

Carlos Henrique dos Santos Silva

Aplicação de análise de dados funcionais para caracterizar as
estruturas físico-químicas em 3D na região oceânica do
Nordeste brasileiro

Recife - PE

02/2019



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOMETRIA E ESTATÍSTICA
APLICADA**

**Aplicação de análise de dados funcionais para caracterizar as
estruturas físico-químicas em 3D na região oceânica do
Nordeste brasileiro**

Dissertação julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Biometria e Estatística Aplicada, defendida e aprovada por unanimidade em 28/02/2019 pela Comissão Examinadora.

Área de Concentração: Modelagem Estatística e Computacional

Recife - PE

02/2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Biblioteca Central, Recife-PE, Brasil

S586a Silva, Carlos Henrique dos Santos
Aplicação de análise de dados funcionais para caracterizar as estruturas físico-químicas em 3D na região oceânica do nordeste brasileiro / Carlos Henrique dos Santos Silva. – 2019.
82 f.: il.

Orientador: Paulo José Duarte Neto.

Coorientador: Arnaud Pierre Alexis Bertrand.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Biometria e Estatística Aplicada, Recife, BR-PE, 2019.

Inclui referências.

1. Análise funcional 2. Oceanografia 3. Pesquisa oceanográfica - Brasil, Nordeste 4. Sistemas de indicação visual tridimensional 5. Físico-química I. Duarte Neto, Paulo José, orient. II. Bertrand, Arnaud Pierre Alexis, coorient. III. Título

CDD 519.5

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOMETRIA E ESTATÍSTICA
APLICADA

Aplicação de análise de dados funcionais para caracterizar as estruturas físico-químicas em 3D na região oceânica do Nordeste brasileiro

Carlos Henrique dos Santos Silva

Dissertação julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Biometria e Estatística Aplicada, defendida e aprovada por unanimidade em 28/02/2019 pela Comissão Examinadora.

Orientador:

Prof. Dr. Paulo José Duarte Neto
DEINFO/UFRPE

Coorientador:

Prof. Dr. Arnaud Pierre Alexis Bertrand
IRD/FRANÇA

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Tiago A. E. Ferreira
DEINFO/UFRPE

Prof. Dr. Alex Costa da Silva
DOCEAN/UFPE

Agradecimentos

A conclusão de um mestrado pode representar, para muitos, mais uma etapa da vida acadêmica, mas para alguém vindo de uma família humilde do interior, que aos 14 anos de idade já trabalhava para ajudar na renda familiar, filho de pais separados, a obtenção do título de mestre em Estatística pela Universidade Federal Rural de Pernambuco, aos 25 anos de idade, é muito mais que isto: é um presente divino. Assim, não poderia deixar de agradecer, em primeiro lugar, a Deus pela sua luz que sempre iluminou o meu caminho.

Agradeço à Minha mãe, Luzinete Pessoa dos Santos, que fez tudo para dar a melhor educação possível à mim e aos meus irmãos. Agradeço a minha Madrinha Tânia Shimmene, que desde minha quinta série do ensino fundamental me incentiva todos os dias com suas sábias palavras.

Agradeço minha esposa Juliana Kátia por tudo que ela fez durante o meu mestrado. Agradeço pela paciência que ela teve nos momentos de maior dificuldade e por cuidar do nosso filho Anthony Gabriel durante minha ausência.

Agradeço aos meus irmãos mais velhos Orlando Pessoa, Danilo Pessoa, Danúbia Pessoa, por todo o carinho e confiança que sempre depositaram em mim.

Quero agradecer aos amigos que sempre estiveram comigo nesse mestrado e que estarão presente em toda minha vida: Rodrigo Cavalcante, Ramilla Assunção, Paulo Almeida, Moisés Tenório, Elielma Santana, Rick Vieira...

Agradeço ao professor Paulo Travassos por ceder um espaço em seu laboratório (LEMAR/Depaq), onde pude realizar todas as pesquisas do meu mestrado, e também aos colegas que fazem parte do mesmo.

Quero também agradecer à todos os professores do programa de pós-graduação em Biometria e Estatística Aplicada, em especial aos professores: Moacyr Cunha, Franklin Sinatra e Kleber Santoro e a todos os demais professores que de forma direta e indireta contribuirão nessa dissertação. Quero agradecer de forma especial ao meu orientador Professor Paulo Duarte, por toda paciência que o mesmo teve comigo e continuará tendo no doutorado.

Meus agradecimentos ao Professor Arnaud Bertrand, ainda vai demorar um pouco pra ficarem prontos. Porque foram tantas coisas que eu aprendi com ele, que eu não consigo demonstrar em palavras a quanto eu sou grato à ele por tudo. Quem sabe quando eu finalizar o doutorado consiga finalizar esses agradecimentos.

Resumo

A Análise de Dados Funcionais (FDA) é um tema que ganhou importância em meados de 1990, através da adaptação de métodos estatísticos multivariados. Afim de facilitar e exibir os dados de forma a destacar suas principais características, para estudar as principais fontes de variação, e determinar comportamentos padronizados entre diferentes curvas. Neste contexto, a presente dissertação pretende desenvolver um trabalho envolvendo diversas informações de oceanografia, cujo objetivo principal é fazer uma caracterização em 3D da paisagem marinha na região oceânica do Nordeste do Brasil, com base em dados coletados durante a campanha oceanográfica Acoustic Along the Brazilian Coast (ABRACOS 1), que foi realizada no período de 21/09 à 09/10 de 2015, a bordo do navio oceanográfico “Antea”, e dados de campanhas anteriores disponíveis no site do *World Ocean Atlas* (WOA) correspondentes a campanha oceanográfica realizada nos anos de 1990 à 2016, nos mesmos meses que do ABRACOS 1, onde os dados de temperatura, salinidade e oxigênio dissolvido foram coletados por um aparelho de perfilagem hidrológica chamado *Conductivity, Temperature and Depth* (CTD), no gradiente de profundidade de 10 à 300 metros. Desta forma, baseado na validação cruzada foram encontrados 40, 45 e 100 funções bases *B-splines* que suavizaram os perfis de temperatura, salinidade e oxigênio dissolvido, respectivamente. Pelos resultados obtidos através do PCA/Agrupamento e ANOVA funcional conclui-se que existem, física e quimicamente, três regiões estatisticamente diferentes: Região próxima a quebra da plataforma, região oceânica ao redor das ilhas Fernando de Noronha e Atol das Rocas e montes submarinos e a Região Oceânica. As águas com menores temperaturas chegam primeiro nas ilhas e vão em direção a região próxima a quebra da plataforma de norte para o sul. A região próxima a quebra da plataforma é mais quente, mais salina e mais oxigenada.

Palavras-chave: Análise de dados funcionais; PCA Funcional; Agrupamento funcional; ANOVA funcional; Krigagem ordinária funcional; Temperatura; Salinidade; Oxigênio dissolvido.

Abstract

Functional Data Analysis (FDA) is a theme that gained importance in the mid-1990s through the adaptation of multivariate statistical methods in order to facilitate and display the data, highlighting its main characteristics, to study the main sources of variation as well as determining standardized behaviors among different curves. In this context, this dissertation intends to develop a work involving several oceanographic information, whose main objective is to make a 3d characterization of the marine landscape in the oceanic region of Northeast Brazil, based on data Collected during the oceanographic campaign, Acoustic Along the Brazilian Coast (ABRACOS1), which was carried out from 21/09 to 09/10 2015, onboard the "Antea" oceanographic ship. In addition, data from previous campaigns available on the World Ocean Atlas (WOA) website corresponding to the oceanographic campaign carried out in the years 1990 to 2016, in the same months as ABRACOS 1, with temperature, salinity and dissolved oxygen were collected by a hydrological profiling apparatus called Conductivity, Temperature and Depth (CTD), in the depth gradient from 10 to 300 meters. Thus, based on cross-validation, 40, 45 and 100 base functions *B-splines* were found, which smoothed the profiles of temperature, salinity and dissolved oxygen, respectively. According to the results obtained through PCA/clustering and functional ANOVA, it is concluded that there are, physically and chemically, three statistically different regions: Coastal Region, Region of the Fernando de Noronha Islands and Atol das Rocas and the seamounts and Region Oceanic. The lower-temperature waters first arrive on the islands and go towards the coastal region from north to south. The coastal region is warmer, more saline and more oxygenated.

Keywords: Functional data analysis; Functional PCA; Functional clustering; Functional ANOVA; Functional ordinary kriging; Temperature; Salinity; Dissolved oxygen.

Lista de ilustrações

Figura 1	– Ilustração de um semivariograma e de um modelo de variograma teórico com parâmetros alcance (a), efeito pepita (C0), patamar (C) e contribuição (C1), adaptado de Silva (2015).	16
Figura 2	– Perfis típicos de temperatura (°C) (a), salinidade (b) e oxigênio dissolvido ($ml.l^{-1}$) (c) em águas tropicais.	18
Figura 3	– Posição dos perfis CTDO coletados no ABRACOS 1 (pontos pretos) e dos perfis do World Ocean Atlas (pontos vermelhos).	20
Figura 4	– Fluxograma com a abordagem utilizada nas análises.	21
Figura 5	– Projeção de perfis de temperatura em uma base B-spline de 40 funções: (a) região próximo a quebra da plataforma, (b) região das ilhas e (c) região oceânica.	22
Figura 6	– Os quadros (a) e (g) são os plotes dos escores dos dois primeiros FPC's da variável temperatura. Os quadros (b) e (h) são a soma (+) e a subtração (-) do primeiro FPC ao perfil médio de temperatura. Os quadros (c) e (i) são a soma (+) e a subtração (-) do segundo FPC ao perfil médio de temperatura referente ao período do ABRACOS 1 e WOA, respectivamente. Os quadros (d) e (j) são os dendrogramas do ABRACOS 1 e WOA respectivamente. Os quadros (e) e (l) representam os perfis médios de temperatura para cada região. Os quadros (f) e (m) são representações espaciais dos grupos, referente ao cruzeiro ABRACOS 1 e WOA, respectivamente.	24
Figura 7	– (a) Perfis médios de temperatura da região próximo a quebra da plataforma, (b) representação espacial da região próximo a quebra da plataforma, (c) perfis médios de temperatura da região das ilhas Fernando de Noronha (FN) e Atol das Rocas (AR), (d) representação espacial da região das ilhas.	25
Figura 8	– Os quadros (a) é plote dos escores dos dois primeiros FPC's da variável temperatura. Os quadros (b) é a soma (+) e a subtração (-) do primeiro FPC ao perfil médio de temperatura (°C). O quadro (c) é a soma (+) e a subtração (-) do segundo FPC ao perfil médio de temperatura. O quadros (d) é o dendrogramas da temperatura (°C). O quadro (e) representam os perfis médios de temperatura (°C) para cada região. O quadros (f) é a representações espacial das regiões referente ao cruzeiro ABRACOS 1 + WOA.	27
Figura 9	– Ajuste do semivariograma empírico para krigagem ordinária funcional da variável temperatura °C.	30

Figura 10 – Comparação do modelo ajustado (linha preta) e observado (linha vermelha) de perfil de temperatura nas regiões: das ilhas ($32^{\circ}46'W$, $3^{\circ}52'S$)(a), na região próximo a quebra da plataforma mais ao norte ($34^{\circ}53'W$, $4^{\circ}56'S$) (b), na região próximo a quebra da plataforma mais ao sul ($34^{\circ}36'W$, $5^{\circ}34'S$) (c) e na região oceânica ($33^{\circ}00'W$, $5^{\circ}17'S$).	31
Figura 11 – Krigagem Funcional para a variável temperatura em seis níveis de profundidade: (a) 10 metros,(b) 100 metros, (c) 150 metros, (d) 200 metros, (e) 250 metros e (f) 300 metros.	32
Figura 12 – Sessões verticais de temperatura ao longo da região próximo a quebra da plataforma e oceânica adjacente. As seções verticais possui as seguintes coordenadas: (A) ($35^{\circ}00'W$, $4^{\circ}42'S$ a $34^{\circ}18'W$, $7^{\circ}24'S$), (B) ($34^{\circ}18'W$, $7^{\circ}24'S$ a $34^{\circ}59'W$, $9^{\circ}56'S$), (C) ($34^{\circ}48'W$, $5^{\circ}30'S$ a $31^{\circ}18'W$, $5^{\circ}30'S$) e (D) ($34^{\circ}27'W$, $8^{\circ}00'S$ a $31^{\circ}18'W$, $8^{\circ}18'W$).	33
Figura 13 – Sessões verticais de temperatura ao longo da região dos montes submarinos, Ilhas Fernando de Noronha e atol das rocas. As seções verticais possuem as seguintes coordenadas: (E) ($35^{\circ}48'W$, $3^{\circ}52'S$ a $31^{\circ}18'W$, $3^{\circ}52'S$), (F) ($32^{\circ}24'W$, $3^{\circ}30'S$ a $32^{\circ}24'W$, $4^{\circ}30'S$).	34
Figura 14 – Projeção de perfis de salinidade em uma base B-spline de 45 funções: (a) região próximo a quebra da plataforma, (b) região das ilhas e (c) região oceânica.	35
Figura 15 – Os quadros (a) e (g) são os plots dos escores dos dois primeiros FPC's da variável temperatura. Os quadros (b) e (h) são a soma (+) e a subtração (-) do primeiro FPC ao perfil médio de salinidade. Os quadros (c) e (i) são a soma (+) e a subtração (-) do segundo FPC ao perfil médio de salinidade referente ao período do ABRACOS 1 e WOA, respectivamente. Os quadros (d) e (j) são os dendrogramas do ABRACOS 1 e WOA respectivamente. Os quadros (e) e (l) representam os perfis médios de salinidade para cada região. Os quadros (f) e (m) são representações espaciais dos grupos, referente ao cruzeiro ABRACOS 1 e WOA, respectivamente.	37
Figura 16 – (a) Perfis médios da salinidade da região próximo a quebra da plataforma, (b) representação espacial da região próximo a quebra da plataforma,(c)perfis médio de salinidade da região das ilhas FN e AR, (d) representação espacial da região das ilhas.	39

Figura 17 – Os quadros (a) é plote dos escores dos dois primeiros FPC's da variável salinidade. Os quadros (b) é a soma (+) e a subtração (-) do primeiro FPC ao perfil médio de salinidade. O quadro (c) é a soma (+) e a subtração (-) do segundo FPC ao perfil médio de temperatura. O quadros (d) é o dendrogramas da salinidade. O quadro (e) representam os perfis médios de salinidade para cada região. O quadros (f) é a representações espacial das regiões referente ao cruzeiro ABRACOS 1 + WOA.	40
Figura 18 – Ajuste do Semivariograma Empírico para Krigagem Ordinária Funcional da variável Salinidade.	43
Figura 19 – Comparação do modelo ajustado (linha preto) e observado (linha vermelho) de perfil de salinidade nas regiões: das oceânica ao redor das ilhas (32°46'W, 3°52'S)(a), na região próximo a quebra da plataforma mais ao norte (34°53'W, 4°56'S) (b), na região próximo a quebra da plataforma mais ao sul (34°36'W, 5°34'S) (c) e na região oceânica (33°00'W, 5°17'S).	44
Figura 20 – Krigagem Funcional para a variável salinidade em seis níveis de profundidade: (a) 10 metros,(b) 100 metros, (c) 150 metros, (d) 200 metros, (e) 250 metros e (f) 300 metros	45
Figura 21 – Sessões verticais de salinidade ao longo da região próximo a quebra da plataforma e oceânica adjacente.As seções verticais possui as seguintes coordenadas: (A) (35°00'W, 4°42'S a 34°18'W, 7°24'S), (B) (34°18'W, 7°24'S a 34°59W, 9°56'S), (C) (34°48'W, 5°30'S a 31°18W, 5°30S) e (D) (34°27W, 8°00'S a 31°18W, 8°18W).	46
Figura 22 – Sessões verticais de salinidade ao longo da região dos montes submarinos, Ilhas Fernando de Noronha e atol das rocas. As seções verticais possui as seguintes coordenadas: (E) (35°48'W, 3°52'S a 31°18'W, 3°52'S), (F) (32°24W, 3°30'S a 32°24W, 4°30'S).	47
Figura 23 – Projeção de perfis de oxigênio dissolvido em uma base B-spline de 100 funções: (a) região próximo a quebra da plataforma, (b) região oceânica ao redor das ilhas e (c) região oceânica.	48

Figura 24 – Os quadros (a) e (g) são os plotes dos escores dos dois primeiros FPC's da variável oxigênio dissolvido ($ml.l^{-1}$). Os quadros (b) e (h) são a soma (+) e a subtração (-) do primeiro FPC ao perfil médio de oxigênio dissolvido ($ml.l^{-1}$). Os quadros (c) e (i) são a soma (+) e a subtração (-) do segundo FPC ao perfil médio de oxigênio dissolvido ($ml.l^{-1}$) referente ao período do ABRACOS 1 e WOA, respectivamente. Os quadros (d) e (j) são os dendrogramas do ABRACOS 1 e WOA respectivamente. Os quadros (e) e (l) representam os perfis médios de oxigênio dissolvido ($ml.l^{-1}$) para cada região. Os quadros (f) e (m) são representações espaciais dos grupos, referente ao cruzeiro ABRACOS 1 e WOA, respectivamente.	50
Figura 25 – O quadro (a) são perfis médios de oxigênio dissolvido ($ml.l^{-1}$) da região próximo a quebra da plataforma. O quadro (b) é a representação espacial da região próximo a quebra da plataforma. O quadro (c) são perfis médio de oxigênio dissolvido ($ml.l^{-1}$) da região oceânica ao redor das ilhas FN e AR. O quadro (d) é representação espacial da região oceânica ao redor das ilhas referente ao ABRACOS 1 e WOA, respectivamente.	51
Figura 26 – O quadro (a) é o plote dos escores dos dois primeiros FPC's da variável oxigênio dissolvido ($ml.l^{-1}$). O quadro (b) é a soma (+) e a subtração (-) do primeiro FPC ao perfil médio do oxigênio dissolvido ($ml.l^{-1}$). O quadro (c) é a soma (+) e a subtração (-) do segundo FPC ao perfil médio de oxigênio dissolvido ($ml.l^{-1}$). O quadro (d) é o dendrogramas do oxigênio dissolvido ($ml.l^{-1}$). O quadro (e) representam os perfis médios de oxigênio dissolvido ($ml.l^{-1}$) para cada região. O quadro (f) é a representações espacial das regiões referente ao cruzeiro ABRACOS 1 + WOA.	53
Figura 27 – Ajuste do Semivariograma Empírico para Krigagem Ordinária Funcional da variável Oxigênio Dissolvido.	56
Figura 28 – Comparação do modelo ajustado (linha preta) e observado (linha vermelha) de perfil de oxigênio dissolvido nas regiões: oceânica ao redor das ilhas ($32^{\circ}46'W$, $3^{\circ}52'S$)(a), na região próximo a quebra da plataforma mais ao norte ($34^{\circ}53'W$, $4^{\circ}56'S$) (b), na região próximo a quebra da plataforma mais ao sul ($34^{\circ}36'W$, $5^{\circ}34'S$) (c) e na região oceânica ($33^{\circ}00'W$, $5^{\circ}17'S$).	57
Figura 29 – Krigagem Funcional para a variável oxigênio dissolvido em seis níveis de profundidade: (a) 10 metros, (b) 100 metros, (c) 150 metros, (d) 200 metros, (e) 250 metros e (f) 300 metros	58

Figura 30 – Sessões verticais de salinidade ao longo da região dos montes submarinos, Ilhas Fernando de Noronha e atol das rocas. As seções verticais possui as seguintes coordenadas: (E) ($35^{\circ}48'W$, $3^{\circ}52'S$ a $31^{\circ}18'W$, $3^{\circ}52'S$), (F) ($32^{\circ}24W$, $3^{\circ}30'S$ a $32^{\circ}24W$, $4^{\circ}30'S$). 59

Lista de tabelas

Tabela 1	– Valores médios e Desvio Padrão, mínimos e máximos da temperatura (°C) na região próximo a quebra da plataforma, para o ABRACOS 1, WOA e ABRACOS + WOA	28
Tabela 2	– Valores médios e Desvio Padrão, mínimos e máximos da temperatura na região das ilhas, para o ABRACOS 1, WOA e ABRACOS + WOA	29
Tabela 3	– Valores médios e Desvio Padrão, mínimos e máximos da temperatura na região oceânica, para o WOA e ABRACOS + WOA.	29
Tabela 4	– Valores médios e Desvio Padrão, mínimos e máximos de salinidade na região próximo a quebra da plataforma, para o ABRACOS 1, WOA e ABRACOS + WOA	41
Tabela 5	– Valores médios e Desvio Padrão, mínimos e máximos de salinidade na região oceânica ao redor das ilhas, para o ABRACOS 1, WOA e ABRACOS + WOA	42
Tabela 6	– Valores médios e Desvio Padrão, mínimos e máximos da salinidade na região oceânica, para o WOA e ABRACOS + WOA.	42
Tabela 7	– Valores médios e Desvio Padrão, mínimos e máximos do oxigênio dissolvido na região próximo a quebra da plataforma, para o ABRACOS 1, WOA e ABRACOS + WOA	54
Tabela 8	– Valores médios e Desvio Padrão, mínimos e máximos do oxigênio dissolvido na região oceânica ao redor das ilhas, para o ABRACOS 1, WOA e ABRACOS + WOA	55
Tabela 9	– Valores médios e Desvio Padrão, mínimos e máximos do oxigênio dissolvido na região oceânica, para o WOA e ABRACOS + WOA	55

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	5
2.1	Geral	5
2.2	Específicos	5
3	REVISÃO DE LITERATURA	6
3.1	Análise de Dados Funcionais	6
3.1.1	Representando dados funcionais como funções suaves	8
3.1.1.1	Funções <i>splines</i>	8
3.1.1.2	Funções <i>B-splines</i>	9
3.1.1.3	Cálculo da suavização <i>spline</i>	10
3.1.2	A escolha do parâmetro de suavização	10
3.1.3	Validação Cruzada	11
3.1.4	Estatística descritivas para dados funcionais	11
3.1.4.1	Média e variância funcionais	11
3.1.4.2	Funções de covariância e correlação	12
3.1.5	Análise de Componentes Principais Funcionais	12
3.1.6	Análise de Variância Funcional	13
3.1.7	Geoestatística Funcional	14
3.1.7.1	Krigagem Ordinária Funcional	14
3.2	Propriedades Físico-Químicas da Água do Mar	17
4	MATERIAL E MÉTODOS	19
4.1	Área de Estudo/Dados	19
4.2	Métodos	19
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
5.1	Temperatura (°C)	22
5.1.1	Classificação da Temperatura (°C)	22
5.1.2	Representação em 3D da Temperatura (°C)	30
5.2	Salinidade	35
5.2.1	Classificação da Salinidade	35
5.2.2	Representação em 3D da Salinidade	43
5.3	Oxigênio Dissolvido ($ml.l^{-1}$)	48
5.3.1	Classificação do Oxigênio Dissolvido ($ml.l^{-1}$)	48

5.3.2	Representação em 3D do Oxigênio Dissolvido ($ml.l^{-1}$)	56
6	CONCLUSÃO	61
	REFERÊNCIAS	63

1 Introdução

Os ecossistemas marinhos são ameaçados por muitos fatores, incluindo as alterações climáticas, acidificação dos oceanos, destruição do habitat, sobrepesca, perda da biodiversidade e poluição (HALPERN et al., 2015). Nos países tropicais, mais de 500 milhões de pessoas dependem da pesca e da aquicultura e dos cerca de 34 milhões de pescadores em atividade mais de 90% são pescadores de pequena escala (FAO, 2010). Paradoxalmente, os ecossistemas explorados pela pesca artesanal são muito menos estudados que os explorados pela pesca industrial. Porém, o foco em estudos ecológicos geralmente é desenvolver uma verdadeira “ecologia de ecossistemas marinhos explorados”, que leva em conta também o contexto de mudança global, ou seja, a sinergia entre as mudanças climáticas e grandes mudanças antropogênicas em escalas locais e regionais.

O Brasil é um dos maiores países do mundo com 8.514.876 km² em extensão territorial. Possui um litoral banhado a leste pelo Oceano Atlântico, caracterizado pela presença de diversos ecossistemas interligados, tais como os estuários, recifes e praias arenosas e conta ainda com a presença de uma ampla plataforma continental e variados bancos e cadeias oceânicas como, por exemplo, a Cadeia Fernando de Noronha (SERAFIM; CHAVES, 2005). Além disso, apresentam áreas de grande importância ecológica, como por exemplo as áreas marinhas ao redor do Arquipélago de Fernando de Noronha e Atol das Rocas, e a zona da Plataforma Continental do Nordeste Brasileiro. Entretanto, apesar de 80% da população brasileira viver perto do litoral, a importância do Oceano Atlântico não está ainda fortemente enraizada no Brasil. É necessário um abundante conhecimento para medidas de proteção, conservação e futuras medidas mitigadoras (SERAFIM; CHAVES, 2005; BERTRAND, 2015).

O Nordeste do Brasil é, de maneira geral, uma região de baixa produtividade e elevada biodiversidade (EKAU, 1999). Está localizado a poucos graus ao norte da bifurcação do ramo sul da Corrente Sul Equatorial, influenciada por águas quentes tropicais (EKAU, 1999). A área é caracterizada pela presença de diversos ecossistemas interligados, tais como manguezais, recifes de corais, praias arenosas, pradarias marinhas, costões rochosos e estuários. Esta interface entre a terra e o mar propicia uma variedade de processos hidrológicos, oceanográficos e antropogênicos, criando habitats com intensos gradientes térmicos e de salinidade, níveis de nutrientes e da concentração de poluentes (EKAU, 1999). Este ambiente com alta complexidade tem uma forte influência nos ciclos de vida dos peixes, nos padrões de distribuições espaço-temporais e também nas assembleias da fauna próximo a quebra da plataforma e marinha (EKAU, 1999).

As ilhas oceânicas brasileiras – os arquipélagos de Fernando de Noronha, São Pedro e São Paulo, Martin Vaz, a Ilha da Trindade e o Atol das Rocas - várias localizadas ao longo do Nordeste do Brasil, variam em tamanho e distância do continente, sendo ambientes particulares, pois devido ao seu isolamento geográfico geralmente abrigam uma biodiversidade peculiar, com grande número de espécies endêmicas (SERAFINI et al., 2010).

O arquipélago de Fernando de Noronha, por exemplo, tem uma área de 18,4 km² e sua principal ilha, Fernando de Noronha, ocupa 91% da área total e é a ilha com o maior número de espécies, tanto marinhas quanto terrestres, em decorrência, principalmente, de sua dimensão e heterogeneidade de habitats, mas também por concentrar a maior parte dos estudos realizados sobre sua biota (SERAFINI et al., 2010). Segundo Serafini et al. (2010), este Arquipélago possui a principal colônia de aves marinhas, entretanto, pouco se sabe sobre os padrões de deslocamento das mesmas e suas áreas de forrageamento nas ilhas oceânicas brasileiras (MANCINI, 2013). Ao mesmo tempo, Fernando de Noronha é a ilha que mais sofreu interferência na estrutura de sua biodiversidade, principalmente na terrestre, sendo que hoje a maior parte das espécies de vertebrados deste ambiente é exótica (SERAFINI et al., 2010).

O Atol das Rocas é o único atol no Oceano Atlântico Sul Ocidental, localizado a 144 milhas náuticas (cerca de 260 km) a E-NE da cidade de Natal, no Rio Grande do Norte, costa nordeste brasileira. Foi a primeira unidade de conservação marinha do Brasil. O Atol das Rocas é uma elipse semicircular, com área interna de 5,5 km², que ocorre na porção oeste do topo aplainado de um monte submarino. O seu eixo E-W tem aproximadamente 3,7 km, e o N-S, cerca de 2,5 km. A fauna de peixes recifais encontrada em Fernando de Noronha apresenta uma grande riqueza de espécies (169) e uma similaridade muito grande com a fauna do Atol das Rocas, sendo que as ilhas compartilham todas as dez espécies endêmicas. Esta similaridade provavelmente se deve à presença de bancos oceânicos rasos localizados entre as duas ilhas, que servem de ligação entre as mesmas (SAMPAIO et al., 2004; ROCHA, 2003).

Inúmeras interações físicas, biológicas e biogeoquímicas entre ecossistemas têm sido identificadas em ambientes costeiros e oceânicos, sendo estes classificados como unidades não autônomas e partes integrantes do ambiente marinho. Esses sistemas, em alguns casos, são tão interligados por processos ecológicos e hidrodinâmicos que são considerados ambientes simbióticos, ou seja, não são entidades isoladas, pelo contrário, são influenciados por atividades do ambiente terrestre, bem como pelo mar aberto (OGDEN, 1988; KITHEKA, 1997; MOBERG; RÖNNBÄCK, 2003).

Pode-se identificar nos ambientes costeiros diversas interações pelos processos dinâmicos que ocorrem simultaneamente. Um ecossistema específico tem enorme importância para outro ecossistema adjacente, sendo assim, o funcionamento dos ecossistemas é inter-

dependente devido à interconectividade dos sistemas naturais costeiros. Essa característica faz com que qualquer ambiente seja considerado de importância vital para o seu ecológico vizinho (MOBERG; RÖNNBÄCK, 2003).

Floeter et al. (2001), estudaram as similaridades e diferenças entre a fauna dos arquipélagos oceânicos e ambientes costeiros para a fauna de peixes recifais, sem, portanto considerar um gradiente contínuo. Diversos trabalhos têm evidenciado que as assembléias de peixes são distintas entre os diferentes habitats, entretanto algumas espécies utilizam todo o mosaico (HARRIS et al., 2001). Por isso a fragmentação desses ecossistemas costeiros tropicais pode causar alterações substanciais na estrutura das comunidades, resultando em um declínio da biodiversidade e perda de serviços dos ecossistemas (VALENTINE-ROSE et al., 2007).

O desenvolvimento de ferramentas de análise de dados sob a forma de perfis amostrados é um forte desafio na oceanografia. Os problemas relacionados à triagem dos dados, métodos de compressão ou à síntese das informações contidas exigem o desenvolvimento de métodos estatísticos específicos. Classicamente para descrever distribuições ou processos físicos ou biológicos, usa-se métodos como análise de componentes principais (PCA). No entanto, esses métodos não permitem explicitamente levar em consideração a estruturação vertical, fundamental nos ecossistemas marinhos pelágicos (PAUTHENET et al., 2017). Para resolver esse problema e considerar o componente vertical usa-se a análise de dados funcionais (RAMSAY; SILVERMAN, 1997).

Essa análise pode ser aplicada sobre conjuntos de dados de variáveis indexadas ao longo de um contínuo, ou curvas, tais como a maior parte dos dados em ciências ambientais (BAYLE et al., 2014). Os perfis de temperatura, salinidade, quantidade de organismos presentes, são dados que podem ser tratados como funções matemáticas com um argumento, como tempo, espaço ou qualquer outra variável real em vez de trabalhar com uma abordagem matricial tradicional.

Análises estatísticas cruzadas, como a análise de componentes principais funcional, ou estudos de covariância entre parâmetros físico-químicos e distribuição horizontal e vertical das comunidades, permitirão a identificação das variáveis físico-químicas que mais influenciam a distribuição das diferentes comunidades. Em zonas tropicais, a coluna de água está altamente estratificada e a produção primária máxima está no nível da termoclina. Assim, a termoclina constitui a zona de transferência de energia para as outras camadas, superficial e mais profunda, através da cadeia trófica. A análise de dados funcionais no nível da termoclina possibilitará o estudo das migrações verticais (ARIZA et al., 2016) dos organismos e a quantificação dos fluxos de energia para cima e para baixo em relação com os parâmetros físico-químicos.

Esta dissertação está dividida em 7 capítulos. No primeiro tem-se a Introdução, capítulo este que irá direcionar o leitor sobre o tema e os métodos que foram trabalhados na dissertação. No capítulo 2 destaca-se os objetivos do trabalho. No capítulo 3, tem-se a Revisão de Literatura em que são apresentadas algumas ideias para o entendimento do que foi estudado. No capítulo 4, denominado Material e Métodos, tem-se a definição e a forma como as variáveis estudadas foram obtidas, além de também os métodos que foram utilizadas nas análises. No capítulo 5, denominado Resultados e Discussão, tem-se os principais resultados e a discussão sobre os resultados obtidos nas análises. No capítulo 6 tem-se as conclusões em que são resumidos os principais resultados e conclusões obtidos. E por último, tem-se as referências que foram utilizadas como base para realização dessa dissertação.

2 Objetivos

2.1 Geral

Analisar os processos físico-químicos na região oceânica do nordeste brasileiro, utilizando métodos estatísticos de análises funcionais. Neste sentido, serão caracterizados os processos físicos Temperatura ($^{\circ}\text{C}$), Salinidade e químico Oxigênio Dissolvido (ml.l^{-1}).

2.2 Específicos

Especificamente, foram traçados os seguintes objetivos:

- Determinar bases funcionais que suavizem os perfis de Temperatura ($^{\circ}\text{C}$), Salinidade e Oxigênio Dissolvido (ml.l^{-1}), com base em funções *B-splines*.
- Caracterizar as estruturas físico-químicas em diversos habitats da Região Nordeste do Brasil (e.g. costa, ilhas e bancos oceânicos) quanto aos seus perfis de profundidade a partir das análises de componentes principais e agrupamentos funcionais.
- Estudar a variação horizontal e vertical da estrutura oceânica ao longo das ilhas oceânicas (Fernando de Noronha e o Atol das Rocas), como também ao longo da plataforma (desde a cidade de Natal até o litoral sul do estado de Pernambuco), com base na ANOVA funcional.
- Determinar a representação 3D na região oceânica do nordeste brasileiro, com base na geoestatística funcional.

3 Revisão de Literatura

3.1 Análise de Dados Funcionais

A Análise de Dados Funcionais (*Functional Data Analysis* - FDA) surgiu como uma nova perspectiva para derivar modelos e ferramentas na análise de dados que exibem alta dimensionalidade no espaço, tempo, ou em ambos os sentidos, aplicada nas mais diversas áreas da ciência, tais como Agricultura, Geologia, Solos, Hidrologia, Meio Ambiente, Ecologia, Mineração, Qualidade do Ar, Sensoriamento Remoto, Econometria Espacial e Epidemiologia (RUIZ-MEDINA, 2012). É uma nova maneira de analisar os dados, na qual não se observa simplesmente mais um conjunto de escalares ou vetores, mas sim um conjunto de funções através da adaptação de métodos estatísticos multivariados. Isto possibilita a exibição dos dados de forma a destacar suas principais características, para estudar as principais fontes de variação, e determinar comportamentos padronizados entre diferentes curvas (RUIZ-MEDINA, 2012). Além disso, explica a variação existente na variável resposta, através da informação sobre as diversas variáveis independentes, e também compara as variações dos conjuntos de dados (RAMSAY; SILVERMAN, 1997; RAMSAY, 2000; RAMSAY; SILVERMAN, 2002; RAMSAY; SILVERMAN, 2005; RAMSAY, 2006; RAMSAY et al., 2009).

Cuevas (2014) utilizou a metodologia da FDA afim de criar uma descrição para tratar os dados como funções, e criar bases probabilísticas e estimativas de parâmetros com a finalidade de reduzir e classificar a dimensão dos dados funcionais.

Por ser ainda um campo recente na Estatística, a FDA não possui uma definição única. Entretanto, Ferraty e Vieu (2006) descreveram alguns aspectos comuns dos dados funcionais: (i) os dados funcionais são continuamente definidos. Porém, na prática são, em geral, observados discretamente e registrados computacionalmente com dimensão finita, mas isso não afeta as interpretações e nem as análises. (ii) O dado individual é toda a função. Os dados funcionais podem ser independentes uns dos outros, entretanto para os valores dentro do mesmo dado funcional não existem suposições sobre a independência. (iii) Por último, os dados não necessariamente precisam ser suaves, mas a suavidade ou outra regularidade será importante para a aplicação de algumas técnicas da análise. Além disso, algumas suposições de suavidade serão apropriadas para funções envolvidas na modelagem dos dados observados, como as funções médias.

Apresentaram ainda duas definições relacionadas aos dados funcionais:

Definição 3.1. Uma variável aleatória $X = \{X(t)|t \in \mathbb{R}\}$ é chamada de variável funcional se sua imagem estiver contida em

$$L_2(T) = \left\{ f : T \rightarrow \mathbb{R} \mid \int_0^1 f(t)^2 dt \right\}, \quad (3.1)$$

sendo que $L_2(T)$ é um espaço de Hilbert com o produto interno $\langle f, g \rangle = \int_T f(t)g(t)dt$ e $T = [a, b] \subset \mathbb{R}$. Uma realização particular $x = \{x(t)|t \in R\}$ de uma variável funcional X é chamada de dados funcional. Quando $n = 1$, denotamos a variável funcional $X = \{X(t)|t \in \mathbb{R}\}$ de curva aleatória e o dado funcional $x = \{x(t)|t \in \mathbb{R}\}$ de uma curva. Neste dissertação, usaremos a notação $X(t)$ para denotar uma variável funcional e $x(t)$ para denotar um dado funcional proveniente de $X(t)$. Com o conceito de variável e dado funcional, podemos definir o conceito de conjunto de dados funcional.

Definição 3.2. Um conjunto de dados funcional x_1, \dots, x_n é a observação de n variáveis funcionais X_1, \dots, X_n identicamente distribuídas.

Ao afirmar que uma observação é um dado funcional, está se referindo a existência de uma função suave que gera os valores daquela observação. A presença desta suavidade é um forte indício para a aplicação da FDA em contraposição as demais técnicas estatísticas como, por exemplo, a análise multivariada clássica. Entretanto, se a função não tem um comportamento suave, realiza-se um processo de suavização para que a FDA possa ser usada (RAMSAY; SILVERMAN, 2005; RAMSAY et al., 2009). Mesmo que, seja importante que a função apresente um caráter suave, isto não é uma condição necessária para a observação original $y = (y_1, \dots, y_n)$, visto que está sujeita a ruídos intrínsecos à observação (RAMSAY; SILVERMAN, 2005; RAMSAY et al., 2009). Portanto, pode-se escrever:

$$y = x(t) + \epsilon, \quad (3.2)$$

em que $x(t)$ é a função suave e ϵ é o ruído. Como já foi mencionado anteriormente, as funções são representadas por combinações lineares de funções base. Funções ϕ_k conhecidas, independentes entre si e que satisfazem a propriedade em que a combinação linear destas funções é capaz de representar arbitrariamente bem a função original (RAMSAY; SILVERMAN, 2005). As funções originais, denotadas por $x(t)$, são representadas então por

$$x(t) = \sum_{k=1}^K c_k \phi_k(t), \quad (3.3)$$

onde K o número de funções base usadas na representação e c_k números reais chamados de coeficientes da representação. O número K de bases determina o grau de suavidade da função obtida. Quanto maior o valor de K , mais suave será a função obtida (RAMSAY; SILVERMAN, 2005; RAMSAY et al., 2009).

A função $x(t)$ não é conhecida previamente, assim é necessário fazer aproximações para esta função e uma das formas é por meio da representação de $x(t)$ em um subespaço qualquer de funções base. Cada observação funcional x consiste de n pares (t_j, y_j) , em que y_j corresponde ao valor da função x em t_j , possivelmente acrescido de um erro de medição (RAMSAY; SILVERMAN, 1997; RAMSAY, 2000; RAMSAY; SILVERMAN, 2002; RAMSAY; SILVERMAN, 2005; RAMSAY, 2006; RAMSAY et al., 2009).

3.1.1 Representando dados funcionais como funções suaves

3.1.1.1 Funções *splines*

O intuito da suavização é estimar uma função não periódica x com base em observações discretas com muito ruído, dispostas em um vetor y . Estudos assintóticos sobre o estimador obtido utilizando o método de suavização por *splines* podem ser encontrados em (EUBANK, 1988), através do qual é possível, entre outras coisas, verificar a consistência desse estimador. Silverman (1984), apresenta também um importante resultado. Ele mostra que, sob certas condições, a suavização *splines* corresponde aproximadamente à suavização por Kernel. Green e Silverman (1993), discutem uma variedade de problemas estatísticos que podem ser abordados usando penalizações por falta de suavidade.

Devido a sua estrutura simples e às boas propriedades de aproximação, os polinômios são amplamente utilizados na prática para aproximar funções. Desse modo, o intervalo $T = [a, b]$, no qual está definida a função, é dividido em subintervalos menores da forma $[x_0, x_1], \dots, [x_k, x_{k+1}]$, e então um polinômio p_i (de grau menor que a função à ser suavizada) é usado para aproximação em cada subintervalo. Esse procedimento produz uma função de aproximação polinomial por partes $s(\cdot)$, em que $s(t) = p_i(t)$ em $[x_i, x_{i+1}]$, $i = 0, \dots, k$. Os valores $x_0, x_1, \dots, x_i, x_{i+1}$ são chamados de nós (knots), sendo que x_0 e x_{k+1} são chamados de nós exteriores e os demais x_1, \dots, x_k , nós interiores (RAMSAY; SILVERMAN, 1997; RAMSAY, 2000; RAMSAY; SILVERMAN, 2002; RAMSAY; SILVERMAN, 2005; RAMSAY, 2006; RAMSAY et al., 2009).

No caso geral, as partes $p_i(t)$ do polinômio, usadas na aproximação de cada subintervalo, são independentes umas das outras e não formam uma função contínua em $[a, b]$. Isso não pode ser aceito para aproximar uma função suave. Portanto, é necessário que as partes do polinômio sejam unidas suavemente e também que sejam deriváveis um certo número de vezes. Como resultado, obtém-se uma função polinomial por partes, suave, chamada função *spline* (RAMSAY; SILVERMAN, 1997; RAMSAY, 2000; RAMSAY; SILVERMAN, 2002; RAMSAY; SILVERMAN, 2005; RAMSAY, 2006; RAMSAY et al., 2009).

Um *spline* de ordem m (*ordem = grau + 1*) com k nós interiores em x_1, \dots, x_k é qualquer função da forma

$$s(t) = \sum_{i=0}^{m-1} \theta_i t^i + \sum_{i=1}^k \delta_i (t - x_i)^{m-1}, \quad (3.4)$$

em que os coeficientes $\theta_0, \dots, \theta_{m-1}, \delta_1, \dots, \delta_k$ são números reais, $\{x_1, \dots, x_k\}$ são os nós interiores e $\{1, t, t^2, t^{m-1}, (t - x_1)^{m-1}, \dots, (t - x_k)^{m-1}\}$ são as funções bases. Assim, pode-se concluir que qualquer função *spline* é uma combinação linear de $m + k$ funções base (RAMSAY; SILVERMAN, 1997; RAMSAY, 2000; RAMSAY; SILVERMAN, 2002; RAMSAY; SILVERMAN, 2005; RAMSAY, 2006; RAMSAY et al., 2009).

O conjunto de funções *spline* de ordem m e nós interiores é chamado de espaço *spline* e é denotado por $\mathcal{S}_m(x_1, \dots, x_k)$. Além disso, o espaço *spline* é linear de dimensão $m + k$. Pode-se considerar ainda uma extensão dos *splines*, que são os chamados B-*splines* e formam uma base de espaços *spline* (RAMSAY; SILVERMAN, 2002; SCHUMAKER, 2007).

3.1.1.2 Funções B-*splines*

Os B-*splines*, assim como os *splines*, são constituídos de partes de polinômios unidos de forma especial em certos valores chamados nós. Esse tipo de base possui duas vantagens: a computação é muito rápida e a flexibilidade é grande (RAMSAY; SILVERMAN, 1997; RAMSAY, 2000; RAMSAY; SILVERMAN, 2002; RAMSAY; SILVERMAN, 2005; RAMSAY, 2006; RAMSAY et al., 2009).

Por exemplo, um B-*spline* de grau 1 consiste de dois pedaços lineares, um pedaço de x_0 a x_1 , e outro de x_1 a x_2 . Os nós são x_0, x_1 e x_2 . É possível construir um conjunto tão amplo de B-*splines* quanto se queira, basta introduzir mais nós (RAMSAY; SILVERMAN, 2005).

Assim, seja o intervalo $T = [a, b]$ dividido em $k + 1$ subintervalos menores da forma $[x_0, x_1], \dots, [x_k, x_{k+1}]$. Como em cada intervalo m B-*splines* de ordem m são não nulos, o número total de nós para a construção dos B-*splines* deve ser $k + 2m$. Portanto, alguns nós adicionais precisam ser incluídos (SCHUMAKER, 2007). Para isso, nós são adicionados no início $m - 1$ e no final da sequência de tal forma que $\tau_1 \leq \tau_2 \leq \tau_{m-1} \leq x_0$ e $x_{k+1} \leq x_{m+k+1} \leq x_{m+k+3} \leq \dots \leq x_{k+2m}$. Os valores desses nós adicionais são arbitrários. É comum fazer com que $\tau_1 = \dots = \tau_{m-1} = x_0$ e $x_{k+1} = \tau_m + k + 2 = \dots = \tau_{k+2m}$.

A partir disso, Boor et al. (1978), desenvolveu um algoritmo para calcular B-*splines* de qualquer ordem através de B-*splines* de ordem menor, ou seja, é possível calcular os B-*splines* através de uma relação de recorrência. Devido ao fato de um B-*spline* de ordem 1 ser uma constante em um intervalo entre dois nós, o cálculo de B-*splines* de qualquer ordem é facilitado. O algoritmo pode ser encontrados em (BOOR et al., 1978).

3.1.1.3 Cálculo da suavização *spline*

Ramsay e Silverman (2005), dizem que uma função pode ser descrita como uma combinação linear de funções base, ou seja,

$$x(t) = \sum_{k=1}^K c_k \phi_k(t) = c' \phi(t), \quad (3.5)$$

em que $c = (c_1, \dots, c_K)'$ é o vetor de coeficientes de tamanho K e ϕ é o vetor de funções base, também de tamanho K . O vetor c que minimiza a soma dos quadrados dos erros é dado por

$$\hat{c} = (\Phi W \Phi)^{-1} \Phi' W y \quad (3.6)$$

em que Φ é uma matriz $n \times K$ contendo os valores das K funções base calculadas nos n pontos de observação t_1, \dots, t_n , W é uma matriz de pesos que permite uma possível estrutura de covariância entre os erros e y é o vetor de dados discretos a serem suavizados, em que $y_{(i)} = x(t_j) + \epsilon_j$. A expressão correspondente para o vetor de valores ajustados é

$$\hat{y} = (\Phi W \Phi)^{-1} \Phi' W y = S y \quad (3.7)$$

em que $S = \Phi(\Phi' W \Phi)^{-1} \Phi' W y$ é o operador de projeção correspondente ao sistema de base ϕ .

3.1.2 A escolha do parâmetro de suavização

Existem duas abordagens distintas em relação à escolha do parâmetro de suavização λ . A primeira abordagem considera livre a escolha do parâmetro de suavização como uma importante característica do procedimento. O procedimento é utilizar diferentes parâmetros e, assim, escolher aquele que, de certa forma, produz a estimativa que melhor se ajusta aos dados. Isso faz com que esse método seja subjetivo, porém muito utilizado na prática porque ele é uma ótima opção quando se tem que ajustar uma única curva. A outra abordagem lida com a necessidade de se ter um procedimento automático para a escolha de λ com base nos dados. Pode-se dizer que condicionado na escolha do método automático a ser usado, essa é uma forma objetiva de escolha de λ (RAMSAY; SILVERMAN, 2005).

Os métodos automáticos não precisam ser utilizados de forma decisiva. Podem, por exemplo, ser usados para a escolha de um valor inicial para um possível refinamento. Esses métodos são essenciais quando a curva estimada é usada como parte integrante de um outro procedimento mais complexo ou se o método é usado frequentemente em muitos conjuntos de dados. Existem diferentes procedimentos automáticos de escolha do parâmetro de suavização. O mais conhecido de todos é o método de validação cruzada (RAMSAY; SILVERMAN, 2005).

3.1.3 Validação Cruzada

A motivação básica para o método de validação cruzada (VC) está relacionada com a predição. Assumindo que o erro aleatório possui média zero, a curva verdadeira x tem a seguinte propriedade: se uma observação y é tomada no ponto t , o valor $x(t)$ é a melhor predição de y em termos de erro quadrático médio. Então, um bom estimador $\hat{x}(t)$ para $x(t)$ seria aquele que produzisse o menor valor possível de $\{y - \hat{x}(t)\}^2$ para uma nova observação y no ponto t (RAMSAY; SILVERMAN, 2005).

Segundo Green e Silverman (1993), deve-se considerar um dado valor λ para o parâmetro de suavização. Toma-se a observação y_i em t_i como sendo uma nova observação, omitindo-a do resto dos dados. Denota-se a curva estimada sem a i -ésima observação usando λ como parâmetro de suavização como $\hat{x}^{(-i)}(t; \lambda)$ em que $\hat{x}^{(-i)}(t; \lambda)$ minimiza

$$\sum_{j \neq i} \{y_j - \hat{x}(t_j)\}^2 + \lambda \int [D^2 x(s)]^2 ds. \quad (3.8)$$

Green e Silverman (1993) relataram que a qualidade da predição de $\hat{x}^{(-i)}$ pode ser julgada através de quão bem o valor $\hat{x}^{(-i)}(t_j)$ se aproxima de y_j . Uma vez que a escolha da observação a ser omitida é arbitrária, a eficácia do procedimento de suavização com o parâmetro λ pode ser quantificada através do critério de validação cruzada

$$VC(\lambda) = n^{-1} \sum_{i=1}^n \{y_i - \hat{x}(t_i) \hat{x}^{(-i)}(t_i; \lambda)\} \quad (3.9)$$

A ideia básica da validação cruzada é escolher o valor de λ que minimiza $VC(\lambda)$ (GREEN; SILVERMAN, 1993).

3.1.4 Estatística descritivas para dados funcionais

3.1.4.1 Média e variância funcionais

Ramsay e Silverman (1997) descreveram que as estatísticas descritivas básicas que são utilizadas para os dados univariados, são aplicadas de forma análoga para os dados funcionais. A função média para uma amostra contendo n funções é dada pela seguinte equação:

$$\bar{x}(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i(t), \quad (3.10)$$

da mesma forma, a função variância é definida por

$$Var_X(t) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [x_i(t) - \bar{x}(t)]^2, \quad (3.11)$$

a função desvio padrão é a raiz quadrada da função variância.

3.1.4.2 Funções de covariância e correlação

Segundo Ramsay e Silverman (1997), a função covariância resume a dependência das observações ao longo de valores de argumentos diferentes e é calculada para todo t_1 e t_2 através da fórmula

$$Cov_t(X, Y) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [X_i(t) - \bar{X}(t)][Y_i(t) - \bar{Y}(t)]. \quad (3.12)$$

A função de correlação associada é dada por

$$Corr_t(X, Y) = \frac{Cov_t(X, Y)}{\sqrt{[Cov_X(t)Cov_Y(t)]}}. \quad (3.13)$$

De forma análoga à análise multivariada, podem ser obtidas as matrizes de correlação, variância e covariância.

3.1.5 Análise de Componentes Principais Funcionais

Apesar da popularidade do PCA, sua aplicação tem sido frequentemente restrita quando o tamanho da amostra de dados multivariados é maior que o número de variáveis, e os dados multivariados são igualmente espaçados em uma grade densa (SHANG, 2014). A ideia principal da extensão do PCA para a Análise de Componentes Principais Funcionais (*Functional principal component analysis* - FPCA) é simplesmente substituir vetores por funções, matrizes por operadores lineares compactos, matrizes de covariância por operadores de covariância e produtos escalares em espaço vetorial por produtos escalares em espaço funcional integrável ao quadrado (BELLMAN, 2015; SHANG, 2014).

A vantagem do FPCA é que ele possui uma representação de menor dimensão, enquanto preserva a quantidade máxima de informação das variáveis originais. Em um espaço de funções L_2 . O FPCA encontra o conjunto de funções de componentes principais ortogonais que maximizam a variação ao longo de cada componente. Ele encontra o primeiro componente funcional principal $\phi_1(x)$, cuja variação dos escores dos componentes principais

$$\beta_1 = \int_{x_1}^p \phi_1(x) f(x) dx \quad (3.14)$$

é maximizado sujeito a $\|\phi_1^2(x)\| = \int_{x_1}^{x_p} \phi_1^2(x) dx = 1$. β_1 representa os scores do primeiro componente principal com média zero, $f(x)$ é um conjunto de curvas funcionais descentralizadas, e $[x_1, x_p]$ é o intervalo de suporte da função.

As demais funções dos componentes principais podem ser obtidos, subtraindo-se as k funções dos componentes principais de $f^0(x) = f(x)$, para $1 \leq k \leq K < \min(n, p)$ tal que,

$$f^k(x) = f^{k-1}(x) - \beta_k \phi_k(x), \quad (3.15)$$

e então tratar $f^k(x)$ como a nova espaço de funções para encontrar $\phi_{k+1}(x)$ com a variância dos scores dos componentes principais

$$\beta_{k+1} = \int_{x_1}^p \phi_{k+1}(x) f^k(x) dx, \quad (3.16)$$

é maximizado sujeito a

$$\int_{x_1}^p \phi_{k+1}^2(x) dx = \|\phi_{k+1}\|^2 = 1, \text{ e} \quad (3.17)$$

$$\int_{x_1}^p \phi_{k+1}(x) \phi_j(x) dx = 0, \text{ para } j, \dots, k. \quad (3.18)$$

A dificuldade computacional da integração das equações (3.17) - (3.18) para calcular o FPCA pode ser superada utilizando uma combinação linear de funções bases $f_t(x) \approx \sum_{k=1}^K \beta_{t,k} \phi_k(x)$ e aproximando cada função por um número fixo de funções bases (RICE; SILVERMAN, 1991). Utilizou-se aqui as funções bases polinomiais que são construídas a partir dos monômios ($\phi_k(x) = x^{k-1}$).

3.1.6 Análise de Variância Funcional

A Análise de Variância Funcional (*Functional Variance Analysis - FANOVA*) é uma metodologia que utiliza as mesmas ferramentas estatísticas da análise de variância para dados univariados. A FANOVA é operacionalizada através da aplicação de uma ANOVA para cada valor individual da variável funcional. Com isso, pode-se determinar, por exemplo, funções ou curvas dos contrastes dos efeitos dos fatores. Podem-se determinar também funções das somas das médias quadráticas dos efeitos dos fatores (RAMSAY; SILVERMAN, 2005).

Considerando os grupos l de funções aleatórias independentes $X_{ij}(t), i = 1, \dots, l, j = 1, \dots, n_i$ definido em um intervalo fechado e limitado $T = [a, b]$. Seja $n = n_1 + \dots + n_l$. Estes grupos podem diferir em funções médias, isto é, assumimos que $X_{ij}(t), j = 1, \dots, n_i$ são processos estocásticos com função média $\mu(t), t \in T$ e função de covariância $Cov_{X,Y}(s, t), s, t \in T$, para $i = 1, \dots, l$. O interesse é testar a seguinte hipótese nula

$$H_0 : \mu_1(t) = \dots = \mu_l(t), \quad t \in T. \quad (3.19)$$

Contra a hipótese alternativa, que é a negação da nula.

Alguns testes para (3.19) baseiam-se na estatística do teste F dado pela fórmula

$$F_n(t) = \frac{SSR_n(t)/(l-1)}{SSE_n(t)/(n-l)} \quad (3.20)$$

em que

$$SSR_n = \sum_{i=1}^l n_i (\bar{X}_i(t) - \bar{X}(t))^2, \quad SSE_n = \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^{n_i} (X_{ij}(t) - \bar{X}_i(t))^2 \quad (3.21)$$

são as variações pontuais entre sujeito e dentro do sujeito respectivamente, e $\bar{X}(t) = n^{-1} \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^{n_i} X_{ij}(t)$ e $\bar{X}_i(t) = \sum_{j=1}^{n_i} X_{ij}(t)$, $i = 1, \dots, l$, são respectivamente a função média da amostra e as funções médias do grupo amostral (RAMSAY; SILVERMAN, 2005).

Cuevas (2014), considerou $\sum_{1 \leq i < j \leq l} n_i \int_T (\bar{X}_i(t) - \bar{X}_j(t))^2 dt$ como uma estatística de teste e aproximada sua distribuição nula por um método de *bootstrap* paramétrico através de re-amostragem dos processos Gaussianos envolvidos na expressão aleatória limite de sua estatística de teste sob H_0 . Como trata-se de uma abordagem funcional pura, não há necessidade de discretizar os pontos das curvas para a análise dos dados. A proposta está baseada no comportamento assintótico do Teste F clássico da ANOVA. A expressão para o cálculo de F apresenta no numerador a variabilidade das curvas entre os grupos e no denominador a variabilidade das curvas dentro dos grupos. O método usa um teste baseado no numerador do teste F.

$$F = \frac{\int_I SSR_n(t) dt / (l - 1)}{\int_I SSE_n(t) dt / (n - l)}. \quad (3.22)$$

3.1.7 Geoestatística Funcional

Segundo Sassi (2016), pode-se calcular numericamente a distância entre dois pontos na superfície da terra, basta considerar o processo estocástico $\{Y(s) | s \in D\}$, $D \subseteq \mathbb{R}^r$. Quando $r = 1$, há uma extensa literatura em séries temporais analisando este tipo de processo estocástico. Quando $r > 1$, diz-se que o processo estocástico é um processo espacial e existe um interesse especial quando $r = 2$ (Norte-Sul e Leste-Oeste) e quando $r = 3$ (Norte-Sul, Leste-Oeste e nível acima do mar). Na prática, os dados serão uma realização parcial desse processo espacial em um conjunto finito de pontos s_1, \dots, s_n e deseja-se prever $Y(s)$ em $s \notin s_1, \dots, s_n$.

3.1.7.1 Krigagem Ordinária Funcional

Nesta dissertação tem-se uma amostra funcional $X_{s_1}(t), \dots, X_{s_n}(t)$ em que $X_{s_i}(t)$, $i = 1, \dots, n$, $t \in [0, 1]$, que é uma curva amostrada no ponto (θ_i, η_i) da região em estudo com θ_i sendo a latitude e η_i a longitude, e o objetivo é estimar a curva $X_{s_0}(t)$ em um ponto não monitorado $s_0 = (\theta_i, \eta_i)$. Para cada $t \in T$, assume-se que há um processo aleatório estacionário e isotrópico de segunda ordem, ou seja, as funções de média e variância são constantes e a covariância depende apenas da distância entre os pontos de amostragem. Formalmente assume-se que:

- 1 $E(X_s(t)) = m(t), \forall s \in D, \forall t \in [0, 1]$;
- 2 $Cov(X_{s_1}(t), X_{s_2}(t)) = C(\|s_1 - s_2\|; t), \forall s_1, s_2 \in D, \forall t \in [0, 1]$;
- 3 $\frac{1}{2} Var(X_{s_1}(t) - X_{s_2}(t)) = \gamma(\|s_1 - s_2\|; t), \forall s_1, s_2 \in D, \forall t \in [0, 1]$; Para $t \in [0, 1]$ fixo, $\gamma(\|s_1 - s_2\|; t)$ é chamada de variograma.

Giraldo et al. (2011), introduziram o método de interpolação espacial para curvas, no qual eles usaram B-splines para aproximar as curvas $X_{s_1}(t), \dots, X_{s_n}(t)$. A estimativa de $\hat{X}_{s_0}(t)$

$$\hat{X}_{s_0}(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i X_{s_i}(t), \quad (3.23)$$

em que $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ são estimados por

$$\arg \min_{\lambda_1, \dots, \lambda_n} E[|\hat{X}_{s_0}(t) - X_{s_0}(t)|^2] \text{ sujeito a } E[\hat{X}_{s_0}(t) - X_{s_0}(t)] = 0 \quad (3.24)$$

ou seja, deseja-se encontrar $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ tal que $\hat{X}_{s_0}(t)$ seja não viciado com erro quadrático médio mínimo. Resolver o problema de otimização não linear (3.24) pode ser uma tarefa analítica e computacionalmente complexa, mas Giraldo et al. (2011) apresentaram uma alternativa viável para resolver este problema apresentado no Teorema a seguir.

Teorema 3.1.7.1: Giraldo et al. (2011), resolveram o problema de otimização não linear $\arg \min_{\lambda_1, \dots, \lambda_n} E[|\hat{X}_{s_0}(t) - X_{s_0}(t)|^2]$ sujeito a $E[\hat{X}_{s_0}(t) - X_{s_0}(t)] = 0$ o que é equivalente a resolver o sistema de equações lineares dado por

$$\begin{pmatrix} \gamma(\|s_1 - s_1\|) & \gamma(\|s_1 - s_2\|) & \cdots & \gamma(\|s_n - s_1\|) & 1 \\ \gamma(\|s_1 - s_2\|) & \gamma(\|s_2 - s_2\|) & \cdots & \gamma(\|s_n - s_2\|) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma(\|s_1 - s_n\|) & \gamma(\|s_2 - s_n\|) & \cdots & \gamma(\|s_n - s_n\|) & 1 \\ 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ \mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma(\|s_1 - s_0\|) \\ \vdots \\ \gamma(\|s_n - s_0\|) \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.25)$$

em que $\gamma(h) = \int_0^1 \gamma(h, t) dt$ é chamado de traço-variograma. A prova desse teorema esta exposta em (GIRALDO et al., 2011).

Giraldo et al. (2011), propuseram construir o sistema linear do Teorema 3.1.7.1, a partir de um estimador do traço-variograma que resultou no seguinte estimador não paramétrico

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2|N(h)|} \sum_{(i,j) \in N(h)} \int_0^1 (X_{s_i}(t) - X_{s_j}(t))^2 dt, \quad (3.26)$$

em que $N(h) = \{(i, j)\} \in \{1, \dots, n\} \times \{1, \dots, n\} | \|s_i - s_j\| \in (h - \epsilon, h + \epsilon)$ para $\epsilon > 0$ apropriado e $|N(h)|$ é o número de elementos de $N(h)$.

Um exemplo do gráfico de um semivariograma experimental calculado para um conjunto de pontos amostrais sobre diferentes valores de h pode ser observado na Figura 1. Os pontos correspondem aos valores obtidos pela semivariância, enquanto a curva contínua representa um modelo de variograma teórico que deve ser ajustado a semivariância. Os parâmetros do variograma são: efeito pepita ou *Nugget effect* (C_0), representa o valor do variograma na origem, evidenciando a descontinuidade; alcance (a), indica a distância dentro da qual as amostras se apresentam correlacionadas espacialmente; contribuição

(C_1), reflete as diferenças espaciais entre os valores de uma variável analisada em pontos com distâncias sucessivamente maiores; patamar (C), refere-se ao valor em que ocorre a estabilidade (SILVA, 2015).

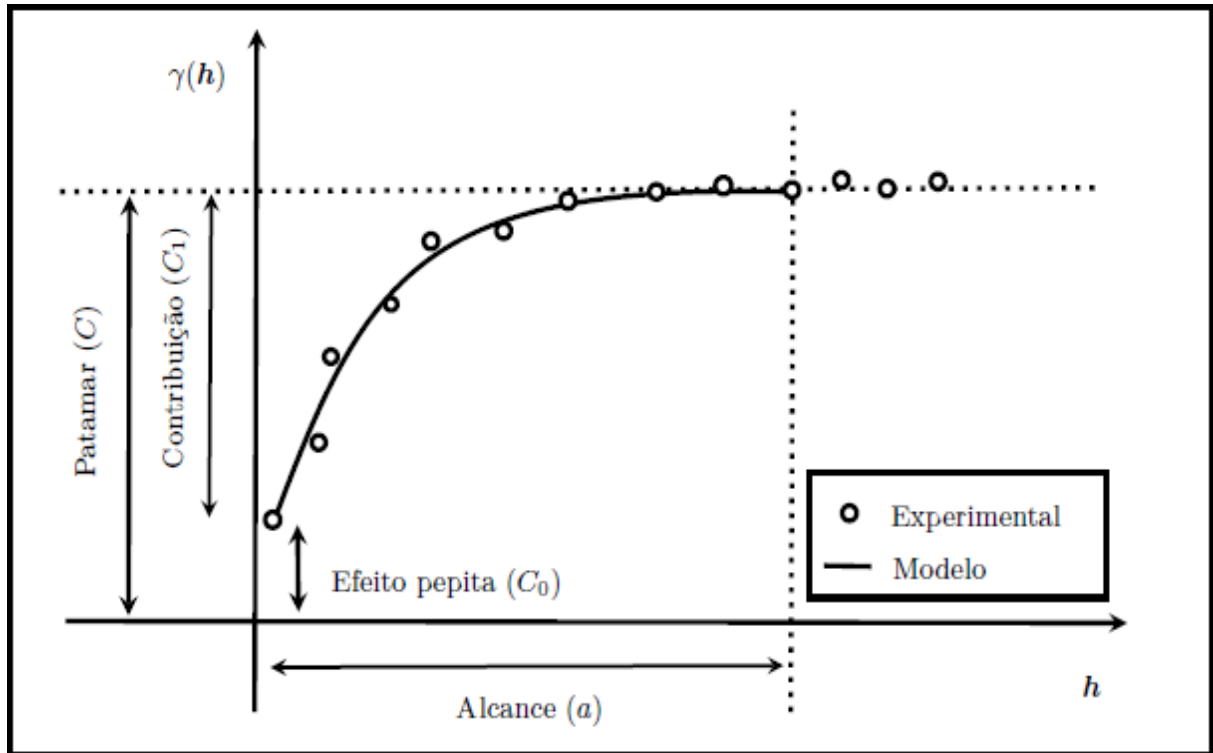


Figura 1 – Ilustração de um semivariograma e de um modelo de variograma teórico com parâmetros alcance (a), efeito pepita (C_0), patamar (C) e contribuição (C_1), adaptado de Silva (2015).

Uma vez estimado o traço-semivariograma para uma sequência de K valores h_k , Giraldo et al. (2011), propuseram ajustar o modelo paramétrico $\gamma(h, \theta)$ para qualquer um dos modelos clássicos e amplamente utilizados, como: Esférico, Gaussiano, Exponencial e Matern, para os pontos $(h_k, \hat{\gamma}_{h_k})$, $k = 1, \dots, K$, como se fossem obtidos no cenário geoestatístico clássico. De modo geral, esse tipo de ajuste é feito por mínimos quadrados ordinários ou mínimos quadrados ponderados (ver, por exemplo, (CRESSIE, 1993)).

3.2 Propriedades Físico-Químicas da Água do Mar

Grande parte do planeta terra é coberta por água e o maior percentual da distribuição dessas águas está nos oceanos e mares. Desta forma, é importante entender quais são as principais propriedades Físicas e Químicas da água do mar. A composição da água do mar é um pouco complexa, pois além de água pura ela possui sais, gases e substâncias orgânicas dissolvidos, além também de partículas de substâncias inorgânicas, cujas propriedades resultam da interação de fatores físicos, químicos, geológicos, biológicos e meteorológicos (CASTELL; KRUG, 2015). Esses fatores não atuam de forma isolada, por isso as propriedades físico-químicas da água do mar devem ser entendidas como resultado de várias ações, que alteram a sua constituição quanto à concentração dos elementos dissolvidos e em suspensão, naturalmente regulados para a manutenção da vida nesse sistema (GARRISON, 2010). Para a compreensão das propriedades físico-químicas da água marinha, são necessários estudos que iniciam com as particularidades da molécula da água e se estendem até o depósito final marinho dos elementos naturais ou sintéticos (GARRISON, 2010).

A temperatura, geralmente é medida em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$), e caracteriza o estado térmico de um corpo ou sistema. Esta é uma das variáveis mais estudadas no oceano. Pois através da distribuição de seus valores nos oceanos é possível prever, por exemplo, possíveis desastres naturais, como eventos extremos de precipitação (SANTOS; MANZI, 2010). A temperatura da água dos oceanos pode variar tanto na escala vertical quanto horizontal e geralmente tem uma variação de $-1,9^{\circ}\text{C}$ à 42°C .

De acordo com Garrison (2010), a salinidade é definida como a quantidade total de sólidos inorgânicos dissolvidos na água. Essa quantidade é medida em gramas, e verificada em um quilograma de água do mar após total evaporação. Embora possa parecer um processo prático para se calcular a salinidade, não é tão simples, pois alguns sais não liberam todas as moléculas de água durante o processo de evaporação e outros quando são aquecidos se decompõem formando gases e outros compostos, o que pode gerar medições imprecisas (GARRISON, 2010). A partir de estudos como os de Knudsen (1902), passou-se a definir salinidade como a quantidade de matéria sólida, contida em um quilograma de água do mar após todos os carbonatos terem sido convertidos em óxidos, os brometos e iodetos substituídos por seus cloretos e toda matéria orgânica ter sido oxidada. (CASTELL; KRUG, 2015).

O oxigênio dissolvido na água do mar é um gás com grande importância biológica, dentre os gases dissolvidos, participando de diversas reações químicas nos ecossistemas aquáticos, como processos de produção de energia e de reprodução de diversos organismos. O oxigênio da água tem como origens principais a atmosfera e a fotossíntese (GARRISON, 2010). É muito usado para indicar a qualidade das águas, principalmente as próximas a quebra de plataformas e interiores, que são mais submetidas às ações antrópicas de despejos de matéria orgânica. A entrada de oxigênio no oceano ocorre através da dissolução do oxigênio atmosférico na água do mar e através da fotossíntese. É um elemento fundamental para a vida marinha, e em diversos casos é considerado um fator limitante aos seres vivos (BREITBURG et al., 2018).

Garrison (2010), estratifica o oceano em três zonas: a zona de superfície (refere-se a camada superior dos oceanos, na qual a temperatura, salinidade e o oxigênio são relativamente constantes a medida que se aumenta a profundidade); a termoclina, haloclina e oxiclina (zona em que ocorre uma variação brusca na temperatura, salinidade e o oxigênio dissolvido em um pequeno gradiente de profundidade) e a zona profunda (localiza-se abaixo da termoclina, haloclina e oxiclina, onde há pouca variação a medida que se aumenta a profundidade) (Figura 2).

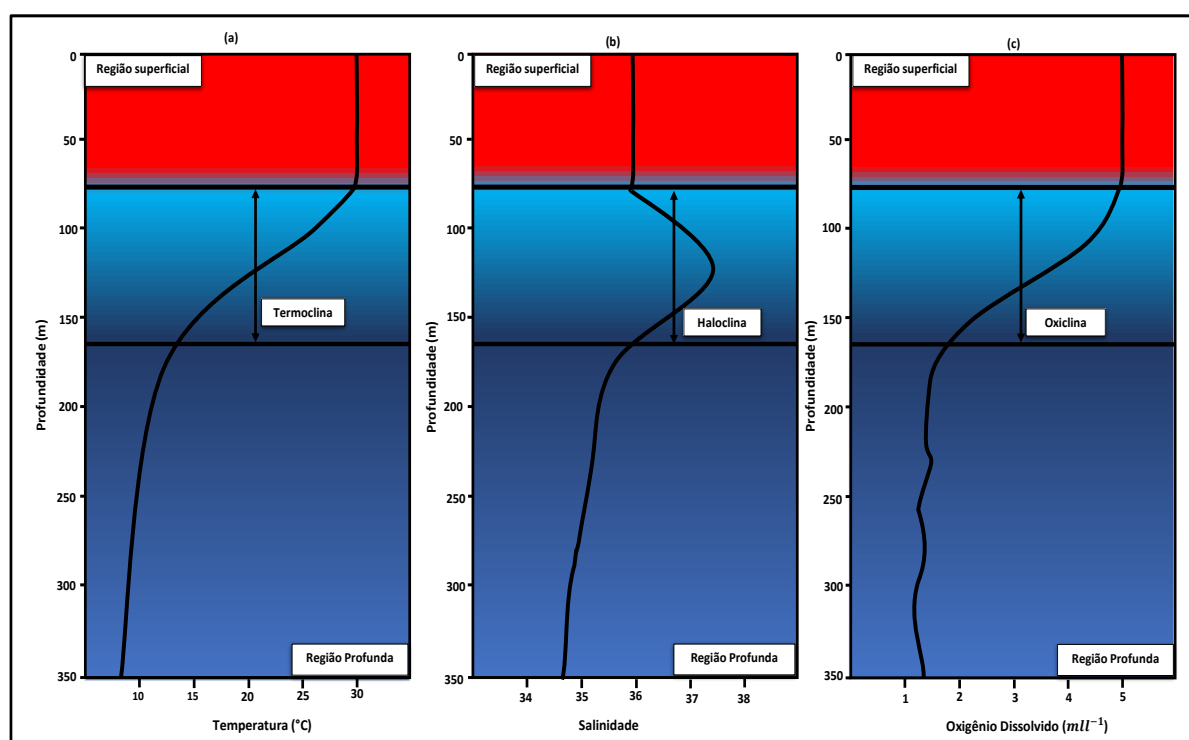


Figura 2 – Perfis típicos de temperatura (°C) (a), salinidade (b) e oxigênio dissolvido ($ml.l^{-1}$) (c) em águas tropicais.

4 Material e Métodos

4.1 Área de Estudo/Dados

Nesta dissertação, a área de estudo foi a região litorânea do Nordeste (localizada entre o norte do estado de Alagoas até o estado do Rio Grande do Norte) e no entorno da ilha oceânica de Fernando de Noronha e do Atol das Rocas (Figura 3). Os dados foram coletados durante a campanha oceanográfica designada *Acoustic Along the Brazilian Coast* (ABRACOS 1), que foi realizada no período de 21/09-09/10 de 2015 ((BERTRAND, 2015)), a bordo do navio oceanográfico “Antea”. Os dados de temperatura, salinidade e oxigênio dissolvido foram coletados por um aparelho de perfilagem hidrológica chamado *Conductivity, Temperature and Depth* (CTD), no gradiente de profundidade de 10 à 300 metros. Para complementar esses dados utilizou-se dados disponíveis no site do *World Ocean Atlas* (WOA)¹ correspondentes a campanha oceanográfica realizada nos anos de 1990 à 2016, nos mesmos meses do ABRACOS 1.

4.2 Métodos

A abordagem dessa dissertação pode ser vista na Figura 4. As etapas 1. e 2. consistem na interpolação dos dados para se obter uma matriz uniforme de informações e determinar a função base que suavizará os dados. A função que irá descrever cada uma das variáveis em um determinado perfil nada mais é que uma combinação linear de funções base, ou seja, $x(t) = \sum_{k=1}^K c_k \phi_k(t)$, sendo K o número de funções base usado na representação e c_k números reais chamados de coeficientes da representação.

Após a suavização dos dados, as funções foram analisadas por meio dos dados funcionais. Como os dados são medidas bivariadas (ao longo da profundidade (t)) podemos avaliá-los utilizando a análise de componentes principais funcionais (FPCA) e Agrupamento Funcional, para explorar não apenas quanto os perfis podem variar, mas também determinar diferentes padrões do fluxo observado nas diferentes regiões do oceano tropical do nordeste brasileiro. No PCA funcional, existe uma auto-função n associada a cada auto valor, em vez de um autovetor. Essas autofunções descrevem os principais variacionais (RAMSAY, 2000). A ideia do principal do FPCA é simplesmente substituir vetores por funções, matrizes por operadores lineares compactos, matrizes de covariância por operadores de covariância e produtos escalares em espaço vetorial por produtos escalares em espaço funcional integrável em quadrado (SHANG, 2014).

¹ <https://www.nodc.noaa.gov/cgi-bin/OC5/wod/getgeodata.pl?Depth=O&WorldOcean.x=679&WorldOcean.y=319>

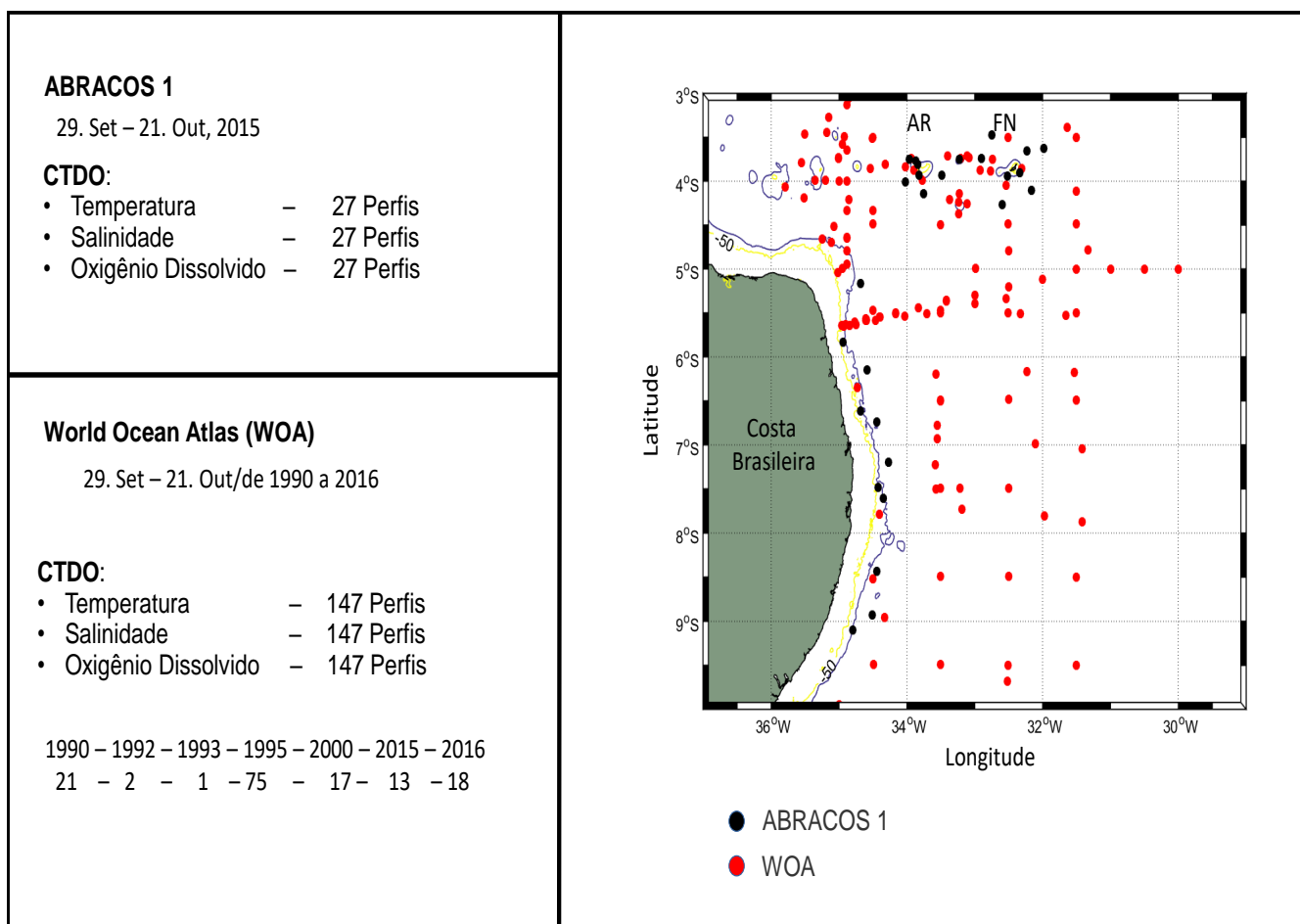


Figura 3 – Posição dos perfis CTDO coletados no ABRACOS 1 (pontos pretos) e dos perfis do World Ocean Atlas (pontos vermelhos).

A base de dados de referência corresponde ao cruzeiro ABRAÇOS 1. Porém, o número de perfis é limitado para poder caracterizar toda zona de estudo. Para determinar se os dados do ABRAÇOS 1 e do WOA são comparáveis e podem ser juntados, trabalhou-se em várias etapas. Primeiramente, aplicou-se Análise de Componentes Principais Funcional e Análise de Agrupamento Funcional (FAA) para classificar os perfis e espacializar os grupos obtidos (regiões) com os dados do ABRAÇOS 1 (Figura 4, passo 3.). Realizou-se o mesmo tipo de análise com os dados do WOA como um propósito exploratório (Figura 4, passo 4.). Em seguida, foram comparados os perfis dos grupos/regiões definidas com os dados ABRAÇOS 1 e com os perfis WOA correspondente a cada região (Figura 4, passo 5.). Para isso, aplicou-se a ANOVA funcional, utilizando-se as seguintes hipóteses: H_0 , não existe diferença significativa (nível de significância foi de 0.05) entre os grupos/regiões, contra H_1 : existe diferença significativa em pelo menos um dos grupos. Caso não rejeite-se a hipótese nula, considera-se que não existem diferenças significativas entre as bases de dados e que é possível juntar as duas fontes de dados ABRAÇOS 1 + WOA.

A partir do resultado dos passos 6 e 7 (Figura 4), utilizou-se novamente a FPCA e FFA para classificar os perfis e agora com as duas fontes de dados juntas, com o objetivo de espacializar os grupos obtidos (regiões) (Figura 4, passo 8.).

Para representar os perfis em 3D (Figura 4, passo 9.), criou-se uma malha a cada 8 km na zona estudada. Após a geração da malha, fez-se a interpolação utilizando a técnica de Krigagem Ordinária Funcional, proposta por Giraldo et al. (2011), juntamente com validação dos resultados a partir do erro quadrático médio. Após a validação, criou-se sete transectos a cada 2 km para poder descrever padrões de interesse para a oceanografia. Os transectos das ilhas permitem ver se é possível evidenciar um impacto das ilhas e também ver a evolução entre Fernando de Noronha e a região dos bancos submarinos que são afetados por correntes diferentes. Os transectos costeiros correspondem ao núcleo da Subcorrente Norte-Brasileira (SCNB), que flua na direção norte perto do talude. Os transectos costa-oceano permite ver como mudam as características oceanográficas entre águas oceânicas e as próximas a quebra da plataformas.

Para a realização de cada etapa, utilizou o software R (R Core Team, 2018), através do ambiente de desenvolvimento integrado Rstudio.

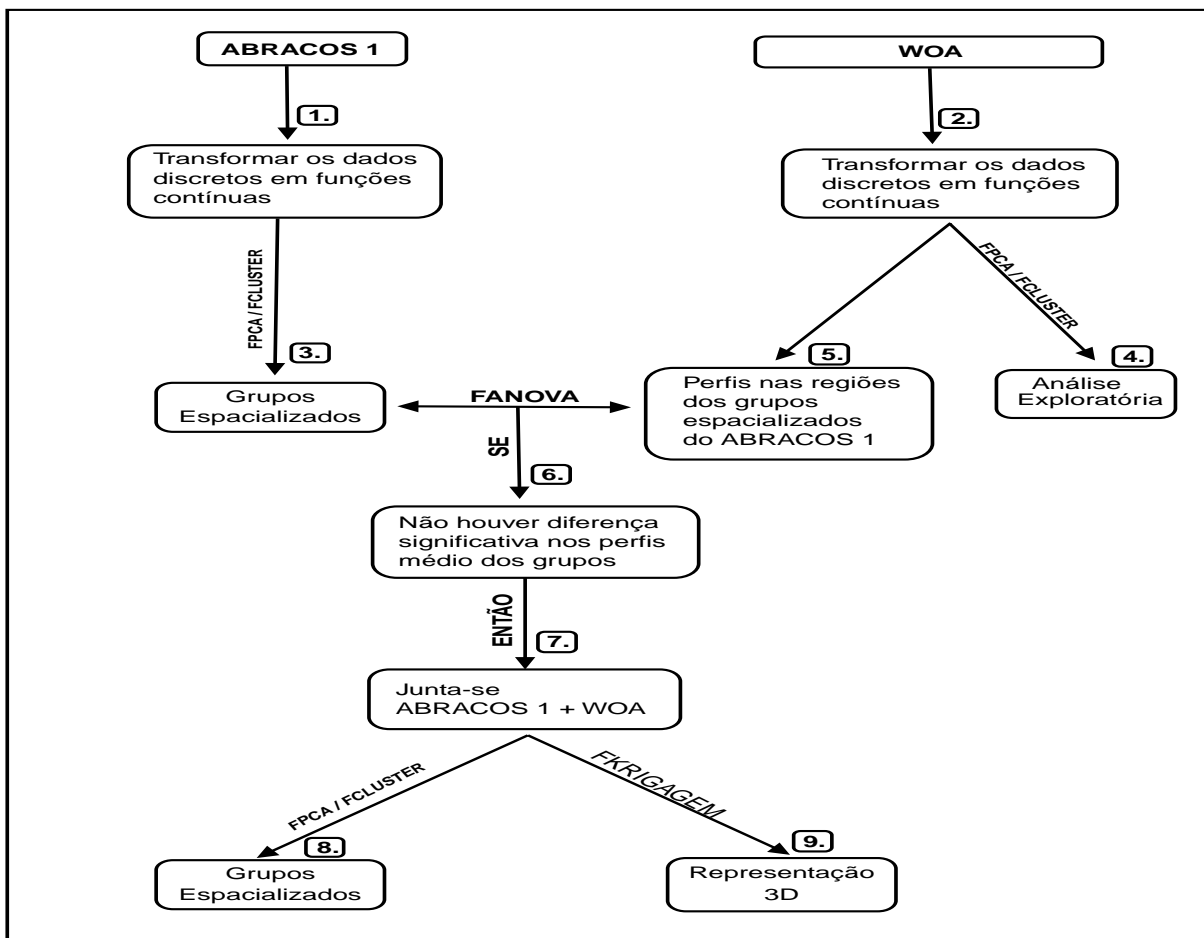


Figura 4 – Fluxograma com a abordagem utilizada nas análises.

5 Resultados e Discussão

5.1 Temperatura (°C)

Com base na validação cruzada a quantidade ótima de funções bases para a variável temperatura foi de 40 B-*splines* e o parâmetro de suavização $\lambda = 1$. O resultado da suavização pode ser visto na Figura (5), na qual é apresentado um exemplo de suavização para cada região: próximo a quebra da plataforma (a), região das ilhas (b) e região oceânica (c).

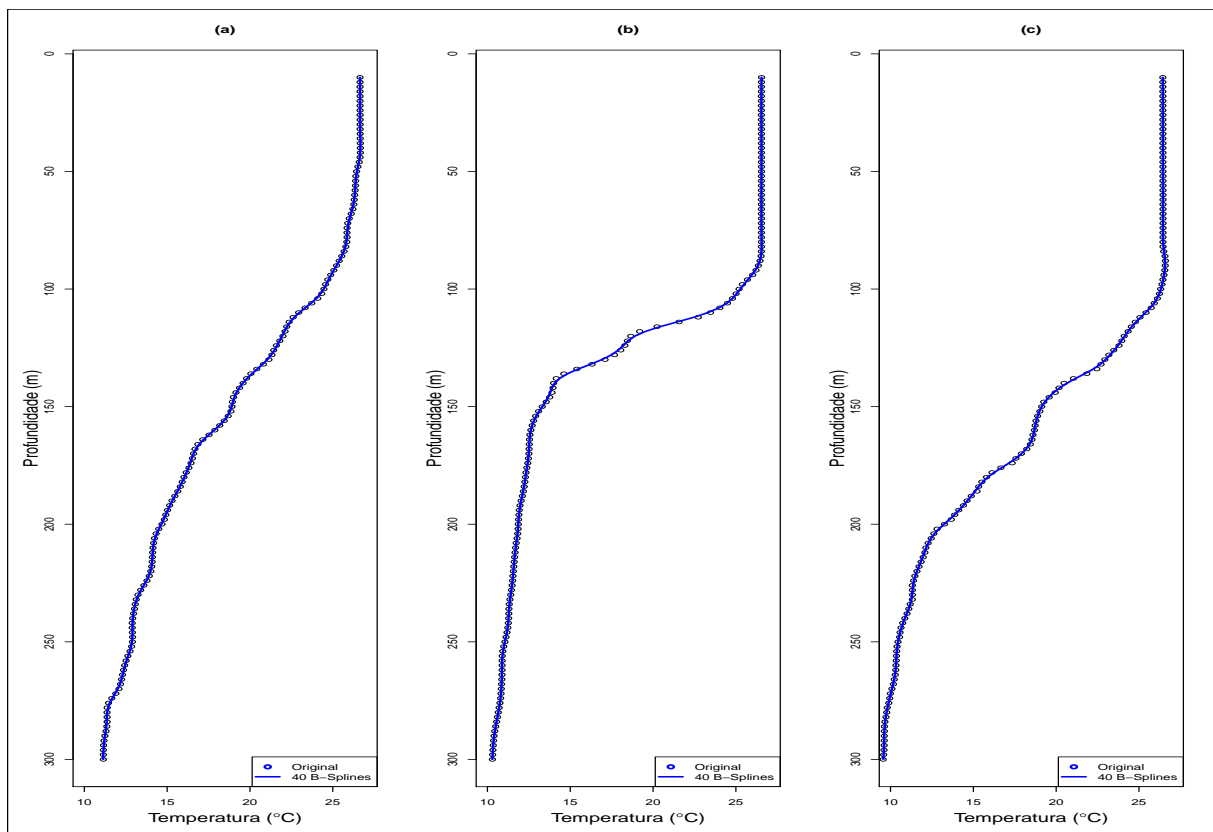


Figura 5 – Projeção de perfis de temperatura em uma base B-spline de 40 funções: (a) região próximo a quebra da plataforma, (b) região das ilhas e (c) região oceânica.

5.1.1 Classificação da Temperatura (°C)

Os dois primeiros componentes principais funcionais retiveram um total de 95.0% da variância total da temperatura referente aos dados do ABRACOS 1 (FCP1 = 84.9%; FCP2 = 10.1%). O primeiro plano fatorial ilustra a existência de dois grupos (Figura 6a). Percebe-se que existe uma diferença significativa na estrutura física do perfil médio de temperatura ao somar (+) e subtrair (-) a autofunção do primeiro componente principal

funcional (Figura 6b), de tal modo que, ao somar o primeiro componente ao perfil médio da temperatura a estrutura física tende a representar a região próximo a quebra da plataforma com uma variação da termoclina mais suave. Por outro lado, ao subtrair, passa a representar a região das ilhas de FN e AR com uma variação da termoclina mais definida. Quando somado o valor do FPC2 com o perfil médio, (Figura 6c), a temperatura aumenta no início da termoclina e diminui no final da mesma, tendo um efeito contrário quando subtrai o valor da FPC2 com o perfil médio. Por outro lado, os dois FPC's referente aos dados do WOA retiveram um total de 90.2% da variância total da temperatura (FCP1 = 69.2%; FCP2 = 21.0%). O primeiro plano fatorial mostra a existência de dois grupos (Figura 6g). Percebe-se que existe uma diferença significativa na estrutura física do perfil médio de temperatura ao somar (+) e subtrair (-) à autofunção do primeiro componente principal funcional (Figura 6h), de tal modo que, ao somar o primeiro componente ao perfil médio da temperatura a estrutura física tende a representar a região próximo a quebra da plataforma com uma variação da termoclina mais suave. Por outro lado, ao subtrair, passa a representar a região das ilhas de FN e AR com uma variação da termoclina mais definida. Somado o valor do FPC2 com o perfil médio, a temperatura aumenta no início da termoclina e diminui no final da mesma, tendo um efeito contrário quando subtrai o valor da FPC2 com o perfil médio (Figura 6i).

Através da aplicação do agrupamento e assumindo a natureza funcional dos dados, a estrutura física do Oceano Atlântico Sul pode ser caracterizada em uma escala vertical de 10 a 300 m de profundidade e classificada em três regiões distintas: próximo a quebra da plataforma, ilha e oceânica (p -valor = 0.00) (Figura 6 (d), (j), (f), (m)). Este é um resultado verdadeiramente notável porque demonstra objetivamente que cada região tem uma determinada tendência de estratificação vertical específica. A primeira região localizada próxima à costa brasileira, representada pela cor azul na Figura (6), possui uma estrutura característica de uma região de fronteira dinâmica próxima a quebra da plataforma, sendo influenciada pelas Correntes de Fronteiras Ocidentais, neste caso, representada pelo sistema Corrente Norte do Brasil e Subcorrente Norte do Brasil (CNB/SCNB) (PETERSON; STRAMMA, 1991; TRAVASSOS et al., 1999; BECKER et al., 2001). A camada homogênea foi observada nos primeiros 90 metros de profundidade. Após os 90 metros ocorre, o início da termoclina, pouco demarcada para a região, variando de 24.5°C para 12°C em um gradiente de profundidade de aproximadamente 200 m (Figura 6 (e) e (l)). A segunda região, localizada próxima das ilhas de FN, AR e os bancos submarinos, representada pela cor verde na Figura (6), revelou-se ser a principal região no Oceano Atlântico Sul. Destaca-se pela dinâmica atual da Corrente Sul Equatorial afetada pela presença das ilhas Fernando de Noronha e Atol das Rocas (PETERSON; STRAMMA, 1991). A camada homogênea também foi observada nos primeiros 90 metros de profundidade. Após os 90 metros ocorre o início da termoclina, que é bem demarcada para esta região, variando de 23.5°C para 12°C em um gradiente de profundidade de aproximadamente 30 m (Figura 6

(e) e (l)). A terceira região, denominada como oceânica, representada pela cor vermelha na mesma figura, é influenciada pelo mesmo sistema de correntes, mas com barreiras orográficas dissimilares (MAZE et al., 2017). Possui uma termoclina mais marcada que a região próximo a quebra da plataforma, porém menos marcada que a região das ilhas (Figura 6 (e) e (l)).

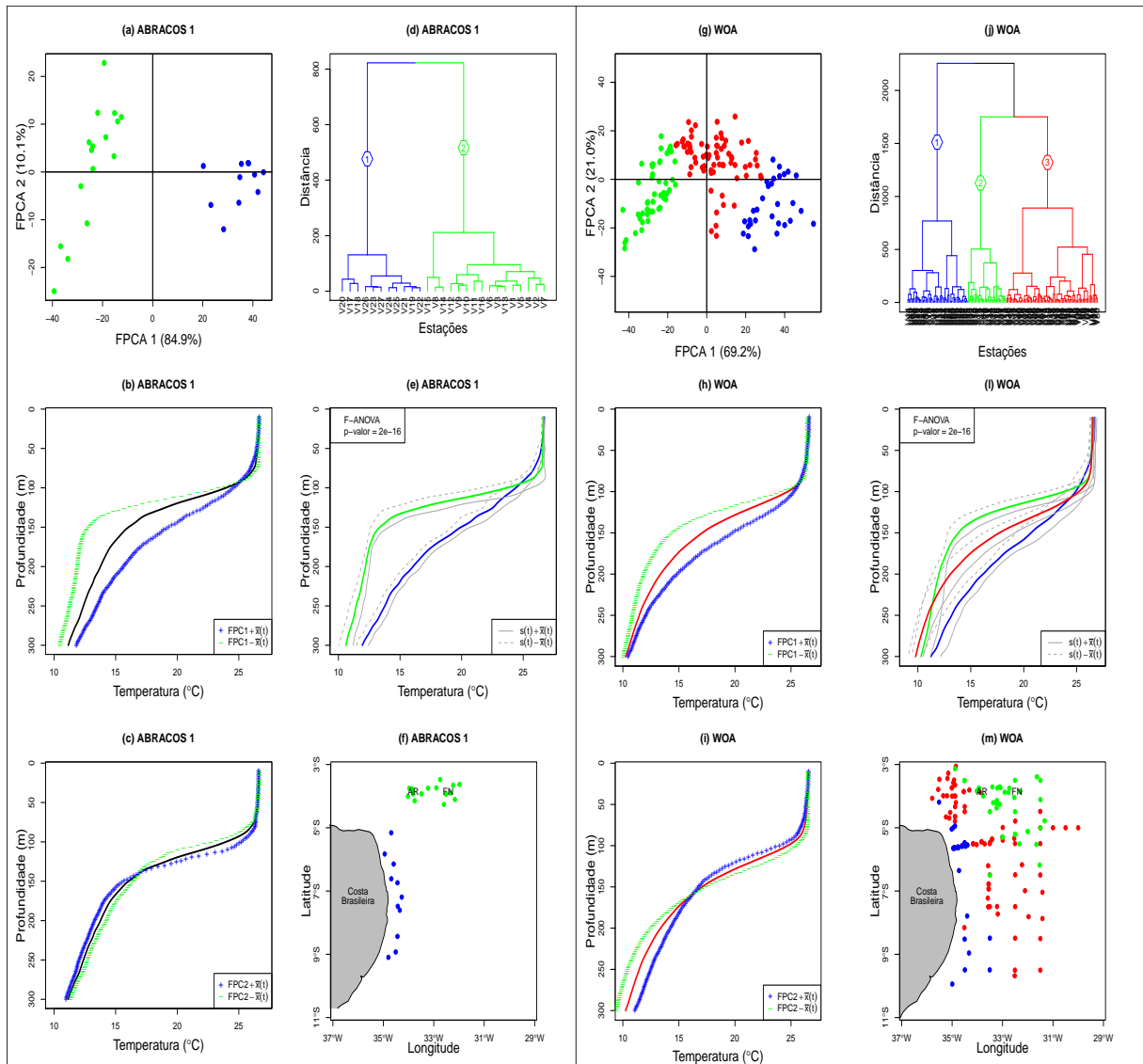


Figura 6 – Os quadros (a) e (g) são os plots dos escores dos dois primeiros FPC's da variável temperatura. Os quadros (b) e (h) são a soma (+) e a subtração (-) do primeiro FPC ao perfil médio de temperatura. Os quadros (c) e (i) são a soma (+) e a subtração (-) do segundo FPC ao perfil médio de temperatura referente ao período do ABRACOS 1 e WOA, respectivamente. Os quadros (d) e (j) são os dendrogramas do ABRACOS 1 e WOA respectivamente. Os quadros (e) e (l) representam os perfis médios de temperatura para cada região. Os quadros (f) e (m) são representações espaciais dos grupos, referente ao cruzeiro ABRACOS 1 e WOA, respectivamente.

Os resultados da ANOVA funcional mostraram que não houve diferença significativa no perfil médio de temperatura quando comparado os dados do ABRACOS 1 e WOA entre os níveis de profundidade (10 - 300 m) referente a região próxima a quebra da plataforma (p-valor = 0.1103) (Figura 7a) e a região oceânica ao redor das ilhas de Fernando de Noronha (FN) e Atol das Rocas (AR) (p-valor = 0.8232) (Figura 7c), embora vários estudos indiquem que o oceano em geral está sofrendo alterações (POOLE; TOMCZAK, 1999; SILVA et al., 2008; SCHUCKMANN et al., 2009; LYMAN et al., 2010; TRENBERTH, 2010).

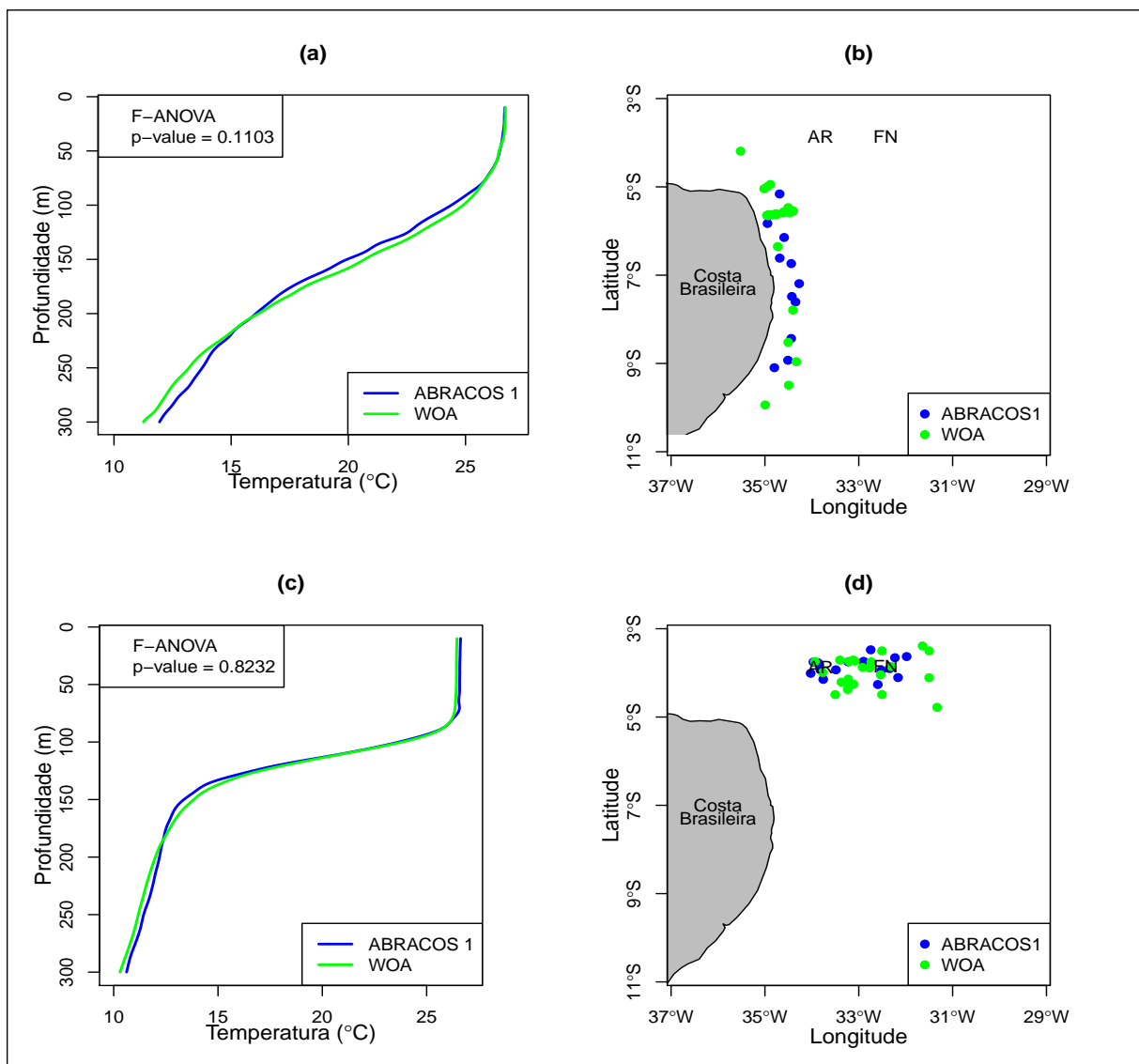


Figura 7 – (a) Perfis médios de temperatura da região próxima a quebra da plataforma, (b) representação espacial da região próxima a quebra da plataforma, (c) perfis médios de temperatura da região das ilhas Fernando de Noronha (FN) e Atol das Rocas (AR), (d) representação espacial da região das ilhas.

Os dois primeiros componentes principais funcionais retiveram um total de 90.5% da variância total da temperatura referente aos dados do ABRACOS 1 + WOA (FCP1 = 70.5 %; FCP2 = 20.0%). O primeiro plano fatorial, ilustra a existência de três grupos (Figura 8a). Percebe-se que existe uma diferença significativa na estrutura física do perfil médio de temperatura ao somar (+) e subtrair (-) a autofunção do primeiro componente principal funcional, Figura 8b, de tal modo que ao somar o primeiro componente ao perfil médio da temperatura a estrutura física tende a representar a região próxima a quebra da plataforma com uma variação da termoclina mais suave. Por outro lado ao subtrair, passa a representar a região das ilhas de FN e AR com uma variação da termoclina mais definida. Quando somado o valor do FPC2 com o perfil médio, Figura 8c, a temperatura aumenta no início da termoclina e diminui no final da mesma, tendo um efeito contrário quando subtrai o valor da FPC2 com o perfil médio.

De maneira similar aos resultados anteriores, as temperaturas referentes aos dados do ABRACOS 1 + WOA foram classificadas em três regiões distintas: próxima a quebra da plataforma, ilha e oceânica (p-valor = 0.00) (Figura 8 (a), (d) e (f)). A primeira região localizada próxima à costa brasileira, representada pela cor azul na (Figura 8), possui uma estrutura característica de uma região de fronteira dinâmica próxima a quebra da plataforma, sendo influenciada pelas Correntes de Fronteiras Ocidentais, neste caso, representada pelo sistema Corrente Norte do Brasil e Subcorrente Norte do Brasil (CNB/SCNB) (PETERSON; STRAMMA, 1991; TRAVASSOS et al., 1999; BECKER et al., 2001). A camada homogênea foi observada com valores nos primeiros 90 metros de profundidade. Após os 90 metros ocorre, o início da termoclina, pouco demarcada para a região, variando de 24.5°C para 12°C em um gradiente de profundidade de aproximadamente 200 m (Figura 8e). A segunda região localizada próxima das ilhas de FN, AR e os bancos submarinos, representada pela cor verde (Figura 8), revelou-se ser a principal região no Oceano Atlântico Sul. Destaca-se pela dinâmica atual da Corrente Sul Equatorial afetada pela presença das ilhas Fernando de Noronha e Atol das Rocas (PETERSON; STRAMMA, 1991). A camada homogênea também foi nos primeiros 90 metros de profundidade. Após os 90 metros, ocorre o início da termoclina, que é bem demarcada para esta região, variando de 23.5°C para 12°C em um gradiente de profundidade de aproximadamente 30 m (Figura 8 (e)). A terceira região, denominada como oceânica, representada pela cor vermelha na mesma figura, é influenciada pelo mesmo sistema de correntes, mas com barreiras orográficas dissimilares (MAZE et al., 2017). Possui uma termoclina mais marcada do que a região próxima a quebra da plataforma, porém menos marcada que a região das ilhas (Figura 8e).

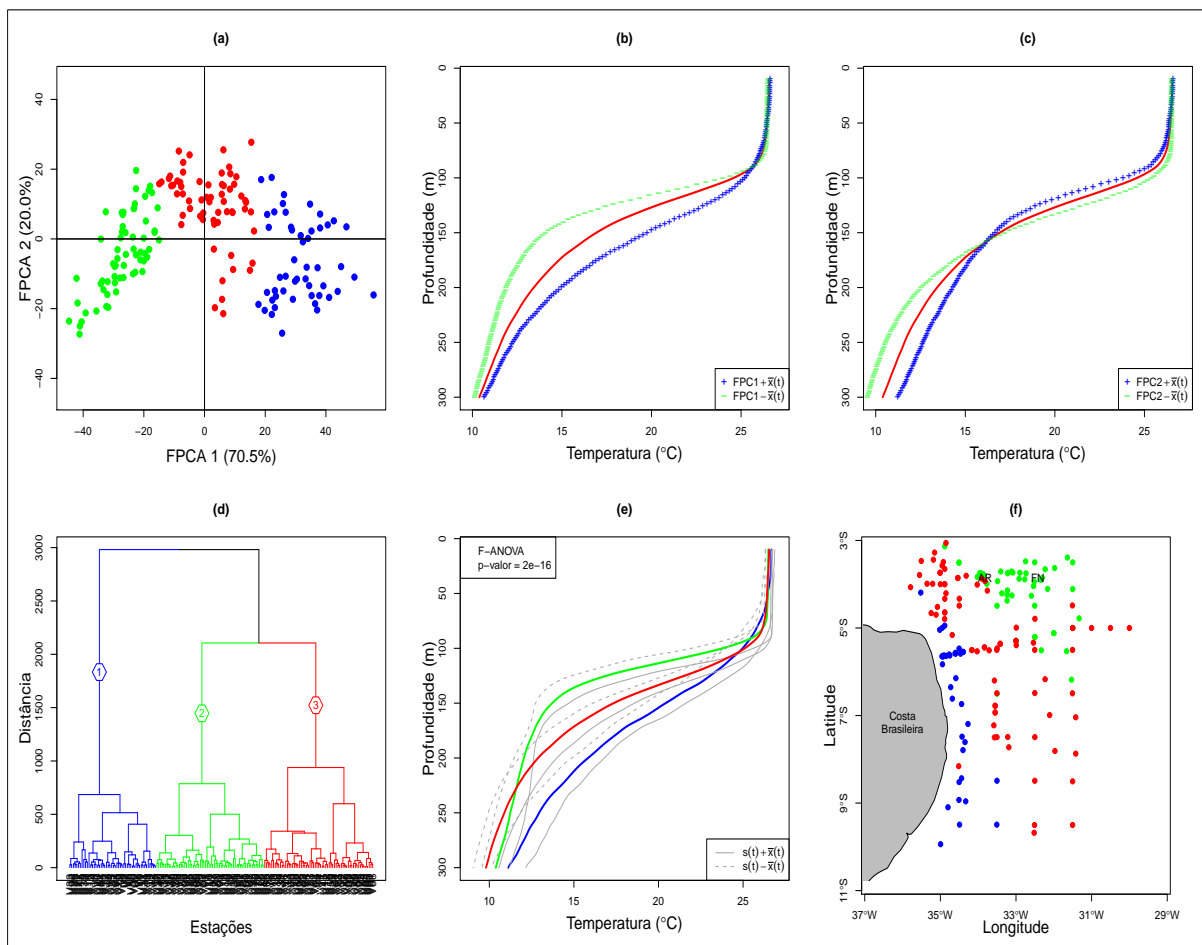


Figura 8 – Os quadros (a) é plote dos escores dos dois primeiros FPC's da variável temperatura. Os quadros (b) é a soma (+) e a subtração (-) do primeiro FPC ao perfil médio de temperatura ($^{\circ}\text{C}$). O quadro (c) é a soma (+) e a subtração (-) do segundo FPC ao perfil médio de temperatura. O quadros (d) é o dendrogramas da temperatura ($^{\circ}\text{C}$). O quadro (e) representam os perfis médios de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) para cada região. O quadros (f) é a representações espacial das regiões referente ao cruzeiro ABRACOS 1 + WOA.

A região próxima a quebra da plataforma apresentou a temperatura da camada superficial (10 m) da água do mar com mínimo de 26.52°C e máximo de 26.876°C , média de $26.68^{\circ}\text{C} \pm 0.11^{\circ}\text{C}$ no período do ABRACOS 1. Enquanto que nos anos anteriores estudados pelos cruzeiros do WOA obteve-se um mínimo de 26.18°C , máximo de 26.98°C e média de $26.7^{\circ}\text{C} \pm 0.22^{\circ}\text{C}$. Quando analisadas as duas fontes de dados juntas obteve-se uma temperatura mínima de 26.18°C , máxima de 26.98°C e média de $26.67^{\circ}\text{C} \pm 0.11^{\circ}\text{C}$, mostrando assim uma menor amplitude de variação térmica superficial nesta região. Em 100 m de profundidade, o cruzeiro do ABRACOS 1 obteve uma amplitude térmica de 2.28°C , com uma média de $24.41^{\circ}\text{C} \pm 0.74^{\circ}\text{C}$. Enquanto que o WOA obteve uma amplitude térmica de 3.96°C e média de $24.89^{\circ}\text{C} \pm 0,48^{\circ}\text{C}$. E quando analisadas as duas fontes de dados juntas obteve-se uma amplitude térmica de 3.96°C com uma média de $24.97^{\circ}\text{C} \pm 0.98^{\circ}\text{C}$. Em 200 metros de profundidade, a temperatura média do cruzeiro ABRACOS 1

foi de $16.06 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0.65 \text{ }^\circ\text{C}$. Enquanto que o WOA foi de $15.84 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0.96 \text{ }^\circ\text{C}$ e ABRACOS + WOA $15.84 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0.96 \text{ }^\circ\text{C}$, com uma amplitude térmica de $2.24 \text{ }^\circ\text{C}$, $3.37 \text{ }^\circ\text{C}$, $5.03 \text{ }^\circ\text{C}$ para os cruzeiros do ABRACOS 1, WOA e ABRACOS 1 + WOA, respectivamente, mostrando assim uma maior amplitude de variação térmica nesta profundidade para a região próximo a quebra da plataforma. Mais detalhes podem ser encontrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores médios e Desvio Padrão, mínimos e máximos da temperatura ($^\circ\text{C}$) na região próximo a quebra da plataforma, para o ABRACOS 1, WOA e ABRACOS + WOA

Profundidade	ABRACOS				WOA				ABRACOS + WOA			
	Média	DP	Mín	Máx	Média	DP	Mín	Máx	Média	DP	Mín	Máx
10m	26.68	0.11	26.52	26.87	26.70	0.22	26.18	26.98	26.67	0.21	26.18	26.98
50m	26.45	0.31	25.62	26.67	26.44	0.32	25.72	26.86	26.46	0.30	25.62	26.86
100m	24.41	0.74	23.18	25.45	24.89	1.03	22.40	26.37	24.97	0.98	22.40	26.37
150m	19.94	0.78	18.45	20.94	20.70	1.43	17.56	22.76	20.43	1.21	17.56	22.76
200m	16.06	0.65	14.69	16.93	16.15	0.77	14.92	18.29	15.84	0.96	13.25	18.29
250m	13.77	0.49	12.90	14.55	13.18	0.84	11.36	14.69	12.95	1.12	10.40	14.69
300m	11.94	0.49	11.15	12.60	11.26	0.91	9.74	13.03	11.12	1.03	9.30	13.03

A região das Ilhas de Fernando de Noronha e Atol das Rocas, além da região dos montes submarinos referente ao cruzeiro do ABRACOS 1, apresentou na camada superficial (10 m) da água do mar uma temperatura mínima de $26.31 \text{ }^\circ\text{C}$ e máxima de $26.81 \text{ }^\circ\text{C}$, com média de $26.63 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0.13 \text{ }^\circ\text{C}$. Enquanto que, os cruzeiros do WOA obtiveram um mínimo de $26.10 \text{ }^\circ\text{C}$, máximo de $26.93 \text{ }^\circ\text{C}$ e média de $26.46 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0.19 \text{ }^\circ\text{C}$. Já para o ABRACOS 1 + WOA tem-se um mínimo de $26.06 \text{ }^\circ\text{C}$ e máximo de $26.93 \text{ }^\circ\text{C}$, com uma média de $26.50 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0.19 \text{ }^\circ\text{C}$, mostrando que existe pouca variação térmica superficial nesta região das ilhas. Para o cruzeiro do ABRACOS 1 observou-se amplitude térmica de $7.39 \text{ }^\circ\text{C}$, com média de $23.66 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1.95 \text{ }^\circ\text{C}$ em 100 metros de profundidade. Enquanto que o WOA obteve uma amplitude térmica de $7.06 \text{ }^\circ\text{C}$ e média de $23.83 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1.79 \text{ }^\circ\text{C}$, e quando analisadas as duas fontes de dados juntas obteve-se uma amplitude térmica de $7.39 \text{ }^\circ\text{C}$ com uma média de $23.79 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1.82 \text{ }^\circ\text{C}$. Portanto, esse nível de profundidade, possui uma alta variabilidade e com alta amplitude térmica na região das ilhas. Na profundidade de 200 metros, a temperatura média do cruzeiro ABRACOS 1 foi de $12.2 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0.32 \text{ }^\circ\text{C}$. Por sua vez, o WOA apresentou, $12.00 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0.63 \text{ }^\circ\text{C}$ e ABRACOS + WOA $12.05 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0.57 \text{ }^\circ\text{C}$, com uma amplitude térmica de $1.07 \text{ }^\circ\text{C}$, $2.2 \text{ }^\circ\text{C}$, $2.2 \text{ }^\circ\text{C}$ para os cruzeiros do ABRACOS 1, WOA e ABRACOS 1 + WOA, respectivamente. Logo, existe pouca variabilidade térmica nesta profundidade para a região das ilhas. Mais detalhes podem ser encontrados na Tabela 2.

Os cruzeiros do WOA obtiveram um mínimo de $26.02 \text{ }^\circ\text{C}$, máximo de $27.07 \text{ }^\circ\text{C}$ e média de $26.55 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0.21 \text{ }^\circ\text{C}$. Já no ABRACOS 1 + WOA tem-se um mínimo de $26.02 \text{ }^\circ\text{C}$ e máximo de $27.07 \text{ }^\circ\text{C}$, com uma média de $26.54 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0.21 \text{ }^\circ\text{C}$, mostrando que existe pouca variação térmica superficial na região oceânica. O cruzeiro do WOA obteve uma amplitude térmica de $7.06 \text{ }^\circ\text{C}$ e média de $23.83 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1.79 \text{ }^\circ\text{C}$. Quando analisou-se as duas fontes de dados juntas, obteve-se uma amplitude térmica de $7.39 \text{ }^\circ\text{C}$ com uma média de $23.79 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1.82 \text{ }^\circ\text{C}$. Portanto, a camada de água em 100 metros de profundidade possui uma alta

Tabela 2 – Valores médios e Desvio Padrão, mínimos e máximos da temperatura na região das ilhas, para o ABRACOS 1, WOA e ABRACOS + WOA

Profundidade	ABRACOS				WOA				ABRACOS + WOA			
	Média	DP	Mín	Máx	Média	DP	Mín	Máx	Média	DP	Mín	Máx
10m	26.63	0.13	26.31	26.81	26.46	0.19	26.10	26.93	26.50	0.19	26.10	26.93
50m	26.58	0.11	26.29	26.71	26.42	0.18	26.06	26.76	26.46	0.18	26.06	26.76
100m	23.66	1.95	19.11	26.50	23.83	1.79	19.20	26.26	23.79	1.82	19.11	26.50
150m	13.37	0.76	12.43	15.43	13.84	1.05	12.51	16.05	13.72	1.00	12.43	16.05
200m	12.20	0.32	11.71	12.77	12.00	0.63	10.59	12.79	12.05	0.57	10.59	12.79
250m	11.43	0.55	10.30	12.30	11.18	0.99	9.52	12.51	11.24	0.90	9.52	12.51
300m	10.62	0.56	9.29	11.44	10.30	0.87	8.86	11.73	10.38	0.81	8.86	11.73

variabilidade e com alta amplitude térmica. Em 200 metros de profundidade a temperatura média do cruzeiro WOA foi de $13.09\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ e ABRACOS + WOA de $12.88\text{ }^{\circ}\text{C} (\pm 1.11\text{ }^{\circ}\text{C})$, com uma amplitude térmica de $4.62\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $4.28\text{ }^{\circ}\text{C}$, para os cruzeiros do WOA e ABRACOS 1 + WOA, respectivamente, mostrando que após o final da termoclina existe alta variabilidade térmica nesta profundidade para a região oceânica. Mais detalhes podem ser encontrados na (Tabela 3).

Tabela 3 – Valores médios e Desvio Padrão, mínimos e máximos da temperatura na região oceânica, para o WOA e ABRACOS + WOA.

Profundidade	WOA				ABRACOS + WOA			
	Média	DP	Mín	Máx	Média	DP	Mín	Máx
10m	26.55	0.21	26.02	27.07	26.54	0.21	26.02	27.07
50m	26.44	0.31	25.10	27.07	26.42	0.32	25.10	27.07
100m	25.20	1.13	20.57	26.82	25.10	1.18	20.57	26.82
150m	17.69	1.47	14.78	20.41	17.34	1.23	14.78	19.30
200m	13.09	1.20	10.89	15.50	12.88	1.11	10.89	15.17
250m	10.92	0.90	9.53	13.82	10.89	0.95	9.53	13.82
300m	9.79	0.70	8.67	13.00	9.80	0.76	8.67	13.00

Os valores médios de temperatura registrados nesta dissertação são compatíveis com os trabalhos encontrados na literatura (PAULO, 2016; LEFEVRE et al., 2014; BECKER et al., 2001; TRAVASSOS et al., 1999), esses estudos indicaram que entre os anos de 2010 e 2012, a amplitude foi de $0,55^{\circ}\text{C}$ em 2010, o que reflete uma anomalia global de temperatura registrada nesse ano. Além disso, os estudos mostraram que os registros globais de temperatura obtidos de 1996 até 2012 indicaram 2010 como o ano mais quente.

5.1.2 Representação em 3D da Temperatura (°C)

O modelo do semivariograma espacial da variável temperatura para a área estudada está representado na Figura 9. O modelo variográfico que melhor se ajustou foi o modelo esférico (linha azul). Os parâmetros para criar o modelo ajustado foram: distância (h) = 4, Patamar (C) = 1739.96, alcance (a) = 3.36, efeito pepita (C_0) = 347.99.

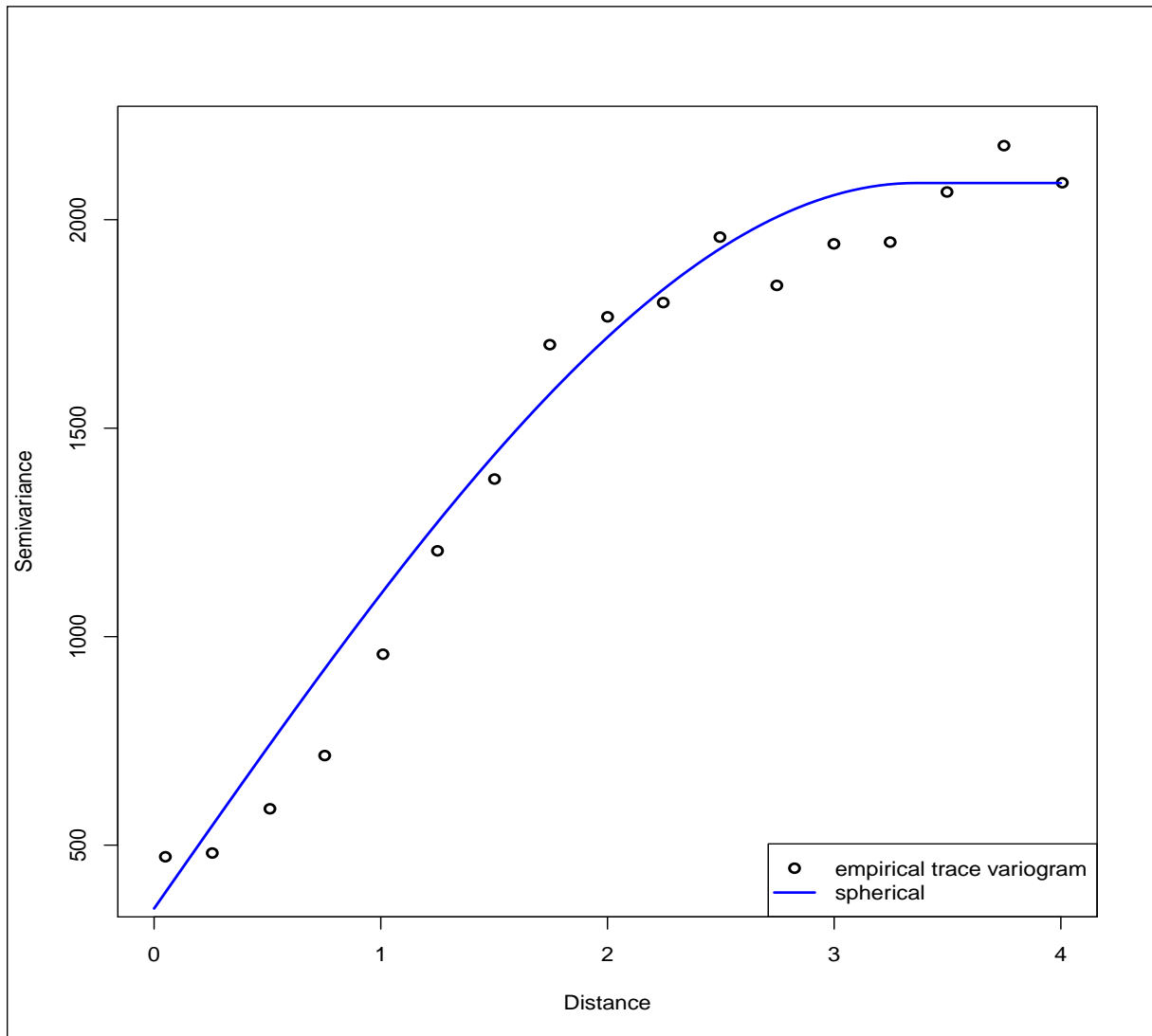


Figura 9 – Ajuste do semivariograma empírico para krigagem ordinária funcional da variável temperatura °C.

Após a realização da Krigagem funcional, fez-se a validação do modelo esférico. A comparação entre o perfil observado e ajustado pode ser observada na Figura 10 para diferentes regiões na área de estudo. Os erros quadráticos médio para os quatro perfis utilizados aqui como exemplo foram de 0.3932, 0.0976, 0.3718 e 0.0562 para as ilhas, região próximo a quebra da plataforma mais ao norte, região próximo a quebra da plataforma mais ao sul e região oceânica, respectivamente. Como os resultados dos erros quadráticos médios são baixos pode-se concluir que o modelo utilizado se ajusta bem aos dados.

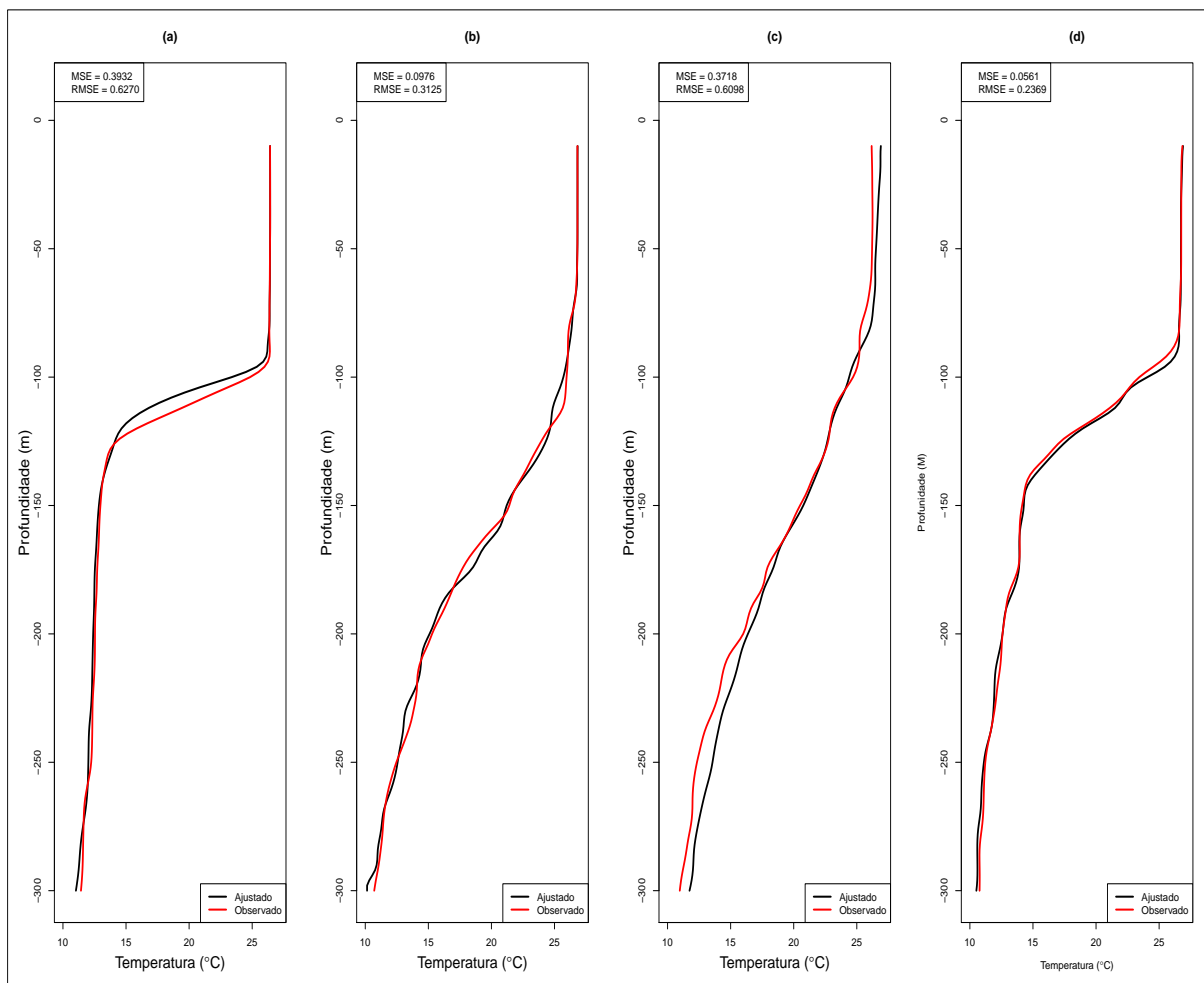


Figura 10 – Comparação do modelo ajustado (linha preta) e observado (linha vermelha) de perfil de temperatura nas regiões: das ilhas ($32^{\circ}46'W$, $3^{\circ}52'S$) (a), na região próxima a quebra da plataforma mais ao norte ($34^{\circ}53'W$, $4^{\circ}56'S$) (b), na região próxima a quebra da plataforma mais ao sul ($34^{\circ}36'W$, $5^{\circ}34'S$) (c) e na região oceânica ($33^{\circ}00'W$, $5^{\circ}17'S$).

A temperatura superficial (10 m de profundidade) da água variou entre $26.08^{\circ}C$ e $26.99^{\circ}C$, com amplitude de $0.91^{\circ}C$ (Figura 11a). Em 100 metros de profundidade, obteve-se uma temperatura média de $24.47^{\circ}C$, com desvio padrão de $1.06^{\circ}C$ (Figura 11b). Já em 150 metros de profundidade, obteve-se uma temperatura média de $17.55^{\circ}C$, com desvio padrão de $2.49^{\circ}C$ (Figura 11c). Em 200 metros de profundidade, a temperatura variou entre $10.67^{\circ}C$ e $18.17^{\circ}C$ com amplitude de $7.5^{\circ}C$, (Figura 11d), no gradiente de 250 metros a temperatura apresentou uma média de $11.65^{\circ}C$, com desvio padrão de $1.59^{\circ}C$ (Figura 11e). Por fim, na profundidade de 300 metros a temperatura média foi de $10.4^{\circ}C$, com desvio padrão de $1.22^{\circ}C$ e o mínima foi registrada em $8.68^{\circ}C$ na região oceânica e a máxima de $13.23^{\circ}C$ na região próxima a quebra da plataforma (Figura 11f), o que evidenciou a estabilidade térmica, característica das áreas tropicais. Comparando as áreas estudadas, a região próxima a quebra da plataforma apresentou as temperaturas mais elevadas. Ao longo da coluna d'água apenas na camada superficial a temperatura média

foi homogênea em toda região estudada. A partir do início da termoclina a região próximo a quebra da plataforma foi a que obteve maiores temperaturas.

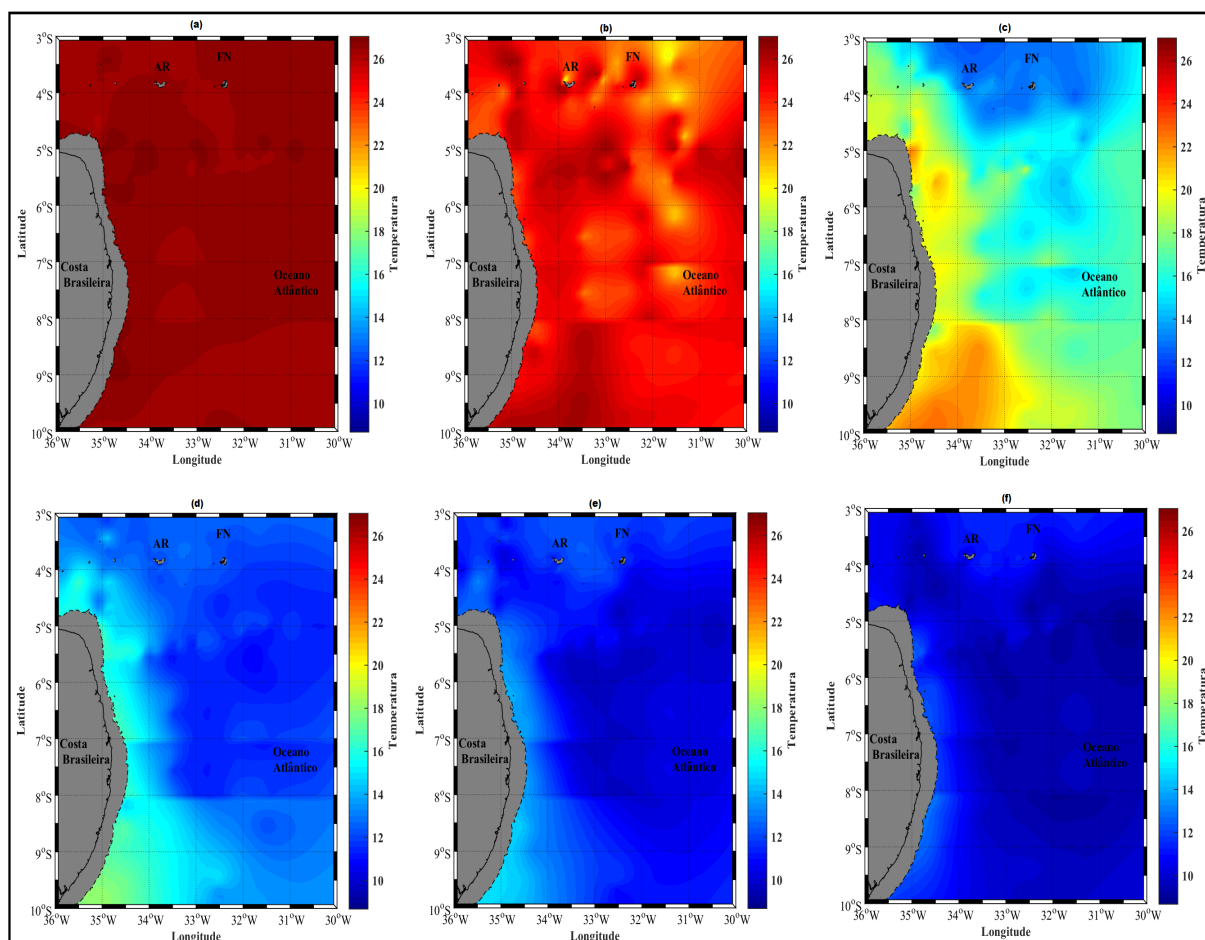


Figura 11 – Krigagem Funcional para a variável temperatura em seis níveis de profundidade: (a) 10 metros, (b) 100 metros, (c) 150 metros, (d) 200 metros, (e) 250 metros e (f) 300 metros.

Os resultados das sessões verticais de temperaturas na região próximo a quebra da plataforma e oceânicas nos primeiros 300 metros de profundidade do Oceano Atlântico, durante o período do verão, pode ser visto na Figura 12. Percebe-se nos dois transectos que a profundidade da termoclina tende a aumentar quando próxima da região próximo a quebra da plataforma. Dá mesma maneira a profundidade da termoclina aumenta do Sul até o Norte. Porém, esses padrões apresentam variações de processos de meso-escala (aproximadamente 100 km). Por outro lado, a espessura da termoclina também tende a aumentar. A camada da termoclina tem alta estabilidade, separa camadas de superfície e do fundo. A variação da estrutura vertical da temperatura em relação as latitudes é pequena.

Na região entre as latitudes 8° e 10°S (Figura 12, transecto B), onde foram registradas profundidades de início da termoclina mais rasas e semelhantes, ocorre a presença de montes submarinos e platô de Pernambuco, possivelmente realizando uma elevação

de massas d'água (ZEMBRUSKI; CHAVES, 1979). Sugere-se que a deformação da termoclina esteja associada a um salto interno hidráulico que resulta em ressurgência orográfica (SCHOTT et al., 2005). No entanto, em regiões mais ao norte, não ocorre a presença de montes e platô, o que resultou no início da termoclina mais profunda, devido ao resfriamento da superfície. Segundo Stramma e England (1999) e Freitas (2003), em regiões de talude pode ocorrer ressurgência orográfica, esse fenômeno também pode vir a ocorrer em áreas de divergência de correntes. Lefevre et al. (2014) observaram que há uma relação entre a latitude e a profundidade do início da termoclina.

Na região mais próxima do declive continental, por exemplo, o processo de meso-escala, é topograficamente induzido pela mistura de bordas, furos de pulos hidráulicos e ondas internas (APEL et al., 1975; HOWELL; BROWN, 1985; LIU, 1993). A transição da dinâmica da costa oceânica é evidenciada através da costa brasileira, onde se observou que uma termoclina horizontal estreita do mar aberto aumentava significativamente ao aproximar-se da quebra de plataforma (Figura 12, transecto C e D). A estratificação variando em profundidade significa que eles agora seguem caminhos curvos e perdem sua coerência após um pequeno número de reflexões a partir do fundo, onde existe uma dispersão da topografia (GERKEMA, 2001; LAMB, 2014; NAVROTSKY et al., 2004).

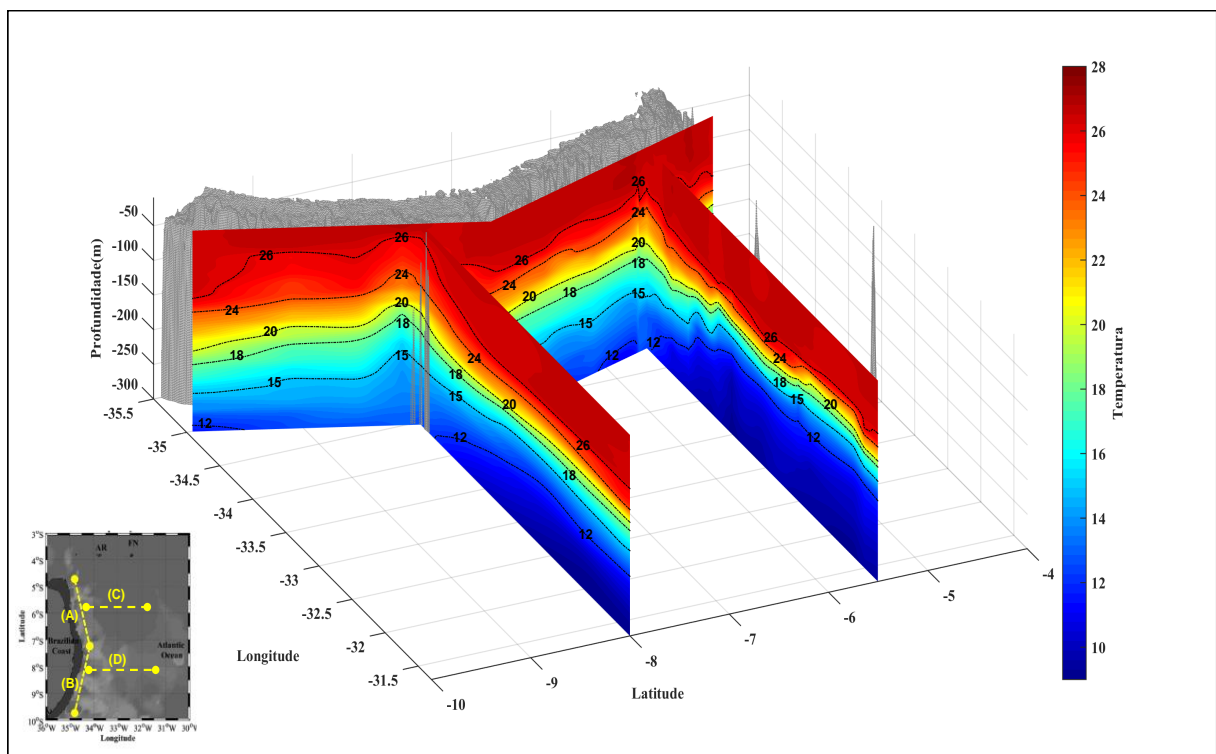


Figura 12 – Sessões verticais de temperatura ao longo da região próxima a quebra da plataforma e oceânica adjacente. As seções verticais possui as seguintes coordenadas: (A) ($35^{\circ}00'W$, $4^{\circ}42'S$ a $34^{\circ}18'W$, $7^{\circ}24'S$), (B) ($34^{\circ}18'W$, $7^{\circ}24'S$ a $34^{\circ}59'W$, $9^{\circ}56'S$), (C) ($34^{\circ}48'W$, $5^{\circ}30'S$ a $31^{\circ}18'W$, $5^{\circ}30'S$) e (D) ($34^{\circ}27'W$, $8^{\circ}00'S$ a $31^{\circ}18'W$, $8^{\circ}18'W$).

Os resultados da distribuição da temperatura na região das ilhas são encontrados na Figura 13. Nota-se que entre a longitude 32°W à 31°W , a altura da termoclina é estável com cerca de 25 m. Quando passa pelo arquipélago de Fernando de Noronha ($32^{\circ}30'\text{W}$) a altura da termoclina tende a diminuir para 20 m até chegar em Atol da Rocas ($34^{\circ}00'\text{W}$). Quando passa por Atol das Rocas em direção aos Monte Submarinos a altura da termoclina tende a aumentar para cerca de 60 m, com baixa variação nessa profundidade. Assim, as principais variações assumidas aqui para a temperatura seguiram as características típicas de águas tropicais.

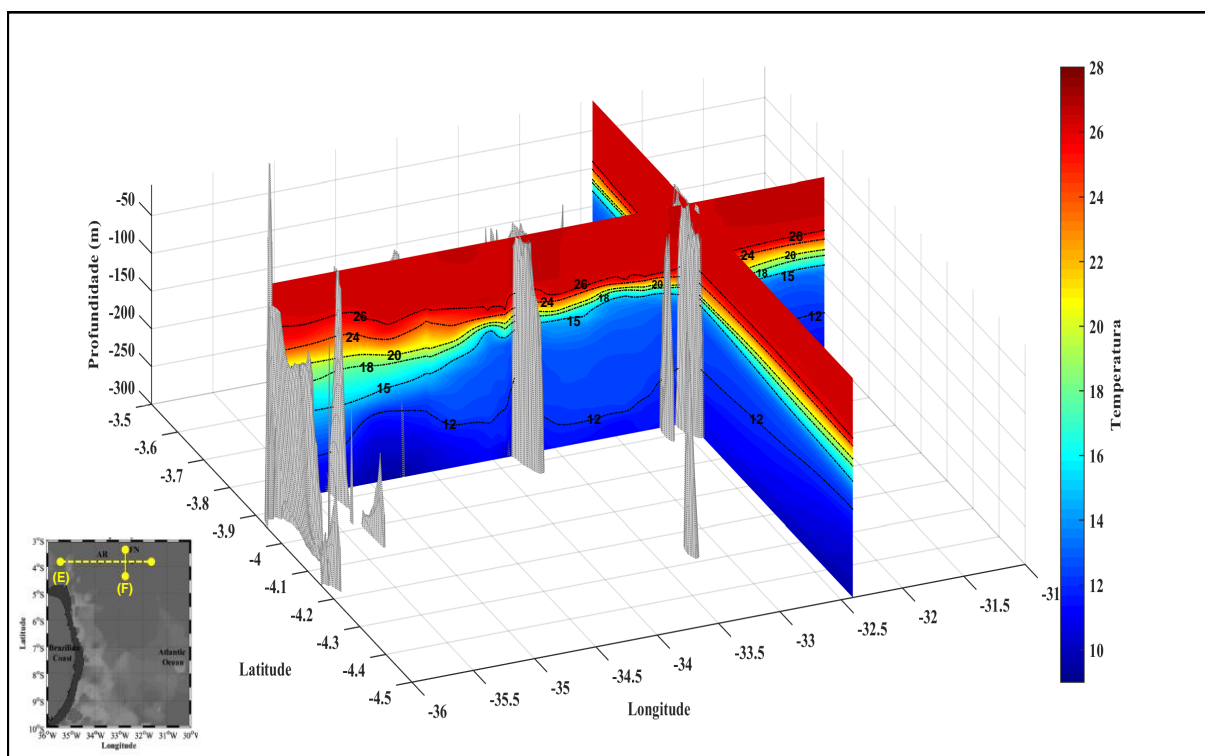


Figura 13 – Sessões verticais de temperatura ao longo da região dos montes submarinos, Ilhas Fernando de Noronha e atol das rocas. As seções verticais possuem as seguintes coordenadas: (E) ($35^{\circ}48'\text{W}$, $3^{\circ}52'\text{S}$ a $31^{\circ}18'\text{W}$, $3^{\circ}52'\text{S}$), (F) ($32^{\circ}24'\text{W}$, $3^{\circ}30'\text{S}$ a $32^{\circ}24'\text{W}$, $4^{\circ}30'\text{S}$).

5.2 Salinidade

Com base na validação cruzada, a quantidade ótima de funções bases para a variável salinidade foi de 45 B-splines e o parâmetro de suavização $\lambda = 1$. O resultado da suavização pode ser visto na Figura (14 (a), (b), (c)), na qual é apresentado um exemplo de suavização para cada região: próximo a quebra da plataforma, das ilhas e oceânica, respectivamente.

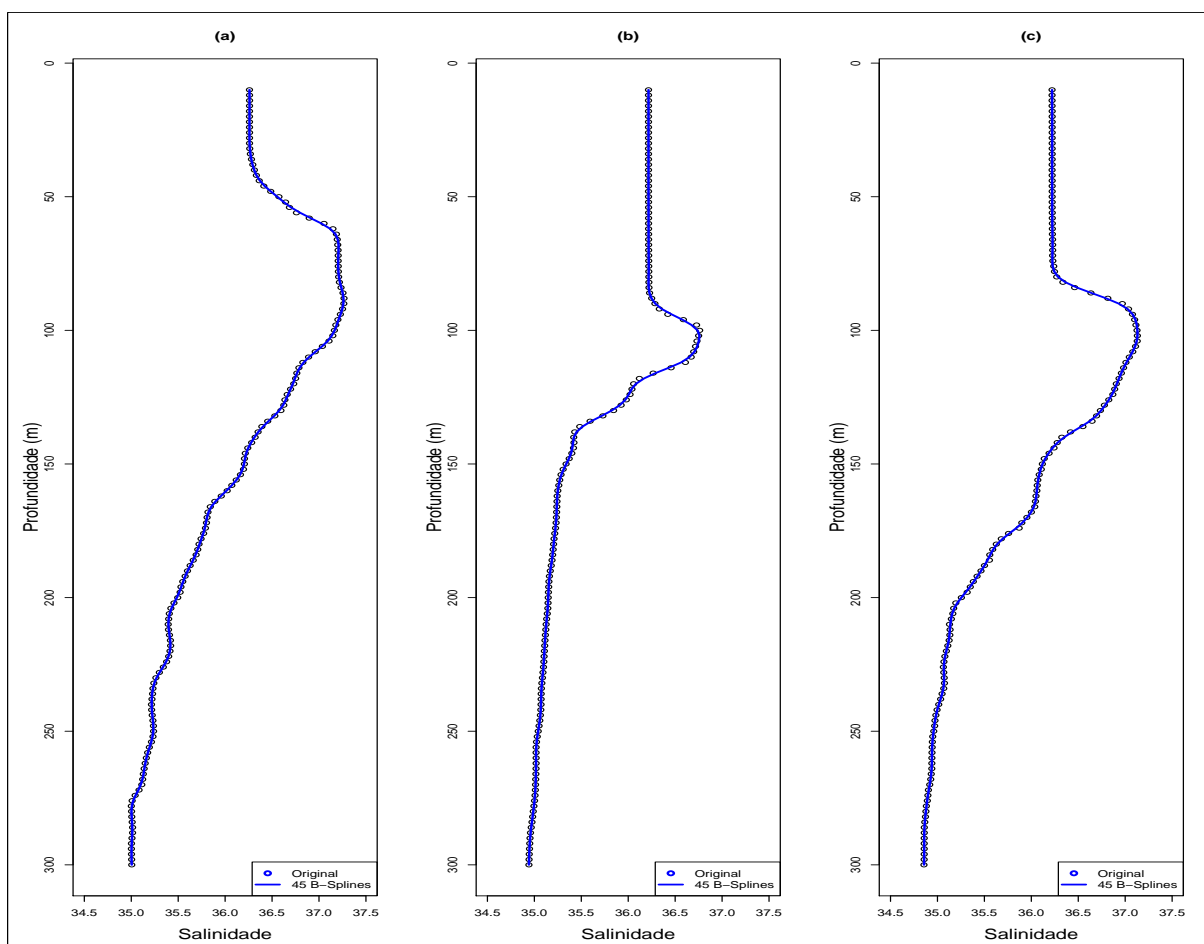


Figura 14 – Projeção de perfis de salinidade em uma base B-spline de 45 funções: (a) região próximo a quebra da plataforma, (b) região das ilhas e (c) região oceânica.

5.2.1 Classificação da Salinidade

Os dois primeiros componentes principais funcionais retiveram um total de 92.1% da variância total da variável salinidade referente aos dados do ABRACOS 1 (FCP1 = 86.4%; FCP2 = 5.7%). O primeiro plano fatorial, ilustra a existência de dois grupos (Figura 15 (a)). Percebe-se que existe uma diferença significativa na estrutura física do perfil médio da salinidade ao somar (+) e subtrair (-) à autofunção do primeiro componente principal funcional, (Figura 15 (b)), de tal modo que, ao somar o primeiro componente ao perfil médio da salinidade, a estrutura física tende a representar a região próximo a quebra da plataforma com uma variação da halocline mais suave. Por outro lado ao subtrair, passa a

representar a região das ilhas de FN e AR com uma variação da termoclina mais definida. Quando somado o valor do FPC2 com o perfil médio, (Figura 15 (c)), a salinidade aumenta no início da haloclina e diminui no final da mesma, tendo um efeito contrário quando subtrai o valor da FPC2 com o perfil médio. Por outro lado, os dois FPC's referente aos dados do WOA retiveram um total de 85.7% da variância total da salinidade (FCP1 = 70.6%; FCP2 = 15.1%). O primeiro plano fatorial mostra a existência de dois grupos (Figura 15 (g)). Percebe-se que existe uma diferença significativa na estrutura física do perfil médio de salinidade ao somar (+) e subtrair (-) a autofunção do primeiro componente principal funcional, (Figura 15 (h)), de tal modo que, ao somar o primeiro componente ao perfil médio da salinidade a estrutura física tende a representar a região próximo a quebra da plataforma com uma variação da haloclina mais suave. Por outro lado, ao subtrair, passa a representar a região das ilhas de FN e AR com uma variação da haloclina mais definida. Somado o valor do FPC2 com o perfil médio, a salinidade aumenta no início da haloclina e diminui no final da mesma, tendo um efeito contrário quando subtrai o valor da FPC2 com o perfil médio (Figura 15 (i)).

Através da aplicação do agrupamento e assumindo a natureza funcional dos dados, a estrutura física do Oceano Atlântico Sul pode ser caracterizada numa escala vertical de 10 a 300 m de profundidade e classificadas em três regiões distintas: próximo a quebra da plataforma, ilha e oceânica (p -valor = 0.00) (Figura 15 (d), (j), (f), (m)). Este é um resultado verdadeiramente notável porque demonstra objetivamente que cada região tem uma determinada tendência de estratificação vertical específica. A primeira região localizada próxima à costa brasileira, representada pela cor azul, possui uma estrutura característica de uma região de fronteira dinâmica próxima a quebra da plataforma, sendo influenciada pelas Correntes de Fronteiras de borda oeste, neste caso, representada pelo sistema Corrente Norte do Brasil e Subcorrente Norte do Brasil (CNB/SCNB) (PETERSON; STRAMMA, 1991; TRAVASSOS et al., 1999; BECKER et al., 2001). A salinidade da superfície é aproximadamente 36.45 e mantém-se praticamente constante até cerca de 50 m de profundidade. Abaixo disso ocorre um acentuado aumento da salinidade até 150 m de profundidade, onde a salinidade atinge aproximadamente 37.29 . Nessa camada há uma sobreposição entre a haloclina e a termoclina. A partir de 200 m de profundidade, não ocorre variação significativa da salinidade em direção ao fundo do oceano (Figura 15 (e), (l)). A segunda região localizada próxima das ilhas de FN, AR e os bancos submarinos, representada pela cor verde, revelou-se ser a principal região no Oceano Atlântico Sul. Destaca-se pela dinâmica atual da Corrente Sul Equatorial afetada pela presença das ilhas Fernando de Noronha e Atol das Rocas (PETERSON; STRAMMA, 1991). A salinidade da superfície é aproximadamente 36.23 e mantém-se praticamente constante até cerca de 70 m de profundidade. Abaixo disso ocorre um acentuado aumento da salinidade até 140 m de profundidade. A máxima salinidade, 36.93 , foi observada em 84 m de profundidade. Nessa camada há uma sobreposição entre a haloclina e a termoclina. A partir de 150 m

de profundidade não ocorre variação significativa da salinidade em direção ao fundo do oceano (Figura 15 (e), (l)). A terceira região denominada como oceânica, representada pela cor vermelha, é influenciada pelo mesmo sistema de correntes, mas com barreiras orográficas dissimilares (MAZE et al., 2017). Possui uma haloclina mais marcada do que a região próximo a quebra da plataforma porém menos marcada do que a região das ilhas (Figura 15 (e), (l)).

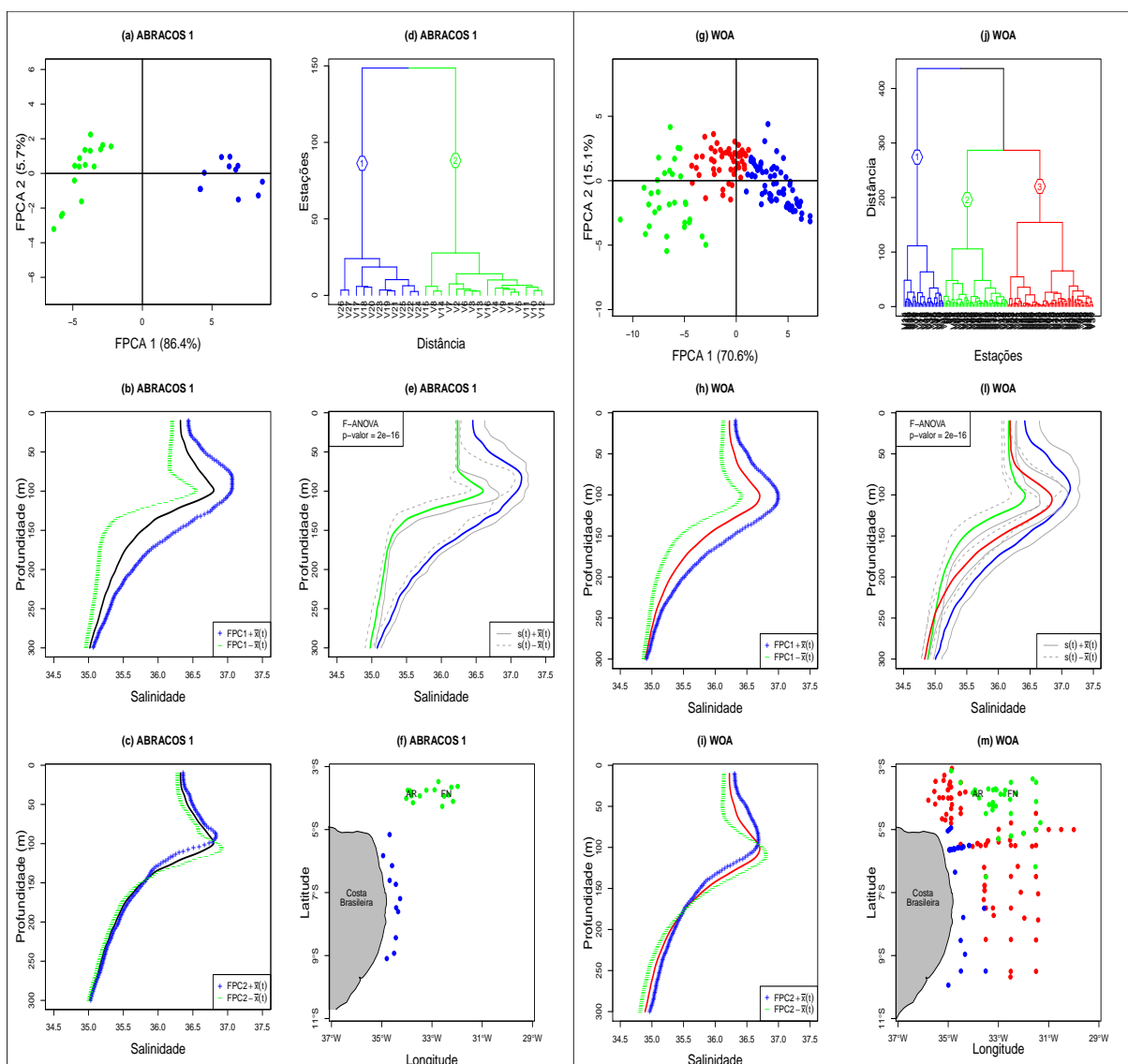


Figura 15 – Os quadros (a) e (g) são os plots dos escores dos dois primeiros FPC's da variável temperatura. Os quadros (b) e (h) são a soma (+) e a subtração (-) do primeiro FPC ao perfil médio de salinidade. Os quadros (c) e (i) são a soma (+) e a subtração (-) do segundo FPC ao perfil médio de salinidade referente ao período do ABRACOS 1 e WOA, respectivamente. Os quadros (d) e (j) são os dendrogramas do ABRACOS 1 e WOA respectivamente. Os quadros (e) e (l) representam os perfis médios de salinidade para cada região. Os quadros (f) e (m) são representações espaciais dos grupos, referente ao cruzeiro ABRACOS 1 e WOA, respectivamente.

Os resultados da ANOVA funcional mostraram que não houve diferença significativa no perfil médio de salinidade quando comparado os dados do ABRACOS 1 e WOA entre os níveis de profundidade (10 - 300 m) referente a região próximo a quebra da plataforma (p-valor = 0.6332) (Figura 16a). Significa, então, que estatisticamente o perfil médio de salinidade não sofreu alteração ao longo dos anos. De forma análoga, comparou-se o perfil médio de salinidade entre os dados do ABRACOS 1 e WOA referente a região das ilhas de Fernando de Noronha (FN) e Atol das Rocas (AR), em que baseado no p-valor = 0.0553, chegou-se a mesma conclusão que a região próximo a quebra da plataforma (Figura 16c), embora vários estudos indiquem que o oceano em geral está sofrendo alterações (POOLE; TOMCZAK, 1999; SILVA et al., 2008; SCHUCKMANN et al., 2009; LYMAN et al., 2010; TRENBERTH, 2010).

Os dois primeiros componentes principais funcionais retiveram um total de 86.6% da variância total da temperatura referente aos dados do ABRACOS 1 + WOA (FCP1 = 72.2 %; FCP2 = 14.4%). O primeiro plano fatorial, ilustra a existência de três grupos (Figura 17 (a)). Percebe-se que existe uma diferença significativa na estrutura física do perfil médio de salinidade ao somar (+) e subtrair (-) a autofunção do primeiro FPC, (Figura 17 (b)), de tal modo que ao somar o primeiro FPC ao perfil médio da salinidade a estrutura física tende a representar a região próximo a quebra da plataforma com uma variação da haloclina mais suave. Por outro lado ao subtrair, passa a representar a região das ilhas de FN e AR com uma variação da haloclina mais definida. Quando somado o valor do FPC2 com o perfil médio, (Figura 17 (c)), a temperatura aumenta no início da haloclina e diminui no final da mesma, tendo um efeito contrário quando subtrai o valor da FPC2 com o perfil médio.

De maneira similar aos resultados anteriores, a salinidade referente aos dados do ABRACOS 1 + WOA, foram classificadas em três regiões distintas: próximo a quebra da plataforma, ilha e oceânica (p-valor = 0.00) (Figura 17 (a), (d), (f)). A primeira região localizada próxima à costa brasileira, representada pela cor azul na (Figura 17), possui uma estrutura característica de uma região de fronteira dinâmica próxima a quebra da plataforma, sendo influenciada pelas Correntes de Fronteiras Ocidentais, neste caso, representada pelo sistema de CNB/SCNB (PETERSON; STRAMMA, 1991; TRAVASSOS et al., 1999; BECKER et al., 2001). A salinidade da superfície é aproximadamente 36.45 e mantém-se praticamente constante até cerca de 50 m de profundidade. Abaixo disso ocorre um acentuado aumento da salinidade até 150 m de profundidade, onde a salinidade atinge aproximadamente 37.29. Nessa camada há uma sobreposição entre a haloclina e a termoclina. A partir de 200 m de profundidade, não ocorre variação significativa da salinidade em direção ao fundo do oceano (Figura 15 (e)). A segunda região localizada próxima das ilhas de FN, AR e os bancos submarinos, representada pela cor verde na (Figura 17), revelou-se ser a principal região no Oceano Atlântico Sul. Destaca-se pela dinâmica atual da Corrente Sul Equatorial afetada pela presença das ilhas Fernando de

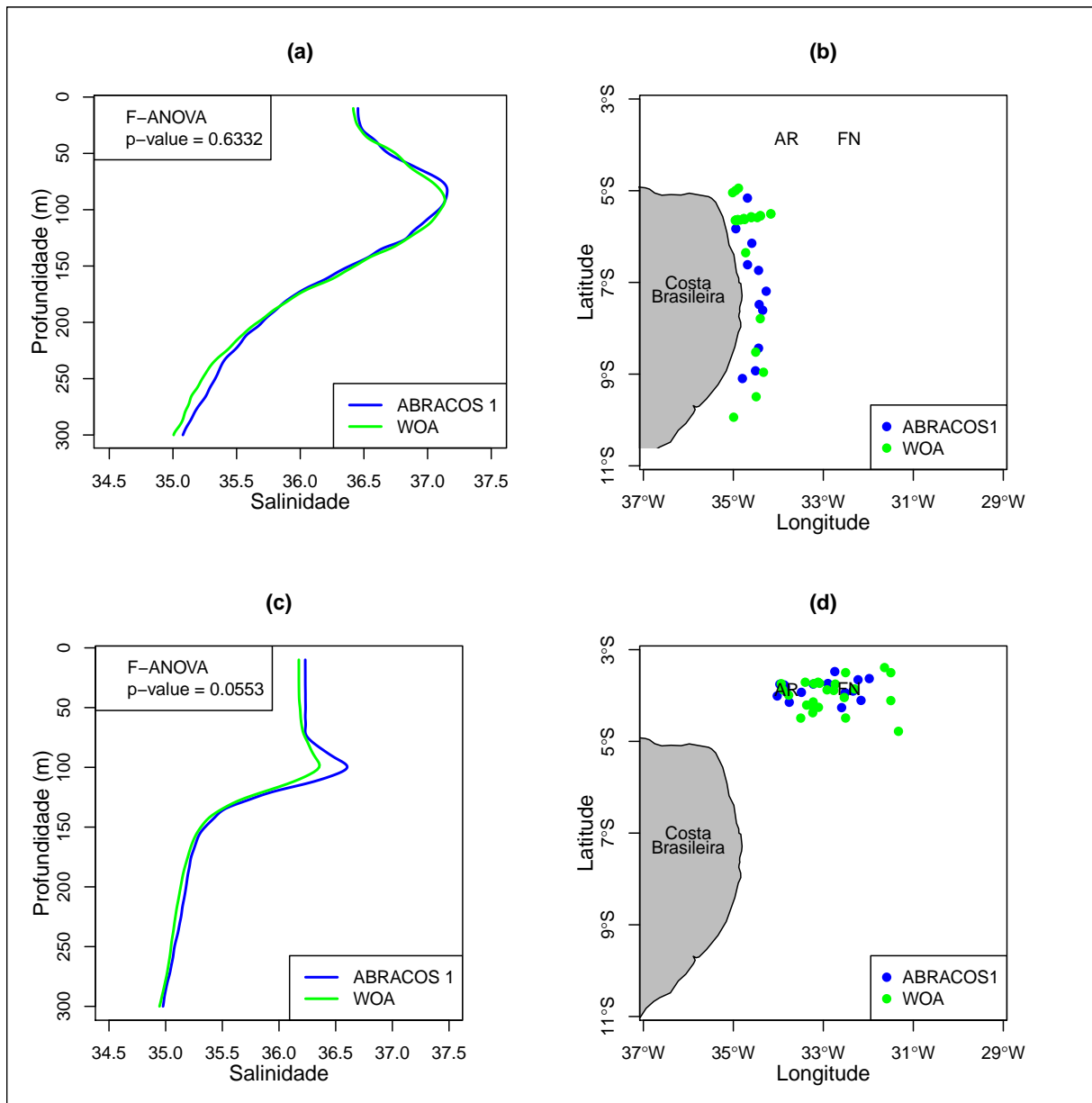


Figura 16 – (a) Perfis médios da salinidade da região próxima a quebra da plataforma, (b) representação espacial da região próxima a quebra da plataforma, (c) perfis médio de salinidade da região das ilhas FN e AR, (d) representação espacial da região das ilhas.

Noronha e Atol das Rocas (PETERSON; STRAMMA, 1991). A salinidade da superfície é aproximadamente 36.23 e mantém-se praticamente constante até cerca de 70 m de profundidade. Abaixo disso ocorre um acentuado aumento da salinidade até 140 m de profundidade. A máxima salinidade, 36.93, foi observada em 84 m de profundidade. Nessa camada há uma sobreposição entre a haloclina e a termoclina. A partir de 150 m de profundidade não ocorre variação significativa da salinidade em direção ao fundo do oceano (Figura 15 (e)). A terceira região denominada como oceânica, representada pela cor vermelha na (Figura 17), é influenciada pelo mesmo sistema de correntes, mas com barreiras orográficas dissimilares (MAZE et al., 2017). Possui uma haloclina mais marcada

do que a região próxima a quebra da plataforma, porém menos marcada do que a região das ilhas (Figura 15 (e)).

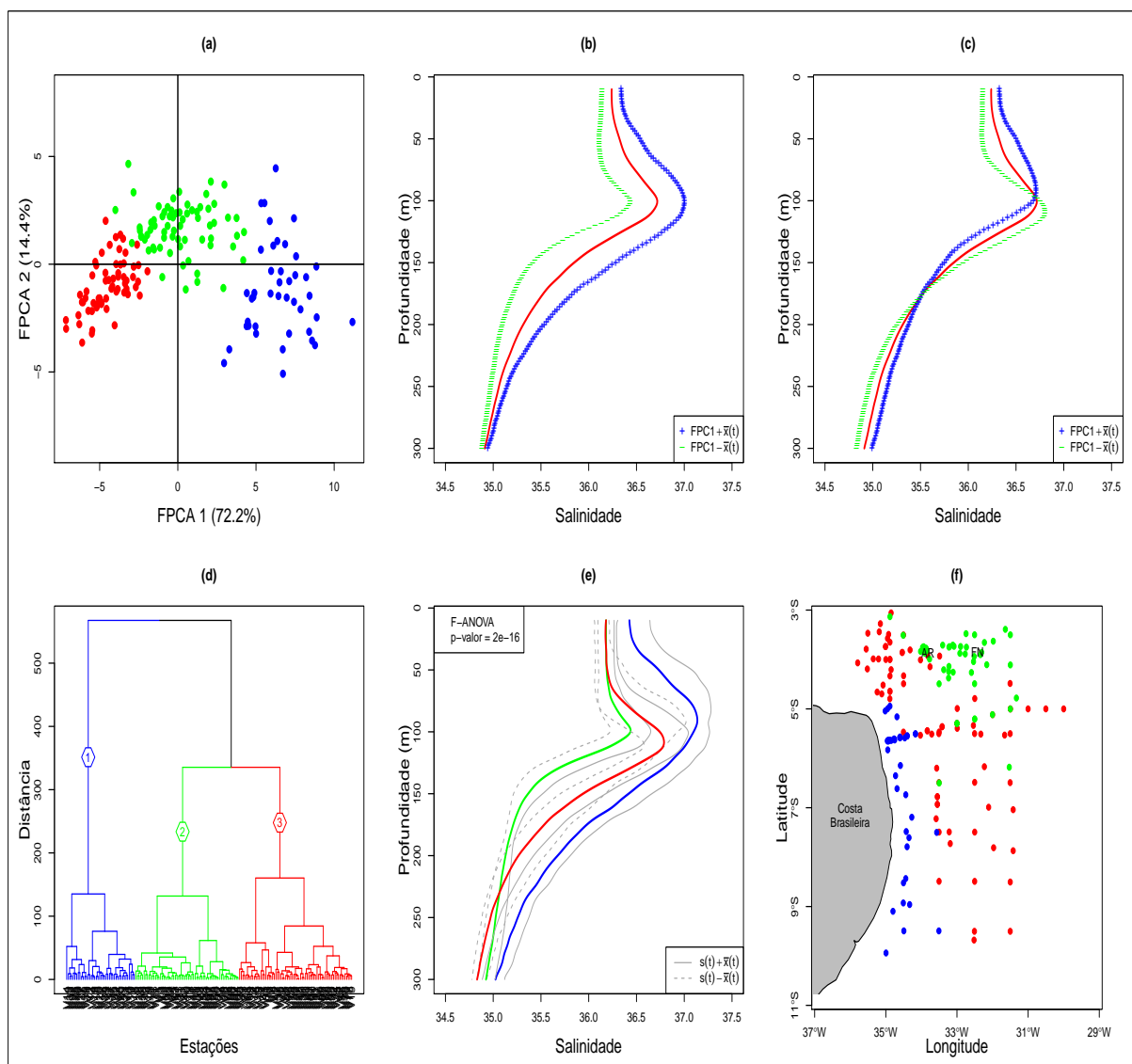


Figura 17 – Os quadros (a) é plot dos escores dos dois primeiros FPC's da variável salinidade. Os quadros (b) é a soma (+) e a subtração (-) do primeiro FPC ao perfil médio de salinidade. O quadro (c) é a soma (+) e a subtração (-) do segundo FPC ao perfil médio de temperatura. O quadros (d) é o dendrogramas da salinidade. O quadro (e) representam os perfis médios de salinidade para cada região. O quadros (f) é a representações espacial das regiões referente ao cruzeiro ABRACOS 1 + WOA.

A região próxima a quebra da plataforma, apresentou no período do ABRACOS 1 a salinidade média da camada superficial (10 m) da água do mar foi de 36.45 ± 0.17 , mínima de 36.26 e máxima de 36.80. Enquanto que, nos anos anteriores estudados pelos cruzeiros do WOA obteve-se uma salinidade mínimo de 35.97, máxima de 37.04 e média de 36.42 ± 0.23 , e quando analisadas as duas fontes de dados juntas, obteve-se uma salinidade mínimo de 35.97, máxima de 37.04, e média de 36.43 ± 0.21 . Logo, existe uma

pequena variação da salinidade superficial nesta região. Em 100 metros de profundidade, o cruzeiro do ABRACOS 1 obteve uma salinidade média de 37.09 ± 0.12 , e amplitude de 0.36, enquanto que, no WOA obteve-se uma amplitude de 0.96 e média de 37.10 ± 0.19 , e quando analisadas as duas fontes de dados juntas, obteve-se uma salinidade média de 37.10 ± 0.17 com amplitude de 0.96. Já em 200 metros de profundidade, o cruzeiro ABRACOS 1, obteve-se uma salinidade média de 35.70 ± 0.11 , enquanto o WOA, obteve 35.67 ± 0.14 e ABRACOS + WOA 35.67 ± 0.13 , com uma amplitude de 0.35, 0.65, 0.65 para os cruzeiros do ABRACOS 1, WOA e ABRACOS 1 + WOA, respectivamente. Mais detalhes podem ser encontrados na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores médios e Desvio Padrão, mínimos e máximos de salinidade na região próximo a quebra da plataforma, para o ABRACOS 1, WOA e ABRACOS + WOA

Profundidade	ABRACOS 1				WOA				ABRACOS 1 + WOA			
	Média	DP	Mín	Máx	Média	DP	Mín	Máx	Média	DP	Mín	Máx
10m	36.45	0.17	36.26	36.80	36.42	0.23	35.97	37.04	36.43	0.21	35.97	37.04
50m	36.70	0.31	36.36	37.17	36.75	0.36	36.16	37.35	36.74	0.34	36.16	37.35
100m	37.09	0.12	36.85	37.21	37.10	0.19	36.44	37.40	37.10	0.17	36.44	37.40
150m	36.38	0.14	36.12	36.57	36.43	0.27	35.90	36.80	36.42	0.25	35.90	36.80
200m	35.70	0.11	35.49	35.84	35.67	0.14	35.44	36.09	35.67	0.13	35.44	36.09
250m	35.33	0.07	35.22	35.45	35.23	0.12	34.98	35.52	35.26	0.12	34.98	35.52
300m	35.08	0.06	34.99	35.15	35.01	0.10	34.83	35.22	35.02	0.09	34.83	35.22

A região das oceânica ao redor das ilhas de Fernando de Noronha e Atol das Rocas, além da região dos montes submarinos referente ao cruzeiro do ABRACOS 1. Foi observado em 10 metros de profundidade uma salinidade média de 36.23 ± 0.02 , mínima de 36.18 e máxima de 36.26. Enquanto que, nos cruzeiros do WOA obteve-se uma salinidade mínima de 35.84, máxima de 36.53 e média de 36.17 ± 0.12 . Já para o ABRACOS 1 + WOA tem-se uma salinidade média 36.18 ± 0.09 , mínima de 35.91 e máxima de 36.32, mostrando que existe pouca variação superficial nesta região das oceânica ao redor das ilhas. Em 100 m de profundidade, a salinidade média referente aos dados do ABRACOS 1 foi de 36.60 ± 0.20 , uma amplitude de 0.77. Nos cruzeiros WOA, a salinidade média observada foi de aproximadamente 36.43 ± 0.22 , com amplitude igual a 0.97, quando analisadas as duas fontes de dados juntas obteve-se uma salinidade média de 36.44 ± 0.21 , e uma amplitude de 0.77. Já em 200 m de profundidade, a salinidade média referente aos dados do ABRACOS 1 foi de 35.18 ± 0.05 . Por sua vez, o WOA apresentou um salinidade média de 35.12 ± 0.09 e ABRACOS + WOA 35.13 ± 0.06 , com uma amplitude de 0.16, 0.59 e 0.31 para os cruzeiros do ABRACOS 1, WOA e ABRACOS 1 + WOA, respectivamente. Mostrando que nesta profundidade existe pouca variabilidade nesta profundidade para a região das oceânica ao redor das ilhas. Mais detalhes podem ser encontrados na Tabela 5.

Tabela 5 – Valores médios e Desvio Padrão, mínimos e máximos de salinidade na região oceânica ao redor das ilhas, para o ABRACOS 1, WOA e ABRACOS + WOA

Profundidade	ABRACOS 1				WOA				ABRACOS 1 + WOA			
	Média	DP	Mín	Máx	Média	DP	Mín	Máx	Média	DP	Mín	Máx
10 m	36.23	0.02	36.18	36.26	36.17	0.12	35.84	36.53	36.18	0.09	35.91	36.32
50 m	36.23	0.02	36.18	36.27	36.17	0.11	35.84	36.35	36.19	0.08	35.91	36.35
100 m	36.60	0.20	36.11	36.88	36.43	0.22	36.11	37.08	36.44	0.21	36.11	36.88
150 m	35.35	0.11	35.20	35.63	35.46	0.22	35.19	35.86	35.37	0.15	35.19	35.72
200 m	35.18	0.05	35.11	35.27	35.12	0.09	34.94	35.53	35.13	0.06	34.96	35.27
250 m	35.08	0.08	34.93	35.20	34.99	0.11	34.77	35.18	35.03	0.10	34.81	35.20
300 m	34.98	0.07	34.84	35.08	34.88	0.09	34.72	35.06	34.92	0.09	34.72	35.08

os cruzeiros do WOA Por outro lado, nos cruzeiros do WOA obteve-se um mínimo de 35.91 , máximo de 36.56 e média de 36.18 ± 0.10 . Já no ABRACOS 1 + WOA, a salinidade média observada na camada superficial (10 m) da água do mar foi de 36.18 ± 0.12 , mínimo de 35.84 e máximo de 36.56 , mostrando que existe pouca variação na camada superficial da região oceânica. Na profundidade de 100 metros, o cruzeiro do WOA, obteve uma salinidade média de 35.83 ± 0.27 . Em 200 metros de profundidade a salinidade média referente aos dados do ABRACOS + WOA foi de 35.26 ± 0.16 . Em 300 metros de profundidade a salinidade média referente aos dados do ABRACOS + WOA foi de 34.83 ± 0.05 , mostrando que existe pouca variabilidade nesta profundidade para a região oceânica. Mais detalhes podem ser encontrados na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores médios e Desvio Padrão, mínimos e máximos da salinidade na região oceânica, para o WOA e ABRACOS + WOA.

Profundidade	WOA				ABRACOS + WOA			
	Média	DP	Mín	Máx	Média	DP	Mín	Máx
10m	36.18	0.10	35.91	36.56	36.18	0.12	35.84	36.56
50m	36.21	0.12	35.91	36.56	36.19	0.13	35.84	36.56
100m	36.83	0.27	36.13	37.32	36.74	0.30	36.13	37.32
150m	36.03	0.20	35.59	36.60	35.94	0.24	35.40	36.60
200m	35.31	0.15	35.08	35.71	35.26	0.16	34.94	35.71
250m	34.98	0.08	34.78	35.20	34.97	0.09	34.77	35.20
300m	34.83	0.06	34.70	34.99	34.83	0.05	34.70	34.99

A zona de máximo de salinidade, com média de 37.5 foi observada entre (70 a 100m) de profundidade, que ocorre devido à evaporação, fazendo com que a água superficial fique mais densa e afunde, no entanto, por continuar aquecida essa água é menos densa que a água das camadas mais profundas. Estando o nível da haloclina muito próximo ao da borda da plataforma, esta seria possivelmente uma das áreas mais propícias a ressurgência de borda de plataforma (FREITAS, 2003). A salinidade mais elevada foi na região próximo a quebra da plataforma, apresentando uma relação direta com a temperatura, cujo aumento resulta em aumento da taxa de evaporação, aumentando a concentração de sais dissolvidos. (FREITAS, 2003; PEDROSA et al., 2006; BECKER et al., 2001; PAULO, 2016) também encontraram esse máximo de salinidade a uma profundidade próxima ao início da haloclina, semelhante ao encontrado nesta dissertação.

5.2.2 Representação em 3D da Salinidade

O modelo do semivariograma espacial da variável salinidade para a área estudada está exposto na Figura 18. O modelo variográfico que melhor se ajustou foi o modelo esférico (linha azul). Os parâmetros para criar o modelo ajustado foram: distância (h) = 4, Patamar (C) = 58.99, alcance (a) = 3.25, efeito pepita (C_0) = 7.37.

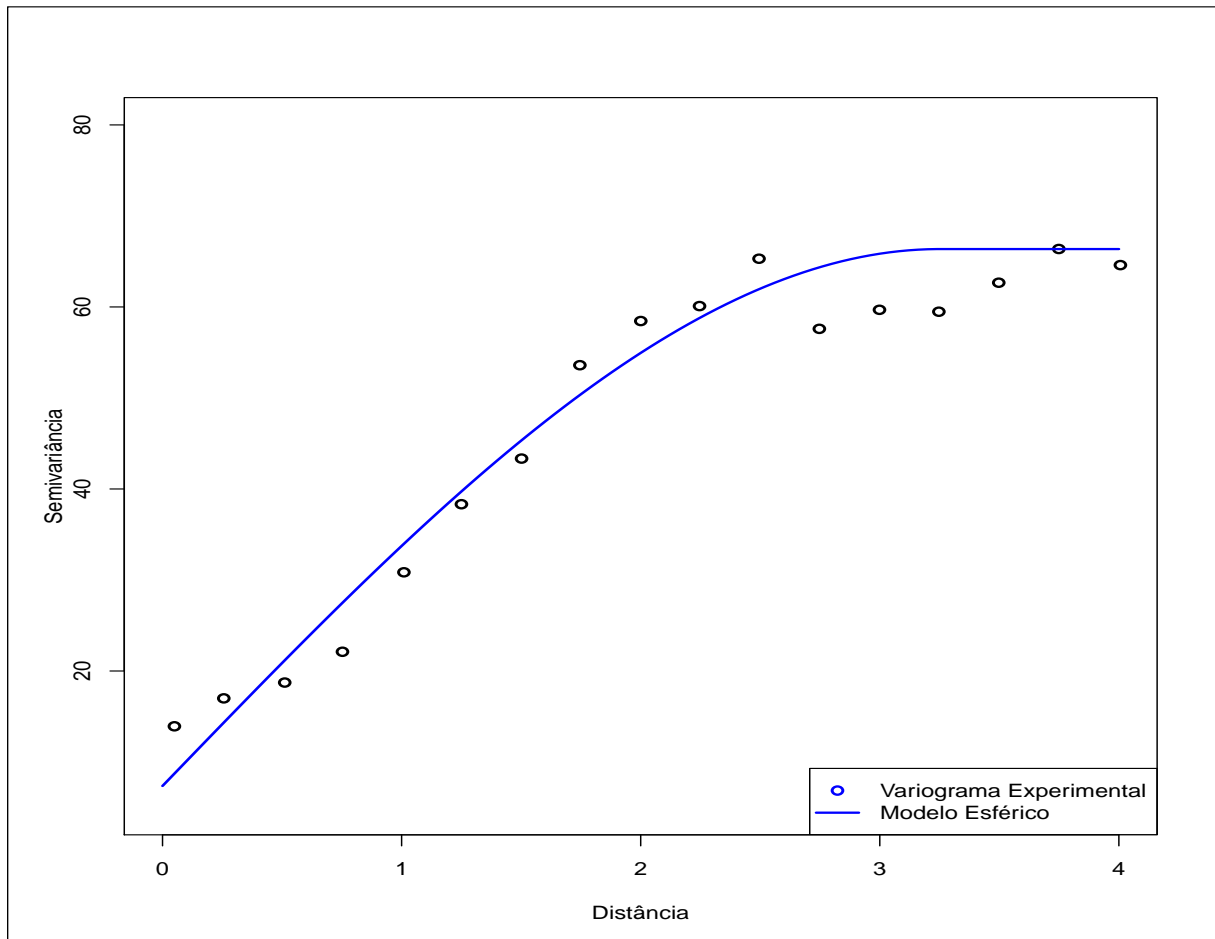


Figura 18 – Ajuste do Semivariograma Empírico para Krigagem Ordinária Funcional da variável Salinidade.

Após a realização da Krigagem funcional, fez-se a validação do modelo esférico. A comparação entre o perfil observado e ajustado pode ser observada na Figura 19 para diferentes regiões na área de estudo. Os erros quadráticos médios para os quatro perfis utilizados aqui como exemplo, foram de 0.0042, 0.0034, 0.0175 e 0.0004 para as oceânica ao redor das ilhas, região próximo a quebra da plataforma mais ao norte, região próximo a quebra da plataforma mais ao sul e região oceânica, respectivamente. Como os resultados dos erros quadráticos médios são baixos pode-se concluir que o modelo utilizado se ajusta bem aos dados.

Em 10 metros de profundidade, salinidade média foi estimada em 36.25 e desvio padrão de 0.2, variando entre 35.87 e 37.04 (Figura 20 (a)). Em 100 metros de profundidade,

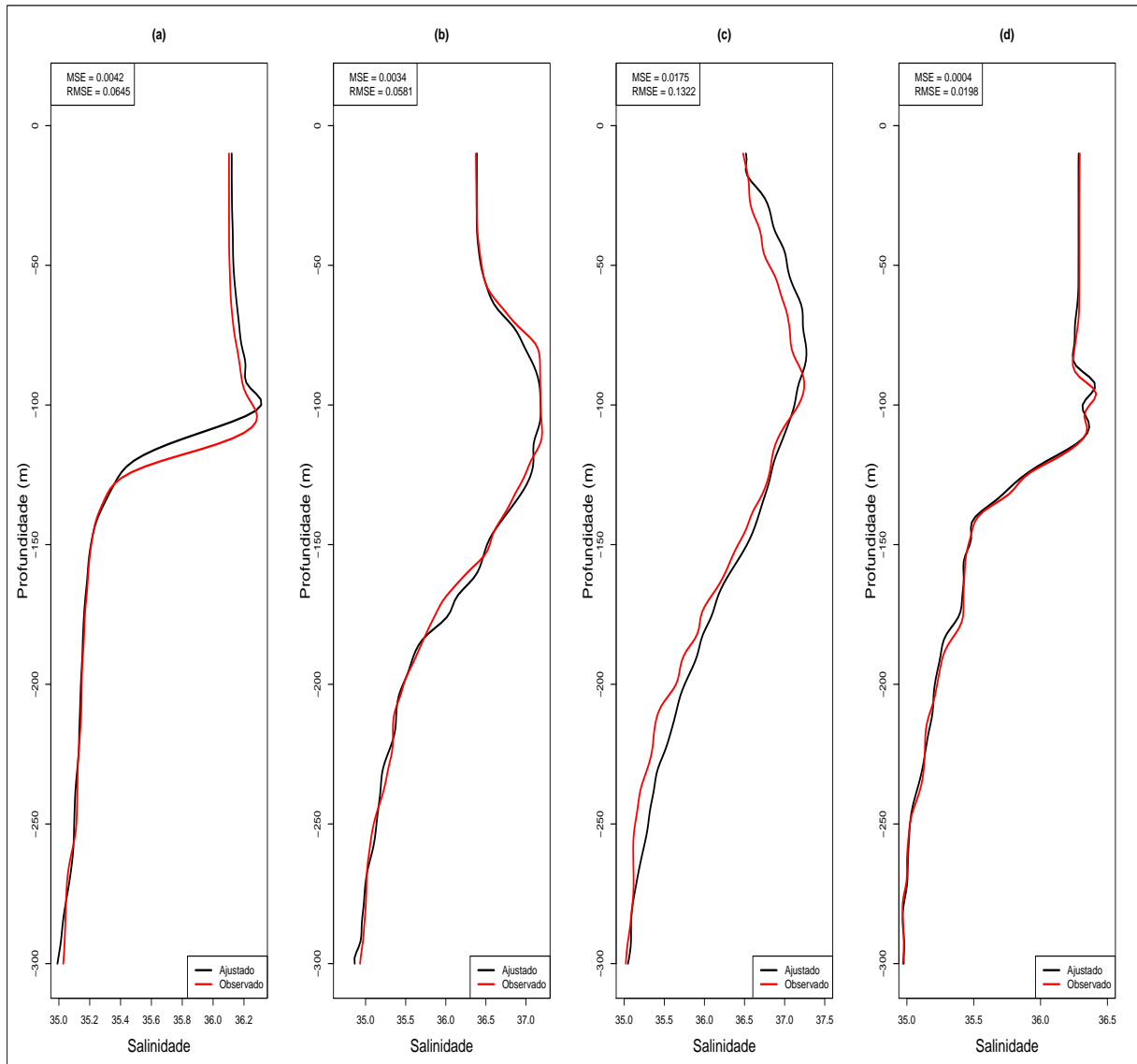


Figura 19 – Comparação do modelo ajustado (linha preto) e observado (linha vermelho) de perfil de salinidade nas regiões: das oceânica ao redor das ilhas ($32^{\circ}46'W$, $3^{\circ}52'S$) (a), na região próximo a quebra da plataforma mais ao norte ($34^{\circ}53'W$, $4^{\circ}56'S$) (b), na região próximo a quebra da plataforma mais ao sul ($34^{\circ}36'W$, $5^{\circ}34'S$) (c) e na região oceânica ($33^{\circ}00'W$, $5^{\circ}17'S$).

a salinidade média foi de 36.76 , com desvio padrão de 0.3 (Figura 20 (b)). Já em 150 metros de profundidade, obteve-se uma salinidade média de 35.96 com desvio padrão de 0.4 (Figura 20 (c)). Em 200 metros de profundidade, a salinidade média foi de 35.40 e variou entre 34.95 e 36.07 , com amplitude de 1.12 (Figura 20 (d)), e no gradiente de 250 metros a salinidade média observada foi de 35.07 , com desvio padrão 0.2 (Figura 20 (e)). Por fim, na profundidade, de 300 metros a salinidade média foi de 34.91 com desvio padrão de 0.13 e a mínima foi registrado em 34.7 na região oceânica e a máxima de 35.19 na região próximo a quebra da plataforma (Figura 20 (f)). Comparando as áreas estudadas, a região próximo a quebra da plataforma apresentou as salinidades mais elevadas. Ao longo da coluna d'água, apenas na camada superficial a salinidade média foi homogênea

em toda região estudada. A partir do início da haloclina a região próximo a quebra da plataforma foi a que obteve maiores salinidades.

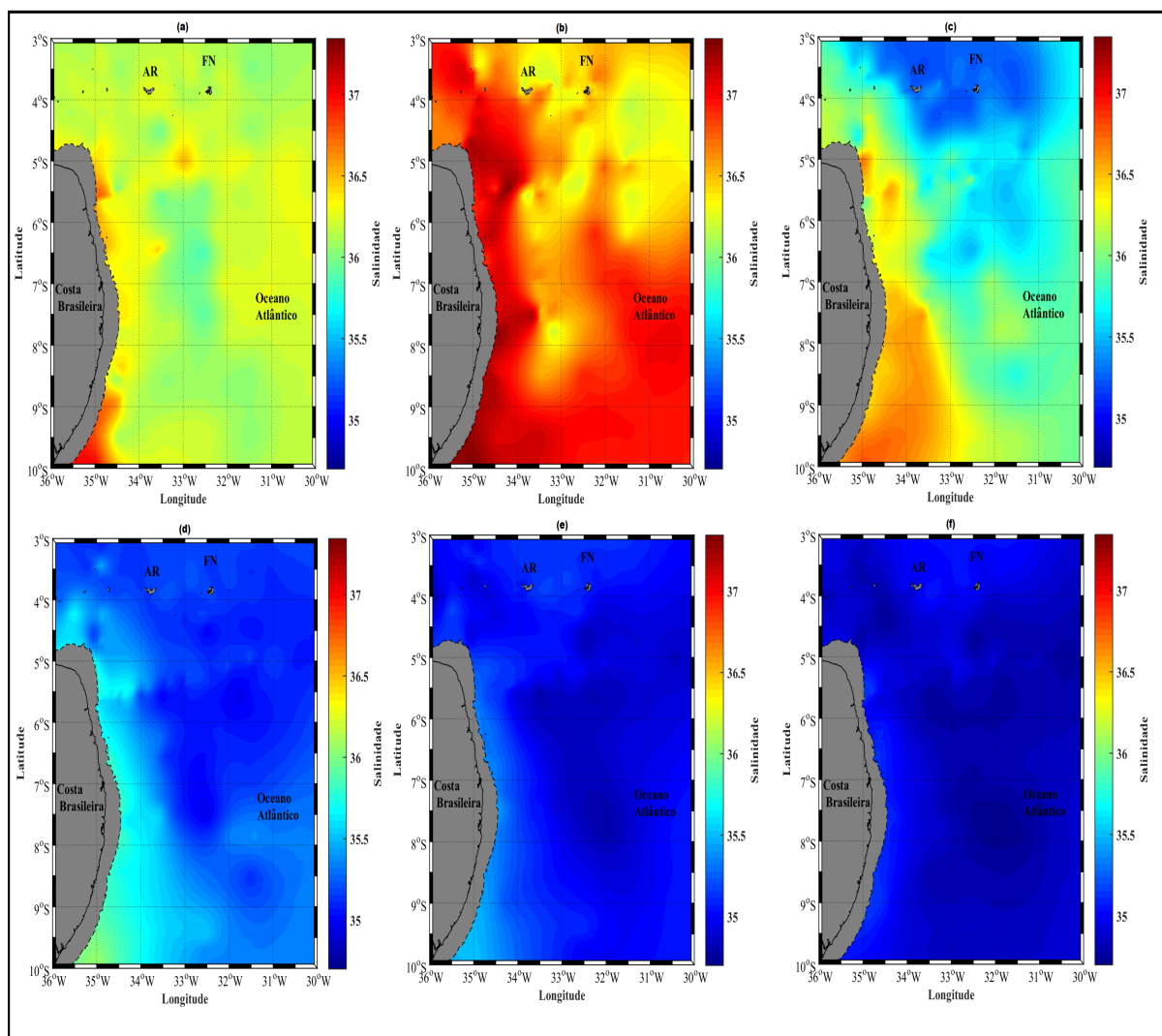


Figura 20 – Krigagem Funcional para a variável salinidade em seis níveis de profundidade: (a) 10 metros, (b) 100 metros, (c) 150 metros, (d) 200 metros, (e) 250 metros e (f) 300 metros

No transecto da região oceânica (Figura 21), tem-se os cortes vertical de salinidade nos primeiros 300 metros de profundidade do Oceano Atlântico, durante o período do verão. Percebe-se nos dois transectos que a profundidade da haloclina tende a aumentar quando próxima da região próximo a quebra da plataforma atingindo o máximo de salinidade em cerca de 100 m. Da mesma maneira a profundidade da haloclina aumenta do sul até o norte. Porém, esses padrões apresentam variações de processos de meso-escala (aproximadamente 100 km). Por outro lado a espessura da haloclina também tende a aumentar. A camada da haloclina tem alta estabilidade, separa camadas de superfície e do fundo.

Na região entre as latitudes 8° e 10°S (Figura 21, transecto B), onde foram registradas profundidades de início da haloclina mais rasas e semelhantes, ocorre a presença

de montes submarinos e platô de Pernambuco, possivelmente realizando uma elevação de massas d'água (ZEMBRUSKI; CHAVES, 1979). Sugere-se que a deformação da haloclina esteja associada a um salto interno hidráulico que resulta em ressurgência orográfica (SCHOTT et al., 2005). No entanto, em regiões mais ao norte, não ocorre a presença de montes e platô, o que resultou no início da haloclina mais profunda, devido ao resfriamento da superfície. Segundo Stramma e England (1999) e Freitas (2003), em regiões de talude pode ocorrer ressurgência orográfica, esse fenômeno também pode vir a ocorrer em áreas de divergência de correntes. Lefevre et al. (2014), observaram que há uma relação entre a latitude e a profundidade do início da haloclina.

Na região mais próxima do declive continental, é topograficamente induzida pela mistura de bordas, furos de pulos hidráulicos e ondas internas (APEL et al., 1975; HOWELL; BROWN, 1985; LIU, 1993). A transição da dinâmica da costa oceânica é evidenciada através da costa brasileira, onde se observou que uma haloclina horizontal estreita do mar aberto aumentava significativamente ao aproximar-se da quebra de plataforma (Figura 21, transecto C e D). A estratificação variando em profundidade significa que eles agora seguem caminhos curvos e perdem sua coerência após um pequeno número de reflexões a partir do fundo, onde a existe uma dispersão da topografia (GERKEMA, 2001; LAMB, 2014; NAVROTSKY et al., 2004).

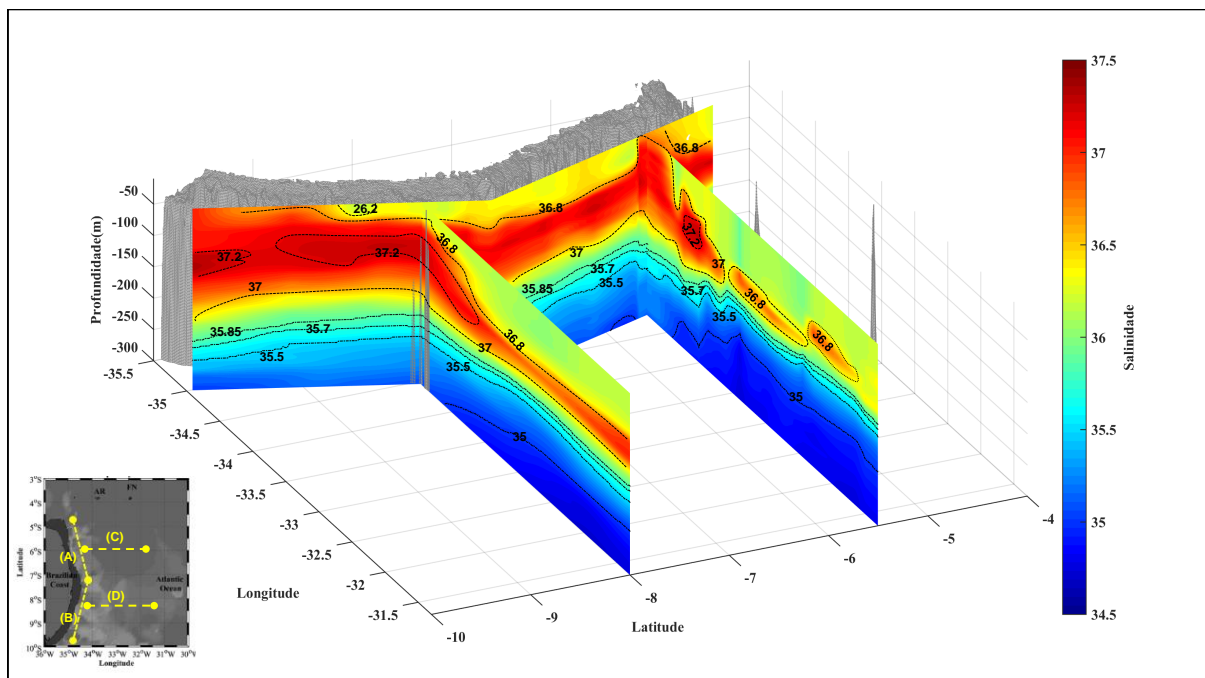


Figura 21 – Sessões verticais de salinidade ao longo da região próxima a quebra da plataforma e oceânica adjacente. As sessões verticais possuem as seguintes coordenadas: (A) ($35^{\circ}00'W$, $4^{\circ}42'S$ a $34^{\circ}18'W$, $7^{\circ}24'S$), (B) ($34^{\circ}18'W$, $7^{\circ}24'S$ a $34^{\circ}59'W$, $9^{\circ}56'S$), (C) ($34^{\circ}48'W$, $5^{\circ}30'S$ a $31^{\circ}18'W$, $5^{\circ}30'S$) e (D) ($34^{\circ}27'W$, $8^{\circ}00'S$ a $31^{\circ}18'W$, $8^{\circ}18'S$).

O transecto da região oceânica ao redor das ilhas pode mostrar os perfis da distribuição vertical da salinidade (Figura 22), observou-se que antes da ilha de Fernando de Noronha o gradiente da haloclina é bem fino e com pouca variação, e após, o gradiente começa a ficar mais largo e com alta variação quando se torna próximo a região próxima a quebra da plataforma, mostrando assim um efeito ilha na salinidade da água.

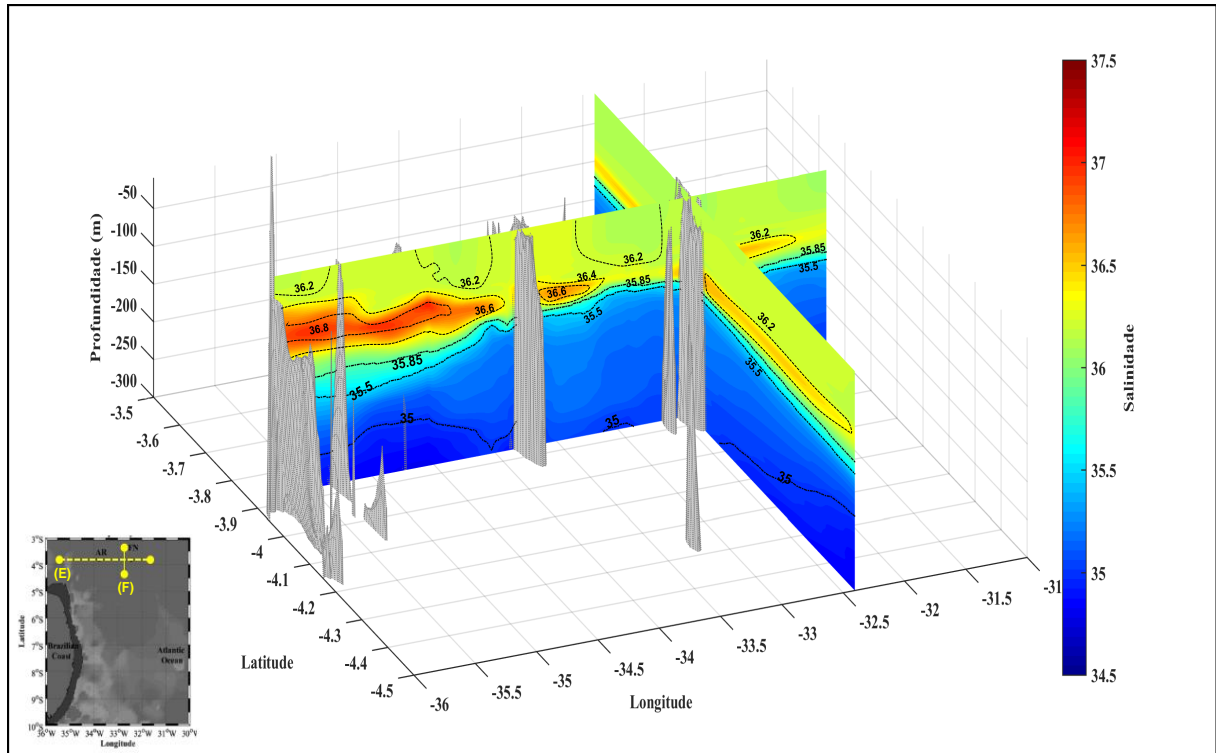


Figura 22 – Sessões verticais de salinidade ao longo da região dos montes submarinos, Ilhas Fernando de Noronha e atol das rocas. As sessões verticais possui as seguintes coordenadas: (E) ($35^{\circ}48'W$, $3^{\circ}52'S$ a $31^{\circ}18'W$, $3^{\circ}52'S$), (F) ($32^{\circ}24'W$, $3^{\circ}30'S$ a $32^{\circ}24'W$, $4^{\circ}30'S$).

5.3 Oxigênio Dissolvido ($ml.l^{-1}$)

Com base na validação cruzada a quantidade ótima de funções bases para a variável oxigênio dissolvido foi de 100 B-splines e o parâmetro de suavização $\lambda = 0.5$. O resultado da suavização pode ser visto na Figura (23a, b, c), onde é apresentado um exemplo de suavização para cada região: próximo a quebra da plataforma, oceânica ao redor das ilhas e oceânica, respectivamente.

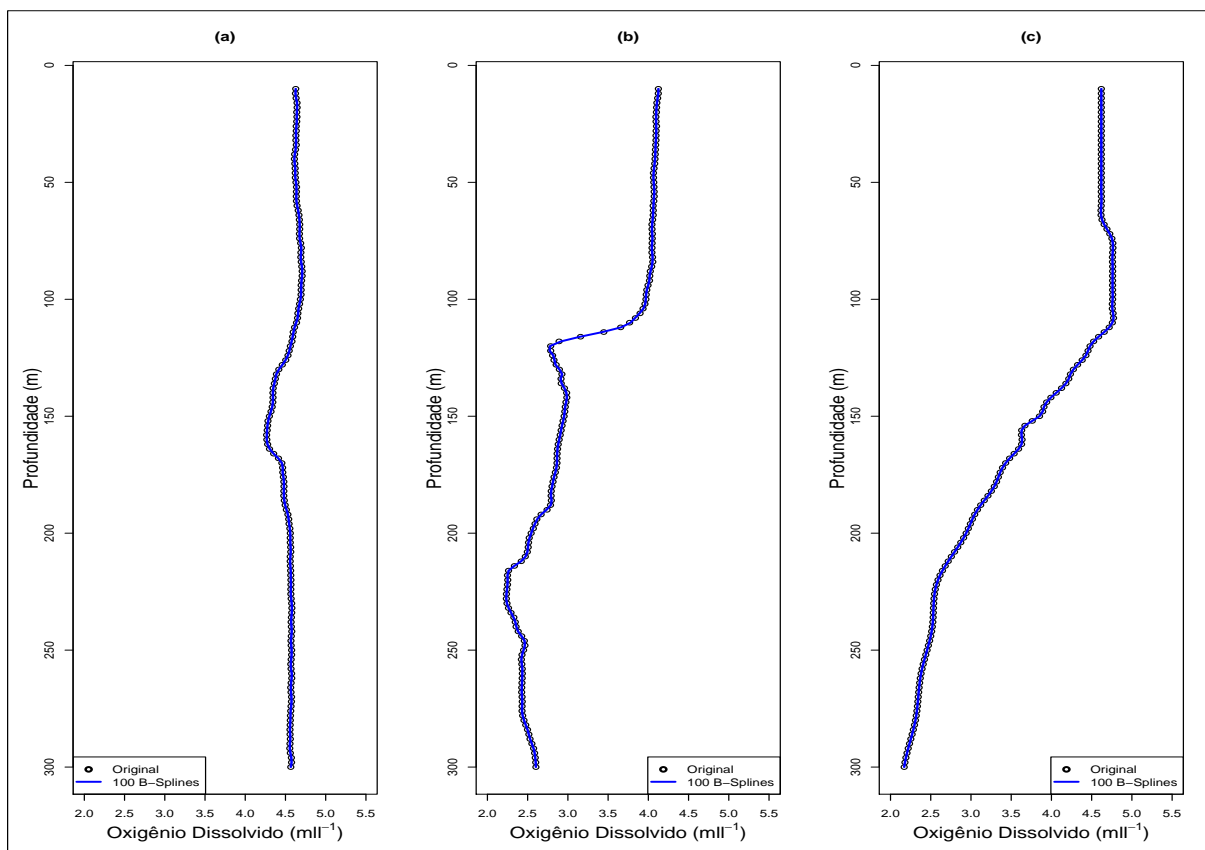


Figura 23 – Projeção de perfis de oxigênio dissolvido em uma base B-spline de 100 funções: (a) região próximo a quebra da plataforma, (b) região oceânica ao redor das ilhas e (c) região oceânica.

5.3.1 Classificação do Oxigênio Dissolvido ($ml.l^{-1}$)

Os dois primeiros componentes principais funcionais retiveram um total de 94.0% da variância total do oxigênio dissolvido referente aos dados do ABRACOS 1 (FCP1 = 86.0%; FCP2 = 12.7%). O primeiro plano fatorial ilustra a existência de dois grupos (Figura 24a). Percebe-se que existe uma diferença significativa na estrutura física do perfil médio de oxigênio dissolvido ao somar (+) e subtrair (-) a autofunção do primeiro componente principal funcional (Figura 24b), de tal modo que ao somar o primeiro componente ao perfil médio do oxigênio dissolvido a estrutura física tende a representar a região próximo a quebra da plataforma com uma variação da oxiclina mais suave. Por outro lado, ao

subtrair, passa a representar a região oceânica ao redor das ilhas de FN e AR com uma variação da oxiclina mais definida. Quando somado o valor do FPC2 com o perfil médio (Figura 24c), o oxigênio dissolvido aumenta no início da oxiclina e diminui no final da mesma, tendo um efeito contrário quando subtrai o valor da FPC2 com o perfil médio. Por outro lado, os dois FPC's referentes aos dados do WOA retiveram um total de 90.3% da variância total do oxigênio dissolvido (FCP1 = 77.6%; FCP2 = 21.0 %). O primeiro plano fatorial mostra a existência de dois grupos (Figura 24 (g)). Percebe-se que existe uma diferença significativa na estrutura física do perfil médio de oxigênio dissolvido ao somar (+) e subtrair (-) a autofunção do primeiro componente principal funcional (Figura 24 (h)), de tal modo que ao somar o primeiro componente ao perfil médio do oxigênio dissolvido a estrutura física tende a representar a região próximo a quebra da plataforma com uma variação da oxiclina mais suave. Por outro lado, ao subtrair, passa a representar a região oceânica ao redor das ilhas de FN e AR com uma variação da oxiclina mais definida. Somado o valor do FPC2 com o perfil médio, o oxigênio dissolvido aumenta no início da oxiclina e diminui no final da mesma, tendo um efeito contrário quando subtrai o valor da FPC2 com o perfil médio (Figura 24 (i)).

Através da aplicação do agrupamento e assumindo a natureza funcional dos dados, a estrutura física do Oceano Atlântico Sul pode ser caracterizada numa escala vertical de 10 a 300 m de profundidade e classificada em três regiões distintas: próximo a quebra da plataforma, ilha e oceânica (p-valor = 0.00) (Figura 24 (d), (j), (f), (m)). Este é um resultado verdadeiramente notável porque demonstra objetivamente que cada região tem uma determinada tendência de estratificação vertical específica. A primeira região localizada próxima à costa brasileira, representada pela cor azul, apresenta homogeneidade na concentração de oxigênio dissolvido em toda coluna d'água, com pouca variação até os 120 metros de profundidade (Figura 24 (e), (l)). A segunda região, localizada próxima das ilhas de FN, AR e os bancos submarinos, representada pela cor verde, revelou-se ser a principal região no Oceano Atlântico Sul. Destaca-se pela dinâmica atual da Corrente Sul Equatorial afetada pela presença das ilhas Fernando de Noronha e Atol das Rocas (PETERSON; STRAMMA, 1991). Os dois grupos da região oceânica ao redor das ilhas referente aos dados do ABRACOS 1, possuem concentração em oxigênio dissolvido homogênea ($\approx 4.91 \text{ ml.l}^{-1}$ na parte norte das ilhas e $\approx 4.54 \text{ ml.l}^{-1}$ na parte sul) da superfície até $\approx 90 \text{ m}$. A partir dessa profundidade se observa uma oxiclina que esta mais profunda no norte das ilhas (com concentração diminuindo até $\approx 2.5 \text{ ml.l}^{-1}$) que na parte sul ($[O_2] \approx 3.3 \text{ ml.l}^{-1}$) (Figura 24 (e)). O grupo da região oceânica ao redor das ilhas referentes aos dados do WOA, possui concentração homogênea de $\approx 4.5 \text{ ml.l}^{-1}$ da superfície até $\approx 85 \text{ m}$. A partir dessa profundidade se observa uma oxiclina com cerca de 65 m de espessura, com concentração diminuindo até $\approx 3.33 \text{ ml.l}^{-1}$ (Figura 24 (l)). A terceira região denominada como oceânica, representada pela cor vermelha, é influenciada pelo mesmo sistema de correntes, mas com barreiras orográficas dissimilares (MAZE et al.,

2017). Possui concentração em oxigênio dissolvido homogênea ($\approx 4.7ml.l^{-1}$) da superfície até $\approx 120m$. A partir dessa profundidade se observa uma oxiclina com cerca de 120 m de espessura (com concentração diminuindo até $\approx 3.3ml.l^{-1}$) (Figura 24e, l).

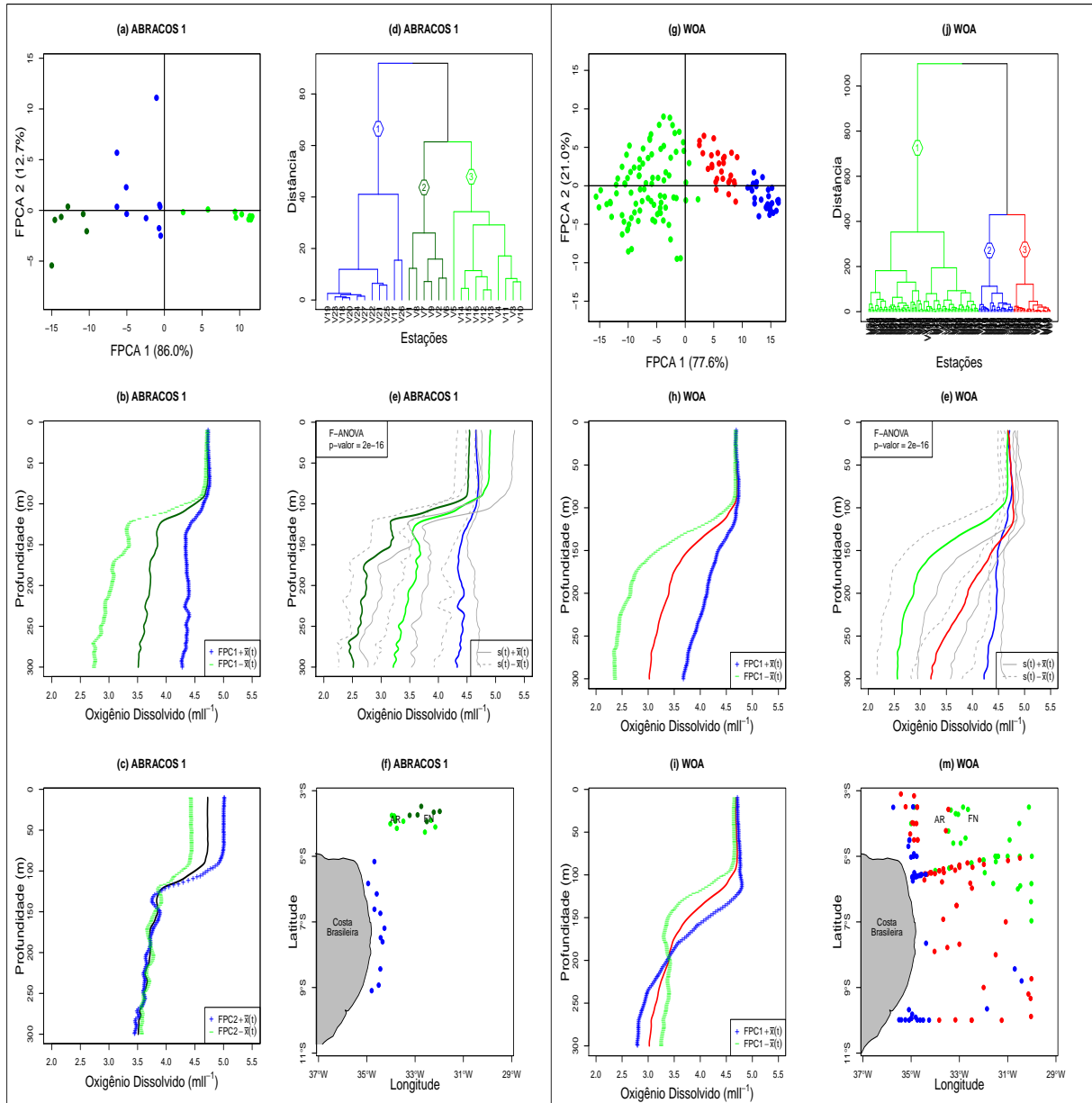


Figura 24 – Os quadros (a) e (g) são os plots dos escores dos dois primeiros FPC's da variável oxigênio dissolvido ($ml.l^{-1}$). Os quadros (b) e (h) são a soma (+) e a subtração (-) do primeiro FPC ao perfil médio de oxigênio dissolvido ($ml.l^{-1}$). Os quadros (c) e (i) são a soma (+) e a subtração (-) do segundo FPC ao perfil médio de oxigênio dissolvido ($ml.l^{-1}$) referente ao período do ABRACOS 1 e WOA, respectivamente. Os quadros (d) e (j) são os dendrogramas do ABRACOS 1 e WOA respectivamente. Os quadros (e) e (l) representam os perfis médios de oxigênio dissolvido ($ml.l^{-1}$) para cada região. Os quadros (f) e (m) são representações espaciais dos grupos, referente ao cruzeiro ABRACOS 1 e WOA, respectivamente.

Os resultados da ANOVA funcional mostraram que não houve diferença significativa no perfil médio de oxigênio dissolvido quando comparado os dados do ABRACOS 1 e WOA entre os níveis de profundidade (10 - 300 m) referente a região próxima a quebra da plataforma (p-valor = 0.6332) (Figura 25a). Significa, então, que estatisticamente o perfil médio de oxigênio dissolvido não sofreu alteração ao longo dos anos. De forma análoga, comparou-se o perfil médio de oxigênio dissolvido entre os dados do ABRACOS 1 e WOA referente a região oceânica ao redor das ilhas de Fernando de Noronha (FN) e Atol das Rocas (AR), em que baseado no p-valor = 0.0553, chegou-se a mesma conclusão que a região próxima a quebra da plataforma (Figura 25c), embora vários estudos indiquem que o oceano em geral está sofrendo alterações (POOLE; TOMCZAK, 1999; SILVA et al., 2008; SCHUCKMANN et al., 2009; LYMAN et al., 2010; TRENBERTH, 2010).

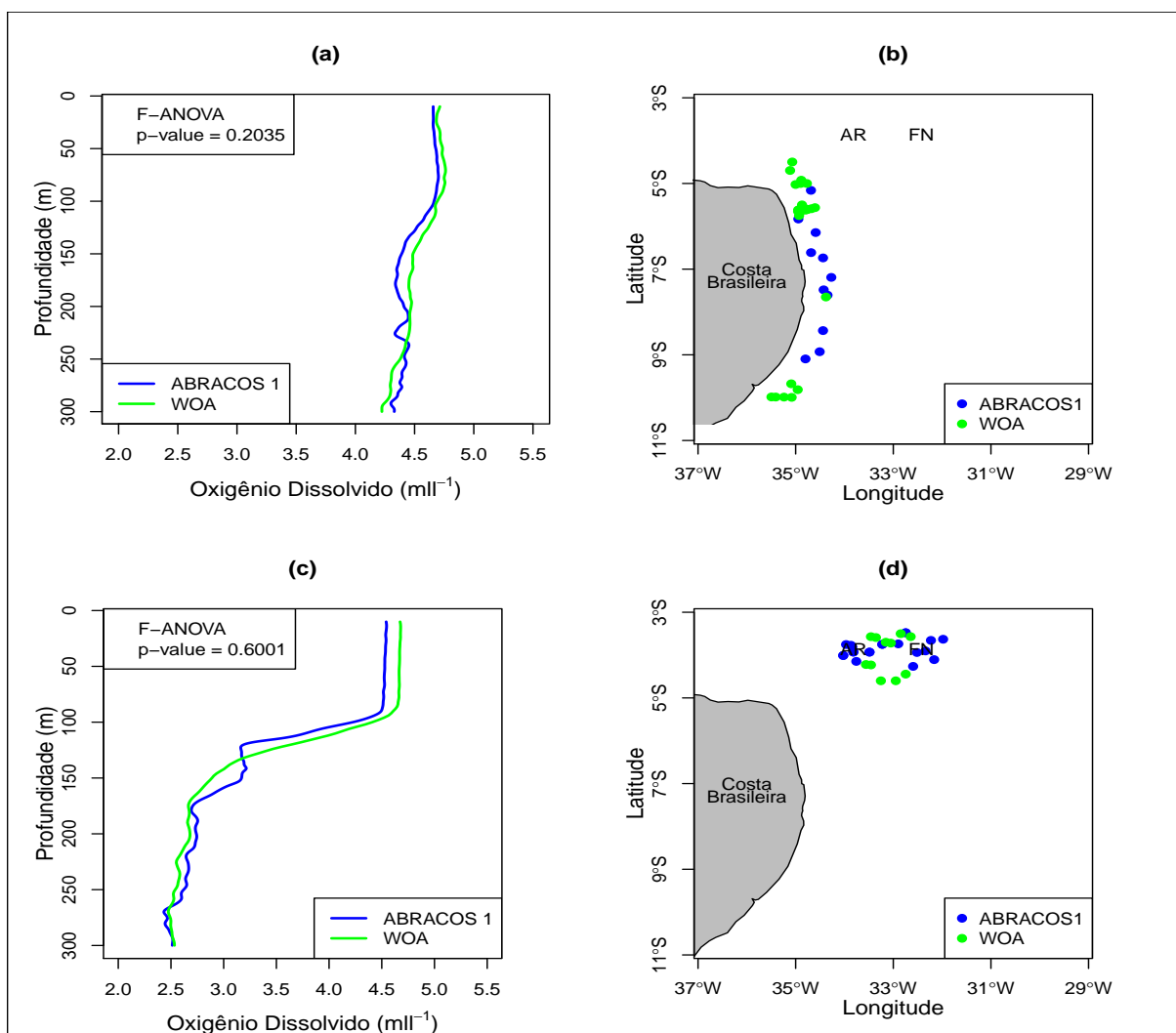


Figura 25 – O quadro (a) são perfis médios de oxigênio dissolvido ($ml.l^{-1}$) da região próxima a quebra da plataforma. O quadro (b) é a representação espacial da região próxima a quebra da plataforma. O quadro (c) são perfis médio de oxigênio dissolvido ($ml.l^{-1}$) da região oceânica ao redor das ilhas FN e AR. O quadro (d) é representação espacial da região oceânica ao redor das ilhas referente ao ABRACOS 1 e WOA, respectivamente.

Os dois primeiros componentes principais funcionais retiveram um total de 89.6% da variância total do oxigênio dissolvido referente aos dados do ABRACOS 1 + WOA (FCP1 = 77.7 %; FCP2 = 11.9%). O primeiro plano fatorial, ilustra a existência de três grupos (Figura 26 (a)). Percebe-se que existe uma diferença significativa na estrutura física do perfil médio do oxigênio dissolvido ao somar (+) e subtrair (-) a autofunção do primeiro componente principal funcional, Figura 26 (b), de tal modo que ao somar o primeiro componente ao perfil médio do oxigênio dissolvido a estrutura física tende a representar a região próxima a quebra da plataforma com uma variação da oxiclina quase inexistente. Por outro lado, ao subtrair, passa a representar a região oceânica ao redor das ilhas de FN e AR com uma variação da oxiclina bem definida. Quando somado o valor do FPC2 com o perfil médio, Figura 26 (c), o oxigênio dissolvido aumenta no início da oxiclina e diminui na região mais profunda, tendo um efeito contrário quando subtrai o valor da FPC2 com o perfil médio.

De maneira similar aos resultados anteriores, o oxigênio dissolvido referente aos dados do ABRACOS 1 + WOA, foram classificadas em três regiões distintas: próximo a quebra da plataforma, ilha e oceânica (p-valor = 0.00) (Figura 26 (a), (d), (f)). A primeira região localizada próxima à costa brasileira, representada pela cor azul, apresenta homogeneidade na concentração de oxigênio dissolvido em toda coluna d'água, com pouca variação até os 120 metros de profundidade (Figura 26 (e)).

A segunda região, localizada próxima das ilhas de FN, AR e os bancos submarinos, representada pela cor verde, destaca-se pela dinâmica atual da Corrente Sul Equatorial afetada pela presença das ilhas Fernando de Noronha e Atol das Rocas (PETERSON; STRAMMA, 1991). possui concentração em oxigênio dissolvido homogênea ($\approx 4.5 \text{ ml.l}^{-1}$) da superfície até $\approx 90 \text{ m}$. A partir dessa profundidade se observa uma oxiclina com cerca de 100 m de espessura, com concentração diminuindo até $\approx 2.7 \text{ ml.l}^{-1}$ (Figura 26 (e)).

A terceira região denominada como oceânica, representada pela cor vermelha, possui concentração em oxigênio dissolvido homogênea ($\approx 4.73 \text{ ml.l}^{-1}$) da superfície até $\approx 120 \text{ m}$. A partir dessa profundidade se observa uma oxiclina com cerca de 120 m de espessura (com concentração diminuindo até $\approx 3.27 \text{ ml.l}^{-1}$) (Figura 26 (e)).

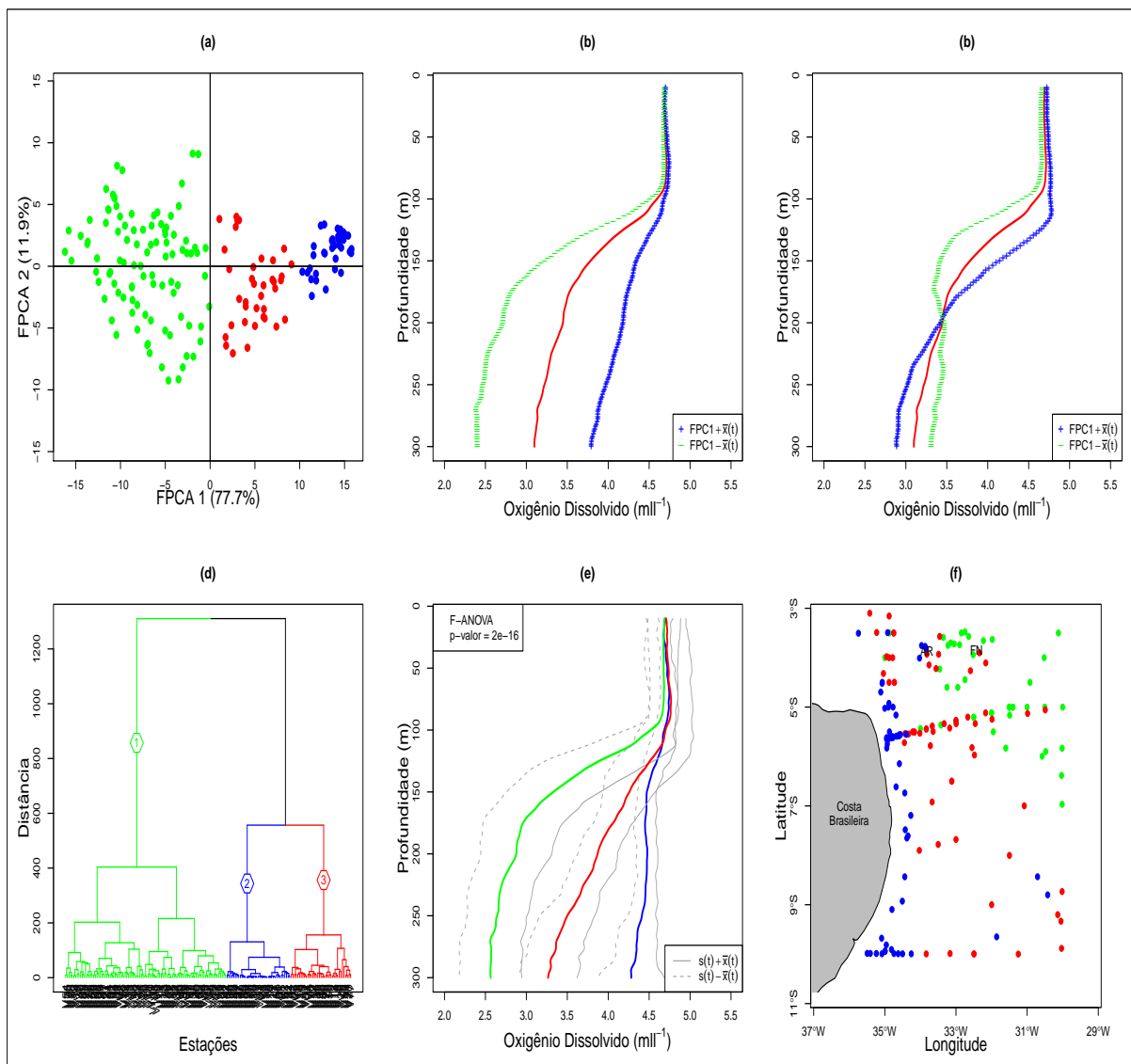


Figura 26 – O quadro (a) é o plot dos escores dos dois primeiros FPC's da variável oxigênio dissolvido ($ml.l^{-1}$). O quadro (b) é a soma (+) e a subtração (-) do primeiro FPC ao perfil médio do oxigênio dissolvido ($ml.l^{-1}$). O quadro (c) é a soma (+) e a subtração (-) do segundo FPC ao perfil médio de oxigênio dissolvido ($ml.l^{-1}$). O quadro (d) é o dendrogramas do oxigênio dissolvido ($ml.l^{-1}$). O quadro (e) representam os perfis médios de oxigênio dissolvido ($ml.l^{-1}$) para cada região. O quadro (f) é a representações espacial das regiões referente ao cruzeiro ABRACOS 1 + WOA.

A região próxima a quebra da plataforma, apresentou o oxigênio dissolvido da camada superficial (10 m) da água do mar com mínimo de $4.63 ml.l^{-1}$ e máximo de $4.68 ml.l^{-1}$, média de $4.66 ml.l^{-1} \pm 0.11 ml.l^{-1}$ no período do ABRACOS 1. Enquanto que nos anos anteriores estudados pelos cruzeiros do WOA obteve-se um mínimo de $4.55 ml.l^{-1}$, máximo de $4.55 ml.l^{-1}$ e média de $4.71 ml.l^{-1} \pm 0.10 ml.l^{-1}$, e quando analisadas as duas fontes de dados juntas observa-se um mínimo de $4.55 ml.l^{-1}$, máximo de $4.90 ml.l^{-1}$ e média de $4.70 ml.l^{-1} \pm 0.09 ml.l^{-1}$. Em 100 m profundidade, o cruzeiro do ABRACOS 1 obteve, média de $4.66 ml.l^{-1} \pm 0.01 ml.l^{-1}$. Enquanto o WOA, obteve média de 4.69

$ml.l^{-1} \pm 0,13 ml.l^{-1}$, e quando analisadas as duas fontes de dados juntas obteve-se média de $4.69 ml.l^{-1} \pm 0.12 ml.l^{-1}$. Em 200 metros de profundidade, o oxigênio dissolvido médio do cruzeiro ABRACOS 1 foi de $4.41 ml.l^{-1} \pm 0.23 ml.l^{-1}$. Enquanto o WOA foi de $4.47 ml.l^{-1} \pm 0.14 ml.l^{-1}$ e ABRACOS + WOA $4.48 ml.l^{-1} \pm 0.13 ml.l^{-1}$. Em 300 metros de profundidade, o oxigênio dissolvido médio do cruzeiro ABRACOS 1 foi de $4.33 ml.l^{-1} \pm 0.40 ml.l^{-1}$. Enquanto o WOA foi de $4.22 ml.l^{-1} \pm 0.42 ml.l^{-1}$ e ABRACOS + WOA $4.28 ml.l^{-1} \pm 0.40 ml.l^{-1}$. Mais detalhes podem ser encontrados na (Tabela 7).

Tabela 7 – Valores médios e Desvio Padrão, mínimos e máximos do oxigênio dissolvido na região próximo a quebra da plataforma, para o ABRACOS 1, WOA e ABRACOS + WOA

Profundidade	ABRACOS				WOA				ABRACOS + WOA			
	Média	DP	Mín	Máx	Média	DP	Mín	Máx	Média	DP	Mín	Máx
10m	4.66	0.01	4.63	4.68	4.71	0.10	4.55	4.90	4.70	0.09	4.55	4.90
50m	4.68	0.04	4.63	4.74	4.74	0.11	4.46	4.98	4.72	0.10	4.46	4.98
100m	4.66	0.05	4.58	4.74	4.69	0.13	4.48	4.97	4.69	0.12	4.48	4.97
150m	4.39	0.12	4.12	4.52	4.49	0.12	4.27	4.70	4.47	0.12	4.24	4.70
200m	4.41	0.23	3.82	4.57	4.47	0.14	3.98	4.70	4.48	0.13	3.98	4.70
250m	4.42	0.28	3.67	4.62	4.38	0.17	4.04	4.61	4.41	0.17	4.04	4.62
300m	4.33	0.40	3.45	4.60	4.22	0.42	2.63	4.61	4.28	0.40	2.63	4.61

Foram observados 2 grupos na região oceânica ao redor das ilhas de Fernando de Noronha e Atol das Rocas, referentes ao cruzeiro do ABRACOS 1 (grupo A: antes de FN e depois de AR e grupo B: entre FN e AR). Observa-se no grupo A que na camada superficial (10 m) a média foi de $4.91 ml.l^{-1} \pm 0.42 ml.l^{-1}$ e no grupo B a média foi de $4.54 ml.l^{-1} \pm 0.21 ml.l^{-1}$. Enquanto que, os cruzeiros do WOA obtiveram uma média de $4.68 ml.l^{-1} \pm 0.18 ml.l^{-1}$. Já para o ABRACOS 1 + WOA tem-se uma média de $4.68 ml.l^{-1} \pm 0.20 ml.l^{-1}$, mostrando que existe pouca variação térmica superficial nesta região oceânica ao redor das ilhas. Em 100 metros de profundidade, observa-se no grupo A uma média de $4.49 ml.l^{-1} \pm 0.49 ml.l^{-1}$ e no Grupo B, $4.23 ml.l^{-1} \pm 0.30 ml.l^{-1}$ (ABRACOS 1). Enquanto que, o WOA obteve uma média de $4.53 ml.l^{-1} \pm 0.30 ml.l^{-1}$, e quando analisadas as duas fontes de dados juntas, obteve-se uma média de $4.52 ml.l^{-1} \pm 0.30 ml.l^{-1}$. Em 200 metros de profundidade observa-se no grupo A uma média de $3.55 ml.l^{-1} \pm 0.26 ml.l^{-1}$ e no Grupo B $2.74 ml.l^{-1} \pm 0.26 ml.l^{-1}$ (ABRACOS 1). Enquanto que, o WOA obteve uma média de $2.87 ml.l^{-1} \pm 0.44 ml.l^{-1}$, e quando analisadas as duas fontes de dados juntas obteve-se uma média de $2.88 ml.l^{-1} \pm 0.43 ml.l^{-1}$. Mais detalhes podem ser encontrados na (Tabela 8).

Por não apresentar informação na região denominada oceânica, o cruzeiro do ABRACOS 1 não formou nenhum grupo. Por outro lado, os cruzeiros do WOA obtiveram um mínimo de $4.48 ml.l^{-1}$, máximo de $5.04 ml.l^{-1}$ e média de $4.68 ml.l^{-1} \pm 0.14 ml.l^{-1}$. Já no ABRACOS 1 + WOA tem-se um mínimo de $4.32 ml.l^{-1}$ e máximo de $5.89 ml.l^{-1}$, com uma média de $4.71 ml.l^{-1} \pm 0.24 ml.l^{-1}$, mostrando que existe pouca variação no gradiente de 10 metros de profundidade na região oceânica. Em 100 metros de profundidade cruzeiro do WOA obteve uma amplitude térmica de média de $4.78 ml.l^{-1} \pm 0.18 ml.l^{-1}$.

Tabela 8 – Valores médios e Desvio Padrão, mínimos e máximos do oxigênio dissolvido na região oceânica ao redor das ilhas, para o ABRACOS 1, WOA e ABRACOS + WOA

Profundidade	ABRACOS (A/B)				WOA				ABRACOS + WOA			
	Média	DP	Mín	Máx	Média	DP	Mín	Máx	Média	DP	Mín	Máx
10m	4.91/4.54	0.42/0.21	4.59/4.13	5.89/4.66	4.68	0.18	3.69	5.37	4.68	0.20	3.69	5.42
50m	4.89/4.53	0.39/0.23	4.61/4.07	5.81/4.67	4.67	0.16	3.94	5.24	4.68	0.17	4.07	5.36
100m	4.49/4.23	0.49/0.30	3.52/3.88	5.44/4.55	4.53	0.30	3.36	5.01	4.52	0.30	3.36	5.01
150m	3.66/3.17	0.18/0.36	3.42/2.55	4.03/3.54	3.34	0.59	2.24	4.68	3.33	0.57	2.24	4.68
200m	3.55/2.74	0.26/0.26	3.09/2.40	3.85/3.07	2.87	0.44	1.96	3.77	2.88	0.43	1.96	3.77
250m	3.30/2.62	0.23/0.16	2.94/2.45	3.62/2.85	2.63	0.38	1.97	3.62	2.64	0.36	1.97	3.62
300m	3.21/2.51	0.32/0.26	2.50/2.06	3.53/2.82	2.56	0.39	1.79	3.58	2.56	0.38	1.79	3.58

Quando analisou-se as duas fontes de dados juntas, obteve-se média de $4.70 \text{ ml.l}^{-1} \pm 0.33 \text{ ml.l}^{-1}$. Em 200 metros de profundidade o oxigênio dissolvido médio do cruzeiro WOA foi de $3.91 \text{ ml.l}^{-1} \pm 0.23 \text{ ml.l}^{-1}$ e ABRACOS + WOA de $3.87 \text{ ml.l}^{-1} \pm 0.24 \text{ ml.l}^{-1}$. Em 300 metros de profundidade, a oxigênio dissolvido médio do cruzeiro WOA foi de $3.20 \text{ ml.l}^{-1} \pm 0.37 \text{ ml.l}^{-1}$ e ABRACOS + WOA de $3.27 \text{ ml.l}^{-1} \pm 0.35 \text{ ml.l}^{-1}$. Mais detalhes podem ser encontrados na (Tabela ??).

Tabela 9 – Valores médios e Desvio Padrão, mínimos e máximos do oxigênio dissolvido na região oceânica, para o WOA e ABRACOS + WOA

Profundidade	WOA				ABRACOS + WOA			
	Média	DP	Mín	Máx	Média	DP	Mín	Máx
10m	4.68	0.14	4.48	5.04	4.71	0.24	4.32	5.89
50m	4.73	0.20	4.44	5.47	4.74	0.28	3.94	5.81
100m	4.78	0.18	4.48	5.26	4.70	0.33	3.52	5.44
150m	4.39	0.20	3.99	4.78	4.26	0.32	3.56	4.78
200m	3.91	0.23	3.59	4.33	3.87	0.24	3.27	4.33
250m	3.48	0.35	2.56	4.02	3.50	0.33	2.56	4.24
300m	3.20	0.37	2.27	3.95	3.27	0.35	2.27	3.95

Os valores médios de oxigênio dissolvido registrados nesta dissertação, são compatíveis com os trabalhos encontrados na literatura (PAULO, 2016; BECKER et al., 2001).

5.3.2 Representação em 3D do Oxigênio Dissolvido ($ml.l^{-1}$)

O modelo do semivariograma espacial da variável Oxigênio Dissolvido para a área estudada está exposto na Figura 27, o modelo variográfico que melhor se ajustou foi o modelo exponencial (linha azul), com parâmetros: distância (h) = 4, Patamar (C) = 245, alcance (a) = 1.35, efeito pepita (C_0) = 30.

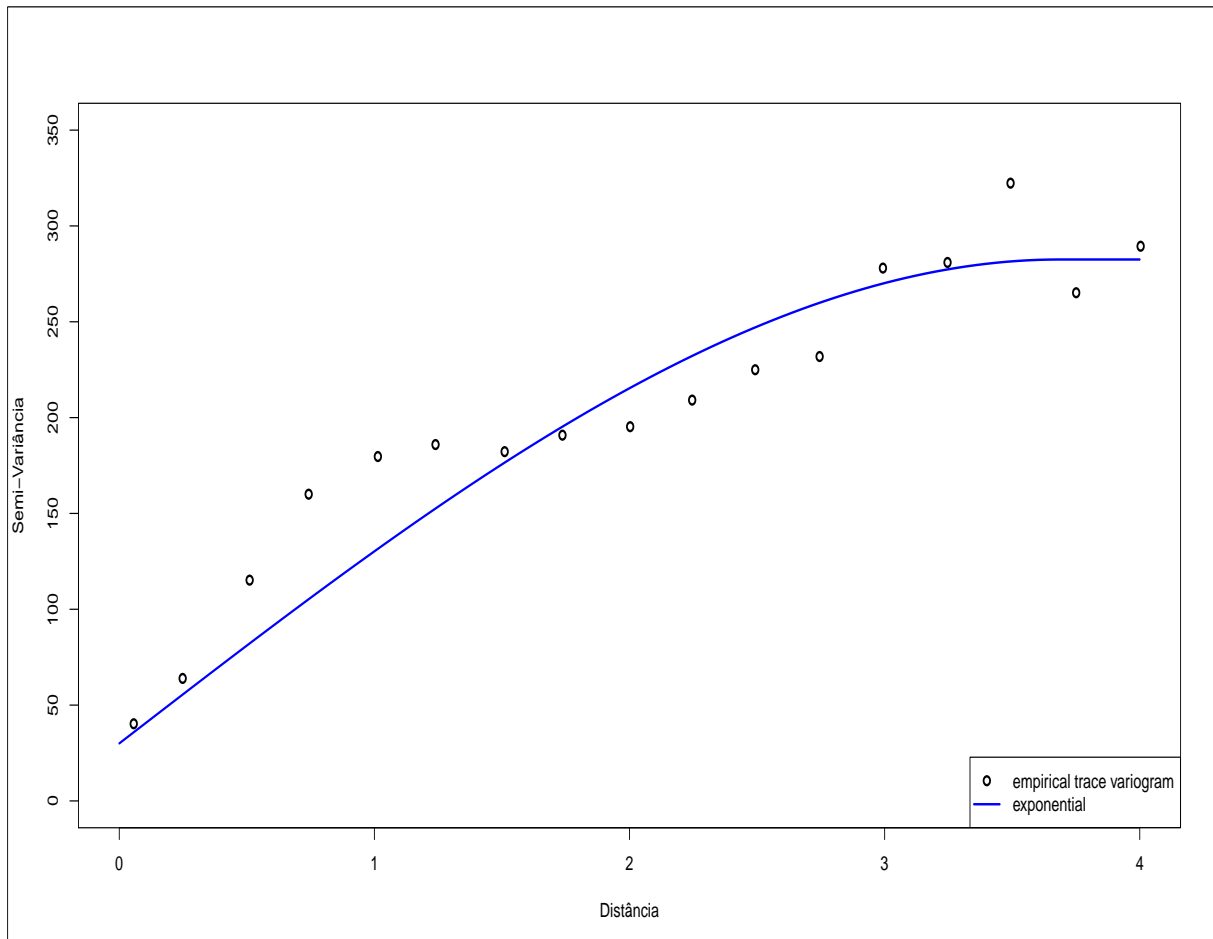


Figura 27 – Ajuste do Semivariograma Empírico para Krigagem Ordinária Funcional da variável Oxigênio Dissolvido.

Após a realização da krigagem funcional, fez-se a validação do modelo exponencial. A comparação entre o perfil observado e ajustado pode ser observada na Figura 10 para diferentes regiões na área de estudo. Os erros quadráticos médio para os quatro perfis utilizados aqui como exemplo, foram de 0.0182, 0.0015, 0.0007 e 0.0041 para a região oceânica ao redor das ilhas, região próximo a quebra da plataforma mais ao norte, região próximo a quebra da plataforma mais ao sul, região oceânica, respectivamente. Como os resultados dos erros quadráticos médios são baixos, pode-se concluir que o modelo utilizado se ajusta bem aos dados.

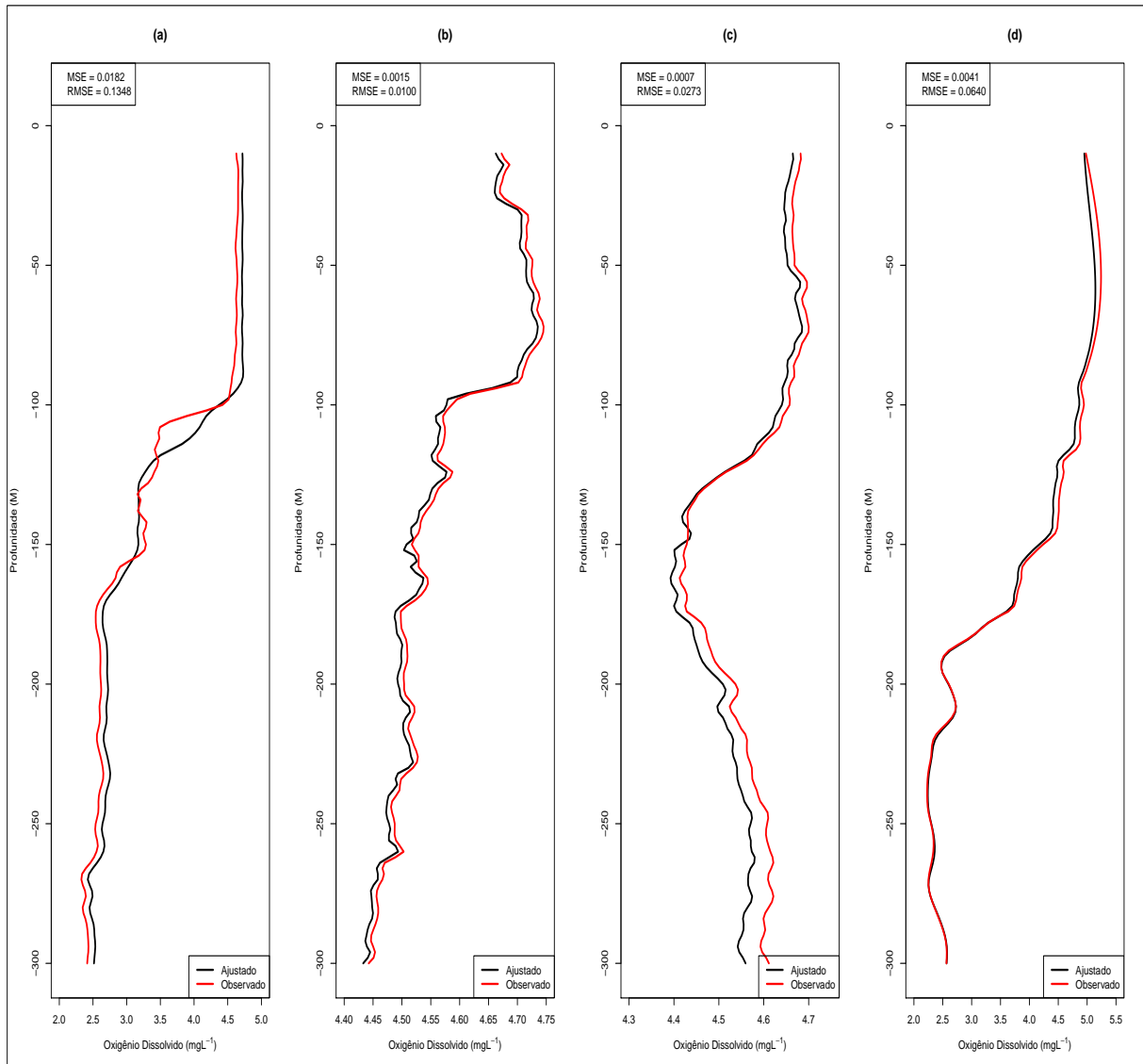


Figura 28 – Comparação do modelo ajustado (linha preta) e observado (linha vermelha) de perfil de oxigênio dissolvido nas regiões: oceânica ao redor das ilhas ($32^{\circ}46'W$, $3^{\circ}52'S$) (a), na região próximo a quebra da plataforma mais ao norte ($34^{\circ}53'W$, $4^{\circ}56'S$) (b), na região próximo a quebra da plataforma mais ao sul ($34^{\circ}36'W$, $5^{\circ}34'S$) (c) e na região oceânica ($33^{\circ}00'W$, $5^{\circ}17'S$).

Em 10 metros de profundidade, o oxigênio dissolvido obteve média de $4.62 \text{ } mll^{-1}$, com desvio padrão de $0.18 \text{ } mll^{-1}$ (Figura 29a). Em 100 metros de profundidade, o oxigênio dissolvido obteve média $3.84 \text{ } mll^{-1}$ com desvio padrão de $0.18 \text{ } mll^{-1}$ (Figura 29b). Em 150 metros de profundidade, o oxigênio dissolvido variou entre $2.39 \text{ } mll^{-1}$ e $4.74 \text{ } mll^{-1}$ com amplitude de $2.35 \text{ } mll^{-1}$, (Figura 29c). Em 200 metros de profundidade, o oxigênio dissolvido variou entre $2 \text{ } mll^{-1}$ e $4.64 \text{ } mll^{-1}$ com amplitude de $2.64 \text{ } mll^{-1}$ (Figura 29, (d)). No gradiente de 250 metros, o oxigênio dissolvido obteve uma média de $3.17 \text{ } mll^{-1}$ com desvio padrão de $0.73 \text{ } mll^{-1}$ (Figura 29e). Por fim, na profundidade de 300 metros o oxigênio dissolvido médio foi de $3.09 \text{ } mll^{-1}$ com desvio padrão de $0.74 \text{ } mll^{-1}$ e o mínimo sendo registrado na região oceânica $1.85 \text{ } mll^{-1}$ e o máximo de $4.67 \text{ } mll^{-1}$ na região próximo

a quebra da plataforma (Figura 29f).

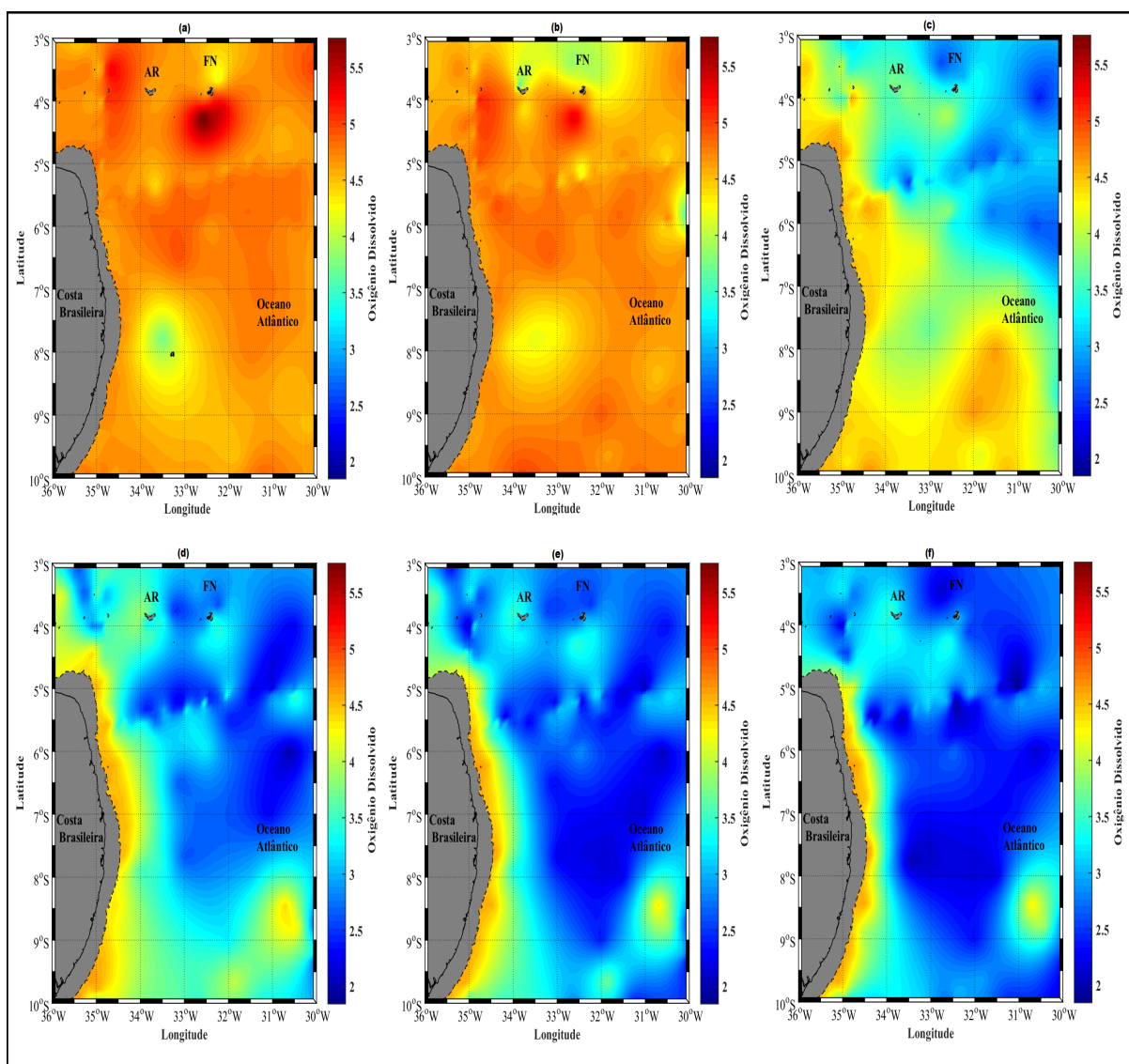


Figura 29 – Krigagem Funcional para a variável oxigênio dissolvido em seis níveis de profundidade: (a) 10 metros, (b) 100 metros, (c) 150 metros, (d) 200 metros, (e) 250 metros e (f) 300 metros

No presente estudo, a concentração de oxigênio dissolvido se apresentou da maneira característica descrita na literatura, os maiores valores foram observados na superfície, com valores mais altos na região próxima a quebra da plataforma, mantendo-se homogêneo com a profundidade. No entanto, a região Oceânica e das Ilhas apresentaram algumas peculiaridades. Na faixa de 90-145 m verifica-se zonas de concentrações mínimas de oxigênio, devido a remineralização da matéria orgânica (LOUANCHI; NAJJAR, 2001; BECKER et al., 2001) e/ou devido a taxa de utilização biológica do oxigênio ser mais forte que a entrada via advecção ou difusão (PACKARD et al., 1988; BECKER et al., 2001). Quanto à distribuição horizontal de oxigênio, devido às maiores temperaturas, as regiões oceânica ao redor das ilhas e a região oceânica apresentam baixas concentrações de oxigênio, já as

regiões próximo a quebra da plataformas são áreas muito ricas em oxigênio.

O transecto da região oceânica ao redor das ilhas e oceânica pode mostrar os perfis da distribuição vertical do oxigênio dissolvido (Figura 30), observa-se que antes da ilha de Fernando de Noronha o gradiente da oxiclina é bem fino e com pouca variação, e ao se aproximar de FN, o gradiente começa a ficar mais largo e com alta variação, mostrando assim um efeito ilha no oxigênio dissolvido na água.

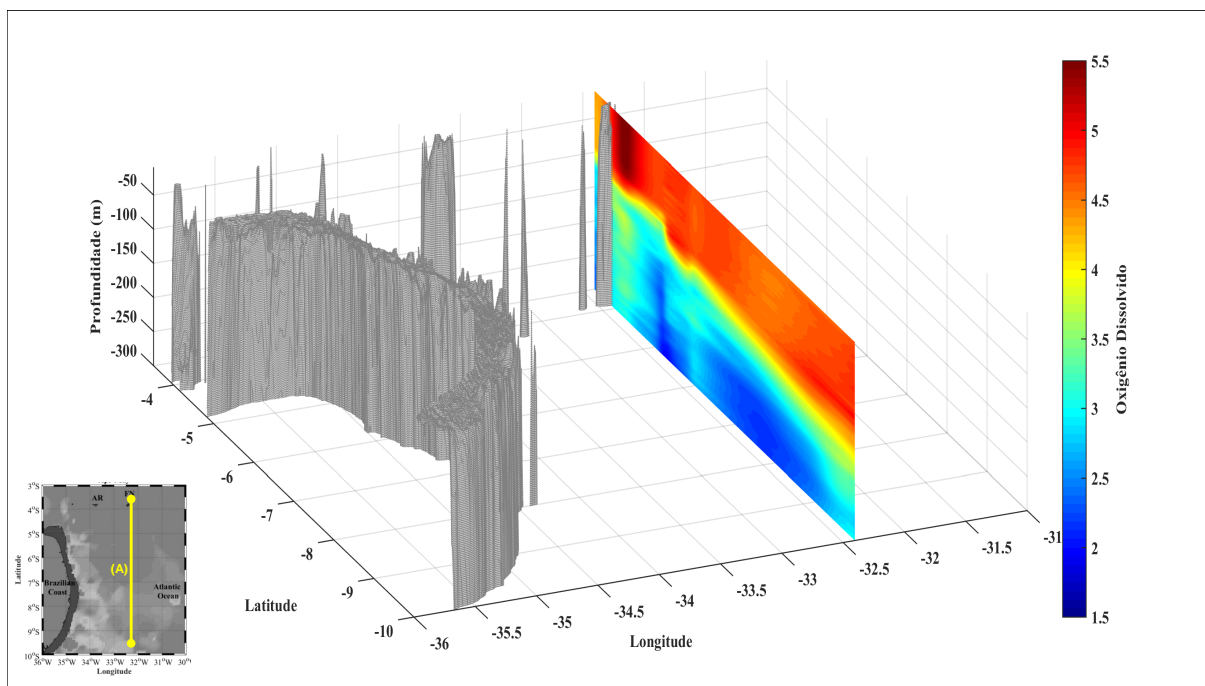


Figura 30 – Sessões verticais de salinidade ao longo da região dos montes submarinos, Ilhas Fernando de Noronha e atol das rocas. As sessões verticais possui as seguintes coordenadas: (E) ($35^{\circ}48'W$, $3^{\circ}52'S$ a $31^{\circ}18'W$, $3^{\circ}52'S$), (F) ($32^{\circ}24'W$, $3^{\circ}30'S$ a $32^{\circ}24'W$, $4^{\circ}30'S$).

A metodologia da FDA fornece uma nova abordagem estatística para a análise de séries independentes ou temporais de funções aleatórias geradas a partir de um ou mais processos estocásticos (SHANG, 2014; RAMSAY; SILVERMAN, 2005). Diferentemente da análise de dados multivariada clássica, o FDA pode extrair informações adicionais contidas nas funções suaves e suas derivadas, normalmente não disponíveis através de métodos de análise de dados multivariados e longitudinais. O FDA é capaz de analisar dados observados em um conjunto de pontos de grade esparsos com ruído (JAMES et al., 2000; YAO et al., 2005; SHANG, 2014). Diferentemente da análise longitudinal de dados, o FDA também pode analisar funções observadas com ou sem ruído em uma grade arbitrariamente densa (RAMSAY; SILVERMAN, 2005).

Ao usar uma análise de componentes principais clássica e agrupamento clássico, tem-se que cada linha vai corresponder a uma estação, um perfil, e cada coluna vai corresponder a uma profundidade. Nos dados obtidos durante a campanha do projeto

ABRACOS, por exemplo, tem-se informações de temperatura a cada metro. Então para permitir usar toda complexidade dos dados o ideal seria ter 300 colunas, de 1 a 300 metros. Mas 300 colunas é um número absurdo de variáveis o que não é recomendável. Uma PCA é necessário um número maior de observações do que de variáveis. Então significa que se deveria ter mais de 300 estações (o que não ocorre). Desta forma, a única possibilidade para se usar métodos clássicos no presente estudo seria ter uma informação a cada 10 metros, por exemplo, ao invés de se ter a cada metro, o que levaria a uma grande perda de informação. Como a FDA é uma função ajustada nos dados iniciais, permite que não ocorra perda de nenhuma informação. Além disso, como cada coluna é independente uma da outra, as profundidades podem ser diferentes em cada uma das estações analisadas. A PCA clássica poderia comparar os perfis hidrológicos numa mesma profundidade, mas não levaria em conta o comportamento do perfil. Em suma, para os tipos de dados analisados no presente trabalho, a FPCA se torna mais poderosa que sua versão clássica.

Outro ponto importante a ser destacado foi a capacidade da análise funcional, mais precisamente, o uso da ANOVA funcional, de permitir uma avaliação precisa da equivalência dos dados do WOA e do ABRACOS. O uso de uma ANOVA clássica nestes dados não seria possível, uma vez que um dos pressupostos é a independência dos erros, e mesmo uma abordagem longitudinal não levaria em conta a correlação intrínseca presente no perfil de profundidade.

Um dos maiores desafios para a Análise Funcional de Dados é o desenvolvimento de métodos estatísticos adaptados para curvas espacialmente conectadas (NERINI et al., 2010). Na oceanografia, os levantamentos fornecem perfis verticais de temperatura, salinidade ou outras variáveis que são espacialmente dependentes e amostradas ao longo da profundidade. Na maioria das vezes, a análise desses dados envolve métodos geoestatísticos para mapear a área, por exemplo. Na melhor das hipóteses, a dimensão vertical é incluída como uma terceira dimensão espacial e a análise é obtida com a krigagem padrão, que é frequentemente problemática devido à forte e complexa anisotropia e à não-estacionaridade ao longo da dimensão vertical.

6 Conclusão

Um dos objetivos desse trabalho foi aplicar métodos de Análise de Dados Funcionais no estudo de variáveis oceanográficas. Sabe-se que essa técnica aplicada a dados desta área é muito promissora devido o comportamento das variáveis em relação a profundidade. A técnica de suavização *B-splines* revelou-se ser bastante eficaz a esse tipo de dados. Desta forma, baseado na validação cruzada foram encontrados 40, 45 e 100 funções bases *B-splines* que suavizaram os perfis de temperatura ($^{\circ}\text{C}$), salinidade e oxigênio dissolvido (ml.l^{-1}), respectivamente.

Pelos resultados obtidos através do PCA/Agrupamento e ANOVA funcional conclui-se que existem, física e quimicamente, três regiões estatisticamente diferentes: (i) Região próximo a quebra da plataforma, onde revelou-se ser a região que possui o perfil médio de temperatura mais quente, com camada homogênea até os primeiros 90 m de profundidade, após isso, ocorre início da termoclina que dura cerca de 200 m de profundidade para variar de 24.5°C à 12°C . Por outro lado, possui o perfil médio de salinidade mais salino, com camada homogênea até os primeiros 50 m de profundidade, após isso, ocorre um acentuado aumento da salinidade até 150 m de profundidade, onde a salinidade atinge aproximadamente 37.29 , seguindo com pouca variação até chegar em 300 m de profundidade, onde foi registrado 35.08 . Em contrapartida, apresenta homogeneidade na concentração de oxigênio dissolvido em toda coluna d'água, tendo máximo de 4.90 ml.l^{-1} em 10m de profundidade e mínimo de 3.45 ml.l^{-1} em 300m de profundidade. (ii) Região oceânica ao redor das ilhas Fernando de Noronha e Atol das Rocas e montes submarinos, revelou-se ser a principal região no Oceano Atlântico Sul. Destacando-se pela dinâmica atual da Corrente Sul Equatorial afetada pela presença das ilhas, com camada homogênea também até os primeiros 90 m de profundidade, após isso, ocorre início da termoclina que dura cerca de 30 m de profundidade para variar de 24°C à 13°C . Por outro lado, possui o perfil médio de salinidade menos salino na camada da haloclina, onde possui um espessura de aproximadamente 40m de profundidade, onde a salinidade atinge ≈ 36.93 , seguindo com pouca variação até chegar em 300 m de profundidade, onde foi registrado 34.92 . Em contrapartida, apresenta concentração de oxigênio dissolvido homogêneo até os primeiros 85 m de profundidade, após isso, ocorre início da oxiclina que dura cerca de 65 m de profundidade para variar de $\approx 4.5 \text{ ml.l}^{-1}$ à $\approx 3.33 \text{ ml.l}^{-1}$. (iii) Região Oceânica, revelou-se ser uma região intermediária entre a região próximo a quebra da plataforma e oceânica ao redor das ilhas, destacando-se pela influenciada do sistema de correntes e barreiras orográficas dissimilares. Possui uma termoclina, haloclina e oxiclina mais marcada que a região próximo a quebra da plataforma, porém menos marcada que a região oceânica ao redor das ilhas.

Com os resultados obtidos através da krigagem funcional foi possível representar em 3D o oceano tropical do ponto de vista univariado, no qual conclui-se que a termoclina, haloclina e oxiclina é estreita do mar aberto e aumenta significativamente ao aproximar-se da região próximo a quebra da plataforma. Foi possível concluir também que as águas com menores temperaturas, menos salinas, e menos oxigenadas chegam primeiro nas ilhas e vão em direção a região próximo a quebra da plataforma de norte para o sul, onde sugere-se que existe um efeito ilha que faz com que isso aconteça.

Referências

- APEL, J. R.; BYRNE, H. M.; PRONI, J. R.; CHARNELL, R. L. Observations of oceanic internal and surface waves from the earth resources technology satellite. *Journal of Geophysical Research*, Wiley Online Library, v. 80, n. 6, p. 865–881, 1975.
- ARIZA, A.; LANDEIRA, J.; ESCÁNEZ, A.; WIENERROITHER, R.; SOTO, N. A. de; RØSTAD, A.; KAARTVEDT, S.; HERNÁNDEZ-LEÓN, S. Vertical distribution, composition and migratory patterns of acoustic scattering layers in the canary islands. *Journal of Marine Systems*, Elsevier, v. 157, p. 82–91, 2016.
- BAYLE, S.; MONESTIEZ, P.; NERINI, D. Modèle linéaire de prédiction fonctionnelle sur données environnementales: choix de modélisation. *Journal de la Société Française de Statistique*, v. 155, n. 2, p. 121–137, 2014.
- BECKER, H. et al. Hidrologia dos bancos e ilhas oceânicas do nordeste brasileiro. uma contribuição ao programa revize. Universidade Federal de São Carlos, 2001.
- BELLMAN, R. E. *Adaptive control processes: a guided tour*. [S.l.]: Princeton university press, 2015. v. 2045.
- BERTRAND, A. Abracos cruise, rv antea. 2015.
- BOOR, C. D.; BOOR, C. D.; MATHÉMATICIEN, E.-U.; BOOR, C. D.; BOOR, C. D. *A practical guide to splines*. [S.l.]: Springer-Verlag New York, 1978. v. 27.
- BREITBURG, D.; LEVIN, L. A.; OSCHLIES, A.; GRÉGOIRE, M.; CHAVEZ, F. P.; CONLEY, D. J.; GARÇON, V.; GILBERT, D.; GUTIÉRREZ, D.; ISENSEE, K. et al. Declining oxygen in the global ocean and coastal waters. *Science*, American Association for the Advancement of Science, v. 359, n. 6371, p. eaam7240, 2018.
- CASTELL, J. P.; KRUG, L. C. *Introdução às ciências do mar*. [S.l.]: Editora Textos, 2015.
- CRESSIE, N. Statistics for spatial data. wiley. *New York*, 1993.
- CUEVAS, A. A partial overview of the theory of statistics with functional data. *Journal of Statistical Planning and Inference*, v. 147, p. 1 – 23, 2014. ISSN 0378-3758. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378375813000748>>.
- EKAU, W. Topographical and hydrographical impacts on macrozooplankton community structure in the abrolhos bank region, east brazil. *Archive of Fishery and Marine Research*, v. 47, p. 307–320, 01 1999.
- EUBANK, R. L. *Spline smoothing and nonparametric regression*. [S.l.: s.n.], 1988.
- FAO, R. The state of world fisheries and aquaculture. 2010.
- FERRATY, F.; VIEU, P. *Nonparametric functional data analysis: theory and practice*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2006.

- FLOETER, S. R.; GUIMARÃES, R. Z.; ROCHA, L. A.; FERREIRA, C. E. L.; RANGEL, C. A.; GASPARINI, J. L. Geographic variation in reef-fish assemblages along the brazilian coast. *Global Ecology and Biogeography*, Wiley Online Library, v. 10, n. 4, p. 423–431, 2001.
- FREITAS, I. C. de. *Estrutura Termohalina e Massas d'Água na Zona Econômica Exclusiva do NE-Brasileiro*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Pernambuco, 2003.
- GARRISON, T. *Fundamentos de oceanografia*. [S.l.]: Cengage Learning, 2010.
- GERKEMA, T. Internal and interfacial tides: beam scattering and local generation of solitary waves. *Journal of Marine Research*, Sears Foundation for Marine Research, v. 59, n. 2, p. 227–255, 2001.
- GIRALDO, R.; DELICADO, P.; MATEU, J. Ordinary kriging for function-valued spatial data. *Environmental and Ecological Statistics*, Springer, v. 18, n. 3, p. 411–426, 2011.
- GREEN, P. J.; SILVERMAN, B. W. *Nonparametric regression and generalized linear models: a roughness penalty approach*. [S.l.]: CRC Press, 1993.
- HALPERN, B.; FRAZIER, M.; POTAPENKO, J.; CASEY, K.; KOENIG, K.; LONGO, C.; LOWNDES, J.; ROCKWOOD, R.; SELIG, E.; SELKOE, K. et al. *Spatial and temporal changes in cumulative human impacts on the world's ocean*. *Nat. Commun.* 6, 7615. 2015.
- HARRIS, S.; CYRUS, D.; BECKLEY, L. Horizontal trends in larval fish diversity and abundance along an ocean-estuarine gradient on the northern kwazulu-natal coast, south africa. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Elsevier, v. 53, n. 2, p. 221–235, 2001.
- HOWELL, T. L.; BROWN, W. S. Nonlinear internal waves on the california continental shelf. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Wiley Online Library, v. 90, n. C4, p. 7256–7264, 1985.
- JAMES, G. M.; HASTIE, T. J.; SUGAR, C. A. Principal component models for sparse functional data. *Biometrika*, Oxford University Press, v. 87, n. 3, p. 587–602, 2000.
- KITHEKA, J. U. Coastal tidally-driven circulation and the role of water exchange in the linkage between tropical coastal ecosystems. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Elsevier, v. 45, n. 2, p. 177–187, 1997.
- KNUDSEN, M. *Berichte über die Konstantenbestimmungen zur Aufstellung der hydrographischen Tabellen von Carl Forch, Martin Knudsen und SPL Sorensen*. [S.l.]: Lunos, 1902.
- LAMB, K. G. Internal wave breaking and dissipation mechanisms on the continental slope/shelf. *Annual Review of Fluid Mechanics*, Annual Reviews, v. 46, p. 231–254, 2014.
- LEFEVRE, R.; BARRE, P.; MOYANO, F. E.; CHRISTENSEN, B. T.; BARDOUX, G.; EGLIN, T.; GIRARDIN, C.; HOUOT, S.; KAETTERER, T.; OORT, F. V. et al. Higher temperature sensitivity for stable than for labile soil organic carbon—evidence from incubations of long-term bare fallow soils. *Global Change Biology*, Wiley Online Library, v. 20, n. 2, p. 633–640, 2014.
- LIU, Z. Thermocline forced by varying ekman pumping. part ii: Annual and decadal ekman pumping. *Journal of physical oceanography*, v. 23, n. 12, p. 2523–2540, 1993.

- LOUANCHI, F.; NAJJAR, R. G. Annual cycles of nutrients and oxygen in the upper layers of the north atlantic ocean. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, Elsevier, v. 48, n. 10, p. 2155–2171, 2001.
- LYMAN, J. M.; GOOD, S. A.; GOURETSKI, V. V.; ISHII, M.; JOHNSON, G. C.; PALMER, M. D.; SMITH, D. M.; WILLIS, J. K. Robust warming of the global upper ocean. *Nature*, Nature Publishing Group, v. 465, n. 7296, p. 334, 2010.
- MANCINI, P. L. *RELAÇÕES TRÓFICAS DE AVES MARINHAS TROPICAIS EM ILHAS OCÊANICAS DO BRASIL*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande, 2013.
- MAZE, G.; MERCIER, H.; FABLET, R.; TANDEO, P.; RADCENCO, M. L.; LENCA, P.; FEUCHER, C.; GOFF, C. L. Coherent heat patterns revealed by unsupervised classification of argo temperature profiles in the north atlantic ocean. *Progress in Oceanography*, Elsevier, v. 151, p. 275–292, 2017.
- MOBERG, F.; RÖNNBÄCK, P. Ecosystem services of the tropical seascape: interactions, substitutions and restoration. *Ocean & Coastal Management*, Elsevier, v. 46, n. 1-2, p. 27–46, 2003.
- NAVROTSKY, V.; LOZOVATSKY, I.; PAVLOVA, E.; FERNANDO, H. Observations of internal waves and thermocline splitting near a shelf break of the sea of japan (east sea). *Continental Shelf Research*, Elsevier, v. 24, n. 12, p. 1375–1395, 2004.
- NERINI, D.; MONESTIEZ, P.; MANTÉ, C. Cokriging for spatial functional data. *Journal of Multivariate Analysis*, Elsevier, v. 101, n. 2, p. 409–418, 2010.
- OGDEN, J. The influence of adjacent systems on the structure and function of coral reefs. In: *Proceedings of the International Coral Reef Symp.* [S.l.: s.n.], 1988. v. 1, p. 123–129.
- PACKARD, T. T.; MINAS, H.; COSTE, B.; MARTINEZ, R.; BONIN, M.; GOSTAN, J.; GARFIELD, P.; CHRISTENSEN, J.; DORTCH, Q.; MINAS, M. et al. Formation of the alboran oxygen minimum zone. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, Elsevier, v. 35, n. 7, p. 1111–1118, 1988.
- PAULO, J. G. Distribuição vertical dos nutrientes dissolvidos no nordeste do brasil entre as latitudes 6° 20's e 7° 33's. Universidade Federal de Pernambuco, 2016.
- PAUTHENET, É.; ROQUET, F.; MADEC, G.; NERINI, D. A linear decomposition of the southern ocean thermohaline structure. *Journal of Physical Oceanography*, v. 47, n. 1, 2017.
- PEDROSA, P.; PARANHOS, R.; SUZUKI, M. S.; ANDRADE, L.; SILVEIRA, I. C. A. da; SCHMIDT, A. C. K.; FALCÃO, A. P.; LAVRADO, H. P.; REZENDE, C. E. Hidroquímica de massas d'água oceânicas em regiões da margem continental brasileira, bacia de campos, estado do rio de janeiro, brasil. *Geochimica Brasiliensis*, v. 20, n. 1, 2006.
- PETERSON, R. G.; STRAMMA, L. Upper-level circulation in the south atlantic ocean. *Progress in oceanography*, Elsevier, v. 26, n. 1, p. 1–73, 1991.
- POOLE, R.; TOMCZAK, M. Optimum multiparameter analysis of the water mass structure in the atlantic ocean thermocline. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, Elsevier, v. 46, n. 11, p. 1895–1921, 1999.

- R Core Team. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna, Austria, 2018. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>.
- RAMSAY, J.; SILVERMAN, B. *The analysis of functional data*. [S.l.]: Springer-Verlag, Berlin, 1997.
- RAMSAY, J. O. Functional components of variation in handwriting. *Journal of the American Statistical Association*, Taylor & Francis, v. 95, n. 449, p. 9–15, 2000.
- RAMSAY, J. O. *Functional data analysis*. [S.l.]: Wiley Online Library, 2006.
- RAMSAY, J. O.; HOOKER, G.; GRAVES, S. *Functional data analysis with R and MATLAB*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2009.
- RAMSAY, J. O.; SILVERMAN, B. W. *Applied functional data analysis: methods and case studies*. [S.l.]: Springer New York, 2002. v. 77.
- RAMSAY, J. O.; SILVERMAN, B. W. Functional data analysis. *Encyclopedia of Statistics in Behavioral Science*, Wiley Online Library, 2005.
- RICE, J. A.; SILVERMAN, B. W. Estimating the mean and covariance structure nonparametrically when the data are curves. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, JSTOR, p. 233–243, 1991.
- ROCHA, L. A. Patterns of distribution and processes of speciation in brazilian reef fishes. *Journal of Biogeography*, Wiley Online Library, v. 30, n. 8, p. 1161–1171, 2003.
- RUIZ-MEDINA, M. New challenges in spatial and spatiotemporal functional statistics for high-dimensional data. *Spatial Statistics*, Elsevier, v. 1, p. 82–91, 2012.
- SAMPAIO, C. L.; NUNES, J. d. A. C.; MENDES, L. F. *Acyrtus pauciradiatus*, a new species of clingfish (teleostei: Gobiesocidae) from fernando de noronha archipelago, pernambuco state, northeastern brazil. *Neotropical Ichthyology*, SciELO Brasil, v. 2, n. 4, p. 206–208, 2004.
- SANTOS, C. A. C. dos; MANZI, A. O. Eventos extremos de precipitação no estado do ceará e suas relações com a temperatura dos oceanos tropicais. *Revista Brasileira de Meteorologia*, SciELO Brasil, v. 26, n. 1, 2010.
- SASSI, G. P. *Estimação de modelos geoestatísticos com dados funcionais usando ondaletas*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2016.
- SCHOTT, F. A.; DENGLER, M.; ZANTOPP, R.; STRAMMA, L.; FISCHER, J.; BRANDT, P. The shallow and deep western boundary circulation of the south atlantic at 5–11 s. *Journal of Physical Oceanography*, v. 35, n. 11, p. 2031–2053, 2005.
- SCHUCKMANN, K. V.; GAILLARD, F.; TRAON, P.-Y. L. Global hydrographic variability patterns during 2003–2008. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Wiley Online Library, v. 114, n. C9, 2009.
- SCHUMAKER, L. *Spline functions: basic theory*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2007.
- SERAFIM, C. C.; CHAVES, P. *Geografia: o mar no espaço geográfico brasileiro*. [S.l.]: Ministério da Educação, 2005. v. 8.

- SERAFINI, T. Z.; FRANÇA, G. Barbosa de; ANDRIGUETTO-FILHO, J. M. Ilhas oceânicas brasileiras: biodiversidade conhecida e sua relação com o histórico de uso e ocupação humana. *Revista de Gestão Costeira Integrada-Journal of Integrated Coastal Zone Management*, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, v. 10, n. 3, 2010.
- SHANG, H. L. A survey of functional principal component analysis. *AStA Advances in Statistical Analysis*, Springer, v. 98, n. 2, p. 121–142, 2014.
- SILVA, A.; BOURLÈS, B.; ARAUJO, M. Circulation of the thermocline salinity maximum waters off the northern brazil as inferred from in situ measurements and numerical results. In: *Annales Geophysicae*. [S.l.: s.n.], 2008. v. 27, p. 1861–1873.
- SILVA, A. S. A. da. Ferramentas para modelagem e interpolação de dados ambientais em escala regional. 2015.
- SILVERMAN, B. W. Spline smoothing: the equivalent variable kernel method. *The Annals of Statistics*, JSTOR, p. 898–916, 1984.
- STRAMMA, L.; ENGLAND, M. On the water masses and mean circulation of the south atlantic ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Wiley Online Library, v. 104, n. C9, p. 20863–20883, 1999.
- TRAVASSOS, P.; HAZIN, F.; ZAGAGLIA, J.; ADVÍNCULA, R.; SCHOBBER, J. Thermohaline structure around seamounts and islands off north-eastern brazil. *Archive of Fishery and Marine Research*, GUSTAV FISCHER VERLAG VILLENANG 2, D-07745 JENA, GERMANY, v. 47, n. 2-3, p. 211–222, 1999.
- TRENBERTH, K. E. Global change: The ocean is warming, isn't it? *Nature*, Nature Publishing Group, v. 465, n. 7296, p. 304, 2010.
- VALENTINE-ROSE, L.; LAYMAN, C.; ARRINGTON, D.; RYPEL, A. Habitat fragmentation decreases fish secondary production in bahamian tidal creeks. *Bulletin of Marine Science*, University of Miami-Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Science, v. 80, n. 3, p. 863–877, 2007.
- YAO, F.; MÜLLER, H.-G.; WANG, J.-L. Functional linear regression analysis for longitudinal data. *The Annals of Statistics*, JSTOR, p. 2873–2903, 2005.
- ZEMBRUSCKI, S. G.; CHAVES, H. Geomorfologia da margem continental sul brasileira e das bacias oceânicas adjacentes. 1979.