

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/07.12.17.40-TDI

PROVÍNCIAS BIOGEOQUÍMICAS MARINHAS NO OCEANO ATLÂNTICO SUL POR SENSORIAMENTO REMOTO

Jean Farhat de Araújo da Silva

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelo Dr. Milton Kampel, aprovada em 31 de julho de 2017.

URL do documento original: <http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3P9B3LH>

> INPE São José dos Campos 2017

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE Gabinete do Diretor (GB) Serviço de Informação e Documentação (SID) Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970 São José dos Campos - SP - Brasil Tel.:(012) 3208-6923/6921 E-mail: pubtc@inpe.br

COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):

Presidente:

Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação (CPG)

Membros:

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dra. Carina de Barros Melo - Coordenação de Laboratórios Associados (CTE)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação de Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Dr. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SID) BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID) EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/07.12.17.40-TDI

PROVÍNCIAS BIOGEOQUÍMICAS MARINHAS NO OCEANO ATLÂNTICO SUL POR SENSORIAMENTO REMOTO

Jean Farhat de Araújo da Silva

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelo Dr. Milton Kampel, aprovada em 31 de julho de 2017.

URL do documento original: <http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3P9B3LH>

> INPE São José dos Campos 2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Silva, Jean Farhat de Araújo da.

Si38p Províncias biogeoquímicas marinhas no Oceano Atlântico Sul por sensoriamento remoto / Jean Farhat de Araújo da Silva. – São José dos Campos : INPE, 2017.

xxvi + 108 p.; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/07.12.17.40-TDI)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2017. Orientador : Dr. Milton Kampel.

Províncias biogeoquímicas marinhas.
 Sensoriamento remoto.
 feições oceanográficas.
 Oceano Atlântico Sul.
 Fuzzy.
 I.Título.

CDU 528.8:551.464.3



Esta obra foi licenciada sob uma Licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License.

Aluno (a): Jean Farhat de Araujo da Silva

Título: "PROVÍNCIAS BIOGEOQUÍMICAS MARINHAS NO OCEANO ATLÂNTICO SUL POR SENSORIAMENTO REMOTO"

> Aprovado (a) pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de *Mestre* em

Sensorlamento Remoto

Ora. Silvana Amaral Kampel

Aliona Chinarandanipe

Presidente / INPE / SJCampos - SP

Dr. Milton Kampel

Or.

Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

- **Dr.** Antônio Miguel Vieira Monteiro
 - . Luis Américo Conti

Convidado(a) / USP / São Paulo SF

Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Este trabalho foi aprovado por:

- ϵ) maioria simples
- 📈 unanimidade

Cooling breeze from the summer Day Hearing echoes from your heart Learning how to recompose the words Let time just fly

Rebirth, Angra.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de mestrado e ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pelo apoio acadêmico, disponibilização de seus recursos e instalações no desenvolvimento deste estudo.

Ao meu orientador Dr. Milton Kampel pelo apoio, dedicação, conhecimentos transmitidos, amizade e rigor prestados ao longo de toda a trajetória do mestrado. Agradeço também pela confiança a mim depositada e a oportunidade de pertencer a sua equipe de trabalho. Aos amigos do laboratório de Monitoramento Oceânico por Satélite (MOceanS) pela parceria ao longo desses anos.

A todos os professores e demais servidores do INPE, pela dedicação e apoio prestados durante o curso de mestrado.

Aos velhos amigos (Pedro Simões, Ian Luca, Ivan Augusto, Gustavo Porto, Gabriel Valério, Ana Claudia Molina, Leandro Oliveira, Bruno Lima e Matheus Guimarães) e amigos que encontrei no INPE (Nelson Gouveia, Anderson Reis, Gabriela Banon, José Guilherme Fronza, André Bertoncini, Kaio Gasparini e Eufrasio Nhongo) que sempre me ajudaram em momentos de dificuldades encontrados ao longo do mestrado.

A meu pai Carlos Leandro da Silva Junior, minha mãe Fátima Farhat de Araújo, meu irmão Allan Farhat de Araújo da Silva, minha madrasta Maria Beatriz da Costa Mattos e todos os outros membros de minha família que sempre me apoiaram e deram suporte quando necessário.

A minha equipe de natação da UNESP de Presidente Prudente pelo apoio, disciplina, união e principalmente por ter me ensinado que não existem desafios que não possam ser superados.

RESUMO

Compreender a estrutura espacial e a função do ecossistema pelágico está no cerne da oceanografia atual. Abordagens categóricas já foram aplicadas à partição do domínio oceânico em províncias biogeoquímicas marinhas (PBGQ). A classificação em PBGQ fornece uma estrutura útil para a compreensão dos mecanismos de interação e controle de processos físicos e biogeoquímicos que refletem a heterogeneidade do ambiente oceânico. O presente trabalho teve como objetivo particionar o oceano Atlântico Sul em províncias biogeoguímicas marinhas, com uso do classificador não supervisionado Fuzzy C-Means (FCM), utilizando dados médios anuais e sazonais da concentração de clorofila-a na superfície do mar (CSM), temperatura da superfície do mar (TSM) e radiação fotossinteticamente disponível estimados por satélite. Dados da profundidade da camada de mistura (PCM) e batimetria também foram utilizados. A partir do critério Silhouette foram definidas 8 classes para aplicação do classificador FCM, que possibilitou identificar as PBGQ Sistema Equatorial/Tropical, denominadas como: Giro Subtropical. Convergência Subtropical Norte e Sul, Subantártica, Polar e Circumpolar Antártica. Foram calculadas as áreas de cada PBGQ e os respectivos graus de pertinência, assim como, os valores médios, máximos e mínimos de cada variável ambiental considerada. Estas informações foram analisadas de modo a se descrever as principais feições oceanográficas presentes em cada PBGQ.Considerando a importância das mudanças climáticas, foi realizada uma simulação de cenário futuro (ano 2099) das variáveis CSM, TSM e PCM estimadas pelo Projeto Inter-comparativo na fase 5 de Modelos Acoplados (CMIP5), Com a aplicação do critério Silhouette foram definidas 5 classes para o algoritmo FCM. Da mesma forma, foram identificadas 5 PBGQ, calculando-se os respectivos graus de pertinência, áreas e valores médios, máximos e mínimos das variáveis ambientais. A redução do numero de PBGQ e da CSM, assim como, ou aumento de TSM no cenário futuro são indicações que as mudanças climáticas podem impactar significativamente essas províncias no Atlântico Sul.

Palavras-Chave: Províncias Biogeoquímicas Marinhas. Sensoriamento Remoto. Feições Oceanográficas. Oceano Atlântico Sul. Fuzzy.

MARINE BIOGEOCHEMICAL PROVINCES IN THE SOUTH ATLANTIC OCEAN BY REMOTE SENSING

ABSTRACT

The understanding of spatial structure and function of the pelagic ecosystem is on focus of current oceanography. Categorical approaches have already been applied to the partition of the oceanic region in marine biogeochemical provinces (BGQP). The classification of BGQP provides an useful framework in order to comprehend the interaction mechanisms and control of physical, chemical and biological processes that reflect the heterogeneity of ocean environment. The present work aims to divide South Atlantic Ocean in marine biogeochemical provinces, using an unsupervised classifier Fuzzy C-Means (FCM) using mean data in yearly and seasonal basis, such as Chlorophylla Concentration on sea surface (CCS), Sea Surface Temperature (SST) and photosynthetically available radiation data estimated by satellite. Mixed layers depths (MLD) and bathymetry data were also used. From the application of the Silhouette criteria, 8 input classes were defined in the FCM classifier which, in turn, produced BGQP named as: Equatorial/Tropical System; Subtropical Gyre; Subtropical Convergence North; Subtropical Convergence South; Sub-Antarctic; Polar and Circumpolar Antarctic. Each BGQP were calculated and its respective membership values, as well as, mean, maximum and minimum values of each considered parameter. This information was analyzed in order to describe the main oceanographic features in each BGQP. Considering the importance of climate change issues, a simulation of future scenarios (year 2099) of the variables CCS, SST and MLD estimated by Inter-Comparison Project in Phase 5 of Coupled Models (CMIP5). By the application of the Silhoutte criteria were defined 5 classes for FCM algorithm. Similarly, were indentified 5 BGQP and were calculated its respective membership values, as well as, mean, maximum and minimum values of each these parameters. The reduction in the number of BGQPs and the decline of the concentration of chlorophyll a (CSM), as well as, the increase in sea surface temperature (SST) in the future scenario are indications that the climatic changes can significantly impact these provinces in the South Atlantic Ocean.

Keywords: Marine Biogeochemical Provinces. Remote Sensing. Oceanographic Features. South Atlantic Ocean. Fuzzy.

LISTA DE FIGURAS

<u>Pág</u>.

Figura 1.1 -	 Clássica delimitação de províncias biogeoquímicas elaborada por
	Lonhurst (2007) a partir de dados de concentração de clorofila-a na
	superfície do mar obtidos por sensoriamento remoto5
Figura 2.1 ·	· Ilustração de como a PCM pode ser estimada a partir de perfis
	verticais de temperatura da água15
Figura 3.1 -	 Caracterização superficial do oceano Atlântico Sul. São ilustradas
	as principais feições oceanográficas e circulação oceânica
	superficial, como o Giro Subtropical e correntes marinhas 19
Figura 3.2 -	 Fluxograma de trabalho apresentando os principais passos
	seguidos para a partição do Atlântico Sul em províncias
	biogeoquímicas. Inclui a seleção dos dados utilizados, testes de
	correlação, reamostragem de variáveis, métodos para delimitar o
	número de classes e classificação não supervisionada (ver texto
	para detalhes)
Figura 3.3 ·	 Fluxograma da análise de cenário futuro, incluindo os dados do
	modelo climático CMIP5 utilizados, processo de reamostragem,
	aplicação do Silhouette e aplicação do FCM (ver texto para
	detalhes)
Figura 4.1 -	 Valores médios (A) e desvios padrão (B) da temperatura da
	superfície do mar para o período de 2006-2015. Os valores médios
	variam de -0,5 °C (azul) a 31 °C (marrom). Os valores de desvio
	padrão variam de 0 °C (azul) a 6,5 °C (marrom)
Figura 4.2 -	 Valores médios (A) e desvios padrão (B) da concentração de
	clorofila- <i>a</i> na superfície do mar para o período de 2006-2015. Os
	valores médios variam de 0 (azul) a 15,5 (marrom) mg.m ⁻³ . Os
	valores do desvio padrão variam de 0 (azul) a 6,2 (marrom) mg.m ⁻³ .

Figura 4.3 - Valores médios (A) e desvios padrão (B) da radiação fotossinteticamente disponível para o período de 2006-2015. Os valores médios variam de 12 (azul) a 51 (marrom) Einsten.m⁻².d⁻¹.
 Os valores de desvio padrão variam de 0,15 (azul) a 4,9 (marrom) Einsten.m⁻².d⁻¹.

Figura 4.11 – Ressurgências costeiras em Vitória, ES, Cabo de São Tomé e
Cabo Frio, RJ. Os valores de TSM variam de 17°C (azul) a 29°C
(vermelho). Imagem elaborada pelo Projeto SATPEIXE

- Figura 4.17 Representação das PBGQ de inverno geradas pelo algoritmo
 FCM a partir das variáveis de entrada: temperatura da superfície do mar, concentração de clorofila-*a*, radiação fotossinteticamente disponível, profundidade da cada de mistura e batimetria. Cada cor representa uma PBGQ.
 Figura 4.18 Graus de pertinência (0 a 1) pixel-a-pixel referentes às 8 PBGQs
 - obtidas com a aplicação do algoritmo FCM no período de inverno. Os números de 1 a 8 representam as PBGQ......71

- Figura 4.21 Anomalias futuras de concentração de clorofila-*a* na superfície do mar estimadas pelo CMIP5 para o período de 2050-2099. Os valores variam do azul (-1,434 mg m⁻³) ao verde (0,280 mg m⁻³).. 84
- Figura 4.23 Anomalias futuras de profundidade da camada de mistura estimadas pelo CMIP5 para o período de 2050-2099. Os valores variam do marrom (-798,69 metros) ao azul (72,53 metros). 85
- Figura 4.25 Representação das PBGQ do cenário futuro geradas pelo algoritmo FCM a partir das variáveis de entrada: temperatura da superfície do mar, concentração de clorofila-*a*, profundidade da cada de mistura e batimetria. Cada cor representa uma PBGQ. .. 87

Figura 4.27- Demonstração das áreas (km ²) das PBGQ do cenário futuro. Os	
valores das áreas foram divididos pelo valor de 1.000.000 para	
melhor representação.	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Variáveis utilizadas para a partição do oceano Atlântico Sul em
Províncias Biogeoquímicas. CSM=concentração de clorofila-a;
TSM=temperatura da superfície do mar; PAR=radiação
fotossintética disponível; K490= coeficiente de atenuação da luz
difusa no comprimento de onda 490nm; PCM=profundidade da
camada de mistura; BAT=batimetria21
Tabela 3.2 – Características do produto ETOPO1 descrevendo a versão do
produto, área de cobertura, sistema de coordenadas, Datum
horizontal, Datum vertical e suas respectivas unidades, resolução
espacial e formato da grade24
Tabela 4.1 - Valores médios de correlação entre as variáveis selecionadas,
destacando em negrito o valor médio de correlação entre as
variáveis CSM x K490 41
Tabela 4.2 – Valores médios, desvios padrão, máximos e mínimos das
variáveis ambientais em cada PBGQ anuais delimitadas pelo
método FCM. Os valores de TSM são dados em °C; CSM em
mg.m ⁻³ ; PAR em Einsten.m ⁻² .d ⁻¹ ; PCM e BAT em metros
Tabela 4.3 – Áreas das PBGQ delimitadas a partir das abordagens anual e
sazonal45
Tabela 4.4 - Valores médios das variáveis obtidas na análise de verão,
seguidos de seus respectivos desvios padrão e valores mínimos-
máximos. Os valores de TSM são dados em °C; CSM em mg m ⁻³ ;
PAR em Einsten m ⁻² d ⁻¹ ; PCM e BAT em metros
Tabela 4.5 - Valores médios das variáveis utilizadas na delimitação das PBGQ
de outono, seguidos de seus respectivos desvios padrão e valores
mínimos-máximos. Os valores de TSM são dados em °C; CSM em
mg m ⁻³ ; PAR em Einsten m ⁻² d ⁻¹ ; PCM e BAT em metros

- Tabela 4.7 Valores médios das variáveis utilizadas na delimitação das PBGQ de primavera, seguidos de seus respectivos desvios padrão e valores mínimos-máximos. Os valores de TSM são dados em °C;
 CSM em mg m⁻³; PAR em Einsten m⁻² d⁻¹; PCM e BAT em metros.

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS

- PBGQ Províncias Biogeoquímicas Marinhas
- CZCS Coastal Zone Color Scanner
 - CSM Concentração de clorofila-*a* na superfície do mar (mg m-³)
 - TSM Temperatura da superfície do mar (°C)
 - PCM Profundidade da camada de mistura (metros)
 - BAT Batimetria (metros)
 - K_d Coeficiente de atenuação da luz difusa
- K490 Coeficiente de atenuação da luz difusa no comprimento de onda 490nm (m⁻¹)
- ARCT Atlantic Artic Province
- BPLR Boreal Polar Province
- IOCCG International Ocean-Colour Coordinating Group
 - IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change
- MODIS Moderate resolution Imaging Spectroradiometer
 - Nm Nanômetros
 - λ Comprimento de onda
 - *R_{rs}* Reflectância de Sensoriamento Remoto
 - CI Color Index
 - PAR Radiação Fotossinteticamente Disponível (Einsten m⁻² d⁻¹)

- iPAR Radiação fotossinteticamente disponível instantânea (Einsten m⁻² d⁻¹)
 - E_d Irradiância descendente
 - z_m- Profundidade de um determinado corpo de água
 - z₁ Profundidade de referência
- $L_m(T_m)$ Radiância medida pelo satélite
 - $L(T_s)$ Radiância da superfície do mar
 - $L(T_a)$ Radiância da atmosfera
 - L_{céu} Radiância do céu
 - ε_w Emissividade da água
 - ρ_w Reflectância da água
 - TB₁₁. Temperaturas de brilho dos canais com centro de banda em 11
 Temperaturas de brilho dos canais com centro de banda em 12
 - Tsfc Estimativa climatológica da temperatura da superfície do mar
 - θ Ângulo zenital
 - FCM Fuzzy C-Means
 - N_s Número total de observações
 - N_c Número total de classes separadas
 - d Distância Euclidiana
 - μ_{ij} Grau de Pertinência

- *m* Expoente de ponderação
- CB Corrente do Brasil
- CM Corrente das Malvinas
- GS Giro Subtropical
- CAS Corrente do Atlântico Sul
- CBG Corrente de Benguela
 - CA Corrente das Agulhas
- NOAA National Oceanic and Atmospheric Administration
- NASA National Aeronautics and Space Administration
- WGS84 World Geodetic System 1984
 - $a(x_i)$ Dissimilaridade média
 - $b(x_i)$ Menor dissimilaridade média
- CMIP5 Coupled Model Inter-comparison Project
- RCP 8.5 Representative Concentration Pathways 8.5
 - TSMG Grade futura de temperatura da superfície do mar
 - CSMG Grade futura de concentração de clorofila-a na superfície do mar
 - PCMG Grade futura de profundidade da camada de mistura
 - WTRA Western Tropical Atlantic Province
 - CG Corrente da Guiné

- GUIN Guinea Province
- FAB Frente Angola-Benguela
- CSE Corrente Sul Equatorial
- CNB Corrente norte do Brasil
- CCSE Contracorrente Sul Equatorial
- CCNE Contracorrente Norte Equatorial
 - CCA Corrente Circumpolar Antártica
 - CBM Convergência Brasil-Malvinas
- SSTC South Subtropical Convergence Province
- SANT Subantarctic Water Ring Province
- ANTA Antartic Province
 - FP Frente Polar
 - FSA Frente Subantártica

SUMÁRIO

<u>Pág</u>.

1	ITRODUÇÃO	1
1.1.	bjetivo geral	8
1.2.	bjetivos específicos	8
2	UNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	9
2.1.	ariáveis Ambientais	9
2.1.1	Concentração de Clorofila- <i>a</i> na Superfície do Mar (CSM)	10
2.1.2	Radiação Fotossinteticamente Disponível (PAR)	11
2.1.3	O Coeficiente de Atenuação da Luz Difusa (K_d e K490)	12
2.1.4	Temperatura da Superfície do Mar (TSM)	13
2.1.5	Profundidade da Camada de Mistura (PCM)	14
2.2.	létodo de Particionamento (Lógica Fuzzy e Fuzzy C-Means)	16
3	IETODOLOGIA	19
3.1.	rea de estudo	19
3.2.	ase de dados	20
3.2.1	Concentração de Clorofila-a na Superfície do Mar	21
3.2.2	Temperatura da Superfície do Mar	22
3.2.3	Radiação Fotossinteticamente Disponível	22
3.2.4	Coeficiente de Atenuação da Luz Difusa	22
3.2.5	Profundidade da Camada de Mistura	23
3.2.6	Batimetria	23
3.3.	rocessamento dos dados	24
3.3.1	Testes de correlação	25
3.3.2	Reamostragem das Variáveis	25
3.3.3	Imagens anuais e sazonais	26
3.4.	plicação do método de particionamento Fuzzy C-Means	26
3.5.	laboração de Cenário Futuro	27
4	ESULTADOS E DISCUSSÃO	31
4.1.	alores médios e desvios padrão das variáveis ambientais	31

4.1.2. CSM 4.1.3. PAR 4.1.4. PCM 4.1.5. Batimetria 4.2. Correlações entre as variáveis ambientais 4.3. Províncias Biogeoquímicas Anuais 4.3.1. PBGQ 1 - Sistema Equatorial/Tropical 4.3.2. PBGQ 2 - Giro Subtropical 4.3.3. PBGQ 3 - Atlântico Sul 4.3.4. PBGQ 4 - Convergência Subtropical Norte 4.3.5. PBGQ 5 - Convergência Subtropical Sul 4.3.6. PBGQ 6 - Subantártica 4.3.7. PBGQ 7 - Polar 4.3.8. PBGQ 8 - Circumpolar Antártica 4.4. Províncias Biogeoquímicas Sazonais 4.5. Verão 55 4.5.1. PBGQ 1 de verão - Sistema Equatorial/Tropical 4.5.2. PBGQ 2 de verão - Giro Subtropical 4.5.4. PBGQ 3 de verão - Convergência Subtropical 4.5.5. PBGQ 5 de verão - Sistema Sul Equatorial/Tropical 4.5.6. PBGQ 6 de verão - Subantártica 4.5.7. PBGQ 7 de verão - Polar 4.5.8. PBGQ 8 de verão - Circumpolar Antártica 4.5.7. PBGQ 7 de verão - Subantártica 4.5.8	4.1.1.	TSM	. 31
4.1.3. PAR	4.1.2.	CSM	. 33
4.1.4. PCM 4.1.5. Batimetria 4.2. Correlações entre as variáveis ambientais 4.3. Províncias Biogeoquímicas Anuais. 4.3.1. PBGQ 1 - Sistema Equatorial/Tropical 4.3.2. PBGQ 2 - Giro Subtropical 4.3.3. PBGQ 2 - Convergência Subtropical Norte 4.3.4. PBGQ 4 - Convergência Subtropical Norte 4.3.5. PBGQ 5 - Convergência Subtropical Sul 4.3.6. PBGQ 7 - Polar 4.3.7. PBGQ 7 - Polar 4.3.8. PBGQ 8 - Circumpolar Antártica 4.3.7. PBGQ 8 - Circumpolar Antártica 4.3.8. PBGQ 1 de verão - Sistema Equatorial/Tropical 4.4. Províncias Biogeoquímicas Sazonais 4.5. Verão 55 4.5.1. PBGQ 1 de verão - Sistema Equatorial/Tropical 4.5.2. PBGQ 2 de verão - Giro Subtropical 4.5.3. PBGQ 3 de verão - Sistema Sul Equatorial. 4.5.4. PBGQ 5 de verão - Sistema Sul Equatorial. 4.5.5. PBGQ 6 de verão - Subantártica. 4.5.6. PBGQ 7 de verão - Circumpolar Antártica 4.5.7. PBGQ 7 de verão - Sistema Sul Equatorial. 4.	4.1.3.	PAR	. 36
 4.1.5. Batimetria 4.2. Correlações entre as variáveis ambientais 4.3. Províncias Biogeoquímicas Anuais 4.3.1 PBGQ 1 - Sistema Equatorial/Tropical 4.3.2. PBGQ 2 - Giro Subtropical 4.3.3. PBGQ 3 - Atlântico Sul 4.3.4. PBGQ 4 - Convergência Subtropical Norte 4.3.5. PBGQ 5 - Convergência Subtropical Norte 4.3.6. PBGQ 6 - Subantártica 4.3.7. PBGQ 7 - Polar 4.3.8. PBGQ 8 - Circumpolar Antártica 4.4. Províncias Biogeoquímicas Sazonais 4.5. Verão 55 4.5.1. PBGQ 1 de verão - Sistema Equatorial/Tropical 4.5.2. PBGQ 2 de verão - Giro Subtropical Subtropical 4.5.3. PBGQ 3 de verão - Atlântico Sul 4.5.4. PBGQ 4 de verão - Sistema Sul Equatorial 4.5.5. PBGQ 5 de verão - Sistema Sul Equatorial 4.5.6. PBGQ 6 de verão - Sistema Sul Equatorial 4.5.7. PBGQ 7 de verão - Sistema Sul Equatorial 4.5.8. PBGQ 8 de verão - Circumpolar Antártica 4.5.7. PBGQ 7 de verão - Circumpolar Antártica 4.5.8. PBGQ 6 de verão - Sistema Sul Equatorial 4.5.8. PBGQ 7 de verão - Circumpolar Antártica 4.6.1. PBGQ 1 de outono - Sistema Equatorial/Tropical 4.6.2. PBGQ 2 de outono - Giro Subtropical 4.6.3. PBGQ 3 de outono - Atlântico Sul 4.6.4. PBGQ 4 de outono - Convergência Subtropical 	4.1.4.	PCM	. 38
 4.2. Correlações entre as variáveis ambientais	4.1.5.	Batimetria	. 40
 4.3. Províncias Biogeoquímicas Anuais	4.2. Correl	lações entre as variáveis ambientais	. 41
 4.3.1. PBGQ 1 - Sistema Equatorial/Tropical 4.3.2. PBGQ 2 - Giro Subtropical 4.3.3. PBGQ 3 - Atlântico Sul 4.3.4. PBGQ 4 - Convergência Subtropical Norte 4.3.5. PBGQ 5 - Convergência Subtropical Sul 4.3.6. PBGQ 6 - Subantártica 4.3.7. PBGQ 7 - Polar 4.3.8. PBGQ 8 - Circumpolar Antártica 4.4. Províncias Biogeoquímicas Sazonais 4.5. Verão 55 4.5.1. PBGQ 1 de verão - Sistema Equatorial/Tropical 4.5.2. PBGQ 2 de verão - Giro Subtropical 4.5.3. PBGQ 3 de verão - Atlântico Sul 4.5.4. PBGQ 4 de verão - Convergência Subtropical 4.5.5. PBGQ 5 de verão - Sistema Sul Equatorial/ 4.5.6. PBGQ 6 de verão - Subantártica 4.5.7. PBGQ 7 de verão - Polar 4.5.8. PBGQ 8 de verão - Circumpolar Antártica 4.6.0 Uutono 4.6.1. PBGQ 1 de outono - Sistema Equatorial/Tropical 4.6.2. PBGQ 2 de outono - Giro Subtropical 4.6.3. PBGQ 3 de outono - Atlântico Sul 4.6.4. PBGQ 4 de outono - Convergência Subtropical 4.6.4. PBGQ 4 de outono - Convergência Subtropical 	4.3. Provír	ncias Biogeoquímicas Anuais	. 43
 4.3.2. PBGQ 2 - Giro Subtropical	4.3.1.	PBGQ 1 - Sistema Equatorial/Tropical	. 46
 4.3.3. PBGQ 3 - Atlântico Sul	4.3.2.	PBGQ 2 - Giro Subtropical	. 48
 4.3.4. PBGQ 4 - Convergência Subtropical Norte 4.3.5. PBGQ 5 - Convergência Subtropical Sul. 4.3.6. PBGQ 6 - Subantártica. 4.3.7. PBGQ 7 - Polar 4.3.8. PBGQ 8 - Circumpolar Antártica 4.4. Províncias Biogeoquímicas Sazonais 4.5. Verão 55 4.5.1. PBGQ 1 de verão - Sistema Equatorial/Tropical 4.5.2. PBGQ 2 de verão - Giro Subtropical 4.5.3. PBGQ 3 de verão - Atlântico Sul 4.5.4. PBGQ 4 de verão - Convergência Subtropical 4.5.5. PBGQ 5 de verão - Sistema Sul Equatorial. 4.5.6. PBGQ 6 de verão - Subantártica 4.5.7. PBGQ 7 de verão - Subantártica 4.5.8. PBGQ 7 de verão - Circumpolar Antártica 4.5.8. PBGQ 8 de verão - Circumpolar Antártica 4.6. Outono 4.6.1. PBGQ 1 de outono - Sistema Equatorial/Tropical 4.6.2. PBGQ 2 de outono - Atlântico Sul 4.6.3. PBGQ 4 de outono - Atlântico Sul 4.6.4. PBGQ 4 de outono - Convergência Subtropical 	4.3.3.	PBGQ 3 - Atlântico Sul	. 50
 4.3.5. PBGQ 5 - Convergência Subtropical Sul	4.3.4.	PBGQ 4 - Convergência Subtropical Norte	. 51
 4.3.6. PBGQ 6 - Subantártica	4.3.5.	PBGQ 5 - Convergência Subtropical Sul	. 52
 4.3.7. PBGQ 7 - Polar	4.3.6.	PBGQ 6 - Subantártica	. 52
 4.3.8. PBGQ 8 - Circumpolar Antártica	4.3.7.	PBGQ 7 - Polar	. 53
 4.4. Províncias Biogeoquímicas Sazonais 4.5. Verão 55 4.5.1. PBGQ 1 de verão - Sistema Equatorial/Tropical 4.5.2. PBGQ 2 de verão - Giro Subtropical 4.5.3. PBGQ 3 de verão - Atlântico Sul 4.5.4. PBGQ 4 de verão - Convergência Subtropical 4.5.5. PBGQ 5 de verão - Sistema Sul Equatorial 4.5.6. PBGQ 6 de verão - Subantártica 4.5.7. PBGQ 7 de verão - Polar 4.5.8. PBGQ 8 de verão - Circumpolar Antártica 4.6. Outono 4.6.1. PBGQ 1 de outono - Sistema Equatorial/Tropical 4.6.2. PBGQ 2 de outono - Giro Subtropical 4.6.3. PBGQ 3 de outono - Atlântico Sul 4.6.4. PBGQ 4 de outono - Convergência Subtropical 	4.3.8.	PBGQ 8 - Circumpolar Antártica	. 54
 4.5. Verão 55 4.5.1. PBGQ 1 de verão - Sistema Equatorial/Tropical	4.4. Provír	ncias Biogeoquímicas Sazonais	. 54
 4.5.1. PBGQ 1 de verão - Sistema Equatorial/Tropical	4.5. Verão	55	
 4.5.2. PBGQ 2 de verão - Giro Subtropical	4.5.1.	PBGQ 1 de verão - Sistema Equatorial/Tropical	. 58
 4.5.3. PBGQ 3 de verão - Atlântico Sul	4.5.2.	PBGQ 2 de verão - Giro Subtropical	. 58
 4.5.4. PBGQ 4 de verão - Convergência Subtropical	4.5.3.	PBGQ 3 de verão - Atlântico Sul	. 59
 4.5.5. PBGQ 5 de verão - Sistema Sul Equatorial	4.5.4.	PBGQ 4 de verão - Convergência Subtropical	. 60
 4.5.6. PBGQ 6 de verão - Subantártica	4.5.5.	PBGQ 5 de verão - Sistema Sul Equatorial	. 61
 4.5.7. PBGQ 7 de verão - Polar	4.5.6.	PBGQ 6 de verão - Subantártica	. 61
 4.5.8. PBGQ 8 de verão - Circumpolar Antártica	4.5.7.	PBGQ 7 de verão - Polar	. 62
 4.6. Outono 4.6.1. PBGQ 1 de outono - Sistema Equatorial/Tropical 4.6.2. PBGQ 2 de outono - Giro Subtropical 4.6.3. PBGQ 3 de outono - Atlântico Sul 4.6.4. PBGQ 4 de outono - Convergência Subtropical 4.6.5. PBGQ 5 de verão - Sistema Subtropical 	4.5.8.	PBGQ 8 de verão - Circumpolar Antártica	. 62
 4.6.1. PBGQ 1 de outono - Sistema Equatorial/Tropical 4.6.2. PBGQ 2 de outono - Giro Subtropical 4.6.3. PBGQ 3 de outono - Atlântico Sul 4.6.4. PBGQ 4 de outono - Convergência Subtropical 4.6.5. PBGQ 5 de verão - Sistema Subtropical 	4.6. Outon	10	. 63
 4.6.2. PBGQ 2 de outono - Giro Subtropical 4.6.3. PBGQ 3 de outono - Atlântico Sul 4.6.4. PBGQ 4 de outono - Convergência Subtropical 4.6.5. PBGQ 5 de verão - Sistema Subtropical 	4.6.1.	PBGQ 1 de outono - Sistema Equatorial/Tropical	. 65
 4.6.3. PBGQ 3 de outono - Atlântico Sul 4.6.4. PBGQ 4 de outono - Convergência Subtropical 4.6.5. PBGQ 5 de verão - Sistema Subtropical 	4.6.2.	PBGQ 2 de outono - Giro Subtropical	. 65
4.6.4. PBGQ 4 de outono - Convergência Subtropical	4.6.3.	PBGQ 3 de outono - Atlântico Sul	. 66
165 PBCO 5 de verão - Sistema Subtropical	4.6.4.	PBGQ 4 de outono - Convergência Subtropical	. 66
	4.6.5.	PBGQ 5 de verão - Sistema Subtropical	. 67

4.6.6.	PBGQ 6 de outono - Subantártica	67
4.6.7.	PBGQ 7 de outono - Polar	68
4.6.8.	PBGQ 8 de outono - Circumpolar Antártica	68
4.7. lı	nverno	69
4.7.1.	PBGQ 1 de inverno - Sistema Equatorial/Tropical	71
4.7.2.	PBGQ 2 de inverno - Giro Subtropical	72
4.7.3.	PBGQ 3 de inverno - Atlântico Sul	73
4.7.4.	PBGQ 4 de inverno - Convergência Subtropical	73
4.7.5.	PBGQ 5 de inverno - Expansão Equatorial	74
4.7.6.	PBGQ 6 de inverno - Subantártica	75
4.7.7.	PBGQ 7 de inverno - Polar	75
4.7.8.	PBGQ 8 de inverno - Circumpolar Antártica	76
4.8. Primavera		76
4.8.1.	PBGQ 1 de primavera - Sistema Equatorial/Tropical	79
4.8.2.	PBGQ 2 de primavera - Giro Subtropical	79
4.8.3.	PBGQ 3 de primavera - Atlântico Sul	80
4.8.4.	PBGQ 4 de primavera - Convergência Subtropical	80
4.8.5.	PBGQ 5 de primavera - Sistema Sul Equatorial	81
4.8.6.	PBGQ 6 de primavera - Subantártica	81
4.8.7.	PBGQ 7 de primavera - Polar	
4.8.8.	PBGQ 8 de primavera - Circumpolar Antártica	82
4.9. C	Cenário Futuro	83
5 C	CONCLUSÃO	91
REFE	RÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	

1 INTRODUÇÃO

As províncias biogeoquímicas marinhas (PBGQ) podem ser definidas como diferentes regiões oceânicas caracterizadas por forçantes físicas coerentes às condições ambientais que eventualmente são representativas de ecossistemas oceânicos em macroescala (VICHI et al., conceito se assemelha à definicão 2011). Este de regiões biogeoquímicas, mas difere da definição de regiões biogeográficas, uma vez que esta última inclui o estudo da distribuição de espécies animais e vegetais ao longo do tempo, no espaço geográfico (MEILLAND et al., 2016).

As PBGQ podem ser similarmente definidas como Grandes Ecossistemas Marinhos (DUDA; SHERMAN., 2002) se estendendo desde áreas costeiras até os limites de correntes oceânicas. São caracterizadas por variáveis ambientais como a batimetria, hidrografia, produtividade primária e relações tróficas de dependência entre as populações (LONGHURST, 2007).

A classificação em PBGQ fornece uma estrutura útil para a compreensão dos mecanismos de interação e controle de processos físicos, químicos e biológicos que refletem a heterogeneidade do ambiente oceânico em diferentes localidades do planeta (SCHLITZER, 2009). Abordagens categóricas já foram aplicadas à partição do ambiente marinho em escala global em províncias biogeoquímicas baseadas na latitude, ventos predominantes, proximidade da costa e campos de clorofila *in situ* (LONGHURST, 1998). A partição em biomas é similar a trabalhos anteriores sobre ecorregiões de larga-escala definidas para os sistemas terrestres (BAILEY, 2014). Breece et al. (2016) propuseram uma partição dinâmica de paisagens marinhas (*seascapes*) para prever a ocorrência de uma espécie ameaçada – esturjão do Atlântico (*Acipenser oxyrinchus*), utilizando dados de temperatura e concentração de clorofila na superfície do mar estimados por satélite.

Este tipo de classificação é útil para a identificação de relações entre forçantes físicas oceânicas e a distribuição fitoplanctônica (PLATT et al., 2005), além de subsidiar estimativas globais da produtividade primária contribuindo com o estudo de mudancas oceânica. climáticas (LONGHURST, 2007). Da mesma forma, auxilia ou suporta esforços de monitoramento ambiental realizados por programas específicos, como por exemplo, o monitoramento contínuo do plâncton marinho (do inglês Continuous Plankton Recorder - CPR) (ZHAI et al., 2013). Estas informações contribuem para o gerenciamento de recursos costeiros, a identificação de habitats pelágicos (HOBDAY et al., 2011), áreas de prospecção para a pesca (REYGONDEAU et al., 2012) e regionalização de espécies de fitoplâncton (KOSTADINOV et al., 2017). A distribuição da maioria dos organismos marinhos é geralmente limitada por estas PBGQ (SEALEY; BUSTAMANTE, 1999; OLIVER; IRWIN, 2008; KAVANAUGH et al., 2016).

Compreender a estrutura espacial e a função do ecossistema pelágico está no cerne da oceanografia atual (KOSTADINOV et al., 2017). Estruturas espaciais são encontradas na camada superior do oceano em diferentes escalas horizontais uma vez que o oceano é forçado em um espectro amplo de escalas simultaneamente (PLATT е SATHYENDRANATH, 1999). Entretanto, são nas escalas global e regional que se postulam questões importantes, como por exemplo, o papel da produtividade primária oceânica no ciclo planetário do carbono (ZHAI et al., 2013; MARTINY et al., 2013; SIEGEL et al., 2014; HONJO et al., 2014).

O estudo de Platt et al., (1991) sobre a variabilidade sazonal e regional da concentração de clorofila-*a* na superfície do mar (CSM) obtida pelo sensor orbital *Coastal Zone Color Scanner* (CZCS), em conjunto com perfis verticais de clorofila e medidas fotossintéticas (curvas de fotossíntese - luz), embasaram a partição do oceano em províncias biogeoquímicas. Com esta abordagem, os autores forneceram o primeiro cálculo em escala de bacia oceânica da produção primária fitoplanctônica para o Atlântico Norte.

A partição em PBGQ marinhas proposta por Longhurst (1995) foi utilizada em diversos estudos sobre o fluxo de partículas orgânicas de carbono para o fundo marinho (HONJO et al., 2014) e a distribuição de grandes peixes pelágicos (ROUYER et al., 2008), entre outros.

Nas últimas décadas, esforços voltados ao particionamento do domínio oceânico vêm sendo realizados por diferentes autores (LONGHURST, 2007; REYGONDEAU et al., 2013). Foram apresentadas tentativas de identificar unidades ecológicas marinhas como os grandes ecossistemas marinhos (SHERMAN, 2005) ou ecorregiões marinhas (SPALDING et al., 2007) buscando compreender a dinâmica oceânica, assim como, os processos oceanográficos atuantes em macroescala.

Diversos estudos utilizaram dados de sensoriamento remoto como a concentração de clorofila na superfície do mar, indexando a biomassa fitoplanctônica, e a temperatura da superfície do mar, indexando às forçantes físicas (LONGHURST, 1995; ZHAI et al., 2013; BLONDEAU et al., 2014). Outros estudos integraram variáveis medidas *in situ* como nutrientes e salinidade (HOBDAY et al., 2011; REYGONDEAU et al., 2013). Cabe mencionar que atualmente é possível obter estimativas globais da salinidade na superfície do mar por satélite (TZORTZI et al., 2016).

Entretanto, é amplamente reconhecido que uma das principais dificuldades em particionar o oceano global reside na dinâmica das massas de água e variabilidade espaço-temporal dos processos de interação oceano-atmosfera (REYGONDEAU et al., 2013; DEVRED et al., 2009).

Tendo em vista o que conceito que as PBGQ devem representar uma distribuição dinâmica (PLATT et al., 2008), a obtenção de dados via sensoriamento remoto orbital torna-se uma alternativa com grande potencial para o mapeamento das PBGQ, pois permitem caracterizar a variabilidade espaço-temporal, com possibilidade de atualizações ao longo do tempo em escala global (SCHLITZER et.al., 2002; HARDMAN-

MOUNTFORD et al., 2008). A localização das principais correntes oceânicas superficiais e, particularmente dos giros oceânicos, definem basicamente os limites destas PBGQ (SEALEY; BUSTAMANTE, 1999).

De acordo com IOCCG (2009), o particionamento do ambiente marinho pelágico pode ser realizado de forma supervisionada ou não supervisionada (utilizando aqui a terminologia padrão de reconhecimento de padrões). A abordagem supervisionada se baseia na partição de províncias a partir de um conhecimento *a priori* da estrutura geográfica da área de estudo, tendo como principal vantagem, a manutenção de uma ligação entre a descrição geral dos padrões oceanográficos e sua composição ecológica.

As principais vantagens desta abordagem supervisionada são o maior controle sobre o processo de classificação por parte do analista, estabelecendo o número de classes, amostras e regiões amostrais, o que contribui para a identificação de incertezas da classificação por meio das amostras de treinamento. Como principal desvantagem, tem-se que as regiões de treinamento pré-estabelecidas, podem não apresentar todas as características das classes representadas (CAMPBELL, 1996). Alguns dos algoritmos de classificação supervisionada comumente utilizados com imagens de sensoriamento remoto são: Máxima Verossimilhança (Maxver), Distância Mínima е Classificador Mahalanobis (BANDYOPADHYAY; SAHA, 2012; RICHARDS, 1986), entre outros.

A abordagem não supervisionada propõe uma partição sem qualquer pressuposição espacial sobre a estrutura oceânica ou de forçantes ambientais, usando metodologias objetivas, como por exemplo, a análise de agrupamento (REYGONDEAU et al., 2013). Vários estudos utilizaram dados de sensoriamento remoto para testar e detectar áreas com feições oceanográficas persistentes em escala global (por exemplo, HARDMAN-MOUNTFORD et al., 2008).

A classificação não supervisionada apresenta vantagens principalmente quando se trata do reconhecimento de padrões a partir de um grande

volume de dados. Entretanto, apresenta certas limitações como a préseleção do número de classes de entrada, número máximo de iterações e limiares para realizar as divisões. Estas são limitações comuns em aplicações utilizando algoritmos como o K-médias e ISODATA (GONÇALVES et al., 2005).

Na década de 1980, Margalef contribuiu com um estudo sobre a influência da turbulência e nutrientes sobre a tipologia do fitoplâncton (CULLEN et al., 2002). Por meio de imagens do sensor CZCS, Ducklow e Harris (1993) traçaram uma evolução progressiva da partição ecológica do oceano superficial, demonstrando a influência da clorofila-*a* em diferentes regiões do Atlântico Norte. Longhurst (1995) realizou uma análise semelhante em escala global, particionando o oceano em 56 PBGQ com base em 4 biomas - ventos de oeste, polar, ventos alísios e áreas costeiras, delimitados de acordo com os processos oceanográficos característicos de cada um destes. Este estudo foi reelaborado, acrescentando novos aspectos descritivos sobre as PBGQ em Longhurst (1998), atualizado mais recentemente em Longhurst (2007) como pode ser observado na Figura 1.1.

Figura 1.1 – Clássica delimitação de províncias biogeoquímicas elaborada por Lonhurst (2007) a partir de dados de concentração de clorofila-*a* na superfície do mar obtidos por sensoriamento remoto.



Fonte: Longhurst (2007)

A partir do uso da lógica *fuzzy*, Schlitzer et al., (2002) particionaram o oceano global em 9 PBGQ utilizando dados sazonais de concentração de clorofila na superfície do mar, temperatura da superfície do mar e radiação fotossinteticamente disponível obtidos via sensoriamento remoto, em conjunto com dados de produtividade primária coletados *in situ*. Esses autores concluíram que as PBGQ apresentaram-se coerentes às suas dinâmicas sazonais, apesar de não terem utilizado nenhuma métrica estatística para definir o número ideal de classes de entrada no algoritmo de classificação.

Reygondeau et al. (2013) por meio de dados de concentração de clorofila na superfície do mar, temperatura da superfície do mar, radiação fotossinteticamente disponível, batimetria e salinidade na superfície do mar, realizaram classificações supervisionadas sazonal e interanual em escala global, baseadas em um modelo ecológico probabilístico não paramétrico. Foram delimitadas espacialmente algumas das PBGQ propostas anteriormente por Longhurst (2007). Os autores identificaram províncias caracterizadas por feições oceanográficas específicas ressurgências equatoriais, giros subtropicais e correntes oceânicas (Agulhas e do Golfo). Também foram observadas mudanças sazonais em províncias localizadas em altas latitudes e plataformas continentais.

Devred et al. (2007) realizaram uma classificação não supervisionada sazonal por meio do algoritmo K-médias utilizando variáveis de temperatura e concentração de clorofila na superfície do mar e batimetria em uma região a noroeste do oceano Atlântico Norte. Foram identificadas duas províncias principais - *Atlantic Artic Province* (ARCT) e *Boreal Polar Province* (BPLR), bem próximas às anteriormente definidas por Longhurst (1995). Os autores apresentaram a ocorrência da BPLR mais ao sul durante a primavera, que seria consistente com a circulação oceânica nesta região. Estes autores também identificaram uma nova província denominada *Slope* e caracterizada por uma massa de água localizada no talude continental entre águas ricas em fitoplâncton da plataforma continental e águas pobres sobre a Corrente do Golfo e o Giro Subtropical do Atlântico Norte.

Hobday et al. (2011) identificaram sete habitats pelágicos dinâmicos em parte da costa leste australiana através de uma análise de agrupamento com as variáveis temperatura e concentração de clorofila na superfície do mar, batimetria e climatologias de nitrato. Destes sete habitas, foram identificados três grandes grupos persistentes e característicos de três massas de água presentes na região, a sudoeste do Pacífico, do mar da Tasmânia e a massa de água central.

Por meio da análise de principais componentes aplicada a um conjunto de dados mensais de temperatura e concentração de clorofila na superfície do mar obtidos por sensoriamento remoto, com 18 quilômetros de resolução espacial, Silveira et al. (2004) delimitou 14 regiões biogeográficas na região sudoeste do Atlântico Sul. Foram caracterizadas as principais feições oceanográficas em cada região encontrada.

A partir deste breve histórico, pode-se verificar que estudos focados no Atlântico Sul ainda merecem esforços de pesquisa adicional. Outra questão relevante refere-se aos cenários futuros de mudanças climáticas que repercutem diretamente sobre o oceano (DUARTE, 2014), a gestão de recursos pesqueiros (TOMMASI et al., 2017), aquicultura, turismo costeiro e saúde humana (WEATHERDON et al., 2016).

Os impactos ocasionados por mudanças climáticas sobre os oceanos nas ultimas décadas, tais como a alteração de correntes, pH do oceano, aumento da temperatura (IPCC, 2014; HOWES et al., 2015), vem sendo uma temática relevante para a projeção de cenários futuros (FOO; BYRNE, 2017). A partir da projeção de cenários futuros simulada por diferentes modelos, Cabré et al. (2014) concluíram que ao longo do século XXI, a temperatura de superfície vem apresentando um aumento de seus valores médios, principalmente sobre os trópicos do planeta. Consequentemente, haveria um estreitamento da profundidade da camada de mistura oceânica, o que reduziria a disponibilidade de nutrientes e a produtividade primária oceânica.

1.1. Objetivo geral

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho consiste em particionar o oceano Atlântico Sul em províncias biogeoquímicas marinhas, com uso de um classificador não supervisionado, utilizando dados anuais e sazonais de sensoriamento remoto (temperatura da superfície do mar, concentração de clorofila-*a* na superfície do mar, coeficiente de atenuação da luz difusa no comprimento de onda 490 nm e radiação fotossinteticamente disponível) e modelagem numérica (profundidade da camada de mistura e batimetria).

1.2. Objetivos específicos

- Identificar e descrever feições oceanográficas que regem a delimitação de cada PBGQ, a partir da dinâmica oceanográfica existente em cada região.
- Analisar a variação temporal das PBGQ delimitadas, em escala anual e sazonal, de acordo com a dinâmica oceanográfica atuante sobre o Atlântico Sul.
- Produzir um cenário futuro de PBGQ com o intuito de compará-lo às partições anuais atuais.
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A seguir será apresentado um embasamento teórico sobre as variáveis ambientais utilizadas no presente trabalho, destacando produtos obtidos por sensoriamento remoto e modelagem. O método selecionado para o particionamento do oceano Atlântico Sul em PBGQ também será abordado.

2.1. Variáveis Ambientais

A temperatura da água é uma das propriedades físicas mais importantes do ambiente marinho e exerce relevante influência em diversos eventos físicos, químicos, geoquímicos e biológicos (LALLI; PARSONS, 1997). A temperatura e a salinidade definem a densidade da água do mar, que por sua vez, influencia a estrutura vertical da coluna de água. A temperatura é o fator abiótico mais importante influenciando a distribuição de espécies marinhas. Pode ser conveniente designar zonas biogeográficas com base na TSM (LALLI; PARSONS, 1997).

A clorofila-*a* é um pigmento comum a todos os organismos fitoplanctônicos do planeta, os quais são definidos como um conjunto de organismos fotossintéticos, capazes de transformar matéria inorgânica em orgânica. O fitoplâncton é responsável por sustentar a biodiversidade marinha e a produção pesqueira global, além de reduzir a concentração de dióxido de carbono (CO2) nas camadas superficiais do oceano e outros sistemas aquáticos (CLARCK; SHERMAN, 1986; FALKOWSKI et al., 1998; KAMPEL, 2003).

A energia solar disponível para a fotossíntese aquática, conhecida como radiação fotossinteticamente disponível ou fotossinteticamente ativa, controla o crescimento do fitoplâncton e, portanto, regula a composição e a evolução dos ecossistemas marinhos (FROUIN; PINKER, 1995). Conhecer a distribuição espacial e temporal da PAR sobre os oceanos globais é fundamental para a compreensão dos ciclos biogeoquímicos do carbono, nutrientes e oxigênio, e para abordar questões climáticas importantes, como o destino do dióxido de carbono atmosférico antropogênico (FROUIN et al., 2012).

Em geral, propriedades como a temperatura, salinidade e densidade variam com a profundidade da camada de mistura do oceano. O aquecimento superficial diurno pode ser intenso em condições de forte insolação e baixo vento (KAWAII; WADA, 2007). Com o aumento da intensidade do vento, o sinal da temperatura se mistura com a profundidade diminuindo a diferença de densidade na vertical. A profundidade da camada de mistura também aumenta com a intensificação do vento (KAWAII; WADA, 2007).

2.1.1. Concentração de Clorofila-a na Superfície do Mar (CSM)

Através da estimativa da CSM em escala planetária, é possível quantificar a produtividade primária global, de fundamental importância para a delimitação das PBGQ no ambiente marinho (LONGHURST, 2007). Segundo Kirk (2011), a interação da radiação eletromagnética com os componentes opticamente ativos presentes nos corpos de água resulta em diferentes padrões de absorção e de espalhamento, tornando possível distinguir diferentes comportamentos espectrais para cada corpo de água. A curva espectral da clorofila possui dois picos de absorção: um no comprimento de onda do azul, em 433 nm, e outro no vermelho, em 686 nm, e espalhamento no comprimento de onda do verde entre aproximadamente 500 e 600nm.

O sensor *MODerate resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) desenvolvido pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), opera a bordo do satélite *Aqua* lançado em 2002, percorrendo uma órbita sol-síncrona em uma altitude nominal de 705 km. Possui 36 bandas espectrais no intervalo de 405 a 14385 nm, resolução radiométrica de 12 bits e resolução espacial de até 250 metros, além de disponibilizar produtos globais em diferentes níveis de processamento (NASA, 2016).

Atualmente o algoritmo empírico padrão utilizado para estimar as concentrações globais de clorofila-*a* na superfície do oceano é o *Color Index* (CI), que calcula a diferença entre a reflectância de sensoriamento

remoto (R_{rs}) na faixa espectral do verde, e uma referência formada linearmente entre a R_{rs} nas bandas do azul e do vermelho (HU et al., 2012). Este algoritmo é apresentado na Equação 2.1:

$$CI = R_{rs}(\lambda \text{verde}) - [R_{rs}(\lambda \text{azul}) + \frac{\lambda \text{verde} - \lambda \text{azul}}{\lambda \text{vermelho} - \lambda \text{azul}} * (R_{rs}(\lambda \text{vermelho}) - R_{rs}(\lambda \text{azul}))]$$

$$(2.1)$$

onde λ azul, λ verde e λ vermelho são os comprimentos de onda em 443, 555 e 670nm, respectivamente, para o sensor MODIS.

2.1.2. Radiação Fotossinteticamente Disponível (PAR)

Os processos biológicos, como por exemplo, a produção primária oceânica, são fundamentalmente controlados pela penetração da radiação solar na coluna de água, na região espectral do visível (BYUN et al., 2014). A PAR é a radiação eletromagnética emitida pelo sol, na faixa espectral entre 400 e 700 nm, que incide no planeta Terra. Esta radiação é utilizada pelos organismos fotossintéticos para realização da fotossíntese. O produto da PAR via sensoriamento remoto, é obtido por meio da integração da PAR instantânea (iPAR) coletada diariamente ao longo do fotoperíodo local, definido pela latitude e data de aquisição (LAAK; SANCHEZ, 2005; LIU et al., 2008).

A PAR obtida pelo sensor MODIS/*Aqua* se dá a partir da integração do cálculo da iPAR, formalmente definido como apresentado na Equação 2.2 (FROUIN et al., 2002):

$$iPAR = \frac{1}{hc} \int_{400}^{700} \lambda E_d(\lambda, z) d\lambda$$
(2.2)

onde *h* é a constante de Planck, *c* a velocidade da luz, E_d é a irradiância descendente.

2.1.3. O Coeficiente de Atenuação da Luz Difusa (K_d e K490)

O coeficiente de atenuação da luz difusa (K_d) define a atenuação da irradiância descendente no corpo de água em função de sua profundidade. É considerado como uma propriedade óptica aparente, pois depende da influência do campo de luz subaquático para ser obtido (KIRK, 2011; KAMPEL; NOVO, 2005).

De forma pragmática e sensoriamento remoto, o K_d é estimado no comprimento de onda de 490 nm (K490), compreendendo o espectro do visível entre o azul e o verde, região espectral onde há maior predominância de componentes opticamente ativos do corpo de água (PIERSON et. al., 2007; KIRK, 2011; KRATZER, et.al., 2014).

Em estudos ambientais, o K490 pode ser aplicado para identificar locais com águas eutrofizadas, de acordo com a quantidade de fitoplâncton e outros constituintes presentes nas mesmas (KRATZER et al., 2014), identificar áreas potenciais à atividade pesqueira (MISHRA, et.al, 2005), além de ser considerado um indicador da transparência da água (KAMPEL; NOVO, 2005; KIRK, 2011).

Um dos métodos utilizados para calcular o K_d consiste em calcular a razão entre a irradiância descendente (E_d) em um determinado corpo de água, e a irradiância descendente de uma profundidade de referência como pode ser observado na seguinte Equação 2.3 (MISHRA, et al., 2005):

$$-K_d(z)(z_m - z_1) = ln\left[\frac{E_d'(z_m,\lambda)}{(z_1,\lambda)}\right]$$
(2.3)

onde (K_d) é o coeficiente de atenuação da luz difusa; (E_d) é a Irradiância descendente; (z_m) é a profundidade de um determinado corpo de água; λ é o comprimento de onda; (z_1) é a profundidade de referência.

O algoritmo do sensor MODIS/Aqua utilizado para estimar o K490 é baseado em uma relação de quarta ordem polinomial, entre uma proporção de R_{rs} e o K_d no comprimento de onda de 490nm como pode

ser observado na Equação 2.4 e Equação 2.5 (WERDELL e BAILEY, 2005):

$$log_{10}(K_{rs}(490)) = a0 + \sum_{i=1}^{4} ai \left(log_{10}\left(\frac{R_{rs\,azul}}{R_{rs\,verde}}\right) \right)$$
(2.4)

$$K490 = K_{rs}(490) + 0,0166 \tag{2.5}$$

onde K_{rs} é o coeficiente espectral de atenuação difuso estimado por satélite.

2.1.4. Temperatura da Superfície do Mar (TSM)

Tratando-se do ambiente marinho, é importante ressaltar que a variabilidade da TSM somada aos processos físicos associados a ela, demonstra grande importância na regulação deste ecossistema (RIVAS, 2010).

Para Reygondeau et al. (2013), o uso da TSM na delimitação de províncias biogeoquímicas marinhas é extremamente relevante na medida em que exerce influência significativa sobre a concentração de clorofila-*a*. A TSM também influencia a taxa máxima de fotossíntese do fitoplâncton estando muitas vezes inversamente correlacionada à concentração de clorofila.

De acordo com Robinson (2004), a radiância medida por um sensor orbital na faixa do infravermelho termal corresponde à soma da radiância da superfície do oceano, somada à radiância da atmosfera e a radiância do céu refletida pela superfície do oceano (Equação 2.6).

$$L_m(T_m) = \tau_a \varepsilon_w L(T_s) + \varepsilon_a L(T_a) + \tau_a \rho_w L_{c\acute{e}u}$$
(2.6)

onde $L_m(T_m)$ é a radiância medida pelo satélite; $L(T_s)$ é a radiância da superfície do mar a uma temperatura T_s ; $L(T_a)$ é a radiância da atmosfera a uma temperatura T_a e $L_{c\acute{e}u}$ é a radiância do céu. τ_a é a transmitância da atmosfera, ε_a é a emissividade da atmosfera, ε_w é a emissividade da água e ρ_w é a reflectância da água. O algoritmo padrão aplicado aos dados do sensor MODIS/Aqua para estimar a TSM orbital é mostrado na Equação 2.7 (NASA, 2016).

$$TSM = c1 + c2^{*}TB11 + c3^{*}(TB11 - TB12)^{*}Tsfc + c4(\sec(\theta) - 1)^{*}(TB11 - TB12)$$

$$(2.7)$$

onde TB₁₁ e TB₁₂ são as temperaturas de brilho dos canais com centro de banda em 11 e 12 µm, respectivamente, Tsfc é uma estimativa climatológica da TSM, θ é o ângulo zenital do satélite e c_n são coeficientes determinados de forma empírica utilizando dados de temperaturas radiométricas coletadas *in situ* (NASA, 2016).

2.1.5. Profundidade da Camada de Mistura (PCM)

Segundo Pond e Pickard (1983), a camada de mistura oceânica é uma porção instável e turbulenta que compõe a estrutura vertical dos oceanos. Pode atingir centenas de metros de profundidade e caracteriza-se por demonstrar de maneira uniforme, certas propriedades físicas, como por exemplo, a temperatura e a salinidade da água do mar. A PCM também desempenha importante papel ecológico no oceano, pois abriga a maior parte da produtividade fotoautotrófica deste (ZHAI et al., 2010).

As forçantes responsáveis por regular a mistura da camada superior do oceano são os ventos, as ondas, a radiação solar e as taxas de evaporação e precipitação (LIMA; LENTINI, 2009). Em decorrência destas características, a profundidade da camada de mistura pode impactar a produtividade biológica oceânica (SAKAR et al., 2005), repercutindo em alterações físicas e ou biológicas que correspondem a delimitações de províncias biogeoquímicas marinhas.

A profundidade da camada de mistura pode ser determinada por meio de perfis de profundidade observados por batitermógrafos descartáveis (XBT) ou equipamentos tipo CTD (condutividade, temperatura e pressão). Basicamente, infere-se a profundidade na qual a temperatura da água decai 0,5°C do valor da TSM, apesar de existirem outras maneiras de

calcular a PCM (FNMOC, 2016). A obtenção desta variável pode ser ilustrada pela Figura 2.1 onde a PCM é a distância entre um ponto A de temperatura θ 1 a um ponto B de temperatura θ 2, de modo que θ 2 seja igual a θ 1 + 0,5°C (Figura 2.1).





Fonte: Próprio Autor

Fisicamente, a camada de mistura é limitada pela profundidade da picnoclina, que vem a ser a camada do oceano em que a densidade aumenta rapidamente com a profundidade. A picnoclina se localiza onde a frequência de Brünt-Väisälä é máxima, fenômeno este explicado pela frequência de oscilação vertical da picnoclina ao longo da coluna d´água, que após se movimentar, retorna a sua posição de repouso, devido a forças restauradoras, como o empuxo, por exemplo (MANN; LAZIER, 2006).

Ainda segundo Mann e Lazier (2006), este transporte vertical reduzido faz com que as camadas em ambos os lados da picnoclina fiquem isoladas uma da outra. Isso repercute em consequências biológicas importantes, pois o fitoplâncton que cresce na camada superior do oceano é afetado pelo deslocamento da picnoclina que funciona como uma barreira dinâmica, bloqueando os nutrientes localizados em camadas profundas. Modelos numéricos também permitem estimar a PCM através de simulações ou dados de reanálise. Os dados vindos de modelos tem como vantagem a cobertura espacial global regular no tempo e no espaço, o que muitas vezes é difícil de ser obtido com dados *in situ* somente.

2.2. Método de Particionamento (Lógica Fuzzy e Fuzzy C-Means)

Uma das etapas deste trabalho consiste em realizar uma classificação não supervisionada por meio do algoritmo *Fuzzy C-Means* (FCM), com o intuito de identificar regiões que possuam variabilidade espaço-temporal semelhantes considerando-as como províncias biogeoquímicas no Atlântico Sul. Trabalhos como o de Moore et al. (2001) e Schlitzer et al. (2002) utilizaram a abordagem *fuzzy* para classificar províncias marinhas em parte do Oceano Atlântico Norte e em escala global, respectivamente.

Em geral, o método de classificação digital de imagens, seja supervisionado ou não supervisionado, pode identificar classes discretas ou contínuas. Nas discretas, cada elemento classificado possui uma adesão plena a uma respectiva classe. Por outro lado, as classes em que cada membro apresenta diferentes graus de pertinência são denominadas de classes contínuas (MCBRATNEY; GRUIJTER, 1992).

Frequentemente utilizada em reconhecimento de padrões, a lógica *fuzzy* introduzida por Zadeh (1965), é um método que permite que um determinado objeto pertença a duas ou mais classes (JIANG, 1998; CHANG et al., 2011). Na teoria dos conjuntos *fuzzy*, a função de associação é alterada para permitir associações graduadas entre conjuntos. Assim, é possível obter a adesão de um conjunto parcial para cada conjunto *fuzzy* como pode ser visto na Equação 2.10 (FARIAS et al., 2012).

$$\sum_{i=1}^{c} f_i(x) = 1 \tag{2.10}$$

Onde fi(x) representa a probabilidade de que x pertença a um determinado conjunto, variando sua adesão entre 0 e 1 ($0 \le fi(x) \le 1$).

O algoritmo de classificação não supervisionada FCM proposto por Bezdek (1984), permite encontrar graus de pertinência no conjunto de dados às classes geradas. No algoritmo Fuzzy C-Means, o "*C*" representa o número de classes de entrada. O FCM pressupõe que a matriz dos dados de entrada no algoritmo seja simétrica, sedo que cada ponto (dado) deve pertencer a uma classe, e cada classe deve conter ao menos um ponto (BEZDEK, 1984). A soma dos graus de pertinência de todos os elementos deve ser menor que o número de elementos existentes no universo amostral (YONAMINE et al., 2002).

Os graus de pertinência são uma generalização da teoria dos conjuntos *fuzzy* e podem ter valores de adesão que variam entre 0 e 1, onde 1 representa a total pertinência do objeto ao centro de determinada classe e 0 representa dissociação completa (FARIAS et al., 2012).

A similaridade e a dissimilaridade entre dois vetores podem ser obtidas a partir do cálculo de diversas distâncias (Distância Euclidiana, Distância de Hamming, Métrica de Mahalanobis, entre outras) que podem ser aplicadas ao conjunto de dados de entrada do FCM (ROCHA et al., 2012). Dentre estas distâncias, a Distância Euclidiana é tida como uma medida padrão de similaridade entre os vetores inseridos no FCM. A formulação simplificada do FCM pode ser entendida pela Equação 2.11.

$$J_m = \sum_{j=1}^{N_s} \sum_{j=1}^{N_c} \mu_{ij}^m d^2 \left(X_j V_i \right)$$
(2.11)

onde N_s é o número total de observações *j* no conjunto de dados, N_c é o número de classes separadas *i*, *d* é a Distância Euclidiana entre um vetor de observação X_j e o centro de agrupamento V_i , μ_{ij} é o grau de pertinência dos membros da observação *j* ao *i* grupo, e *m* é o expoente de ponderação.

O modelo FCM tem sido aplicado para o processamento de imagens médicas (SOPHARAK et al., 2009), para a análise e compressão de imagens (TSEKOURAS et al., 2008) e em outros problemas de reconhecimento de padrões (TAN et al., 2008). Atualmente, vem sendo utilizado como base para o desenvolvimento de novos modelos com o objetivo de minimizar deficiências, tais como, a sensibilidade do método a ruídos, grande volume de dados, o alto custo computacional exigido, entre outros (ROCHA et al., 2012).

O principal desafio encontrado para a classificação de conjuntos *fuzzy* é a pré-seleção de um número de classes a ser inserido no algoritmo utilizado. Seleções de diferentes números de classes podem muitas vezes resultar em partições ou classificações distintas (BEZDEK, 1984; WANG; ZANG, 2007; SULEMAN, 2017).

Diferentes métodos foram desenvolvidos para a seleção do número ideal de classes. Alguns deles são o *Thumb Rule* (MARDIA et al. 1982), *Cross-Validation* (MOSIER, 1951), *Elbow Method* (THORNDIKE, 1953), *Silhouette* (ROUSSEEUW, 1987), entre outros.

3 METODOLOGIA

A seguir, é apresentada a área de estudo do trabalho (item 3.1), seguida dos procedimentos metodológicos adotados no presente trabalho. Isso inclui a base de dados utilizada (item 3.2), o processamento dos dados (item 3.3), a aplicação do método de particionamento oceânico em PBGQ (item 3.4) e a elaboração do cenário futuro (item 3.5).

3.1. Área de estudo

A área de estudo compreende o oceano Atlântico Sul aqui limitado entre as latitudes 10°N - 60°S e longitudes 70°W - 30°E. A Figura 3.1 ilustra as principais feições oceanográficas existentes no oceano Atlântico Sul.

Figura 3.1 – Caracterização superficial do oceano Atlântico Sul. São ilustradas as principais feições oceanográficas e circulação oceânica superficial, como o Giro Subtropical e correntes marinhas.



Fonte: Adaptado de Peterson e Stramma, (1991)

A circulação superficial do Atlântico Sul pode ser descrita iniciando-se pela Corrente do Brasil (CB) tida como uma corrente de contorno oeste

quente e salina que flui no sentido sul-sudoeste a partir da costa Nordeste brasileira, até a região da Confluência Brasil-Malvinas em torno de 38°S (RODRIGUES, 2015). A Corrente das Malvinas (CM) fria e rica em nutrientes flui no sentido norte a partir da Passagem de Drake (OLSON et al., 1988). O Giro Subtropical (GS) presente na parte central da bacia do Atlântico Sul que flui no sentido anti-horário é composto ao sul pela Corrente do Atlântico Sul (CAS), a norte pela Corrente Sul Equatorial (CSE), a leste pela Corrente de Benguela (CBG) e a oeste pela Corrente do Brasil (PETERSON; STRAMMA, 1991).

A CAS tem origem na Confluência Brasil-Malvinas, e flui no sentido leste em direção ao continente africano, onde se encontra com águas transportadas do Oceano Índico pela Corrente das Agulhas (CA), formando a CBG. A CBG é tida como uma corrente de contorno leste que flui para noroeste, dando origem à CSE. Esta passa a fluir em direção ao continente sul-americano (STRAMMA; ENGLAND, 1999; RODRIGUES, 2015).

3.2. Base de dados

A seguir serão apresentadas as variáveis ambientais utilizadas no presente trabalho, contendo informações referentes às respectivas fontes dos dados, resoluções espacial e temporal e o período de disponibilidade (Tabela 3.1). No presente trabalho, o período de dados adotado foi de 01/2006 a 12/2015, devido à disponibilidade mais restrita dos dados de PCM aqui utilizados. De acordo com a literatura consultada, este período temporal ainda não havia sido utilizado para elaboração de uma partição do Atlântico Sul em PBGQ.

Tabela 3.1. Variáveis utilizadas para a partição do oceano Atlântico Sul em Províncias Biogeoquímicas. CSM=concentração de clorofila-a; TSM=temperatura da superfície do mar; PAR=radiação fotossintética disponível; K490= coeficiente de atenuação da luz difusa no comprimento de onda 490nm; PCM=profundidade da camada de mistura; BAT=batimetria.

Variáveis	Resolução Temporal	Resolução Espacial	Fonte	Período de disponibilidade
CSM	Mensal	9 km	MODIS/Aqua - NASA	2002/07 - 2017/04
TSM	Mensal	9 km	MODIS/Aqua - NASA	2002/07 - 2017/04
PAR	Mensal	9 km	MODIS/Aqua - NASA	2002/07 - 2017/04
K490	Mensal	9 km	MODIS/Aqua - NASA	2002/07 - 2017/04
РСМ	Mensal	18 km	TOPS/FNMOC	2005/07 - 2017/02
BAT	Atemporal	1 km	ETOPO1 - NOAA	A partir de 2009

Fonte: NASA; FNMOC; NOAA (ver texto para endereços eletrônicos).

3.2.1. Concentração de Clorofila-a na Superfície do Mar

A CSM é tida como a principal variável biológica obtida por sensoriamento remoto para o particionamento do ecossistema pelágico superficial oceânico (LONGHURST, 2007). É considerada como um indicador importante na estimativa da produtividade primária oceânica (DEVRED et al., 2007, HOBDAY et al., 2011, entre outros).

Os dados de CSM aqui utilizados foram obtidos pelo sensor MODIS, a bordo do satélite *Aqua*, em nível 3 de processamento com resolução espacial de 9 km e resolução temporal mensal, compreendendo o período de 01/2006 a 12/2015. Dados disponíveis em: https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/l3.

3.2.2. Temperatura da Superfície do Mar

Em decorrência da TSM exercer uma influência cardeal sobre os sistemas biogeoquímicos, esta variável física torna-se indispensável para o particionamento oceânico em PBGQ (REYGONDEAU et al., 2013).

Os dados de TSM utilizados neste trabalho são derivados do sensor MODIS/Aqua, com resolução espacial de 9 km e resolução temporal mensal, no período de 01/2006 a 12/2015. Dados disponíveis em: https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/l3.

3.2.3. Radiação Fotossinteticamente Disponível

O oceano pode ser subdividido em inúmeros ambientes. Uma divisão básica separa os biomas pelágico e bentônico. O ambiente pelágico refere-se à coluna de água oceânica, da superfície até grandes profundidades. O ambiente bentônico abrange o fundo oceânico (LALLI; PARSONS, 1997). Pela própria natureza das variáveis ambientais consideradas neste trabalho, pode-se dizer que as análises são mais focadas no ambiente pelágico.

As variáveis PAR e K490 permitem representar a variabilidade vertical da coluna de água oceânica principalmente no que se refere à disponibilidade e penetração de luz. De modo geral, a PAR influencia a produtividade primária oceânica, uma vez que em ambientes com luz limitada, a taxa instantânea de produção primária é proporcional à PAR (SCHLITZER et al., 2002).

Os dados referentes à PAR utilizado no presente trabalho são derivados do sensor MODIS/*Aqua*, com resolução espacial de 9 km e resolução temporal mensal, no período de 01/2006 a 12/2015. Dados disponíveis em: https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/l3.

3.2.4. Coeficiente de Atenuação da Luz Difusa

Da maneira similar à PAR, a variável K490 também contribui para a variabilidade vertical da coluna de água oceânica, no que diz respeito à

penetração de luz no corpo de água. É utilizada como um indicador de transparência da água, pois varia em função da presença e das quantidades de diferentes componentes opticamente ativos (KIRK, 2011).

Os dados referentes à K490 utilizados no trabalho são provenientes do sensor MODIS/*Aqua*, com resolução espacial de 9 km e resolução temporal mensal, no período de 01/2006 a 12/2015. Dados disponíveis em: https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/l3.

3.2.5. Profundidade da Camada de Mistura

A variável PCM foi selecionada devido à sua relevância em abrigar grande parte da produtividade fotoautotrófica dos oceanos (ZHAI et al., 2010). Influências sobre a produtividade biológica oceânica repercutem em alterações físicas e ou biológicas que correspondem a delimitações de províncias biogeoquímicas marinhas (SAKAR et al., 2005).

Neste trabalho, foram utilizados dados de PCM com resolução espacial de 18 km gerados pelo *Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center* (FNMOC), derivados do modelo *Thermal Ocean Prediction* (TOPS) descrito por Clancy e Sadler (1992). Dados disponíveis em: http://orca.science.oregonstate.edu/1080.by.2160.monthly.hdf.mld.fnmoc. php.

3.2.6. Batimetria

A batimetria foi selecionada neste trabalho, por ser uma variável comumente utilizada para distinguir áreas de plataformas continentais de áreas oceânicas (LONGHURST, 2007; REYGONDEAU et al., 2013). No plano horizontal, distinguem-se duas zonas marinhas: a nerítica e a oceânica. A quebra de plataforma continental marca o limite entre essas duas zonas. A divisão é baseada na batimetria e na distância da costa, adotando-se de maneira geral, a isóbata de 200 metros como o limite da plataforma continental. Regiões de plataformas continentais exercem influência sobre a distribuição de determinadas espécies bentônicas (CAPÍTOLI e BEMVENUTI, 2004), abrigam importante parcela das

reservas de óleo e gás (HALL, 2002) e concentram grande parte da pesca mundial (SHARP, 1998). A BAT é a única variável estática utilizada no presente trabalho, não variando ao longo do período de estudo.

Os dados de batimetria aqui utilizados são obtidos pelo modelo de relevo global ETOPO1 desenvolvido por Amante e Eakins et al., (2009) da *National Oceanic and Atmospheric Administration (*NOAA). Reúne vários bancos de dados de cobertura global referentes à topografia terrestre e à batimetria marinha, apresentando uma resolução espacial de 1 arcominuto (1km), tendo o WGS84 como Datum horizontal e o nível médio dos mares como Datum altimétrico (Tabela 3.2). Dados disponibilizados em: http://maps.ngdc.noaa.gov/viewers/wcs-client.

Tabela 3.2 – Características do produto ETOPO1 descrevendo a versão do produto, área de cobertura, sistema de coordenadas, Datum horizontal, Datum vertical e suas respectivas unidades, resolução espacial e formato da grade.

Característic	Características do Modelo de Relevo GlobalETOPO1				
Área de Cobertura	-180º a 180º longitude; -90º a 90º latitude				
Sistema de Coordenadas	Graus Decimais Geográficos				
Datum Horizontal	Sistema Geodésico Mundial de 1984 (WGS 84)				
Datum Vertical	Nível do Mar				
Unidade Vertical	Metros				
Resolução Espacial	1 arco-minuto (1 km)				
Formato da Grade	netCDF, binary float, tiff, xyz				

Fonte: Adaptado de Amante e Eakins et al, (2009).

3.3. Processamento dos dados

Os produtos de CSM, TSM e K490 foram submetidos a um préprocessamento, que consistiu no preenchimento de *gaps* (lacunas de dados), principalmente em decorrência da presença de nuvens persistentes sobre a área de estudo.

Para o preenchimento dos pixels faltantes, aplicou-se o método *Joseph Sheme* (JOSEPH, 1983), implementado pela NASA (TODD et al., 2010),

que realiza uma interpolação linear de lacunas vazias, a partir dos valores de seus vizinhos mais próximos.

Os produtos de PCM e BAT não precisaram ser interpolados. Os dados PAR são estimados a partir de um conjunto de bandas específicas na região do visível (469, 555 e 645 nm), que evitam a saturação dos valores de radiância na presença de nuvens, não contendo *gaps*.

3.3.1. Testes de correlação

Foram realizados testes de correlação entre as variáveis TSM, CSM, PAR, PCM e K490, a fim de elaborar um conjunto de dados ideal. Isto é, o mais descorrelacionado possível. A variável BAT não foi utilizada nos testes por ser invariável no tempo.

Considerando que altas correlações entre variáveis implicam na redundância de informação, foi adotado um limiar referente à correlação de Pearson ≥ 0,7 para suprimir variáveis redundantes. De acordo com Dancey e Reidy (2006), a partir de 0,7 a correlação é considerada muito forte entre as variáveis.

3.3.2. Reamostragem das Variáveis

Tratando-se da bacia do Atlântico Sul como domínio geográfico de análise, adotou-se a padronização das variáveis ambientais para a resolução espacial de 9 km. Esta é a melhor (maior) resolução espacial disponível entre as variáveis utilizadas. Procurou-se assim, preservar as informações espaciais em maior detalhe. Desse modo, as variáveis PCM e BAT foram submetidas ao processo de reamostragem bilinear para uma resolução espacial de 9 km, mesma resolução das demais variáveis utilizadas. A reamostragem bilinear realiza uma interpolação linear a partir dos quatro vizinhos mais próximos em linha e coluna (CENTENO, 2003).

Cabe ressaltar que estudos anteriores geralmente utilizaram resoluções espaciais mais grosseiras, de 110 km (LONGHURST, 2007; REYGONDEAU et al., 2013), 50 km (HOBDAY et al., 2011) e 18 km (SILVEIRA, et al., 2004; HARDMAN-MOUNTFORD et al., 2008). Até onde

vai o nosso conhecimento, esta é a primeira vez que um particionamento do ambiente pelágico é realizado com resolução de 9 km na escala de bacia oceânica.

3.3.3. Imagens anuais e sazonais

Foram calculadas grades médias anuais e sazonais das variáveis CSM, TSM, PAR, K490 e PCM objetivando verificar o comportamento médio para cada variável abordada.

Em relação às imagens sazonais, o período de outono é composto por uma imagem (média) dos meses de março, abril e maio (MAM). O inverno é representado pelos meses de junho, julho e agosto (JJA), a primavera por setembro, outubro e novembro (SON) e o verão por dezembro, janeiro e fevereiro (DJF). Ou seja, estações do ano referentes ao hemisfério sul (austral).

3.4. Aplicação do método de particionamento Fuzzy C-Means

Nesta etapa do trabalho, adotou-se a sequência metodológica utilizada por Subbalakshmi et al. (2015), a partir da utilização do critério *Silhouette* na definição do número ideal de classes, posteriormente inseridas do algoritmo de particionamento FCM.

O critério *Silhouette* fornece a representação gráfica de quão bem cada objeto encontra-se dentro de sua respectiva classe. Seus valores variam entre -1 e 1, onde um valor alto indica que o objeto está mais bem situado em uma determinada classe. Valores negativos indicam que o objeto foi atribuído erroneamente àquela classe. O critério *Silhouette* é calculado de acordo com a Equação 3.1 (ROUSSEEUW, 1987):

Silhouette (xi) =
$$\frac{b(x_i) - a(x_i)}{\max\{a(x_i), b(x_i)\}}$$
 (3.1)

onde $a(x_i)$ é a dissimilaridade média do objeto (x_i) em relação a todos os demais objetos da classe A e $b(x_i)$ é a menor dissimilaridade média de (x_i) dos objetos de uma outra classe B.

A seguir, aplicou-se o método de particionamento não supervisionado FCM sobre as imagens anuais e sazonais, para que na sequência fossem produzidas PBGQ contendo seus respectivos graus de pertinência. A Figura 3.2 abaixo apresenta as etapas seguidas no desenvolvimento metodológico.

Figura 3.2 – Fluxograma de trabalho apresentando os principais passos seguidos para a partição do Atlântico Sul em províncias biogeoquímicas. Inclui a seleção dos dados utilizados, testes de correlação, reamostragem de variáveis, métodos para delimitar o número de classes e classificação não supervisionada (ver texto para detalhes).





3.5. Elaboração de Cenário Futuro

Nesta etapa do trabalho, foram utilizados dados de anomalias futuras de TSM, CSM e PCM para o período de 2050–2099, com resolução espacial de 1º (110 km no equador), projetadas por uma coleção de modelos de

circulação global do "Projeto Inter-comparativo na fase 5 de Modelos Acoplados" (CMIP5, do inglês *Coupled Model Inter-comparison Project*). Foi considerado o cenário de emissão *Representative Concentration Pathways* 8.5 (RCP 8.5). Dados de saída do modelo são disponíveis em: <esrl.noaa.gov/psd/ipcc/ocn>. Nesse cenário de emissão, a forçante radiativa aumenta até acrescentar 8,5 $W.m^{-2}$ em 2099, sendo representativo de um padrão de desenvolvimento que leva a níveis elevados de concentração de gases do efeito estufa (VUUREN et al., 2011).

Atualmente, mais de 20 grupos de modelagem realizam simulações do CMIP5, utilizando mais de 50 modelos para estudar cenários de mudanças climáticas (KARL et al., 2012). Trabalhos como o de Cabré et al. (2014), Klippel et al., (2016) e Kostadinov et al. (2017) utilizaram cenários futuros simulados pelo CMIP5 para o estudo de mudanças climáticas.

Klippel et al. (2016) utilizaram dados do CMIP5 (TSM e CSM) para estimar a distribuição futura de algumas espécies de tubarões no Atlântico Sudoeste, por meio de modelos de distribuição de espécies específicos. Estes autores observaram que a TSM e CSM exerceram certa influência na distribuição de dois tubarões de natação livre (*Galeorhinus galeus* e *Mustelus schmitti*), estimando períodos de migração destes animais a partir da variação sazonal de TSM e CSM durante períodos de inverno e primavera austral.

As anomalias futuras de TSM, CSM e PCM estimadas pelo modelo CMIP5 foram somadas a seus respectivos valores médios anuais calculados para o período atual entre 2006-2015, resultando uma grade de dados futura considerada nesta análise (Equações 3.1 a 3.3):

$$TSMG = TSM_{anual} + TSM_{a} \tag{3.1}$$

onde *TSMG* é a grade futura de TSM, TSM_{anual} é obtida da base de dados anuais de TSM elaborada neste trabalho (2006–2015) e TSM_a é o

valor de anomalia de TSM estimado pelo modelo CMIP5 (2050–2099), em uma base pixel-a-pixel.

$$CSMG = CSM_{anual} + CSM_{a}$$
(3.2)

onde CSMG é a grade futura de CSM, CSM_{anual} é obtida da base de dados anuais de CSM elaborada neste trabalho (2006–2015) e CSM_a é o valor de anomalia de CSM estimado pelo modelo CMIP5 (2050–2099).

$$PCMG = PCM_{anuais} + PCM_{a}$$
(3.3)

onde *PCMG* é a grade futura de CSM, *PCM*_{anual} é obtida da base de dados anuais de PCM elaborada neste trabalho (2006–2015) e *PCM*_a é o valor de anomalia de PCM estimado pelo modelo CMIP5 (2050–2099).

Os dados de BAT foram mantidos invariantes nesta análise, considerando-se que o fundo do mar não deve sofrer alterações nesta escala de tempo, na escala espacial de bacia oceânica. Como a variável PAR não está disponível nas estimativas do CMIP5, não foi incluída nesta análise de cenário futuro.

O novo conjunto de dados simulados composto pelas variáveis TSMG, CSMG, PCMG e BAT, foi reamostrado para a resolução espacial de 9 km e submetido à classificação pelo FCM. Adotou-se utilizar a mesma resolução espacial com o intuito de comparar as PBGQ do cenário futuro com as PBGQ obtidas da base de dados anuais (Figura 3.3).

Figura 3.3 - Fluxograma da análise de cenário futuro, incluindo os dados do modelo climático CMIP5 utilizados, processo de reamostragem, aplicação do *Silhouette* e aplicação do FCM (ver texto para detalhes).



Fonte: Próprio Autor

4 **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Nesta sessão são apresentados os resultados obtidos no trabalho, assim como a discussão destes em relação à literatura existente. Além de mapas contendo valores médios e respectivos desvios padrão das variáveis estudadas (item 4.1), são expostos os testes de correlação entre as variáveis (item 4.2), as PBGQ delimitadas a partir das abordagens anual (item 4.3) e sazonal (item 4.4), e a representação de um cenário futuro indicando as PBGQ para o ano de 2099 no Atlântico Sul (item 4.5).

4.1. Valores médios e desvios padrão das variáveis ambientais

Para compreender o comportamento médio e a variabilidade das variáveis ambientais utilizadas no trabalho, apresentamos os valores médios e respectivos desvios padrão das variáveis ambientais TSM, CSM, PAR e PCM no período 2006-2015, juntamente com um mapa batimétrico do oceano Atlântico Sul (Figuras 4.1 a 4.5).

4.1.1. TSM

De modo geral, a temperatura da superfície do mar varia com a latitude (Figura 4.1A). Valores de TSM médios mais elevados, próximos a 30°C, são observados na região tropical (aqui entre as latitudes de 20°S e 10°N), região de ocorrência dos ventos alísios. Os valores mínimos de TSM são observados em latitudes mais altas, entre 40°S e 60°S.

Determinadas regiões do Atlântico Equatorial oriental são mais frias que regiões de latitudes mais altas, sendo identificadas como "línguas frias" (KLINGER; HAINE, 2017). Boa parte da borda oriental do Atlântico Sul é mais fria do que grandes áreas mais a oeste. Exemplos notáveis de áreas caracterizadas por águas mais frias associadas com processos de ressurgência localizam-se na costa oeste da América do Sul, no Oceano Pacífico e na costa sudoeste da África, no Atlântico Sul.

Observando a Figura 4.1B, percebe-se uma maior variabilidade dos valores de TSM, com desvio padrão próximo a 6,5 °C entre 30°S a 50°S,

região de ocorrência de ventos fortes de oeste que atuam no transporte de massas de água.



Figura 4.1 – Valores médios (A) e desvios padrão (B) da temperatura da superfície do mar para o período de 2006-2015. Os valores médios variam de -0,5 °C (azul) a 31 °C (marrom). Os valores de desvio padrão variam de 0 °C (azul) a 6,5 °C (marrom).

Fonte: Próprio Autor

O regime de variação das temperaturas nos oceanos é suavizado por certas propriedades físicas da água, como o alto calor específico, podendo absorver ou perder grandes quantidades de calor com pouca variação de temperatura. Além disso, o oceano é resfriado principalmente pela evaporação e como o calor latente de evaporação da água é alto,

grandes quantidades de calor podem ser transferidas e armazenadas como vapor de água com variação relativamente baixa da temperatura da água (CASTELLO; KRUG, 2015).

Ainda que esforços tenham sido realizados para estabelecer limites latitudinais a diferentes zonas de temperaturas, pode não haver um significado ecologicamente robusto no ambiente pelágico onde as correntes marinhas transportam águas com diferentes temperaturas e onde também ocorrem variações graduais de temperatura por processos de mistura.

4.1.2. CSM

A radiação solar penetra na coluna de água. A absorção da luz depende, entre outros fatores, da quantidade de clorofila-*a* armazenada nas células do fitoplâncton. Medindo a radiância emergente da água ou a reflectância de sensoriamento remoto em diferentes comprimentos de onda, incluindo aqueles onde ocorre a banda de absorção pela clorofila, é possível estimar a concentração de clorofila (LALLI; PARSONS, 1997).

Uma vez que a estimativa da CSM com dados de sensoriamento remoto da cor do oceano só é viável em áreas livres de nuvens, dados diários apresentam lacunas devido à cobertura de nuvens. A qualidade das estimativas de CSM depende da qualidade do mascaramento de nuvens, que tem sido melhorado constantemente.

A própria estimativa da CSM por satélite pode apresentar incertezas e desvios, pois é baseada em uma abordagem empírica (HU et al., 2012). Os coeficientes do algoritmo utilizado são gerados e atualizados com base em resultados de validações e estudos de intercomparações. Ainda assim, problemas são comuns em zonas com altos gradientes e quantidades de material em suspensão e falta de dados *in situ* de radiâncias para calibração dos algoritmos de satélite. O ângulo de observação e o ângulo zenital solar também influenciam a qualidade dos produtos de sensoriamento remoto (FENG; HU, 2016).

A Figura 4.2A mostra as concentrações médias de clorofila-*a* no Atlântico Sul entre 2006-2015. Algumas das maiores concentrações médias de clorofila para este período de tempo estão localizadas perto das costas continentais da África e América do Sul (15,5 mg.m⁻³). Nas regiões costeiras ocorre maior aporte de água doce dos continentes e processos de ressurgência costeira que aumentam a concentração de nutrientes dissolvidos na coluna de água incrementando o aumento de biomassa fitoplanctônica. Os desvios padrão são mostrados na Figura 4.2B. Da mesma maneira, observam-se os maiores valores localizados nas regiões costeiras da América do Sul e África (6,2 mg.m⁻³), em decorrência da maior variabilidade existente nestas regiões. A abundância relativa do fitoplâncton pode ser estimada a partir da cor do oceano como mostrado na Figura 4.2. A clorofila é mais abundante onde as correntes oceânicas ou os processos de mistura trazem nutrientes para a camada superficial onde podem ser utilizados pelo fitoplâncton.

As populações de fitoplâncton, como indicado pelas concentrações de clorofila, respondem tanto a mudanças sazonais (de curto prazo) quanto a climáticas (longo prazo). A produção primária fitoplanctônica pode ser afetada indiretamente por fatores climáticos, como mudanças nas temperaturas da água e ventos superficiais, que afetam a mistura dentro da coluna de água e a disponibilidade de nutrientes. As mudanças na cobertura de nuvens podem reduzir ou aumentar a energia solar disponível para a fotossíntese, e também podem afetar a produção primária (LALLI; PARSONS, 1997).

Figura 4.2 – Valores médios (A) e desvios padrão (B) da concentração de clorofila-*a* na superfície do mar para o período de 2006-2015. Os valores médios variam de 0 (azul) a 15,5 (marrom) mg.m⁻³. Os valores do desvio padrão variam de 0 (azul) a 6,2 (marrom) mg.m⁻³



Fonte: Próprio Autor

4.1.3. PAR

A luz solar na faixa espectral entre 400nm e 700nm (PAR) contribui para aquecer o oceano superior, modificando o contraste de densidade entre a camada de mistura e as camadas mais profundas. As variações resultantes na profundidade e temperatura da camada de mistura desempenham um papel importante no clima oceânico e nos processos de interação entre o oceano e a atmosfera.

Valores médios e desvios padrão mais elevados da PAR, em torno de 51,0 Einsten.m⁻².d⁻¹ e 4,9 Einsten.m⁻².d⁻¹ respectivamente, são observados próximos às regiões equatorial e tropical onde ocorre maior incidência da radiação solar ao longo do ano (Figura 4.3).

Em localidades abaixo de 40°S há o predomínio dos valores médios mais baixos da PAR, com aproximadamente 12,0 Einsten.m⁻².d⁻¹, onde a radiação solar não é tão intensa. Latitudes mais altas experimentam uma variabilidade sazonal maior na PAR do que latitudes mais baixas. Diferenças latitudinais na elevação solar podem afetar a quantidade (magnitude) e a qualidade (variação espectral) da PAR entrando na coluna de água (CAMPBELL; AARUP, 1989). Outra consequencia da baixa elevação solar é o aumento na reflexão superficial. Perdas na radiação incidente devido à reflexão, que são da ordem de 4-6% em baixas latitudes, podem ser significativamente maiores em latitudes mais altas.

Figura 4.3 - Valores médios (A) e desvios padrão (B) da radiação fotossinteticamente disponível para o período de 2006-2015. Os valores médios variam de 12 (azul) a 51 (marrom) Einsten.m⁻².d⁻¹. Os valores de desvio padrão variam de 0,15 (azul) a 4,9 (marrom) Einsten.m⁻².d⁻¹.



Fonte: Próprio Autor

4.1.4. PCM

Em geral, propriedades como a temperatura, salinidade e densidade variam com a profundidade no oceano. Entretanto, próximo a superficie, a variação vertical dessas propriedades é bem menor que em outras profundidades. A razão desta uniformidade vertical é devido à mistura turbulenta, que é orden de magnitude mais intensa proximo a superficie do que em outras partes da coluna de agua. Por esta razão, a camada superior é geralmente referenciada como a camada de mistura (KLINER; HAINE, 2017). Ao longo do ano, a profundidade da camada de mistura passa por um ciclo de aprofundamento quando as águas de superfície tornam-se mais frias e densas. Da mesma forma, fica mais rasa quando as águas de superfície tornam-se mais quentes. A estratificação mais rasa da PCM durante as estações de primavera e verão é conhecida como picnoclina (ou termoclina) sazonal.

A partir da Figura 4.4 (A e B), observam-se os valores médios e desvios padrão mais elevados de PCM, entre aproximadamente 40°S e 60°S, com 200 metros e 145 metros respectivamente. Tais valores encontram-se elevados possivelmente pela ocorrência dos fortes ventos de oeste que sopram nessas latitudes e consequentemente, tornam a PCM mais profunda e com maior variabilidade em tais localidades.

Além do ciclo anual da PCM, há um ciclo diurno correspodente ao ciclo da TSM, com uma picnoclina (e termoclina) diurna se desenvolvendo nos metros superiores do oceano (KAWAII; WADA, 2007). Valores típicos da PCM no verão variam entre 20 a 50 m e entre 60 a 200 m no inverno, em latitudes médias. Valores máximos podem ser observados na região tropical, assim como, mínimos nas regiões de línguas frias e bordas oceânicas frias (KAWAII; WADA, 2007).



Figura 4.4 - Valores médios (A) e desvios padrão (B) da profundidade da

Fonte: Próprio Autor

4.1.5. Batimetria

A Figura 4.5 ilustra a batimetria do oceano Atlântico Sul, variando de 0 a ~7000 metros de profundidade. Valores mais rasos até cerca de 200 metros, são observados nas plataformas continentais da América do Sul e África. Valores mais profundos são encontrados nas regiões de planícies abissais oceânicas. Também são ressaltadas determinadas feições batimétricas, como a Dorsal Meso Atlântica, Cadeia Vitória-Trindade e Cadeia vulcânica de Walvis. Estas feições são mais bem discutidas nos itens seguintes do trabalho (4.3 e 4.4).



Fonte: Adaptado de Stanton et al. (2006).

4.2. Correlações entre as variáveis ambientais

Foram realizados testes de correlação entre as variáveis ambientais com o intuito de evitar redundância de informações durante o processo de particionamento com o método *Fuzzy C-means*. Foram gerados mapas de correlação entre as séries temporais das variáveis (Figura 4.6), não sendo observados valores médios maiores que 0,7 na maioria dos testes realizados (Tabela 4.1).

Exceção foi obtida entre as variáveis CSM e K490, com valor médio do coeficiente de 0,963 (Figura 4.7). Como a CSM é considerada uma variável chave neste tipo de classificação em PBGQ, optou-se por não utilizar a variável K490 na aplicação do método Fuzzy C-means. Além disso, a variável PCM também agrega informação sobre a estrutura vertical da coluna de água de forma similar ou ao menos complementar à informação aportada pela variável K490. Desta forma, o conjunto de variáveis utilizadas no método FCM é composto por: CSM, TSM, PCM, PAR e BAT.

Variáveis	Valor Médio de Correlação
CSM x TSM	-0,283
CSM x PAR	-0,073
CSM x K490	0,963
CSM x PCM	0,121
K490 x PCM	0,103
K490 x PAR	-0,068
PCM x PAR	-0,308
TSM x K490	-0,256
TSM x PCM	-0,251
TSM x PAR	0,189

Tabela 4.1 - Valores médios de correlação entre as variáveis selecionadas, destacando em negrito o valor médio de correlação entre as variáveis CSM x K490.

Fonte: Próprio Autor

Figura 4.6 - Mapas de correlação entre as variáveis (A) CSM x TSM; (B) CSM x PAR; (C) CSM x PCM; (D) K490 x PCM; (E) K490 x PAR; (F) PCM x PAR; (G) TSM x K490; (H) TSM x PCM; (I) TSM x PAR. Os valores de correlação variam de -1 (azul) a 1 (vermelho).



Fonte: Próprio Autor

Figura 4.7 - Mapa de correlação entre as variáveis CSM x K490. Os valores de correlação variam de -1 (azul) a 1 (vermelho).



Fonte: Próprio Autor

4.3. Províncias Biogeoquímicas Anuais

A partir da aplicação do critério *Sihouette* sobre os dados anuais (Figura 4.8) foram delimitadas oito classes de entrada no algoritmo FCM, resultando na partição do oceano Atlântico Sul em 8 PBGQ (Figura 4.9). Trabalhos anteriores como o de Spalding et al. (2012), Longhurst (2007) e Schlitzer et al. (2002), dividiram o oceano Atlântico Sul em 10, 11 e 6 PBGQ, respectivamente. Importante destacar que nenhum destes autores utilizou uma métrica estatística objetiva para identificar um número ideal de partições.

Figura 4.8 - Gráfico da aplicação do critério *Silhouette* indicando o número de 8 classes a partir dos dados anuais de entrada. O eixo vertical indica o número de classes e o eixo horizontal a distribuição dos objetos (dados) em cada classe sugerida.



A partir da aplicação do FCM, foram gerados mapas da distribuição espacial das PBGQ e dos graus de pertinência de cada pixel à sua respectiva PBGQ (Figura 4.10). Esta metodologia favoreceu a observação de feições oceanográficas no Atlântico Sul. Longhurst (2007) descreveu as províncias com base em informações históricas sobre os padrões de

circulação oceânica, não apresentando visualmente a presença destas feições em sua principal obra.

Figura 4.9 – Representação das PBGQ geradas pelo algoritmo FCM a partir das variáveis de entrada: temperatura da superfície do mar, concentração de clorofila-*a*, radiação fotossinteticamente disponível, profundidade da cada de mistura e batimetria. Cada cor representa uma PBGQ.



Fonte: Próprio Autor

A distribuição aproximadamente zonal das PBGQ anuais indica uma variação latitudinal, ainda que com assimetrias em localidades próximas aos continentes sul-americano e africano. Estas assimetrias apontam regiões banhadas por correntes oceânicas e feições oceanográficas como ressurgências.

Os valores médios, desvios padrão e mínimos-máximos de cada variável para as respectivas PBGQ podem ser vistos na Tabela 4.2. A distribuição das áreas das 8 PBGQ são apresentadas na Tabela 4.3. Estas informações subsidiaram a caracterização das PBGQ quanto à dinâmica oceanográfica atuante em cada região.
				0.	
PBGQ	TSM	CSM	PAR	PCM	BAT
1	26,94 ± 0,85	0,13 ± 0,95	46,66 ± 2,85	29,43 ± 12,54	-3895,11 ± 1356,48
	(25,18 - 29,77)	(0,03 - 0,47)	(36,92 - 55,99)	(10 - 59,56)	(7544 – 403)
2	24,44 ± 0,90	0,07 ± 0,27	44,71 ± 3,08	43,18 ± 13,77	-4172,47 ± 1116,49
	(21,63 - 27,18)	(0,03 - 0,20)	(36,93- 49,59)	(12,23 - 65)	(6545 – 390)
3	20,91 ± 1,13	0,14 ± 0,57	38,39 ± 3,50	51,95 ± 14,16	-4011,79 ± 1145,82
	(17,67 - 24,39)	(0,05 – 0,53)	(30,54 - 48,09)	(13,80 - 82,66)	(6060 – 33)
4	17,26 ± 1,27	0,33 ± 1,25	32,37 ± 3,36	60,89 ± 17,94	-3907,84 ± 1561,32 (-
	(13,17 - 21,10)	(0,12 - 0,79)	(27,22 - 38,10)	(10,36 - 92,27)	(5840 – 167)
5	12,46 ± 1,45 (8,86 - 16,81)	0,41 ± 0,55 (0,23 - 1,01)	27,95 ± 2,69 (23,02 - 34,57)	75,71 ± 20,43 (20,04 - 129,27)	-4144,12 ± 1627,13 (6103 – 224)
6	7,56 ± 1,35	0,31 ± 0,59	24,22 ± 2,60	102,82 ± 22,64	-3235,13 ± 1904,13
	(3,21 - 11,59)	(0,17 - 0,78)	(19,20 - 29,32)	(35,11 - 82,91)	(6147 – 167)
7	4,04 ± 0,98 (0,97 - 6,68)	0,29 ± 0,20 (0,13 - 0,67)	20,37 ± 1,49 (16,11 - 24,60)	119,43 ± 15 (84,76 - 185, 45)	-3733,72 ± 902,28 (6630 - 77)
8	1 ± 0,71 (-0,82 - 3,22)	0,31 ± 0,14 (0,13 - 0,67)	16,98 ± 1,33 (13,53 - 20,84)	161,15 ± 18,02 (88,47 - 200,40)	-3898,81 ± 1058,65 (8278 - 68)

Tabela 4.2 – Valores médios, desvios padrão, máximos e mínimos das variáveis ambientais em cada PBGQ anuais delimitadas pelo método FCM. Os valores de TSM são dados em °C; CSM em mg.m⁻³; PAR em Einsten.m⁻².d⁻¹; PCM e BAT em metros.

Fonte: Próprio Autor

Tabela 4.3 – Áreas das PBGQ delimitadas a partir das abordagens anual e sazonal.

PBGQ	Anual (km ²)	Verão (km²)	Outono (km²)	Inverno (km²)	Primavera (km²)
1	16.171.289,927	12.222.943,219	15.876.581,423	11.391.638,496	8.770.062,378
2	9.269.036,015	8.129.108,847	6.790.548,189	6.911.711,862	8.301.279,597
3	8.529.109,493	6.326.381,706	6.192.764,445	7.122.921,756	8.207.986,969
4	5.113.876,769	3.923.810,045	4.024.933,894	4.517.988,606	4.571.564,727
5	4.404.571,609	3.393.535,712	3.274.590,609	4.371.572,678	4.457.800,700
6	3.228.738,454	3.923.810,045	4.024.933,894	4.517.988,606	4.571.564,727
7	3.251.705,170	3.764.212,530	3.755.337,138	4.109.118,954	3.861.983,640
8	4.887.554,613	5.930.871,979	5.882.151,780	6.642.760,478	6.704.714,302

Fonte: Próprio Autor

Figura 4.10 - Graus de pertinência (0 a 1) pixel-a-pixel referentes às 8 PBGQ anuais obtidas com a aplicação do algoritmo FCM. Os números de 1 a 8 representam as PBGQ mostradas na Figura 4.10.





4.3.1. PBGQ 1 - Sistema Equatorial/Tropical

A PBGQ 1, aqui denominada como "Província Equatorial/Tropical" (Figura 4.10), apresenta a maior área em relação às demais, com 16.171.289,927 km² (Tabela 4.3). As variáveis TSM, CSM, PAR, PCM e BAT apresentam valores médios de 26,94°C, 0,13 mg.m⁻³ e 46,66 Einsten m⁻² d⁻¹, 29,43 metros e -3895,11 metros, respectivamente (Tabela 4.2). Esta PBGQ 1 é caracterizada pela presença de correntes quentes, e intensa radiação solar próximo à região equatorial, além de alta produtividade primária (indexada pela CSM) na costa africana.

A PBGQ 1 é comparável às características e processos oceânicos descritos por Longhurst (2007) que denomina esta parte do Oceano Atlântico Sul como "Província do Atlântico Oeste Tropical" ou *Western Tropical Atlantic Province* (WTRA). Para este autor, os limites físicos da província WTRA são definidos de forma a incluir os processos físicos dominantes desta parte do Atlântico tropical que são fundamentais para a

compreensão de sua ecologia pelágica. Pode-se citar, por exemplo, o campo zonal de ondas de instabilidade tropical no oceano, que se propagam do continente africano até o sul-americano (CHELTON et al., 2000), ou a presença da Corrente da Guiné (CG) que flui na região oriental desta PBGQ. Longhurst (2007) delimita a área de ocorrência da CG como uma PBGQ separada denominada de Guinea Province (GUIN), levando em consideração a importância desta corrente nos processos físicos e biológicos locais. Estes processos são caracterizados principalmente, pela ocorrência de ressurgência costeira, que favorece uma alta produtividade primária, e pela presença de uma termoclina permanente definindo regionalmente uma camada de mistura relativamente rasa.

Vichi et at. (2011) também identificaram a província WTRA por meio de um modelo não paramétrico. Entretanto, seu método de particionamento não considerou as influências físicas e biológicas que ocorrem associadas à CG, não destacando tal região como uma província separada em sua classificação.

Com elevado grau de pertinência (próximo a 1), observa-se a CG localizada ao norte da frente Angola-Benguela (FAB) em aproximadamente 3°N, sendo abastecida pela Contracorrente Norte Equatorial (CCNE) e a Corrente das Canárias. Ao variarem sazonalmente, estas correntes afetam a variabilidade da CG (INGHAM, 1970; HENIN et al., 1986; MEEUWIS; LUTJEHARMS, 1990). A CG apresenta alta produtividade primária em decorrência dos processos de ressurgência costeira que ocorrem em certas localidades próximas do oeste africano, principalmente durante o verão austral (BAKUN, 1978). Esta localidade com alto grau de pertinência, por onde a CG flui assemelhou-se a uma das regiões encontradas por Spalding et al. (2012) caracterizada principalmente pela alta produtividade primária.

Ainda nesta PBGQ, nota-se a Corrente Sul Equatorial (CSE), que ao ramificar-se próximo ao continente sul-americano para sudoeste, dá origem a Corrente do Brasil. O ramo da bifurcação da CSE que flui para

norte-noroeste dá origem à CNB. Na região equatorial, com médio grau de pertinência (próximo a 0,5), infere-se a presença da Contracorrente Sul Equatorial (CCSE) que se bifurca em aproximadamente 30°W e atravessa o Atlântico Sul entre 7°S e 9°S (STRAMMA, 1991). A CCSE apresenta suas camadas superficiais abastecidas pelo ramo sul da CSE e por águas do Atlântico Equatorial, localizadas abaixo da termoclina (MOLINARI, 1982).

4.3.2. PBGQ 2 - Giro Subtropical

A PBGQ 2, aqui denominada como Giro Subtropical (Figura 4.10), apresenta uma área de 9.269.036,015 km² (Tabela 4.3). Esta PBGQ 2 apresentou valores médios de 0,07 mg m⁻³ de CSM (Tabela 4.2), e assemelhou-se ao que foi descrito por Silveira et al. (2004), principalmente quanto aos baixos valores de CSM por ser uma região oligotrófica. Os valores médios encontrados para as variáveis TSM, PAR, PCM e BAT foram de 24,44°C, 44,71 Einsten m⁻² d⁻¹, 43,18 metros e - 4172,47 metros, respectivamente (Tabela 4.2).

Na extremidade mais a oeste do Atlântico Sul, junto ao continente sulamericano entre aproximadamente 19°S e 40° W, observa-se com alto grau de pertinência, uma região caracterizada por ressurgências costeiras. Esta região se estende desde Vitória, ES e percorre a plataforma continental no sentido sul. A Figura 4.11 retrata a região deste fenômeno oceanográfico, destacando a ressurgência de Cabo Frio, RJ, aonde os valores mínimos de TSM chegam a 16°C. O processo de ressurgência ocorre nesta região quando sopram ventos de nordeste intensos e constantes, responsáveis por retirar a água superficial da região e trazer à superfície águas de subsuperfície mais frias e ricas em nutrientes (VALENTIN, 1989; KAMPEL, 2004).

Figura 4.11 – Ressurgências costeiras em Vitória, ES, Cabo de São Tomé e Cabo Frio, RJ. Os valores de TSM variam de 17°C (azul) a 29°C (vermelho). Imagem elaborada pelo Projeto SATPEIXE.



Fonte: Silva JR et al. (1998).

Ao largo da plataforma continental brasileira, ainda fluindo para sul, temos a CB que segundo a classificação de Peterson e Stramma (1991), pode ser considerada como a região da frente da Corrente do Brasil. A leste desta região, tem-se com um médio grau de pertinência (próximo a 0,5) o Giro Subtropical ocupando toda a área central do Atlântico Sul em torno de 30°S.

O GS é influenciado pela atuação dos ventos alísios sobre a superfície do oceano, gerando uma variação sazonal significativa na PCM, o que favorece a ocorrência de baixos valores de CSM (LONGHURST, 2007). Esta PBGQ representa parte do que foi definido por Longhurst (2007) como Província do Giro do Atlântico Sul ou *South Atlantic Gyre Province*

(SATL), por compreender parte da circulação anticiclônica do Atlântico Sul.

Interessante notar a presença de um pequeno filamento com grau de pertinência de aproximadamente 0,5, ao sul do continente africano, associado à Corrente das Agulhas (CA). Segundo Gordon (1985), a CA flui na porção sul da costa africana entre 27°e 40°S. Ao atingir sua porção mais ao sul, a CA realiza o processo de retroflexão, seguindo para o oceano Índico no sentido leste (QUARTLY e SROKOSZ, 1993).

4.3.3. PBGQ 3 - Atlântico Sul

A PBGQ 3 é aqui denominada como "Atlântico Sul" devido à presença da Corrente do Atlântico Sul (CAS) (Figura 4.10). A CAS, inicia-se em aproximadamente 40°S (PETERSON; STRAMMA, 1991) sob a influência de ventos fortes de noroeste que forçam uma grande deriva para leste. Em função de sua presença, pode haver certa dificuldade na distinção entre o limite sul do GS e o limite norte da Corrente Circumpolar Antártica (CCA) (THOMSON, 1971). Mas ainda assim, pode ser considerada como um limite geográfico entre o Giro Subtropical mais a norte e a CCA mais a sul (DEACON, 1933). A CAS atravessa a bacia do Atlântico Sul e bifurcase para norte em torno de 10°E, onde abastece a Corrente de Benguela. Outra ramo bifurcado para sul ao longo do continente africano, encontrase com a Corrente das Agulhas.

Esta PBGQ 3 apresenta uma feição com alto grau de pertinência (próximo a 1) sobre a plataforma continental sul-sudeste brasileira, cujo limite mais a norte chega a 28°S. Esta feição é associada à penetração de águas frias vindas da porção sul do Atlântico Sudoeste principalmente no outono-inverno (KAMPEL; SOUZA, 2005; GARZOLI; GARRAFO, 1989; SILVA JR et al, 1996).

Ao sul da África do Sul, com baixo grau de pertinência, observa-se um pequeno filamento da CA que durante o verão austral, apresenta uma maior variabilidade em sua profundidade (MATANO et al., 1998).

A PBGQ 3 apresenta uma área de 8.529.109,493 km² (Tabela 4.3) e valores médios de TSM, CSM, PAR, PCM e BAT de 20,91°C, 0,14 mg m⁻³, 38,39 Einsten m⁻² d⁻¹, 51,95 metros e -4011,39 metros, respectivamente (Tabela 4.2).

4.3.4. PBGQ 4 - Convergência Subtropical Norte

A PBGQ 4, aqui denominada como Convergência Subtropical Norte (Figura 4.10), abrange a região da Convergência Subtropical onde ocorre a confluência da Corrente do Brasil com a Corrente das Malvinas (CBM) gerando um gradiente térmico superficial ao sul do GS. Esta PBGQ 4 assemelha-se a descrição da província denominada como Província de Convergência Subtropical Sul ou *South Subtropical Convergence Province* (SSTC) apresentada por Longhurst (2007).

Observa-se com alto grau de pertinência (próximo a 1) a presença da Corrente das Malvinas (CM) fluindo no sentido norte sobre a plataforma continental Argentina, até aproximadamente 35°S. A CM é uma corrente relativamente forte e fria, com TSM média de 6° C, o que favorece a ocorrência de florações de algas, aumentando a produtividade primária nesta região (BRANDINI et al., 2000). Por conta deste aspecto, esta PBGQ 4 sugere apresentar certa influência das variáveis CSM e TSM, apresentando valores médios de 17,26°C e 0,33 mg m⁻³, respectivamente (Tabela 4.2), com uma área de 5.113.876,769 km² (Tabela 4.3). Os valores médios de PAR, PCM e BAT são de 32,37 Einsten m⁻² d⁻¹, 60,89 metros e -3907,84 metros, respectivamente. A PBGQ 4 apresenta similaridade com uma ecorregião definida por Spalding et al. (2012) e Reygondeau et al. (2013), sendo caracterizada como um braço da CCA que ao seguir na direção norte forma a CM, na porção sudoeste do Atlântico Sul.

Do outro lado do Atlântico Sul, a Corrente da Benguela inicia-se como um fluxo em torno da extremidade sul do Giro Subtropical próximo ao continente africano. Com os ventos de sudeste soprando da costa africana sobre a região oceânica, ocorrem afloramentos de águas frias e

ricas em nutrientes, o que promove o desenvolvimento do fitoplâncton e da produtividade primária nesta região (BOYER et al., 2000). Esta região de origem da CBG e com alta produtividade também foi identificada nas regiões delimitadas por Longhurst (2007), Spalding et al. (2012) e Reygondeau et al. (2013).

4.3.5. PBGQ 5 - Convergência Subtropical Sul

A PBGQ 5 (Figura 4.10) é aqui denominada como "Convergência Subtropical Sul". Diferente da PBGQ 4, esta PBGQ 5 localiza-se entre aproximadamente 40°S e 50°S e ocupa a porção sul da Convergência Subtropical, onde ocorre uma variação brusca de TSM e salinidade (DEACON, 1933). Apresenta uma área de 4.404.571,609 km² (Tabela 4.3), e valores médios de TSM, CSM, PAR, PCM e BAT de 12,46°C, 0,41 mg m⁻³, 27,95 Einsten m⁻² d⁻¹, 75,71 metros e -4144,12 metros, respectivamente (Tabela 4.2).

Nesta PBGQ 5 é notada a presença da CM com elevado grau de pertinência sobre a costa Argentina (45°S). A medida que se propaga para o norte, a CM se afasta da costa, mas continua ocupando a plataforma continental Argentina, até 38°S. Uma feição de alto grau de pertinência (próximo de 1) observada nesta PBGQ 5 é a Frente Subantártica, localizada na porção leste do Atlântico Sul próximo a 20°E, e fluindo até atravessar a bacia do Atlântico Sul.

4.3.6. PBGQ 6 - Subantártica

A PBGQ 6, aqui denominada como "Subantártica" (Figura 4.10), apresenta como principal feição a Frente Subantártica (FSA), representando a porção mais ao norte da CCA. A FSA nesta PBGQ 6 apresenta alto grau de pertinência (próximo a 1), estendendo-se de oeste para leste desde a América do Sul, cruzando a bacia do Atlântico entre aproximadamente 42°S e 48°S, sendo uma região de floração de algas devido a ocorrência de ressurgências (KLINCK; NOWLIN, 1986). Em decorrência dos processos de ressurgência nesta PBGQ 6, ocorrem

valores relativamente elevados de CSM, apresentando um valor médio de 0,31 mg m⁻³ e valor máximo de 0,78 mg m⁻³ (Tabela 4.2).

Além da CSM, os valores médios de TSM, PAR, PCM e BAT nesta PBGQ 6 são de 7,56°C, 24,22 Einsten m⁻² d⁻¹, 102,82 metros e -3235,13 metros, respectivamente. Ocupa a menor área de todas as 8 PBGQ anuais, com 3.228.738,454 km² (Tabela 4.3).

4.3.7. PBGQ 7 - Polar

A PBGQ 7, denominada como "Polar" (Figura 4.10), está localizada sobre a região de ocorrência da Frente Polar (FP), que se estende ao sul da FSA em torno de 50°S. Nesta região ocorrem fortes ventos de oeste (GORDON et al., 1977). Esta PBGQ 7 assemelha-se à Província do Anel Subantártico ou *Subantarctic Water Ring Province* (SANT) descrita por Longhurst (2007). Vichi et al. (2011) e Reygondeau et al. (2013) também descrevem esta província como uma região rica em fitoplâncton.

Em relação a esta PGBQ 7, sua área compreende 3.251.705,170km² (Tabela 4.3), sendo uma região onde ocorre alta produtividade primária, forte intensidade de ventos e baixos valores de temperatura. Os valores médios de TSM, CSM e PCM são de 4,04°C, 0,29 mg m⁻³, 102,82 metros, respectivamente (Tabela 4.2). Os valores médios da PAR e BAT são de 20,37 Einsten m⁻² d⁻¹ e -3733,72 metros, respectivamente.

A partir da Passagem de Drake e com alto grau de pertinência, nota-se a Frente Polar (55º S e 65º W) bifurcando-se para norte, onde avança sobre a plataforma continental Argentina, deixando a leste as Ilhas Malvinas.

A região associada à PBGQ 7 também foi delimitada por Spalding et al. (2012) indicando a presença de vórtices no sentido horário (ciclônicos), além de se caracterizar como um limite geográfico até onde somente espécies de aves e mamíferos bem adaptadas conseguem migrar.

4.3.8. PBGQ 8 - Circumpolar Antártica

A PBGQ 8, aqui denominada como "Circumpolar Antártica", leva este nome em função da Corrente Circumpolar Antártica. Esta PBGQ 8 compreende parte da Província Antártica ou *Antartic Province* (ANTA), que segundo Longhurst (2007), Vichi et al. (2011) e Reygondeau et al. (2013), é caracterizada por incluir o ramo sul da CCA. Situa-se entre a FP em ~50°S e a Divergência Antártica entre 60°S-65°S.

Na PBGQ 8 nota-se o predomínio da CCA que flui de oeste para leste em torno da Antártica, onde a TSM média varia entre -1 e 5°C (DEACON, 1984). Nesta região, entre as latitudes 50°-60°S há a presença de ventos fortes e constantes que sopram de oeste e noroeste (LONGHURST, 2007) o que pode influenciar a variabilidade da PCM sobre o conjunto de pixels com elevados graus de pertinência. Nesta PBGQ 8 os valores médios de TSM, CSM, PAR, PCM e BAT são de 1°C, 0,31 mg m⁻³, 16,98 Einsten m⁻² d⁻¹, 161,15 metros e -3898,81 metros, respectivamente (Tabela 4.2), apresentando uma área de 4.887.554,613 km² (Tabela 4.3).

4.4. Províncias Biogeoquímicas Sazonais

Aqui são apresentados os mapas das PBGQ e graus de pertinência obtidos em escala sazonal, na seguinte ordem: Verão, Outono, Inverno e Primavera. Foram calculadas as áreas de cada PBGQ sazonal (Tabela 4.3) e respectivos valores médios, desvios padrão e mínimos-máximos das variáveis ambientais.

Analisando de modo geral os graus de pertinência das PBGQ sazonais é possível identificar influência de feições batimétricas como a Dorsal Meso Atlântica, Cadeia Vulcânica de Walvis e Cadeia Vitória-Trindade. As associações com feições batimétricas ainda não haviam sido comentadas em outros trabalhos anteriores sobre províncias biogeoquímicas que abordassem o Atlântico Sul. Por esse aspecto, é importante a identificação de feições batimétricas nesse tipo de estudo, para o monitoramento de espécies bentônicas, assim como aspectos geológicos.

Na análise sazonal, foram mantidas algumas denominações empregadas nas PBGQ anuais, como por exemplo, as PBGQ 1 e 2 (Sistema Equatorial/Tropical e Giro Subtropical), por apresentarem um padrão de distribuição espacial semelhante. Entretanto, certas PBGQ sazonais foram renomeadas em decorrência de aspectos específicos observados em suas respectivas regiões geográficas, como por exemplo, a PBGQ 5 que se apresentou distinta da PBGQ encontrada na classificação anual. Diferenças como a observada em relação à PBGQ 5 podem ser associadas à sensibilidade do método FCM a um volume grande de dados de entrada.

4.5. Verão

Durante o período de verão austral, o deslocamento da Zona de Convergência InterTropical (ZCIT) entre 5°N e 1°N, promove uma alteração no regime de ventos principalmente na região equatorial (HASTENRATH; LAMB, 1977). Essa variabilidade meteorológica está também relacionada com a distribuição das correntes oceânicas e sistema anticiclônico do hemisfério sul, deslocando o posicionamento das PBGQ encontradas nesta estação do ano.

Assim como nas PBGQ anuais, a Figura 4.12 apresenta uma distribuição zonal no período de verão, com assimetrias principalmente em localidades próximas aos continentes sul-americano e africano. A Figura 4.13 retrata os graus de pertinência de cada PBGQ sazonal de verão e os valores médios, desvios padrão e mínimos-máximos de cada variável para as respectivas PBGQ podem ser vistos na Tabela 4.4.

Figura 4.12 - Representação das PBGQ de verão geradas pelo algoritmo FCM a partir das variáveis de entrada: temperatura da superfície do mar, concentração de clorofila-*a*, radiação fotossinteticamente disponível, profundidade da cada de mistura e batimetria. Cada cor representa uma PBGQ.



Fonte: Próprio Autor

Einsten m ⁻² d ⁻¹ ; PCM e BAT em metros.								
PBGQ	TSM	CSM	PAR	PCM	BAT			
1	26,73 ± 1,29	0,13 ± 1,05	45,30 ± 5,94	25,17 ± 11,28	-3688,82 ± 1452,20			
	(22,42 - 31,46)	(0,01 - 0,35)	(32,20 - 59,13)	(10 - 57,42)	(5766 – 68)			
2	16,22 ± 1,30	0,19 ± 0,79	52,77 ± 2,93	24,13 ± 5,50	-4020,06 ± 1094,49			
	(11,93 - 20,08)	(0,04 - 0,65)	(42,27 - 62,02)	(10 - 50,37)	(6545 - 390)			
3	18,94 ± 1,36	0,06 ± 0,69	35,35 ± 3,57	26,63 ± 5,80	-3958,25 ± 1424,95			
	(16,11 - 21,71	(0,03 - 0,21)	(26,46 - 50,17)	(12,51 - 45,35)	(5808 –158)			
4	11,66 ± 1,47	0,48 ± 0,64	37,76 ± 3,33	32,55 ± 8,89	-4082,43 ± 1567,97			
	(7,43 - 16,07)	(0,22 - 1,41)	(31,03 - 54,75)	(60,46 - 14,12)	(6102 - 403)			
5	23,09 ± 1,57	0,05 ± 0,12	54,88 ± 2,77	26,20 ± 7,96	-4318,45 ± 1006,61			
	(18,52 - 25,92)	(0,02 - 0,20)	(47,05 - 60,29)	(12,55 - 50,87)	(7544 – 167)			
6	8 ± 1,43	0,44 ± 0,79	43,43 ± 2,58	47,52 ± 13,77	-3769,52 ± 1881,22			
	(3,45 - 12,21)	(0,22 - 1,20)	(35,98 - 51,69)	(17,13 - 83,87)	(6147 – 224)			
7	3,95 ± 1,15	0,38 ± 0,34	38,26 ± 2,51	71,71 ± 15,32	-3637,13 ± 1241,96			
	(0,88 - 7,33	(0,16 - 0,86)	(31,99 - 44,75)	(39,67 - 113,08)	(6230 –400)			
8	-0,3 ± 1,05	0,37 ± 0,25	33,54 ± 2,04	122,79 ± 27,92	-3851,82 ± 1044,55			
	(-2 - 3,33)	(0,11 - 0,89)	(27,96 - 39,14)	(53,80 - 177,14)	(8278 – 68)			

Tabela 4.4 - Valores médios das variáveis obtidas na análise de verão, seguidos de seus respectivos desvios padrão e valores mínimos-máximos. Os valores de TSM são dados em °C; CSM em mg m⁻³; PAR em Einsten m⁻² d⁻¹; PCM e BAT em metros.

Fonte: Próprio Autor

Figura 4.13 - Graus de pertinência (0 a 1) pixel-a-pixel referentes às 8 PBGQ obtidas com a aplicação do algoritmo FCM no período de verão. Os números de 1 a 8 representam as PBGQ (ver Figura 4.12).



Fonte: Próprio Autor

4.5.1. PBGQ 1 de verão - Sistema Equatorial/Tropical

A PBGQ 1 de verão (Figura 4.13), aqui denominada de "Sistema Equatorial/Tropical", apresenta sua região oriental caracterizada pela presença da CG com alto grau de pertinência (próximo a 1) ao norte do equador, que flui no sentido oeste-leste (HENIN et al., 1986). De acordo com Spalding et al. (2012), a CG durante o verão apresenta intensos processos de ressurgência costeira no continente africano, repercutindo no aumento da produtividade primária nesta região.

Em torno de 10°S a CB pode ser identificada com um alto grau de pertinência (próximo a 1) seguindo no sentido sul. Em torno de 20°S, a área banhada pela CB passa a apresentar um médio grau de pertinência (próximo a 0,5) sendo caracterizada por um filamento associado ao eixo central da CB. Esta feição diminui em direção sul até desaparecer em ~35°S. Durante o verão austral a CB geralmente desloca-se com maior intensidade na direção sul-sudoeste, percorrendo entre 10 e 50km por dia (GARZOLI; BIANCHI, 1987).

Em decorrência da maior radiação solar sobre a região desta PBGQ 1 de verão, tem-se a TSM e PAR com valores médios elevados, apresentando 26,73°C e 45,30 Einsten m⁻² d⁻¹, respectivamente (Tabela 4.4). Os valores médios de CSM, PCM e BAT foram de 0,13 mg m⁻³; 25,17 metros e - 3688,82, respectivamente, com uma área de 12.222.943,219 km² e uma diminuição de 25% em relação a PBGQ 1 da classificação anual (Tabela 4.3).

4.5.2. PBGQ 2 de verão - Giro Subtropical

Na PBGQ 2 de verão (Figura 4.13), aqui denominada de "Giro Subtropical", encontra-se a ressurgência costeira sobre a plataforma continental sudeste brasileira, entre Vitória e Cabo Frio (grau de pertinência próximo a 0,5). Inclui também uma parte mais ao sul da frente interna da Corrente do Brasil e o GS. Esta PBGQ 2 de verão pode ser considerada oligotrófica, apresentando valor médio de CSM de 0,19 mg m-³ (Tabela 4.4), padrão característico do GS (< 0,2 mg m⁻³). Os valores

médios de TSM, PAR e PCM foram de 16,22°C; 52,77 Einsten m⁻² d⁻¹ e 24,13 metros, respectivamente. Apresentou uma área de 8.129.108,847 km² e uma diminuição de 13% em relação a PBGQ 2 da classificação anual.

Com elevado grau de pertinência (próximo a 1) observa-se a região da CA ao sul da África do Sul. O modo dominante de variabilidade da CA é sob a forma de vórtices de mesoescala, conhecidos como "Vazamento das Agulhas" que ocorrem com maior frequência durante os meses de verão austral (BRYDEN et al., 2003; RODRIGUES, 2015). Por conta desse fenômeno, a CA aparece com maior grau de pertinência no verão do que na classificação anual.

Na classificação sazonal de verão observa-se uma influência da batimetria nesta PBGQ 2 de verão na região das plataformas continentais entre a África do Sul e Namíbia (35°S e 16°S) e nas regiões nordeste e norte do Brasil (10°S e 10°N). No lado oeste do Atlântico Sul, nota-se uma feição de baixa pertinência associada à Cadeia Vitória-Trindade em torno de ~20°S (Figura 4.5). Esta é caracterizada pelo predomínio de rochas alcalinas basálticas (MOTOKI et al., 2012). Em decorrência destas associações, a batimetria parece ter apresentado certa influência nesta PBGQ, com um valor médio de -4020,06 metros (Tabela 4.4).

4.5.3. PBGQ 3 de verão - Atlântico Sul

A PBGQ 3 de verão (Figura 4.13) é aqui denominada de "Atlântico Sul", por ser associada à CAS. Observa-se parte da região da CM com médio grau de pertinência (próximo a 0,5) entre 35° e 45°S. Também é observada a região da CAS como principal feição desta província, com elevado grau de pertinência (próximo a 1). A CAS bifurca-se em ~10°E, onde passa a alimentar a CBG.

Esta PBGQ 3 apresenta uma área de 6.326.381,706 km² (Tabela 4.3), com uma diminuição de 26% em relação à PBGQ 3 da classificação anual. Apresenta valores médios de TSM, CSM, PAR, PCM e BAT de

18,94°C; 0,06 mg m⁻³; 35,35 Einsten m⁻² d⁻¹; 26,63 metros e -3958,35 metros, respectivamente (Tabela 4.4).

4.5.4. PBGQ 4 de verão - Convergência Subtropical

A PBGQ 4 de verão (Figura 4.13), denominada de "Convergência Subtropical", abrange a área da CM onde flui sobre a plataforma continental argentina no sentido norte, em torno de ~38°S. Como mencionado anteriormente, esta é a região da Confluência Brasil-Malvinas (Figura 4.14), sendo considerada uma das mais energéticas do Atlântico Sul. Sua posição média oscila ao longo do ano, localizando-se mais ao norte no inverno e mais ao sul no verão austral (OLSON et al., 1988; CATALDI et al., 2010).

Figura 4.14 - Imagem de TSM média do mês de novembro de 2009 para a região da Confluência Brasil-Malvinas no Oceano Atlântico Sul-Sudoeste.



Fonte: Pezzi et al. (2016).

A PBGQ 4 de verão aqui delimitada, assemelha-se a províncias identificadas nos trabalhos de Longhurst (2007), Spalding et al. (2012) e Reygondeau et al. (2013). Porém, no presente trabalho é possível observar a ocorrência de feições oceanográficas por meio dos graus de

pertinência, o que não foi realizado nos outros trabalhos. A área da PBGQ 4 de verão foi estimada em 3.923.810,045 km² apresentando uma diminuição de 24% em relação a PBGQ 4 da classificação anual (Tabela 4.3), e valores médios de TSM, CSM, PAR e PCM de 11,66 °C; 0,48 mg m⁻³; 37,76 Einsten m⁻² d⁻¹; 32,55 metros e -4082,43 metros.

4.5.5. PBGQ 5 de verão - Sistema Sul Equatorial

A PBGQ 5 de verão (Figura 4.13), aqui denominada de "Sistema Sul Equatorial" é observada na parte leste do Atlântico Sul com alto grau de pertinência (aproximadamente 1). O fluxo da Corrente Sul Equatorial (CSE) atravessando a bacia do Atlântico em direção ao Brasil também é associado à esta PBGQ 5.

A CSE oscila entre 15°S e 25°S ao longo do ano, e ao fluir em direção à costa brasileira, bifurca-se em aproximadamente 16°S, onde alimenta a Corrente Norte do Brasil (WIENDERS et al., 2000). Também com alto grau de pertinência, percebe-se a CCSE fluindo para leste, tendo seu limite norte sobre a linha do equador. Esta é uma região com predomínio de águas quentes e salinas principalmente em suas camadas superficiais (MOLINARI, 1982).

A PBGQ 5 apresenta uma área de $3.393.535,712 \text{ km}^2$ (Tabela 4.3) e valores médios de TSM, CSM, PAR, PCM e BAT de $23,09^{\circ}$ C; 0,05 mg m⁻³; 54,88 Einsten m⁻² d⁻¹; 26,20 metros e -4318,45 metros, respectivamente (Tabela 4.4).

4.5.6. PBGQ 6 de verão - Subantártica

A PBGQ 6 de verão (Figura 4.13), denominada de "Subantártica", inclui a região da FSA como principal feição oceanográfica. A região da FSA apresenta médio grau de pertinência (próximo de 0,5) na extremidade oeste do Atlântico Sul (~50°S). Em torno de 58°W, a FSA se estende para leste, onde aumenta seu grau de pertinência (próximo a 1), cruzando a bacia do Atlântico Sul em torno de 45°S. Esta PBGQ 6 apresenta valores médios de TSM, CSM, PAR, PCM e BAT de 8°C; 0,44 mg m⁻³; 43,43

Einsten m⁻² d⁻¹; 47,52 metros e -3769,52 metros (Tabela 4.4), respectivamente. Esta PBGQ 6 de verão ocupa uma área de 3.923.810,045 km² (Tabela 4.3), com um aumento de 21% em relação à classificação anual.

4.5.7. PBGQ 7 de verão - Polar

A PBGQ 7 (Figura 4.13) denominada de "Polar", é associada a presença da Frente Polar, incluindo um região banhada pela CM, com baixo grau de pertinência (próximo a 0,25), fluindo no sentido norte até ~40°S. Passando pela Passagem de Drake e se estendendo em direção ao continente africano, observa-se a FP com alto grau de pertinência (~1), de modo similar ao observado na classificação anual.

Esta PBGQ 7 de verão apresenta uma área de $3.764.212,530 \text{ km}^2$ (Tabela 4.3), apresentando uma variação de 15% em relação à classificação anual. Esta PBGQ 7 de verão apresenta valores médios das variáveis TSM, CSM, PAR, PCM e BAT de 3.95° C; 0.38 mg m^{-3} ; 38,26 Einsten m⁻² d⁻¹; 71,71 metros e -3637,13 metros (Tabela 4.4), respectivamente.

4.5.8. PBGQ 8 de verão - Circumpolar Antártica

A PBGQ 8 de verão (Figura 4.13) denominada de "Circumpolar Antártica", localiza-se sobre uma região de ventos fortes de oeste, que repercutem em altos valores de PCM. Esta PBGQ 8 de verão pode ser caracterizada pela presença da CCA, cruzando toda a extensão da bacia do Atlântico Sul. Em ~50°S, observa-se a FP presente ao sul da Frente Subantártica, que por sua vez, demonstra um baixo grau de pertinência (~0,25).

Esta PBGQ 8 apresenta uma área de 5.930.871,979 km² (Tabela 4.3) com um aumento de 21% em relação à classificação anual. Os valores médios de TSM, CSM, PAR, PCM e BAT de verão são de -0,3°C; 0,37 mg m⁻³; 33,54 Einsten m⁻² d⁻¹; 122,79 metros e -3851,82 metros, respectivamente (Tabela 4.4), semelhantes aos da classificação anual.

4.6. **Outono**

Assim como nas PBGQ de verão, a Figura 4.15 apresenta uma distribuição zonal, com variações latitudinais e assimetrias em localidades próximas aos continentes sul-americano e africano. Na PBGQ 4 de outono, destaca-se uma diminuição da área costeira do continente africano em relação às classificações anual e de verão. A Figura 4.16 retrata os graus de pertinência de cada PBGQ de outono. Os valores médios, desvios padrão e mínimos-máximos de cada variável para as respectivas PBGQ podem ser observados na Tabela 4.5.

Figura 4.15 - Representação das PBGQ de outono geradas pelo algoritmo FCM a partir das variáveis de entrada: temperatura da superfície do mar, concentração de clorofila-*a*, radiação fotossinteticamente disponível, profundidade da cada de mistura e batimetria. Cada cor representa uma PBGQ.



Fonte: Próprio Autor

	em mg m ⁻³ ; PAR em Einsten m ⁻² d ⁻¹ ; PCM e BAT em metros.						
PBGQ	TSM	CSM	PAR	РСМ	BAT		
1	27,73 ± 0,85	0,06 ± 1	43,52 ± 2,77	24,35 ± 9,44	-3918,38 ± 1380,39		
	(23,22 - 30,11)	(0,02 - 0,19)	(30,31 - 53,16)	(10 - 45,79)	(7544 – 403)		
2	22,52 ± 1	$0,08 \pm 0,5$	32,93 ± 4,4	35,46 ± 8	-3979,84 ± 1098,02		
	(19,29 - 24,87)	(0,04 - 0,22)	(22,89 - 47,21)	(10,39 - 60,94)	(6545 - 94)		
3	19,33 ± 1,30	0,05 ± 1,22	28,44 ± 4,2	39,14 ± 10,88	-3951,01± 1444,43		
	(15,12 - 23,09)	(0,05 - 0,77)	(21,20 - 36,41)	(10 - 61,61)	(5807 –158)		
4	14,18 ± 1,59	0,29 ± 0,42	21,98 ± 2	47,49 ± 11,96	-4133 ± -1556,19		
	(9,13 - 17,48)	(0,20 - 0,50)	(2,06 - 16,53)	(15,33 - 74,78)	(6103 – 224)		
5	25,66 ± 0,81	0,12 ± 0,25	42,76 ± 5,39	30,53 ± 7	-4153,41± 1077,78		
	(26,27 - 29,50)	(0,07 - 0,31)	(30,31 - 53,16)	(12,06 - 47,38)	(6118 – 390)		
6	9,18 ± 1,78	0,37 ± 0,52	18,15 ± 2,18	62,38 ± 13,88	-3707,78 ± 1904,94		
	(3 - 13,20)	(0,20 - 0,88)	(8,39 - 27,93)	(19,86 - 91,23)	(6147 – 133)		
7	4,20 ± 1,49	0,27 ± 0,19	13,84 ± 1,81	83,23 ± 14,05	-3554,36 ± 1309,93		
	(0,20 - 8,50)	(0,11 - 0,51)	(8,95 - 20,82)	(43,39 - 135,34)	(6434 –167)		
8	-0,61 ± 0,64 (-	0,45 ± 0,15	10,10 ± 1,52	119,75 ± 21,63	-3846,65 ± 1048,66		
	0,16 - 3,19)	(0,22 - 1)	(5,13 - 14,44)	(64,56 - 169,03)	(8278 – 76)		

Tabela 4.5 - Valores médios das variáveis utilizadas na delimitação das PBGQ de outono, seguidos de seus respectivos desvios padrão e valores mínimos-máximos. Os valores de TSM são dados em °C; CSM em mg m⁻³; PAR em Einsten m⁻² d⁻¹; PCM e BAT em metros.

Fonte: Próprio Autor

Figura 4.16 - Graus de pertinência das 8 PBGQ (0 a 1) obtidas com a aplicação do algoritmo FCM no período de outono. Os números de 1 a 8 representam as PBGQ.



Fonte: Próprio Autor

4.6.1. PBGQ 1 de outono - Sistema Equatorial/Tropical

Na PBGQ 1 de outono (Figura 4.16), aqui denominada de "Sistema Equatorial/Tropical", nota-se na extremidade oeste do Atlântico Sul, com baixo grau de pertinência (próximo a 0,25), a origem da CB fluindo para sudoeste em torno de 10°S. Esta feição apresenta aqui um grau de pertinência inferior em relação a PBGQ 1 de verão.

É possível notar a CNB fluindo para noroeste inicialmente sobre parte da plataforma continental nordeste brasileira. Ao atravessar o estado do Maranhão, a CNB se afasta e passa a fluir mais ao largo até chegar em 10°N. Acima da linha do equador percebe-se a CCNE fluindo de oeste para leste e alimentando a CG que chega até a costa Africana.

A área da PBGQ 1 de outono é estimada em 15.876.581,423 km² (Tabela 4.3), com um aumento de 29% em relação a área da PBGQ 1 de verão. Esta PBGQ 1 de outono apresentou valores médios de TSM, CSM, PAR, PCM e BAT iguais a 27,73 °C; 0,06 mg m⁻³; 43,52 Einsten m⁻² d⁻¹; 24,35 metros e -3918,38 metros, respectivamente (Tabela 4.5).

4.6.2. PBGQ 2 de outono - Giro Subtropical

A PBGQ 2 de outono (Figura 4.16), denominada de "Giro Subtropical", apresenta uma feição na plataforma continental com médio grau de pertinência (próximo a 0,5) a partir de Vitoria-ES, próximo ao continente sul-americano. Esta feição já foi associada ao processo de ressurgência costeira nesta região até Cabo Frio-RJ no período de verão. Como durante o outono esse fenômeno é menos intenso, demonstrou um grau de pertinência inferior.

É possível observar o GS com alto grau de pertinência (próximo a 1), ocupando a parte central do Atlântico Sul. Associados a esta PBGQ 2 de outono estão as regiões de plataforma continental da África do Sul e Namíbia no continente africano, e nordeste e norte do Brasil na porção sul-americana. Assim como observado na PBGQ 2 de verão, nesta PBGQ 2 de outono também é observado com alto grau de pertinência, a CA na porção sul do continente africano. Apesar do outono ser um período de transição (entre verão e inverno), apresentou forte sinal de presença da CA, possivelmente por tal corrente superficial demonstrar seu pico de variabilidade durante o período de verão austral (BRYDEN et al., 2003; RODRIGUES, 2015).

Esta PBGQ 2 de outono ocupa uma área de 6.790.548,189 km² (Tabela 4.3), isto é, com uma diminuição de 17% em relação a PBGQ 2 de verão. Esta PBGQ 2 de outono apresentou valores médios de TSM, CSM, PAR, PCM e BAT de 22,52°C; 0,08 mg m⁻³; 32,93 Einsten m⁻² d⁻¹; 35,46 metros e -3979,84 metros (Tabela 4.5), respectivamente.

4.6.3. PBGQ 3 de outono - Atlântico Sul

A PBGQ 3 de outono (Figura 4.16), denominada de "Atlântico Sul", apresenta de modo geral as mesmas feições apresentadas na PBGQ 3 de verão. A CAS é tida como a principal feição, com alto grau de pertinência (próximo a 1), fluindo em torno de 40°S e bifurcando-se em 10°E para nordeste, alimentando a CBG e para sudeste, percorrendo o sul da África do Sul.

Esta PBGQ 3 de outono apresenta uma área de 6.192.764,445 km² (Tabela 4.3), com uma diminuição de 3% em relação a área da PBGQ 3 de verão. Esta PBGQ 3 de outono apresentou valores médios de TSM, CSM, PAR, PCM e BAT de 19,33°C; 0,05 mg m⁻³; 28,44 Einsten m⁻² d⁻¹; 39,14 metros e -3951,01 metros (Tabela 4.5), respectivamente.

4.6.4. PBGQ 4 de outono - Convergência Subtropical

A PBGQ 4 de outono (Figura 4.16), denominada de "Convergência Subtropical", retrata a região da confluência da CM com a CB, mas com menor intensidade (ou grau de pertinência) em relação à PBGQ 4 de verão. Abrange também, a região da CBG com médio grau de pertinência (próximo a 0,5) fluindo pela costa africana. A PBGQ 4 apresenta altos valores médios de CSM (0,29 mg m⁻³), associados principalmente a alta

produtividade que ocorre na região da CBG. Sua área compreende 4.024.933,894km² (Tabela 4.3) e apresenta valores médios de TSM, PAR, PCM e BAT de 14,18°C; 21,98 Einsten m⁻² d⁻¹; 47,49 metros e -4133 metros (Tabela 4.5), respectivamente.

4.6.5. PBGQ 5 de verão - Sistema Subtropical

A PBGQ 5 de outono (Figura 4.16), aqui denominada de "Sistema Subtropical", abrange a região da CB a partir de ~25°S fluindo para sudoeste até atingir a região do rio da Prata. Observa-se também, a região do GS com alto grau de pertinência ocupando a parte central do Atlântico Sul. Observa-se também, o que pode ser uma influência do Giro Subtropical do Atlântico Norte no limite setentrional da área de estudo. Esta feição ao norte do equador com alta pertinência pode também estar associada à presença da CSE migrando de leste para oeste, assim como, parte da CCNE no sentido oeste-leste.

Possui uma área de 3.274.590,609 km² (Tabela 4.3) e apresenta valores médios de TSM, CSM, PAR, PCM e BAT de 25,66°C; 0,12 mg m⁻³; 42,76 Einsten m⁻² d⁻¹; 30,53 metros e -4153,41 metros (Tabela 4.5), respectivamente.

4.6.6. PBGQ 6 de outono - Subantártica

A PBGQ 6 de outono (Figura 4.16), aqui denominada de "Subantártica", pode ser descrita de forma similar à PBGQ 6 de verão. A principal feição presente e com maior grau de pertinência (~1) é a FSA. Também abrange parte da CAS como uma feição secundária dotada de baixo grau de pertinência (~ 0,25).

Uma feição de destaque observada nesta PBGQ 6 é a região da Dorsal Meso Atlântica que aparece entre 10°S - 5°N e 10°W - 30°W, no centro da bacia do Atlântico Sul (Figura 4.5). Esta cordilheira oceânica originou-se em decorrência da divergência de placas tectônicas sobre a crosta oceânica, e apresenta um predomínio de rochas basálticas em sua composição geológica devido ao extravasamento do magma oriundo do manto litosférico (WILSON, 1965).

Nota-se uma influência da batimetria em várias regiões, desde a plataforma continental do nordeste e norte do Brasil, passando pela Cadeia Vitória-Trindade, chegando até a extensa região da *South Brazilian Bight* ou Embaiamento de Santos (LORENZETTI; GAETA, 1996).

A PBGQ 6 apresenta uma área de 4.024.933,894 km2 (Tabela 4.3), com um aumento de 2% em relação a área da PBGQ 6 de verão. Esta PBGQ 6 de outono apresenta valores médios de TSM, CSM, PAR, PCM e BAT de 9,18°C, 0,37 mg m⁻³, 18,15 Einsten m⁻² d⁻¹, 62,38 metros e -3707,78 metros (Tabela 4.5), respectivamente.

4.6.7. PBGQ 7 de outono - Polar

A PBGQ 7 de outono (Figura 4.16), aqui denominada de "Polar", tem como principal feição oceanográfica a Frente Polar, apresentando graus de pertinência próximos a 1, localizada em ~50°S. Ao passar pela região da CM, a FP se estende para fora da plataforma continental Argentina.

A área desta PBGQ é de 3.755.337,138 km² (Tabela 4.3), e apresenta uma diminuição de 1% em relação a área da PBGQ 7 de verão. Esta PBGQ 7 de outono apresenta valores médios de TSM, CSM, PAR, PCM e BAT de 4,20°C; 0,27 mg m⁻³; 13,84 Einsten m⁻² d⁻¹; 83,23 metros e - 3554,36 metros (Tabela 4.5), respectivamente.

4.6.8. PBGQ 8 de outono - Circumpolar Antártica

A PBGQ 8 de outono (Figura 4.16), denominada de "Circumpolar Antártica", abrange uma feição batimétrica, com baixo grau de pertinência (próximo a 0,25), representada pela plataforma continental Argentina passando pelas Ilhas Malvinas.

Apresentando um alto grau de pertinência (próximo a 1), nota-se a CCA na extremidade sul da Bacia do Atlântico Sul, que durante o outono apresenta-se próxima de 50°S. É uma região de fortes ventos de oeste, o que favorece o maior aprofundamento da camada de mistura,

responsável por abrigar muitos nutrientes, favorecendo a alta produtividade primária (LONGHURST, 2007).

Esta PBGQ 8 de outono apresenta uma área de 5.882.151,780 km² (Tabela 4.3) e uma variação de 0,99% em relação a área da PBGQ 8 de verão. Esta PBGQ 8 de outono apresentou valores médios de TSM, CSM, PAR, PCM e BAT de -0,61°C; 0,45 mg m⁻³; 10,10 Einsten m⁻² d⁻¹; 119,75 metros e -3846,65 metros (Tabela 4.5), respectivamente.

4.7. Inverno

O deslocamento latitudinal da ZCIT se dá em virtude do ciclo sazonal das estações do ano, apresentando seus picos de variação (sentidos norte e sul) de acordo com a distribuição de insolação (PEIXOTO; OORT, 1992). Durante os meses de inverno austral, a ZCIT pode chegar a atingir seu pico máximo de deslocamento em 10°N (HASTENRATH; LAMB, 1977), influenciando provavelmente, na distribuição latitudinal (mais ao norte) das PBGQ obtidas durante esta estação do ano.

A configuração das PBGQ de inverno (Figura 4.17) demonstra uma distribuição zonal das regiões encontradas, com variação latitudinal e assimetrias próximas aos continentes sul-americano e africano. A Figura 4.18 retrata os graus de pertinência de cada PBGQ elaborada. Os valores médios, desvios padrão e mínimos-máximos de cada variável para as respectivas PBGQ podem ser observados na Tabela 4.6.

Figura 4.17 - Representação das PBGQ de inverno geradas pelo algoritmo FCM a partir das variáveis de entrada: temperatura da superfície do mar, concentração de clorofila-*a*, radiação fotossinteticamente disponível, profundidade da cada de mistura e batimetria. Cada cor representa uma PBGQ.



Fonte: Próprio Autor

Tabela 4.6 -	Valo	res médio	os das var	iáve	is utiliz	zadas na	deli	mitação	das PBC	GQ
	de	inverno,	seguidos	de	seus	respecti	vos	desvios	padrão	е
	valo	ores mínii	mos-máxin	nos.	Os va	lores de	TSⅣ	l são dao	dos em '	°C;
	CS	M em ma	m ⁻³ ; PAR	em E	Einster	n m ⁻² d ⁻¹ ; l	РСМ	e BAT e	m metro	S.

.PBGQ	TSM	CSM	PAR	РСМ	BAT
1	27,13 ± 1	0,13 ± 1,14	43,73±3,68	32,59 ± 15,12	-3838,22 ± 1427,91
	(24,51 - 29,89)	(0,04 - 0,32)	(33,07 - 51,67)	(10 - 78,71)	(6159 - 403)
2	17,26 ± 1	0,21 ± 0,42	20,20 ± 3,55	70,84 ± 22,43	-4178,97 ± 1100,29
	(14,11 - 20,20)	(0,05 - 0,70)	(13,21 - 32,23)	(14,57 - 109,64)	(6545– 390)
3	20,8 ± 1	0,42 ± 0,74	29,17±4,66	84,92 ± 28,51	-3873,19 ± 1235,58
	(18 - 23,1)	(0,09 - 0,61)	(18,56 - 38,71)	(10,17 - 141,85)	(5403 –167)
4	13,44 ± 1,2	0,53 ± 1,18	14,5 ± 1,85	103,13 ± 29,07	-4088,69 ± 1335,18
	(9,8 - 16,934)	(0,20 - 0,78)	(10,8 - 19,8)	(10 - 158,69)	(5861– 158)
5	24,02 ± 0,91	0,28 ± 0,55	38,2± 5,57	48,01 ± 27,11	-4204,87 ± 1036,80
	(21,3 - 26,52)	(0,19 - 0,54)	(25,7 - 50,14)	(10,02 - 101,40)	(7544 – 157)
6	9,17 ± 1,28	0,30 ± 0,29	11,11±1,82	114,79 ± 30,72	-4289,35 ± 1546,02
	(0 - 12,74)	(0,15 - 0,60)	(7,35 - 18,81)	(23,31 - 199,45)	(6147 - 182)
7	4,57 ± 1,23	0,13 ± 0,34	7,66± 1,97	148,53 ± 41,56	-3171,66 ± 1736,56
	(-1,45 - 7,76)	(0,04 - 0,32)	(3,01 - 16,84)	(39,75 - 332,17)	(6230 –403)
8	0,54 ± 1	0,11 ± 0,13	4,43 ± 1,2	180,96 ± 26,78	-3840,47 ± 1021,92
	(-2 - 5,33)	(0,04 - 0,74)	(0,53 - 9,17)	(108,27 - 228,19)	(8278 - 390)

Fonte: Próprio Autor

Figura 4.18 - Graus de pertinência (0 a 1) pixel-a-pixel referentes às 8 PBGQs obtidas com a aplicação do algoritmo FCM no período de inverno. Os números de 1 a 8 representam as PBGQ.



Fonte: Próprio Autor

4.7.1. PBGQ 1 de inverno - Sistema Equatorial/Tropical

A PBGQ 1 de Inverno (Figura 4.18), aqui denominada de "Sistema Equatorial/Tropical", abrange parte da CSE como uma feição com elevado grau de pertinência (próximo a 1), ocupando a porção oeste da bacia do Atlântico Sul, em ~10°S. Esta corrente sofre forte influência dos ventos alísios principalmente em sua porção sul, apresentando sua máxima componente geostrófica durante os meses de inverno austral (MOLINARI, 1982).

Esta PBGQ 1 abrange também, partes da plataforma continental brasileira norte-nordeste entre ~10°S e 10°N, e uma feição de alta pertinência associada com a CCNE, entre ~3°N e 10°N, que converge com o limite ao norte da Corrente Norte Equatorial (PETERSON; STRAMMA, 1991). Interessante notar a retração da região mais ao sul da CB que a partir de

~20°S é visualizada como um filamento com baixo grau de pertinência (próximo a 0,25). As regiões da CG com alto grau de pertinência (próximo a 1) e da Cadeia Vitória-Trindade com médio grau de pertinência (próximo a 0,5) também são abrangidas nesta PBGQ 1.

A área da PBGQ 1 de inverno foi estimada em 11.391.638,496 (Tabela 4.3), sendo esta, inferior às áreas das PBGQ 1 de verão e outono, com uma diminuição de 7% e 29%, respectivamente. A PBGQ 1 de inverno apresenta valores médios de TSM, CSM, PAR, PCM e BAT de 27,13°C; 0,13 mg m⁻³; 43,73 Einsten m⁻² d⁻¹, 32,59 metros e -3838,22 metros (Tabela 4.6), respectivamente.

4.7.2. PBGQ 2 de inverno - Giro Subtropical

A PBGQ 2 de inverno (Figura 4.18), denominada de "Giro Subtropical", apresenta praticamente as mesmas feições das PBGQ 2 de verão e outono. Observa-se parte do GS com alto grau de pertinência (próximo a 1) e com as maiores profundidades da camada de mistura ao longo de uma calha zonal próximo a 20°S, em toda a parte centro-oeste do GS (LONGHURST, 2007).

Observa-se parte da CA ao sul do continente africano com um grau de pertinência próximo a 0,5. Durante o inverno austral, a variabilidade térmica que ocorre sobre a CA encontra-se mínima em relação às demais estações do ano (MATANO, 1998). Isso explica o grau de pertinência inferior desta feição em relação à PBGQ 2 de verão, por exemplo.

A área desta PBGQ 2 de inverno foi estimada em 6.911.711,862 km² (Tabela 4.3), e apresentou uma diminuição de 15% em relação a PBGQ 2 de verão, e um aumento de 3% em relação às PBGQ 2 de outono. Esta PBGQ 2 de inverno apresentou valores médios de TSM, CSM, PAR, PCM e BAT de 17,26°C; e 0,21 mg m⁻³; 20,20 Einsten m⁻²d⁻¹; 70,84 metros e - 4178,97 metros, respectivamente (Tabela 4.6).

4.7.3. PBGQ 3 de inverno - Atlântico Sul

A PBGQ 3 de inverno (Figura 4.18), aqui denominada de "Atlântico Sul" apresenta-se similar às PBGQ 3 de verão e outono. A região da CAS se apresenta com um alto grau de pertinência (próximo a 1). Nesta região, há uma feição batimétrica associada à Cadeia Vulcânica de Walvis (Figura 4.5) posicionada no eixo sudoeste-nordeste, entre 20°S e 35°S, formada por uma estrutura cristalina originada na crosta terrestre (JEGEN et al., 2016). Também é possível verificar a região de ocorrência da CBG, além de parte da CA, ao sul da África Sul com baixo (próximo a 0,25) e médio (próximo a 0,5) graus de pertinência, respectivamente.

Esta PBGQ 3 de inverno possui uma área de 122.921,756 km², e um aumento de 12% e 15% em relação às PBGQ 3 de verão e outono, respectivamente (Tabela 4.3). Esta PBGQ 3 de inverno apresentou valores médios de TSM, CSM, PAR, PCM e BAT de 20,8°C; 0,42 mg m⁻³, 29,17 Einsten m⁻² d⁻¹; 84,92 metros e -3873,19 metros (Tabela 4.6), respectivamente.

4.7.4. PBGQ 4 de inverno - Convergência Subtropical

A PBGQ 4 de inverno (Figura 4.18), denominada de "Convergência Subtropical", abrange a região da CM chegando a atingir sua porção mais ao norte (30°S), diferentemente do padrão observado nas demais estações (verão e outono).

Observa-se a região da CBG com médio grau de pertinência (próximo a 0,5), que durante o inverno austral apresenta velocidades mais elevadas em sua porção norte, favorecendo a ocorrência de ressurgências na costa africana e enriquecendo a produtividade primária (BOYER et al. 2000). Também pode ser observada a região da Cadeia Vulcânica de Walvis na costa africana com médio grau de pertinência.

Esta PBGQ 4 apresenta uma área de 4.517.988,606 km² (Tabela 4.3) e um aumento de 15% e 12% em relação às PBGQ 4 de verão e outono, respectivamente. A PBGQ 4 de inverno apresentou valores médios de TSM, CSM, PAR, PCM e BAT de 13,44°C; 0,53 mg m⁻³; 14,5 Einsten m⁻² d⁻¹; 103,13 metros e -4088,69 metros (Tabela 4.6), respectivamente.

4.7.5. PBGQ 5 de inverno - Expansão Equatorial

A PBGQ 5 de inverno (Figura 4.18), aqui denominada de "Expansão Equatorial", apresenta na porção oeste da bacia do Atlântico Sul, entre 20°S e 35° W, uma feição com características semelhantes à Cadeia Vitória–Trindade. Ao sul desta feição nota-se ao largo da plataforma continental, a CB que ao fluir para sul, transforma-se em um pequeno filamento chegando a 35°S, onde praticamente desaparece.

Partindo do continente africano e indo em direção ao continente sulamericano, podemos observar uma língua de água fria que apresenta seu pico (sinal de ocorrência) durante os meses do inverno austral (OKUMURA, 2004). Essa língua fria se forma em decorrência das monções que ocorrem no hemisfério norte e realizam um resfriamento da região equatorial, desempenhando um papel importante na expansão dessa água fria que flui de oeste para leste no oceano Atlântico Sul (MITCHELL; WALLACE, 1992).

No meio da bacia do Atlântico Sul, percebe-se uma parte do GS, que durante os meses de inverno austral, apresenta um aprofundamento da PCM (LEVITUS, 1982). Esse aprofundamento ocorre em função também do deslocamento da ZCIT que se encontra em sua posição mais ao norte. Isto faz com que as maiores velocidades de vento ocorram entre o equador e 25°S, gerando aumento dos valores da PCM em aproximadamente 20°S durante esta estação do ano (LONGHURST, 2007).

Esta PBGQ 5 apresenta uma área de 4.371.572,678 km² (Tabela 4.3) e um aumento de 28% e 33% em relação às PBGQ 5 de verão e outono, respectivamente. A PBGQ 5 de inverno apresentou valores médios de TSM, CSM, PAR, PCM e BAT de 20,04°C; 0,28 mg m⁻³; 38,2 Einsten m⁻² d^{-1} , 48,01 metros e -4204,87 metros (Tabela 4.6), respectivamente.

4.7.6. PBGQ 6 de inverno - Subantártica

A PBGQ 6 de inverno (Figura 4.18), aqui denominada de "Subantártica", abrange a região da CM com médio grau de pertinência (próximo a 0,5) sobre a plataforma continental da Argentina chegando até o Uruguai. Além desta feição, pode-se observar a região da FSA, que ao se estender da plataforma continental na direção leste, demonstra elevado grau de pertinência (próximo a 1), percorrendo toda a bacia do Atlântico Sul até o continente africano.

A PBGQ 6 apresentou uma área de 4.517.988,606 km² (Tabela 4.3) e um aumento de 15% e 12% em relação às PBGQ 6 de verão e outono, respectivamente. Esta PBGQ 6 de inverno apresentou valores médios de TSM, CSM, PAR, PCM e BAT de 9,17°C; 0,30 mg m⁻³; 11,11 Einsten m⁻² d⁻¹; 114,79 metros e -4289,35 metros (Tabela 4.6), respectivamente.

4.7.7. PBGQ 7 de inverno - Polar

A PBGQ 7 de inverno (Figura 4.18), aqui denominada de "Polar", abrange a região da CM com alto grau de pertinência (próximo a 1) sobre a plataforma continental Argentina, em aproximadamente 40°S, e a oeste das Ilhas Malvinas. Percebe-se também, a região da FP com alto grau de pertinência se estendendo desde a Passagem de Drake em 55°S, no sentido oeste-leste, até cruzar a bacia do Atlântico Sul por completo. Esta mesma feição (FP) demonstra seu estreitamento máximo em 49°S e 40°W.

A PBGQ 7 apresenta uma área de 4.109.118,954 km² (Tabela 4.3), sendo esta, a maior área quando comparada às demais PBGQ 7 das estações do ano, com um aumento de 1% em relação as PBGQ 7 de verão e outono. Apresenta ainda valores médios de TSM, CSM, PAR, PCM e BAT de 4,57°C; 0,13 mg m⁻³; 7,66 Einsten m⁻² d⁻¹; 148,53 metros e -3171,66 metros (Tabela 4.6), respectivamente.

4.7.8. PBGQ 8 de inverno - Circumpolar Antártica

A PBGQ 8 de inverno (Figura 4.18), aqui denominada de "Circumpolar Antártica", abrange a CCA como principal feição e com elevado grau de pertinência (próximo a 1). Segundo Deacon (1984), durante o inverno austral a TSM média varia entre 1°C e 2°C, principalmente na região da Convergência Antártica, localizada a cerca de 200 km ao sul da Frente Polar.

A PBGQ 8 de inverno engloba uma região onde ocorrem fortes ventos de oeste, apresentando um alto valor médio da PCM com 180,96 metros (Tabela 4.6). Este valor médio da PCM é o maior de todas as demais PBGQ.

Esta PBGQ 8 de inverno apresenta uma área de 6.642.760,478 km² (Tabela 4.3) e um aumento de 1% em relação às PBGQ 8de verão e outono. A PBGQ 8 de inverno apresentou valores médios de TSM, CSM, PAR e BAT de 0,54°C; 0,11 mg m⁻³; 4,43 Einsten m⁻² d⁻¹, e -3840,47 metros (Tabela 4.6), respectivamente.

4.8. Primavera

A configuração das PBGQ de primavera (Figura 4.19), assim como nas demais estações, apresenta um padrão de distribuição zonal das regiões encontradas, com variação latitudinal e assimetrias próximas aos continentes sul-americano e africano. A Figura 4.20 retrata os graus de pertinência de cada PBGQ elaborada. Os valores médios, desvios padrão e mínimos-máximos de cada variável para as respectivas PBGQ podem ser vistos na Tabela 4.7.

Figura 4.19 - Representação das PBGQ de primavera geradas pelo algoritmo FCM a partir das variáveis de entrada: temperatura da superfície do mar, concentração de clorofila-*a*, radiação fotossinteticamente disponível, profundidade da cada de mistura e batimetria. Cada cor representa uma PBGQ.



Fonte: Próprio Autor

	valores mínimos-máximos. Os valores de TSM são dados em °C;								
	CSM em mg m ⁻³ ; PAR em Einsten m ⁻² d ⁻¹ ; PCM e BAT em metros.								
PBGQ	TSM	CSM	PAR	PCM	BAT				
1	27,83 ± 0,95	0,13 ± 1,14	46,16 ± 5,24	26,94 ± 12,92	-3504,21 ± 1467,98				
	(25,78 - 30,99)	(0,01 - 0,33)	(28,18 - 56,51)	(10 - 61,80)	(5514 – 403)				
2	21,03 ± 1	$0,08 \pm 0,30$	44,97 ± 2,82	58,57 ± 21,29	-4092,39 ± 1151,36				
	(18,73 - 24,16)	(0,03 - 0,32)	(35,19 - 51,70)	(13,99 - 97,22)	(6545– 390)				
3	17,62 ± 1	0,23 ± 0,95	43,14 ± 3,31	65,10 ± 21,37	-3935,27 ± 1265,27				
	(14,39 - 20,39)	(0,05 - 0,80)	(35,24 - 52,58)	(10 - 112,52)	(5618 –117)				
4	9,43 ± 1,2	0,37 ± 0,70	33,55 ± 2,12	86,65 ± 26,27	-4137,66 ± 1305,55				
	(6 - 16,61)	(0,17 - 0,98)	(27,79 - 42,09)	(14,92 - 140,85)	(5887– 158)				
5	13,68 ±0,97	0,34 ± 0,55	37,87 ± 2,88	43,11 ± 19	-4307,73 ± 1076,37				
	(10,71 - 17,70)	(0,20 - 0,70)	(32,84 - 42,64)	(11,55 - 87,49)	(7544 – 223)				
6	9,29 ± 1,29	0,11 ± 0,98	34,51 ± 3,48	106,20 ± 34,09	-4129,24 ± 1676,75				
	(2,23 - 15,73)	(0,02 - 0,52)	(27,79 - 44,13)	(20,24 - 200,48)	(6103 – 182)				
7	4,65 1,14	0,27 ± 0,76	29,06 ± 3,44	143,61 ± 29,35	-3283,15 ± 1662,81				
	(1,14 - 8,5)	(0,13 - 0,81)	(21,71 - 36,74)	(38,86 - 230,41)	(6230 –167)				
8	0,27 ± 1,25	0,38 ± 0,20	22,84 ± 2,40	186,08 ± 25,29	-3850,16 ± 1012,83				
	(-1,20 - 4,12)	(0,14 - 0,75)	(13,72 - 31,67)	(107,47 - 269,81)	(8278 - 76)				

Tabela 4.7 - Valores médios das variáveis utilizadas na delimitação das PBGQ de primavera, seguidos de seus respectivos desvios padrão e

Fonte: Próprio Autor





Fonte: Próprio Autor

4.8.1. PBGQ 1 de primavera - Sistema Equatorial/Tropical

A PBGQ 1 de primavera (Figura 4.20), aqui denominada de "Sistema Equatorial/Tropical", engloba as regiões de plataforma continental da Guiné Equatorial, Gabão, Congo e Angola (entre 1°N e 9°S) com baixo grau de pertinência (próximo a 0,25). Acima da linha do equador, abrange parte da região da CCNE fluindo de oeste para leste, alimentando a CG.

Normalmente, a CCNE apresenta valores médios de TSM maiores que 24°C durante a primavera austral, em decorrência do fortalecimento dos ventos alísios. A PCM nessa região passa a ser mais rasa, o que aumenta a amplitude térmica sobre a CCNE (GRODSKY; CARTON 2002). Com isso, ocorre o surgimento de uma língua de água fria superficial entre aproximadamente 30°W-0°W e 4°N-2°N (WISLON et. al. 1994).

A PBGQ 1 de primavera apresenta a menor área (8.770.062,378 km²), se comparada com as PBGQ 1 das demais estações (Tabela 4.3), e uma diminuição de 71%; 55% e 76% em relação às PBGQ 1 de verão, outono e inverno, respectivamente. Esta PBGQ 1 de primavera apresentou valores médios de TSM, CSM, PAR, PCM e BAT de 27,83°C; 0,13 mg m⁻³; 46,16 Einsten m⁻² d⁻¹; 26,94 metros e -3504,21 metros (Tabela 4.7), respectivamente.

4.8.2. PBGQ 2 de primavera - Giro Subtropical

A PBGQ 2 de primavera (Figura 4.20), aqui denominada de "Giro Subtropical", apresenta feições oceanográficas semelhantes às observadas no verão, outono e inverno. Engloba as regiões do GS, CA e FAB com altos graus de pertinência (próximos a 1). Abrange também, a região da Cadeia Vulcânica de Walvis nas proximidades do continente africano.

É uma província com uma área de 8.301.279,597 km² (Tabela 4.3) e um aumento de 2%; 22% e 20% em relação às áreas de verão, outono e inverno, respectivamente. Esta PBGQ 2 de primavera apresentou valores

médios de TSM, CSM, PAR, PCM e BAT de 21,03°C; 0,08 mg m⁻³; 44,97 Einsten m⁻² d⁻¹; 58,57 metros e -4092,39 metros (Tabela 4.7), respectivamente.

4.8.3. PBGQ 3 de primavera - Atlântico Sul

A PBGQ 3 de primavera (Figura 4.20), aqui denominada de "Atlântico Sul", abrange a região da CAS como principal feição e com alto grau de pertinência (próximo a 1). A CAS se estende no sentido oeste-leste e abastece o GS e a CBG. A região da Cadeia de Walvis pode ser observada de maneira realçada, com um médio grau de pertinência (próximo a 0,5).

A PBGQ 3 de primavera apresenta uma área de 8.207.986,969 km² (Tabela 4.3), e um aumento de 29%; 32% e 15% em relação às PBGQ 3 de verão, outono e inverno, respectivamente. Esta PBGQ 3 de primavera apresentou valores médios das variáveis TSM, CSM, PAR, PCM e BAT equivalentes a 17,62°C; 0,23 mg m⁻³; 43,14 Einsten m⁻² d⁻¹; 65,10 metros e -3935,27 metros (Tabela 4.7), sendo estas as possíveis variáveis mais influentes desta PBGQ.

4.8.4. PBGQ 4 de primavera - Convergência Subtropical

A PBGQ 4 de primavera (Figura 4.20), denominada de "Convergência Subtropical", abrange a área da CM com médio grau de pertinência (próximo a 0,5). É possível identificar a região da Cadeia Walvis e sobre a plataforma continental da África do Sul e Namíbia, engloba a região da CBG.

De acordo com Longhurst (2007), o processo de ressurgência costeira é constante na região da Corrente de Benguela ao longo do ano todo, mas se intensifica durante os períodos de inverno e primavera do hemisfério sul, entre aproximadamente 17°S e 19°S. De acordo com a Tabela 4.7, observam-se valores médios de CSM elevados (0,55 mg m⁻³) para esta PBGQ 4 de primavera, o que corrobora a observação de Longhurst, (2007).
A área desta PBGQ 4 de primavera ocupa 8.207.986,969 km² (Tabela 4.3), e demonstrou um aumento de 16%; 13% e 1% em relação às PBGQ de verão, outono e inverno foi de, respectivamente. Esta PBGQ 4 de primavera apresentou valores médios de TSM, PAR, PCM e BAT de 9,43°C; 33,55 Einsten m⁻² d⁻¹; 86,65 metros e -4137,66 metros, respectivamente (Tabela 4.7).

4.8.5. PBGQ 5 de primavera - Sistema Sul Equatorial

A PBGQ 5 de primavera (Figura 4.20), aqui denominada de "Sistema Sul Equatorial", abrange a região da FAB próxima à plataforma continental africana com alto grau de pertinência (próximo a 1). Esta região contribui para a formação da CSE que durante a primavera austral, atinge seu fluxo máximo em torno de 30°W (WIENDERS et al., 2000).

Ao chegar nas proximidades da costa brasileira, percebe-se a região de formação da CB com alto grau de pertinência. A CB flui para sudoeste a partir de ~10°S e na altura de ~20°S, atravessa a Cadeia Vitória-Trindade. Aproximando-se da região de Cabo Frio, o grau de pertinência diminui até 0,5 em ~30°S. A região de parte da Dorsal Meso Atlântica em torno de 12°W também está englobada nesta PBGQ 5 de primavera.

A área desta PBGQ compreende 4.457.800,700 km² (Tabela 4.3), e um aumento de 31% em relação a área da PBGQ 5 de verão que leva a mesma denominação. Esta PBGQ 5 de primavera apresenta valores médios de TSM, CSM, PAR, PCM e BAT de 13,68°C; 0,34 mg m⁻³; 37,87 Einsten m⁻²d⁻¹; 43,11 metros e -4307,73 metros, respectivamente (Tabela 4.7).

4.8.6. PBGQ 6 de primavera - Subantártica

A PBGQ 6 de primavera (Figura 4.20), denominada de "Subantártica", abrange parte da região da CM que nesta época do ano encontra-se relativamente recuada próxima a ~40°S. Engloba também a região da FSA com alto grau de pertinência (próximo a 1) que se estende em direção ao lado leste da Bacia do Atlântico Sul.

Esta província apresenta uma área de 4.571.564,727 km² (Tabela 4.3), e um aumento de 16%; 13% e 1% em relação às PBGQ 6 de verão, outono e inverno, respectivamente. Esta PBGQ 6 de primavera apresenta valores médios de TSM, CSM, PAR, PCM e BAT de 9,29°C; 0,70 mg m⁻³; 34,51 Einsten m⁻² d⁻¹; 106,20 metros e -4129,24 metros (Tabela 4.7), respectivamente.

4.8.7. PBGQ 7 de primavera - Polar

A PBGQ 7 de primavera (Figura 4.20), denominada de "Polar", abrange a região da FP como principal feição oceanográfica, com alto grau de pertinência (próximo a 1), em torno de ~50°S. Assim como foi visto na PGBQ 7 de inverno, também é observado o estreitamento da FP em 49°S e 40°W.

A área desta PBGQ 7 de primavera compreende 3.861.983,640 km² (Tabela 4.3), e apresenta um aumento de 2% em relação as PBGQ 7 de verão e outono, e uma diminuição de 7% em relação à PBGQ 7 de inverno. Esta PBGQ 7 de primavera apresenta valores médios de TSM, CSM, PAR, PCM e BAT de 4,65°C; 0,27 mg m⁻³; 29,06 Einsten m⁻² d⁻¹; 143,61 metros e -3283,15 metros, respectivamente (Tabela 4.7).

4.8.8. PBGQ 8 de primavera - Circumpolar Antártica

A PBGQ 8 de primavera (Figura 4.20), aqui denominada de "Circumpolar Antártica", engloba a região da CCA como feição de maior grau de pertinência (próximo a 1). Durante a primavera, esta região estende seus limites para norte cruzando a latitude de 50°S. Também é observada uma feição batimétrica representada pela plataforma continental Argentina, além da FSA ao norte da CCA com grau de pertinência próximo a 0,25.

A área desta PBGQ compreende 6.704.714,302 km² (Tabela 4.3), e demonstra um aumento de 13% em relação às PBGQ 8 de verão e outono, e 1% em relação a PBGQ 7 de inverno. Esta PBGQ 8 de primavera apresentou valores médios de TSM, CSM, PAR, PCM e BAT

de 0,27°C; 0,38 mg m⁻³; 22,84 Einsten m⁻² d⁻¹; 186,08 e -3850,16 metros (Tabela 4.7), respectivamente.

4.9. Cenário Futuro

Nesta etapa do trabalho é apresentado o particionamento do oceano Atlântico Sul em PBGQ projetadas para o cenário de 2099, a partir de uma coleção de modelos numéricos de simulação global conhecida como CMIP5. Foram utilizadas as variáveis TSM, CSM, PCM e BAT. As Figuras 4.21 a 4.23 correspondem às anomalias de CSM, TSM e PCM respectivamente, estimadas pelo CMIP5 para o ano de 2099.

A Figura 4.24 representa as classes de entrada no FCM, delimitadas pelo critério *Silhouette* e a Figura 4.25 ilustra as PBGQ do cenário futuro, resultantes da aplicação do FCM a partir das variáveis de entrada.

Analisando a Figura 4.21 e Figura 4.22, observa-se que nas localidades de anomalias negativas de CSM (-1,434 mg m⁻³) houve anomalias positivas TSM (3,515°C), principalmente nas latitudes de 0°, 40°S e na costa africana sobre as plataformas continentais da Namíbia e Angola, onde ocorre o Sistema de Benguela. Estas informações sugerem, que no cenário futuro caso ocorra um aumento significativo da TSM no Atlântico Sul, também ocorrerá uma diminuição da CSM e consequentemente, da produtividade nessas regiões.

A Figura 4.23 demonstra a ocorrência de maiores variações das anomalias futuras da PCM na região de 40°S, mesma localidade de elevados valores de anomalia de TSM (Figura 4.22). Anomalias negativas são observadas entre 60°S e 50°S, região de ocorrência de ventos fortes de oeste. Caso este cenário futuro se concretize, e torne a PCM mais rasa nesta região, pode vir a interferir principalmente na produtividade primária local, uma vez que a PCM abriga parte da produtividade fotoautotrófica dos oceanos.

83

Figura 4.21 – Anomalias futuras de concentração de clorofila-*a* na superfície do mar estimadas pelo CMIP5 para o período de 2050-2099. Os valores variam do azul (-1,434 mg m⁻³) ao verde (0,280 mg m⁻³).



Fonte: Próprio Autor

Figura 4.22 - Anomalias futuras de temperatura da superfície do mar estimadas pelo CMIP5 para o período de 2050-2099. Os valores variam do azul (-0,238°C) ao vermelho (7,030°C).



Fonte: Próprio Autor

Figura 4.23 - Anomalias futuras de profundidade da camada de mistura estimadas pelo CMIP5 para o período de 2050-2099. Os valores variam do marrom (-798,69 metros) ao azul (72,53 metros).



Fonte: Próprio Autor

A Figura 4.24 retrata a configuração do número de classes de entrada no FCM, a partir das variáveis de entrada CSM, TSM, PCM e BAT, ilustrando a seleção de 5 classes pela aplicação do critério *Silhouete*. Observa-se uma redução de 3 classes em relação ao número encontrado para a classificação anual com 8 classes. Ainda que a ausência/presença da variável PAR possa influenciar na definição do número de classes, considera-se que as anomalias estimadas para as variáveis CSM, TSM e PCM sejam impactantes no resultado das simulações.

A configuração das PBGQ produzidas para o cenário futuro (Figura 4.25) demonstra um padrão de distribuição zonal das regiões encontradas, com variação latitudinal e assimetrias próximas aos continentes sul-americano e africano, de aspecto similar à classificação anual referente ao período 2006-2015.

Figura 4.24 – Gráfico da aplicação do critério *Silhouette* indicando o número de ideal de 5 classes a partir dos dados futuros de entrada (CSM, TSM e PCM), além da batimetria. O eixo vertical indica o número de classes, e o eixo horizontal a distribuição dos objetos (dados) em cada classe sugerida.



Entretanto, considerando o menor número de classes (5) definido para o cenário futuro, houve um reagrupamento das 8 classes obtidas na classificação 2006-2016. Utilizando algarismos romanos para representar as PBGQ futuras, tem-se de modo geral, que a PBGQ 1 e parte da PBGQ 2 (anual) foram integradas à PBGQ I (futura). Da mesma forma, partes da PBGQ 2 e PBGQ 3 (anuais) foram integradas à PBGQ II (futura). A PBGQ 4 e parte da PBGQ 5 (anuais) foram integradas à PBGQ III (futura). A PBGQ 6 e parte da PBGQ 5 (anuais) foram integradas à PBGQ IV (futura). E as PBGQ 7 e 8 (anuais) foram integradas à PBGQ V (futura) (ver Figuras 4.10 e 4.25).

Figura 4.25 - Representação das PBGQ do cenário futuro geradas pelo algoritmo FCM a partir das variáveis de entrada: temperatura da superfície do mar, concentração de clorofila-a, profundidade da cada de mistura e batimetria. Cada cor representa uma PBGQ.



Fonte: Próprio Autor

Considerando os valores médios das PBGQ anuais (Tabela 4.2) e PBGQ do cenário futuro (Tabela 4.9), observa-se certa semelhança em alguns casos. A PBGQ 1 assemelhou-se à PBGQ I, assim como a PBGQ 3 à PBGQ II, a PBGQ 5 com a PBGQ III, PBGQ 6 com a PBGQ IV e PBGQ 8 com a PBGQ V (ver Figuras 4.9 e 4.24).

Para a realização de uma análise comparativa tanto dos valores médios quanto das áreas das PBGQ futuras, foram consideradas essas semelhanças: PBGQ1 – PBGQ I; PBGQ 3 – PBGQ II; PBGQ 4 – PBGQ III; PBGQ 6 – PBGQ IV; PBGQ 8 – PBGQ V. Os valores médios, desvios padrão e mínimos-máximos de cada variável para as respectivas PBGQ futuras podem ser vistos na Tabela 4.8.

PCM e BAT em metros; área em km ² .					
PBGQ	TSM	CSM	PCM	BAT	Área
1	28,92 ± 0,29 (25,65 - 32,60)	0.06 ± 0.08 (0 - 0.2)	28,45 ± 6,52 (9,56 - 60,64)	-4081,58 ±1192,29 (7544 – 273)	18.385.329,778
2	24,03 ± 0,42 (20,39 - 28,12)	$0,08 \pm 0,05$ (0 - 0,30)	44,29 ± 11,30 (7,85 - 81,13)	-4035,64± 1151,36 (6545– 390)	13.238.136,945
3	19,14 ± 0,54 (14,19 - 24,50)	0,25 ± 0,12 (0,05 - 0,8)	69,60 ± 9,98 (10,31 - 120,97)	-4012,99 ±1334,02 (6081 –158)	7.831.544,248
4	11,50 ± 0,6 (4,23 - 17,98)	0,42 ± 0,15 (0,06 - 0,95)	91,62 ± 12,78 (8,87 - 139,76)	-3688,49± 1837,25 (6147– 167)	8.059.854,990
5	3,30 ±0,69 (-0,13 - 8,44)	0,28 ± 0,13 (0,06 - 0,72)	113,58 ± 64,31 (1,93 -184,13)	-3825,23± 1007,169 (8278 – 77)	13.314.888,216

Tabela 4.8 - Valores médios das PBGQ do cenário futuro, seguido de seus respectivos desvios padrão e valores mínimo-máximos de cada variável. Os valores de TSM são dados em °C; CSM em mg m⁻³; PCM e BAT em metros; área em km².

Fonte: Próprio Autor

A partir da semelhança entre as PBGQ e os valores médios das variáveis (Tabela 4.8), estima-se na PBGQ I (Figura 4.25) um aumento de 1,98°C no valor médio de TSM; diminuição de 0,07 mg m⁻³ de CSM e redução de 0,98 metros da PCM. Esse mesmo padrão de alteração pode ser visto na PBGQ II (Figura 4.25), em que se estima um aumento expressivo de 3,12°C da TSM; diminuição de 0,06 mg m⁻³ da CSM; redução de 7,66 metros da PCM.

Em relação à PBGQ III (Figura 4.25), houve um significativo aumento dos valores de TSM (1,88°C) e diminuição dos valores CSM (0,08 mg m⁻³). A PCM demonstrou um aumento de seus valores (11,2 metros). A PBGQ IV (Figura 4.25) apresentou um aumento médio de 3,94°C da TSM; redução de 0,11 mg m⁻³ da CSM e diminuição expressiva da PCM de 11,2 metros. Em relação à PBGQ V (Figura 4.25), a TSM apresentou um aumento de

2,30°C; a CSM apresentou redução de 0,03 mg m⁻³ e a PCM demonstrou uma maior redução de 47,57 metros.

A partir da observação dos valores absolutos presentes nas Figuras 4.26-4.27 foi possível analisar a variação das áreas das PBGQ anuais em relação às PBGQ futuras.





Fonte: Próprio Autor





Fonte: Próprio autor

Tendo em vista a PBGQ I (futura), observou-se um aumento de 13% da área em relação à PBGQ 1 (anual). Da mesma forma, houve 55% de aumento da área da PBGQ II em relação à PBGQ 3, além de 71% da área da PBGQ III em relação à PBGQ 4. Pode-se observar um aumento de 82% da área da PBGQ IV em relação à PBGQ 6, e 172% da PBGQ V em relação à PBGQ 8, sendo esta a maior variação de área observada.

De toda forma, a ocorrência de mudanças climáticas pode vir a influenciar negativamente na produtividade pesqueira, repercutindo negativamente sobre a segurança alimentar dos que usufruem destes recursos, além de comprometer a integridade dos diversos ecossistemas marinhos e costeiros (LLORET et al., 2015; MANRIQUEZ et al., 2016).

Por meio do exercício da delimitação destas PBGQ, torna-se possível realizar um monitoramento destas regiões, visando observar o comportamento das feições oceanográficas existentes nestas, assim como, os recursos pesqueiros e a produtividade primária.

5 CONCLUSÃO

Com base no trabalho realizado e nos resultados obtidos, conclui-se que o classificador não supervisionado FCM foi eficiente na delimitação de PBGQ no Atlântico Sul a partir de dados anuais e sazonais, captando parte da dinâmica oceânica por meio da observação de feições oceanográficas que regem a circulação superficial do Atlântico Sul. Destaca-se que parte das PBGQ aqui delimitadas concordaram com estudos existentes na literatura sobre o tema.

Sobre o FCM, destaca-se o recurso de estimar os graus de pertinência. Estas informações favorecem ou facilitam a percepção de processos distintos, atuantes sobre determinadas PBGQ a partir do conjunto de variáveis utilizado. O problema de selecionar o número ideal de classes de entrada foi aqui solucionado a partir da aplicação do critério *Silhouette*. Este método se mostrou eficiente ao sugerir um conjunto praticamente perfeito, ou seja, com valores negativos inexistentes, resultando no número de 8 classes de entrada.

O FCM não foi totalmente eficiente quando aplicado aos dados em escala sazonal, apresentando a PBGQ 5 de maneira totalmente distinta em relação à classificação anual das PBGQ. Essa inconsistência é tida como uma crítica ao método, que é muito sensível a ruídos, apresenta alto custo computacional e não apresenta uma ótima adequabilidade para aplicação em problemas específicos, quando se trata de um grande volume de dados. Para superar estes problemas, é sugerido aplicar outros modelos com características *fuzzy* que foram desenvolvidos justamente para otimizar tais adversidades do FCM, como por exemplo o *Possibilistic Fuzzy C-Means* sugerido por Pal et al. (1997). Outra sugestão para uma melhor análise das classificações sazonais seria aplicar sucessivamente o critério *Silhouette*, a fim de verificar uma combinação mais precisa do número de classes de entrada no FCM em cada estação do ano.

91

As variáveis da TSM e CSM representaram boa parte das feições oceanográficas encontradas nas PBGQ, caracterizando as principais correntes superficiais do Atlântico Sul. A PCM foi importante em regiões de mais altas latitudes na bacia do Atlântico Sul, onde os ventos de oeste são mais intensos.

A PAR teve influência mais destacada nas regiões equatorial e tropical, onde a radiação solar é mais intensa. Cabe destacar que na classificação anual, a batimetria não realçou feições do fundo oceânico a partir da abordagem dos graus de pertinência. O contrário se mostrou nas PBGQ sazonais, em que a batimetria demonstrou feições importantes não só nas plataformas continentais, mas também em localidades na bacia do Atlântico Sul como na Dorsal Meso Atlântica, além de cadeias vulcânicas como a Cadeia Vitória-Trindade e Cadeia de Walvis.

O exercício aqui realizado para estimar variações futuras, a partir do CMIP5, mostrou-se coerente quanto à classificação anual de PBGQ. Esta análise demonstrou um aumento da TSM e redução da CSM e PCM na maioria das PBGQ encontradas, repercutindo provavelmente, na diminuição do número de PBGQ existentes para o ano de 2099. Como complemento a este exercício realizado, sugere-se a obtenção de outras bases de dados que forneçam a estimativa da variável PAR no cenário futuro.

O trabalho ora apresentado demonstrou que dados de sensoriamento remoto, modelagem e *in situ*, podem não só mapear as principais feições oceanográficas da bacia do Atlântico Sul em abordagens anuais e sazonais. Acima de tudo, podem prover a extensão e os limites das principais PBGQ desta bacia, apresentando mais uma forma de acompanhar as variações na dinâmica do Atlântico Sul, e auxiliando em novas formas de monitorar as mudanças climáticas.

Como sugestões para futuros trabalhos, seria interessante incluir novos conjuntos de variáveis, como por exemplo, os campos de vento em superfície. A partir desta variável, é possível observar alterações na PCM,

92

verificar se esta encontra-se mais rasa ou profunda em determinadas regiões, uma vez que a PCM também é forçada pelo vento. Além deste fator, o vento pode ser interessante para demonstrar se existe certa influência sobre o posicionamento e deslocamento anual e sazonal das PBGQ identificadas nos resultados obtidos. Outra variável interessante para este tipo de estudo seria a salinidade da superfície do mar. Assim como a TSM, a salinidade também é considerada uma variável física importante para a caracterização da distribuição de nutrientes na coluna de água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMANTE, C.; EAKINS, B. W. **ETOPO1 1 arc-minute global relief model**: procedures, data sources and analysis. NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24, March, p.19, 2009.

BAKUN, A. Guinea Current Upwelling. Nature, v.271, p.147-150, 1978.

BEZDEK, J. C.; EHRLICH, R.; FULL, W. FCM: The fuzzy c-means clustering algorithm. **Computers and Geosciences**, v.10, n. 2-3, p.191-203, 1984.

BLONDEAU-PATISSIER, D.; GOWER, J. F. R.; DEKKER, A. G.; PHINN, S. R.; BRANDOC, V. E. A review of ocean color remote sensing methods and statistical techniques for the de- tection, mapping and analysis of phytoplankton blooms in coastal and open oceans. **Progress in Oceanography**. v.123. p.123-144. 2014.

BOYER, D.; COLE, J.; BARTHOLOME, C. Southwestern Africa: Northern Benguela Current region. **Marine Pollution Bulletin**, v. 41, p.123-140, 2000.

BRANDINI, F. P.; BOLTOVSKOY, D.; PIOLA, A.; KOCMUR, S.; ROTTGERS, R.; ABREU, P. C.; LOPES, R. M. Multiannual trends in fronts and distribution of nutrients and chlorophyll in the southwestern Atlantic (30-62°S). **Deep-Sea Research I**, v.47, p.1015-1033, 2000.

BREECE, M. W.; FOX, D. A.; DUNTON, K. J.; FRISK, M. G.; JORDAAN, A.; OLIVER, M. J. (2016). Dynamic seascapes predict the marine occurrence of an endangered species: Atlantic Sturgeon Acipenser oxyrinchus oxyrinchus, **Methods in Ecology and Evolution**. v.7, p.725-733, 2016.

CABRÉ, A.; MARINOV, I.; LEUNG, S. Consistent global responses of marine ecosystems to future climate change across the IPCC AR5 earth system models. **Climate dynamics**, v.45, n.5-6, p.1253, 2015.

CAMPBELL, J.W.; AARUP, T. Photosynthetically available radiation at high latitudes, Limnol. **Oceanogr**. v.34, p.1490-1499, 1989.

CAMPBELL, J. B. **Introduction to remote sensing**. The Guilford Press, 1996.622p.

CAPÍTOLI, R. R.; BEMVENUTI, C. Distribuição batimétrica e variações de diversidade dos macroinvertebrados bentônicos da plataforma continental e talude superior no extremo sul do Brasil. **Atlântica**. v. 26, p. 27-43, 2004.

CATALDI, M.; JUNIOR, L. P.; ALVES, J. L. D. Estudo da influência das anomalias da tsm do atlântico sul extratropical na região da cbm no regime hidrometeorológico de verão do sul e sudeste do brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.25, p.12, 2010.

CENTENO, J. A. S. Sensoriamento remoto e processamento de imagens digitais. 1° edição. Curitiba: Departamento de Geomática; U niversidade Federal do Paraná, 210 p, 2003.

CHANG, C. T.; LAI, J. Z. C.; JENG, M. J. A Fuzzy K-means Clustering Algorithm Using Cluster Center Displacement. **journal of information science and engineering**. v.27, p.995-1009, 2011.

CHELTON, D. B.; WENTZ, F. J.; GENTEMANN, C. L.; SZOEKE, R. A.; SCHLAX, M. G. Satellite microwave SST observations of transequatorial tropical instability waves. **Geophysical Research Letters**, v.27, n. 9, p.1239-1242, 2000.

CLANCY, R.M. Operational modeling: Ocean modeling at the Fleet Numerical Oceanography Center. **Oceanography**. v. 5, n. 1,p. 31-35. 1992.

CLARCK, D.K.; SHERMAN, J.W. Nimbus-7 Coastal Zone Color Scanner: ocean color applications. **MTS Journal**, v.20, n.2, p.43-56, 1986.

CULLEN, J. J. P.; FRANKS, D.; KARL, M.; LONGHURST, A. Physical influences on marine ecosystem dynamics. In: ROBINSON, A. R.; MCCARTHY, J. J.; ROTHSCHILD, B.J. (eds.). **The sea**: biological-physical interactions in the ocean. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2002. v.12, p. 297-336. ISBN 0-471-18901-4.

DANCEY, C.; REIDY, J. estatística sem matemática para psicologia: usando SPSS para Windows. Porto Alegre: Ed. Artmed, 2006. 608p.

DEACON, G.E.R. A general account of the hydrology of the South Atlantic Ocean. **Discovery Reports**, v.7, p.171-238, 1933.

DEACON. G. **The Anatarctic circumpolar ocean**. Cambridge University Press, 1984. 180p.

DEVRED, E.; SATHYENDRANATH, S.; PLATT, T. Delineation of ecological provinces using ocean colour radiometry. **Marine Ecology Progress Series**, v.346, p. 1-13, 2007.

DUARTE, C.M. Global change and the future ocean: a grand challenge for marine sciences. **Front. Mar. Sci.**, v.1, n. 63, 2014.

DUCKLOW, H. W.; HARRIS, R. P. Introduction to the JGOFS North Atlantic bloom experiment, deep-sea res. II: **Top. Stud. Oceanogr**.,v.40, p.1-8, 1993.

DUDA, A. M.; SHERMAN, K. A new imperative for improving management oflarge marine ecosystems. **Ocean & Coastal Management.** v. 45, p. 797-833, 2002.

FALKOWSKI, P.G.; BEHRENFELD,M.J.; ESAIAS, E.; BALCH, W.;
CAMPBELL, J.W.; IVERSON, R.L.; KEFER, D.A.; MOREL,A.;
YODER,J.A. Satellite primary productivity data and algorithm
development: a science plan for mission to planet Earth. In: JOOKER, S.
B.; FIRESTONE, E. R. (ed). SeaWifs technical report series.
Whashington, DC: NASA, 1998. 36P. NASA Technical Memorandum
104566.

FARIAS, E. G. G.; LORENZZETTI, J. A.; BENTAMY, A.; BERTRAND CHAPRON, B.; ROMAIN, H. Fuzzy logic applied to track generation areas of swell systems observed by SAR. **Geoscience and Remote Sensing Letters.** v.9, p.5, 2012.

- FLEET NUMERICAL METEOROLOGY AND OCEANOGRAPHY CENTER (FNMOC). **Thermal Ocean Prediction (TOPS)**. Website oficial, 2016. Disponível em: http://orca.science.oregonstate.edu//

FENG, L.; HU, C. Comparison of valid ocean observations between MODIS Terra and Aqua over the global oceans. **IEEE Transactions on geosciences and Remote Sensing**. v.54, p.1575-1585, 2016.

FOO, A.; BYRNE, M. Marine gametes in a changing ocean: Impacts of climate change stressors on fecundity and the egg. **Marine Environmental Research**, v.128, p.12-24, 2017.

FROUIN, R.; PINKER, R. T. Estimating Photosynthetically Active Radiation (PAR) of the Earth's surface from satellite observations. **Remote Sensing of Environment**, v. 51, 98-107, 1995.

FROUIN, R.; MCPHERSON, J.; UEYOSHI, K.; Franz, B. A. A time series of photosynthetically available radiation at the ocean surface from SeaWiFS and MODIS data. In: **SPIE Asia-Pacific remote sensing international society for optics and photonics**, p. 852519-852519, 2012.

GARZOLI, S.; GARRAFFO, Z. Transports, frontal motions and eddies at the Brazil-Malvinas Currents Confluence. **Deep- Sea Research**, v. 36, n. 5, p.681-703, 1989.

GARZOLI, S.L.; BIANCHI, A. Time-space variability of the local dynamics of the Malvinas-Brazil confluence as revealed by inverted echo sounders. **Journal of Geophysical Research,** v.92, p.1914-1922, 1987.

GONÇALVES, M. L., NETTO, M. L. A., COSTA, J. A. F., ZULLO JR, J. An unsupervised method of classifying remotely sensed images using Kohonen self-organizing maps and agglomerative hierarchical clustering methods. **International Journal of Remote Sensing**, v.29, p.3171-3207, 2008.

GORDON, A.L. Indian-Atlantic transfer of thermocline water at the Agulhas Retroflection. **Science**, v.227, p.1030-1033, 1985.

GRODSKY, S. A.; J. A. CARTON, J. A. 2002: Surface drifter pathways originating in the equatorial Atlantic cold tongue. **Geophysical Research Letters**, v.29, p.4, 2002.

HALL, S. J. The continental shelf benthic ecosystem: current status, agents for change and future prospects. **Environmental Conservation**, 29(3), p.350-374, 2002.

HARDMAN-MOUNTFORD, N. J.; HIRATA, T.; RICHARDSON, K. A.; AIKEN, J. An objective methodology for the classification of ecological pattern into biomes and provinces for the pelagic ocean, **Remote Sens. Environ**., v.112, n. 8, p. 3341-3352, 2008.

HASTENRATH, S.; LAMB, P.J. Climatic Atlas of the Tropical Atlantic and Eastern Pacific Oceans. University of Wisconsin Press, 1997. 112p.

HENIN, C.; HISARD, P.; PITON, B. **Observations hydrologiques dans I'ocean Atlantique Equatorial**. Paris:ORSTOM: , 1986. v.1, p.1-191.

HOBDAY, A.J.; YOUNG J.W.; MOESENEDER C.; DAMBACHER J.M. Defining dynamic pelagic habitats in oceanic waters off eastern Australia. **Deep-Sea Research II,** v. 58, p.734-745. 2011.

HONJO, S. Understanding the role of the biological pump in the global carbon cycle: an imperative for ocean science. **Oceanography**, v. 27, p. 10-16, 2014.

HOWES, E.L.; JOOS, F.; EAKIN, C.M.; GATTUSO, J.P. An updated synthesis of the observed and projected impacts of climate change on the chemical, physical and biological processes in the oceans. **Frontiers in Marine Science 2**, v.36, 2015.

HU, C.; LEE, Z.; Franz, B. Chlorophyll a algorithms for oligotrophic oceans: A novel approach based on three-band reflectance difference. **Journal of Geophysical Research**, v.117, p.25, 2012.

INGHAM, M.C. Coastal upwelling in the northwestern gulf of Guinea. **Bulletin of Marine Science**, v. 20, p.1-34, 1970.

INTERNATIONAL OCEAN COLOUR COORDINATING GROUP (IOCCG), Partition of the ocean into ecological provinces: Role of ocean-colour radiometry. In: Dowell, M.; Platt, T.; Stuart, V. (eds.). **Reports and monographs of the international Ocean-Colour Coordinating Group (IOCCG** Dartmouth, Nova Scotia, 2009. v. 1, p. 1-98.

IPCC. **Climate change 2014**: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, p.151, 2014.

IRWIN, A. J.; OLIVER, M. J. Are ocean deserts getting larger?. **Geophys. Res. Lett.** v.36, p.5, 2009.

JIANG, B. Visualisation of fuzzy boundaries of geographic objects. **Cartography**. v.27, p.7, 1998.

JEGEN, M.; AVDEEVA, A.; BERNDT, C.; FRANZ, G.; HEINCKE, B.; HÖLZ, S.; NESKA, A.; MARTI, A.; PLANERT, L.; KOPP, H.; BABA, K.; RITTER, O.; WECKMANN, O.; MEQBEL, N.; BEHRMANN, J. 3-D. Magnetotelluric Image of Offshore Magmatism at the Walvis Ridge and Rift Basin. **Tectonophysics**, v. 686, p.98-108, 2016.

JOSEPH, P. An improved algorithm for reprojecting rays through pixel images. **IEEE Trans. Med. Imag.** v.1, p.6, 1983.

KAMPEL. M. Estimativa da produção primária e biomassa fitoplanctônica através de sensoriamento remoto da cor do oceano e dados in situ na costa sudeste brasileira. 2003. 311p. Tese (Doutorado em Oceanografia Biológica) - Universidade de São Paulo, São Paulo, p.311. 2003.

KAMPEL, M. Sensoriamento remoto aplicado à Oceanografia. In: VII Curso de uso escolar do sensoriamento remoto no estudo do meio ambiente. São José dos Campos: Inpe, 2004. 31p.

KAMPEL, M.; SOUZA, R. B. Observação por satélite de um vórtice de núcleo quente na Zona de Confluência Brasil-Malvinas durante a Operação Antártica XXI. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12. (SBSR), 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 3643-3650. CD-ROM, On-line. ISBN 85-17-00018-8. (INPE-12741-PRE/8031). Disponível em: http://urlib.net/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.21.00.01

KAMPEL. M.; NOVO, E. Sensoriamento remoto da cor da água. In: SOUZA. R. (ed.). **Oceanografia por satélites**. São José dos Campos: INPE, 2005. Cap.12, p.179-196.

KAVANAUGH, M. T.; OLIVER, M. J.; Francisco P. CHAVEZ, F. P.; Ricardo M. LETELIER, R. M.; KARGER, F. E.; DONEY, S. C. Seascapes as a new vernacular for pelagic ocean monitoring, management and conservation. **Journal of Marine Science**. v.73, p.1839-1850, 2016.

KAWAI, Y.; WADA, A. Diurnal sea surface temperature variation and its impact on the atmosphere and ocean: A review. **Journal of oceanography**, v.63, n. 5, p. 721-744, 2007.

KIRK. J.T.O. Light and photosynthesis. In: KIRK, J. T. O (ed.). **Aquatic Ecosistems.** 3. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2011. 665p. ISBN (978-0-521-15175-7).

KLINCK, J., NOWLING, W. Antarctic Circumpolar Current. Encyclopedia of Ocean Science, **Academic Press**, v.1, 2001,151-159p.

KLINGER, B.A.; HAINE, T.W.N. **Ocean circulation in three dimensions**. Cambridge University Press, 2017. 482p.

KLIPPEL, S.; AMARAL, S.; VINHAS, L. Development and evaluation of species distribution models for five endangered elasmobranchs in southwestern Atlantic. **Hidrobiologia**. v.773, p.26, 2016.

KOSTADINOV, T. S.; CABRÉ, A.; VEDANTHAM, H.; MARINOV, I.; BRACHER, A.; BREWIN, R. J. W.; BRICAUD, A.; HIRATA, T.; HIRAWAKE, T.; MOUNTFORD, N. J. H.; MOUW, C.; ROY, S.; UITZ, J. Inter-comparison of phytoplankton functional type phenology metrics derived from ocean color algorithms and Earth System Models. **Remote Sensing of Enviroment**. v.190, p. 162-177, 2017.

KRATZER. S, HARVEY. T, PHILIPSON. P. The use of ocean color remote sensing in integrated coastal zone management - A case study from Himmerfjärden, Sweden. **Marine Policy**. v. 43, p. 29-39, 2014.

LAAK, P. E. V.; SANCHEZ-AZOFEIFA, G. A. Mapping PAR using MODIS atmosphere products. **Remote Sensing of Environment.** v. 94, p. 554-563, 2005.

LEVITUS, S. Climatological atlas of the world ocean. **NOAA Professional Papers**. v.13, p.1-173, 1982.

LIMA, L. N.; LENTINI, C. A. D. Variabilidade sazonal da profundidade da camada de mistura na região do Complexo Recifal dos Abrolhos e da Cadeia Vitória-Trindade baseada em dados de ventos derivados do

satélite QuikSCAT. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., (SBSR), 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. p. 6533-6540. DVD, On-line. ISBN 978-85-17-00044-7. Disponível em:

<http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.17.17.18.42>.

LIU, R.; LIANG, S.; HE, H.; LIU, J. ZHENG, T. Mapping incident photosynthetically active radiation from MODIS data over China. **Remote Sensing of Environment.** v. 113, n. 3, p. 998-1009, 2008.

LLORET, J.; RÄTZ, H.J.; LLEONART, J.; DEMESTRE, M. Challenging the links between seafood and human health in the context of global change. **J. Mar. Biol. Assoc. U. K**. v.96, p.29-42, 2015.

LONGHURST, A. et al. an Estimate of Global Primary Production in the Ocean From Satellite Radiometer Data. **Journal of Plankton Research**, v. 17, n. 6, p. 1245-1271, 1995.

LONGHURST, A. Seasonal cycles of pelagic production and consumption, **Prog. Oceanogr**., v. 36, p.77-167, 1995.

LONGHURST, A. **Ecological geography of the sea**. London: Academic Press, 1998. 527p.

LONGHURST, A. **Ecological geography of the sea**. Academic Press,London, 2007. 575p.

LORENZZETTI, J. A.; GAETA, S. A. The Cape Frio Upwelling effect over the South Brazil Bight northern sector shelf waters: a study using AVHRR images.**International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**. v.31, p.6, 1996.

LUTJEHARMS, J.R.E.; VAN BALLEGOOYEN, R.C. The Retroflection of the Agulhas Current. **Journal of Physical Oceanography**. v.18, p.1570-1583, 1988.

MANN. K. H., LAZIER. J R. N. Dynamics of marine ecossystems. 3. ed. **Journal of Chemical Information and Modeling**. v.53, p.520. 2006.

MARDIA, K. V.; KENT, T.; BIBBY, T. M. **Multivariate analysis.** Academic Press.v.24, 1982. 502p.

MANRIQUEZ, P.H.; JARA, M.E.; SEGUEL, M.E.; TORRES, R.; ALARCON, E.; LEE, M.R. Ocean acidification and increased temperature have both positive and negative effects on early ontogenetic traits of a rocky shore keystone predator species. **PLoS One**. v.11, p.22, 2016. MARTINY, A. A. C. et al. Strong latitudinal patterns in the elemental ratios of marine plankton and organic matter. **Nature Geoscience**, v. 6, n. 4, p. 279-283, 2013.

MEILLAND, J. et al. Planktonic foraminiferal biogeography in the Indian sector of the Southern Ocean: contribution from CPR data. **Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers**, v. 110, p. 75-89, 2016.

MEEUWIS, J.M.; LUTJEHARMS, J. R. E. 1990: surface thermal characteristics of the Angola-Benguela front. **South African Journal of Marine Science**, v.9, p.261-279, 1990.

MISHRA. D. R, NARUMALANI. S, Donald RUNDQUIST. D, LAWSON. M. Characterizing the vertical diffuse attenuation coefficient for downwelling irradiance in coastal waters: Implications for water penetration by high resolution satellite data. **Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**. v. 60. p. 48-64. 2005.

MOLINARI, R.L. 1982: Observations of eastward currents in the tropical South Atlantic Ocean: 1978-1980, **Journal of Geophysical Research**, v.87, p.9707-9714, 1982.

MOSIER, C. I. The need and means of cross-validation. I. Problems and designs of cross-validation. **Educational and Psychological Measurement**, v.11, p.511, 1951.

MOTOKI, A.; MOTOKI, K.; MELO, D. Caracterização da morfologia submarina da Cadeia Vitória-Trindade e Áreas Adjacentes-ES, com base na batimetria predita do topo versão 14.1. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. v.13, p.151-170, 2012.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS).** Website oficial, 2016. Disponível em: http://modis.gsfc.nasa.gov/> Acesso em: 14 Fev. 2016.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). ETOPO1 Arc-Minute Global Relief Model. Website oficial, 2016. Disponível em: www.ngdc.noaa.gov/ Acesso em: 20 Fev. 2016.

OLSON, D.B.; PODESTÁ, G. P.; EVANS, R.H.; BROWN, O. B. Temporal variations in the separation of Brazil and Malvinas currents. **Deep-Sea Research**, v. 35, p.20, 1990.

PAL, N. R.; PAL, K.; BEZDEK, J. C. A mixed c-means clustering model. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON FUZZY SYSTEMS, 6., 1997, Barcelona, Spain. **Proceedings...** Barcelona: IEEE, 1997. p.11-21.

PEIXOTO, J.P.; OORT, A.H. **Physics of climate**. Springer Verlag, 1992. 520p.

PETERSON, R.G.; STRAMMA, L. Upper-level circulation in the South Atlantic Ocean. **Progress in Oceanography**, v.26, p.1-73, 1991.

PEZZI, LU. P.; SOUZA, R. B.; QUADRO, M. F. L. Uma Revisão dos Processos de interação oceano-atmosfera em regiões de intenso gradiente termal do Oceano Atlântico Sul baseada em dados observacionais**. Rev. bras. meteorol**. v.31, n.4, p.26, 2016.

PIERSON, D. C.; KRATZER, S.; STROMBECK, N.; HAKANSSON, B. Relationship between the attenuation of downwelling irradiance at 490 nm with the attenuation of PAR (400 nm–700 nm) in the Baltic Sea. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, p. 668-680, 2008.

PLATT, T.; CAVERHILL, C.; SATHYENDRANATH, S. Basin-scale estimates of oceanic primary production by remote sensing: The North Atlantic. **Journal of Geophysical Research: Oceans**. v. 96, p.15147-15159, 1991.

PLATT, T.; SATHYENDRANATH, S. Spatial structure of pelagic ecosystem processes in the global ocean. **Ecosystems**, v. 2, n. 5, p. 384-394, 1999.

PLATT, T.; BOUMAN, H.; DEVRED, E.; FUENTES-YACO, C.; SATHYENDRANATH, S. Physical forcing and phytoplankton distributions. **Scientia Marina**, v.69 ,p.55-73. 2005.

PLATT, T.; SATHYENDRANATH, S.; Ecological indicators for the pelagic zone of the ocean. **Remote Sensing of Environment**., v.112 ,p. 3426 - 3436, 2008.

POLOVINA, J. J.; HOWELL, E. A.; ABECASSIS, M. Ocean's least productive waters are expanding. **Geophys. Res. Lett.**, v.35, n. 3, p.5, 2008.

QUARTLY, G.D.; SROKOSZ, M.A. Seasonal variations in the region of the Agulhas Retroflection: Studies with Geosat and FRAM. **Journal of Physical Oceanography**, v.23, 07-24, 1993.

REYGONDEAU, G. et al. Biogeography of tuna and billfish communities. **Journal of Biogeography**, v. 39, n. 1, p. 114–129, 2012.

REYGONDEAU, G. et al. Dynamic biogeochemical provinces in the global ocean. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 27, n. 4, p. 1046-1058, 2013.

RICHARDS, J. A. **Remote sensing digital image analysis**. Springer Verlag. p.375, 1986.

RIVAS, A.L. Spatial and temporal variability of satellite-derived sea surface temperature in the southwestern Atlantic Ocean. **Continental Shelf Research**, v. 30, n. 7, p. 752-760, 2010.

ROBINSON, I. S. **Measuring the oceans from space**: the principles and methods of satellite oceanography. 1. ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004. 670p. ISBN (978-3-540-42647-9).

ROCHA, T.; PERES, S. M.; BÍSCARO, M. H.; MADEO, R. C. B.; BOSCARIOLI, C. Tutorial sobre fuzzy-c-means e fuzzy learning vector quantization: abordagens híbridas para tarefas de agrupamento e classificação. **RITA.** v.19, p.44, 2012.

RODRIGUES. R. Circulação atmosférica e oceânica. In: CASTELLO, J.; KRUG, L. (eds.). **Introdução às ciências do Mar. Pelotas**. Ed. Textos, 2015. p.172-196.

ROUSSEEUW, P.J. 1987. Silhouettes: A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. **Journal of Computational and Applied Mathematics**, v. 20: p.53-65, 1987.

ROUYER. T.; FROMENTIN. J. M.; MENARD. F.; CAZELLES. B.; BRIAND. K.; PIANET. R; PLNQUE. B.; STENSETH, N. C. complex interplays among population dynamics, environmental forcing, and exploitation in fisheries. **Proc Natl Acad Sci (PNAS),** v.105, n. 14, p. 5420–5425, 2008. Doi: 10.1073/pnas.0709034105. United States.

SCHLITZER, R.; MONFRAY, P.; HOEPFFNER, N. **Global ocean** productivity and the fluxes of carbon and nutrients: combining observations and models. Report of a Workshop held at the Institute for Environment and Sustainability, p.65, 2002.

SEALEY, K. S.; BUSTAMANTE, G. Setting geographic priorities for Marine conservation in Latin America and the Caribbean. **The Nature Conservancy**, Arlington, Virginia.p.146. 1999.

SHERMAN, K. The large marine ecosystem approach for assessmentand management of ocean coastal waters. In: Hennessey, T. M.; Sutinen, J. G. (ed.). **Sustaining large marine ecosystems**: the human dimension.Amsterdam: Elsevier B.V.,2005. p. 3-16.

SIEGEL, D. A. et al. Global biogeochemical cycles. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 28, p. 181-196, 2014.

SILVA JR, C. L.; KAMPEL, M.; ARAÚJO, C. E. S.; STECH, J. L. Observação da penetração do ramo costeiro da corrente das Malvinas na costa sul-sudeste do Brasil a partir de imagens AVHRR. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO (SBSR), 8., 1996, Salvador. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1996. p. 787-794. CD-ROM. ISBN 85-17-00014-5. (INPE-6174-PRE/2263). Disponível em: <http://urlib.net/sid.inpe.br/deise/1999/02.01.15.13>.

SILVA JR, C. L.; KAMPEL, M.; ARAÚJO, C. E. S.; NETO, O. O. B.; PRIETO, J. M. N. Imagens termais de satélite aplicadas à pesca de atuns e afins - projeto SATPEIXE. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 9. (SBSR)., 1998, Santos. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1998. p. 849-860. CD-ROM. ISBN 85-17-00015-3. (INPE-6945-PRE/2907). Disponível em: <http://urlib.net/sid.inpe.br/deise/1999/02.10.15.05>.

SILVEIRA, A. G.; ANGEL, E. S.; GARCIA, V. M.; GARCIA, C. A. E.; NUÑEZ, R. M.; KARGER, F. M. Biogeographical regions of the tropical and subtropical Atlantic Ocean off South America: classification based on pigment (CZCS) and chlorophyll-a (SeaWiFS) variability. **Continental Shelf Reseach**, v.24, p.983-1000, 2004.

SOPHARAK, A.; UYYANONVARA, B. E. S. B. Automatic exudate detection from nondilated diabetic retinopathy retinal images using fuzzy c-means clustering. **Sensors**. v.9, p.2148-2161, 2009.

SPALDING, M. D.; FOX. H.; ALLEN. G.; DAVIDSON. N.; FERDAÑA. Z.; FINLAYSON. M.; HALPERN. B.; JORGE. M.; LOMBANA. A.; LOURIE. S.; MARTIN. K.; MCMANUS. E.; MOLNAR. J.; RECCHIA. C.; ROBERTSON. J. Marine ecoregions of the world: A bioregionalization of coastal and shelf areas, **BioScience**, v.57., p.573-583. July 2007.

SPALDING, M. D.; AGOSTINI, V. N.; RICE, J.; GRANT, S. M. Pelagic provinces of the world: a biogeographic classification of the world's surface pelagic Waters. **Ocean & Coastal Management**. v.60, p.19-30, 2012.

SUBBALAKSHMI, C.; KRISHNA, G.; RAO, S.; RAO, P. A method to find optimum number of clusters based on fuzzy silhouette on dynamic data set. **Procedia Computer Science**, v.46, p.346-353, 2015.

SULEMAN, A. Measuring the congruence of fuzzy partitions in fuzzy cmeansclustering. **Applied Soft Computing**. v.52, p.1285-1295, 2017. STANTON, N.; MELLO, S.; SICHEL, S. Morfoestrutura da Cordilheira Mesoceânica no Atlantico Sul entre 0°S e 50°S. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 24, n. 2, p. 231-241, 2006.

STRAMMA, L.; PETERSON, R. G. The south Atlantic current. J. **Phys. Oceanogr**., v. 20, p.846-859, 1990.

STRAMMA, L. Geostrophic transport of the South Equatorial Current in the Atlantic, **Journal of Marine Research**, v.49, p.281-294, 1991.

STRAMMA, L.; ENGLAND M. On the water masses and mean circulation of the South Atlantic Ocean. **Geophys. Res**. v.104, p.21, 1999.

TAN, G. X.; VIARD-GAUDIN, C.; KOT, A. Online writer identification using fuzzy c-means clustering of character prototypes. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FRONTIERS IN HANDWRITING RECOGNITION, 11., 2008, Montreal, Canadá. **Proceedings...** Montreal: Concordia University, 2008. p.475-480.

THOMSON, R. "Why there is an intense eastward current in the North Atlantic but not in the South Atlantic," **Phys. Oceanogr** v.1: p.235-239, 1971.

THORNDIKE, R. L. Who Belong in the Family?. **Psychometrika**. v.18, p.267-276, 1953.

TODD, A.; ROSENBERGER, K. J.; GARTNER, A. L. **Reformatted data sets used in the cooperative LACSD/USGS Palos Verdes flow study, 2000-2008**. U.S. Geological Survey Open-File Report 2010-1253, 2012. 45p.

TOMMASI, D.; STOCK, C.; ALEXANDER, M.; YANG, X.; ROSATI, A.; VECCHI, G. Multi-annual climate predictions for fisheries: an assessment of skill of sea surface temperature forecasts for large marine ecosystems. **Front.Mar. Sci**, 2017. Disponível em:

https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00201. Acesso em: 04 ago 2017.

TSEKOURAS, G. E.; ANTONIOS, M.; ANAGNOSTOPOULOS, C.; GAVALAS, D.; ECONOMOU, D. Improved batch fuzzy learning vector quantization for image compression. **International Journal of Information Sciences.** v.178, p.3895-3907, 2008.

VALENTIN, J.L. A dinâmica do plâncton na ressurgência de Cabo Frio -RJ. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE PLÂNCTON, 3., 1989, Caiobá -PR. **Anais...** Fundação da Universidade Federal do Paraná, 1989. p.26-35. VICHI, M.; ALLEN, J.; MASINA, S.; HARDMAN, N. J. The emergence of ocean biogeochemical provinces: a quantitative assessment and a diagnostic for model evaluation. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 25, n. 2, p.17, 2011.

VUUREN, D. P.; EDMONDS, J.; KAINUMA, M.; RIAHI, K.; THOMSON, A.; HIBBARD, K.; HURTT, G. C.; KRAM, T.; KREY, V.; LAMARQUE, J. F.; MASUI, T.; MEINSHAUSEN, M.; NAKICENOVIC, N.; SMITH, S. J.; ROSE, S. K. The representative concentration pathways: an overview. **Climatic Change**, v.109, n. 1-2, p. 5-31, 2011.

WANG, W.; ZHANG, Y. On fuzzy cluster validity indices. **Fuzzy Sets and Systems**. v.158, p. 2095- 2117, 2007.

WANG, H.; LI, X.; CHU, F.; LI, Z.; WANG, J.; YU, X.; BI, D. Mineralogy, geochemistry, and Sr-Pb isotopic geochemistry of hydrothermal massive sulfides from the 15.2°S hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge. **Journal of Marine Systems**, in press, Corrected Proof, 2017.

WEATHERDON, L.V.; MAGNAN, A.K.; ROGERS, A.D.; SUMAILA, U.R.; CHEUNG, W.W.L. Observed and Projected Impacts of Climate Change on Marine Fisheries, Aquaculture, Coastal Tourism, and Human Health: An Update. **Front. Mar. Sci.** v. 3, n. 48, 2016.

WERDELL, P. J.; BAILEY, S. W. An improved bio-optical data set for ocean color algorithm development and satellite data product validation. **Remote Sensing of Environment**. v.98, p.122-140, 2005.

WIENDERS, N.; ARHAN, M.; MERCIER, H. Circulation at the western boundary of the South and Equatorial Atlantic: Exchanges with the ocean interior. **Journal of Marine Research**, v.58, p.1007-1039, 2000.

WILSON, J.T. A new class of faults and their bearing on continental drift. **Nature**, v.207, p.343-347, 1965.

WILSON, W.D.; Johns, E.; Molinari, R. L. 1994: Upper layer circulation in the western tropical North Atlantic Ocean during August 1989. **Journal of Geophysical Research**, v.99, p.11, 1989.

YONAMINE, F. S., SPECIA, L., CARVALHO, V. O., NICOLETTI, M. C. Aprendizado não supervisionado em domínios fuzzy–algoritmo fuzzy c-means. São Carlos: UFSCAR, p.20, 2002.

ZADEH, L. Fuzzy sets. Inf. Control, v.8, p.338-353, 1965.

ZHAI, L.; PLATT, T.; TANG, C.; SATHYENDRANATH, S.; FUENTES, C.; DEVRED, E.; WU, Y. Seasonal and geographic variations in

phytoplankton losses from the mixed layer on the Northwest Atlantic Shelf. **Journal of Marine Systems**, v. 80, n. 1, p.36-46, 2010.

ZHAI, L.; PLATT, T.; TANG, C.; SATHYENDRANATH, S.; WALNE, A. The response of phytoplankton to climate variability associated with the North Atlantic Oscillation. Deep Sea Research Part II: **Topical Studies in Oceanography**, v.93, p.159-168, 2013.