

# UTILIZAÇÃO DO BENTHIC TERRAIN MODELER (BTM) PARA CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA DA PLATAFORMA CONTINENTAL EXTERNA E BORDA DE PLATAFORMA DA BACIA DE SANTOS

Eduardo Thomaz de Aquino Ribeiro<sup>1</sup>

Leonardo Junius Chapeta Santos<sup>1</sup>

Alexandre Alcazar Plácido Teixeira<sup>2</sup>

Alberto Garcia de Figueiredo Junior<sup>3</sup>

## INTRODUÇÃO E REFERENCIAL TEÓRICO

As plataformas continentais desempenham um papel fundamental na dinâmica oceânico-continental, uma vez que representam a zona de transição de processos que ocorrem tanto no oceano como no continente. O reconhecimento das formas de fundo na plataforma continental, (especialmente em profundidades superiores a 100 m), é desafiador devido à necessidade de efetuar levantamentos hidrográficos extensos, com elevado custo operacional. Neste contexto, ferramentas de geoprocessamento que permitam a utilização de bases de dados históricos, bem como a sua reinterpretação, são fundamentais para o reconhecimento da geomorfologia da plataforma. Ferramentas como Benthic Terrain Modeler, (ou BTM) (LUNDBLAD et al., 2006) são reconhecidas como importantes para auxiliar na identificação de formas de relevo submarino. O BTM já foi utilizado para o reconhecimento da geomorfologia de plataformas continentais em todo o mundo, sendo aplicado em locais como a Indonésia (SUBARNO et al., 2016) e Noruega (DOLAN et al., 2009). No Brasil, o BTM já foi utilizado em alguns locais como Abrolhos (MENANDRO et al., 2020) e Pernambuco (GOES et al., 2019).

Diante disso, a Bacia de Santos, localizada no sudeste do Brasil, abrange uma área entre o Rio de Janeiro e Santa Catarina e é reconhecida como a maior bacia sedimentar offshore do país em termos de área.

1 Mestrando do Curso de Pós-Graduação em Dinâmicas dos Oceanos e da Terra da Universidade Federal Fluminense – UFF, [eduardo\\_aquino@id.uff.br](mailto:eduardo_aquino@id.uff.br), [santosleonardo@id.uff.br](mailto:santosleonardo@id.uff.br)

2 Graduando do Curso de Geografia da Universidade Federal Fluminense - UFF, [alexandrealcazar@id.uff.br](mailto:alexandrealcazar@id.uff.br)

3 Professor orientador: Pós-Doutor em Geologia Marinha - Departamento de Geologia e Geofísica da Universidade Federal Fluminense - UFF, [afigueiredo@id.uff.br](mailto:afigueiredo@id.uff.br)

Dessa forma, projetos como o Projeto Santos - Caracterização Ambiental da Bacia de Santos (PCR-BS), coordenado pela PETROBRAS/CENPES, são de significativa importância, pois realizaram um levantamento de dados inéditos que servem de base para estudos, tanto já publicados quanto os posteriores. Devido à importância do mapeamento de feições nas partes externas da plataforma, este trabalho tem como objetivo caracterizar a morfologia da plataforma externa da Bacia de Santos até a borda da plataforma (de 60m a 200m de profundidade) utilizando a ferramenta Benthic Terrain Modeler (BTM).

As definições de plataforma externa e borda de plataforma foram baseadas no estudo de Lavagnino et al. (2020), que considerou a plataforma externa como o intervalo de profundidade de 60 a 100 metros e a borda de plataforma como 100 a 300 metros. A área de estudo (Fig. 1) compreende a plataforma externa e a borda de plataforma da Bacia de Santos (60 a 200m), considerando que a quebra de plataforma se estende aproximadamente até a isóbata de 200 metros.

## **METODOLOGIA (OU MATERIAIS E MÉTODOS)**

### **AQUISIÇÃO DE DADOS**

O Raster de batimetria da plataforma continental da Bacia de Santos utilizada neste estudo foi a mesma empregada no trabalho de Santos Filho et al. (2022). A superfície batimétrica foi gerada utilizando 694.431 pontos de longitude, latitude e profundidade, interpolados pelo método de *Inverse Distance Weight* (IDW) no software ArcGIS® (SANTOS FILHO et al., 2022). Os pontos de profundidade são provenientes do Banco Nacional de Dados Oceanográficos (BNDO) e do programa LEPLAC (Programa de Pesquisa da Plataforma Continental Brasileira), ambos da Marinha do Brasil. O produto da interpolação foi um modelo digital de terreno (MDT) da plataforma continental da Bacia de Santos, com células de 50m, que serviu como base para os dados utilizados na execução do BTM. Os dados de sísmica rasa (SBP - Sub Bottom Profiler) utilizados no estudo são provenientes do Projeto Santos - Caracterização Ambiental da Bacia de Santos (PCR-BS), coordenado pela PETROBRAS/CENPES. Os dados de granulometria e teor de carbonato utilizados são derivados de 9.761 pontos de dados históricos, sendo 114 provenientes de amostras coletadas pelo projeto PCR-BS durante 2019 e 2020. O teor de carbonato foi calculado utilizando a diferença de peso das amostras antes e depois da dissolução em ácido clorídrico diluído a 10%.

### **BTM E PARÂMETROS BATIMÉTRICOS**

A ferramenta *Benthic Terrain Modeler* (BTM) foi utilizada para a classificação de feições morfológicas. O BTM é uma extensão do ArcGIS® capaz de analisar modelos digitais de terreno (MDTs) com base em parâmetros batimétricos como o Índice de Posição Batimétrica (IPB), inclinação e profundidade (MENANDRO et al., 2020). A ferramenta gera resultados que classificam o MDT de acordo com as feições

identificadas. O IPB é um cálculo que descreve a elevação de cada ponto do fundo do mar (presente no MDT) em comparação com os pixels vizinhos (SUBARNO et al., 2016). Para o índice de posição batimétrica, é necessário definir raios interno e externo; pontos localizados entre esses raios são considerados na comparação (SUBARNO et al., 2016). Assim, os pixels são representados com um valor positivo ou negativo, indicando sua posição e elevação. Valores positivos indicam que o ponto está mais alto do que seus vizinhos, potencialmente indicando feições como cristas, enquanto valores negativos indicam que está mais baixo, potencialmente indicando feições como depressões (GOES et al., 2019). No presente estudo, os raios interno e externo utilizados foram 100 e 1000 para a escala mais ampla e 20 e 200 para a escala mais fina, respectivamente. Os parâmetros batimétricos utilizados na ferramenta são definidos no dicionário de classificação (Tabela 1).

No entanto, não há padronização na definição dos valores do índice de posição batimétrica na literatura. Portanto, para que o BTM produza resultados que destacam com precisão as morfologias do fundo da área de estudo, é necessário um processo de tentativa e erro (SUBARNO et al., 2016). A tabela de parâmetros batimétricos utilizada no estudo (Tabela 1) foi desenvolvida através de múltiplas execuções até que os valores de IPB (30 e -30) fossem encontrados por destacar as morfologias previamente identificadas. Devido ao tamanho da área de estudo, seis feições morfológicas foram consideradas: Elevações, Depressões, Declives Suaves, Quebras da Plataforma, Planícies e Cristas e Bancos. Depressões foram consideradas apenas acima de 150 m de profundidade para evitar confusão com a quebra da plataforma. A inclinação foi mais decisiva como um parâmetro de identificação para planícies, que foram consideradas com uma inclinação máxima de até  $0,02^\circ$ , considerando o ângulo de declividade baixo da plataforma.

Tabela 1: Parâmetros Batimétricos utilizados para classificação de estruturas bentônicas da área de estudo.

ID	Classes	Broad-scale BPI		Fine-scale BPI		Slope		Depth	
		Lower	Upper	Lower	Upper	Lower	Upper	Lower	Upper
1	Elevações	30		30					
2	Depressões		-30		30				-150
3	Declives Suaves	30			30				
4	Quebra de Plataforma		-30						
5	Planícies	-30	30		30		0.02		
6	Cristas e bancos	-30		-30					

Todos os dados foram processados utilizando o ArcGIS Pro 3.1.0 (Esri, 2023). Para a rotação do BTM neste estudo, uma seção do MDT da plataforma continental da Bacia de Santos foi recortada para a área de estudo, gerando um raster que cobre a parte externa e a borda da plataforma (com a quebra da plataforma como limite).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

As seis feições consideradas no dicionário de classificação (Tabela 1) foram identificadas ao longo de toda a área de estudo (Fig. 1). De acordo com as estatísticas realizadas, a

Os autores agradecem à PETROBRAS/CENPES e a FUSP pelos recursos financeiros disponibilizados durante o projeto PCR-BS.

feição com a maior área apresentada no modelo foi Declives Suaves (30,75%), seguida por Planícies (30,07%), Quebra da Plataforma (15,99%), Depressões (12,39%), Elevações (8,49%) e Cristas e Bancos (2,32%). Quando somados, os valores de área das planícies e dos declives suaves representam mais de 60% de toda a área de estudo.

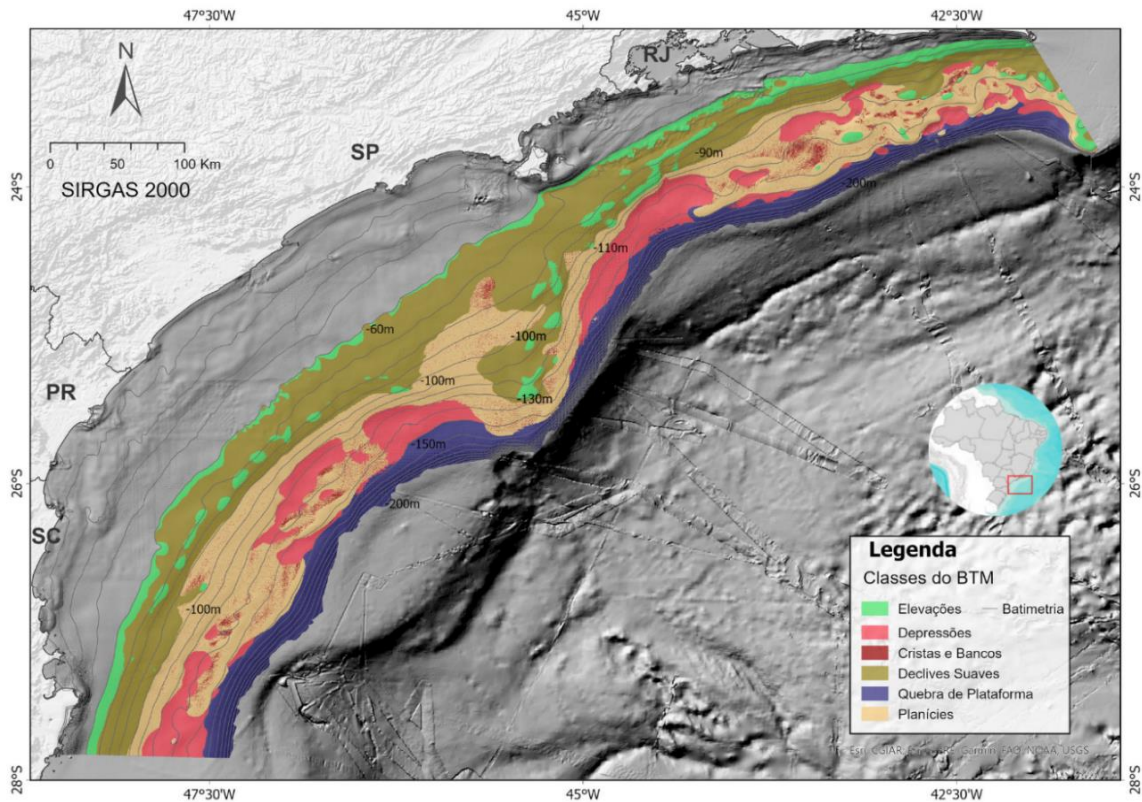


Figura 1: Mapa com as feições morfológicas identificadas pelo BTM na área de estudo.

A predominância dessas feições indica que uma grande parte da área de estudo possui valores do índice de posição batimétrica (BPI) próximos de zero, indicando áreas planas ou áreas com uma inclinação constante (LUNDBLAD et al., 2006).

Tabela 2: Descrição estatísticas das áreas e profundidades identificadas pelo BTM

Estruturas Bentônicas		Profundidade				
ID	Área (Km <sup>2</sup> )	Área (%)	Max(m)	Min(m)	Média(m)	Amplitude
Elevações	7.182,78	8,49%	-149,41	-59,96	-76,31	89,44
Declives Suaves	26.009,00	30,75%	-146,89	-60,00	-81,11	86,89
Planícies	25.434,18	30,07%	-159,78	-72,17	-117,62	87,60
Quebra de Plataforma	13.527,27	15,99%	-205,47	-123,02	-168,26	82,45
Depressões	10.475,33	12,39%	-150,00	-108,23	-131,72	41,76
Cristas e Bancos	1.961,49	2,32%	-156,45	-72,21	-121,56	84,23

A feição que apresentou a maior variação na ocorrência em profundidade (Tab. 2) foram as elevações (89,44).

#### COMPARAÇÃO DO MODELO GERADO PELO BTM COM DADOS DE VERDADE DE CAMPO NA BACIA DE SANTOS

O modelo identificou cristas e bancos na parte central do transecto e uma depressão na extremidade sudeste (SE) (Fig. 2). Comparando essas características evidenciadas com os registros SBP, observou-se coerência significativa entre o modelo e os dados de campo, com a sísmica rasa mostrando relevo acidentado, pequenas elevações, cristas e uma depressão no SE. O único ponto de teor de carbonato coincidindo com esta linha de transecto foi na extremidade noroeste (NW), classificado como Litobioclástico (30-49% de carbonato) com base na classificação proposta por Larssonneur (1977) e Dias (1996). Os pontos localizados na mancha mais densa de cristas e bancos, à direita do transecto, foram identificados como Bioclásticos.

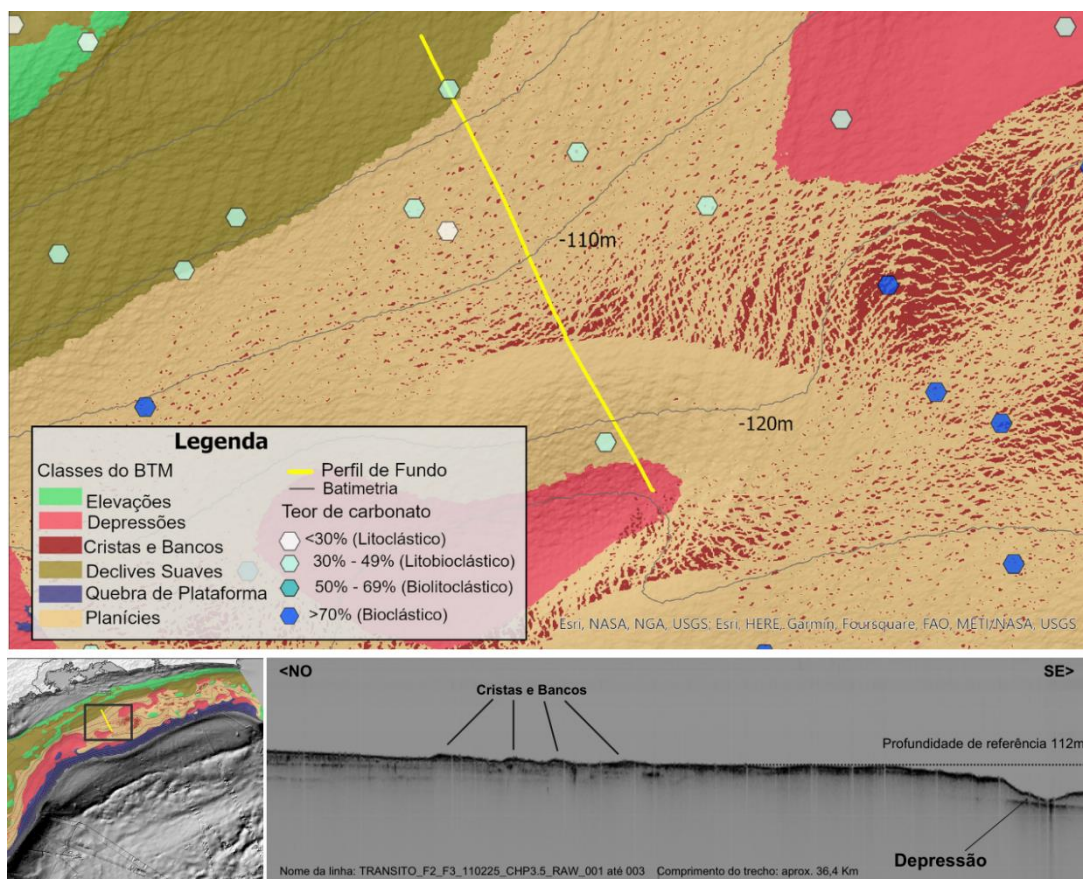


Figura 2: Comparação do modelo gerado com transecto de sísmica rasa no trecho indicado.

A maioria das feições classificadas como cristas e bancos no modelo são possivelmente influenciadas por um maior teor de carbonato. A presença deste carbonato pode ser identificada com os registros do SBP, não só pela sua morfologia, mas também pela elevada refletividade do sinal sísmico. Os tipos variados de morfologia, e a coloração mais escura, podem ser observados nas imagens de perfil de fundo nas figuras 2 e 3 onde são indicados como cristas e bancos e elevações.

Como sugerido por Dias et al. (2019), Reis et al. (2013) e Santos Filho et al. (2022), o segmento entre Cabo Frio e a ilha de São Sebastião apresenta a maior concentração de fácies carbonáticas na plataforma. A presença de elevações próximas à quebra no limite norte (Fig. 3) pode estar relacionada às bioconstruções, onde algumas já foram caracterizadas apresentando aproximadamente 10 metros de altura (REIS et al., 2013; CAVALCANTI et al., 2012; FIGUEIREDO JR e TESSLER, 2004). A Figura 3 mostra alguns pontos com alto teor de carbonato próximos a elevações identificadas na área próxima a Cabo Frio.

Comparando e analisando a imagem do perfil, é possível identificar que as elevações são influenciadas por fácies carbonáticas, devido à forte reflexão do sinal sísmico e ao relevo

mais acidentado. Esses fatores sugerem que essas fácies podem constituir uma bioconstrução.

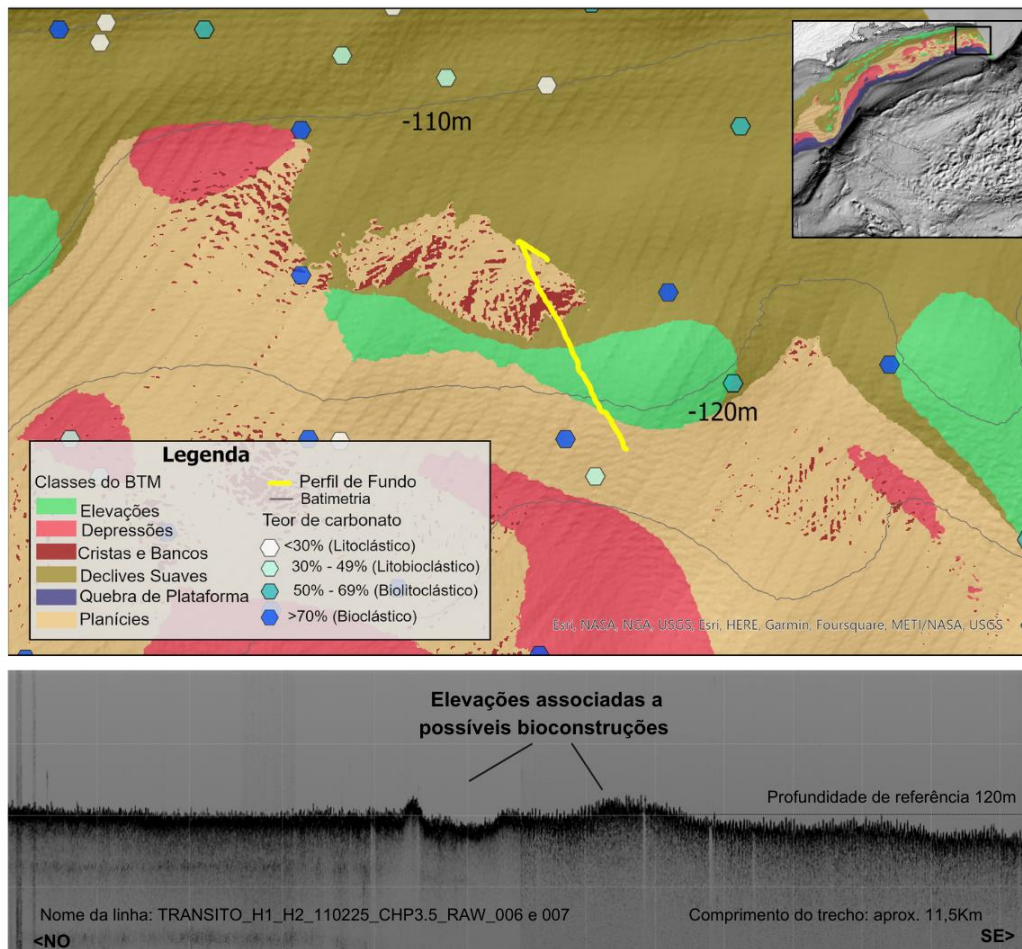


Figura 3 : Comparação de elevação identificada no modelo com bioconstruções registradas através de sísmica.

De acordo com a literatura, o trecho mais próximo à borda norte da plataforma apresenta maiores teores de carbonatos e relevo mais acidentado do que o setor mais ao sul (FIGUEIREDO JR. et al., 2023).

### CONCLUSÃO:

Através dos resultados apresentados, o modelo gerado pelo BTM mostrou coerência quando comparado com os dados de verdade de campo, principalmente com as imagens sísmica rasa. A integração do modelo com dados como os registros de SBP é de significativa importância, uma vez que a validação utilizando esses dados é essencial para uma maior confiabilidade. Neste contexto, a ferramenta BTM tem um grande potencial para auxiliar na classificação morfológica submarina. Entretanto, como muitas ferramentas de modelagem, o BTM possui limitações, sendo uma das principais a

Os autores agradecem à PETROBRAS/CENPES e a FUSP pelos recursos financeiros disponibilizados durante o projeto PCR-BS.

inexistência de valores padronizados para o dicionário de classificação, implicando em inúmeras tentativas até que o modelo se torne coerente. Esse método de tentativa e erro para modelos utilizando o BTM já é reconhecido na literatura (Subarno et al., 2016). No entanto, com o ajuste dos parâmetros batimétricos, os resultados gerados pelo BTM podem ser muito satisfatórios. A visualização das feições pode auxiliar numa melhor compreensão do fundo, contribuindo para estudos de caracterização morfológica submarina e para diversos estudos multidisciplinares em ciências do mar, como o mapeamento de habitats bentônicos, relação com o pescado e o Planejamento Espacial Marinho (PEM). O mapeamento apresentado pode ser refinado a partir de dados gerados por levantamentos com batimetria multifeixe, sonar de varredura lateral e imageamento de fundo por ROV ou Câmera Drop.

**Palavras-chave:** Benthic Terrain Modeler; Bacia de Santos, Geomorfologia submarina.

## REFERÊNCIAS

CAVALCANTI, G. H.; CAROLINA, R.; ARANTES, M.; LOIOLA, L. L.

**Caracterização ambiental das formações carbonáticas na rota do gasoduto Cernambi-Cabiúnas** (Anexo II.5.2-1). Rio de Janeiro: IBAMA, 2012.

DIAS, G.T.M. **Classificação de sedimentos marinhos proposta de representação em cartas sedimentológicas**. Anais Do XXXIX Congresso Brasileiro de Geologia vol. 3 1996.

DIAS, M.P.; BASTOS, A.C.; VITAL, H. **Plataforma Continental Brasileira**.

Programa de Geologia e Geofísica Marinha 185, 2019.

DOLAN, M.F.J.; BUHL-MORTENSEN, P.; THORSNES, T.; BUHL-MORTENSEN, L.; BELLEC, V.K.; BØE, R. **Developing seabed nature-type maps offshore Norway: initial results from the MAREANO programme**. Norwegian Journal of Geology, v. 89, n. 1-2, p. 17-28, 2009.

DOLAN, M.F.J.; BUHL-MORTENSEN, P.; THORSNES, T.; BUHL-MORTENSEN, L.; BELLEC, V.K.; BØE, R. **Developing seabed nature-type maps offshore Norway: initial results from the MAREANO programme**. Norwegian Journal of Geology, v. 89, n. 1-2, p. 17-28, 2009

FIGUEIREDO JUNIOR, A.G.; TESSLER, M. **Topografia e composição do substrato marinho da região Sudeste-Sul do Brasil** - Série documentos Revizee: Score Sul. São Paulo: Instituto Oceanográfico, 2004.

FIGUEIREDO JÚNIOR, A.G.; CARNEIRO, J. C.; SANTOS FILHO, J. R. **Santos Basin continental shelf morphology, sedimentology, and slope sediment distribution**. Ocean and Coastal Research, v. 71, p. e23007, 2023.



GOES, E. R.; BROWN, C. J.; ARAÚJO, T. C. **Geomorphological classification of the benthic structures on a tropical continental shelf.** *Frontiers in Marine Science*, v. 6, p. 47, 2019.

LARSONNEUR, C. **La cartographie des dépôts meubles sur le plateau continental français: méthode mise au point et utilisée en Manche.** *Journal de Recherche Oceanographique* 2, 34–39, 1977.

LAVAGNINO, A.C.; BASTOS, A.C.; AMADO FILHO, G.M.; MORAES, F.C.; ARAUJO, L.S.; MOURA, R.L. **Geomorphometric seabed classification and potential megahabitat distribution in the Amazon continental margin.** *Frontiers in Marine Science*, v. 7, p. 190, 2020.

LUNDBLAD, E. R.; WRIGHT, D.J.; MILLER, J.; LARKIN, E.M.; RINEHART, R.; NAAR, D.F.; DONAHUE, B.T.; ANDERSON, S.M.; BATTISTA, T. **A benthic terrain classification scheme for American Samoa.** *Marine Geodesy*, v. 29, n. 2, p. 89-111, 2006.

MENANDRO, P. S.; BASTOS, A.C.; BONI, G.; FERREIRA, L.C.; VIEIRA, F.V.; LAVAGNINO, A.C.; MOURA, R.L.; DIESING, M. **Reef mapping using different seabed automatic classification tools.** *Geosciences*, v. 10, n. 2, p. 72, 2020.

REIS, A.T.; MAIA, R.M.C.; SILVA, C.G.; RABINEAU, M.; GUERRA, J.V.; GORINI, C.; AYRES, A.; ARANTES-OLIVEIRA, R.; BENABDELLOUAHED, M.; SIMÕES, I.; TARDIN, R. **Origin of step-like and lobate seafloor features along the continental shelf off Rio de Janeiro State, Santos basin-Brazil.** *Geomorphology*, v. 203, p. 25-45, 2013.

SANTOS FILHO, J.R.; FIGUEIREDO JÚNIOR, A.G.; CARNEIRO, J. C.; DIAS, G.T.M.; RAMALHO, A.S. **Mesophotic bioclastics and bioconstructions at the continental shelf of Santos Basin, Brazil.** *Sedimentary Geology*, v. 442, p. 106294, 2022.

SUBARNO, T.; SIREGAR, V.P.; AGUS, S.B.; SUNUDDIN, A. **Modelling Complex Terrain of Reef Geomorphological Structures in Harapan-kelapa Island, Kepulauan Seribu.** *Procedia Environmental Sciences*, v. 33, p. 478–486, 2016.