



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO DE CIÊNCIAS FÍSICAS E MATEMÁTICAS (CFM)  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA

Jessica Leiria Schattschneider

**CARACTERIZAÇÃO DA COMPLEXIDADE MORFOLÓGICA DA LINHA DE  
COSTA SUL-SUDESTE BRASILEIRA E SUA RELAÇÃO COM CONDICIONANTES  
LOCAIS**

FLORIANÓPOLIS

2019

Jessica Leiria Schattschneider

**CARACTERIZAÇÃO DA COMPLEXIDADE MORFOLÓGICA DA LINHA DE  
COSTA SUL-SUDESTE BRASILEIRA E SUA RELAÇÃO COM CONDICIONANTES  
LOCAIS**

Projeto submetido ao Programa de Pós-Graduação  
em Oceanografia da Universidade Federal de Santa  
Catarina como parte dos requisitos para a obtenção  
do Grau de Mestre em Oceanografia.  
Orientador: Prof. Dr. Jarbas Bonetti

Florianópolis

2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Schattschneider, Jessica Leiria

Caracterização da complexidade morfológica da linha de costa Sul-Sudeste brasileira e sua relação com condicionantes locais / Jessica Leiria Schattschneider ; orientador, Jarbas Bonetti, 2019.

97 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Físicas e Matemáticas, Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

1. Oceanografia. 2. Complexidade costeira. 3. Linha de costa. 4. Condicionantes costeiros. 5. SIG. I. Bonetti, Jarbas. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Oceanografia. III. Título.

Jessica Leiria Schattschneider

Caracterização da complexidade morfológica da linha de costa sul-sudeste brasileira  
e sua relação com condicionantes locais

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca  
examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof., Dr. Jarbas Bonetti Filho  
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Prof., Dr. Pedro Pereira  
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Prof., Dr. Luis Américo Conti  
Universidade de São Paulo (USP)

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi  
julgado adequado para obtenção do título de mestre em Oceanografia.

---

Prof. Dr. Paulo Roberto Pagliosa Alves  
Coordenador(a) do Programa

---

Prof. Dr. Jarbas Bonetti  
Orientador(a)

Florianópolis, 29 de julho de 2019.

“...O mundo não se fez para pensarmos nele  
– Pensar é estar doente dos olhos –  
Mas para olharmos para ele e estarmos de acordo...”

*Fernando Pessoa (Alberto Caeiro)*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Ana e Eduardo por todo o suporte e amor que me deram ao longo de mais essa jornada. Obrigada por sempre me incentivarem ao estudo e a nunca desistir do que almejamos. Esta conquista também é de vocês.

Agradeço ao meu orientador Jarbas por seu voto de confiança e por me guiar nesses dois longos anos, me apoiando e aconselhando em muitos momentos, obrigada por compartilhar seus saberes comigo.

Agradeço a professora Carla, sempre tão paciente e disponível, me ajudando muito com as análises dos resultados estatísticos.

Agradeço aos membros do Programa de Pós-Graduação em Oceanografia da UFSC pela manutenção do programa.

Agradeço aos membros da banca por sua disponibilidade e interesse em discutir este trabalho tão importante para mim. Suas contribuições certamente serão de grande valia para o aperfeiçoamento dos dois anos dedicados nesta pesquisa.

Agradeço também aos velhos e novos amigos que estiveram comigo. Obrigada aos velhos amigos que o cassino me deu e que me apoiaram em muitas decisões. Obrigada aos amigos que conheci no início desta nova fase acadêmica, cujo os quais compartilhei muitos momentos de desespero com prazos, terminando sempre com boas gargalhadas de alívio. Obrigada também as manhãs compartilhadas com os amigos do CGEO de Porto Alegre, vocês ajudaram a deixar meu último ano muito mais leve e alegre.

Agradeço ao Tiago por todos estes anos de evangelização ao mundo do *open science*, venho tentando propagar a palavra meu querido amigo.

Por fim, agradeço ao meu companheiro Nicholas por toda a sua paciência e parceria nesses últimos meses tão enlouquecedores para nós. Obrigada por dividir comigo teus conhecimentos e por ser sempre tão presente.

## RESUMO

Por ser o limite entre o ambiente marinho e terrestre, a linha de costa reflete em sua forma a interação dos processos e agentes continentais e marinhos, se apresentando como uma interessante feição no processo de caracterização do ambiente costeiro. Neste sentido, o presente estudo avalia a complexidade morfológica da linha de costa sul-sudeste brasileira, através de descritores morfológicos quantitativos. Para isso, são utilizadas três diferentes técnicas, duas com base na teoria fractal e uma relacionada a variação angular. Todos os processos realizados por este estudo são desenvolvidos com base em dados públicos e softwares livres, tendo seus modelos metodológicos finais disponibilizados em repositórios públicos. Na caracterização por métodos fractais, a complexidade de quatro compartimentos da linha de costa sul-sudeste brasileira é medida em termos da dimensão fractal ( $D$ ). A análise do ajuste da curva fractal ( $R^2$ ) e do tipo de dado de entrada utilizado, mostra o método divisor de passos como o mais recomendado neste caso, indicando que ao sul do Cabo de Santa Marta a complexidade é baixa e homogênea ( $D = 1,08$ ), e compartimentos ao norte deste limite são mais complexos ( $D = 1,16$  e  $D = 1,23$ ). Conclui-se que, os resultados estão de acordo com o nível de complexidade descrito por classificações qualitativas tradicionais, evidenciando o potencial de  $D$  como indicador quantitativo da complexidade costeira. Em um segundo momento deste estudo, a técnica de medida angular AMT é aplicada na linha de costa sem nenhuma compartimentação prévia, buscando classificar segmentos de linha de costa em classes de complexidade. Nove diferentes comprimentos escalares ( $S$ ) são considerados em um agrupamento hierárquico, o qual indica que a linha de costa de estudo pode ser classificada em quatro diferentes grupos de complexidade. Segmentos classificados pelo Grupo 01 apresentam baixa complexidade, sendo associados a linhas de costa retilínea, já o Grupo 02 está associado a segmentos de complexidade intermediária, segmentos do Grupo 03 são normalmente relacionados a linhas de costa com presença de costões rochosos e o Grupo 04 representa a classe mais complexa, em geral classificando segmentos com grandes baías e promontórios. A relação entre esta classificação morfológica é ainda comparada quanto a variabilidade dos condicionantes costeiros, utilizando como descritor, a diversidade litológica, concentração de falhas estruturais e declividade emersa e submersa. A Análise da Componente Principal (ACP) mostra que a diversidade litológica e a concentração de falhas controlam a morfologia da linha de costa na escala avaliada por este estudo, possivelmente refletindo a influência da maior proximidade da Serra do Mar em alguns trechos. No entanto, a curva suavizada de cada grupo de complexidade obtida pelo modelo aditivo generalizado (GAM) a partir dos perfis batimétricos e altimétricos individuais, mostra uma variação entre o padrão observado para cada grupo, indicando uma relação com a expressão morfológica da linha de costa. Por fim, conclui-se que o estudo contribui com avanços metodológicos quantitativos de classificação da linha de costa, auxiliando ainda na compreensão do controle dos condicionantes costeiros na morfologia desta feição.

**Palavras-chave:** Complexidade costeira, linha de costa, condicionantes costeiros, SIG

## ABSTRACT

The coastline is the limit between the terrestrial and the maritime environment reflecting in its shape the interaction of continental and marine processes, presenting it as an interesting feature for coastal characterization. In this sense, the current study analyses by quantitative descriptors the morphological complexity of the south-southeast Brazilian coastline. Three different techniques are used to reach this objective, two of them are based in fractal theory and one in angular variation. All processes made by this study were developed in open-free softwares using public databases and the final methodological models are freely available in a public repository. In the characterization using fractal methods, the complexity of four coastline compartments of the study are measured by the fractal dimension ( $D$ ). The adjustment of the fractal curve ( $R^2$ ) and the type of data used indicates that the step-divisor is the best method in this case, characterizing a low and homogeneous complexity ( $D = 1,08$ ) from southeast part until Cape of Santa Marta with increasing complexity after this limit in the north direction ( $D = 1,16$  e  $D = 1,23$ ). It is concluded that the results are in accordance to the complexity level described by traditional qualitative classifications highlighting the potential of  $D$  as a quantitative indicator of coastal complexity. In a second moment of this study, the Angular Measurement Technique (AMT) is applied to the coastline without a previous compartmentalization, reaching to classify coastline segments in complexity classes. Nine different scale lengths ( $S$ ) were considered in a hierarchic cluster indicating that the study area can be classified in four different complexity groups. Segments classified by Group 01 have low complexity being associated to straight coastline, Group 02 has an intermediate complexity while Group 03 and 04 have a higher complexity being segments of Group 04 normally associated to headlands and bays. Additionally, the relationship between this morphological classification is compared to the variability of four coastal descriptors, the lithological diversity, the concentration of structural faults and the submerged and emerged slope. Principal Component Analysis (PCA) shows that the lithological diversity and the concentration of faults control the coastline morphology in the scale evaluated by this study, possibly reflecting the influence of the Serra do Mar proximity in some stretches. However, the smoothed curve of each complexity group obtained by the generalized additive model (GAM) from the individual bathymetric and altimetric profiles shows a variation between the pattern observed for each group, indicating a relation with the morphological expression of the coastline. Finally, it is concluded that the study contributes with quantitative methodological advances in the classification of the coastline, helping also in the understanding of the control of coastal process in the morphology of this feature.

**Keywords:** Coastal complexity, coastline, coastal descriptors, GIS

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Relação entre feições costeiras (quadrados) com os principais processos condicionantes atuantes em diferentes escala característica, tanto espaciais (eixo x) quanto temporais (eixo y a esquerda). O retângulo em vermelho enfatiza a localização da linha de costa (feição alvo do presente estudo) neste esquema e a escala dos processos condicionantes desta feição. Adaptado de Carter & Woodroffe (1994) e Klein & Short (2016)..... 18
- Figura 2: Localização dos quatro compartimentos (CP) de linha de costa analisados. De acordo com classificações costeiras pretéritas, estes compartimentos se encontram em duas diferentes províncias costeiras, representadas por elipses na imagem acima (em azul para a Província 01 e em verde para a Província 02), tendo como limite fisiográfico o Cabo de Santa Marta.....30
- Figura 3: Esquema do método divisor de passos utilizando régua de diferentes tamanhos  $r$  (resolução) para sobrepor a feição de interesse. O valor N indica a quantidade de régua necessárias para cada caso.....38
- Figura 4: Esquema do método contagem de caixas utilizando caixas com diferentes tamanho de lado  $l$  (resoluções) para sobrepor a feição de interesse. O valor N indica a quantidade de caixas necessárias para cada caso.....39
- Figura 5: Resultado das curvas fractais –  $\log(N) \times \log(r)$  –, representando o padrão fractal individual dos compartimentos analisados. Para facilitar a visualização, as escalas log aritmizadas do eixo x estão representadas em seus valores originais ao longo da curva.....41
- Figura 6: Resultado das curvas fractais –  $\log(N) \times \log(l)$  –, representando o padrão fractal individual dos compartimentos analisados. Para facilitar a visualização, as resoluções logaritmizadas do eixo x estão representadas em seus valores originais ao longo da curva...43
- Figura 7: Mapa da área de estudo identificando algumas das principais feições costeiras do litoral investigado. A linha pontilhada mostra os limites das duas bacias sedimentares marinhas presentes nesta região.....57
- Figura 8: Fluxograma do esquema metodológico simplificado utilizado por este estudo.....62
- Figura 9: Cálculo da complexidade morfológica usando a técnica de medida angular – AMT. O comprimento de escala (S) é medido para frente (AB) e para trás (AC) de um ponto escolhido (A) sobre a linha de costa mapeada. A medida de complexidade  $C_x$  é o ângulo CAD (ângulo suplementar do CAB).....63
- Figura 10: Esquema do agrupamento espacial entre  $S_{5km}$  (em vermelho) e o comprimento alvo  $S_{15km}$  (em preto). Na parte superior da imagem, são representados os identificadores de cada

segmento (esquerda) e os seus respectivos valores de complexidade pelo método AMT (direita). A tabela superior à esquerda mostra o agrupamento tabular da sobreposição espacial de  $S_{5km}$  sobre  $S_{15km}$ , resultando na tabela à direita com o cálculo final do desvio padrão dos valores de AMT utilizado como dado de entrada para a definição das classes de complexidade morfológica.....65

Figura 11: Esquema dos dados de entrada já tratados (painéis superiores) e procedimentos metodológicos (painéis inferiores) utilizados na obtenção dos descritores dos condicionantes locais ( $D_{cl}$ ). Painéis superiores apresentam a área de estudo total representada por diferentes dados de entrada. A simbologia do painel (a) e (b), indica classe de rocha e a estrutura de falhas geológicas, respectivamente, de acordo com a carta do milionésimo. No painel (c) a interpolação batimétrica assim como imagens de SRTM compõem o conjunto de dados de entrada. Já os painéis inferiores apresentam, como exemplo, o esquema de transformação de dados aplicado à região do Cabo Frio (buscando uma melhor visualização) onde as linhas verticais representam os nós de  $S_{15km}$ . O trecho opaco no painel (d) indica a área utilizada para o cálculo do Índice de *Shannon* por segmento de  $S_{15km}$  enquanto os *grids* no painel (f) representam a quantidade de falhas sobre cada área. No painel (e) pontos verdes sobrepõem os transectos individuais de altimetria enquanto pontos brancos sobrepõem os transectos individuais de batimetria (isóbata de 50 m é representada pela linha cinza no painel c), sendo considerado apenas os pontos iniciais e finais de cada transecto na obtenção dos descritores de declividade.....66

Figura 12: Segmentos de  $S_{15km}$  alvo da classificação de complexidade da linha de costa S-SE brasileira.....70

Figura 13: Segmentos de  $S_{15km}$  alvo da classificação da complexidade da linha de costa S-SE brasileira (continuação da Figura 12).....70

Figura 14: Dendograma do agrupamento hierárquico sobre a variabilidade dos comprimentos escalares sobre  $S_{15km}$ . A linha vermelha pontilhada mostra a altura escolhida para o corte do agrupamento, indicando a presença de quatro grupos de complexidade bem definidos.....71

Figura 15: Gráfico de caixa mostrando a variação angular ( $\sigma_{Cx}$ ) dos oito diferentes comprimentos escalares (S) em cada grupo de complexidade. A linha horizontal no meio de cada caixa indica o valor mediano da complexidade de cada comprimento S, com as linhas superiores e inferiores correspondendo o terceiro e primeiro quantil, respectivamente.....72

Figura 16: Representação espacial da classificação da linha de costa S-SE brasileira, de acordo com o grupo de complexidade correspondente a cada segmento de linha de costa.....73

Figura 17: Representação espacial da classificação da linha de costa S-SE brasileira, de acordo com o grupo de complexidade correspondente a cada segmento de linha de costa.....	74
Figura 18:Avaliação exploratória da distribuição dos diferentes valores descritores ambientais ao longo de segmentos classificados em cada grupo de complexidade morfológica, seguindo o padrão de cores, verde-escuro, verde-claro, laranja e vermelho para grupo 01, 02, 03 e 04, respectivamente.....	75
Figura 19: Resultado da Análise da Componente Principal (ACP) das duas primeiras componentes (xy) com os pontos representando segmentos de linha de costa classificados por seus grupos de complexidade. O grau de contribuição de cada descritor ambiental aos componentes da análise é indicado por suas respectivas setas.....	76
Figura 20: Perfil batimétrico individual de cada segmento de linha de costa pertencente a cada um dos quatro grupos de complexidade. A linha preta representa a curva ajustada ao modelo aditivo generalizado (GAM) dos perfis batimétricos de cada grupo.....	77
Figura 21: Perfil altimétrico individual de cada segmento de linha de costa pertencente a cada um dos quatro grupos de complexidade. A linha preta representa a curva ajustada ao modelo aditivo generalizado (GAM) dos perfis altimétricos de cada grupo.....	78

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Esforços mundiais em classificar a complexidade morfológica de linhas de costa em relação à dimensão fractal ( $D$ ). Valores obtidos pelo método divisor de passo estão indicados na coluna $D_{dp}$ e pelo método contagem de caixas estão na coluna $D_{cc}$ .....	28
Tabela 2: Divisão da área de estudo proposta por classificações costeiras tradicionais.....	32
Tabela 3: Números de réguas ( $N$ ) necessárias para cobrir cada compartimento em cada uma das nove resoluções ( $r$ ) analisadas.....	40
Tabela 4: Números de caixas ( $N$ ) necessárias para cobrir cada compartimento em cada uma das nove escalas ( $l$ ) analisadas.....	41
Tabela 5: Dimensão fractal ( $D$ ) obtida pelos dois métodos fractais para os quatro compartimentos de linha de costa. O coeficiente da regressão linear pelo método de mínimos quadrados ( $R^2$ ) indica o ajuste da curva fractal para cada um dos casos.....	43
Tabela 6: Base de informações dos dados de entrada utilizados para cada descritor dos condicionantes locais ( $D_{cl}$ ) e para o descritor morfológico ( $C_x$ ).....	61
Tabela 7: Quantidade de nós necessários para cobrir a linha de costa analisada por cada um dos nove comprimentos escalares ( $S$ ) considerados neste estudo.....	69

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
1.1 OBJETIVOS.....	21
<b>1.1.1 Objetivo Geral.....</b>	<b>21</b>
<b>1.1.2 Objetivos Específicos.....</b>	<b>21</b>
1.2 Referências.....	23
<b>2 CAPÍTULO I: CARACTERIZAÇÃO DA COMPLEXIDADE MORFOLÓGICA DA LINHA DE COSTA POR MÉTODOS FRACTAIS.....</b>	<b>25</b>
2.1 INTRODUÇÃO.....	25
2.2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	29
<b>2.2.1 Área de estudo.....</b>	<b>29</b>
<b>2.2.2 Classificações em mesoescala do setor Sul-Sudeste da costa brasileira.....</b>	<b>33</b>
2.2.2.1 Província Costeira 01.....	33
2.2.2.2 Província Costeira 02:.....	35
<b>2.2.3 Quantificação da dimensão fractal (D).....</b>	<b>35</b>
2.2.3.1 Método Divisor de Passos.....	36
2.2.3.2 Método Contagem de Caixas.....	38
2.3 RESULTADOS.....	40
2.4 DISCUSSÃO.....	44
<b>2.4.1 Comportamento fractal.....</b>	<b>44</b>
<b>2.4.2 Analisando a complexidade costeira utilizando o método fractal.....</b>	<b>45</b>
<b>2.4.3 Comparação com outras costas e limitações do método.....</b>	<b>47</b>
2.5 CONCLUSÃO.....	47
2.6 REFERÊNCIAS.....	49
<b>3 CAPÍTULO II: CLASSIFICAÇÃO DA LINHA DE COSTA PELO MÉTODO AMT E A RELAÇÃO COM CONDICIONANTES LOCAIS.....</b>	<b>54</b>
3.1 INTRODUÇÃO.....	54

3.2 ÁREA DE ESTUDO.....	57
<b>3.2.1 Evolução da Margem Continental Sudeste-Sul Brasileira:.....</b>	<b>58</b>
3.2.1.1 Bacia de Santos.....	58
3.2.1.2 Bacia de Pelotas.....	59
3.3 MATERIAL E MÉTODOS.....	61
<b>3.3.1 Descritor complexidade morfológica da linha de costa.....</b>	<b>63</b>
<b>3.3.2 Descritores da complexidade estrutural da zona costeira.....</b>	<b>66</b>
3.3.2.1 Diversidade Litológica.....	67
3.3.2.2 Concentração de Falhas.....	67
3.3.2.3 Declividade emersa e submersa.....	68
3.4 RESULTADOS.....	69
3.5 DISCUSSÃO.....	79
<b>3.5.2 Classificação da complexidade morfológica da linha de costa S-SE brasileira.....</b>	<b>79</b>
<b>3.5.3 Complexidade morfológica e condicionantes costeiros locais.....</b>	<b>80</b>
<b>3.5.4 Considerações gerais e limitações do método.....</b>	<b>82</b>
3.6 CONCLUSÃO.....	84
3.7 REFERÊNCIAS.....	85
<b>4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>89</b>
<b>5 APÊNDICE 01.....</b>	<b>92</b>
<b>6 APÊNDICE 02.....</b>	<b>95</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A interação do conjunto de processos e agentes ambientais sobre a zona costeira resulta em um ambiente caracterizado por padrões complexos e caóticos. De acordo com Phillips (1992) os mecanismos que controlam a paisagem deste ambiente são dificilmente analisados como um processo individual, ou seja, a modificação de um único processo ou feição acaba dando início a um conjunto de respostas, tanto no domínio do tempo como no espaço. Por exemplo, a entrada de energia no sistema através de forçantes ambientais (como vento, onda e maré) interage com seus constituintes (como rochas e sedimentos) gerando formas terrestres costeiras, as quais conseqüentemente, modificam a ação dos processos geomorfológicos que as formam (Short, 1999).

Historicamente, estudos geomorfológicos endereçados a questões relacionadas a interação entre forma e processo, fazem uso de abordagens descritivas e qualitativas para o desenvolvimento de seus processos de análise. No entanto, este padrão vem apresentando modificações recentes através da incorporação do conjunto de ferramentas interdisciplinares aplicadas a compreensão de processos da superfície terrestre (Murray et al., 2009). A riqueza da história observacional de dados coletados no passado, junto ao desenvolvimento de uma série de novas técnicas para a caracterização de feições, vem inserindo esta ciência no contexto das análises quantitativas.

Em esforços objetivados a caracterização da complexidade de feições costeiras, o avanço de tecnologias relacionadas ao levantamento de dados por sensores remotos e a modelos computacionais para avaliação de extensos conjuntos de dados, têm aberto espaço para avaliações por abordagens geomorfométricas. A geomorfometria, sendo o ramo geomorfológico que se concentram análises quantitativas da superfície terrestre, é caracterizada por integrar princípios matemáticos, computacionais e geográficos aplicado a técnicas de cartografia analítica e de Sistema de Informação Geográficas (SIG) (Pike et al., 2009). De maneira geral, o objetivo operacional desta linha temática é a extração de medidas (parâmetros da superfície terrestre) e de feições espaciais (objetos da superfície terrestre) de produtos digitais. Apesar do cenário atual ainda ser limitado quanto a aplicação de estudos deste tipo no ambiente costeiro e marinho, trabalhos recentes mostram a aplicação desta abordagem na quantificação de modificações de padrões morfológicos de feições costeiras complexas, como campos de dunas e mudanças em linhas de costa (Petras et al., 2015).

Mesmo com os avanços no conhecimento em relação ao ambiente costeiro obtidos através aplicação de técnicas quantitativas, a complexidade intrínseca deste ambiente ainda apresenta-se como um desafio para esforços desenvolvidos nesse ambiente. Devido a este fato, propostas de compartimentação costeiras, também referida como tipologia ou classificação costeira, buscam identificar áreas semelhantes, facilitando a generalização e compreensão do sistema (Cooper & McLaughlin, 1998). A compartimentação costeira se baseia no agrupamento de áreas que expressam atributos ou características similares em classes correspondentes, podendo ser utilizada na compreensão da formação morfológica de linhas de costa (Davidson-Arnott, 2009). Para a correta definição do conjunto de atributos avaliados no processo de classificação costeira, considera-se duas principais propriedades relacionadas ao objetivo do estudo: escala e resolução.

Sendo setores altamente dinâmicos, zonas costeiras, principalmente no que diz respeito à geometria da linha de costa, apresentam diferentes configurações quando analisadas em diferentes escalas, sejam estas, temporais ou espaciais. Como discutido por Hanson et al. (2003) a compreensão dos processos morfodinâmicos característicos a cada nível escalar é o ponto inicial de estudos de classificação costeira. Em relação a escala espacial, tipologias costeiras podem ser definidas em quatro diferentes espectros: globais (cobertura total do globo terrestre), continentais, regionais e locais (alto detalhamento e baixa cobertura); podendo ser baseada em uma ou em até cinco classes de fenômenos associados a este tipo de análise, que são: processos, materiais, formas, idade, estágio de desenvolvimento e ambientes (ecológicos ou morfodinâmicos) (Finkl, 2004).

Ao longo de sua discussão, Fairbridge (2004) retoma frequentemente a importância da escala ao definir os parâmetros no qual a classificação irá se basear, sendo apenas aplicável para o nível de escala o qual foi desenvolvido. A Figura 1 apresenta um esquema entre diferentes feições costeiras e a escala característica em que atuam os seus principais processos moduladores. De acordo com este esquema, estudos envolvendo avaliações em mesoescala, ou seja, entre 1 – 100km ( como o presente estudo) devem considerar principalmente, descritores relacionadas a estrutura geológica de formação. Em alguns casos, classificações locais geralmente desenvolvidas com o propósito de identificar áreas de exposição a riscos costeiros, são utilizadas para áreas maiores com menos detalhe. Porém a adoção desse processo construído de maneira mais detalhadas pode suavizar a análise da expressão de processos atuantes em maior escala (Gornitz et al., 1994).

A resolução é a segunda propriedade que deve ser considerada na obtenção dos dados de entrada relativos aos descritores, é ela que informa o grau de detalhe com que a imagem ou as feições de interesse foram obtidas. Através da popularização de softwares SIG vem sendo possível o desenvolvimento de análises robustas resultantes de um conjunto extenso de informações de naturezas diferentes (Cooper & Mclaughlin, 1998), sendo fundamental a avaliação da resolução dos dados para a validação destas análises. A determinação da resolução mínima do produto a ser obtido ainda é discutida no meio, porém é consenso que os dados devem estar de acordo com objetivo do estudo, com as principais feições que se baseiam, com o ambiente e com a representação dos resultados desejados (Lam & Quattrochi, 1992).

Em relação aos principais motivadores da tipologia costeira em mesoescala, o Programa Land Ocean Interactions in the Coastal Zone (LOICZ), se apresenta como um expressivo esforço mundial objetivando-se a compreensão dos ciclos globais de nutrientes (C, N, P), avaliando assim, mudanças ambientais decorrentes de mudanças climáticas em diferentes escalas. Uma das tarefas iniciais deste projeto é o estabelecimento de uma tipologia da zona costeira que permita o agrupamento deste ambiente através de conjuntos de unidades discretas, cientificamente válidas, baseadas em recursos naturais e características e processos socioeconômicos (Buddemeier et al., 2008). Segundo os relatórios do projeto (Maxwell & Buddemeier, 2002), o desafio está na obtenção de dados universalmente disponíveis que representem a interações entre diferentes agentes costeiros. Como um dos produtos do Programa LOICZ, o estudo de classificação costeira desenvolvido por Bartley et al. (2001) buscou contornar este fato ao utilizar a sinuosidade da linha de costa como descritor da complexidade do ambiente.

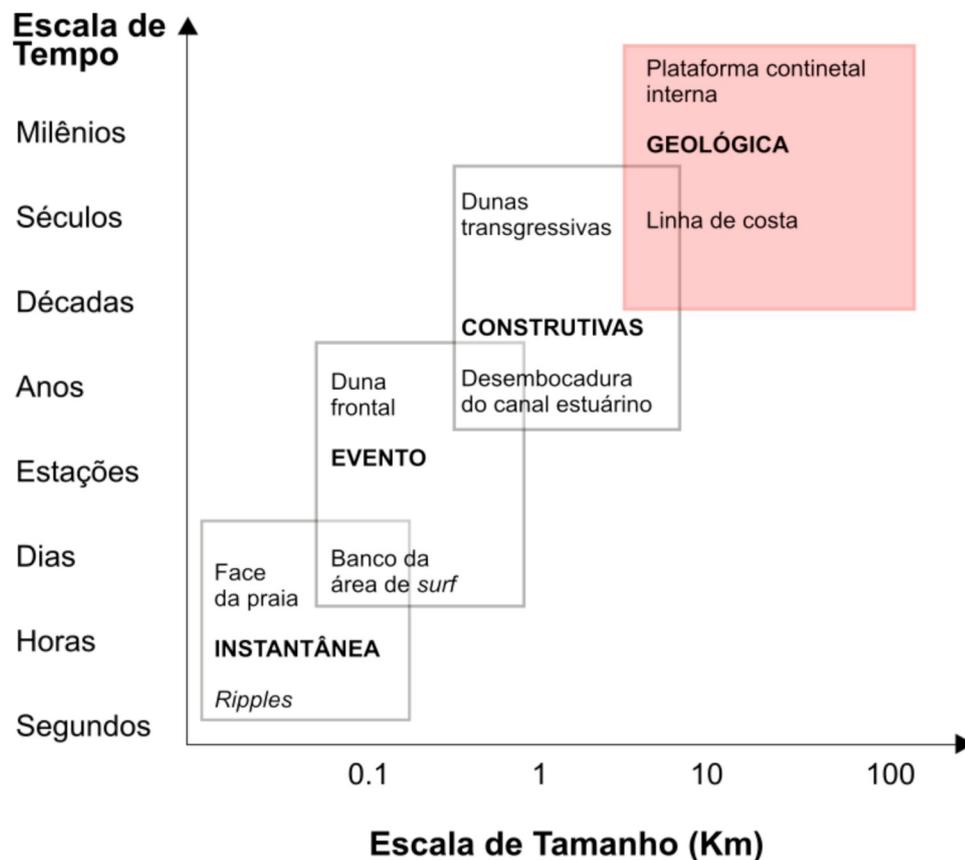


Figura 1: Relação entre feições costeiras (quadrados) com os principais processos condicionantes atuantes em diferentes escala característica, tanto espaciais (eixo x) quanto temporais (eixo y e esquerda). O retângulo em vermelho enfatiza a localização da linha de costa (feição alvo do presente estudo) neste esquema e a escala dos processos condicionantes desta feição. Adaptado de Carter & Woodroffe (1994) e Klein & Short (2016).

Por ser caracterizada como o limite entre o ambiente marinho e terrestre, a linha de costa reflete em sua forma a interação dos processos e agentes costeiros que atuam em diferentes escalas, se mostrando como uma interessante feição no processo de investigação da variabilidade deste grupo de parâmetros ao longo da costa. Assim, a caracterização da complexidade de linha de costa, ou simplesmente, a análise matemática da sinuosidade geométrica desta feição pode auxiliar no reconhecimento dos processos estruturantes e modeladores da variabilidade costeira (Andrle, 1996). O estudo conduzido por Porter-Smith & McKinlay (2012) buscou compreender a relação entre a complexidade morfológica da linha de costa com a variabilidade de agentes e processo costeiros ao longo do

território australiano. Propostas de classificação em pequena escala como a realizada por este grupo não são usuais, sendo classificações costeiras locais mais desenvolvidas. Resultados obtidos em grande escala são usualmente generalizados porém, esta generalização pode não ser ideal na maioria dos casos. Isso porque diferentes processos operam em diferentes níveis de organização, sendo aconselhado, para o correto manejo da área costeira, estudos e estratégias dirigidas à níveis variados (Berkes, 2006).

Devido aos avanços de técnicas quantitativas, diferentes metodologias são atualmente disponíveis para a medição da complexidade morfológica da linha de costa. Por fazer parte de um sistema complexo, Mandelbrot (1967), definiu a morfologia da linha de costa como um exemplo natural de estrutura fractal. Estruturas formadas por sistemas caóticos, como a morfologia da linha de costa, são caracterizadas pela sua complexidade fractal, onde em teoria, podem ser descritas pelo valor da dimensão fractal ( $D$ ), um parâmetro quantitativo adimensional e independente de escala, utilizado para descrever o padrão de complexidade de uma feição. Apesar de diferentes esforços terem utilizado o descritor fractal para caracterizar linhas de costa (Jiang & Plotnick, 1998; Dai et al., 2004; Tanner et al., 2006), ainda há questões fundamentais quanto ao significado geomorfológico do valor de  $D$ , assim como a sua relação com os processos moduladores do sistema, como aqueles relacionados a dinâmica de ondas atual e aos processos geológicos de formação do ambiente (Gao & Xia 1996). Neste sentido, alguns autores (Andrle, 1996; Bartley et al., 2001) discutem a necessidade da adoção de métodos de classificação costeira qualitativa que considerem as escalas características do sistema em suas análises assim como os processos e agentes dominantes de cada escala. Devido a este fato, novos esforços utilizando a teoria fractal vem incorporando o conceito de escala característica em suas análises (Tanner et al., 2006), onde a compreensão geomorfológica obtida por esta modificação permanece em fase inicial.

Uma outra abordagem metodológica quantitativa utilizada na avaliação da complexidade morfológica da linha de costa, é a análise da variação angular, conhecida pela sigla AMT – *Angular Measurement Technique*. Esta técnica utiliza o descritor de complexidade angular ( $C_x$ ), para medir a variação angular da linha de costa em uma gama de comprimentos escalares ( $S$ ) previamente definidos (Andrle, 1994). Desta forma, a técnica retorna valores individuais de  $C_x$  para os diferentes comprimentos de escalas ( $S$ ) analisados, identificando possíveis mudanças de complexidade morfológica, associadas às escalas

características do sistema costeiro (Andrle, 1996). Esta abordagem se diferencia da técnica fractal por retornar valores únicos e independentes de complexidade morfológica para cada comprimento de escala analisado. De acordo com Porter-Smith & McKinlay (2012), estas variações em diferentes escalas de  $C_x$  podem conter pistas importantes para a compreensão dos processos responsáveis pela forma costeira.

Tendo-se em conta as questões acima apresentadas, o presente trabalho busca caracterizar a complexidade morfológica da linha de costa compreendida entre a região Sul-Sudeste (S-SE) brasileira além de avaliar a sua relação com condicionantes locais que caracterizam o ambiente. Para isso, a avaliação da sinuosidade da representação cartográfica da linha de costa da área de estudo foi assumida como indicador da complexidade morfológica neste estudo, em acordo com o aplicado em esforços pretéritos (Bartley et al., 2001). Visando maior objetividade e publicidade, optou-se por construir a presente dissertação no formato de dois artigos independentes, aqui apresentados na forma de capítulos. Devido à discussão em torno das diferentes metodologias quantitativas disponíveis para a avaliação da complexidade morfológica, classificações distintas em mesoescala foram alcançadas para cada capítulo.

O primeiro capítulo objetiva testar a aplicação da caracterização da complexidade morfológica da linha de costa S-SE brasileira através da determinação da dimensão fractal de diferentes compartimentos de linhas de costa previamente definidos. Para isso, são utilizadas duas técnicas fractais, as quais assumem a dimensão fractal como descritor de complexidade, em quatro segmentos de linha de costa, definidos por este estudo como compartimentos de linha de costa. Os resultados obtidos por estas duas diferentes técnicas foram então comparados com valores fractais de linhas de costa obtidos por diferentes pesquisas internacionais, discutindo o significado geomorfológico dos valores obtidos no presente estudo. Buscando demonstrar a aplicabilidade do descritor morfológico como um indicador da variabilidade de processos condicionantes locais, as classificações fractais foram também comparadas descritivamente com compartimentações costeiras qualitativas tradicionais já descritas para a área de estudo.

Já o segundo capítulo, classifica a complexidade morfológica de segmentos de linha de costa em mesoescala através da técnica AMT considerando diferentes comprimentos escalares ( $S$ ). Técnicas de agrupamento definiram grupos de complexidade, classificando a linha de costa a partir desta avaliação. De acordo com os processos

relacionados à escala desta classificação morfológica, foram definidos quatro descritores de condicionantes costeiros, sendo eles, diversidade geológica, concentração de falhas estruturais, declividade emersa e declividade submersa. Este conjunto de informações foi obtido através de técnicas espaciais e geomorfométricas para cada segmento de linha de costa já classificado quanto à sua complexidade morfológica. Por fim, a Análise da Componente Principal (ACP) avaliou a relação entre os grupos de complexidade morfológica e o conjunto de descritores de condicionantes costeiros que caracterizam os locais em que os segmentos estão inseridos.

Buscando adequar-se à nova tendência que visa a replicação científica e a redução da subjetividade de análises tradicionais, este estudo utilizou dados públicos que foram manipulados em softwares livres. Assim, a escolha dos dados de entrada e das técnicas metodológicas utilizadas basearam-se, primariamente, na relevância destes para que se alcançassem os objetivos previstos, mas também considerou a disponibilidade de dados abertos visando um balanço entre a resolução destes dados e o esforço computacional necessário para as análises. A integração deste conjunto de dados em um ambiente SIG, permitiu aplicação de técnicas de geoprocessamento endereçadas a obtenção dos descritores morfológicos e de condicionantes costeiros avaliados por este estudo.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Caracterizar a complexidade morfológica da linha de costa Sul-Sudeste brasileira através de descritores quantitativos, assim como avaliar a relação da classificação obtida com a variabilidade dos condicionantes costeiros locais.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Classificar a área de estudo quantitativamente quanto a sua complexidade morfológica de acordo com técnicas fractais e angulares (AMT).

Avaliar a classificação obtida pelo descritor morfológico fractal com compartimentações costeiras qualitativas disponíveis previamente.

Caracterizar a costa S-SE brasileira quanto a variabilidade dos condicionantes costeiros locais, definidos pelos descritores de diversidade litológica, padrão de concentração de falhas estruturais e declividade emersa e submersa;

Avaliar o grau de relação entre os grupos de complexidade morfológica obtidos pela técnica AMT com os descritores dos condicionantes costeiros locais.

## 1.2 REFERÊNCIAS

- ANDRLE, R. The angle measure technique: A new method for characterizing the complexity of geomorphic lines. **Mathematical Geology**, v. 26, n. 1, p. 83–97, 1994.
- ANDRLE, R. Complexity and scale in geomorphology: Statistical self-similarity vs characteristic scales. **Mathematical Geology**, v. 28, n. 3, p. 275–293, 1996.
- BARTLEY, J. D.; BUDDEMEIER, R. W.; BENNETT, D. A. Coastline complexity: A parameter for functional classification of coastal environments. **Journal of Sea Research**, v. 46, n. 2, p. 87–97, 2001.
- BENOIT MANDELBROT. How Long Is the Coast of Britain? Statistical Self-Similarity and Fractional Dimension. **Science**, v. 156, n. 3775, p. 636–638, 1967.
- BERKES, F. From community-based resource management to complex systems: The scale issue and marine commons. **Ecology and Society**, v. 11, n. 1, 2006.
- BUDDEMEIER, R. W.; SMITH, S. V.; SWANEY, D. P.; CROSSLAND, C. J.; MAXWELL, B. A. Coastal typology: An integrative “neutral” technique for coastal zone characterization and analysis. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 77, n. 2, p. 197–205, 2008.
- CARTER, R.W.G.; WOODROFFE, C.D. **Coastal evolution: Late Quaternary shoreline morphodynamics**, Cambridge University Press, 1994
- COOPER, J. A. G.; MCLAUGHLIN, S. Contemporary Multidisciplinary Approaches to Coastal Classification and Environmental Risk Analysis. **Journal of Coastal Research**, v. 14, n. 2, p. 512–524, 1998.
- DAI, Z. J.; LI, C. C.; ZHANG, Q. L. Fractal analysis of shoreline patterns for crenulate-bay beaches, Southern China. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 61, n. 1, p. 65–71, 2004.
- DAVIDSON-ARNOTT, R. D. **Introduction to Coastal Processes & Geomorphology**. 2009.
- FAIRBRIDGE, R. W. Classification of Coasts. **Journal of Coastal Research**, v. 20, n. 1, p.155–165, 2004.
- FINKL, C. W. Coastal Classification: Systematic Approaches to Consider in the Development of a Comprehensive Scheme. **Journal of Coastal Research**, v. 201, n. 1, p. 166–213, 2004.
- GAO, J.; XIA, Z. G. Fractals in physical geography. **Progress in Physical Geography**, v. 20, n. 2, p. 178–191, 1996.
- GORNITZ, V. M., DANIELS, R. C., WHITE, T. W., & BIRDELL, K. R. The development of a coastal risk assessment database: vulnerability to sea-level rise in the US Southeast. **Journal of Coastal Research**, v.27, n. 75, p. 327–338, 1994.
- H. HANSON, S. AARNINKHOF, M. CAPOBIANCO, J. A. JIMÉNEZ, M. LARSON, R. J. NICHOLLS, N. G. PLANT, H. N. SOUTHGATE, H. J. STEETZEL, M. J. F. S. AND H. J.

- DE V. Modelling of Coastal Evolution on Yearly to Decal Time Scales. **Journal of Coastal Research**, v. 19, n. 4, p. 790–811, 2003.
- JIANG, J.; PLOTNICK, R. E. Fractal Analysis of the Complexity of United States. **Mathematical Geology**, v. 30, n. 5, p. 535–546, 1998.
- KLEIN, A. H. DA F.; SHORT, A. D. **Brazilian Beach Systems: Introduction**. 2016.
- LAM, N. S. N., & QUATTROCHI, D. On the issues of scale, resolution, and fractal analysis in the mapping sciences. **Professional Geographer**, v. 44, n. 1, p. 88–98, 1992.
- MAXWELL, B. A.; BUDDEMEIER, R. W. Coastal Typology Development with Heterogeneous Data Sets Coastal Typology Development with Heterogeneous Data Sets. **Regional Environmental Change**, v. 3, n. 1, p. 77–87, 2002.
- MURRAY, A. B.; LAZARUS, E.; ASHTON, A.; et al. Geomorphology Geomorphology , complexity , and the emerging science of the Earth’ s surface. **Geomorphology**, v. 103, n. 3, p. 496–505, 2009.
- PETRAS, V.; MITASOVA, H.; PETRASOVA, A. Mapping gradient fields of landform migration. **Geomorphometry**, p. 173–176, 2015.
- PHILLIPS, J. D. Spatial Analysis of Shoreline Erosion, Delaware Bay, New Jersey. **Annals of the Association of American Geographers**. v. 76, p.50–62, 1986.
- PHILLIPS, J. D. Nonlinear dynamical systems in geomorphology: Revolution or evolution? **Geomorphology**, v. 5, p. 219–229, 1992.
- PIKE, R. J.; EVANS, I. S.; HENGL, T. **Geomorphometry: A Brief Guide**., v. 33, n. 1944, p. 1–9, 2009.
- PORTER-SMITH, R.; MCKINLAY, J. Mesoscale coastal complexity and its relationship to structure and forcing from marine processes. **Marine Geology**, v. 323–325, p. 1–13, 2012.
- SHORT, A. D. **Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics**, 1999.
- TANNER, B. R.; PERFECT, E.; KELLEY, J. T. Fractal Analysis of Maine’s Glaciated Shoreline Tests Established Coastal Classification Scheme. **Journal of Coastal Research**, v. 225, n. 5, p. 1300–1304, 2006.

## 2 CAPÍTULO I: CARACTERIZAÇÃO DA COMPLEXIDADE MORFOLÓGICA DA LINHA DE COSTA POR MÉTODOS FRACTAIS

### 2.1 INTRODUÇÃO

O ambiente costeiro, sendo um ambiente de transição, recebe influência de diferentes processos marinhos, terrestres e atmosféricos. Por interagirem de maneira variável dentro deste sistema, diferentes gradientes ambientais são observados em sua extensão, resultando em variações relativas à complexidade sistema (Brocx & Semeniuk, 2009). Esta variação pode ser analisada em relação a interação dos processos que atuam no interior do sistema (Moore et al., 2010) ou quanto a variabilidade da forma geométrica das suas feições, como no caso da análise da sinuosidade da linha de costa (Thomas et al., 2016). Apesar da popularização de estudos utilizando a primeira abordagem, a carência de dados e a subjetividade de resultados qualitativos de diferentes metodologias acaba dificultando o desenvolvimento e a comparação entre esforços. Mesmo trabalhos regionais buscando avaliar técnicas cartográficas tradicionais na identificação da complexidade costeira mostram a dificuldade de mensurar e comparar métodos (Cunha et al., 2010). Este fato sugere a segunda abordagem como uma maneira eficiente de investigar a complexidade costeira por apresentar uma metodologia quantitativa, dispensando a necessidade de bases de dados extensas.

Assim como nos demais sistemas complexos, as estruturas presentes no ambiente costeiro são moduladas por uma série complexa de variáveis e interações, atuando em diferentes níveis escalares, resultando em formas naturais não lineares seguindo um padrão fractal (Bak, 1996). A linha de costa sendo o limite submerso e emerso do sistema costeiro, conseqüentemente, apresenta uma geometria complexa seguindo um padrão fractal, onde a sua irregularidade em geral aumenta de acordo com o aumento escalar da análise (Lam & Quattrochi, 1992). Esta relação (entre padrão morfológico e a escala) impede a aplicação satisfatória de métodos dependentes da escala de análise como o caso de medidas euclidianas (Goodchild, 1980). Buscando contornar essa limitação, Mandelbrot (1967) deu início a teoria fractal, desenvolvida com o objetivo de avaliar a complexidade de geometrias resultantes de sistemas complexos. Neste estudo pioneiro sobre a teoria fractal, foi apresentada a aplicabilidade desta abordagem na caracterização de extensas linhas de costa, utilizando um único valor de dimensão fractal ( $D$ ) como descritor da complexidade da feição. O descritor  $D$

em geral varia entre 1 e 2, onde quanto maior o valor de  $D$  associado a feição analisada, maior a sua complexidade.

Sendo um modelo matemático, a teoria fractal utiliza da abstração de um sistema natural para derivar conhecimentos pertencentes ao sistema. Apesar das perdas recorrentes da representação cartográfica destes ambientes, conhecimentos significativos podem ser obtidos relacionados a complexidade de interação e ação dos agentes presentes em sistemas naturais como no caso do ambiente costeiro ao avaliar a dimensão fractal da linha de costa (Lam & Quattrochi, 1992). A teoria fractal ainda assume três propriedades básicas a estas feições complexas: homogeneidade, auto-similaridade e a ausência de uma escala característica, significando que cada porção pode ser considerada uma imagem de escala redutível do todo onde a complexidade da característica é constante sobre qualquer escala (Mandelbrot, 1983). Décadas após Mandelbrot (1967) ter apresentado a teoria fractal, um estudo topográfico (Mark & Aronson, 1984) indicou que a propriedade de auto-similaridade estatística de feições naturais é restrita a um domínio escalar específico, a qual pode ser observada a partir de quebras de padrão ou pontos de estabilização da curva fractal. Essas descontinuidades no comportamento de superfície representam domínios escalares nos quais a importância relativa de diferentes processos pode diferir, relacionados a mudanças estruturais e a escalas temporais. Da mesma maneira, trabalhos utilizando a teoria fractal a padrões ecológicos também apontaram que, além da propriedade fractal onipresente em feições naturais, o método fractal pode se tornar simplista quando domínios escalares não são considerados (Sugihara & May, 1990). Além disso, esforços mais recentes sugerem que a suposição de independência de escala só é adequada para casos específicos, onde várias recomendações práticas devem ser observadas (Bez & Bertrand, 2011).

Atualmente, a teoria fractal divide estruturas fractais em dois tipos, onde feições com características ideais (e.g.: floco de neve Koch) são caracterizadas como "fractal de regra" – com auto-similaridade em todas as escalas, enquanto estruturas geossistêmicas como linhas costeiras, são definidas como "fractais aleatórios", ou seja, objetos mostrando auto-similaridade apenas em domínios de escala específica. Neste último, os valores  $D$  aplicados às características fractais naturais são apenas precisos se os dados estiverem dentro do domínio de escala correto (Ma et al., 2016). Este domínio escalar é definido através da divisão da área em zonas significativas, baseando-se em conhecimentos prévios locais (Klinkenberg, 1992) e concordante com a resolução do dado de entrada (Buttenfield & McMaster, 1991). Apesar da

existência de uma vasta lista de métodos para a análise fractal, a contagem de caixas (box-counting) e o divisor de passos (step-divisor) são os mais aplicados em estudos costeiros, onde, os valores de  $D$  retornados por estes métodos se apresentam como estimadores da complexidade do sistema. Esses métodos estão sendo usados em diferentes locais desde o final dos anos 1960 para obter o valor  $D$  de linhas de costa de todo o mundo.

Apesar do aumento de esforços científicos buscando caracterizar linhas de costa em relação ao seu comportamento fractal (Tabela 1), ainda existem alguns locais, como a costa brasileira, onde estudos nesta linha foram pouco explorados. Mesmo com esforços regionais buscando revisar a teoria fractal (Azevedo & Christofoletti, 2008), aplicá-la em estrutura de ilhas oceânicas (Barão et al., 2018) e até mesmo testar a utilização da dimensão fractal em setores litorâneos (Azevedo & Marques, 2004), as discussões quanto a comportamento fractal da linha de costa brasileira ainda encontram-se em fase inicial.

Tabela 1: Esforços mundiais em classificar a complexidade morfológica de linhas de costa em relação à dimensão fractal ( $D$ ). Valores obtidos pelo método divisor de passo estão indicados na coluna  $D_{dp}$  e pelo método contagem de caixas estão na coluna  $D_{cc}$ .

Linha de Costa	$D_{dp}$	$D_{cc}$	Referência
Grã-Bretanha (costa oeste)	1.25		Mandelbrot (1967)
Austrália	1.13		Mandelbrot (1967)
África do Sul	1.02		Mandelbrot (1967)
Estados unidos (baía de Delaware)	1.46		Phillips (1986)
Alaska (ilha Adak/ ilha Amchitka )	1.20/1.66		Pennycuick & Kline (1986)
Noruega (costa sul)		1.52	Feder (1988)
Grã-Bretanha (costa oeste)	1.27		Carr & Benzer (1991)
Austrália (costa norte/sul)	1.19/1.13		Carr & Benzer (1991)
Estados Unidos (Puget Sound; costa oeste/leste)	1.19/1.15		Carr & Benzer (1991)
México (Golfo do México; costa oeste/leste)	1.03/1.02		Carr & Benzer (1991)
Croácia (ilha Cres)		1.12	Paar et al. (1997)
Estados Unidos	1.00 – 1.27/ 1.00 – 1.70		Jiang & Plotnick (1998)
China	1.16		Xiaohua et al. (2004)
Estados Unidos (Maine)		1.11 – 1.35	Tanner et al. (2006)
Italia (seis províncias)		1.03 – 1.14	D’Alessandro et al. (2006)
Polo Norte (lagos Titan)	1.24 – 1.42	1.07-1.19	Sharma & Byrne (2010)
China	1.19		Su et al. (2011)
Groenlândia		1.26	Singh & Gupta (2013)
China		1.13	Xu et al. (2014)
China	1.20	1.09	Ma et al. (2016)
China		1 – 1.27	Hou et al. (2016)
Espanha (costa da Cantabria)		1.19	Piña-García et al. (2016)
Espanha (La Palma/Grã Canaria)		1.104/1.065	Ferrer-valero (2018)

Apesar de permanecerem algumas discussões remanescentes quanto às premissas assumidas pela metodologia fractal quando aplicada a feições naturais (Turcotte, 2007), estudos vêm adotando o valor  $D$  para classificar a linha de costa em termos de sua complexidade morfológica e investigando a relação entre este descritor e diferentes processos que modulam esta feição (Jiang & Plotnick, 1998; Xiaohua et al., 2004; Tanner et al., 2006; Ni et al., 2017). Além disso, barreiras na tipologia costeira qualitativa podem ser evitadas com a adoção destes métodos quantitativos, como os relacionados à exigência de conjuntos de dados extensivos e os altos investimentos, em aspectos temporais, técnicos e financeiros, reduzindo ainda a subjetividade das classificações tipológicas tradicionais. Esforços deste tipo podem ser direcionados à compartimentação costeira, buscando extrapolar resultados e discussões de estudos aplicados à setores bem investigados para outros menos conhecidos (Cooper & McLaughlin, 1998). Estes resultados podem, então, facilitar a aplicação de estratégias de manejo, como demonstrado em um estudo realizado na Grã-Bretanha que utilizou a dimensão fractal da linha de costa para selecionar trechos com alto nível de complexidade, avaliando assim o fluxo de dispersão de poluentes em diferentes segmentos costeiros (Boffetta et al., 2008).

Com isso, o presente capítulo tem como objetivo avaliar a aplicação da teoria fractal na linha de costa sul-sudeste brasileira testando dois diferentes métodos de análise da dimensão fractal (método de contagem de caixas e divisor de passos). Os resultados colaboram com os esforços científicos anteriores que utilizaram a dimensão fractal na classificação da linha de costa, além de auxiliar a compreensão da modulação de feições costeiras a partir da ação de processos formadores deste ambiente.

## 2.2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.2.1 Área de estudo

A área de estudo em que se concentra este trabalho está localizada na porção sul e sudeste da costa brasileira, entre a fronteira Brasil-Uruguaí (latitude  $33.7436^\circ$  Sul; longitude  $53.3700^\circ$  Oeste) e Cabo Frio (latitude  $22.9974^\circ$  Sul; longitude  $42.0142^\circ$  Oeste) como mostra a Figura 02.

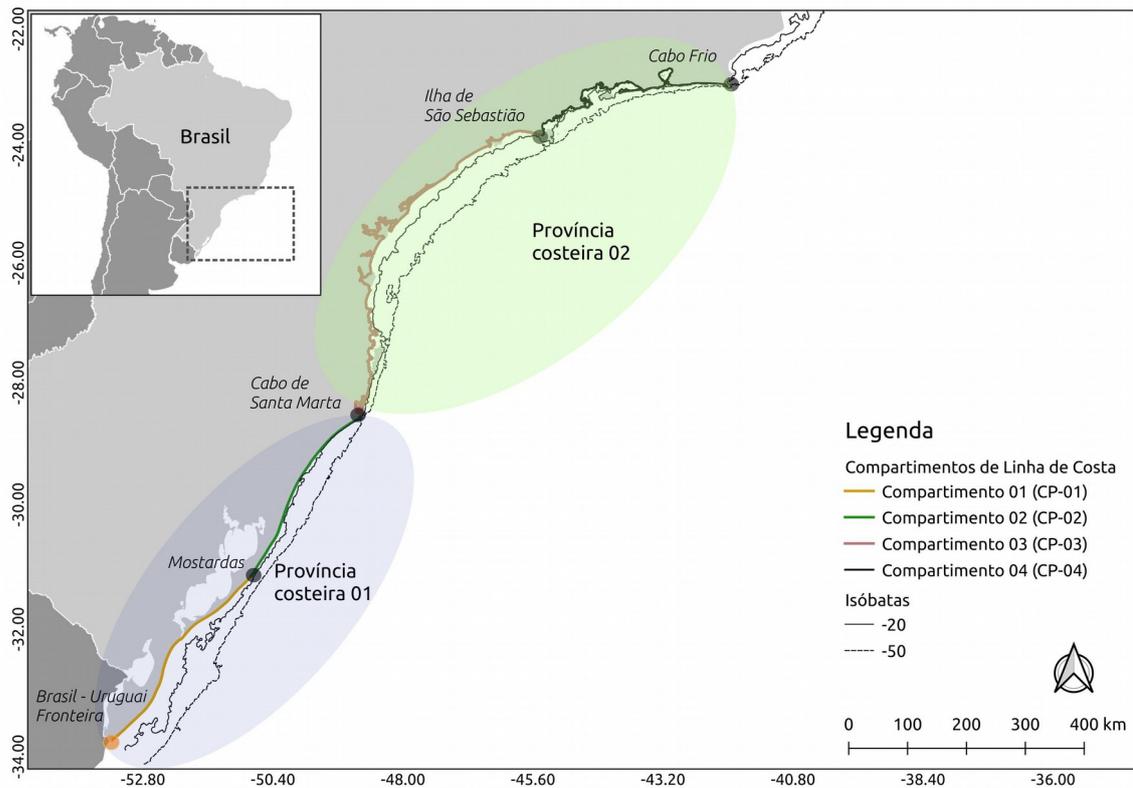


Figura 2: Localização dos quatro compartimentos (CP) de linha de costa analisados. De acordo com classificações costeiras pretéritas, estes compartimentos se encontram em duas diferentes províncias costeiras, representadas por elipses na imagem acima (em azul para a Província 01 e em verde para a Província 02), tendo como limite fisiográfico o Cabo de Santa Marta.

Quatro compartimentos de linha de costa foram previamente selecionados, considerando mudanças nos padrões de sinuosidade desta feição, assim como os limites das províncias costeiras previamente descritas em classificações tradicionais da costa brasileira (Tabela 2). A partir desta compartimentação, cada compartimento foi assumido como um exemplo de fractal aleatório, expressando sua complexidade através da dimensão fractal ( $D$ ). Apesar dos dois compartimentos de linha de costa a sul, localizados na província 01, aparentemente seguirem um padrão relativamente monótono, estudos pretéritos apontam diferenças na complexidade da plataforma continental destes ambientes (Zembruski, 1979).

Desta maneira, decidiu-se por seguir essa compartimentação visando avaliar uma possível influência também da morfologia submarina na mudança da complexidade de linha de costa. A província costeira 02 também se encontra dividida em dois compartimentos de costa tendo a ilha de São Sebastião como limite entre ambas. Aqui, esta divisão foi assumida devido à mudança expressiva da orientação de linha de costa, passando de NE-SO ao sul da ilha de São Sebastião, para aproximadamente L-O a norte, até Cabo Frio (Sugiuo & Martin, 1978).

Tabela 2: Divisão da área de estudo proposta por classificações costeira tradicionais.

Classificações	Províncias da costa sul-sudeste brasileira	Base da classificação
Short & Klein, (2016)	<b>Província 01:</b> Dominado por ondas de S – localizada entre a fronteira Brasil-Chuí e Cabo de St. Marta <b>Província 02:</b> Dominada por ondas de SE – localizada entre o Cabo de St. Marta e Cabo Frio	Características geológicas, sedimentares, processos costeiros e tipos de praias
Muehe (2010)	<b>Província 01:</b> Costa arenosa de múltiplas barreiras do Rio Grande do Sul – localizada entre a fronteira Brasil-Chuí e Cabo de St. Marta (SC) <b>Província 02:</b> Costa rochosa do sudeste - localizada entre o Cabo de St. Marta e a Ilha Grande (RJ) <b>Província 03:</b> Costa das lagunas – barreira duplas – localizada entre a Ilha Grande e o Cabo Frio (RJ)	Aspectos geomorfológicos e potenciais vulnerabilidades associadas às mudanças climáticas
Dominguez (2009)	<b>Província 01:</b> Costa arenosa do Rio Grande do Sul - localizada entre a fronteira Brasil-Chuí e Cabo de St. Marta (SC) <b>Província 02:</b> Zona de alívio do sudeste brasileiro (os limites seguem o da classificação acima)	Principalmente na evolução costeira, concentrando-se em aspectos relacionados à variação do nível do mar, padrões sedimentares e herança geológica.
Zembruski (1979)	<b>Província 01:</b> Cone do Rio Grande - localizada entre a fronteira Brasil-Chuí e o trecho de Mostardas (RS) <b>Província 02:</b> Setor Florianópolis-Mostardas – localização entre Mostardas e Florianópolis (SC) <b>Província 03:</b> Embaiamento de São Paulo – localizado entre Florianópolis e o Cabo Frio <b>Província 04:</b> Setor Cabo Frio Cabo de São Tomé – localizado entre Cabo Frio e São Tomé (ES)	Concentrado nas características da plataforma continental, utilizando como base diferenças geológicas relativas à batimetria, declividade e a presença de cânions e canais
Silveira (1964)	<b>Província 01:</b> Sul - localizada entre a fronteira Brasil-Chuí e Cabo de St. Marta <b>Província 02:</b> Sudeste - localizada entre o Cabo de St. Marta e Cabo Frio	Descritores geomorfológicos, climáticos e oceanográficos como condicionantes da setorização.

### **2.2.2 Classificações em mesoescala do setor Sul-Sudeste da costa brasileira**

Como as características de aspectos geomorfológicos, oceanográficos e climáticos diferem ao longo da extensa costa brasileira de aproximadamente 9000 km, sua compartimentalização em áreas com atributos semelhantes é valiosa para o reconhecimento de segmentos com características específicas (Short & Klein, 2016). Atualmente, a classificação deste ambiente conta uma série de propostas qualitativas em mesoescala, considerando a compreensão de cada autor quanto ao conjunto de indicadores avaliados em seus esforços, resultando em divergências quanto aos limites de cada setor, inclusive ao longo do setor sudeste e sul (ver Tabela 2).

Um dos primeiros esforços para classificar a costa brasileira em relação a sua complexidade em mesoescala, foi efetuado por Silveira (1964), dividindo a área em cinco compartimentos morfológicos gerais distintos. A seguir, uma caracterização geomorfológica mais detalhada da margem continental compreendida no setor sul e sudeste do Brasil, realizada pelo Projeto REMAC nos anos 70, incluiu aspectos batimétricos, sísmicos e sedimentológicos da plataforma continental. De acordo com seus resultados, a área foi dividida em quatro compartimentos diferentes (Zembruski, 1979). No entanto, a inclusão do setor de Cabo Frio – Cabo de São Tomé como parte da margem sul é atualmente avaliada como inapropriada devido às suas diferentes características geomorfológicas, hidrodinâmicas e sedimentológicas, quando comparadas com as demais áreas localizadas ao sul deste setor (Mahiques et al., 2010). Assumindo a classificação mais recente proposta por Short & Klein (2016), identificam-se abaixo aspectos e feições características de cada província costeira as quais encontram-se localizadas os quatro compartimentos de linha de costa investigados pelo presente estudo.

#### **2.2.2.1 Província Costeira 01**

Caracteriza-se por uma extensa planície arenosa de aproximadamente 750 km de extensão, apresentando uma série de barreiras alongadas desenvolvidas a partir de sucessivas acreções durante o período Quaternário (Short & Klein, 2016). A alta estabilidade tectônica da porção sul da costa atlântica da América do Sul, a partir da qual esta província se desenvolveu, possibilitou o seu aplainamento pela ação marinha e continental, resultando no desenvolvimento de uma ampla planície costeira instalada sobre a Bacia de Pelotas (Corrêa et al., 2004).

De modo geral, a província apresenta uma baixa declividade batimétrica, fato associado ao embasamento tectonicamente estável e ao fornecimento de grandes quantidades de sedimentos detríticos, os quais foram retrabalhados pelas variações do nível do mar durante o período Quaternário (Corrêa et al., 2004). Atualmente esta província é caracterizada por uma série de trechos alagadiços assim como grandes lagoas costeiras, também resultantes da evolução quaternária (Dominguez, 2009). A provável fonte de sedimentos retrabalhados durante este período é proveniente do Rio da Prata, por ter apresentado grandes descargas dispersadas no sentido norte durante períodos de nível do mar abaixo do atual (Rocha et al. 1975). Este padrão de fluxo sedimentar acabou por desenvolver faixas mais largas do sistema laguna-barreira no sentido norte da planície costeira.

Em relação às características oceanográficas, esta província apresenta um padrão dominado por ondulações vindas da direção sul e ondas de vento geradas durante o inverno e a primavera por brisas oceânicas vindas da direção norte (Dominguez, 2009). Em média apresentam-se com 1.5 m de altura significativa (Motta, 1969) aliadas a um regime astronômico de micromaré semidiurno, com uma variação média de 0.5 m (Dominguez, 2009). Em geral, as praias presentes neste setor são dissipativas em toda sua extensão, onde variações relacionadas ao tamanho do grão sedimentar são presentes (Short & Klein, 2016).

A dinâmica costeira local é constituída pela ação de ventos, ondas e correntes litorâneas, sendo tais agentes os principais condicionantes no desenvolvimento de suas linhas de costa que abrigam praias arenosas (Short & Klein, 2016). De maneira geral, a linha de costa deste sistema apresenta uma orientação NE-SE, sendo formada por dois arcos costeiros separados pelo canal de Rio Grande (Dominguez, 2006). Pequenas variações relacionadas a orientação geral da linha de costa mostram influenciar os padrões da dinâmica costeira gerando pontos de erosão e de acreção (Dilemburg et al., 2000). No contexto da deriva litorânea local, o trecho de Mostardas e Dunas Altas mostram-se como locais importantes, recebendo altas taxas de sedimentos e conseqüente alargamento do sistema praial, desde o campo de dunas costeiras até a antepraia junto a isóbata de 10 m (Dilemburg et al., 2000).

Uma mudança abrupta de orientação da linha de costa ocorre na altura do Cabo de Santa Marta, local onde a Serra Geral se aproxima da zona costeira e a mesma muda de orientação, caracterizando-se como limite desta província, sendo desenvolvido a partir de então um ambiente morfológico totalmente distinto em relação a ação dos processos costeiros e a feições fisiográficas a norte desta feição.

#### 2.2.2.2 Província Costeira 02:

Esse setor se estende por aproximadamente 1700 km (Short & Klein, 2016), caracterizado pela proximidade da Serra do Mar, que resulta em uma sequência de promontórios de rochas pré-cambrianas e pequenas enseadas, com planícies costeiras pequenas e às vezes ausentes (Muehe, 2010). A porção mais ao sul, compreendendo o estado de Santa Catarina, é tipificada como uma costa altamente sinuosa alternada por trechos rochosos que separam praias, enseadas e estuários (Short & Klein, 2016). Um padrão costeiro distinto é observado entre Barra Velha, ao norte do estado de Santa Catarina, e a Ilha do Cardoso, localizada no sul do estado de São Paulo. Este trecho é caracterizado por possuir um segmento litorâneo mais recente, de padrão geomorfológico holocênico. Este setor abriga as maiores extensões de cordões litorâneos do sudeste brasileiro, assim como quatro planícies costeiras e três sistemas estuarinos (Dominguez, 2009).

Em geral, a parte compreendida entre o litoral de São Paulo e do Rio de Janeiro é dominado por um complexo sistema de horst e as garbens das serras da Serra da Mantiqueira e da Serra do Mar, resultando em inúmeras baías, enseadas e ilhas (Dominguez, 2006). A área possui alto relevo associado à expressão de rochas metamórficas retrabalhadas a partir das falhas resultantes do rifteamento da bacia de Santos, cuja posição está localizada na porção mediana da atual plataforma continental (Williams & Hubbard, 1984). Há uma prevalência de planícies costeiras no setor sul do litoral de São Paulo que se estende até a altura de São Sebastião. A porção continental desta província encontra-se em um compartimento estrutural complexo (Almeida, 1964), desenvolvendo uma faixa costeira de alta suscetibilidade a deslizamentos (Moura et al., 2011). A partir deste limite, a proximidade da faixa costeira com a Serra do Mar é reduzida, resultando em pequenas baías e praias de orientação variável. Isso faz com que as ondas incidentes se aproximem da linha costeira em diferentes ângulos, resultando em padrões de transporte de sedimento localmente específicos.

#### 2.2.3 Quantificação da dimensão fractal ( $D$ )

Dois diferentes métodos fractais (i.e.: contagem de caixas e divisor de passos) foram utilizados para a avaliação da complexidade morfológica dos quatro compartimentos de linha de costa. Ambos utilizam como parâmetro a dimensão fractal ( $D$ ), a qual reflete a sinuosidade da feição, sendo este o indicador de complexidade morfológica aplicado por este trabalho.

Para isso, foi utilizada como dado de entrada a linha de costa disponibilizada pela base legal de dados cartográficos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), digitalizada na escala de 1:250.000. Este dado vetorial foi inicialmente pré-processado no programa QGIS 3.6 (QGIS *Development Team*, 2019), removendo erros topológicos, dissolvendo a feição para apenas um atributo e em seguida segmentando-a nos limites dos compartimentos previamente estabelecidos. Nesta mesma plataforma, foram construídas quadrículas com diferentes tamanhos de lado necessárias para o cálculo da dimensão fractal através do método contagem de caixas. A seguir, uma sequência de régua de diferentes tamanhos foi construída em ambiente R v. 3.5.3 (R *Core Team*, 2019) para o método divisor de passos, assim como uma rotina para o cálculo de  $D$  de cada compartimento por ambos os métodos. Por fim, o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) da regressão linear pelo método de mínimos quadrados foi obtido a partir dos eixos da curva fractal de cada método para cada compartimento, visando avaliar o desempenho dos métodos fractais.

Com isso, este estudo apresenta uma metodologia baseada exclusivamente em softwares livres - FOSS (*Free and Open Source Softwares*) e em bases públicas, contribuindo para a replicação do método e padronização dos produtos gerados. A seguir, conceitos e diferenças básicas entre os métodos fractais testados neste estudo são apresentados.

### 2.2.3.1 Método Divisor de Passos

Esta é a técnica original usada para demonstrar o conceito fractal por Mandelbrot (1967), a qual consiste no uso de uma sequência de régua de diferentes tamanhos ( $r$ ) para cobrir continuamente uma determinada feição. A razão entre o número de régua necessárias para cobrir esta área em cada resolução  $r$  é posteriormente ajustada em um espaço logarítmico, onde a dimensão fractal pode ser obtida pela seguinte equação (Eq.1) (Turcotte, 2007):

$$D = \ln(N) / \ln(1/r) \quad (\text{Eq. 1})$$

1)

onde  $N$  correspondente ao número de régua,  $r$  ao comprimento da régua (domínio escalar) e  $D$  à dimensão fractal, que pode ser simplificada pela seguinte equação:

$$D = -b$$

(Eq. 2)

, sendo  $b$  a inclinação da curva fractal obtida pela Eq.1.

Assim, os valores de  $D$  são caracterizados como um parâmetro adimensional, onde no caso deste método, variam entre 1 (linha pouco complexa) e dois (linha de altamente complexa).

Para obter este valor da dimensão fractal pelo método divisor de passos ( $D_{dp}$ ), foi desenvolvida uma rotina em R baseando-se em três etapas. A primeira consiste na determinação do comprimento das réguas (resolução). Optou-se por seleccionar as réguas entre o intervalo escalar de 15 à 90 km, mantendo assim o mesmo nível de resolução entre as análises e de acordo com as especificações topográficas do dado de entrada (Buttenfield & McMaster, 1991). Assim, o domínio escalar desta análise foi definido a partir de nove resoluções ( $r$ ): 15 km, 25 km, 30 km, 40 km, 50 km, 60 km, 70 km, 80 km, 90 km. Em seguida, a rotina sobrepôs os compartimentos com diferentes comprimentos de réguas, resultando em nove linhas costeiras simplificadas semelhantes às representadas na Figura 03.

Na última etapa, a transformação logarítmica da regressão entre a quantidade de réguas ( $N$ ) e comprimento da régua ( $r$ ) foi utilizada para obter a  $D_{dp}$  de cada compartimentos, seguindo a Eq. I.

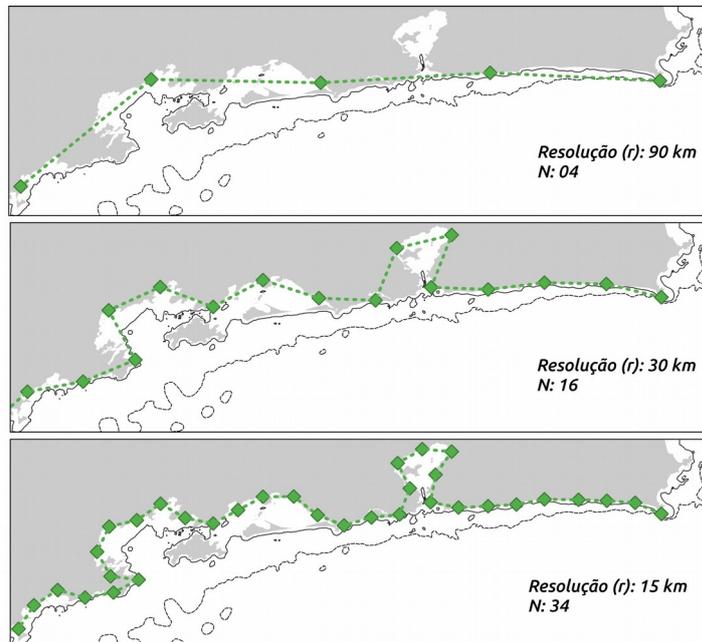


Figura 3: Esquema do método divisor de passos utilizando régua de diferentes tamanhos  $r$  (resolução) para sobrepor a feição de interesse. O valor  $N$  indica a quantidade de régua necessária para cada caso.

### 2.2.3.2 Método Contagem de Caixas

Esta técnica é muito semelhante à descrita acima, e utiliza os mesmos conceitos para a obtenção da dimensão fractal pelo método contagem de caixas ( $D_{cc}$ ). Diferencia-se, todavia, no tipo de elemento geométrico utilizado para cobrir feições de interesse e quanto ao espectro de valores de  $D_{cc}$ . Aqui, utilizam-se caixas de diferentes tamanhos de lado  $l$  no lugar das régua de tamanho  $r$  para definir o domínio escalar da análise, onde os valores fractais retornados podem variar entre 0 (segmentos menos complexos) e 2 (segmentos mais complexos), conforme Ni et al. (2017).

Este método também foi estruturado em três etapas, iniciando com a definição do tamanho dos lados das caixas (resolução), seguindo para a junção espacial entre estas caixas e os compartimentos de linha de costa, e terminando com o cálculo da dimensão fractal.

A construção de feições de grades (caixas) foi realizada através do Software QGIS ao longo da extensão total da área de estudo. Foram definidas grades quadradas com diferentes tamanhos de lado ( $l$ ), aqui também tratadas como resolução, seguindo os mesmos limites do método do anterior: 15 km, 25 km, 30 km, 40 km, 50 km, 60 km, 70 km, 80 km e 90 km. Em seguida, uma junção espacial foi realizada entre os compartimentos de linha costa e as grades de diferentes resoluções. Como resultado desse procedimento, um novo atributo é adicionado ao vetor da linha de costa com o número de caixas sobrepondo cada compartimento, semelhante ao que mostra a Figura 4.

Ao repetir este procedimento para todas as nove resoluções, a linha de costa contendo os nove novos atributos é então importada para o ambiente R, seguindo para a última etapa. A partir desta nova linha de costa, foi possível extrair a declividade da curva logarítmica formada pela quantidade de caixas x escala, extraíndo  $D_{cc}$  seguindo a equação 1.

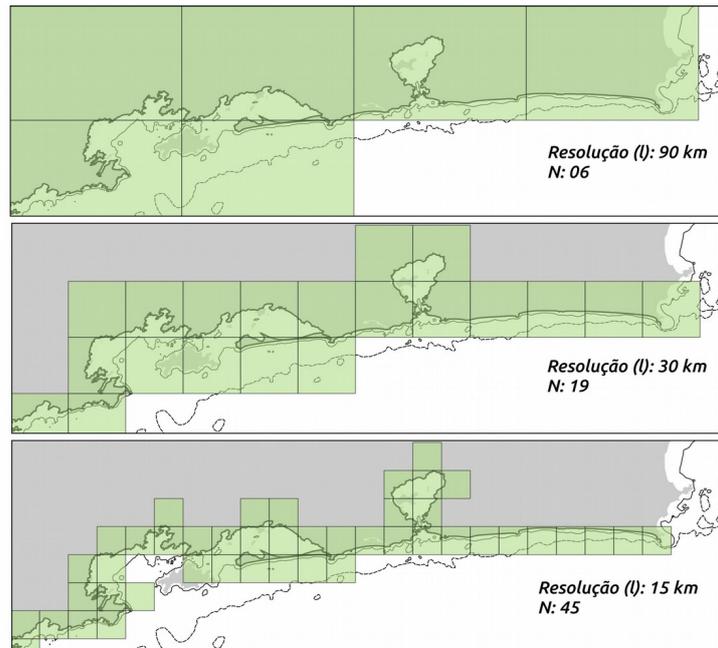


Figura 4: Esquema do método contagem de caixas utilizando caixas com diferentes tamanho de lado l (resoluções) para sobrepor a feição de interesse. O valor N indica a quantidade de caixas necessárias para cada caso.

### 2.3 RESULTADOS

Os resultados apresentados neste capítulo foram obtidos através de uma rotina em R elaborada com base na estrutura metodológica previamente descrita. Esta rotina se encontra disponível em um repositório online (<https://github.com/JesSchattschneider/Dissertation/blob/master/coastlineCompartmentsFractalDimension.zip>) juntamente os seus dados de entrada, podendo ser utilizada e adaptada por qualquer usuário.

A quantidade de réguas necessárias para cobrir cada um dos quatro compartimentos nas resoluções pré-definidas são apresentadas na Tabela 03. Os valores mostram que, em geral, há uma relação inversa entre a quantidade de réguas e os seus tamanhos ( $N \times r$ ). Ao comparar a quantidade de réguas necessárias para cobrir cada compartimento, observa-se que CP-02 necessitou de um número menor de réguas quando comparado com os demais, enquanto que CP-03 representou o compartimento com as maiores quantidades de réguas em todas as resoluções. A partir deste resultado também é possível identificar pontos de estabilização em CP-02 e CP-04, entre 80-90km e 60-70km, respectivamente, os quais podem indicar mudanças no comportamento morfológico da feição a partir estes limites.

Tabela 3: Números de réguas (N) necessárias para cobrir cada compartimento em cada uma das nove resoluções (r) analisadas.

Compartimento	15 km	25 km	30 km	40 km	50 km	60 km	70 km	80 km	90 km
1	35	21	17	13	10	07	07	06	05
2	20	12	10	07	06	04	04	03	03
3	66	37	29	21	16	11	11	10	08
4	37	20	17	10	08	06	06	05	04

Estes pontos de estabilização também são notados na curva fractal  $N \times r$ , os quais mostraram influenciar o comportamento da curva na Figura 5. A análise deste resultado aponta para uma relação mais homogênea em CP-01 e CP-03 quando comparadas com os demais compartimentos.

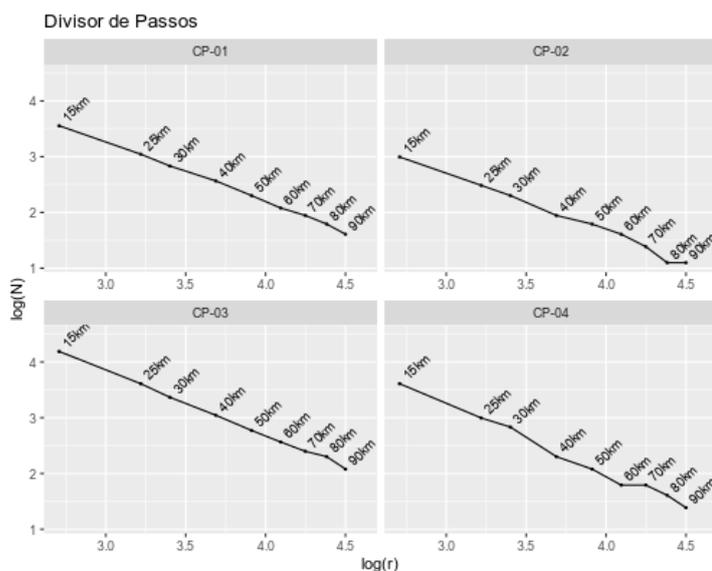


Figura 5: Resultado das curvas fractais –  $\log(N) \times \log(r)$  –, representando o padrão fractal individual dos compartimentos analisados. Para facilitar a visualização, as escalas logaritmizadas do eixo x estão representadas em seus valores originais ao longo da curva

Já analisando o método contagem de caixas, os resultados também mostram as particularidades específicas de cada compartimento, porém mantendo a mesma relação inversa entre  $N \times l$  (Tabela 04) Como também observado no divisor de passos, CP-02 apresentou, em geral, as menores quantidade de caixas necessárias para cobrir o compartimento nas resoluções analisadas, enquanto aqui, CP-03 foi o compartimento com os maiores valores.

Tabela 4: Números de caixas (N) necessárias para cobrir cada compartimento em cada uma das nove escalas (l) analisadas.

Compartimento	15 km	25 km	30 km	40 km	50 km	60 km	70 km	80 km	90 km
1	42	26	21	17	14	11	09	08	07
2	38	23	20	14	12	10	10	08	08
3	97	58	44	32	22	21	15	15	14
4	54	28	25	15	13	12	09	07	08

Pontos de estabilização foram mais recorrentes neste método, observados em CP-02, assim como no método previamente analisado, entre as resoluções de 60-70 km de lado e

entre 80-90 km de lado. Seguindo nesta avaliação, CP-03 também apresentou pontos de estabilidade, localizados entre 70-80 km de lado. Estes pontos influenciaram o comportamento da curva logarítmica (Figura 6), apresentando CP-01 como o compartimento com o comportamento mais uniforme nesta análise.

A partir da inclinação destas curvas foi possível obter a dimensão fractal dos compartimentos para cada um dos métodos fractais (Tabela 05). Em geral, os valores retornados pelo método divisor de passos foram maiores do que os retornados pelo método de contagem de caixas.

No primeiro método, o valor de  $D$  se manteve constante em CP-02 e CP-01, correspondendo aos menores valores retornados, já CP-4 apresentou-se como o compartimento mais complexo desta análise. Para a contagem de caixas, CP-01 e CP-02 retornaram valores distintos, sendo o segundo menos complexo que os demais, enquanto CP-03 apresentou-se com o compartimento de maior complexidade. Avaliando o ajuste de mínimos quadrados aplicado às curvas logarítmicas, percebe-se um melhor ajuste para o método divisor de caixas para todos os compartimentos.

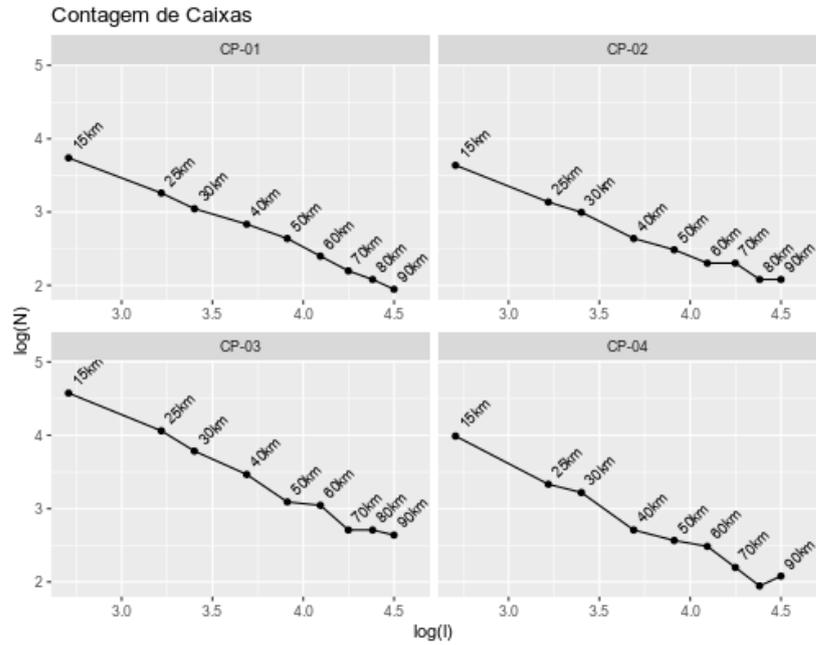


Figura 6: Resultado das curvas fractais –  $\log(N) \times \log(l)$  –, representando o padrão fractal individual dos compartimentos analisados. Para facilitar a visualização, as resoluções logaritmizadas do eixo x estão representadas em seus valores originais ao longo da curva.

Tabela 5: Dimensão fractal ( $D$ ) obtida pelos dois métodos fractais para os quatro compartimentos de linha de costa. O coeficiente da regressão linear pelo método de mínimos quadrados ( $R^2$ ) indica o ajuste da curva fractal para cada um dos casos.

Compartimento	$D_{dp}/R^2$	$D_{cc}/R^2$
1	1.08/ 0.998	1.00/ 0.995
2	1.08/ 0.990	0.89/ 0.986
3	1.16/ 0.998	1.14/ 0.986
4	1.23/ 0.989	1.12/ 0.977

## 2.4 DISCUSSÃO

### 2.4.1 Comportamento fractal

A teoria fractal aplicada ao ambiente costeiro apresenta-se como um método quantitativo para quantificar a complexidade da forma de feições a partir do valor de  $D$ . Quando aplicado a linhas de costa, em geral este valor se aproxima de 1 no caso de feições retilíneas de baixa complexidade e atinge um valor máximo de 2 quando em linhas de costa altamente sinuosas. Por ser um valor independente de escala, a aplicação deste método ainda é debatida uma vez que sistemas costeiros, assim como as feições moldadas por ele, são considerados função dos processos atuantes em escalas específicas (Carter & Woodroffe, 1997). No entanto, estudos geomorfométricos apontam a necessidade de adotar aproximações quantitativas de fácil mensuração e aplicáveis a um amplo espectro de escalas (Hobson, 1972).

Com o aumento de estudos costeiros utilizando a teoria fractal para classificar suas respectivas linhas de costa, a mesma vem demonstrando a sua aplicabilidade e discutindo o conceito de escala característica. A incorporação deste conceito na presente abordagem evidência a importância de considerar a homogeneidade da feição (premissa da teoria fractal) somente em determinados domínios escalares. Para isso, é necessário parcimônia na escolha prévia das escalas de análise assim como a posterior a avaliação da homogeneidade da curva fractal (Mark & Aronson, 1984). Para o primeiro, é indicado concentrar o espectro de escalas (ou resoluções) em um nível de grandeza na qual processo costeiros específicos atuam. A partir disso, a análise da curva fractal pode indicar trechos onde o padrão morfológico é modificado (Goodchild, 1980). A inconformidade das curvas assim com pontos de estagnação podem apontar escalas nas quais a feição passa de um padrão morfológico para outro, permitindo fazer suposições sobre os processos físicos que definiram a morfologia da feição a partir destes limites (Klinkenberg, 1992).

Avaliando os resultados obtidos a partir deste trabalho em relação às premissas fractais, percebe-se que os valores de  $D$  retornados para todos os compartimentos de linha de costa estão de acordo com os limites fractais de cada método. Assumindo o valor mínimo de  $R^2$  em 0.90 utilizado em estudos prévios para aceitar a hipótese de que o segmento de linha de costa testado possui um comportamento fractal (Klinkenberg, 1992), os altos valores de  $R^2$  observados neste trabalho comprovam este argumento. Este fato indica que a linha de costa do setor sul e sudeste do Brasil segue um padrão fractal dentro do domínio escalar testado neste

estudo. Em geral, os valores retornados pelo método divisor de passos foram maiores do que os retornados pela contagem de caixas em todos os casos, estando de acordo com o observado na literatura (Sharma & Byrne, 2010; Ma et al., 2016). Este fato pode estar relacionado com a dimensão das feições básicas de cada método, ou seja, quadrados para a contagem de caixas (duas dimensões) e linhas para o divisor de passo (uma dimensão). Assim como em outros trabalhos onde a comparação entre métodos foi discutida (Sharma & Byrne 2010; Ma et al 2016), este estudo utilizou um dado de entrada vetorial de apenas uma dimensão, podendo indicar que os valores retornados pelo método divisor de passos são os mais precisos, uma vez que este método considera a correta dimensão do dado de entrada.

Em relação ao comportamento da curva fractal ao longo das escalas pré-selecionadas, expressas através de diferentes resoluções de régua e caixa, foram identificados alguns pontos de estabilização e de quebra de inclinação, os quais podem ser indicativos de transições de processos dominantes (Lam & Quattrochi, 1992). Diferentemente da maioria dos casos apresentados, CP-01 manteve um padrão homogêneo ao longo de todas as resoluções analisadas para ambos os métodos, indicando que a estrutura morfológica deste compartimento se mantém constante em todo o domínio escalar analisado. Já CP-02 apresentou um ponto de estabilização entre a resolução de 80-90 km para ambos os métodos, podendo ser o indicativo do limite de análise deste compartimento, já que os valores a partir do limite de 80 km se mantêm constantes, além de se aproximar do tamanho total da feição. A curva do divisor de passos para CP-03 se manteve bastante homogênea, enquanto que para o outro método, o comportamento pareceu mudar a partir da resolução de 50 km. Já para CP-04, dois padrões fractais parecem estar presentes entre as resoluções analisadas em ambos métodos a partir da resolução de 60 km. Possivelmente as quebras do padrão de declividade observada nos últimos compartimentos estão relacionadas ao embaçamento da província, o qual em escalas de menor detalhe são pouco percebidos ou simplificados por uma única régua ou caixa (ver Figura 3 e Figura 4). Já a partir destes limites, o padrão morfológico passa a se apresentar de forma mais sinuosa e recortada, refletindo na mudança do padrão da curva fractal.

#### **2.4.2 Analisando a complexidade costeira utilizando o método fractal**

A complexidade dos compartimentos de linha de costa foi analisada em termos de  $D$  refletindo os seus respectivos graus de sinuosidade. Para um mesmo compartimento,

diferentes valores foram obtidos a partir do teste de dois métodos de análise fractal. De maneira geral, compartimentos mais ao sul retornaram valores menores quando comparados com os mais ao norte em ambos os métodos. Este padrão de complexidade morfológica vai ao encontro do que é observado em relação à complexidade das províncias costeiras aos quais estes compartimentos de costa pertencem (Dominguez, 2009; Short & Klein, 2016).

Ao analisar os valores de  $D_{ap}$ , CP-01 e CP-02 retornaram o mesmo valor, indicando que a complexidade morfométrica destes dois compartimentos de linha de costa é equivalente. Este resultado aponta que, em relação ao comportamento fractal, a morfologia da linha de costa compreendida nestes dois compartimentos se mantém constante, dispensando a sua divisão no limite da região de Mostardas. A integração destes dois compartimentos morfológicos também segue a classificação mais atual (Short & Klein, 2016) de províncias costeiras nas quais estes setores estão inseridos, sugerindo que o valor da dimensão fractal é um bom indicador quantitativo de complexidade costeira neste caso. No entanto, o mesmo não foi observado para CP-03 e CP-04, que retornaram valores distintos para estes compartimentos compreendidos na mesma província costeira. A análise de  $D_{ap}$  mostrou que a complexidade da linha de costa é maior em CP-04, refletindo a morfologia complexa do segmento, já descrita por estudos qualitativos (Muehe et al., 2006). Este resultado indica a Ilha de Sebastião como um limite morfológico importante na caracterização da complexidade da linha de costa. Como discutido por Mahiques et al. (2010) a partir desta feição há uma mudança batimétrica e estrutural acentuada, mudando também a maneira na qual processos oceanográficos atuam sobre a costa (Dominguez, 2009). Através dos resultados obtidos aqui, essa mudança também pode ser identificada quantitativamente através da avaliação do padrão fractal da linha de costa.

Em contrapartida, os valores de  $D$  obtidos pelo método contagem de caixas foram distintos para todos os compartimentos, sendo CP-02 o de menor complexidade e CP-03 o de maior, divergindo da classificação retornada pelo método discutido previamente. Porém, considerando o ajuste de mínimos quadrados para cada um dos compartimentos e o tipo de dado de entrada utilizado (como discutido na seção acima), a classificação obtida pelo método divisor de passos se mostra como a mais representativa para o cenário analisado.

### 2.4.3 Comparação com outras costas e limitações do método

Assumindo os valores de  $D_{dp}$ , é possível discutir a representação deste valor comparativamente com linhas de costa previamente classificadas em termos fractais. CP-01 e CP-02 se mostraram pouco complexas, com  $D$  próximo a 1, assim como observado por Mandelbrot (1967) para a linha de costa compreendida na porção sul do continente africano, que assim como a linha de costa aqui analisada apresenta um padrão relativamente monótono de sinuosidade. Já CP-03 retornou um valor de complexidade semelhante ao reportado para a costa da China (Su et al., 2011; Xiaohua et al., 2004). Apesar da diferença quanto as escalas avaliadas e à extensão das linhas de costa entre estes dois trabalhos, ambas compreendem unidades visualmente mais sinuosas ao sul e mais retilíneas em suas porções mais ao norte, mostrando uma semelhança quanto à variabilidade da sinuosidade da linha de costa em ambos locais. No caso do  $D_{dp}$  associado ao CP-04, este mostra-se similar com os valores reportados para a linha de costa oeste da Grã-Bretanha (Mandelbrot, 1967) a qual, assim como o compartimento avaliado neste estudo, apresenta um sistema costeiro complexo, incluindo uma série de embaixamentos e promontórios ao longo de sua extensão.

No entanto, a comparação direta entre ambientes utilizando o parâmetro  $D$  obtido por diferentes estudos deve ser feito com cautela, principalmente quando as escalas e o tamanho das feições analisadas não seguem o mesmo padrão a ser comparado. Não obstante, de acordo com o observado por Boffetta et al. (2008), valores de  $D$  próximos a 1 estão normalmente associados a linhas de costa sedimentares enquanto que ao avaliar linhas de costa rochosas este valor se aproxima de 1.3, colaborando com os resultados obtidos pelo presente estudo.

## 2.5 CONCLUSÃO

A dimensão fractal se apresenta como um método quantitativo eficiente na avaliação da complexidade geométrica de feições naturais, como no caso de linhas de costa. Mudanças de padrões morfológicos podem ser identificados a partir da curva fractal gerada por diferentes métodos de análise fractal, podendo identificar a influência de mudanças escalares entre processos costeiros. No presente estudo, os dois métodos fractais aplicados na linha de costa compreendida nos setores sul e sudeste brasileiros mostraram-se válidos, onde o coeficiente de determinação da regressão linear ( $R^2$ ) assim como a relação entre a dimensão utilizada pelos métodos e a dimensão do dado de entrada, demonstrou o melhor desempenho do método divisor de passos. De acordo com os valores fractais obtidos por este método, a linha

de costa possui diferentes níveis de complexidade, sendo o segmento compreendido entre São Sebastião e Cabo-Frio o mais complexo ( $D=1.23$ ). De maneira geral, segmentos mais ao sul retornaram valores menores que os localizados mais ao norte da área investigada, indo ao encontro do que também já havia sido observado através de classificações qualitativas do sistema costeiro estudado. Além disso, valores iguais de  $D$  foram retornados para os dois compartimentos localizados mais ao sul, os quais se encontram sobre a mesma província costeira, mostrando que este descritor pode ser um bom indicador de complexidade costeira. Por fim, algumas quebras no padrão da curva fractal foram observadas, principalmente nos compartimentos localizados mais ao norte da área de estudo. Este fato pode indicar uma mudança geral no padrão da linha de costa, provavelmente relacionada à ocorrência de sucessivos promontórios que se alternam com praias de bolso, característico de trechos nos quais a Serra do Mar se aproxima do litoral.

A teoria fractal aplicada ao ambiente costeiro busca utilizar o valor de  $D$  para facilitar a comparação entre esforços investigativos conduzidos em diferentes locais que objetivam avaliar a complexidade da linha de costa. Apesar de aparentemente existir concordância de que valores com magnitudes diferentes estejam refletindo o domínio de matrizes rochosas ou sedimentares, a comparação direta entre domínios geológico-geomorfológicos e a classificação baseada na dimensão fractal ainda precisa ser mais profundamente investigada. Visando contribuir com a ampliação do conhecimento sobre o assunto este trabalho, até onde se pode verificar, apresenta a primeira classificação de uma linha de costa no interior do território sul-americano considerando quantitativamente sua complexidade. A metodologia desenvolvida utilizou apenas softwares livres e um único dado de entrada, podendo ser replicada em locais com escassez de dados. Para esforços futuros, sugere-se a avaliação mais criteriosa dos domínios escalares a serem analisados, focando na relação entre as quebras do padrão fractal e escalão nível de alteração dos processos costeiros que atuam localmente.

## 2.6 REFERÊNCIAS

- AZEVEDO, T. S.; MARQUES, M. L. As propriedades fractais da representação cartográfica de linhas: um estudo de caso para o litoral do Estado de São Paulo – Brasil. **GEOUSP**, São Paulo, n. 15, p. 51-61, 2004.
- AZEVEDO, Thiago Salomão; CHRISTOFOLETTI, Anderson Luiz Hebling. FRACTAIS EM GEOGRAFIA: CONCEITOS E PERSPECTIVAS. **CLIMEP-Climatologia e Estudos da Paisagem**, v. 2, n. 2, 2008.
- BAK, P. **How Nature Works: The Science of Self-Organized Criticality**. New York: Copernicus, 117 p., 1996.
- BARÃO, L. M.; TRZASKOS, B.; ÂNGULO, R. J., SOUZA, M. C. Análise Qualitativa Fractal das estruturas nas Ilhas Belmonte e Challenger e sua relação com a estruturação local - Arquipélago de São Pedro e São Paulo. **Arquipélago de São Pedro e São Paulo 20 anos de pesquisa**. Via design Publicações. 2018.
- BEZ, N.; BERTRAND, S. **The duality of fractals: Roughness and self-similarity**. *Theoretical Ecology*, v. 4, n. 3, p. 371–383, 2011.
- BOFFETTA, G.; CELANI, A.; DEZZANI, D.; SEMINARA, A. How winding is the coast of Britain? Conformal invariance of rocky shorelines. *Geophysical Research Letters*, v. 35, n. 3, p. 5–8, 2008.
- BROCX, M.; SEMENIUK, V. Coastal geoheritage: Encompassing physical, chemical, and biological processes, landforms, and other geological features in the coastal zone. **Journal of the Royal Society of Western Australia**, v. 92, n. 3, p. 243–260, 2009.
- BUTTENFIELD, B. P.; MCMASTER, R. B. **Map Generalization: Making rules for knowledge representation**. New York: Longman Scientific & Technical, 1991.
- CARR, J. R.; BENZER, W. B. On the practice of estimating fractal dimension. **Mathematical Geology**, v. 23, n. 7, p. 945–958, 1991.
- CARTER, R. W. G.; WOODROFFE, C. D. **Coastal evolution: Late Quaternary shoreline morphodynamics**. Cambridge University Press, 1997.
- COOPER, J. A. G.; MCLAUGHLIN, S. Contemporary Multidisciplinary Approaches to Coastal Classification and Environmental Risk Analysis. **Journal of Coastal Research**, v. 14, n. 2, p. 512–524, 1998.
- CORRÊA, I.; ALIOTTA, S.; WESCHENFELDER, J. Estrutura e Evolução dos Cordões Arenosos Pleistocênicos no Canal de Acesso à Laguna dos Patos-RS, Brasil. **Revista Pesquisas em Geociências**, v. 31, n. 2, p. 69–78, 2004.
- CUNHA, LUPINACCI, C. M.; SOUZA, T. DE A. A Cartografia do Relevo de Áreas de Sedimentação Recente: O Caso do Litoral Sul Paulista. **Geociências**, v. 29, p. 187–199, 2010.

- D'ALESSANDRO, L.; DE PIPPO, T.; DONADIO, C.; MAZZARELLA, A.; MICCADEI, E. Fractal dimension in Italy: a geomorphological key to interpretation. **Zeitschrift Fur Geomorphologie**, v. 50, n. 4, p. 479–499, 2006.
- DILLEMBURG, S. R.; ROY, P. S.; COWELL, P. J.; TOMAZELLI, L. J. Influence of antecedent topography on coastal evolution as tested by the shoreface translation-barrier model (STM). **Journal of Coastal Research**, v. 16 n. 1, p. 71-81, 2000.
- DOMINGUEZ, J. M. L. The Coastal Zone of Brazil: an Overview. **Journal of Coastal Research**, v. I, n. 39, p. 16–20, 2006.
- DOMINGUEZ, J. M. L. The Coastal Zone of Brazil. **Geology and Geomorphology of Holocene Coastal Barriers of Brazil**, Berlin: Heidelberg, p. 17-51, 2009.
- FEDER, J. **Fractals**. New York: Plenum, 1988.
- FERRER-VALERO, N. Measuring geomorphological diversity on coastal environments: A new approach to geodiversity. **Geomorphology**, v. 318, n. 1, p. 217–229, 2018.
- GOODCHILD, M. F. Fractals and the accuracy of geographical measures. **Journal of the International Association for Mathematical Geology**, 1980.
- HOBSON, R.D. Surface roughness in topography: A quantitative approach. **Spatial Analysis in Geomorphology**, London: Methuen, p. 221-245, 1972.
- HOU, X. Y.; WU, T.; HOU, W.; Characteristics of coastline changes in mainland China since the early 1940s. **Science China Earth Sciences**, v. 59, n. 9, p. 1791–1802, 2016.
- IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cartas Topográficas Vetoriais do Mapeamento Sistemático**, disponível em: <https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/download/arquivos/index1.shtm>
- JIANG, J.; PLOTNICK, R. E. Fractal Analysis of the Complexity of United States. **Mathematical Geology**, v. 30, n. 5, p. 535–546, 1998.
- KLINKENBERG, B. Fractals and morphometric measures: is there a relationship? **Geomorphology**, v. 5, p. 5–20, 1992.
- LAM, N. S. N.; QUATTROCHI, D. On the issues of scale, resolution, and fractal analysis in the mapping sciences. **The Professional Geographer**, v. 44, n. 1, p. 88–98, 1992.
- MA, J.; LIU, D.; CHEN, Y. Random fractal characters and length uncertainty of the continental coastline of China. **Journal of Earth System Science**, v. 125, n. 8, p. 1615–1621, 2016.
- MAHIQUES, M. M.; MELLO E SOUSA, S. H.; FURTADO, V. V.; et al. The Southern Brazilian shelf: General characteristics, quaternary evolution and sediment distribution. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 58, n. SPEC. ISSUE 2, p. 25–34, 2010.

MANDELBROT, B. How long is the coast of Britain? Statistical Self-Similarity and Fractional Dimension. **Science**, v. 156, n. 3775, p. 636–638, 1967.

MANDELBROT, B. B. **The Fractal Geometry of Nature**. New York: WH freeman, 1983.

MARK, D. M.; ARONSON, P. B. Scale-dependent fractal dimensions of topographic surfaces: An empirical investigation, with applications in geomorphology and computer mapping. **Journal of the International Association for Mathematical Geology**, v. 16, n. 7, p. 671–683, 1984.

MOORE, L. J.; LIST, J. H.; WILLIAMS, S. J.; STOLPER, D. Complexities in barrier island response to sea level rise: Insights from numerical model experiments, North Carolina Outer Banks. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface**, v. 115, n. F3, 2010.

MOTTA, V. F. **Relatório-Diagnóstico sobre melhoria e o aprofundamento do acesso pela barra do Rio Grande**. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS Porto Alegre, 144p. 1969

MOURA, C. A. DE; MATTOS, J. T. DE; JIMENEZ-RUEDA, J. R. Mapeamento Geoambiental como Subsídio na Determinação de Dutos OSVAT / OSPLAN – São Sebastião, SP. **Geociências**, v. 30, n. 4, p. 611–629, 2011.

MUEHE, D. Brazilian coastal vulnerability to climate change. **Pan-American Journal of Aquatic Sciences**, v. 5, n. 2, p. 1–11, 2010.

MUEHE, D.; LIMA, C. F.; BARROS, F. M. L. Rio de Janeiro. **Erosão e progradação no litoral brasileiro**. p.32, 2006.

NI, C.; ZHANG, S.; CHEN, Z.; YAN, Y.; LI, Y. Mapping the Spatial Distribution and Characteristics of Lineaments Using Fractal and Multifractal Models: A Case Study from Northeastern Yunnan Province, China. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 1–11, 2017.

PAAR, V.; CVITAN, M.; OCELIC, N.; JOSIPOVIC, M. Fractal Dimension of Coastlines of the Croatian Island Cres. **Acta Geographica Croatica**, v. 32, p. 21–34, 1997.

PENNYCUICK, C. J.; KLINE, N. C. Units of measurement for fractal extent, applied to the coastal distribution of bald eagle nests in the Aleutian Islands, Alaska C.J. **Oecologia**, v. 68, p. 254–258, 1986.

PHILLIPS, J. D. Spatial Analysis of Shoreline Erosion, Delaware Bay, New Jersey. **Annals of the Association of American Geographers**, v. 76, p.50–62, 1986.

PIÑA-GARCÍA, F.; PEREDA-GARCÍA, R.; DE LUIS-RUIZ, J. .; PÉREZ-ÁLVAREZ, R.; HUSILLOS-RODRÍGUEZ, R. Determination of Geometry and Measurement of Maritime – Terrestrial Lines by Means of Fractals: Application to the Coast of Cantabria ( Spain ). **Journal of Coastal Research**, v. 32, n. 5, 2016.

QGIS Development Team, 2019. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation. <<<http://www.qgis.org>>>

R Core Team, 2019. R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. <<<https://www.R-project.org/>>>

SHARMA, P.; BYRNE, S. Constraints on Titan's topography through fractal analysis of shorelines. **Icarus**, v. 209, n. 2, p. 723–737, 2010.

SHORT, A. D., KLEIN, A. H. D. F. **Brazilian Beach Systems: Introduction**. Springer, 2016.

SILVEIRA, J. D. Morfologia do litoral. **Brasil: a terra e o homem**. 1<sup>a</sup> ed, São Paulo: Companhia Editora Nacional, p.253–305., 1964.

ROCHA, J., MILLIMAN, J.D., SANTANA, C.I., VICALVI, M.A. Southern Brazil. Upper continental margin sedimentation off Brazil. **Contributions to Sedimentary Geology**, v.4, p.117-150, 1975.

SINGH, H. K.; GUPTA, D. Quantification analysis of chaotic fractal dimensions. **International Journal of Engineering and Computer Science**, v. 2, n. 4, p. 1192–1199, 2013.

SU, F.; GAO, Y.; ZHOU, C.; YANG, X.; FEI, X. Scale effects of the continental coastline of China. **Journal of Geographical Sciences**, v. 21, n. 6, p. 1101–1111, 2011.

SUGIHARA, G.; MAY, R. M. Applications of Fractals in Ecology. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 5, n. 3, 1990.

SUGUIO, K.; MARTIN, L. Formações quaternárias marinhas do litoral paulista e sul fluminense (Quaternary marine formations of the State of São Paulo and southern Rio de Janeiro). **Internacional Symposium on Coastal Evolution in the Quaternary**, p. 1–55, 1978.

TANNER, B. R.; PERFECT, E.; KELLEY, J. T. Fractal Analysis of Maine's Glaciated Shoreline Tests Established Coastal Classification Scheme. **Journal of Coastal Research**, v. 225, n. 5, p. 1300–1304, 2006.

THOMAS, C. W.; MURRAY, A. B.; ASHTON, A. D.; et al. Complex coastlines responding to climate change: Do shoreline shapes reflect present forcing or “remember” the distant past? **Earth Surface Dynamics**, v. 4, n. 4, p. 871–884, 2016.

TURCOTTE, D. L. Self-organized complexity in geomorphology: Observations and models. **Geomorphology**, v. 91, p. 302–310, 2007.

WILLIAMS, B.G., HUBBARD, R.J. Seismic stratigraphic framework and depositional sequences in the Santos Basin, Brazil. **Marine and Petroleum Geology**, v. 1, n. 2, p. 90-104, 1984.

XIAOHUA, Z.; YUNLONG, C.; XIUCHUN, Y. On Fractal Dimensions of China's Coastlines. **Mathematical Geology**, v. 36, n. 4, 2004.

XU, J.; ZHANG, Z.; ZHAO, X.; et al. Spatial and temporal variations of coastlines in northern China (2000-2012). **Journal of Geographical Sciences**, v. 24, n. 1, p. 18–32, 2014.

ZEMBRUSCKI, S. G. Geomorfologia da margem continental Sul- brasileira e das bacias oceânicas adjacentes. **Geomorfologia da margem continental brasileira e áreas oceânicas adjacentes**. Rio de Janeiro: Série Projeto REMAC, p. 129-177, 1979.

### 3 CAPÍTULO II: CLASSIFICAÇÃO DA LINHA DE COSTA PELO MÉTODO AMT E A RELAÇÃO COM CONDICIONANTES LOCAIS

#### 3.1 INTRODUÇÃO

A compartimentação costeira, ou seja, o agrupamento de áreas que expressam atributos ou características similares, é popularmente utilizada na busca da compreensão da dinâmica e da configuração de ambientes costeiro. A maioria dos esforços iniciais de classificação costeira tentaram agrupar qualitativamente feições semelhantes com base em algum ou alguns condicionante(s) costeiros importantes, como a história tectônica, processos de evolução costeira ou a oscilação do nível do mar (David-Arnott, 2009). Apesar de ainda ser amplamente utilizada, esta abordagem apresenta uma série de desafios.

Dentre as adversidade deste método, pode-se apontar para a subjetividade dos processos de análise envolvidos, além da necessidade de um amplo conjunto de dados, os quais em geral não são se apresentam mundialmente disponíveis (Maxwell & Buddemeier, 2002). Neste sentido, a complexidade morfológica da linha de costa, ou simplesmente a sinuosidade da linha de costa, constitui uma abordagem atrativa para projetos de classificação costeira, sendo ela uma feição única que reflete a variação de processos e características que controlam esse ambiente transicional (Bartley et al., 2001). O grau da complexidade morfológica desta feição pode ainda ser quantificado de acordo com decritores morfológicos obtidos por técnicas quantitativas, retornando valores comparáveis entre ambientes distintos através de um único dado de entrada, dispensando assim conjuntos extensos de dados.

Neste contexto, Mandelbrot (1967) apresentou em seu estudo pioneiro em torno da teoria fractal, a aplicabilidade desta abordagem na caracterização de extensas linhas de costa, utilizando um único valor de dimensão fractal ( $D$ ) como descritor da complexidade da feição. Segundo a teoria, feições naturais são auto-similares, mantendo sua complexidade constante em diferentes níveis escalares, a qual pode ser medida pelo valor de  $D$ . Este parâmetro é caracterizado por ser adimensional, independente de escala, variando geralmente entre 1 (linhas retilíneas) e 2 (linhas de alta sinuosidade). Apesar desse método ser atrativo devido a sua relativa simplicidade de análise, a utilização de um descritor independente de escala em estudos geomorfológicos (ciência que se fundamenta na escala em que se analisa o objeto) é constantemente questionada (Andrle, 1996; Lam & Quattrochi, 1992; Mark & Aronson, 1984). Como uma alternativa metodológica a esta questão, Andrle (1994) apresentou uma

nova rotina de medição de complexidade, a técnica da medida angular (AMT), projetada para tratar a complexidade em função da escala. Esta técnica consiste na avaliação do valor angular de um conjunto de nós localizados sobre a linha de costa de análise, onde a distância entre estes nós define o comprimento de escala (S). A linha de costa é então classificada com base no descritor de complexidade morfológica (Cx), obtido a partir da variabilidade deste valor em um conjunto S.

Assim como os métodos de tipologia qualitativos, as técnicas descritas acima também apresentam fragilidades. Mesmo com trabalhos demonstrando uma melhor inferência geomorfológica dos resultados obtidos pela AMT (Andrle, 1996), o significado geomorfológico dos descritores de ambas técnicas ainda parece necessitar de mais estudos. No entanto, diferentes esforços têm se concentrado na investigação desta relação, como o desenvolvido na costa glacial do Maine (EUA) por Tanner et al. (2006), onde os resultados da classificação morfológica da região mostraram possuir uma relação com a variabilidade geológica costeira. Ainda no continente americano, o estudo desenvolvido por Jiang & Plotnick (1998) conclui que a costa banhada pelo Atlântico é mais complexa que a pelo Pacífico, indicando uma possível relação entre o valor qualitativo da complexidade morfológica e a expressão topográfica. Já o trabalho realizado por Xiaohua et al. (2004), conduzidos no continente asiático, indicou uma alta relação entre a presença de falhas e dobras geológicas no ambiente costeiro com o aumento da complexidade morfológica da linha de costa.

Mesmo com uma série de classificações costeiras visando a compartimentação da costa brasileira (ver revisão em Muehe, 2018), estas ainda se concentram em abordagens qualitativas. A complexidade do ambiente costeiro brasileiro se sustenta na heterogeneidade dos componentes morfológicos e hidrodinâmicos encontrados nos mais de 9000 km de linha de costa presente entre 4°N e 34°S de latitude (Klein & Short, 2016). De acordo com o que é descrito na bibliografia (Dominguez, 2006) o aporte sedimentar, herança geológica e a energia relativa de maré e ondas controlam, de forma geral, a evolução da costa brasileira. Em alguns pontos, a mudança dos condicionantes costeiros que controlam determinadas regiões é reconhecidamente expressa por variações na orientação da linha de costa (Dillenburg & Hesp, 2009; Tessler & Goya, 2005). Portanto, quantificar a complexidade morfológica desta expressão pode retornar informações relevantes para a compreensão dos processos responsáveis pela paisagem costeira local.

Tendo em conta esses aspectos, o presente trabalho busca classificar a complexidade morfológica da linha de costa S-SE brasileira através da técnica AMT, assim como avaliar a relação entre este descritor morfológico e a variabilidade espacial de alguns condicionantes costeiros locais. O estudo tem como base a metodologia apresentada por Porter-Smith & McKinlay (2012), adaptada para o sul do Brasil. Para o descritor de complexidade morfológica ( $C_x$ ), foram considerados nove diferentes comprimentos escalares compreendidos entre 0.5 – 15 km. Foram definidos quatro descritores de condicionantes costeiros locais ( $D_{Cl}$ ), sendo eles, diversidade litológica, concentração de falhas geológicas e declividade das áreas emersas e submersas. A avaliação da relação entre os descritores de forma ( $C_x$ ) e processos ( $D_{Cl}$ ) foi investigada através de gráficos de distribuição, sendo complementadas com a Análise de Componentes Principais (ACP). O desenvolvimento deste estudo se deu exclusivamente através de plataformas livres buscando desenvolver uma metodologia de fácil replicação que represente a variabilidade dos agentes atuantes em diferentes segmentos de linha de costa.

### 3.2 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo localiza-se na zona costeira compreendida entre a fronteira Brasil-Uruguaí (latitude 33.74° Sul; longitude 53.37° Oeste) e Cabo Frio (latitude 23.00° Sul; longitude 42.01° Oeste) (Figura 07).

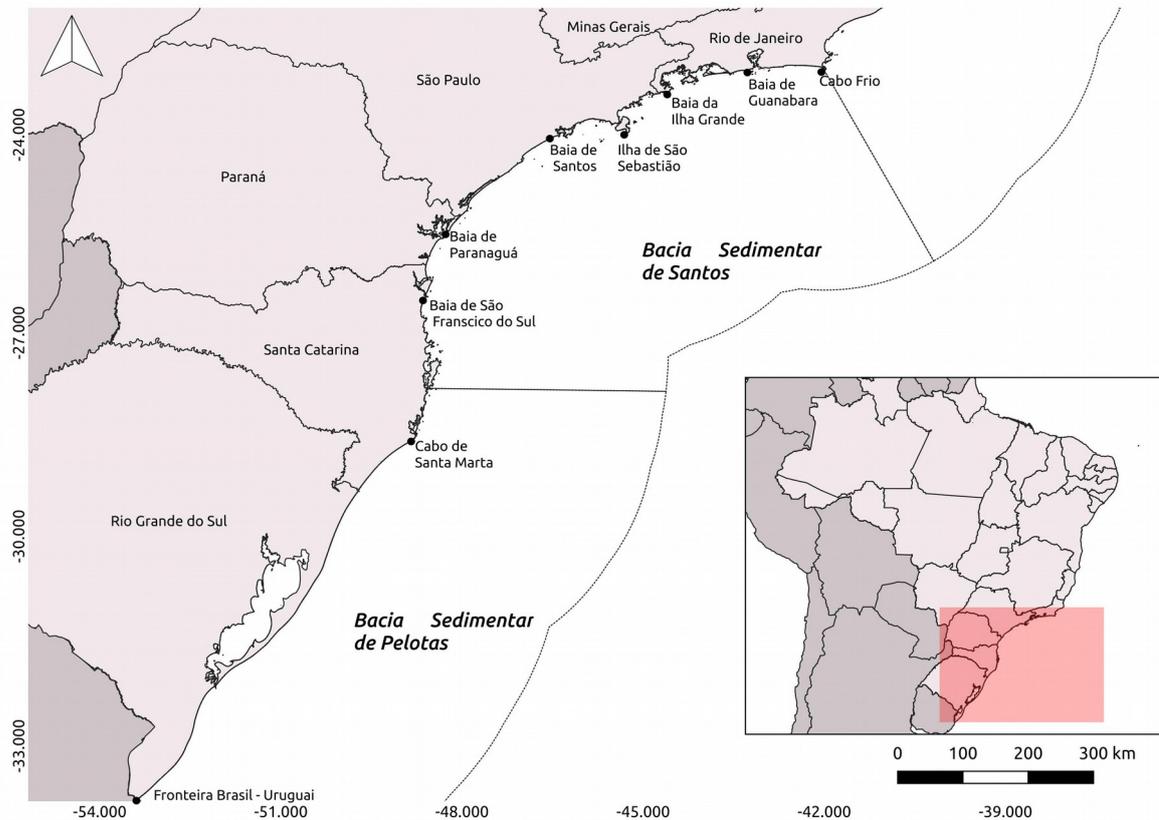


Figura 7: Mapa da área de estudo identificando algumas das principais feições costeiras do litoral investigado. A linha pontilhada mostra os limites das duas bacias sedimentares marinhas presentes nesta região.

A configuração do litoral brasileiro, tanto em relação à sua posição geográfica quanto em termos de orientação da linha de costa, resultou, em grande parte, da reativação pós-paleozóica que deu origem às bacias sedimentares e à própria gênese do Oceano Atlântico (Tessler & Goya (2005). Na porção sul e sudeste da zona costeira investigada, duas bacias sedimentares marinhas englobam o ambiente, sendo elas, a Bacia Sedimentar de Pelotas e a Bacia Sedimentar de Santos. Tendo considerado as características estruturais definidas pelo processo de formação da margem continental brasileira para a definição do conjunto de

descritores de condicionantes costeiros deste estudo, um breve histórico da evolução e da caracterização fisiográfica deste ambiente é apresentado a seguir.

### **3.2.1 Evolução da Margem Continental Sudeste-Sul Brasileira:**

A formação da margem continental Sudeste-Sul brasileira começou com a abertura do Gondwana, a partir de um processo geotectônico extensivo, com origem nos primeiros pulsos tectônicos no extremo sul entre Argentina e África do Sul, durante o Neojurássico (Dias et al., 1990). A sua compartimentação tectonossedimentar é dividida em três megassequências: (1) sequência rifte, formada durante o afinamento crustal na separação das placas tectônicas; (2) sequência transicional, ambiente de deposição continental e lacustre; e (3) sequência drifte, contendo o ambiente marinho (Guardado et al., 1989; Milani et al., 2007). No Eocretáceo, o rifte propagou-se até a margem sudeste do Brasil acima da zona de fratura Florianópolis (Meisling et al., 2001) até as bacias de Pelotas, Santos e Campos. De acordo com Mohriak et al. (1995), o rifteamento foi acompanhado por extrusão volumosa de basaltos toleíticos, ambos na parte continental e nas incipientes bacias marginais. Subprovíncias fisiográficas de relativa expressão regional foram delimitadas pelos períodos de intensa atividade tectono-magmática (Silveira & Machado, 2010). Neste contexto, feições estruturais das duas bacias sedimentares presentes neste sistema são caracterizadas a seguir, em função da proximidade da linha de costa e das possíveis relações tectônicas que apresentam com a mesma.

#### **3.2.1.1 Bacia de Santos**

Limitada ao norte pela Bacia de Campos, Alto de Cabo Frio, e ao sul pelo Alto de Florianópolis (Bacia de Pelotas) a Bacia de Santos é margeada atualmente pela Serra do Mar. O soerguimento desta feição rochosa teve seu pulso inicial desenvolvido junto aos eventos tectônicos ocorridos após a fase rifte, sendo responsável pelo grande aporte sedimentar para a bacia em direção à quebra da plataforma (Macedo, 1989). De acordo com (De Souza et al., 2008), o soerguimento desta feição rochosa teve grande influência na evolução geomorfológica do continente e, na conseqüente caracterização de sua rede de drenagem. Atualmente a Serra do Mar situa-se na borda sudeste-sul do Brasil entre a Serra da Mantiqueira e o Maciço da Carioca (atualmente erodido). É caracterizada por um setor montanhoso com aproximadamente 80 Km de largura que se estende por quase 1000 Km de

extensão (Almeida, 1976). Uma série de cristas e linhas de falhas com desníveis da ordem de 800 a 1000m constituem essa feição, podendo chegar a 2400m de altitude próximo à cidade do Rio de Janeiro. Apresenta uma superfície regional erosiva denominada Japi-Paleocênica (Almeida e Carneiro, 1998), caracterizada por sua importância na identificação do tectonismo e na compreensão da evolução estrutural no Sudeste do Brasil sendo praticamente, o único nível de correlação regional existente por todo o embasamento Pré-cambriano do sudeste brasileiro (Zalán e Oliveira, 2005).

O Alto de Cabo Frio limita a bacia a norte, funcionando como uma barreira sedimentar, em função do seu alto estrutural do embasamento, separando as Bacias de Campos e Santos. Já as feições do Alto de Florianópolis em conjunto com a Dorsal de São Paulo formam um lineamento de construções vulcânicas com direção leste-oeste denominado Lineamento de Florianópolis, responsável por delimitar estruturalmente as Bacias de Santos e Pelotas ao sul (De Souza, 2008). A respeito da influência na sedimentação exercida isoladamente pelo Alto de Florianópolis, o alto do embasamento desempenhou a função de barreira sedimentar a bacias de Santos até o Albiano Inferior/Médio (Gamboa & Rabinowitz, 1981). A partir de então, é notada a entrada de uma delgada sedimentação, até ao Paleoceno Inferior, quando se observa um espessamento do pacote sedimentar, com a ausência do Alto de Florianópolis como estrutura limitante (Kumar & Gamboa, 1979).

### 3.2.1.2 Bacia de Pelotas

Pelo processo de rifteamento e conseqüente abertura oceânica ter iniciado na porção sul do antigo continente, a bacia de pelotas é caracterizada por possuir o mais antigo depósito sedimentar da margem brasileira. Este fato diferencia esta bacia das demais, onde a formação ocorreu posteriormente, associada a ambientes lagunares, registrando apenas o último estágio evolutivo, o oceânico, tendo resquícios dos estágios anteriores mais afastados da linha de costa, encobertos por espessos pacotes sedimentares (Asmus & Ferrari, 1978). Tendo a bacia de pelotas no estágio pós-rifte como cenário, os momentos de hiato deposicional permitiram a ação erosiva da corrente do Brasil a qual atuou em alta intensidade na erosão da plataforma e conseqüente aporte de sedimentos na parte mais distal do continente.

A Planície Costeira do Rio Grande do Sul corresponde a uma feição fisiográfica onde estão expostos os sedimentos da porção superficial da Bacia de Pelotas, ou seja, os sedimentos da cobertura depositados desde o Terciário sob a influência de oscilações glacio-

eustáticas do nível do mar e acentuadas variações climáticas (Barboza et al., 2008). Esta região se caracteriza pela presença de um sistema de leques aluviais e quatro sistemas do tipo laguna barreira. A formação do sistema aluvial teve início no final do Terciário, resultantes de processos gravitacionais como a queda livre de blocos, o rastejamento e o fluxo de detritos tendo como fonte principal, rochas ígneas e metamórficas no Escudo Sul Rio-Grandense na parte mais ao sul e fragmentos rochosos oriundos da Bacia do Paraná como input sedimentar em partes mais internas da planície (Tomazelli & Villwock, 2005).

### 3.3 MATERIAL E MÉTODOS

A avaliação da complexidade morfológica da linha de costa em relação a descritores de condicionantes locais adotados neste estudo, tem como base a proposta metodológica desenvolvida por Porter-Smith & Mckinlay (2012), resultando no esquema metodológico apresentado na Figura 08. Como descritor da complexidade da linha de costa foi utilizado o parâmetro morfológico  $C_x$  obtido pela técnica AMT, considerando um conjunto de comprimentos escalares ( $S$ ). Já para obter os descritores de condicionantes locais ( $D_{cl}$ ), foram utilizados dados de entrada de diferentes fontes como mostra a Tabela 06. Após o levantamento deste conjunto de dados, a integração e manipulação espacial se deu a partir dos softwares livres QGIS 3.6 (QGIS Development Team, 2019) e R 3.5.3 (R Core Team, 2019), visando o desenvolvimento de uma metodologia aberta e replicável.

Tabela 6: Base de informações dos dados de entrada utilizados para cada descritor dos condicionantes locais ( $D_{cl}$ ) e para o descritor morfológico ( $C_x$ )

	Dado de entrada	Fonte	Resolução/Escala	Tipo de Dado	Descritor
Descritores $D_{cl}$	Litologia (classe de rocha)	CPRM	1:1.000.000	Vetorial	Diversidade geológica
	Altimetria	SRTM	30 metros	Matricial	Declividade emersa
	Batimetria	DHN	0.4 km	Matricial	Declividade Submersa
	Falhas geológicas	CPRM	1.000.000	Vetorial	Concentração de falhas
Descritor $C_x$	Linha de costa	IBGE	1:250.000	Vetorial	Complexidade morfológica da linha de costa

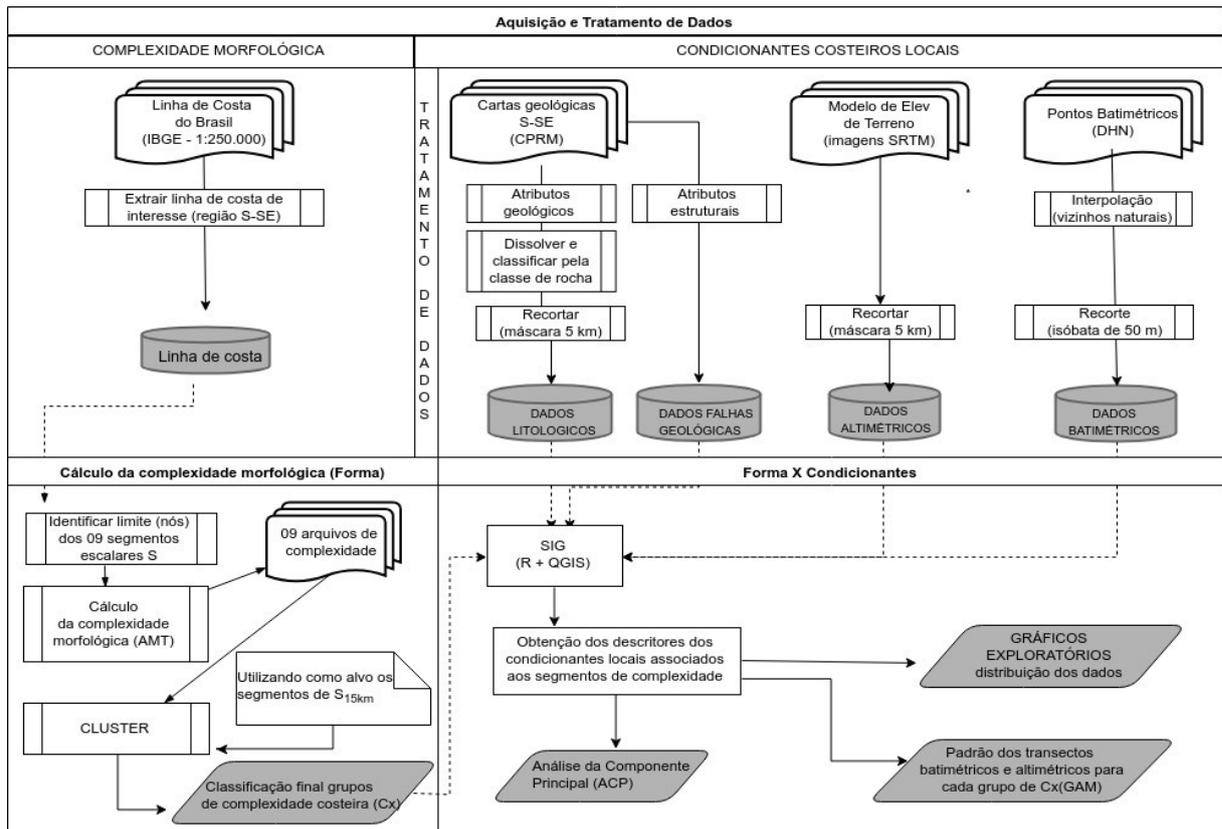


Figura 8: Fluxograma do esquema metodológico simplificado utilizado por este estudo.

Nove diferentes comprimentos escalares (S) foram considerados pela técnica AMT. Técnicas de agrupamento retornaram grupos de complexidade, classificando segmentos de linha de costa com base na variabilidade dos valores individuais de AMT compreendida entre os nós dos maiores comprimentos escalares (S<sub>15km</sub>).

Por ser descrita como limite geológico entre a plataforma interna e externa (Mendes, 1994), a isóbata de 50 m limitou a zona submersa da análise de  $D_{cl}$ . Já a porção continental compreendida até 5 metros da linha de costa foi definida como limite emerso, tendo como base a localização média das barreiras formadas pelo último período holocênico transgressivo na costa do Rio Grande do Sul. Assumindo estes limites de análise, valores individuais de  $D_{cl}$ , foram atribuídos a cada nó de S<sub>15km</sub>, iniciando o processo de integração de dados. O grau de contribuição dos quatro descritores ambientais na classificação da complexidade morfológica foi investigada e avaliada através da análise da componente principal (PCA). Por fim, perfis batimétricos e altimétricos individuais foram analisados para

cada grupo de complexidade morfológica, assim como o seu padrão geral através da aplicação de um modelo de suavização.

### 3.3.1 Descritor complexidade morfológica da linha de costa

A técnica da medida angular (AMT) foi originalmente desenvolvida por Andrieu (1994) para descrever a complexidade de linhas geomórficas através de um parâmetro dependente de escala. O processo inicial se assemelha com a técnica fractal de generalização da linha de costa, através da criação de linhas simples geradas entre dois nós distantes de acordo com o comprimento escalar ( $S$ ) (Figura 09). O descritor da complexidade morfológica para a escala  $S$  ( $Cx_s$ ) é então obtido a partir do ângulo suplementar formado pelos nós CAB, sendo este o valor atribuído à complexidade individual do segmento CA para este comprimento de escala específico.

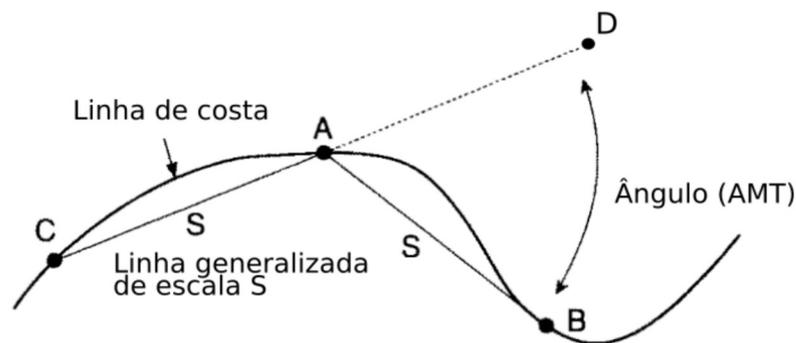


Figura 9: Cálculo da complexidade morfológica usando a técnica de medida angular – AMT. O comprimento de escala ( $S$ ) é medido para frente ( $AB$ ) e para trás ( $AC$ ) de um ponto escolhido ( $A$ ) sobre a linha de costa mapeada. A medida de complexidade  $Cx$  é o ângulo  $CAD$  (ângulo suplementar do  $CAB$ ).

Esta técnica permite a aplicação de um conjunto de diferentes comprimentos de  $S$  sobre o mesmo local, onde grupos de complexidade morfológica podem ser definidos com base na variabilidade de  $Cx$  para o conjunto de comprimentos escalares avaliado.

Semelhante à metodologia utilizada por Porter & Smith (2012), o espectro escalar de análise foi definido através da determinação de nove diferentes comprimentos de  $S$ , sendo eles 0.5 km, 1.0 km, 2.0 km, 2.5 km, 3 km, 4 km, 5 km e 10 km e 15 km, onde o maior comprimento ( $S_{15km}$ ) foi o alvo espacial da análise. Uma rotina desenvolvida em ambiente R identificou e interligou os nós de cada escala  $S$ , gerando nove linhas de costa generalizadas

em  $n$  segmentos. A partir destes produtos, foi construída uma função para o cálculo do ângulo suplementar (AMT) formado entre cada segmento e seu sucessor no sentido norte – sul. Esta função se baseia em dois passos, o primeiro sendo o cálculo do azimute (variando entre  $180^\circ$  e  $-180^\circ$ ) do segmento formado por dois nós, seguindo para o cálculo do ângulo suplementar que cada segmento forma com seu sucessor. Tendo como alvo o comprimento de maior extensão ( $S_{15km}$ ), um agrupamento espacial permitiu obter a variabilidade dos valores de  $Cx$  dos oito demais comprimentos de  $S$  compreendidos entre os nós de  $S_{15km}$  através do cálculo do desvio padrão ( $\sigma$ ) (Figura 10). Por fim, esta variabilidade escalar serviu como dado de entrada para a obtenção de grupos de complexidade morfológica a partir da técnica estatística de agrupamento de dados (*cluster*).

Como parte inicial desta análise, uma matriz de distância euclidiana foi obtida a partir da variabilidade angular. O método de aglomeração hierárquica *Ward* foi a técnica de agrupamento escolhida, por considerar que o conjunto de dados analisados parte de um único grupo, e que se distinguem quanto ao grau de semelhança entre eles. A definição dos grupos retornados por este método se baseia na medida de similaridade calculada a partir da soma de quadrados entre os dois agrupamentos feita sobre todas as variáveis, onde, devido a minimização de variação interna retornam agrupamentos de tamanhos semelhantes (Hair et al, 2005).

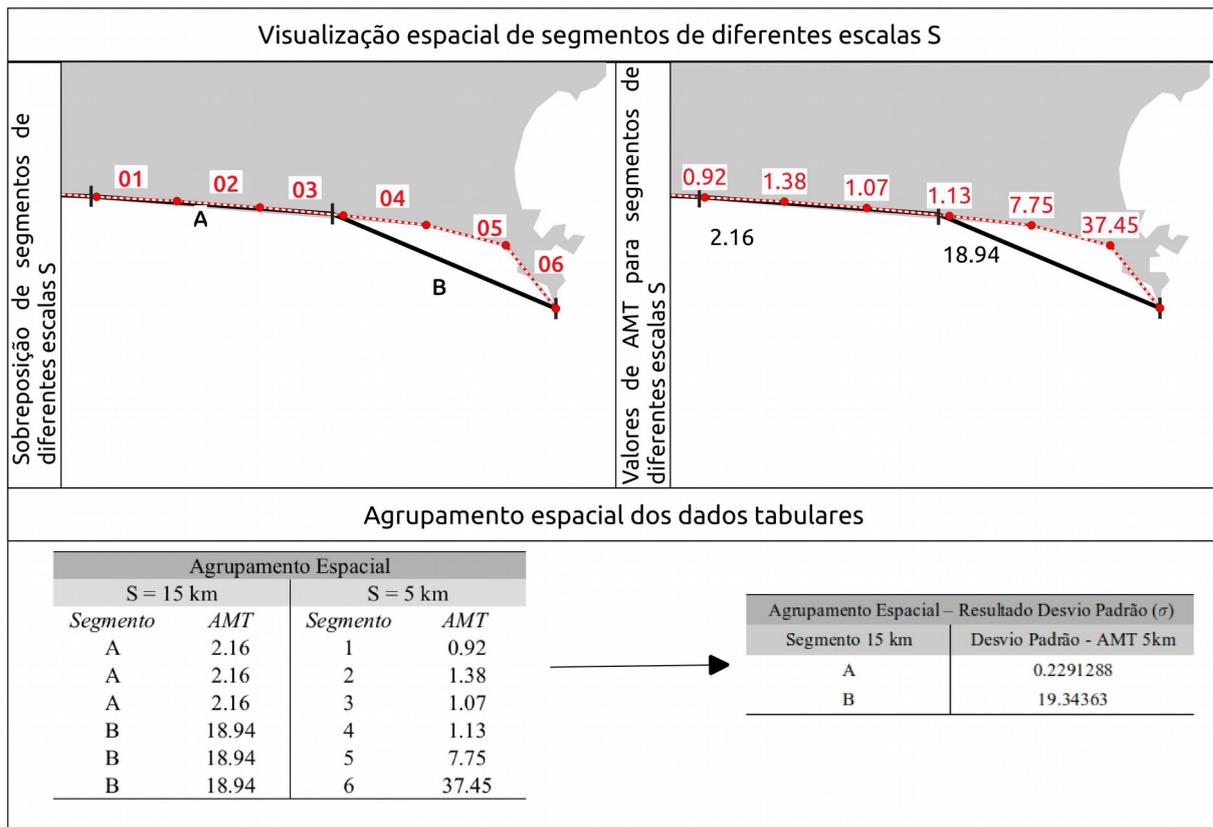


Figura 10: Esquema do agrupamento espacial entre  $S_{5km}$  (em vermelho) e o comprimento alvo  $S_{15km}$  (em preto). Na parte superior da imagem, são representados os identificadores de cada segmento (esquerda) e os seus respectivos valores de complexidade pelo método AMT (direita). A tabela superior à esquerda mostra o agrupamento tabular da sobreposição espacial de  $S_{5km}$  sobre  $S_{15km}$ , resultando na tabela à direita com o cálculo final do desvio padrão dos valores de AMT utilizado como dado de entrada para a definição das classes de complexidade morfológica.

### 3.3.2 Descritores da complexidade estrutural da zona costeira

Procedimentos específicos foram aplicados ao conjunto de dados de entrada já tratados (a visualização espacial dos dados brutos encontra-se no Apêndice 01), como mostra o esquema da Figura 11, sendo estes individualmente detalhados nas seções a seguir

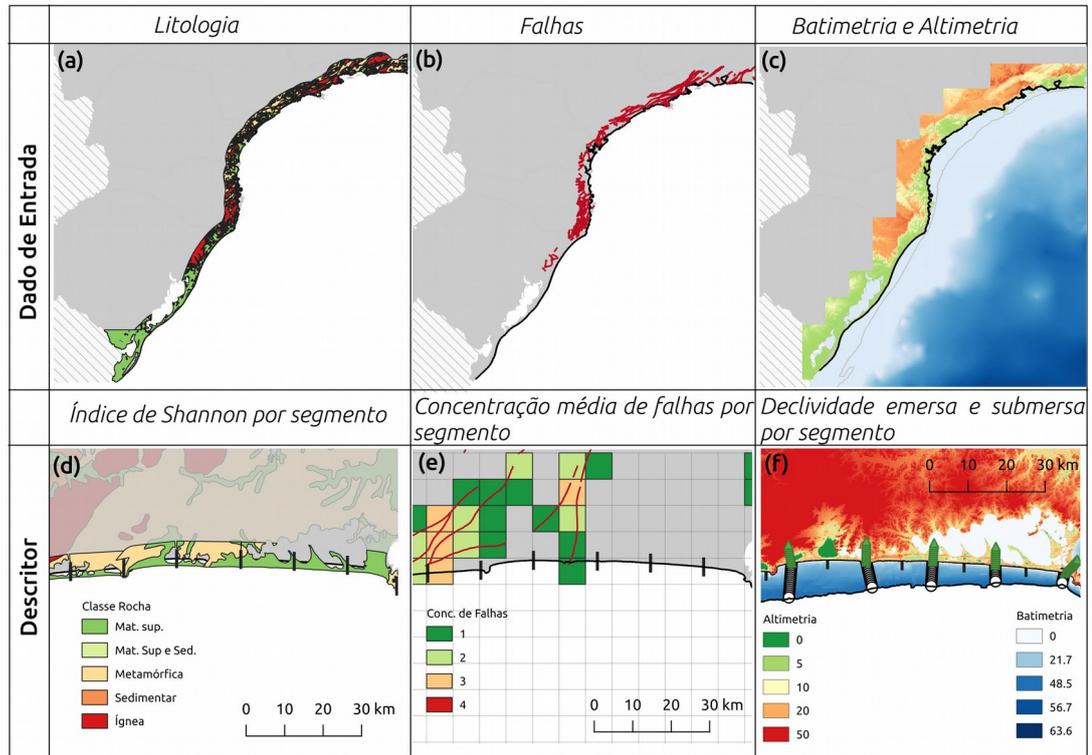


Figura 11: Esquema dos dados de entrada já tratados (painéis superiores) e procedimentos metodológicos (painéis inferiores) utilizados na obtenção dos descritores dos condicionantes locais ( $D_{cl}$ ). Painéis superiores apresentam a área de estudo total representada por diferentes dados de entrada. A simbologia do painel (a) e (b), indica classe de rocha e a estrutura de falhas geológicas, respectivamente, de acordo com a carta do milionésimo. No painel (c) a interpolação batimétrica assim como imagens de SRTM compõem o conjunto de dados de entrada. Já os painéis inferiores apresentam, como exemplo, o esquema de transformação de dados aplicado à região do Cabo Frio (buscando uma melhor visualização) onde as linhas verticais representam os nós de  $S_{15km}$ . O trecho opaco no painel (d) indica a área utilizada para o cálculo do Índice de *Shannon* por segmento de  $S_{15km}$  enquanto os *grids* no painel (f) representam a quantidade de falhas sobre cada área. No painel (e) pontos verdes sobrepõem os transectos individuais de altimetria enquanto pontos brancos sobrepõem os transectos individuais de batimetria (isóbata de 50 m é representada pela linha cinza no painel c), sendo considerado apenas os pontos iniciais e finais de cada transecto na obtenção dos descritores de declividade.

### 3.3.2.1 Diversidade Litológica

As informações relativas às classes de rocha presentes na área de estudo serviram como base de entrada para o descritor de diversidade litológica. O tratamento deste dado foi realizado no QGIS, dissolvendo áreas adjacentes que compartilhavam atributos iguais. A partir deste processamento, o desenvolvimento metodológico do descritor teve sua continuidade no Software R. O recorte dos dados litológicos compreendidos na área emersa de interesse deste estudo foi obtido a partir da construção de uma máscara baseada na linha de costa segmentada a partir dos nós de  $S_{15km}$ .

O Índice de *Shannon* foi o parâmetro utilizado como descritor da diversidade litológica no presente estudo. Este índice é comumente utilizado em pesquisas ecológicas, representando a abundância e uniformidade de espécies em uma determinada área, podendo variar de 0 a 5. No entanto, este índice também se mostra aplicável a avaliação da diversidade litológica como demonstrado por Porter-Smith & McKinlay (2012). Aqui, as classes litológicas compreendidas na zona emersa de cada segmento de linha de costa serviram como dado de entrada da análise. Através da área associada a cada segmento de linha de costa definido pelo recorte da máscara, a diversidade de classes litológicas pode ser obtida individualmente, seguindo a equação (Eq.1)

$$H' = - \sum \left( \frac{n_i}{N} \times \ln \frac{n_i}{N} \right) \quad \text{Eq. (1)}$$

Onde,  $n_i$  é a área ocupada pelas classes litológicas  $i$  presentes no local e  $N$  é a área total associada ao segmento.

### 3.3.2.2 Concentração de Falhas

Buscando avaliar a influência da dinâmica geológica local, a concentração de falhas geológicas próximas à linha de costa também foi considerada como um  $D_{cl}$ . Para isso, uma análise zonal utilizando *grids* de 7,5 km de lado, serviram como base de entrada para esta análise junto ao dado espacial de falhas geológicas. A definição do tamanho de cada célula considerou o comprimento  $S$  do alvo da classificação morfológica (15 km) assim como o valor computacional da análise, definido a metade da extensão dos segmentos (7,5 km) como um tamanho de lado coerente para a construção do *grids*. Assim, uma contagem espacial

retornou a quantidade falhas contidas em cada célula, excluindo em seguida, aqueles que não sobrepunham à linha de costa e sem falhas associadas. Após esta filtragem, a concentração média de falhas associada a cada segmento de linha de costa foi calculada, representando o valor final deste descritor.

### 3.3.2.3 Declividade emersa e submersa

Para o cálculo da declividade emersa e submersa foram amostrados transectos individuais para cada segmento de linha de costa tendo como início o seu ponto intermediário. Como limite do transecto emerso foi criada uma linha distante 5 km da linha de costa, mantendo o limite considerado no cálculo da diversidade litológica. Para o limite submerso foi utilizada a isóbata de 50 m obtida pela interpolação dos pontos batimétricos através da técnica de vizinhos naturais, disponível no Software SAGA (Conrad et. al., 2015). Para a criação das linhas de transecto fez-se necessária a transformação dos dados de linha para feições de ponto através de ferramentas disponíveis no software QGIS. Linhas de ligação foram criadas entre os pontos intermediários de cada segmento e o ponto mais próximo das linhas de limite emerso/submerso através da ferramenta “*Distance to the Nearest Hub*”, sendo transformadas em pontos distantes em 0.5 km. Este resultado definiu os pontos de amostra para o processo “*Sample Raster Values*”, registrando a distância da linha de costa e o valor do pixel de batimetria ou altimetria associado à posição espacial de cada ponto. Com o resultado dos pontos amostrados, uma rotina em R permitiu extração da declividade batimétrica e altimétrica correspondente a cada segmento. Associada a esta análise, uma curva de suavização, obtida através da aplicação de um modelo linear aditivo (GAM), retornou o padrão do conjunto dos perfis para cada grupo. Este método de ajuste foi escolhido por incorporar um conjunto de modelos lineares em sua estrutura, considerando assim os múltiplos pontos amostrados em cada segmento (Wood, 2017).

### 3.4 RESULTADOS

Os resultados apresentados a seguir são produtos da rotina em R desenvolvida com base na estrutura metodológica descrita acima, a qual se encontra disponível em repositório online (<https://github.com/JesSchattschneider/Dissertation/blob/master/coastlineClassificationAMT.zip>).

A quantidade de nós, assim como o valor médio de  $C_x$  dos nove comprimentos de  $S$  estão representados na Tabela 07. Em geral, este resultado mostra uma relação direta entre o aumento da média dos valores de  $C_x$  com o comprimento  $S$ . Assumindo os segmentos de linha de costa compreendidos entre os nós dos diferentes comprimentos escalares, foram obtidas nove classificações de  $C_x$  independentes para cada comprimento de  $S$  analisado (Apêndice 02).

Logo após o cálculo individual, o agrupamento espacial destas classificações intermediárias avaliou a variabilidade destes resultados para um mesmo trecho de linha de costa. Esta avaliação se desenvolveu sobre os segmentos 157 segmentos de  $S_{15km}$  (Figura 12 e Figura 13) dando início à classificação morfológica final da linha de costa proposta por esse estudo.

Tabela 7: Quantidade de nós necessários para cobrir a linha de costa analisada por cada um dos nove comprimentos escalares ( $S$ ) considerados neste estudo.

$S$ (km)	Quantidade	Valor médio ( $C_x$ )
0.5	6238	23.36
1.0	3075	27.77
2.0	1462	29.54
2.5	1158	32.84
3.0	939	31.67
4.0	682	29.04
5.0	533	34.05
10	246	33.82
15	157	32.47

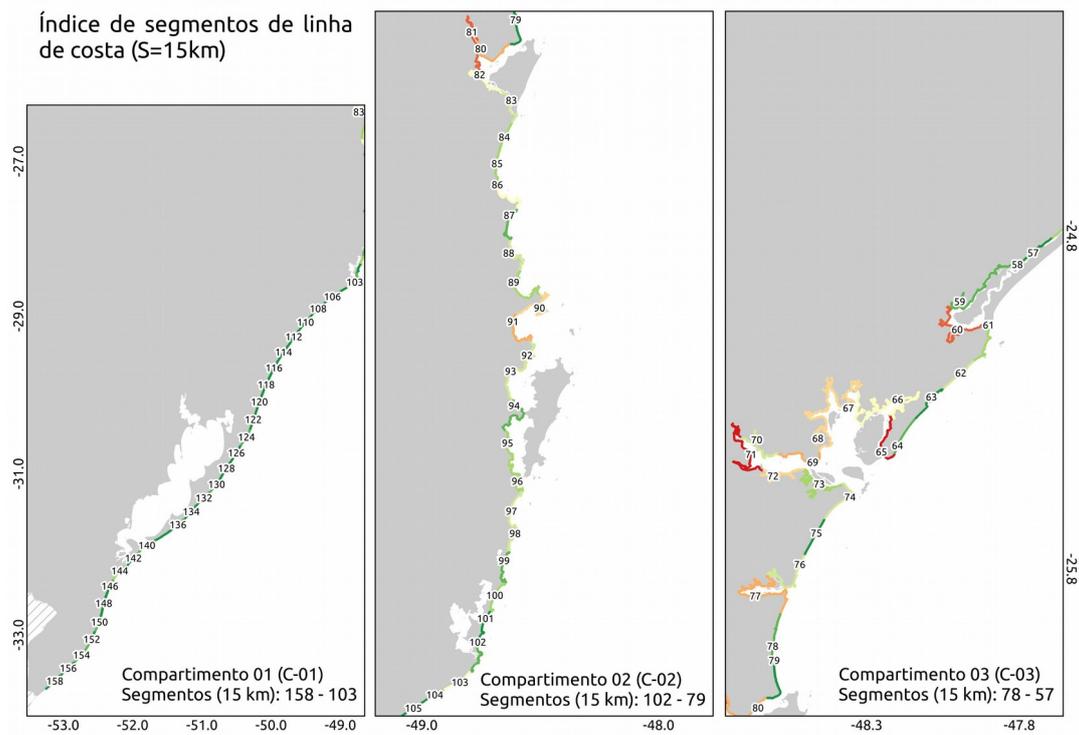


Figura 12: Segmentos de  $S_{15km}$  alvo da classificação de complexidade da linha de costa S-SE brasileira.

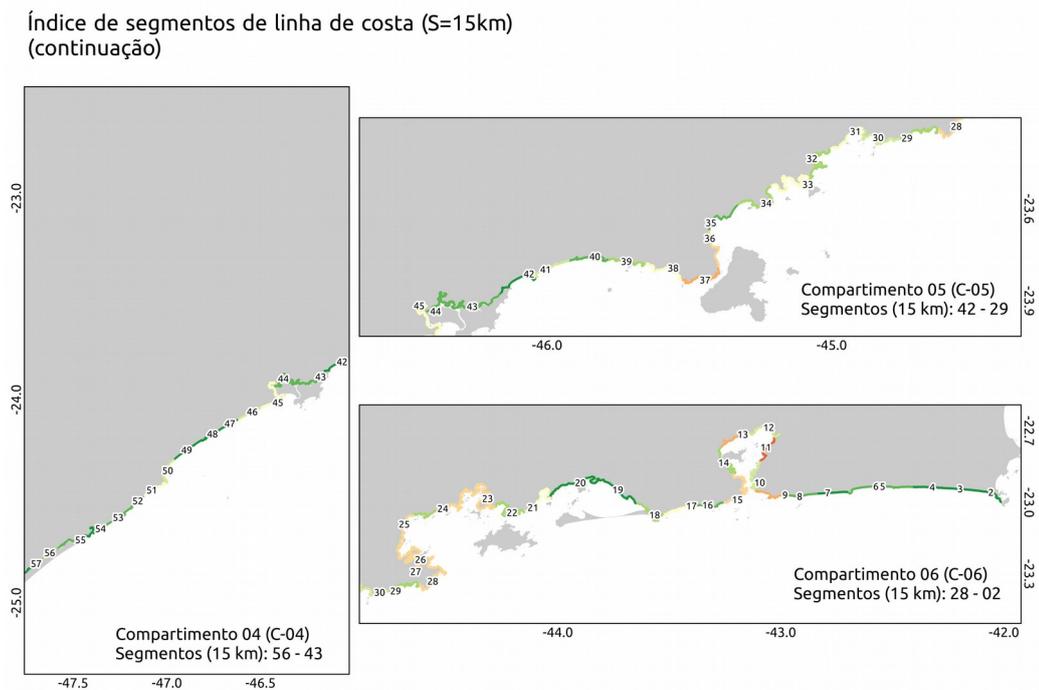


Figura 13: Segmentos de  $S_{15km}$  alvo da classificação da complexidade da linha de costa S-SE brasileira (continuação da Figura 12).

A quantidade de classes de complexidade morfológica foi definida pelo dendrograma obtido a partir dos valores de desvio padrão dos oito comprimentos de S sobre a linha de costa segmentada pelos nós de  $S_{15km}$ . Quatro grupos de complexidade morfológica foram identificadas a partir deste produto como indicado na Figura 14.

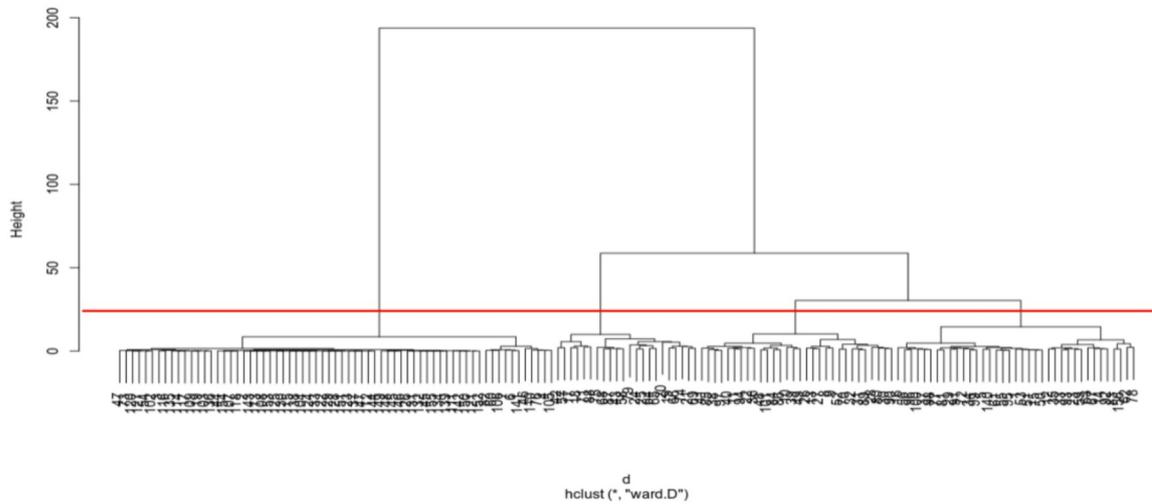


Figura 14: Dendrograma do agrupamento hierárquico sobre a variabilidade dos comprimentos escalares sobre  $S_{15km}$ . A linha vermelha pontilhada mostra a altura escolhida para o corte do agrupamento, indicando a presença de quatro grupos de complexidade bem definidos.

Buscando investigar a diferença escalar dos diferentes  $C_x$  nestas quatro classes, um gráfico de caixas foi construído. Como mostra a Figura 15 os segmentos classificados pelo grupo 01 possuem pouca variabilidade de  $C_x$  em todas os comprimentos escalares, já no grupo 02 os valores de  $C_x$  dos segmentos são mais variáveis mas ainda mantêm uma homogeneidade entre o grau de variabilidade em diferentes comprimentos de  $S$ .

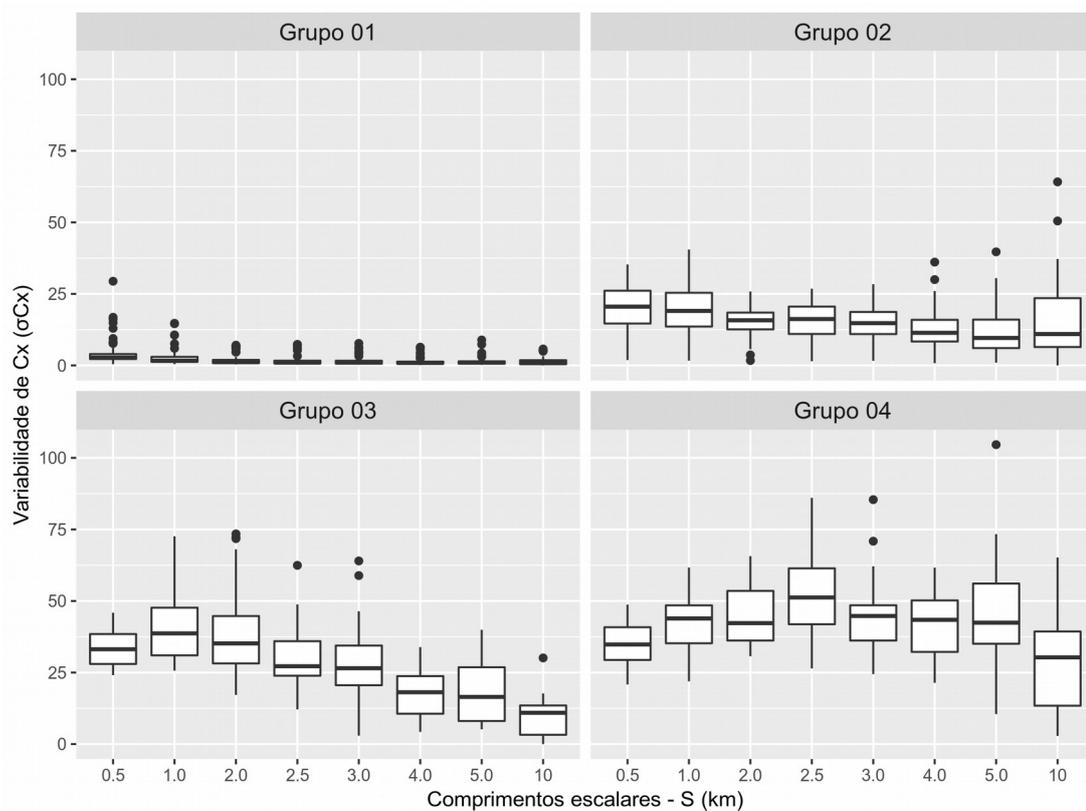


Figura 15: Gráfico de caixa mostrando a variação angular ( $\sigma_{C_x}$ ) dos oito diferentes comprimentos escalares ( $S$ ) em cada grupo de complexidade. A linha horizontal no meio de cada caixa indica o valor mediano da complexidade de cada comprimento  $S$ , com as linhas superiores e inferiores correspondendo o terceiro e primeiro quartil, respectivamente.

Nas classes 03 e 04 estão compreendidos os segmentos mais complexos, onde em geral, o grupo 03 mostra uma relação inversa entre o aumento do  $\sigma_{C_x}$  com o comprimento de  $S$ , já o grupo 04, em geral, apresenta maiores valores de  $\sigma_{C_x}$ , associados a maiores comprimento de  $S$ , além de compreenderem um espectro maior de  $\sigma_{C_x}$  para os comprimentos de  $S$  individuais.

Aplicando a classificação dos grupos de complexidade morfológica aos respectivos segmentos de  $S_{15km}$ , a linha de costa segue o padrão espacial apresentado pela Figura 16 e pela Figura 17.

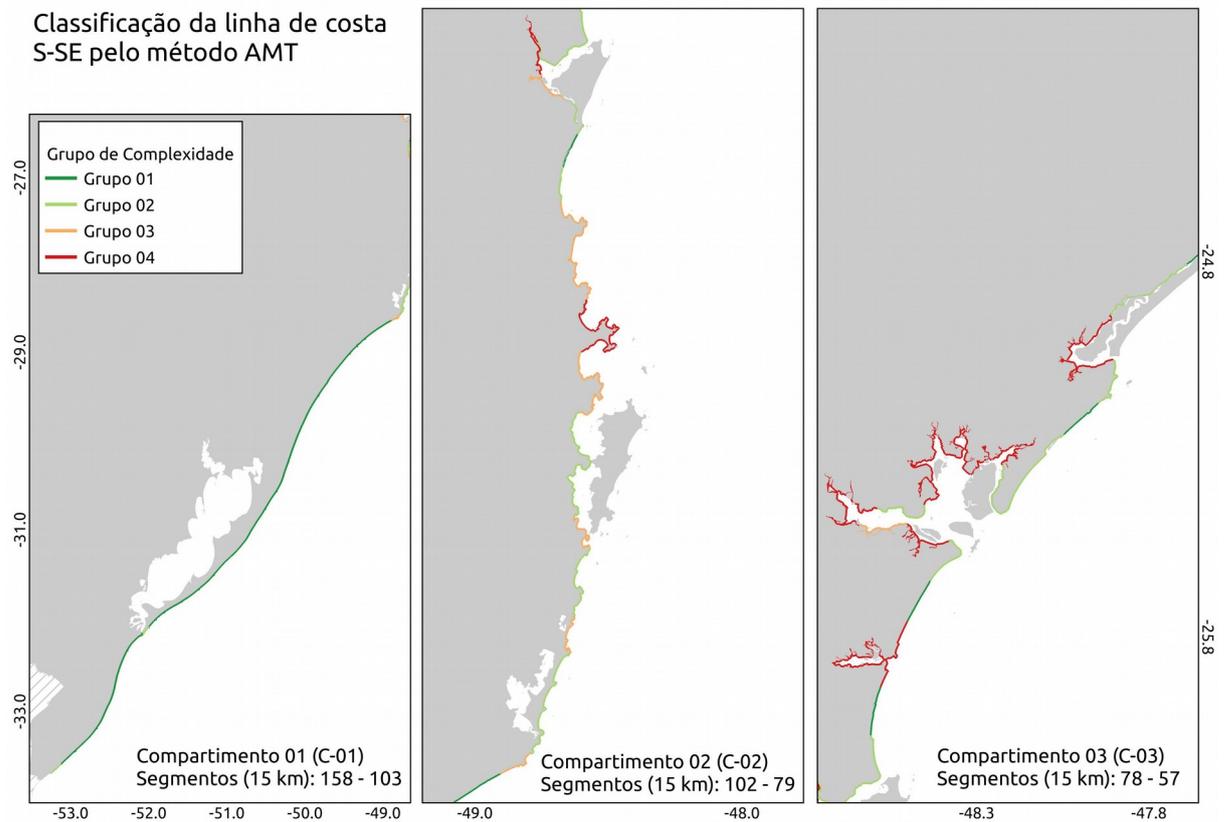


Figura 16: Representação espacial da classificação da linha de costa S-SE brasileira, de acordo com o grupo de complexidade correspondente a cada segmento de linha de costa.

Classificação da linha de costa  
S-SE pelo método AMT  
(continuação)

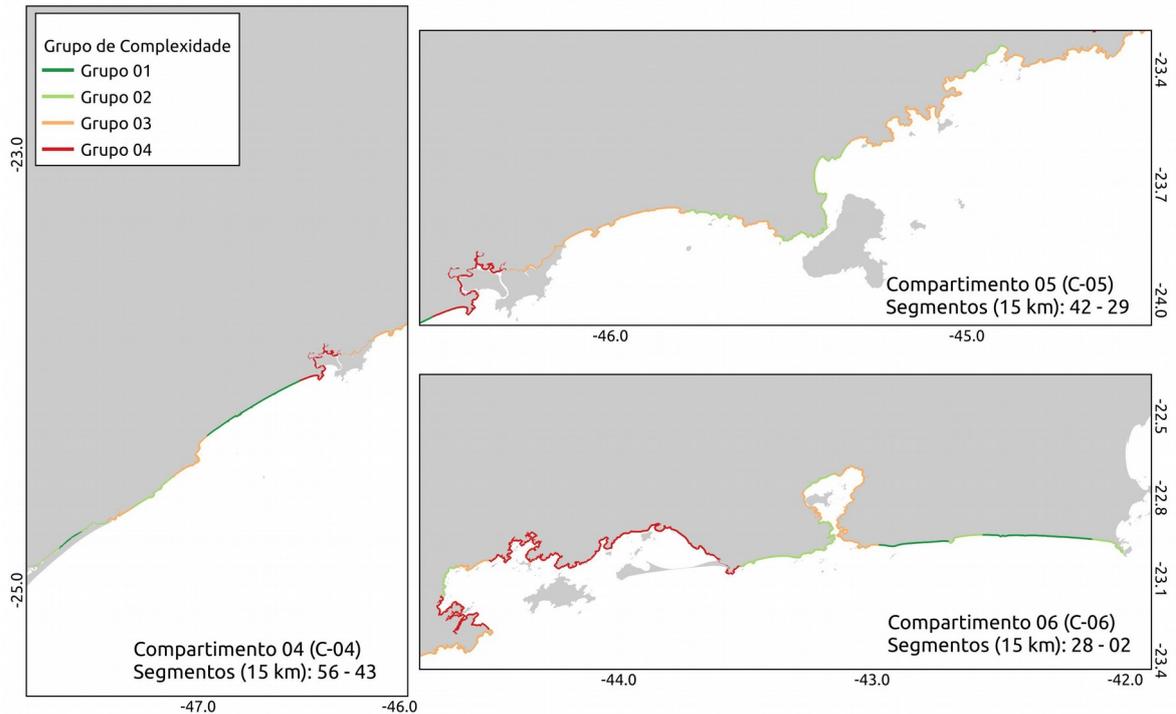


Figura 17: Representação espacial da classificação da linha de costa S-SE brasileira, de acordo com o grupo de complexidade correspondente a cada segmento de linha de costa.

A partir deste resultado deu-se início à investigação da relação entre a complexidade dos descritores de condicionantes ambientais ( $D_{ci}$ ) com os grupos de complexidade morfológica. Tendo todos os descritores associados aos segmentos de costa já sido classificados quanto a complexidade morfológica, observa-se uma distribuição distinta destes descritores entre grupos (Figura 18).



Figura 18: Avaliação exploratória da distribuição dos diferentes valores descritores ambientais ao longo de segmentos classificados em cada grupo de complexidade morfológica, seguindo o padrão de cores, verde-escuro, verde-claro, laranja e vermelho para grupo 01, 02, 03 e 04, respectivamente.

A baixa correlação entre descritores mostra independência entre eles, suportando a escolha do conjunto analisado. Com o intuito de resumir o padrão de correlação entre os descritores estruturais e os grupos de complexidade morfológica, o resultado da Análise de Componentes Principais (ACP) mostra que aproximadamente 70% dos casos podem ser explicado pelo padrão apresentado pela Figura 19. Este produto estatístico mostra que a diversidade litológica, de concentração de falhas e declividade emersa possuem a maior

contribuição na distinção dos grupos de complexidade morfológica, enquanto que a declividade submersa é a grande contribuinte da segunda componente.

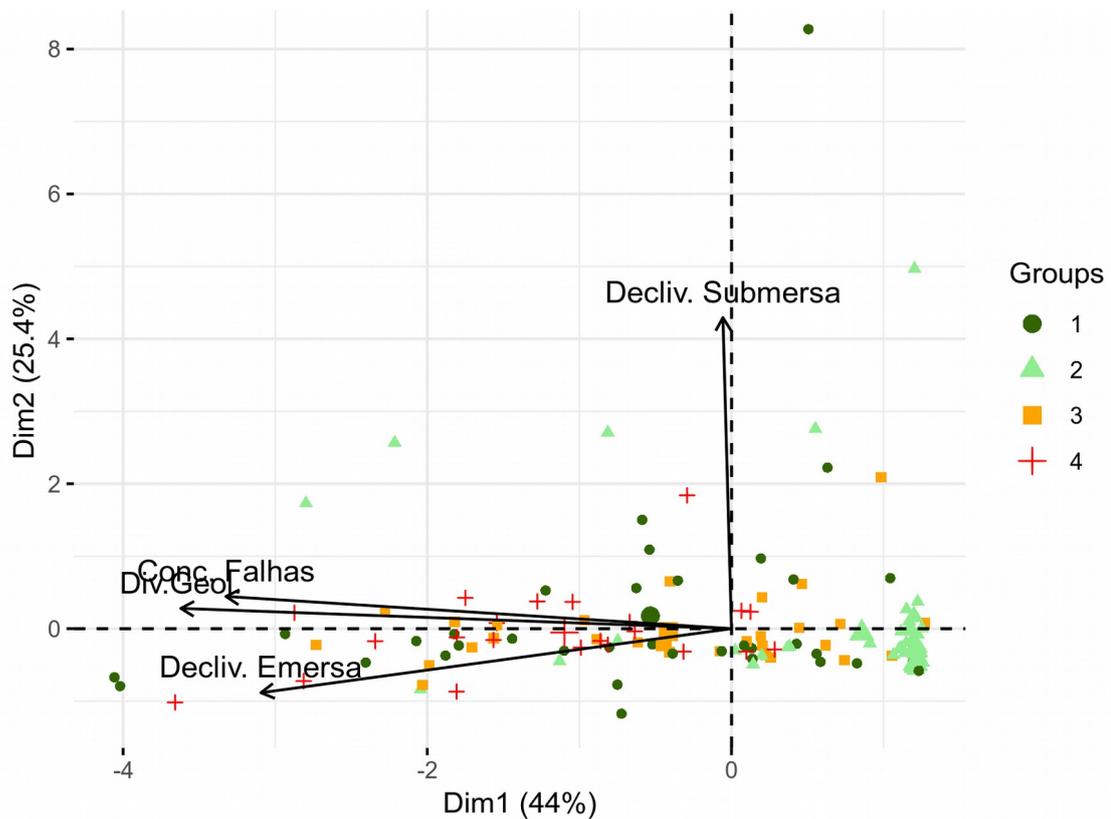


Figura 19: Resultado da Análise da Componente Principal (ACP) das duas primeiras componentes (xy) com os pontos representando segmentos de linha de costa classificados por seus grupos de complexidade. O grau de contribuição de cada descritor ambiental aos componentes da análise é indicado por suas respectivas setas.

Devido à simplificação dos descritores de declividade, os quais consideram apenas o valor inicial e final dos pontos dos transectos emersos e submersos, uma análise adicional foi realizada considerando a totalidade dos pontos amostrados. Perfis batimétricos (Figura 20) e altimétricos (Figura 21) individuais mostram diferenças quanto ao padrão geral dentro grupos de complexidade.

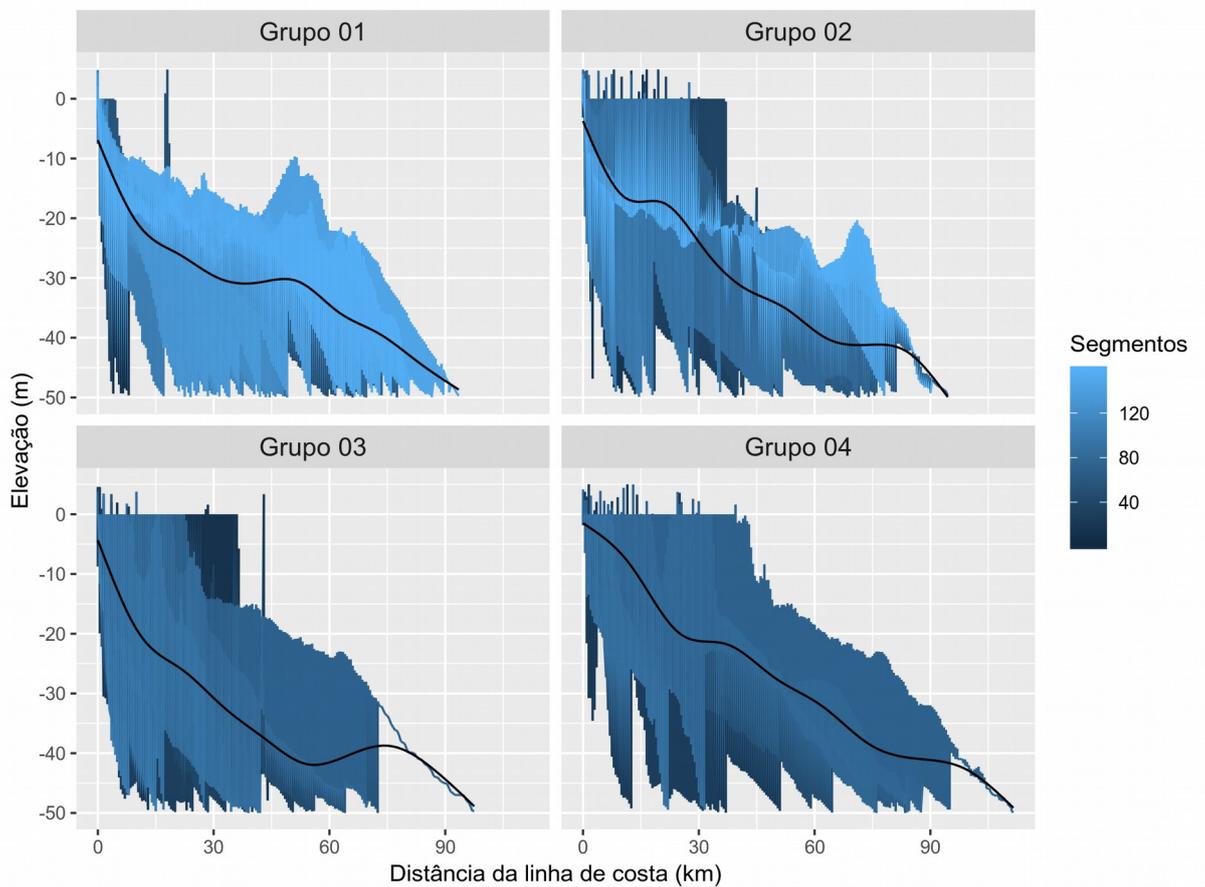


Figura 20: Perfil batimétrico individual de cada segmento de linha de costa pertencente a cada um dos quatro grupos de complexidade. A linha preta representa a curva ajustada ao modelo aditivo generalizado (GAM) dos perfis batimétricos de cada grupo.

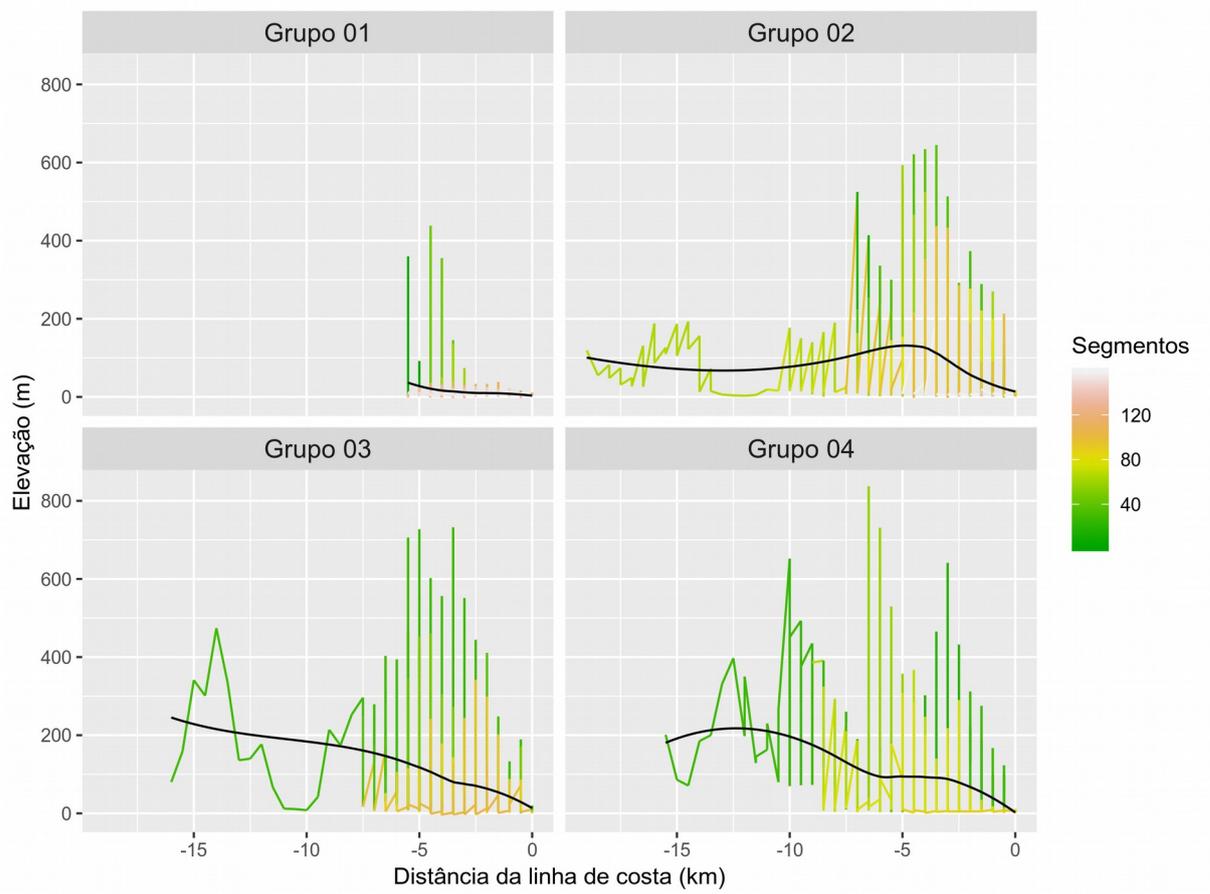


Figura 21: Perfil altimétrico individual de cada segmento de linha de costa pertencente a cada um dos quatro grupos de complexidade. A linha preta representa a curva ajustada ao modelo aditivo generalizado (GAM) dos perfis altimétricos de cada grupo.

### 3.5 DISCUSSÃO

#### 3.5.1 Classificação da complexidade morfológica da linha de costa S-SE brasileira

Quatro diferentes grupos de complexidade morfológica foram identificados na linha de costa S-SE brasileira através da técnica AMT. A definição de grupos de complexidade teve como base a variação de Cx no conjunto de comprimentos escalares compreendido entre 0.5 e 15 km. De acordo com a técnica de agrupamento aplicada, o grupo 01 apresenta uma baixa variação em todos os comprimentos escalares, representando os segmentos de menor complexidade. Já o grupo 02 apresenta em média uma variabilidade baixa e homogênea entre todas as escalas analisadas. Nos Grupos 03 e 04 se concentram os segmentos de maior complexidade, sendo o último definido como o mais complexo por sua alta variabilidade em todos os níveis escalares.

A linha de costa compreendida no litoral do Rio Grande do Sul foi predominantemente classificada pelo Grupo 01. No entanto, este grupo também se mostrou presente em segmentos retilíneos do litoral de São Paulo (entre a baía de Santos e a Ilha de São Sebastião) e do Rio de Janeiro (próximo ao Cabo Frio). Estas áreas se assemelham quanto a seu padrão monótono, formado por praias arenosas extensas, indicando uma consequente associação do Grupo 01 com costas sedimentares retilíneas.

A partir do Cabo de Santa Marta uma mudança abrupta de orientação da linha de costa ocorre em resposta a proximidade da Serra do Mar ao ambiente costeiro, caracterizando-o com um perfil costeiro recortado (Martins & Coutinho, 1981). Neste sentido, o resultado obtido pela classificação morfológica deste estudo mostrou-se sensível a essa influência. Avaliando a classificação entre o Cabo de Santa Marta e a baía de São Francisco do Sul (SC), onde a presença de enseadas e costões rochosos passa a ser mais frequente, segmentos de linha de costa passaram a variar em sua maioria entre o Grupo 02 e 03, apontando para o aumento da sinuosidade local.

No segmento litorâneo compreendido entre a baía de São Francisco do Sul (SC) e a Baía de Santos (SP), uma grande diversidade de paisagens é presente com desenvolvimento de extensas planícies costeiras e baias de grande extensão como Santos, Paranaguá e São Francisco do Sul (Tessler & Goya, 2005). Este padrão diverso também se mostrou refletido na classificação obtida por esse estudo, sendo esta a porção mais heterogênea em relação a distribuição dos grupos de complexidade. No entanto, segmentos retilíneos mantiveram sendo

classificados pelo Grupo 01, enquanto ambientes complexos como promontórios, e extensas baías, foram classificados pelo grupo de maior complexidade (Grupo 04).

Ao norte da Baía de Santos até a Baía de Guanabara foi observada uma prevalência dos grupos de maior complexidade (03 e 04). De acordo com Muehe et al. (2006), este setor costeiro é caracterizado por sua alta complexidade geomorfológica associada a proximidade da Serra do Mar, impedindo o desenvolvimento de planícies costeiras de expressão, resultando em um litoral predominantemente constituído por costões rochosos. Aliado a esta alta sinuosidade, o sistema de ilhas presente nesta área desenvolve um amplo padrão morfodinâmico, intensificando a complexidade dinâmica local (Mahiques, 1987). Isto mostra que a metodologia reagiu bem a mudança de padrão morfológico, evidenciando sua aplicabilidade para a caracterização morfológica definida pelo tipo de ambiente.

### **3.5.2 Complexidade morfológica e condicionantes costeiros locais**

Buscando uma melhor compreensão quanto ao significado geomorfológico das classes de complexidade costeira, condicionantes geomorfológicos locais associados a cada grupo de complexidade foram avaliados através de quatro descritores. De acordo com as análises investigativas e com o grau de contribuição do conjunto ambiental na classificação morfológica, diferentes padrões costeiros foram associados a diferentes níveis de complexidade morfológica. Neste sentido, a estrutura geológica, a concentração de falhas e a declividade emersa foram os descritores que apresentaram a melhor associação com os grupos de complexidade (eixo principal da ACP). Este resultado pode estar refletindo a alta influência da herança geológica na modulação da linha de costa local, conforme apontado por estudos pretéritos (Goya & Tessler, 2005). Zonas caracterizadas por uma alta concentração de falhamentos e de diversidade geológica em geral estiveram associadas a regiões onde há afloramento do Embasamento Cristalino, como no caso da Baía da Ilha Grande (Bispo & Sperle, 2013). Em relação a sua complexidade morfológica, em geral, segmentos deste tipo foram classificados pelo Grupo 03 e 04, indicando que o modelo aplicado neste estudo é capaz de identificar a relação entre a complexidade morfológica e a estrutura geológica. O inverso também foi observado, com uma concentração expressiva de segmentos do Grupo 01 em setores de baixa diversidade geológica e poucos falhamentos, características comuns de costas sedimentares recentes.

Já no que se refere à caracterização dos condicionantes costeiros dos segmentos do grupo 02, nenhuma relação clara foi evidenciada com os descritores avaliados neste estudo. No entanto, em comparação aos demais, a declividade emersa e submersa associada a este grupo pareceu apresentar um espectro mais variado. Este fato pode estar relacionado a alta distribuição desta classe na área de estudo, correspondendo a segmentos de complexidade intermediária e por vezes intercalando ambientes complexos como baías localizadas entre o litoral norte de Santa Catarina e do Rio de Janeiro. Segundo estudos pretéritos (Zalán e Oliveira, 2005), a zona emersa e submersa deste trecho apresenta um perfil bem variado, resultante do complexo sistema de riftes, grábens e semi-grábens originados segundo um modelo de quebra e colapso gravitacional. Por não apresentar uma relação clara com nenhuma formação específica, uma maior diversidade de ambientes pode ter sido identificada neste grupo, correspondendo a alta variação da configuração da perfil de declividade associado.

Seguindo para a análise dos perfis altimétricos e batimétricos individuais, alguns padrões interessantes puderam ser identificados. Em comparação com os demais casos, os perfis adjacentes aos segmentos do Grupo 01 mostraram uma baixa declividade geral. Por corresponderem, em sua grande maioria, a segmentos de linha de costa do Rio Grande do Sul o padrão observado para o perfil batimétrico se mostra de acordo com o que é descrito na bibliografia. De acordo com Silveira & Machado (2004), este padrão pouco íngreme se desenvolveu pelo longo processo de sedimentação associado a abertura do oceano Atlântico, sendo ainda intensificado pela baixa dinâmica oceanográfica da região, dando origem a uma superfície batimétrica irregular e de baixa declividade. Já o perfil emerso se mostra de acordo com análises descritas acima, retornando o perfil monótono das costas sedimentares associadas a este grupo.

Quanto ao padrão batimétrico geral dos demais grupos, observa-se que alguns segmentos apresentam baixa declividade nos primeiros metros do perfil, principalmente ao longo da extensão de transectos batimétricos de segmentos do Grupo 04. Este fato pode estar relacionado com a presença de ilhas imediatamente à frente do segmento de linha de costa que correspondem. Esta característica provavelmente influenciou o padrão geral obtido pelo GAM, resultando na suavização dos primeiros metros do perfil. Já o resultado do padrão altimétrico irregular associado a esses segmentos corroborou com avaliações identificadas anteriores, associando este grupo de morfologia complexa em resposta a proximidade da Serra do Mar. Outra característica importante deste resultado é relativa a proximidade dos

segmentos e a isóbata de 50 m. Visualmente, transectos batimétricos do grupo 03 distinguiram-se dos demais quanto a sua extensão, compreendendo transectos mais curtos, refletindo a proximidade da isóbata de 50 metros nos locais de maior concentração destes segmentos, ou seja, litoral norte de São Paulo e setor central de Santa Catarina. Tal padrão parece refletir o controle estrutural dessas áreas, nas quais há um estreitamento da plataforma continental interna.

### 3.5.3 Considerações gerais e limitações do método

De forma semelhante ao observado no presente estudo, Porter-Smith & McKinlay (2012) também identificaram a diversidade litológica como o fator de maior relação com a variação da complexidade morfológica do litoral australiano. De maneira geral, estes autores identificaram morfologias menos complexas associadas a zonas costeiras de composição litológica homogênea e linhas de costa mais complexas relacionadas a uma composição mais diversa. A semelhança entre resultados observados para a costa brasileira e australiana aponta para o controle primário da herança geológica na variação da complexidade costeira em mesoescala. Conforme sugerem Davidson et al. (2002), em um padrão heterogêneo a modulação ocorre de forma irregular, onde materiais menos resistentes são erodidos primeiro, formando assim uma linha de costa mais complexa do que a observada em zonas costeiras de padrão litológico homogêneo.

Em conjunto com a diversidade geológica, a concentração de falhas estruturais também se mostrou como um descritor de expressiva contribuição para a morfologia local, possivelmente refletindo a interferência de lineamentos presentes no embasamento cristalino da Serra do Mar na configuração da linha de costa. Apesar da importância da avaliação da estrutura tectônica na modulação da linha de costa ter sido identificada neste estudo, assim como o observado por estudos pretéritos (Giuliano et al., 2016; Xu et al., 2014), a orientação das falhas e o processo de evolução geológica (idade das rochas) não foram considerados nas análises. A implementação destas variáveis em estudos futuros poderá resultar em avaliações mais precisas quanto ao controle da dinâmica estrutural no ambiente costeiro. Porém, para isso é indicada a utilização de bases geológicas em escalas mais detalhadas.

Quanto à influência da declividade do terreno (emerso e submerso) na complexidade morfológica da linha de costa, as análises realizadas por este estudo não mostraram uma influência muito clara destas variáveis. Porém, as curvas dos modelos de suavização

considerando a totalidade do transecto de cada segmento indicaram a existência de perfis variados para os diferentes grupos de complexidade, sugerindo o reflexo do padrão batimétrico e altimétrico, fruto do processo evolutivo da margem costeira, na definição da complexidade atual linha de costa adjacente. Jiang & Plotnick (1998) foram mais longe na análise desta relação ao concluir que esta interação reflete consequente na biodiversidade do local. Esta aplicação em conjunto com os resultados obtidos pelo presente estudo, mostram a potencialidade da avaliação morfológica da linha de costa considerando dados batimétricos e altimétricos.

### 3.6 CONCLUSÃO

Análises morfológicas quantitativas foram conduzidas através da técnica AMT, sobre linha de costa compreendida entre as regiões sul e sudeste do Brasil, permitindo a sua classificação em quatro grupos de complexidade morfológica. A relação entre os grupos de complexidade e tipo de ambiente foi mais expressiva para os Grupos 01 e 04, tendo segmentos retilíneos de linhas de costa sido classificadas no Grupo 01 (referente à classe de menor complexidade) e segmentos associados a baías e promontórios classificados no Grupo 04 (referente à classe de maior complexidade).

A relação entre os diferentes grupos de complexidade morfológica com os condicionantes costeiros locais mostraram que os padrões litológico e tectônicos exercem um controle mais claro em comparação com os demais descritores avaliados, principalmente sobre a morfologia dos segmentos dos Grupo 01 e 04. No entanto, a diferença observada entre no padrão geral dos perfis batimétrico e altimétrico dos diferentes grupos de complexidade indica a importância da avaliação de descritores que considerem estas informações em estudo que se propõem a compreender a relação dos condicionantes costeiros na expressão morfológica da linha de costa.

Pioneiramente, os resultados apresentados nesse estudo fornecem informações quantitativas para a área e descrevem a sua relação com condicionantes costeiros locais. A utilização de bases de dados abertas e softwares livres permitiu o desenvolvimento de uma metodologia replicável, passível de ser adaptada e reproduzida em outras costas. Para trabalhos futuros, recomenda-se a utilização de variáveis adicionais, como fluxo direcional de onda, amplitude de maré, orientação de falhas e composição sedimentar do substrato marinho como descritores de condicionantes locais para a análise refinada, e talvez em maior escala, dos fatores que condicionam a complexidade costeira. Aliado a estas recomendações, é indicado a continuidade de pesquisas que permitam o acesso a dados primários e a replicação de metodologias, visando a integração de avanços qualitativos gradualmente obtidos. Desta forma, será possível, com o avanço das pesquisas, que se obtenha uma compreensão mais abrangente quanto ao papel de diferentes processos na determinação da morfologia local.

## 3.7 REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F. F. M. de, 1976. “The system of continental rifts bordering the Santos Basin, Brazil”. **Anais Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 48, Supl. 1, p. 15-26, 1976.
- ALMEIDA, F.F.M. E CARNEIRO, C.D.R. “Origem e Evolução da Serra do Mar”. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 28, n. 28, p.135-150, 1998.
- ANDRLE, R. The angle measure technique: A new method for characterizing the complexity of geomorphic lines. **Mathematical Geology**, v. 26, n. 1, p. 83–97, 1994.
- ANDRLE, R. Complexity and scale in geomorphology: Statistical self-similarity vs characteristic scales. **Mathematical Geology**, v. 28, n. 3, p. 275–293, 1996.
- ASMUS, H.E. and FERRARI, A.L. Hipótese sobre a causa do tectonismo Cenozoico na região sudeste do Brasil. **Projeto Remac**, 1978.
- BARBOZA, E. G., ROSA, M. L. C. da C., & AYPUP-ZOUAIN, R. N. Cronoestratigrafia da Bacia de Pelotas: uma revisão das seqüências deposicionais. **Gravel**, v. 6, n. 1, p. 125–138. 2008.
- BARTLEY, J. D.; BUDDEMEIER, R. W.; BENNETT, D. A. Coastline complexity: A parameter for functional classification of coastal environments. **Journal of Sea Research**, v. 46, n. 2, p. 87–97, 2001.
- BISPO, L.; SPERLE, M. Relações entre a sedimentação quaternária, o condicionamento tectônico e as variações relativas do nível médio do mar no canal central da Baía da Ilha Grande, Rio de Janeiro, RJ. **INTERAÇÕES HOMEM - MEIO NAS ZONAS COSTEIRAS BRASIL/PORTUGAL**. p.245–260, 2013.
- CONRAD, O., BECHTEL, B., BOCK, M., DIETRICH, H., FISCHER, E., GERLITZ, L., WEHBERG, J., WICHMANN, V., and BÖHNER, J. **System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA)**, Geosci. Model. 2015.
- DAVID-ARNOTT, R. **Introduction to Coastal Processes & Geomorphology**. 2009.
- DAVIDSON, J.P., REED, W.E., DAVIS, P.M. **Exploring Earth: an Introduction to Physical Geology**. Prentice-Hall Inc., Upper Saddle River, NJ. 2002
- DE SOUZA, I. A. et al. Caracterização das falhas de transferência na porção norte da Bacia de Santos a partir da integração de dados geológicos e geofísicos. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 17, n. 1,p. 109–132, 2008.

- DIAS, J. L. et al. Aspectos da evolução tectono-sedimentar e a ocorrência de hidrocarbonetos na Bacia de Campos. **Origem e evolução de Bacias Sedimentares**, 1990.
- DILLENBURG, S.; HESP, P. A. **Geology and Geomorphology of Holocene Coastal Barriers of Brazil**, 2009
- DOMINGUEZ, J. M. L. The Coastal Zone of Brazil: an Overview. **Journal of Coastal Research**, v. I, n. 39, p. 16–20, 2006.
- FONTANA, R.L. Desenvolvimento Termomecânico da Bacia de Pelotas e Parte Sul da plataforma de Florianópolis. **Origem e evolução de Bacias sedimentares**. PETROBRAS. p.377-400. 1990.
- GAMBOA, L.A.P. & RABINOWITZ, P.D. The Rio Grande Fracture Zone in the western South Atlantic and its tectonic implications. **Earth and Planetary Science Letters, Amsterdam**, v. 52, p. 410-418, 1981.
- GUARDADO, L. R.; GAMBOA, L. A. P.; LUCCHESI, C. F. Petroleum Geology of the Campos Basin, Brazil, a Model for a producing atlantic type basin. **Divergent/Passive Margins Basins**, v. 48, p. 3–36, 1989.
- GIULIANO, J.; GODARD, V.; LEBOURG, T.; et al. Large scale structural control on regional coastline orientations: example from South-eastern France. **Journal of Coastal Research**, v. 165, p. 1687–1691, 2016.
- GOODCHILD, M. F. Geomorphology Scale in GIS: An overview. **Geomorphology**, v. 130, n. 1–2, p. 5–9, 2011.
- HAIR, J. F., et al. **Análise multivariada de dados**. Trad. Adonai S. Sant’Anna e Anselmo C. Neto. 5 ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.
- JIANG, J.; PLOTNICK, R. E. Fractal Analysis of the Complexity of United States. **Mathematical Geology**, v. 30, n. 5, p. 535–546, 1998.
- KLEIN, A. H. DA F.; SHORT, A. D. **Brazilian Beach Systems: Introduction**. 2016.
- KUMAR, N.; GAMBOA, L.A.P. Evolution of the São Paulo Plateau and implications for the early history of the South Atlantic. **Geological Society America Bulletin**, v. 90, p. 281-293, 1979.
- LAM, N. S. N.; QUATTROCHI, D. On the issues of scale, resolution, and fractal analysis in the mapping sciences. **Professional Geographer**, v. 44, n. 1, p. 88–98, 1992.
- MACEDO, J. M. Evolução tectônica da Bacia de Santos e áreas continentais adjacentes. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, v. 3, n. 3, p. 159–173, 1989.

- MACHADO, L. G. Evolução Morfo-Tectônica do Alto de Florianópolis que segmenta as Bacias de Santos e Pelotas, Margem Sudeste da Costa Brasileira., *Dissertação de Mestrado – Universidade Federal Fluminense, Niterói – RJ.*, 2010
- MANDELBROT, B. How long is the coast of Britain? Statistical Self-Similarity and Fractional Dimension. **Science**, v. 156, n. 3775, p. 636–638, 1967.
- MARK, D. M.; ARONSON, P. B. Scale-dependent fractal dimensions of topographic surfaces: An empirical investigation, with applications in geomorphology and computer mapping. **Journal of the International Association for Mathematical Geology**, v. 16, n. 7, p. 671–683, 1984.
- MARTINS, L. R.; COUTINHO, P. N. The Brazilian continental margin. **Earth Science Reviews**, v. 17, n. 1–2, p. 87–107, 1981.
- MAXWELL, B. A.; BUDDEMEIER, R. W. Coastal Typology Development with Heterogeneous Data Sets Coastal Typology Development with Heterogeneous Data Sets. **Regional Environmental Change**, v. 3, n. 1, p. 77–87, 2002.
- MEISLING, K. E., Cobbold, P. R., and Mount, V. S., Segmentation of an obliquely rifted margin, Campos and Santos basins, southeastern Brazil. **AAPG Bull.**, v. 85, no. 11, p. 1903-1924, 2001
- MAHIQUES, M.M. Considerações sobre os sedimentos de superfície de fundo da Baía da Ilha Grande, Estado do Rio de Janeiro. *Dissertação de Mestrado. Instituto Oceanográfico, Universidade São Paulo - USP.* São Paulo, SP. 1987.
- MENDES, J.C. **Elementos de estratigrafia.** TA Queiroz, 1984.
- MILANI, E. J. et al. Bacias Sedimentares Brasileiras - Cartas Estratigráficas. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 1, p. 183–205, 2007.
- MOHRIAK, W. U.; MACEDO, J. M.; CASTELLANI, R. T., “Salt Tectonics and Structural Styles in the Deep Water Province of the Cabo Frio Region, Rio de Janeiro, Brazil”. **Salt Tectonics: A Global Perspective.** American Association of Petroleum Geologists, Memoir, p. 273-304, 1995.
- MUEHE, D. A geomorfologia costeira e seu desdobramento para a geografia costeira e marinha. *Revista Brasileira de Geografia*, v. 63, n. 1, p. 29–59, 2018.
- MUEHE, D.; LIMA, C. F.; BARROS, F. M. L. DE; et al. Rio de Janeiro. **Erosão e progradação no litoral brasileiro.** p.32, 2006.

PORTER-SMITH, R.; MCKINLAY, J. Mesoscale coastal complexity and its relationship to structure and forcing from marine processes. **Marine Geology**, v. 323–325, n. 1, p. 1–13, 2012.

QGIS Development Team, 2019. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation. <<http://www.qgis.org>>

R Core Team, 2019. R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. <<https://www.R-project.org/>>

SILVEIRA, D. P.; MACHADO, M. A. P. Bacias Sedimentares Brasileiras: Bacia de Pelotas. **Séries Bacias Sedimentares**, v. 6, n. 67, 2004.

TOMAZELLI, L. J., & VILLWOCK, J. A. Mapeamento Geológico de Planícies Costeiras: o Exemplo da Costa do Rio Grande do Sul. **Gravel**, v. 3, p. 109–115. 2005.

TANNER, B. R.; PERFECT, E.; KELLEY, J. T. Fractal Analysis of Maine's Glaciated Shoreline Tests Established Coastal Classification Scheme. **Journal of Coastal Research**, v. 225, n. 5, p. 1300–1304, 2006.

TESSLER, M. G.; GOYA, S. C.; YOSHIKAWA, P. S.; HURTADO, S. N. São paulo. **Erosão e Progradação do Litoral Brasileiro**, 2006.

WOOD, S.N. **Generalized additive models: an introduction with R**. Chapman and Hall/CRC, 2017.

XIAOHUA, Z.; YUNLONG, C.; XIUCHUN, Y. On Fractal Dimensions of China's Coastlines. **Mathematical Geology**, v. 36, n. 4, 2004.

XU, J.; ZHANG, Z.; ZHAO, X.; et al. Spatial and temporal variations of coastlines in northern China (2000-2012). **Journal of Geographical Sciences**, v. 24, n. 1, p. 18–32, 2014

ZALÁN, P. V.; OLIVEIRA, J. A. B., 2005, "Origem e evolução estrutural do sistema de riftes cenozóicos do sudeste do Brasil, Boletim de Geociências da Petrobras, v. 13, n.2 (maio/nov), pp. 269-300.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Três diferentes técnicas quantitativas foram utilizadas para caracterizar a complexidade morfológica da linha de costa S-SE brasileira, duas utilizando métodos fractais e uma pelo método da medida angular (AMT). Os descritores utilizados por estas técnicas se mostram aplicáveis para a área de estudo deste trabalho, permitindo distinguir segmentos com diferentes padrões de complexidade morfológica. No entanto, resultados distintos foram obtidos para cada caso devido às premissas de cada método.

A caracterização através de técnicas fractais confirmou que a linha de costa segue um padrão morfológico fractal no domínio escalar analisado, onde a sua complexidade pode ser avaliada quanto ao valor da sua dimensão fractal. No entanto, devido ao tipo de dado de entrada utilizado e ao ajuste da curva fractal, concluiu-se que a caracterização retornada pelo método divisor de passos era mais fidedigna. De acordo os resultados deste método, a complexidade morfológica da linha de costa (indicada pelo descritor  $D$ ) se mantém constante entre a fronteira Brasil-Uruguai e o Cabo de Santa Marta. A partir deste limite a complexidade aumenta latitudinalmente, alcançando seu ápice no segmento de linha de costa compreendido entre a ilha de São Sebastião e Cabo Frio. Estes resultados vão ao encontro do que é descrito por classificações qualitativas tradicionais da região, as quais consideram a variabilidade dos agentes e processos costeiros, mostrando a aplicabilidade deste descritor morfológico para a zona costeira em questão. Apesar da avaliação final positiva desta abordagem, observou-se que as propriedades básicas da teoria fractal podem dificultar a aplicabilidade desta metodologia no ambiente costeiro. Por ser um parâmetro independente de escala, não foi possível obter valores individuais de complexidade morfológica para as resoluções avaliadas, mesmo com a incorporação do conceito de escala característica. Além disso, a compartimentação inicial da linha de costa com base em conhecimentos prévios foi indispensável, o que pode aumentar a subjetividade da análise. Devido a este fato, recomenda-se que estudos futuros sejam endereçados à compreensão do significado geomorfológico do valor da dimensão fractal, assim como ao processo inicial de definição das escalas de análise.

Já a caracterização da linha de costa pelo método AMT dispensou conhecimentos prévios do local, além de retornar valores individuais de complexidade morfológica para diferentes comprimentos escalares  $S$ , mostrando uma maior maleabilidade comparativamente aos métodos fractais. Através desta técnica foi possível classificar segmentos de linha de costa

tendo como base quatro grupos de complexidade, definidos pela variabilidade angular do conjunto de S analisados. Assim como observado pela classificação fractal, os resultados obtidos por esta classificação mostram a homogeneidade do trecho sul da linha de costa até o Cabo de Santa Marta, caracterizada por uma baixa complexidade morfológica. Paralelamente à caracterização morfológica, diferentes dados de entrada foram integrados em um ambiente SIG para a obtenção de quatro descritores quantitativos dos condicionantes costeiros locais. Técnicas geoespaciais e geomorfométricas permitiram associar e avaliar a variabilidade espacial destes descritores ambientais para os diferentes grupos de complexidade morfológica. De acordo com os resultados da ACP, a diversidade litológica e a concentração de falhas geológicas são os descritores que melhor se relacionam com a diferença dos grupos definidos pela AMT. Por considerarem apenas o ponto inicial e final dos transectos altimétricos e batimétricos, o grau de contribuição dos descritores de declividade podem ter sido subestimados. A investigação feita através da visualização individual destes perfis indica padrões distintos associados a cada grupo de complexidade morfológica, no entanto análises mais aprofundadas devem ser aplicadas a estes resultados iniciais. Além destas análises, sugere-se para estudos futuros utilizando esta metodologia a incorporação de variáveis adicionais relacionadas à dinâmica oceanográfica (fluxo direcional de onda, amplitude de maré) e a padrões sedimentares (tipo de substrato) ao conjunto de descritores de condicionantes costeiros locais.

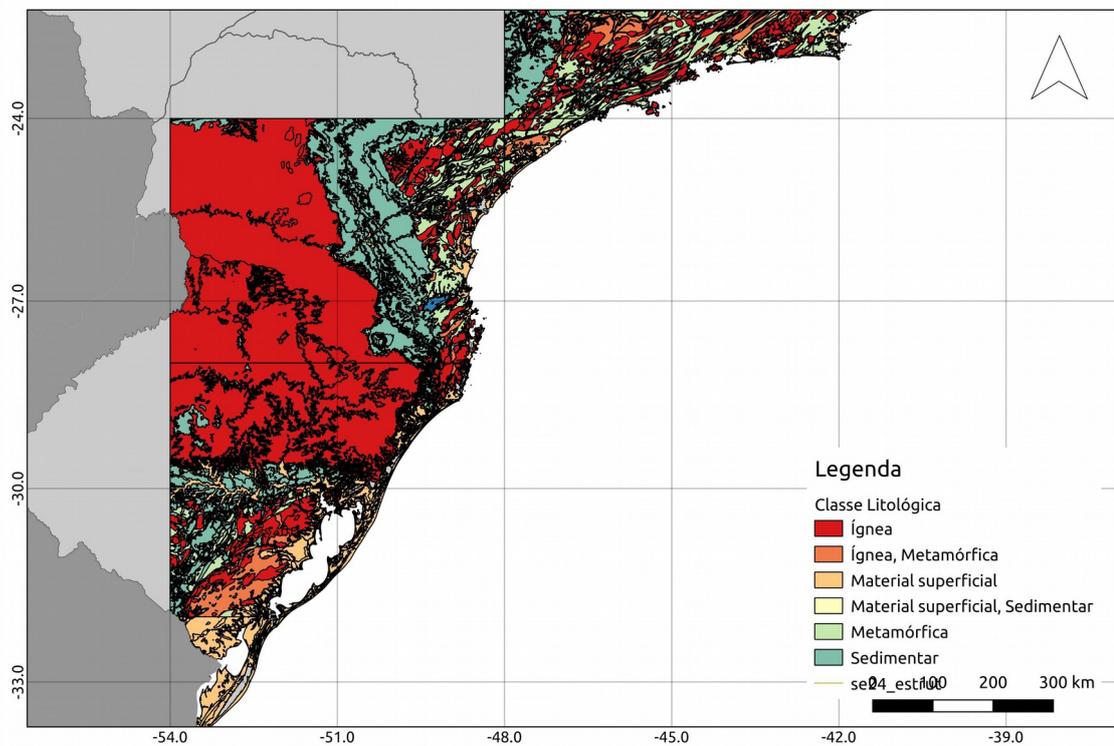
Considerando a fase inicial em que se encontram as pesquisas relacionadas a avaliação quantitativa da linha de costa S-SE brasileira, o presente trabalho possui um aspecto exploratório significativo em torno do potencial de diferentes técnicas quantitativas aplicadas a este ambiente. Apesar de independentes, o segundo capítulo se mostra complementar ao primeiro. Tendo uma abordagem mais descritiva, o primeiro capítulo permitiu uma avaliação em comparação com o observado por caracterizações qualitativas tradicionais desenvolvidas na área de estudo. Assim, a conclusão deste primeiro capítulo de que a região sul apresenta uma configuração mais homogênea e que a região compreendida entre São Sebastião e Cabo Frio se mostra mais complexa foi complementada pelo capítulo que o sucede. Além dos resultados obtidos pelo método AMT corroborarem com esta conclusão, as investigações em relação aos descritores costeiros que caracterizam cada segmento analisado, permite uma maior compreensão quanto a significância geomorfológica dos valores obtidos pelas análises morfológicas e os agentes envolvidos na evolução geomorfológica do ambiente estudado.

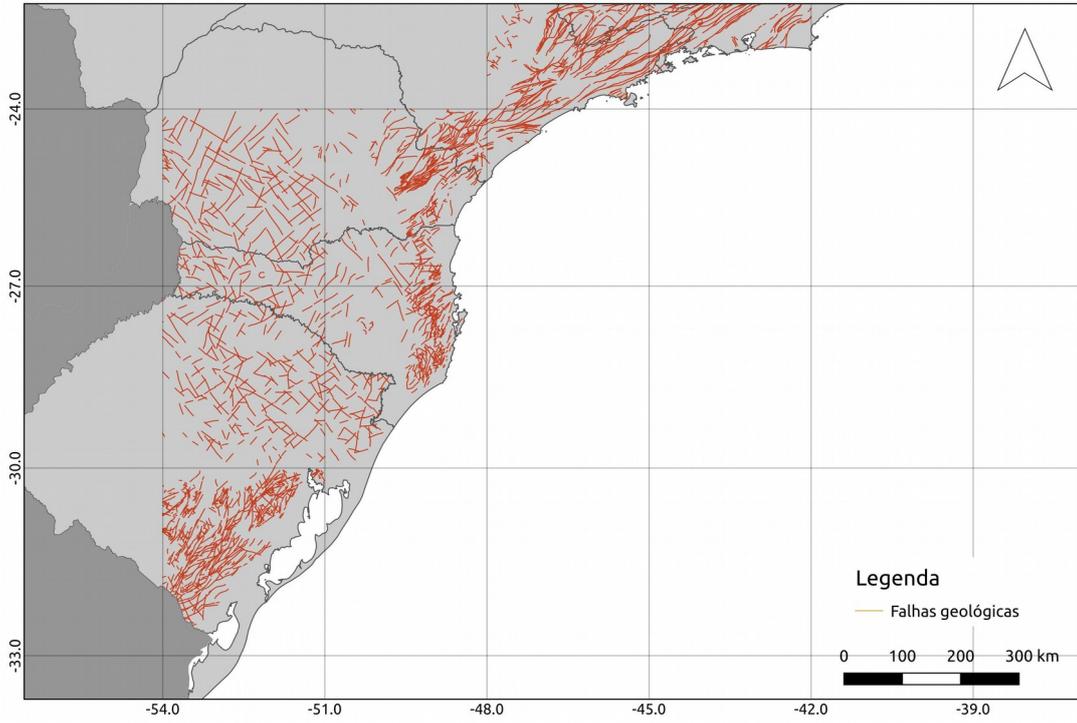
Os resultados e análises obtidos por este estudo se basearam em dados de bases públicas manipulados por softwares livres e abertos. Este fato demonstra o potencial de replicação desta metodologia, podendo esta ser aplicada na caracterização de locais com poucos dados e com baixos investimentos financeiros disponíveis. No entanto, por integrar um conjunto de dados de diferentes fontes, os quais apresentam resoluções espaciais distintas, limitações analíticas acabaram resultando desta falta de padrão espacial. A diferença entre resoluções dos dados de entrada geraram incompatibilidades topológicas ao longo do processo metodológico, dificultando o desenvolvimento de determinadas análises espaciais. Além disso, a inconstância das bases de dados (mudança de domínio, falta de manutenção, encerramento de projetos, etc...) aliada com a indisponibilidade, para o público em geral, de dados já levantados dificultaram a utilização de dados com mesmo nível de detalhe.

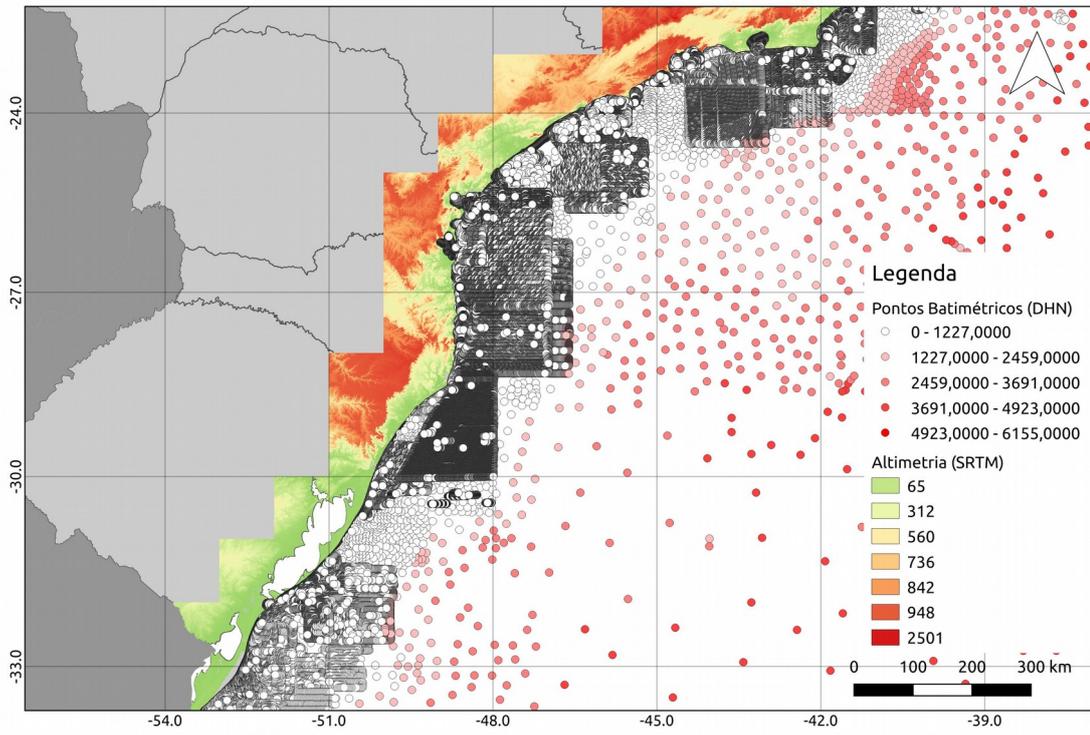
De maneira geral, os descritores morfológicos utilizados por este estudo foram sensíveis às variações morfológicas, confirmando a aplicabilidade de descritores quantitativos para a caracterização da complexidade morfológica da linha de costa S-SE brasileira. As análises relacionadas a associação deste valor morfológico com os condicionantes ambientais locais foram satisfatórias, colaborando na compreensão da relação entre a forma e os processos que caracterizam a porção sul e sudeste da costa brasileira. A continuidade de esforços desta natureza devem buscar o amadurecimento quanto às potencialidades de descritores morfológicos como indicadores de processos e agentes costeiros específicos.

## 5 APÊNDICE 01

Este apêndice apresenta a visualização dos dados brutos disponibilizados pela carta do milionésimo para classe litológica (primeiro mapa) e estrutura de falhas (segundo mapa), assim como as imagens de SRTM e os pontos batimétricos (terceiro mapa) utilizados na interpolação.







## 6 APÊNDICE 02

Este apêndice apresenta as nove classificações de linha de costa pelo método AMT de cada comprimento escalar (S) considerados na determinação das classes de complexidade.

