpoador, notou-se que o grau de selecionamento do grão varia de acordo com o setor praial (pós-praia e face de praia) e com a direção leste-oeste do arco, evidenciando uma melhora na seleção dos grãos em direção da porção leste. Na porção oeste (Leblon) os grãos encontram-se moderadamente bem selecionados no pós-praia e bem selecionado na face de praia. Na região do meio do arco praial (Ipanema), os grãos são bem selecionados no pós-praia e na face de praia e esse mesmo grau de selecionamento também é observado na porção leste (Arpoador). Quadros *et al.* (2016) identificaram semelhante aumento no grau de selecionamento dos grãos na praia do Farol (Ilha do Cabo Frio – RJ) em que os grãos são moderadamente bem selecionado na porção oeste e bem selecionados na porção leste. Semelhante dinâmica também é observada em Marino *et al* (2013).

Como a maturidade também pode ser relacionada com o grau de selecionamento, percebe a mesma dinâmica já descrita: grãos supermaturos no pós-praia e maturos na face de praia. Outro fator decisivo na maturidade de um grão influi no grau de arredondamento do mesmo, em que grãos mais arredondados são classificados como supermaturos e grãos subangulares são tidos como maturos (FOLK, 1951). Esses dados serão discutidos no próximo subtópico (Morfoescopia).

A presença das ilhas incorporadas ao sistema do arco praial pode apresentar certa influência no tamanho dos grãos dispostos nos pontos de monitoramento. Como já pontuado, os sedimentos grossos são percebidos somente na porção oeste do arco praial, mostrando que essa é menos abrigada à ondas de Sudoeste e a energia dessas ondas é capaz de remobilizar o fundo e dispor sedimentos grossos na porção emersa da face de praia. Porém nas análises granulométricas, não foi se quer identificado a presença de sedimentos grossos nos pontos mais à leste. Mesmo quando impactado por ondas de tempestade, os grãos continuaram variando em areias médias a finas. Devido ao fato de se observar uma zona de sombra causada pelas ilhas, os sedimentos grossos dispostos no fundo marinho, não são atingidos pelas ondas de alta energia e não são dispostos na porção emersa do prisma praial. Logo, tende-se a acreditar que além de impactar nos perfis topográficos e na distribuição sedimentar, a presença das ilhas também influencie na predominância do grão.

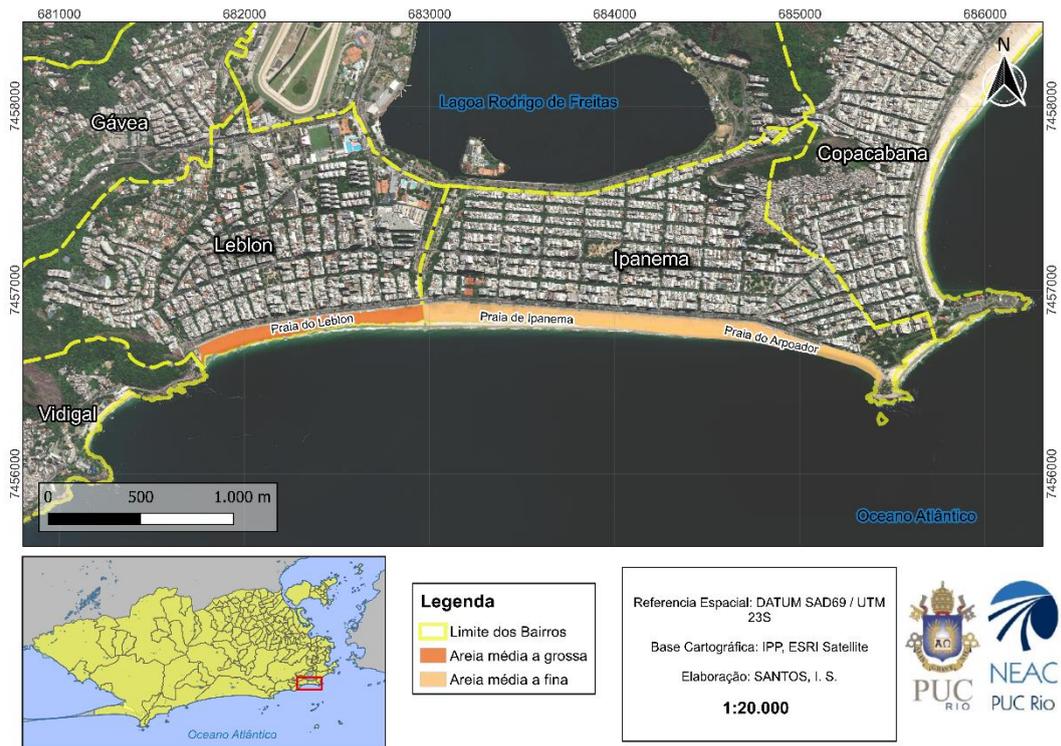


Figura 60. Distribuição granulométrica durante o arco praial.

6.3. Morfoscopia

Os dados de morfoscopia descritos no capítulo dos Resultados mostraram que o arco praial segue um padrão quanto ao grau de arredondamento dos grãos, onde no setor do pós-praia os grãos se apresentam subarredondados e na face de praia subangulares. Esse padrão de arredondamento está associado diretamente ao tipo de energia predominante no ambiente, conforme observado na granulometria dos pontos de monitoramento onde em ambientes de alta energia predominaram areias grossas, enquanto que areias finas estavam associadas a ondas de baixa energia (DAVID-ARNOTT, 2010).

Por estarem sendo retrabalhados em ambiente aquoso, os grãos subangulares encontrados na face de praia não tiveram tempo para se arredondar (FOLK, 1980) apresentando apenas desgastes nos cantos dos grãos, como afirmado por Suguio (1973) ao descrever as diversas características associadas a morfologia de grãos de sedimentos. Já os grãos subarredondados encontrados no pós-praia são por sua vez resultado do retrabalhamento em ambiente eólico, desta forma se arredondam com mais facilidade, segundo destaca Folk (1980). Em outras palavras, os grãos subarredondados se encontram a mais tempo no sistema praial do que os grãos subangulares e se concentram no pós-praia a partir do retrabalhamento eólico. Ainda sob efeitos da ação dos ventos e da água, os grãos apresentaram-se de forma geral foscos no pós-praia e polidos na face de praia, como descrito na literatura (FOLK, 1980; SUGUIO, 1973; SUGUIO, 2003). As partículas foscas presente na face de praia estão atreladas à presença de feldspato e fragmentos de conchas nas amostras.

Nas análises de Pinto (2018) e Pinto *et al.* (2022) evidencia-se que na planície costeira do litoral de Jaconé-Saquarema (RJ), as areias variam entre arredondadas a bem arredondadas. Já em trabalhos de Pinheiro (2018); Pinheiro *et al.* (2021), em que se observa influência fluvial na composição sedimentar das praias de Paraty, o grau de arredondamento dos grãos varia de subangular de origem fluvial, seguidos de grãos arredondados de origem marinha. Esta diferenciação de depósito é explicada por McLane (1995), onde ambientes fluviais tendem a apresentar grãos menos arredondados e mais foscos, enquanto que grãos de proveniência marinha são mais arredondados e achatados e apresentam superfícies lisas e brilhosas. Essa dinâmica sedimentar e morfoscópica também é descrita mo

trabalho de Araújo *et al* (2020). Vale acrescentar que os sedimentos encontrados no arco praial do Leblon ao Arpoador são advindos da plataforma continental e são tidos como sedimentos relíquias devido ao fato de terem sido depositados em condições em que o nível médio do mar se encontrava abaixo do atual (MARTINS *et al.* 1978).

7. CONCLUSÃO

Inserido em um litoral urbano, o arco praial do Leblon ao Arpoador apresenta particularidades em relação a sua caracterização morfológica e sedimentar. É possível afirmar que as extremidades do arco evidenciam dinamicidade em termos de largura de praia, enquanto a porção central mostra-se mais protegida por conta da presença de ilhas a sua frente (Cagarras, Redonda e Rasa). Essa dinâmica está associada a um processo de rotação de sedimentos gerado pela mudança no sentido da deriva litorânea, que tende a se desenvolver de leste para oeste sob a ação de ondas de sudeste, mais comuns no verão e relacionadas a tempo bom, invertendo esse sentido durante a chegada de ondas de tempestade (inverno), onde passa a se deslocar de oeste para leste sob a ação das ondas adivindas de sudoeste. Percebe-se assim que os sedimentos se mantem aprisionados nesse sistema praial, não havendo perdas de sedimentos para outras praias adjacentes.

Dentre os pontos de monitoramento, o ponto LB02 é apontado como o mais vulnerável a eventos de tempestade, mostrando recorrentes episódios em que as ondas chegam a afetar a infraestrutura urbana. Esta vulnerabilidade está vinculada diretamente com o volume sedimentar deficitário. Observa-se que este ponto não é impactado por todas as ressacas incidentes no litoral, mas sim em situações em que as mesmas apresentam-se mais frequentes ou com altura e energia mais significantes. Neste cenário é comum observar eventos de transposição por ondas, remobilizando os sedimentos sobre quiosques, calçada, ciclovias e até a avenida. O déficit sedimentar neste ponto faz com que o mesmo apresente uma curta largura, o que também facilita a passagem das ondas de tempestade. Frente ao atual cenário de mudanças climáticas e aumento na magnitude e frequência de eventos extremos nos próximos anos, este trecho da orla merece atenção dos gestores costeiros no desenvolvimento de estratégias de adaptação e mitigação de impactos.

A dinâmica dos pontos de monitoramento (LB01, LB02, IP01 e AR01) é marcada pelas variações sazonais que o arco praial sofre durante o ano, principalmente em função da variação da energia das ondas entre o inverno e o verão. No inverno, os perfis de tempestades tornam-se estreitos devido à alta energia das ondas que atingem o litoral, enquanto que no verão os perfis de tempo bom tendem a aumentar a largura da parte emersa da praia devido à baixa energia

de ondas incidentes no arco praial que trazem sedimentos da zona submarina. Observou-se ainda a resiliência da praia após eventos extremos com perda significativa de volume sedimentar. Em poucos dias sob a ação de ondas de tempo bom a praia tende a recuperar a sedimentação da parte emersa, como observado em alguns dos levantamentos. Neste processo, parece que a porção oeste da praia acaba sendo a última a se recuperar, visto que este trecho também é o mais diretamente impactado pelas ondas de tempestade.

As comparações dos perfis topográficos com os dados de volume emerso dos sedimentos nos dias analisados enfatizam ainda mais as variações sazonais ocasionadas pela ação de ondas de tempestade e de tempo bom, além de demonstrar a presença da deriva litorânea no transporte dos sedimentos no arco praial. Quando os perfis do Leblon são atingidos por ondas de tempestade, observa-se a retirada dos sedimentos na porção emersa e o acúmulo de sedimentos nos pontos de Ipanema e Arpoador, mostrando assim que os sedimentos são transportados de oeste para leste nesta situação. Através dos dados de volume também ficou explícito a capacidade de resiliência do arco praial após eventos de tempestade conforme citado anteriormente.

As análises granulométricas identificaram que o arco praial é composto majoritariamente por areias médias e que a distribuição granulométrica varia por setor: areias médias a grossas são observadas à oeste e areias médias a finas estão presentes na porção leste do arco praial. O grau de selecionamento dos grãos também segue essa setorização, uma vez que na parte oeste (Leblon) são encontradas areias que variam de bem selecionadas a muito bem selecionadas no pós-praia e na face de praia e na porção leste percebe areias bem selecionadas em ambos os setores praias.

O arco praial é composto por areias quartzosas subangulares encontradas na face de praia a subarredondadas dispostas no setor do pós-praia. Nas análises morfoscópicas foi possível reconhecer a presença de feldspato e fragmentos de conchas em maior proporção nas amostras da face de praia. A textura superficial dos grãos também é diferenciada para os setores analisados, apresentando-se mais foscas no pós-praia e mais vítreas na face de praia. A diferenciação da energia apresentada nos setores do pós-praia e face de praia, faz com que os estágios de maturidade dos grãos também se comportem de maneira distinta: os grãos da face de praia por serem subangulares encontram-se no estágio maduro e os grãos

subarredondados, observados no pós-praia, encontram-se em estágio supermaturo.

Outro fator importante na dinâmica desse arco praial está relacionado com as ondas que o atingem, ora adivindas da direção Sudeste, ora de Sudoeste, impactando principalmente as extremidades do arco praial . A energia das ondas é o fator principal na movimentação sazonal dos sedimentos, no diâmetro médios dos grãos, no grau de arredondamento, na seleção dos grãos e nos estágios de maturidade dos mesmos.

Tais informações representam uma ampla e detalhada caracterização deste trecho do litoral, cujas informações podem contribuir na tomada de decisão dos agentes públicos no que tange a gestão do ambiente costeiro, principalmente em um cenário de mudanças climáticas e intensificação de eventos extremos.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AAGARD, T.; VINTHER, N. Cross-Shore Currents in the Surf Zone: Rips or Undertow? *Journal of Coastal Research* 24(3):561-570. 2008.

ALMEIDA, F. F. M. & CARNEIRO, C. D. R. Origem e evolução da Serra do Mar. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, 28(2): 135-150, 1998.

ALMEIDA, F.F.M. 1967. Origem e evolução da plataforma brasileira. DNPM. Div. Geol. Min., bol. 241. 36 p.

ALMEIDA, F.F.M. 1976. The system of continental rifts bordering the Santos Basin, Brazil. *Anais da Academia Brasileira Ciências*, 48:15-26.

AMADOR, Elmo da Silva. *Bacia da Baía de Guanabara: características geoambientais, formação e ecossistemas*. Rio de Janeiro: Interciencia, 2012. 432p.:il.; 28 cm

ARAÚJO, D. C. MORFOLOGIA DE FUNDO E SEDIMENTAÇÃO DO CANAL DE ITAIPU (NITERÓI, RJ). 2020. 68f. Monografia (Licenciatura em Geografia) – Faculdade de Formação de Professores, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, São Gonçalo, 2020.

Arjen Luijendijk, Sierd de Vries - Global beach database, Editor(s): Derek W.T. Jackson, Andrew D. Short, *Sandy Beach Morphodynamics*, Elsevier, 2020, Pages 641-658.

ARONA, T. N. Lugares de Interesse Geológico e proposta de Georroteiro na Trilha Transcarioca. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017, vi, 50 p.

ASMUS, H.E. & FERRARI, A.L. 1978. Hipótese sobre a causa do tectonismo cenozóico na Região Sudeste do Brasil. In: PETROBRÁS. Aspectos Estruturais da Margem Continental Leste e Sudeste do Brasil. Rio de Janeiro, CENPES/DINTEP. p.75-88. (Série Projeto REMAC, 4).

Biausque, M., & Senechal, N. (2019). Seasonal morphological response of an open sandy beach to winter wave conditions: The example of Biscarrosse beach, SW France. *Geomorphology*, 332, 157–169.

Biausque, M., Senechal, N., 2018. Storms impacts on a sandy beach including seasonal recovery: alongshore variability and management influences. *Revue Paralia*. 11. <https://doi.org/10.5150/revue-paralia.2018.n02>

BIGARELLA, J. J., SALAMUNI, R. E MARQUES F, O P. L. Método para avaliação do nível oceânico à época da formação dos terraços de construção marinha. *Boletim Paranaense de Geografia*, 4/5, 1961.

BIRD, E. *Coastal Geomorphology: an introduction*. Jon Wiley & Sons.Inc 2008

BIRKEMEIER,W.A.A user's guide to ISRP: The interactive survey reduction program. Coastal Engineering Research Center,Vicksburg, 118 p, 1984.

BLOTT, S.J.; PYE, K. GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. Technical communication. *Earth Surface Processesand Landforms*,nº26, p. 1237-1248, 2001.

BOGGS JR., S. *Principles of sedimentology and stratigraphy*.4 ed. New Jersey: Pearson Prentice Halt, 662 p, 2006.

Bukvic, Anamaria et al. "A Systematic Review of Coastal Vulnerability Mapping." *Sustainability* 12 (2020): 2822.

BULHÕES, E.M.R.; FERNANDEZ, G.B.; OLIVEIRA FILHO, S.R.; PEREIRA, T.G.; ROCHA, T.B. Impactos costeiros induzidos por ondas de tempestade entre o Cabo Frio e o Cabo Búzios, Rio de Janeiro, Brasil. *Quaternary and Environmental Geosciences*, v. 5(2), p. 155-165, 2014.

BULHÕES, Eduardo Manoel Rosa. *Condições Morfodinâmicas Associadas a Riscos aos Banhistas. Contribuição à Segurança nas Praias Oceânicas da Cidade do Rio de Janeiro, RJ*. 2006. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

BULHÕES, Eduardo Manoel Rosa. *Condições Morfodinâmicas Associadas a Riscos aos Banhistas. Contribuição à Segurança nas Praias Oceânicas da Cidade do Rio de Janeiro, RJ*. 2006. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

CARVALHO, Breylla Campos. Variabilidade da resposta da linha de costa aos condicionantes hidrodinâmicos e às oscilações do nível do mar no litoral sul fluminense. 2019. 192 f. Tese (Doutorado em Oceanografia) – Faculdade de Oceanografia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

CASTELLE, B.; HARLEY, M. Extreme events: impact and recovery. *Sandy Beach Morphodynamics*, p. 533–556, 2020.

Chalegre-Touceira, Maria Carolina. Caracterização e mapeamento de risco dos danos causados pelo mar na cidade do Rio de Janeiro – RJ, Brasil. 2018. 132 p. Monografia (Bacharelado em Oceanografia) – Faculdade de Oceanografia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018

COCO, G.; MURRAY, B.; D. ASHTON, A. Rhythmic patterns in the surfzone. *Sandy Beach Morphodynamics*, p. 297–316, 2020.

Cooper, J.A.G., Masselink, G., Coco, G. Sandy beaches can survive sea-level rise. *Nat. Clim. Chang.* 10, 993–995 (2020).
<https://doi.org/10.1038/s41558-020-00934-2>

Costa, Carlos Eduardo Santos. Relação entre a expansão da Frente Polar Atlântica e os impactos de eventos extremos na zona costeira do Rio de Janeiro (RJ): análise dos últimos 30 anos. Rio de Janeiro, 2020. 113p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Geografia e Meio Ambiente, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

DANTAS, Marcelo Eduardo. Geomorfologia do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: CPRM, 2000. v.1. 75p.

DANTAS, Marcelo Eduardo. Geomorfologia do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: CPRM, 2000. v.1. 75p.

DAVIDSON-ARNOTT, R., 2010. Introduction to coastal processes and geomorphology. Cambridge University Press

DAVIS, JR.; RICHARD, A. Beach and Nearshore Zone. In: *Coastal Sedimentary Environments*. 3. ed. New York: Springer-Verlag, p. 379-444, 1985.

DE VRIES, S.; WENGROVE, M.; BOSBOOM, J. Marine sediment transport. *Sandy Beach Morphodynamics*, p. 187–212, 2020.

DIAS, J. A. A análise sedimentar e o conhecimento dos sistemas marinhos. Universidade do Algarve, 2004. Faro.

EMERY, K. O. 1961. A Simple Method of Measuring Beach Profiles. *Limnology and Oceanographic* V 6. pp. 90-93.

Eun Chul Choi, Joo Suk Lee, Jeong-In Chang. Willingness to pay for the prevention of beach erosion in Korea: The case of Haeundae beach, *Marine Policy*, Volume 132, 2021.

Feng, J., Li, D., Li, Y. et al. Storm surge variation along the coast of the Bohai Sea. *Sci Rep* 8, 11309 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-29712-z>

FERNANDEZ, G. B. et al. Morfodinâmica costeira do litoral fluminense: 15 anos de observação contínua. In: MUEHE, D.; LINS-DE-BARROS, F. M.; PINHEIRO, L. (orgs.) *Geografia Marinha: oceanos e costas na perspectiva de geógrafos*. Rio de Janeiro: PGGM, 2020. p. 196-226. ISBN 978-65-992571-0-0

Fernandez, Guilherme & Baptista da Rocha, Thaís & Oliveira Filho, Silvio & Vasconcelos, Sérgio & Carvalho da Silva, André Luiz & Pereira, Thiago & Moulton, Martim. (2021). *EVOLUÇÃO MORFODINÂMICA DE PLANÍCIES COSTEIRAS: DO QUATERNÁRIO AOS EVENTOS ATUAIS*.

Fernando J. Méndez, Ana Rueda - Wave climates: deep water to shoaling zone, Editor(s): Derek W.T. Jackson, Andrew D. Short, *Sandy Beach Morphodynamics*, Elsevier, 2020, Pages 39-59.

FERRARI, A.L. 2001. *Evolução Tectônica do Gráben da Guanabara*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 412 p.

FERREIRA, O. M., ALMEIDA, L. P. M., RODRIGUES, B. A., MATIAS, A. (2010). Determination of thresholds for storm impacts. In: *XI Reunión Nacional de Geomorfología*, Solsona, 35-42.

FitzGerald, D.M., Fenster, M.S., Argow, B., Buynevich, I.V., 2008. Coastal impacts due to sea-level rise. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 36:601–647. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.35.031306.140139>

Flayou, L.; Snoussi, M.; Raji, O. Evaluation of the economic costs of beach erosion due to the loss of the recreational services of sandy beaches—The case of Tetouan coast (Morocco). *J. Afr. Sci.* 2021, 182, 104257.

FLEMMING, B. Beach sand and its origins. *Sandy Beach Morphodynamics*, p. 15– 37, 2020.

FOLK, R. L. 1980. *Petrology of sedimentary rocks*. Austin: Hemphill Publishing Company.

FOLK, R.L. (1951). Stages of textural maturity in sedimentary rocks. *Journal of Sed. Petrol.*, 21: 127-130

FORTUNATO, A. B.; CLÍMACO, M.; OLIVEIRA, F.; OLIVEIRA, A.; SANCHO, F; FREIRE, P. Dinâmica Fisiográfica da Orla Costeira: Estudos de Reabilitação e Protecção Coastal Dynamics: Rehabilitation and Protection Studies. *Revista da Gestão Costeira Integrada*, v.8 n.1 45-63p, 2008.

GALVIN, C. J. Breaker type classification on three laboratory beaches. *Journal of Geophysical Research*, v. 73, n. 12, p. 3651–3659, 1968.

Gutierrez, B.T., Williams, S.J., Thieler, E.R., 2009. Ocean coasts. Coastal Sensitivity to Sea- Level Rise: A Focus on the Mid-Atlantic Region, U. S. Climate Change Science Program, Report 4.1, pp. 43–56.

Harley M.2017. Coastal storm definition. In: *Coastal Storms*.Chichester: John Wiley & Sons; p. 1–21.

HEILBRON, M. & MACHADO,N. 2003. Timing of terrane accretion in the Neoproterozoic-Eopaleozoic Ribeira orogen (SE Brazil). *Precambrian Research*, 125:87-112.

HEILBRON, M.; EIRADO, L. G.; ALMEIDA, J. (Org.). Mapa geológico e de recursos minerais do estado do Rio de Janeiro. Belo Horizonte: CPRM. 1 mapa. Escala 1:400.000. Programa geologia do Brasil. Mapas geológicos estaduais. 2016.

HEILBRON, M.; VALERIANO, C.M. VALLADARES, C.S.; MACHADO, N. 1995. A Orogênese Brasileira no segmento central da Faixa Ribeira, Brasil, *Revista Brasileira de Geociências*, 25(4): 249-266.

Helderop, E., & Grubestic, T. H. (2019). Social, geomorphic, and climatic factors driving U.S. coastal city vulnerability to storm surge flooding. *Ocean and Coastal Management*, 181, [104902].
<https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.104902>

IBGE, CENSO 2010. IBGE em parceria com a Marinha do Brasil lança o Atlas Geográfico das Zonas Costeiras e Oceânicas. Disponível em: <https://censo2010.ibge.gov.br/noticias_censo.html?busca=1&id=1&idnoticia=2036&t=ibge-parceria-marinha-brasil-lanca-atlas-geografico-zonas-costeiras-oceanicas&view=noticia> Acesso em: 22 de março de 2018.

JACKSON, D. W. T.; SHORT, A. D. Introduction to beach morphodynamics. *Sandy Beach Morphodynamics*, p. 1–14, 2020.

Kim, Y.H., 2020. Assessment of coastal inundation due to storm surge under future sealevel rise condition. In: Malvárez, G. and Navas, F. (eds.), *Global Coastal Issues of 2020*. Journal of Coastal Research, Special Issue No. 95, pp. 845–849. Coconut Creek (Florida), ISSN 0749-0208

Kirezci, E., Young, I.R., Ranasinghe, R. et al. Projections of global-scale extreme sea levels and resulting episodic coastal flooding over the 21st Century. *Sci Rep* 10, 11629 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67736-6>

LAINING, A.K. *Guide to Wave Analysis and Forecasting*. Geneva: World Meteorological Organization, 2. ed., nº 702, 1988.

LINS-DE-BARROS, F.M.; KLUMB-OLIVIERA, L.; LIMA, R.F. Avaliação histórica da ocorrência de ressacas marinhas e danos associados entre os anos de 1979 e 2013 no litoral do estado do Rio de Janeiro (Brasil). *Journal of Integrated Coastal Zone Management / Revista de Gestão Costeira Integrada* vol. 18, n. 2, p.85-102, 2018. Disponível em http://www.aprh.pt/rgci/pdf/rgci-n146_Barros.pdf | DOI:10.5894/rgci-n146

Lins-de-Barros, Flavia Moraes ; SAUZEAU, THIERRY ; GUERRA, JOSEFA VARELA . L'évolution historique de l'occupation des littoraux français (golfe de Gascogne) et brésilien (Rio de Janeiro) face à l'érosion des côtes, aux risques et à la vulnérabilité (19e-20e siècles). *CONFINS (PARIS)* , v. 1, p. 1-44, 2019.

LUIJENDIJK, A.; HAGENAARS,G.; RANASINGHE, R. BAART, F. DONCHYTS, G.; AARNINKHOF, S. The State of the World's Beaches. *Scientific Reports*, v. 8, n.: 6641, 2018. <https://www.nature.com/srep/>

Mariona Casamayor, Ignacio Alonso, Nieves G. Valiente, María José Sánchez-García. Seasonal response of a composite beach in relation to wave climate, *Geomorphology*, Volume 408,2022,108245, ISSN 0169-555X. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108245>.

MAZUR, F. P. R. ; PONTES, L. R. . Caracterização socioambiental do Maciço da Tijuca, Rio de Janeiro.. In: XIV Encontro de Geógrafos da América Latina, 2013, Lima, Peru. Caracterização socioambiental do Maciço da Tijuca, Rio de Janeiro., 2013.

Mentaschi, L., Voudoukas, M.I., Pekel, JF. *et al.* Global long-term observations of coastal erosion and accretion. *Sci Rep* 8, 12876 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-30904-w>

MIO, E. de; CHANG, H. K.; CORRÊA, F. S. Integração de métodos geofísicos na modelagem crustal da Bacia de Santos. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 23, n. 3, p. 275-284, 2005.

MUEHE, D. 1994. Geomorfologia costeira. In: Guerra, A.J.T. & Cunha, S.B. (Orgs.). *Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos*. 2.ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. p.253-308.

MUEHE, D. 1996. Geomorfologia Costeira. In: Guerra, A.J.T. & Cunha, S.B. (Orgs.). *Geomorfologia: exercício, técnicas e aplicações*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. p.191- 238

MUEHE, D. Definição de limites e tipologias de orla sob os aspectos morfodinâmicos e evolutivos. In: MMA/ SQA; MP/SQU. *Projeto Orla: Subsídios para um projeto de gestão*. Brasília, DF, p. 13-32, 2004.

MUEHE, D. O sistema praias: formas, termos, processos e medição. In: MUEHE, D.; LINS-DE-BARROS, F. M.; PINHEIRO, L.S. (orgs.) *Geografia Marinha: oceanos e costas na perspectiva de geógrafos*. Rio de Janeiro: PGGM, 2020. p. 27-55. ISBN 978- 65-992571-0-0

MUEHE, D. Pós-praia não deve ser traduzido como backshore – uma revisão da terminologia brasileira do sistema praia - antepraia. *Quaternary and Environmental Geosciences*, v. 10, n.1 p. 40-43, 2019.

Muehe, D., & Valentini, E. 1998. *O Litoral do Estado do Rio de Janeiro: uma caracterização físico-ambiental*. (Ed.), Rio de Janeiro: FEMAR: p. 123

Murty, T.S., 1984, Storm surges - meteorological ocean tides: Canada, National Research Council of Canada, *Canadian Bulletin of Fisheries and Aquatic Sciences* v. 212, 897 p.

NICHOLS, G. Clastic coasts and estuaries. In: *Sedimentology and Stratigraphy*. Chichester: John Wiley & Sons, p.199-214, 2009.

Oliveira Filho, S. R., Santos, R. A., & Fernandez, G. B. (2020). EROSÃO E RECUPERAÇÃO DE PRAIAS REFLETIVAS DE ALTA ENERGIA IMPACTADAS POR ONDAS DE TEMPESTADE GERADAS POR CICLONE TROPICAL. *Revista Brasileira De Geomorfologia*, 21(2). <https://doi.org/10.20502/rbg.v21i2.1455>

Patsch, K. B., & Griggs, G. B. (2006). Littoral Cells, Sand Budgets, and Beaches: Understanding California's Shoreline. Oakland, California: California Sediment Management Group. <http://www.dbw.ca.gov/CSMW/PDF/LittoralDrift.pdf>

PENA, Juliana do Nascimento. Dinâmica geomorfológica das praias oceânicas urbanas da cidade do Rio de Janeiro e impactos associados a ressacas do mar: uma contribuição à gestão costeira. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geografia: Universidade do Rio de Janeiro, 149 pg., Rio de Janeiro.

PEREIRA, T. G.; OLIVEIRA FILHO, S. R.; MORAES, C. P. R. A.; LESSA, A. C. P. Impacto das Tempestades de 2016 em Orla Urbanizada: Arco Praial de Piratininga, Niterói – RJ. *Revista do Departamento de Geografia, USP. Volume Especial – Eixo 4*, 2017, p. 75-84.

PINHEIRO, A. B. Geomorfologia de praias e sensibilidade ambiental do litoral de Paraty (RJ) à potenciais eventos de derramamento de óleo. 2018. 141 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Faculdade de Formação de Professores, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, São Gonçalo, 2018

Pinheiro, A.B., da Silva, A.L.C. & Neto, J.A.B. Dynamics and storm records on sheltered beaches: Paraty, southeast coast of Brazil. *J. Sediment. Environ.* 6, 647–663 (2021). <https://doi.org/10.1007/s43217-021-00075-2>

PINTO, Valéria Cristina Silva. Caracterização morfológica e sedimentar da planície costeira e vulnerabilidade do litoral de Jaconé-Saquarema (RJ) às ondas de tempestade. 2018. 131f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Faculdade de Formação de Professores, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, São Gonçalo, 2018.

Pucino, N., Kennedy, D.M., Carvalho, R.C. *et al.* Citizen science for monitoring seasonal-scale beach erosion and behaviour with aerial drones. *Sci Rep* 11, 3935 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-83477-6>

RICCOMINI, C. 1989. O Rift Continental do Sudeste do Brasil. Tese de Doutorado, Departamento de Geologia, Universidade de São Paulo, São

Paulo, 256p.

RICCOMINI, C.; SANT'ANNA, L. G.; FERRARI, A. L. Evolução geológica do Rift Continental do Sudeste do Brasil. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C. D. R.; BRITO NEVES, B. B. (Org.). Geologia do Continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo: Beca, p. 383-405. 2004.

ROSMAN, P. C. C.; NEVES, C. F.; MUEHE, D. & VALENTINI, E. M. S. (2007). Estudo de Vulnerabilidades no Litoral do Estado do Rio de Janeiro devido às Mudanças Climáticas. Fundação Coppetec PENO-9501, Relatório Final, 98 pp.

SANTOS, I. S. Morfodinâmica costeira e resposta a eventos de tempestades no arco praiado entre Leblon-Arpoador, município do Rio de Janeiro. PUC-Rio, 2020.

SANTOS, M.S.T; AMARO, V.A.; FERREIRA, A.T.S; SANTOS, A.L.S. Mapeamento de precisão da dinâmica costeira de curta duração em áreas de alta taxa de erosão no Nordeste do Brasil. Revista de Geologia, HIDROSEMA-UFRN, v. 25, p. 7- 19. 2012

SCHMIEGELOW, J.M. O Planeta Azul - Uma Introdução às Ciências Marinhas. Interciência.2004. 269p.

SCHOBENHAUS, C. & CAMPOS D. A. 1984. A Evolução da Plataforma SulAmericana no Brasil e suas Principais Concentrações Minerais. In: SCHOBENHAUS, C.; CAMPOS, D. A.; DERZE, G. R.; ASMUS, H. E. Geologia do Brasil. Ministério das Minas e Energia/Departamento Nacional de Produção Mineral, Brasília. p 9-53.

Semeoshenkova, V., Newton, A., 2015. Overview of erosion and beach quality issues in three Southern European countries: Portugal, Spain and Italy. Ocean Coast Manag. 118, 12–21. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.08.013>.

SHEPARD, F. P.; INMAN, D. L. Near-shore circulation related to bottom topography. Transactions of the American Geophysical Union, v. 31, n. 4, p. 555–565, 1950.

SOUZA, C. R. G. ; SOUZA FILHO, P. W. M. S. ; ESTEVES, L. S. ; VITAL, H. ; DILLENBURG, S. R. ; PATCHINEELAM, S. M. ; ADDAD, J. E. . Praias arenosas e erosão costeira. In: Celia Regina de Gouveia Souza; Kenitiro Suguio; Antonio Manoel dos Santos Oliveira; Paulo Eduardo Oliveira.

(Org.). Quaternário do Brasil. Ribeirão Preto: Holos, Editora, 2005, v., p. 130-152.

SUGUIO, K. Introdução à sedimentologia. São Paulo: EDUSP. 1973, 317 p.

Tadesse, M.G., Wahl, T. A database of global storm surge reconstructions. *Sci Data* 8, 125 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41597-021-00906-x>.

Tim Scott, Gerd Masselink, Tim O'Hare, Andrew Saulter, Tim Poate, Paul Russell, Mark Davidson, Daniel Conley. The extreme 2013/2014 winter storms: Beach recovery along the southwest coast of England, *Marine Geology*. Volume 382, 2016, Pages 224-241. ISSN 0025-3227, <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2016.10.011>.

Tsoukala, V.K., Katsardi, V., Hadjibiros, K. *et al.* Beach Erosion and Consequential Impacts Due to the Presence of Harbours in Sandy Beaches in Greece and Cyprus. *Environ. Process.* 2 (Suppl 1), 55–71 (2015). <https://doi.org/10.1007/s40710-015-0096-0>

TUCKER, M. E. 2003. Sedimentary rocks in the field. Third ed. Chichester: Ed. Wiley.

TUPINAMBÁ, M. (coord.). 2012. Nota explicativa do Mapa Geológico da Folha Nova Friburgo 1:100.000. Rio de Janeiro, CPRM - Serviço Geológico do Brasil. 136p.

TUPINAMBÁ, M., 1999. Evolução tectônica e magmática da Faixa Ribeira na região da Serra dos Órgãos. Tese de Doutorado (unpublished), Instituto de Geociências - Universidade de São Paulo, São Paulo, 186 p.

TUPINAMBÁ, M.; HEILBRON, M.; DUARTE, B.P.; NOGUEIRA, J.R.; VALLADARES, C.S.; ALMEIDA, J.C.H.; EIRADO, L.G.; MEDEIROS, S.R.; ALMEIDA, C.G.; MIRANDA, A.W.A.; RAGATKY, C.D. 2007. Geologia da Faixa Ribeira Setentrional: Estado da Arte e Conexões com a Faixa Araçuai. *Geonomos*, v.15, p.67-79.

VOUSDOUKAS, M.I.; RANASINGHE, R.; MENTASCHI, L.; PLOMARITIS, T.A.; ATHANASIOU, P.; LUIJENDIJK, A.; FEYEN, L. Sandy coastlines under threat of erosion. *Nature Climate Change*, v.10, p.260–263, 2020.

Wadell, H.A. (1932) Volume, Shape and Roundness of Rock Particles. *The Journal of Geology*, 40, 443-451. <http://dx.doi.org/10.1086/623964>

WENTWORTH, C. K., 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology*. USA, v. 30.

WRIGHT, L. D. 1984. Morphodynamics variability of surf zones and beaches: A synthesis. *Mar. Geol*, 56(1-4):93-118.

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. *Mar. Geol.*, 32(1-2):105-140.

WRIGHT, L. D.; GUZA, R. T. & SHORT, A. D. 1982. Dynamics of a high energy dissipative surf zone. *Mar. Geol.*, 45(1-2):41-62.

WRIGHT, L. D.; THORN, B. G. & CHAPPELL, J. 1979. Morphodynamic variability of high energy beaches. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COASTAL ENGINEERING, 16. Hamburg,1978. Proceedings. Hamburg, ASCE. p. 1180-1194.

