



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

RICARDO CHRISTYAN MATOS CARVALHO

**AVALIAÇÃO DOS CAMPOS DE CORRENTE OCEÂNICA E PADRÕES DE
SALINIDADE NO ATLÂNTICO TROPICAL**

MACEIÓ/AL
2022



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA**



RICARDO CHRISTYAN MATOS CARVALHO

**AVALIAÇÃO DOS CAMPOS DE CORRENTE OCEÂNICA E PADRÕES DE
SALINIDADE NO ATLÂNTICO TROPICAL**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado à banca examinadora do Curso de Graduação em Meteorologia, da Universidade Federal de Alagoas, como exigência parcial para a obtenção do grau de Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. Geórgenes Hilário
Cavalcante Segundo

**MACEIÓ/AL
2022**

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 – 1767

- C331a Carvalho, Ricardo Christyan Matos.
Avaliação dos campos de corrente oceânica e padrões de salinidade no Atlântico tropical / Ricardo Christyan Matos Carvalho. – 2022.
41 f. : il.
- Orientador: Geórgenes Hilário Cavalcante Segundo.
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas. Instituto de Ciências Atmosféricas. Maceió, 2022.
- Bibliografia: f. 40-41.
1. Circulação oceânica. 2. Salinidade. 3. Modelagem. I. Título.

CDU: 551.465



ATA DE APRESENTAÇÃO PÚBLICA DO TCC

ALUNO: RICARDO CHRISTYAN MATOS CARVALHO

ORIENTADOR: GEÓRGENES HILÁRIO CAVALCANTE SEGUNDO

TÍTULO DO TRABALHO: AVALIAÇÃO DOS CAMPOS DE CORRENTE OCEÂNICA E PADRÕES DE SALINIDADE NO ATLÂNTICO TROPICAL

DATA: 01/02/2022 HORA: 16:00

LOCAL: meet.google.com/ujm-ueej-kcn

BANCA EXAMINADORA

PRESIDENTE: GEÓRGENES HILÁRIO CAVALCANTE SEGUNDO

SEGUNDO COMPONENTE: PAULO RICARDO PETTER MEDEIROS

TERCEIRO COMPONENTE: RICARDO FERREIRA CARLOS DE AMORIM

QUARTO COMPONENTE: _____

QUADRO DE AVALIAÇÃO

Banca Examinadora	Apresentação	Conteúdo	Domínio do Assunto	Média Parcial	Assinatura
Presidente	9,4	9,5	9,0	9,3	<i>Geórgenes H. C. Segundo</i>
Segundo Componente	9,4	9,5	9,0	9,3	<i>Paulo Petter</i>
Terceiro Componente	9,0	9,5	9,1	9,2	<i>Ricardo Ferreira Carlos de Amorim</i>
Quarto Componente					

MÉDIA FINAL: 9,26

COMPROVANTE DE ENTREGA DA VERSÃO FINAL DO TCC

O TCC obteve média final 9,26, conforme quadro de avaliação acima, homologado por esta coordenação.

Entregue na versão final no dia 31 de março de 2022.

Assinatura do(a) Coordenador (a):

Dedico esse trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pois sem Ele nada disso seria possível.

À minha mãe e minha irmã por todo apoio e incentivo.

Ao meu filho por todos os momentos de sacrifício nos quais tive que estar ausente.

Ao meu professor e orientador Dr. Geórgenes Hilário Cavalcante Segundo, pela paciência, incentivo e orientação.

Aos professores Dr. Ricardo Ferreira C. de Amorim e Dr. Paulo Ricardo Petter Medeiros por aceitarem integrar a banca examinadora.

À Universidade Federal de Alagoas e todos os professores do Instituto de Ciências Atmosféricas que contribuíram para o meu aprendizado.

A todos os meus colegas e amigos de graduação.

“Durante a maior parte da história, o homem teve que lutar contra a natureza para sobreviver; neste século, ele está começando a perceber que, para sobreviver, deve protegê-la.” - Jacques-Yves Cousteau

“O mar, uma vez que lança seu feitiço, aprisiona a pessoa em sua rede de maravilhas para sempre.” - Jacques-Yves Cousteau

“É um fato biológico interessante que todos nós temos em nossas veias a mesma proporção de sal que existe nos oceanos; e, portanto, possuímos sal em nosso sangue, suor e lágrimas. Estamos ligados ao Oceano. E quando retornamos ao mar, seja para navegar ou simplesmente observar, estamos retornando para o local de onde viemos.” – John F. Kennedy

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo principal avaliar os campos de corrente de superfície e salinidade nas regiões norte e nordeste do Brasil e sua variação sazonal. Para isto foram utilizados produtos de sensores instalados em satélites que medem a salinidade da superfície do mar, em combinação com dados da circulação oceânica através de modelo numérico, e medições *in situ* da salinidade na superfície do mar. Foram identificados a variabilidade espaço-temporal dos campos de corrente e salinidade, a caracterização de massas d'água e a variação da periodicidade entre os padrões de salinidade e temperatura através da análise de ondeletas. As análises indicaram que os campos de salinidade variam de acordo com a latitude e influência da corrente do Brasil, bem como o período do ano quando ocorre diminuição no regime de chuvas. O diagrama TS indicou massas d'água com características predominantes de Água Tropical (Tropical Water - TW) e Água Costeira (Coastal Water - CW). A estimativa do transporte de sal integrado revelou grande sazonalidade para a Subcorrente Norte do Brasil (SNB) e pouca ou quase nenhuma sazonalidade para a Corrente do Brasil (CB). Os padrões de longo prazo analisados através de ondeletas para a salinidade indicaram uma maior predominância no período de oscilações curtas, em torno de um ano, como também em períodos mais longos em torno de dois anos. Já para a temperatura os padrões mostraram predominância apenas no período de oscilações mais curtas, em torno de um ano.

Palavras-chave: Circulação oceânica; Salinidade; Modelagem.

ABSTRACT

The main objective of the present work was to evaluate the surface current and salinity fields in the north and northeast regions of Brazil and their seasonal variation. For this, products from sensors installed on satellites that measure sea surface salinity were used, in combination with ocean circulation data from numerical modelling and in situ measurements of sea surface salinity. The spatio-temporal variability of the current and salinity fields, characterization of water masses and periodicity variation between salinity and temperature patterns through wavelet analysis were identified. The analyzes indicated that the salinity fields vary according to the latitude and influence of the Brazilian Current, as well as the period of the year when there is a decrease in the rainfall regime. The TS diagram indicated water masses with predominant characteristics of Tropical Water (TW) and Coastal Water (CW). The estimate of the integrated salt transport revealed great seasonality for the Northern Brazil Undercurrent (SNB) and little or almost no seasonality for the Brazil Current (CB). The long-term patterns analyzed through wavelets for salinity indicated a greater predominance in the period of short oscillations, around one year, as well as in longer periods, around two years. As for the temperature, the patterns showed predominance only in the period of shorter oscillations, around one year.

Keywords: Ocean Circulation; Salinity; Modelling.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - MAPA DAS PRINCIPAIS CORRENTES OCEÂNICAS.....	15
FIGURA 2 - MAPA GLOBAL DE SALINIDADE DA SUPERFÍCIE MARINHA.....	16
FIGURA 3 - MAPA GLOBAL DE TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE MARINHA.....	17
FIGURA 4 - ÁREA EM ESTUDO SUBENTENDIDA PELO RETÂNGULO PRETO EM NEGRITO ABRANGENDO A SNB E A SBC.....	19
FIGURA 5 - EXEMPLO DE PRODUTO DO MODELO OCEANOGRÁFICO HYCOM.....	20
FIGURA 6 - ILUSTRAÇÃO DO SATÉLITE SMOS.....	21
FIGURA 7 - MAPA GLOBAL DE FLUTUADORES ARGO EM DEZEMBRO DE 2021.....	22
FIGURA 8 - EXEMPLO DO SOFTWARE UTILIZADO MATLAB.....	23
FIGURA 9 - MAPAS DE SALINIDADE CORRESPONDENTES AOS MESES DO ANO.....	25
FIGURA 10 - MAPAS DE SALINIDADE CORRESPONDENTES ÀS ESTAÇÕES DO ANO.....	26
FIGURA 11A - MAPAS DE DISTRIBUIÇÃO ESPAÇO TEMPORAL DA CORRENTE SOBREPOSTA À SALINIDADE (JANEIRO A JUNHO).....	27
FIGURA 11B - MAPAS DE DISTRIBUIÇÃO ESPAÇO TEMPORAL DA CORRENTE SOBREPOSTA À SALINIDADE (JULHO A DEZEMBRO).....	28
FIGURA 12 - MAPAS COMPARATIVOS DE SALINIDADE SAZONAL DOS DADOS DO MODELO HYCOM E DO SATÉLITE SMOS.....	29
FIGURA 13 - MAPAS COMPARATIVOS DE SALINIDADE SAZONAL DOS DADOS DO MODELO HYCOM E DA REDE DE FLUTUADORES ARGO.....	30
FIGURA 14 - GRÁFICO DO TRANSPORTE DE SAL CALCULADO PARA AS CORRENTES SNB E SBC.....	31
FIGURA 15 - MAPA COM OS PONTOS ESCOLHIDOS PARA AVALIAÇÃO DAS MASSAS DE ÁGUA.....	32
FIGURA 16 - DIAGRAMA TS CORRESPONDENTE AO PONTO 1.....	33
FIGURA 17 - DIAGRAMA TS CORRESPONDENTE AO PONTO 2.....	34
FIGURA 18 - DIAGRAMA TS CORRESPONDENTE AO PONTO 3.....	35

FIGURA 19 - DIAGRAMA TS CORRESPONDENTE AO PONTO 4.....	36
FIGURA 20 - GRÁFICO DA ANÁLISE DE ONDELETAS PARA A SALINIDADE.....	37
FIGURA 21 - GRÁFICO DA ANÁLISE DE ONDELETAS PARA A TEMPERATURA.....	38

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMOC	Atlantic Meridional Overturning Circulation
CB	Corrente do Brasil
CNB	Corrente Norte do Brasil
CSE	Corrente Sul Equatorial
ESA	Agência Espacial Européia
HYCOM	HYbrid Coordinate Ocean Model
LOCF	Laboratório de Oceanografia Física
NOPP	National Ocean Partnership Program
SMOS	Soil Moisture Over land and Sea surface salinity
SNB	Subcorrente Norte do Brasil
SSM	Salinidade da Superfície do Mar
TS	Temperatura-Salinidade
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
PSS-78	Practical Salinity Scale ou escala de salinidade prática de 1978
PSU	Practical Salinity Unit ou unidade prática de salinidade

LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES

°	Graus
σ	Densidade
kg	Quilograma
km	Quilometro
L	Leste
m	Metros
m ³	Metros cúbicos
O	Oeste
S	Sul

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	OBJETIVOS.....	14
2.1	Geral.....	14
2.2	Específicos.....	14
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
3.1	Correntes Oceânicas.....	15
3.2	Salinidade da Superfície do Mar.....	16
3.3	Temperatura da Superfície do Mar.....	16
3.4	Densidade da Água do Mar.....	17
3.5	Diagramas Temperatura-Salinidade (Diagrama TS).....	18
3.6	Análise de Ondeletas (Wavelets).....	18
4	METODOLOGIA.....	19
4.1	Descrição da Área de Estudo.....	19
4.2	Dados do Modelo HYCOM.....	19
4.3	Dados do Satélite SMOS.....	20
4.4	Dados da Rede de Flutuadores ARGO.....	21
4.5	Análise dos Dados.....	22
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	24
5.1	Variação Espaço/Temporal da Salinidade.....	24
5.2	Circulação Superficial.....	26
5.3	Comparativo entre os Mapas de Salinidade.....	28
5.4	Transporte de Sal Integrado.....	31
5.5	Diagramas Temperatura-Salinidade (Diagramas TS).....	32
5.6	Análise de Ondeletas (Wavelets).....	37
6	CONCLUSÃO.....	39
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	40

1 INTRODUÇÃO

As variações de longo prazo da Circulação de Revolvimento Meridional do Atlântico (Atlantic Meridional Overturning Circulation - AMOC) (Broecker, 1994) podem levar a mudanças regionais na distribuição da temperatura da superfície do mar (TSM) e salinidade da superfície do mar (SSM) (Haarsma et al., 2008; Garzoli et al., 2011). Por outro lado, alguns processos chave em escala regional nos oceanos tropical e do Atlântico Sul podem influenciar a dinâmica e a variabilidade dessas circulações oceânicas. De particular relevância tanto para os processos regionais como para os transportes latitudinais de calor e sal, estão as trajetórias percorridas pelas circulações oceânicas desde o Atlântico Sul até a formação em águas profundas nas regiões do Atlântico Norte, e em particular, o estabelecimento das correstes de contorno oeste do Atlântico Sul, como a Corrente Norte do Brasil (CNB), Subcorrente Norte do Brasil (SNB) e Corrente do Brasil (CB).

Assim, o monitoramento contínuo de variáveis como SSM e TSM, juntamente com a circulação superficial, são essenciais para determinar e prever a relação entre a variabilidade oceânica e climática em escalas regionais e globais. Desta forma, justifica a avaliação da relação entre os parâmetros acima mencionados, principalmente nessas regiões localizadas próximas à costa norte e nordeste do Brasil, dentro das correntes CNB, SNB e CB.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Avaliar os padrões de circulação oceânica e salinidade da superfície do mar dentro das regiões Norte e Nordeste da costa do Brasil.

2.2 Específicos

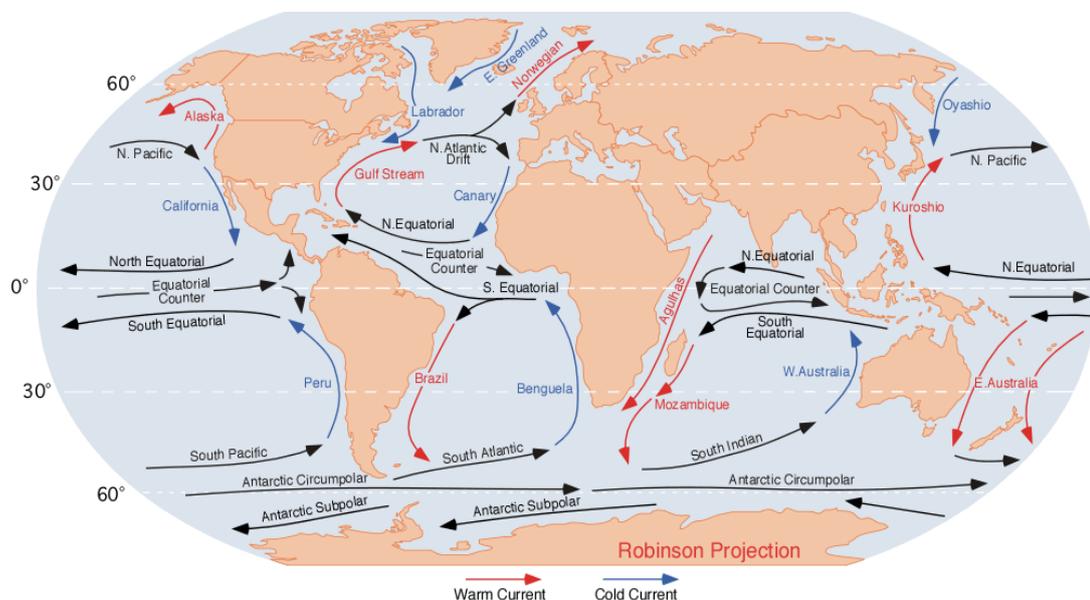
- Calcular médias mensais dos padrões de corrente e salinidade na superfície do mar;
- Fazer o levantamento da variabilidade sazonal e espacial das correntes e salinidade superficiais;
- Elaborar mapas comparativos de salinidade superficial;
- Aferir o ciclo sazonal das CNB, SNB, e CB para as áreas demarcadas;
- Computar o transporte de sal integrado de acordo com os fluxos regionais;
- Caracterizar as massas de água oceânicas através do diagrama TS;
- Examinar a variação da periodicidade entre os padrões de corrente, salinidade e temperatura superficial através da análise de ondeletas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Correntes Oceânicas

As correntes oceânicas são fluxos contínuos de água marinha que possuem trajetórias bem definidas e conhecidas, conectando as diferentes bacias oceânicas e transportando calor, elementos químicos, organismos e sedimentos. As correntes superficiais possuem como principal força a ação do vento. Já as correntes profundas, que compõem a circulação termohalina, são impulsionadas por diferenças de temperatura e salinidade.

Figura 1 - Mapa das principais correntes oceânicas.



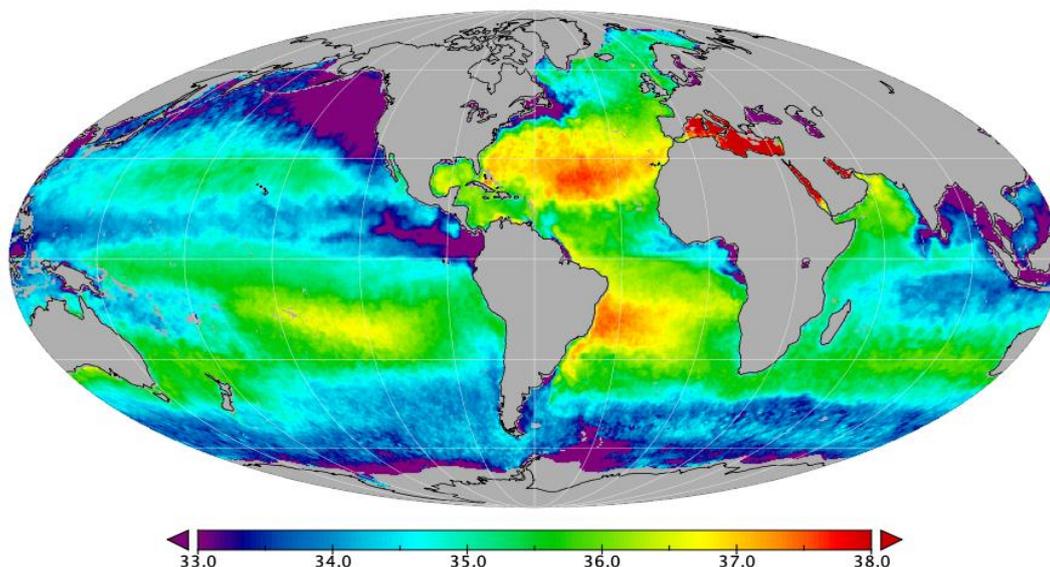
Fonte: <http://www.physicalgeography.net>

As correntes oceânicas atuam de forma significativa no clima do planeta. Com as principais correntes do Oceano Atlântico Sul exercendo uma influência importante na variabilidade da Circulação de Revolvimento Meridional do Atlântico (do inglês AMOC), como já ficou claro desde as primeiras observações da expedição Meteor (Garzoli et al. 2011).

3.2 Salinidade da Superfície do Mar

Salinidade é a concentração de sal dissolvido na água marinha. Sua unidade de medida é o PSU (do inglês Practical Salinity Unit) de acordo com a escala de salinidade prática de 1978 (pss-78), que expressa uma taxa de condutividade (Kerr et al. 2010).

Figura 2 - Mapa global de salinidade da superfície marinha.



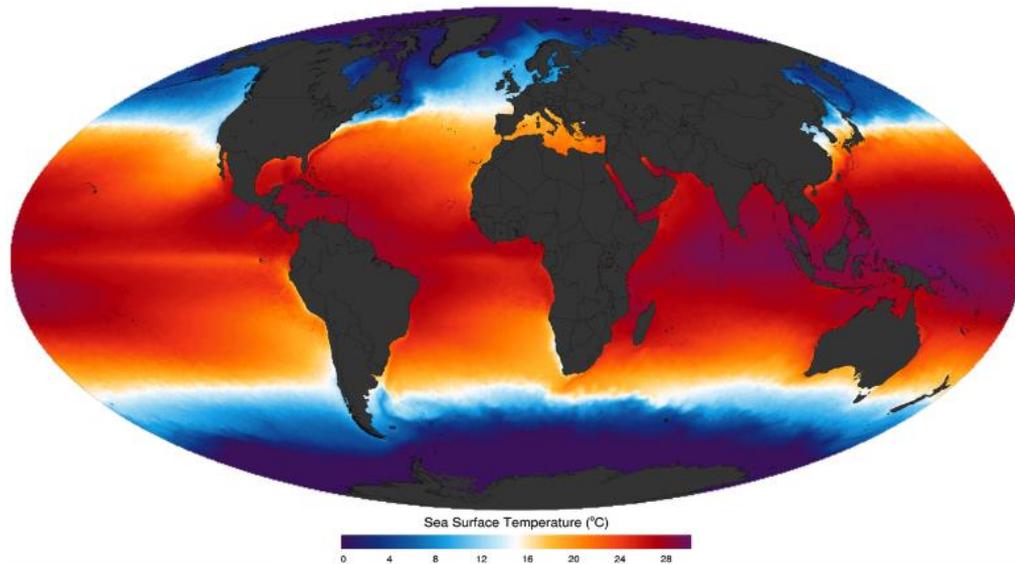
Fonte: <http://podaac.jpl.nasa.gov>

A variação da salinidade da superfície marinha é uma importante variável, junto com a temperatura, na circulação termohalina.

3.3 Temperatura da Superfície do Mar

É a temperatura da água marinha próximo à superfície do oceano. É uma variável muito importante na variabilidade climática, distribuindo calor por diversas regiões do planeta.

Figura 3 - Mapa global de temperatura da superfície marinha.



Fonte: <http://podaac.jpl.nasa.gov>

Através de sua influência sobre as massas de ar na atmosfera, originam diversos fenômenos meteorológicos como: Brisas marítimas, nevoeiros, formação de ciclones, etc. A variabilidade da temperatura da superfície marinha no Oceano Atlântico tropical também afeta a posição e intensidade da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) (Andreoli e Kayano, 2004).

3.4 Densidade da Água do Mar

Densidade é a quantidade de massa por unidade de volume e é expressa em quilogramas por metro cúbico (kg/m^3). É uma variável que depende diretamente da salinidade, temperatura e pressão. Densidade da água do mar é importante pois irá determinar a profundidade na qual uma massa permanecerá em equilíbrio. As menos densas na superfície e as mais densas no fundo. A formação de águas mais densas é o principal mecanismo na origem da Circulação de Revolvimento Meridional do Atlântico (Garzoli et al. 2011).

3.5 Diagramas Temperatura-Salinidade (Diagrama TS)

São gráficos elaborados a partir da temperatura no eixo das ordenadas e da salinidade no eixo das abcissas e também com isolinhas de densidade (ou isopicnas) que facilitam a identificação de diferentes massas de água do mar. Através de diagramas TS, duas massas de água predominantes na região da plataforma continental do nordeste brasileiro foram identificadas, a água tropical (Tropical Water - TW) e água costeira (Coastal Water - CW) (Schettini et al. 2017).

3.6 Análise de Ondeletas (Wavelets)

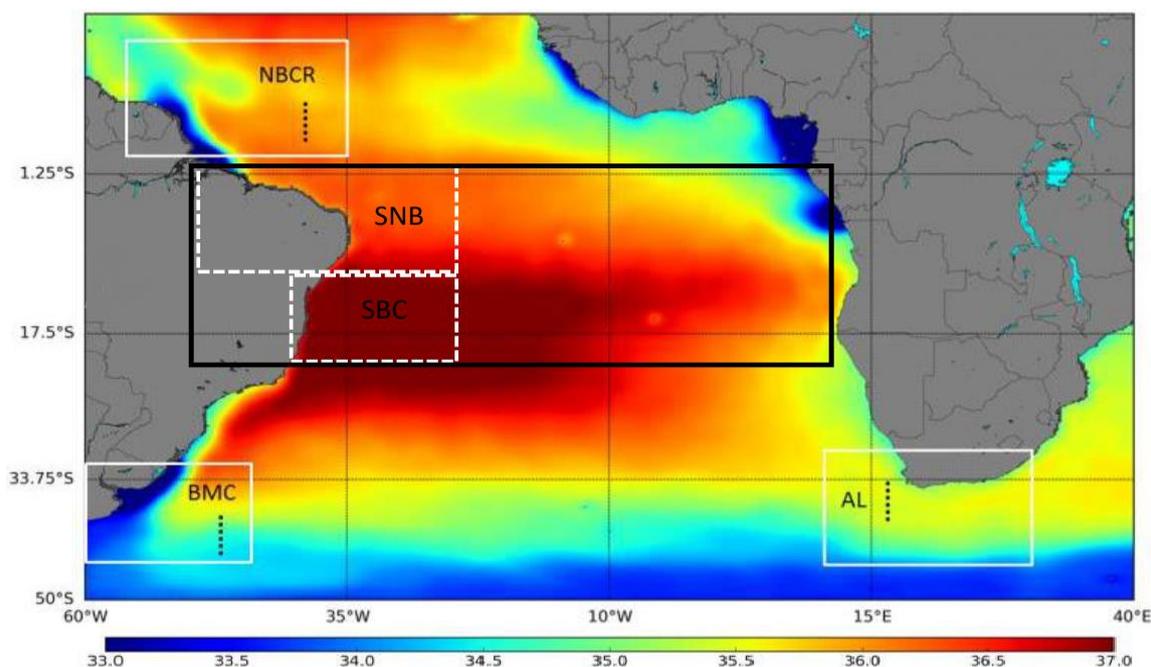
Método matemático utilizado em análise de séries temporais não estacionárias. Permite decompor tais séries temporais em diferentes níveis de resolução tempo-frequência, possibilitando assim determinar as escalas de variabilidade predominantes e suas localizações ao longo do tempo. A análise de ondeletas tem sido utilizada no estudo de diversos fenômenos, tais como: Convecção tropical, ENOS, frentes frias atmosféricas, dispersão de ondas oceânicas, fluxos turbulentos, etc. (Torrence e Compo, 1998)

4 METODOLOGIA

4.1 Descrição da Área de Estudo

A área de estudo corresponde à porção do Oceano Atlântico compreendida pelo retângulo preto na **figura 4**. As áreas para estimativa espacial e temporal da salinidade e corrente correspondem aos domínios (0°S - 10°S e 0°O - 48°O) para a Subcorrente Norte do Brasil (do inglês SNB) e (10°S - 20°S e 0°O - 40°O) para a Corrente Sul do Brasil (do inglês SBC).

Figura 4 - Área em estudo subentendida pelo retângulo preto abrangendo a SNB e a SBC.



Fonte: Laboratório de Oceanografia Física (LOCF).

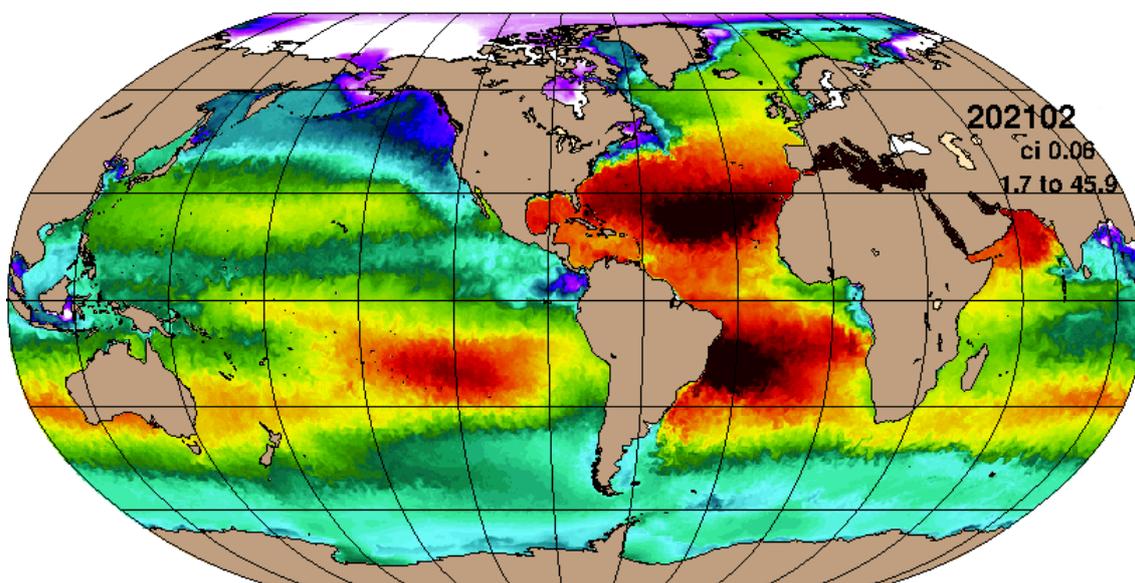
4.2 Dados do Modelo HYCOM

Foi utilizado a saída do modelo global HYCOM conhecido como “HYbrid Coordinate Ocean Model”, patrocinado pelo National Ocean Partnership Program (NOPP) dos Estados Unidos (<https://www.hycom.org>). Durante a última década, o HYCOM se tornou um modelo de circulação oceânica, sendo validado em numerosas

investigações sobre clima oceânico (conforme ilustrado na **figura 5**). Uma lista completa de referências está disponível no site do consórcio HYCOM e informações adicionais sobre o experimento e sua validação também podem ser encontradas no site oficial.

O modelo possui resolução espacial de $1/12^\circ$ (~8km) e temporal de 3 horas, e foi utilizado para extrair dados para o Oceano Atlântico Sul, em um domínio que se estende entre $0^\circ\text{S} - 20^\circ\text{S}$ e $0^\circ\text{O} - 48^\circ\text{O}$. Os produtos do HYCOM aqui analisados foram velocidade das correntes e salinidade próxima da superfície (período entre 2011 - 2020).

Figura 5 - Exemplo de produto do modelo oceanográfico HYCOM.



Fonte: <https://hycom.org>

4.3 Dados do Satélite SMOS

O satélite Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) (**figura 6**) tem a capacidade de detectar remotamente a umidade do solo sobre a superfície terrestre e a salinidade da superfície do mar (SSM), e foi lançado em novembro de 2009 [Font et al., 2010, Kerr et al., 2010]. O SMOS possui calibração dedicada e algoritmos de reconstrução de imagem para validação dos dados observados (<https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/smos>).

Mapas de salinidade da superfície do mar foram produzidos para o período entre 2011 - 2020 calculados a partir de temperaturas de brilho medidas pelo SMOS e fornecidas pela Agência Espacial Europeia (do inglês ESA), seguindo a metodologia explicada em (Olmedo et al., 2017). Uma principal vantagem da nova técnica utilizada pelo SMOS é que os mapas de SSM não sofrem contaminação entre terra - mar, e com isto é possível obter medidas mais próximas da costa. Uma completa descrição da metodologia, bem como uma extensa validação do produto podem ser encontradas em (McMullan et al., 2008). Mapas diários de SSM foram produzidos a partir da análise objetiva de dados com resolução espacial de $1/4^\circ$ (~25 km) e temporal de 9 dias (mais detalhes em [Olmedo et al., 2017]).

Figura 6 - Ilustração do satélite SMOS.



Fonte: Agência Espacial Européia (ESA).

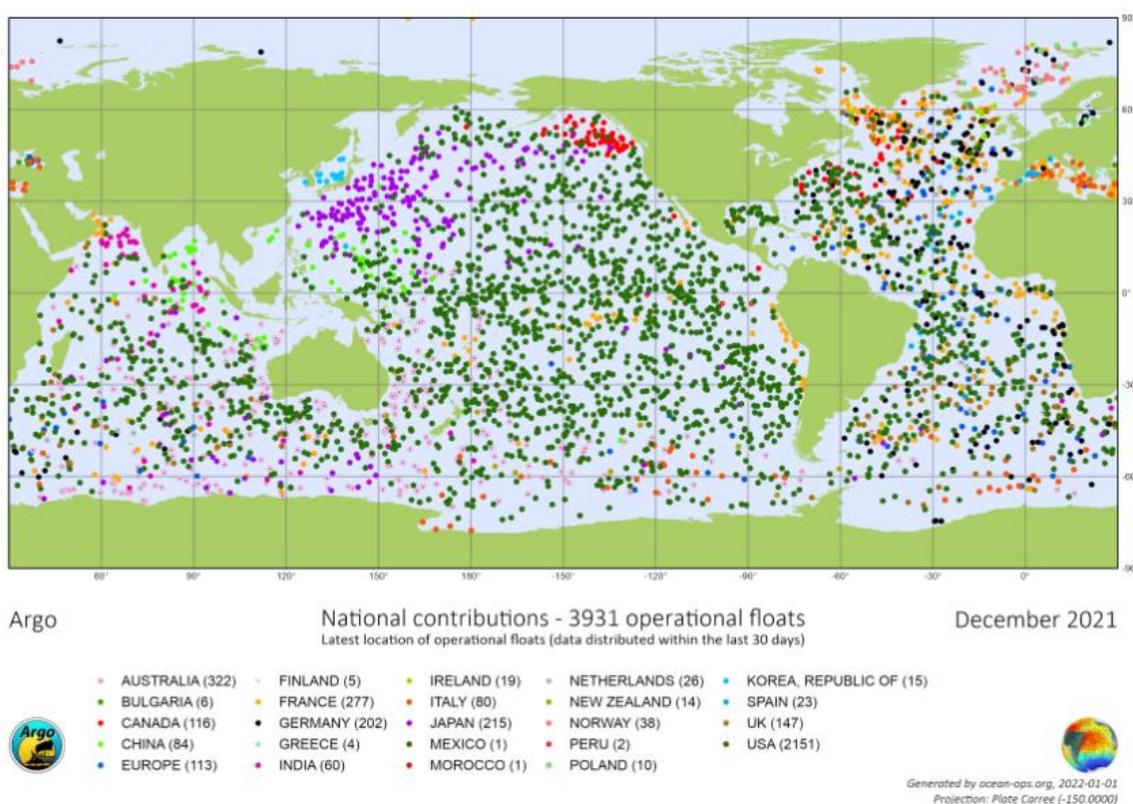
4.4 Dados da Rede de Flutuadores ARGO

Dados de observações *in situ* de salinidade foram extraídos da base de dados dos flutuadores dentro do programa ARGO. O ARGO é uma rede de extensão global (ver

figura 7) composta por mais de 3000 flutuadores perfiladores, capazes de medir a temperatura e a salinidade desde a camada superficial superior, até 2000m de profundidade. Mais detalhes podem ser obtidos nos sites (<http://www.argo.ucsd.edu/>, <http://argo.jcommops.org>, <http://www.goosbrasil.org/argo/>).

O período de amostragem foi entre Janeiro de 2011 e Dezembro de 2020. De acordo com os dados adquiridos, as salinidades nas camadas com profundidade superior à 10m e inferior à 0,5m foram removidas devido à possível presença de bolhas de ar que podem aumentar o erro no sensor de condutividade.

Figura 7 - Mapa global de flutuadores Argo em Dezembro de 2021



Fonte: <http://argo.jcommops.org>

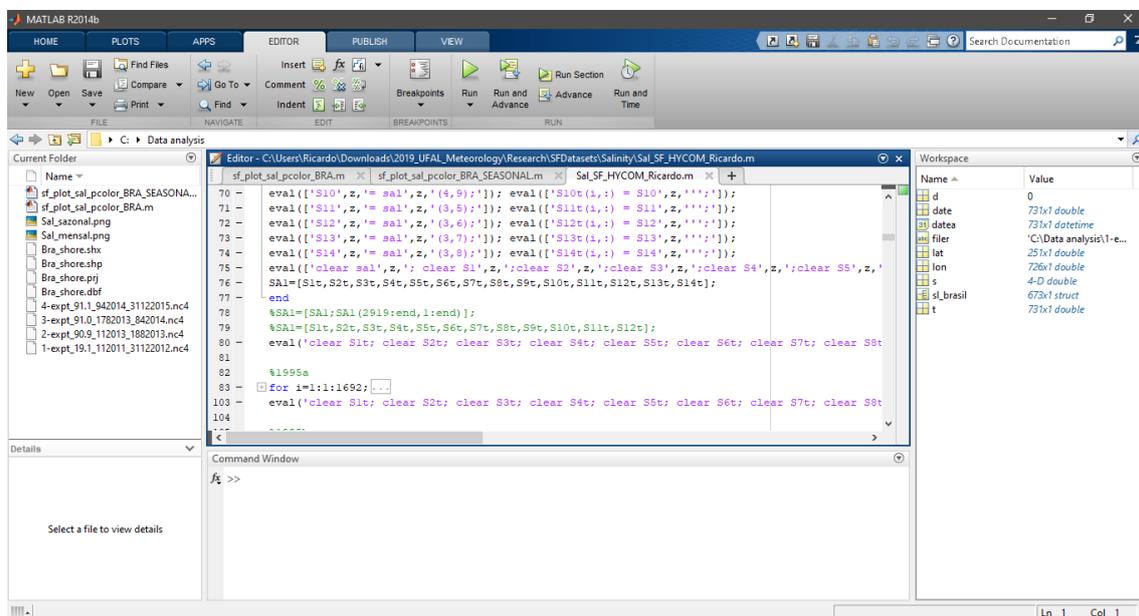
4.5 Análise dos Dados

A partir dos dados do HYCOM foram computadas as médias climatológicas das correntes superficiais e da salinidade, sendo o mesmo procedimento adotado para os

dados do SMOS do ARGO. Para os dados do SMOS, as médias espaciais tiveram uma resolução de $1/4^\circ$ e, portanto, a comparação com os dados do HYCOM somente foi feita quando se calculou a média considerando a mesma resolução espacial do SMOS. Todas as medições disponíveis de salinidade superficial do ARGO foram comparadas com os valores mensais provenientes do SMOS e HYCOM. Tendo como base os dados do SMOS, foram estimados as velocidades e os transportes de água integrados para então obtermos os fluxos de sal e transporte de sal integrado. Os fluxos de sal foram simplesmente calculados como o produto da velocidade, SSM e a densidade média da superfície (aqui considerada como 1.025 kg/m^3).

Os dados remotos correspondentes ao projeto foram obtidos através de acesso às plataformas on-line previamente detalhadas na metodologia do projeto. Sendo posteriormente organizados para análise no Laboratório de Oceanografia Física (LOCF) do Instituto de Ciências Atmosféricas (ICAT). Todos os mapas de corrente e salinidade foram elaborados em ambiente MATLAB conforme mostra **figura 8** abaixo:

Figura 8 - Exemplo do software utilizado MATLAB.



Fonte: Laboratório de Oceanografia Física (LOCF).

A partir da análise dos dados foram calculadas médias mensais e sazonais dos padrões de SSM para a região em estudo. As unidades de medida de SSM estão em **psu**

(do inglês: Practical Salinity Units) e utilizou-se uma escala com valores mínimo de 30 psu e máximo de 40 psu respectivamente.

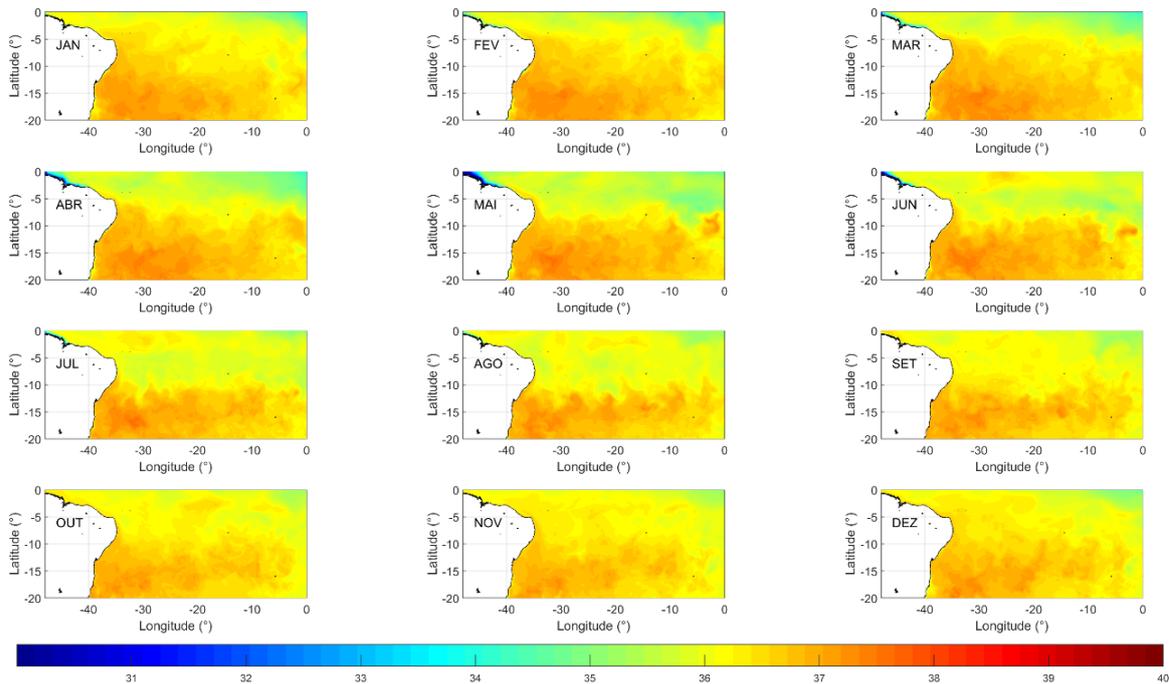
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Variação Espaço/Temporal da Salinidade

A salinidade média do Oceano a nível global é de aproximadamente 34.6 psu, no entanto, há variações significativas devido a processos como a evaporação e a diluição da água marinha pela água proveniente das precipitações e das desembocaduras dos rios. O transporte devido às principais correntes oceânicas também exerce grande influência nessas variações.

Inicialmente foram elaborados mapas de salinidade para a região em estudo correspondentes aos meses do ano conforme se vê na **figura 9**. De acordo com os mapas é possível perceber uma maior concentração na salinidade da superfície do mar na região que cobre aproximadamente entre 10°S - 20°S e 10°O - 40°O, com valores entre 36,5 psu e 38,5 psu aproximadamente (**figura 9**). Tanto para os mapas das médias mensais como também para as sazonais. A concentração nessa faixa de latitude é reflexo do transporte exercido por influência da Corrente do Brasil (CB) que atua ao longo da costa no sentido Norte – Sul. Em geral a CB começa com o ramo sul das águas originadas na Corrente Sul Equatorial (CSE), a partir de sua bifurcação na plataforma continental brasileira à aproximadamente 10°S (**figura 1**). Esse aumento na concentração da salinidade da superfície do mar inicia em meados do mês de Dezembro e se prolonga até Junho, com valores que chegam até os 38,5 psu, e começa a diminuir entre os meses de Julho e meados de Novembro quando os valores decrescem até a faixa entre 36,5 psu e 37 psu (**figura 9**). Correspondendo as estações de Verão/Outono e Inverno/Primavera respectivamente. Como pode ser também observado nos mapas de salinidade sazonais (**figura 10**).

Figura 9 - Mapas de salinidade correspondentes aos meses do ano.

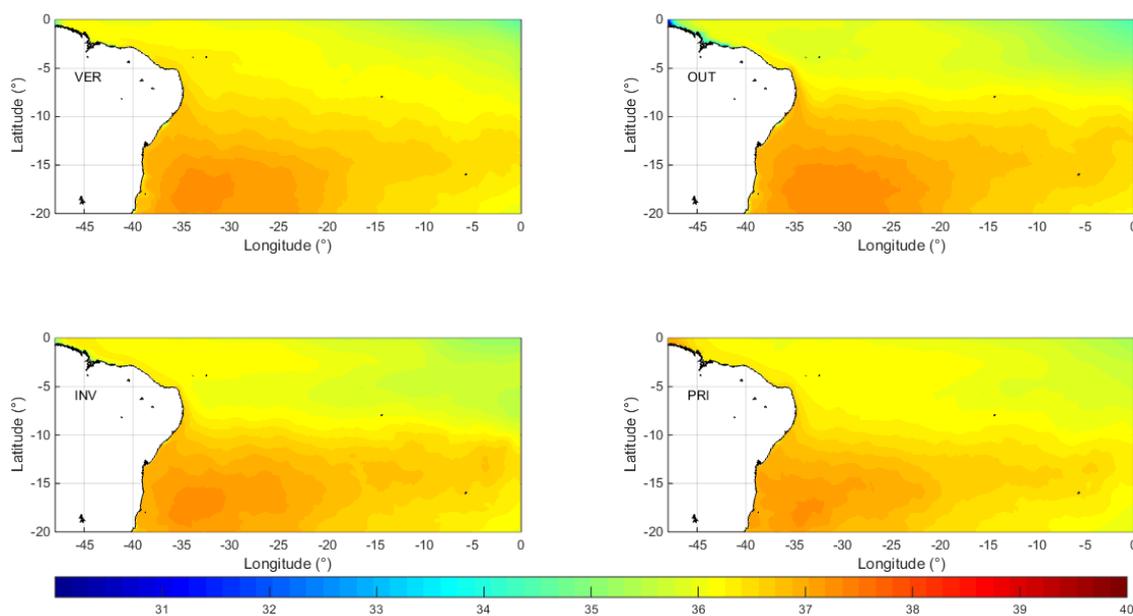


Fonte: Laboratório de Oceanografia Física (LOCF).

Posteriormente foram elaborados os mapas de salinidade sazonais conforme **figura 10**. Há uma diminuição abrupta na salinidade que pode ser facilmente percebida na região da foz do rio Amazonas devido à diluição da água do mar pelo grande volume de água proveniente do rio, com valores que caem até 31,5 psu aproximadamente (**figura 10**). Esse volume de água é transportado ao longo da costa por influência da Corrente Norte do Brasil (CNB). A CNB é o outro ramo da Corrente Sul Equatorial (CSE) que flui em direção ao Hemisfério Norte (**figura 1**).

Esse ciclo sazonal no aumento e diminuição na concentração da salinidade da superfície do mar é um reflexo do aumento da evaporação da água do mar devido ao aumento da radiação solar na estação do Verão no Hemisfério Sul, como também devido à diluição da água marinha na superfície pelo regime de precipitações na estação de Inverno, que diminui a concentração da salinidade superficial do mar (Font e Camps, 2010).

Figura 10 - Mapas de salinidade correspondentes às estações do ano.



Fonte: Laboratório de Oceanografia Física (LOCF).

5.2 Circulação Superficial

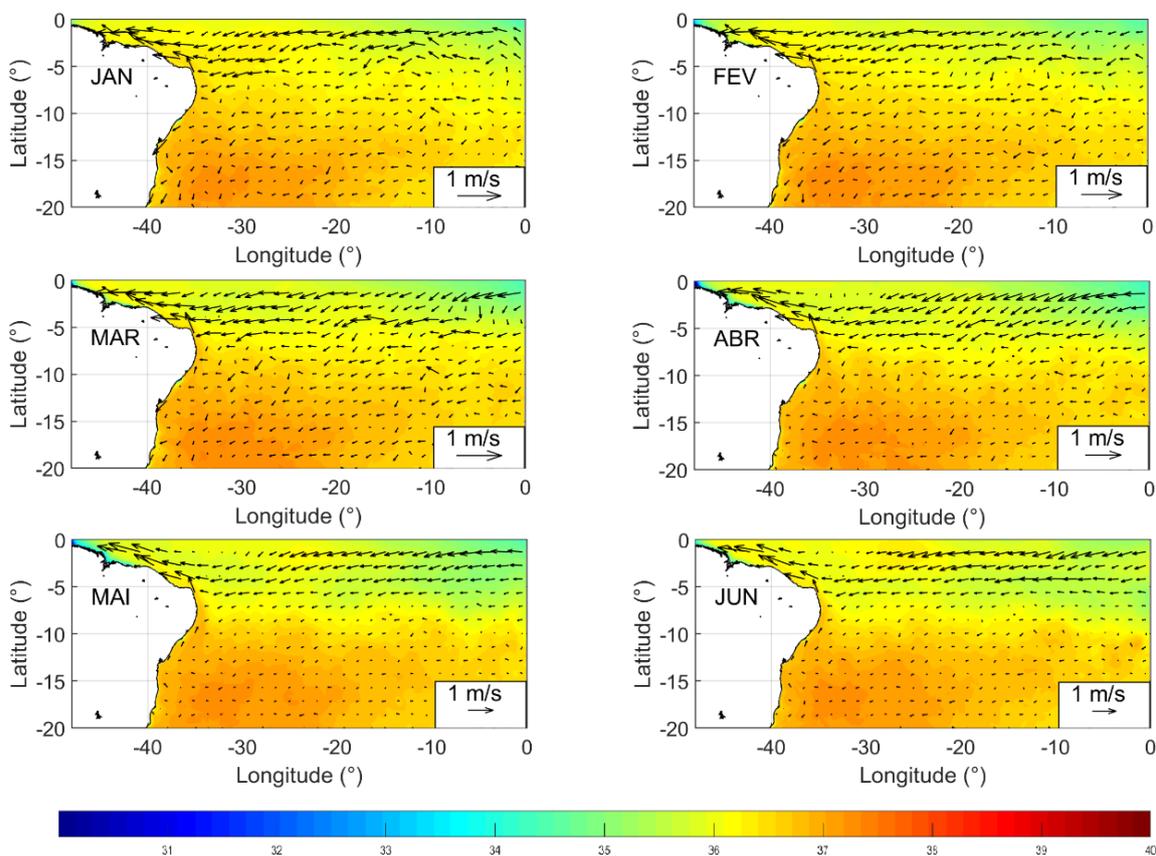
A partir dos dados do modelo numérico (HYCOM), dos produtos de sensores instalados em satélites (SMOS) e de medições *in situ* da salinidade na superfície do mar oriundas da rede de flutuadores ARGO, foram produzidas as análises da variação espacial das correntes de superfície e salinidade médias no Oceano Atlântico Sul, mais especificamente no litoral e áreas adjacentes às regiões Norte e Nordeste do Brasil.

Os mapas da variação das correntes e salinidade, conforme consta na **figura 11a** e **figura 11b**, foram produzidos a partir das médias climatológicas para o período compreendido entre Janeiro de 2011 até Dezembro de 2020.

É possível perceber claramente nos mapas uma faixa mais intensa de corrente na altura da latitude 5°S aproximadamente, o que corresponde à Corrente Sul Equatorial (CSE), com valores de velocidade de corrente em torno de $0,4\text{ m/s}$. Também é possível

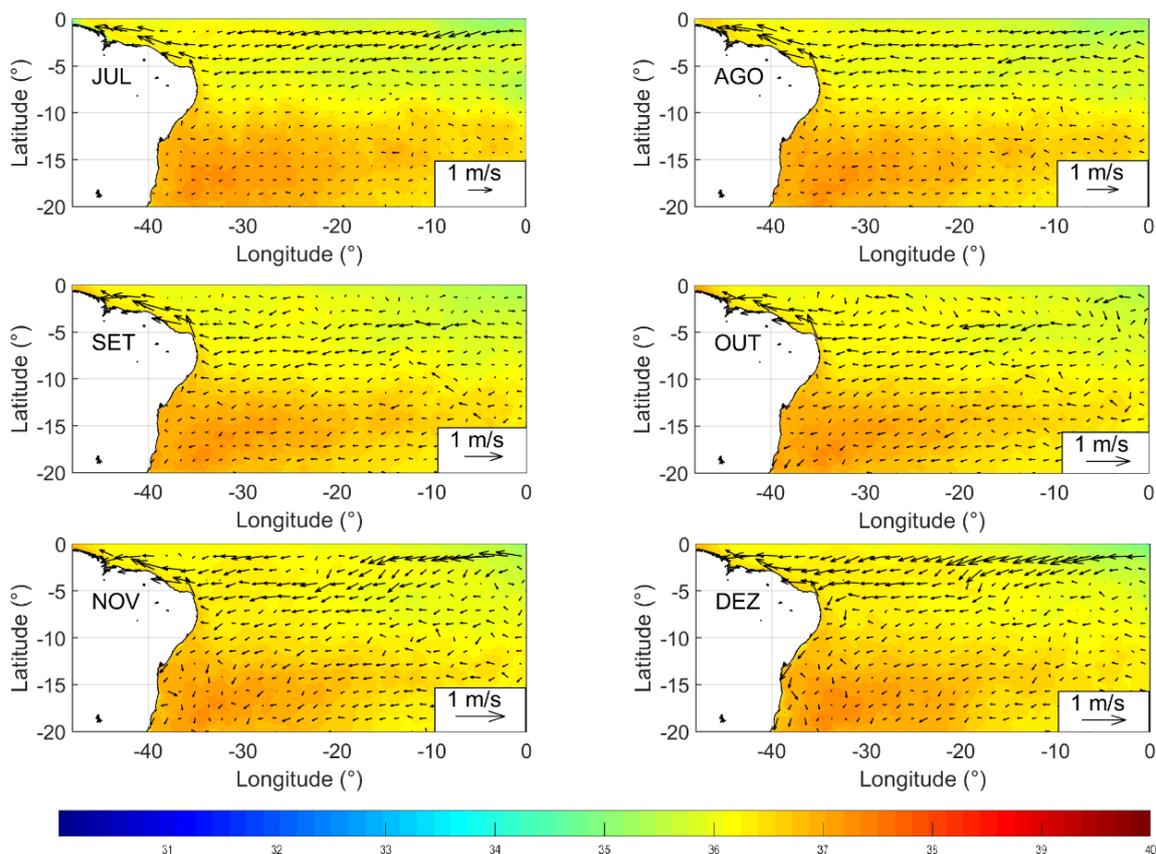
distinguir duas correntes importantes, a Corrente Norte do Brasil (CNB) e a Corrente do Brasil (CB), com valores aproximados de 0,5 m/s e 0,3 m/s (**figura 11a e 11b**). Estas são correntes de contorno oeste do Atlântico Sul que se originam a partir da bifurcação da Corrente Sul Equatorial (CSE) na plataforma continental brasileira, aproximadamente entre 5°S e 10°S. Sendo que Corrente Norte do Brasil (CNB) flui em direção ao norte e a Corrente do Brasil (CB) flui em direção ao sul.

Figura 11a - Mapas de distribuição espaço temporal da corrente sobreposta à salinidade (janeiro a junho).



Fonte: Laboratório de Oceanografia Física (LOCF).

Figura 11b - Mapas de distribuição espaço temporal da corrente sobreposta à salinidade (julho a dezembro).



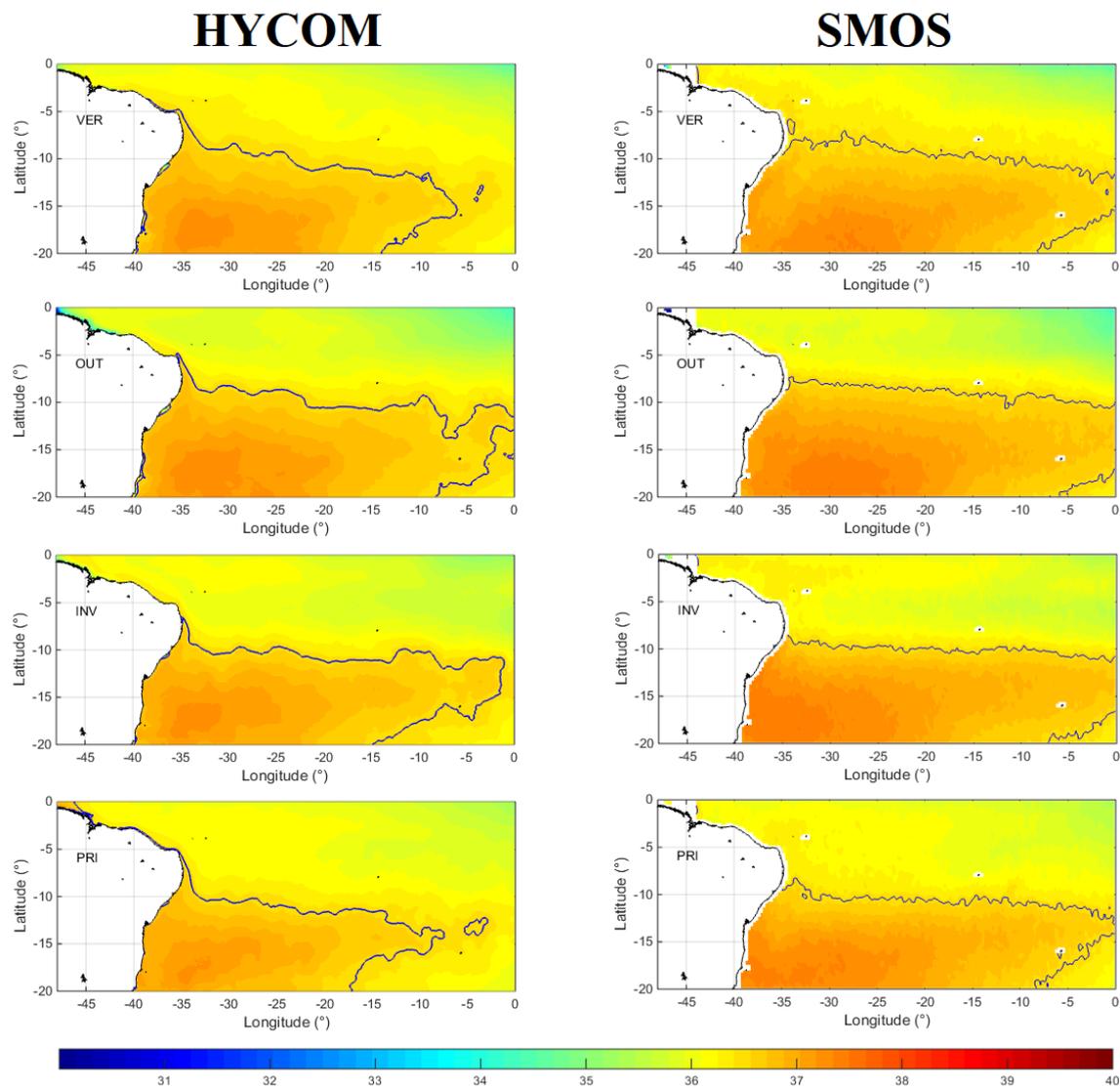
Fonte: Laboratório de Oceanografia Física (LOCF).

5.3 Comparativo entre os Mapas de Salinidade

Também com base nos dados do HYCOM, SMOS e ARGO foi possível elaborar mapas da variação sazonal e de distribuição espacial dos campos de salinidade da superfície do mar para o Oceano Atlântico Sul. Os mapas na **figura 12** e **figura 13** fazem um comparativo entre os dados do HYCOM e SMOS (**figura 12**) e entre os dados do HYCOM e ARGO (**figura 13**), respectivamente.

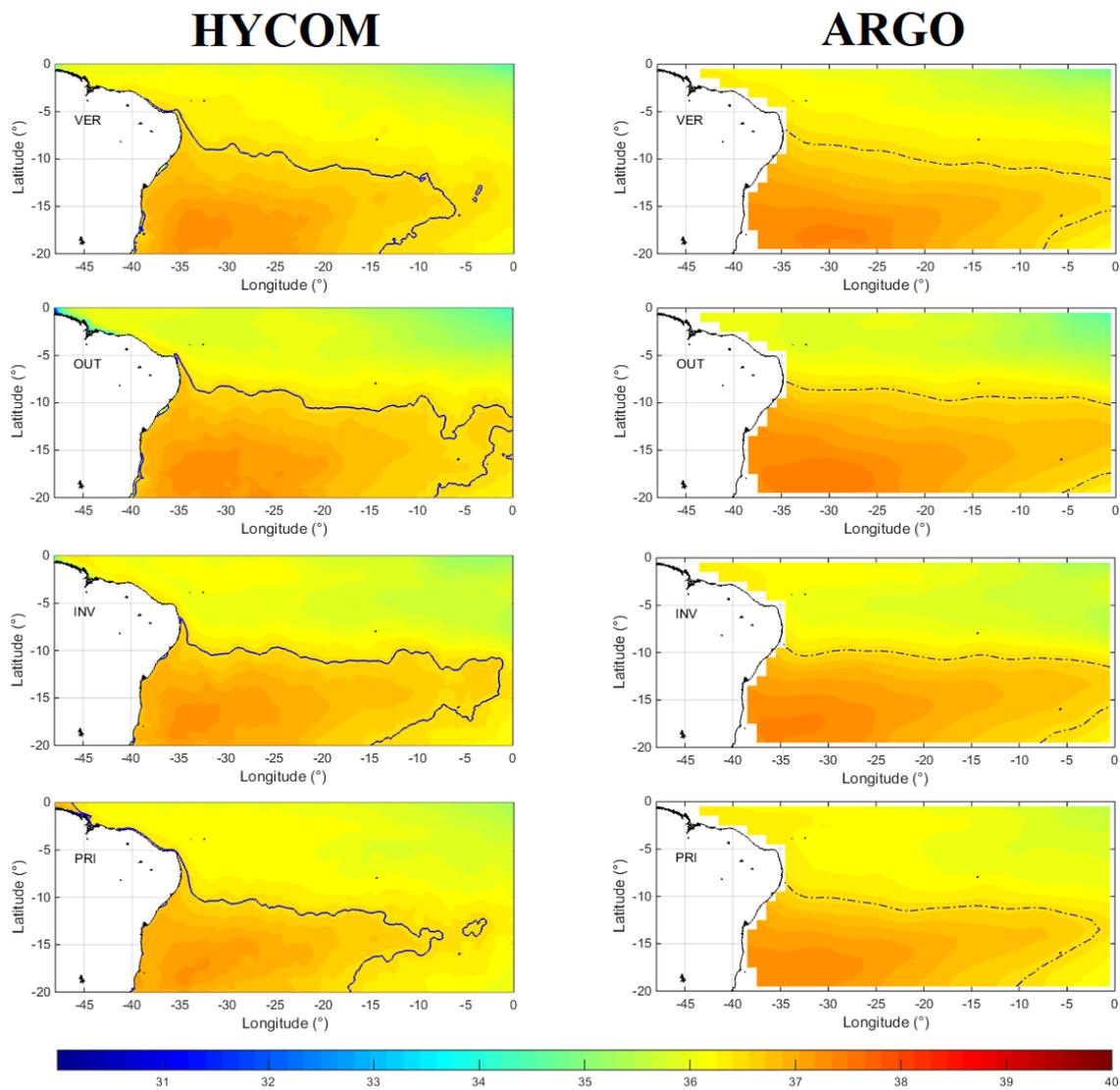
Todos os mapas de distribuição espacial da salinidade na **figura 12** e **figura 13** também foram produzidos a partir das médias climatológicas para o período compreendido entre Janeiro de 2011 até Dezembro de 2020. Os contornos em azul marinho nos mapas correspondem à salinidade de referência **34.6 psu** (do inglês: Practical Salinity Units).

Figura 12 - Mapas comparativos de salinidade sazonal dos dados do modelo HYCOM (coluna à esquerda) e do satélite SMOS (coluna à direita).



Fonte: Laboratório de Oceanografia Física (LOCF).

Figura 13 - Mapas comparativos de salinidade sazonal dos dados do modelo HYCOM (coluna à esquerda) e da rede de flutuadores ARGO (coluna à direita).



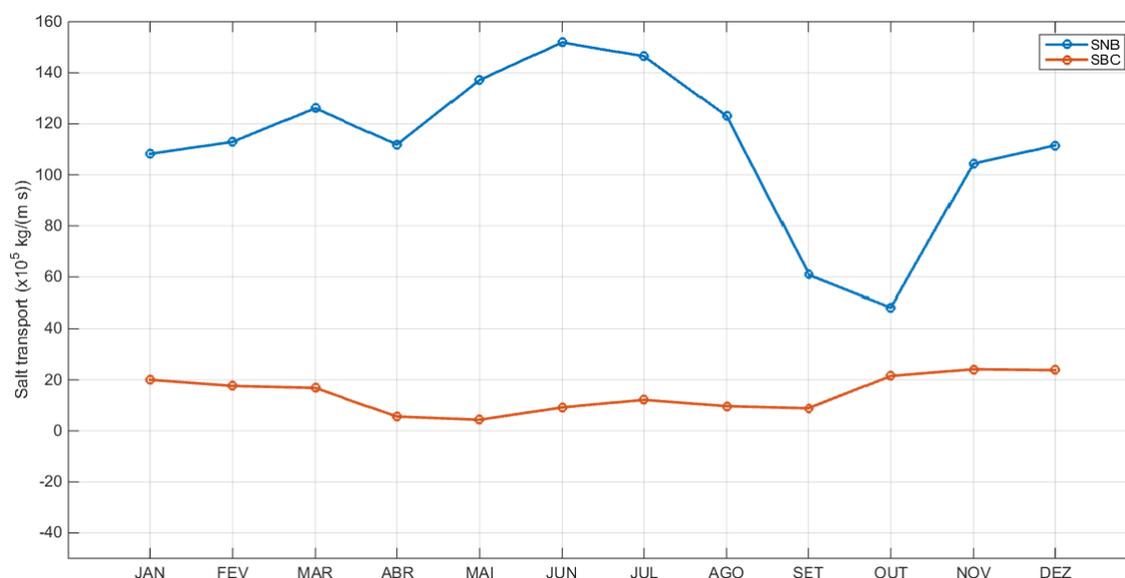
Fonte: Laboratório de Oceanografia Física (LOCF).

5.4 Transporte de Sal Integrado

A partir das análises dos campos de corrente superficial foi possível estimar a circulação residual para a SNB (Subcorrente Norte do Brasil) e SBC (Corrente do Brasil), as quais foram decompostas em suas componentes, com 0,3 m/s para a componente zonal da SNB e 0,04 m/s para a componente meridional da SBC.

Também foi possível a partir das estimativas das velocidades e transportes de água integrados obter os fluxos de sal e transporte de sal integrados, conforme mostra a **figura 14**. Os fluxos de sal foram calculados como o produto da velocidade, salinidade superficial (SSM) e densidade média da superfície (aqui considerada como **1025 kg/m³**).

Figura 14 - Gráfico do transporte de sal calculado para as correntes SNB e SBC.



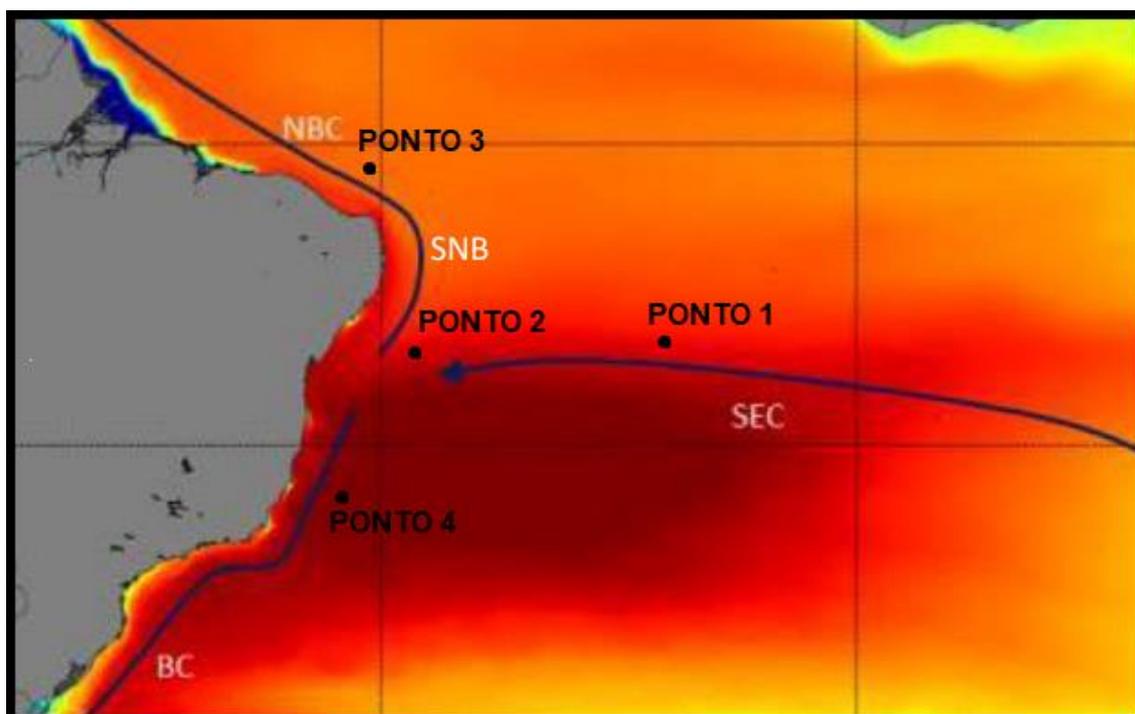
Fonte: Laboratório de Oceanografia Física (LOCF).

É possível perceber a existência de uma sazonalidade no transporte da SNB, com um pico entre os meses de maio e julho, com valores em torno de $145 \times 10^5 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$. Já para a SBC, não há muita sazonalidade, apresentando valores mais constantes em torno de $20 \times 10^5 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$.

5.5 Diagramas Temperatura-Salinidade (Diagramas TS)

Para a análise das massas de água foram escolhidos quatro pontos dentro da área do presente estudo conforme ilustra a **figura 15**. Os dados utilizados são de medições *in situ* da temperatura e salinidade na superfície do mar oriundas da rede de flutuadores ARGO, cobrindo todo o período de estudo, de Janeiro de 2011 a Dezembro de 2020.

Figura 15 - Mapa com os pontos escolhidos para avaliação das massas de água.

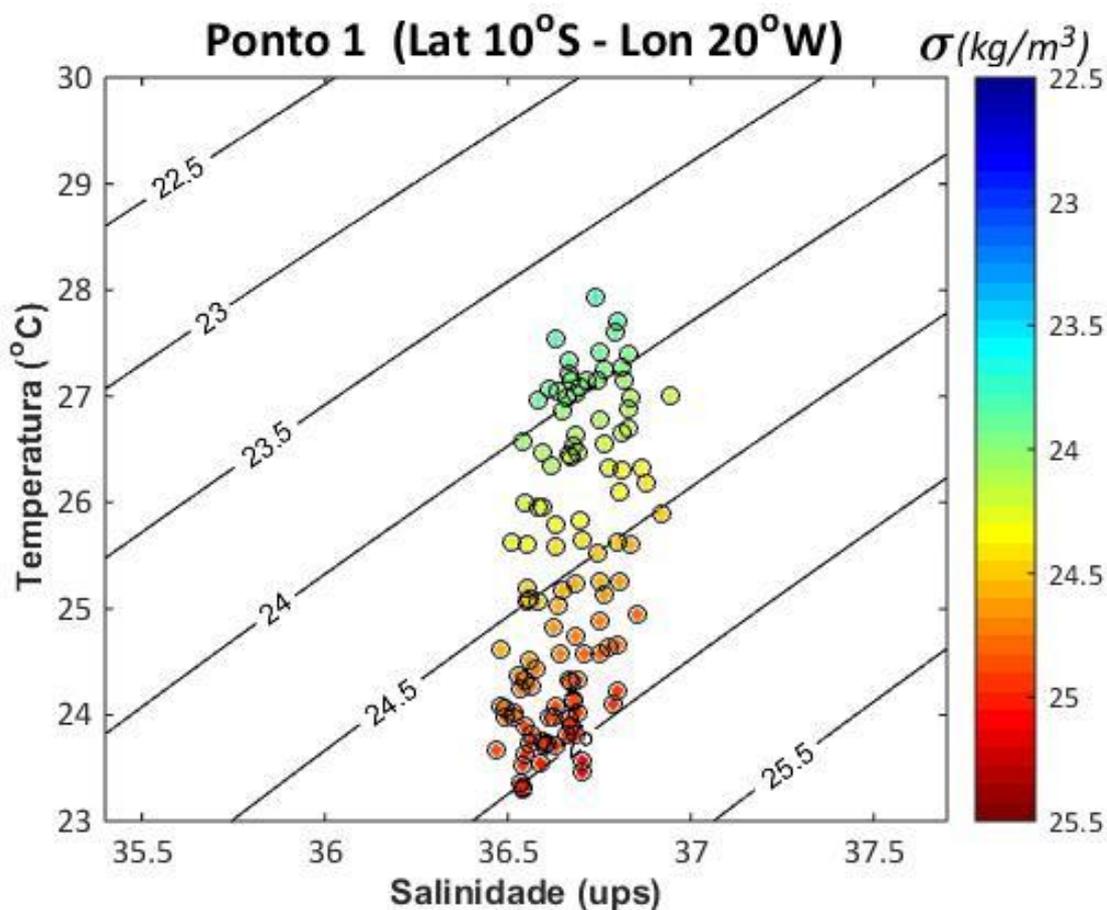


Fonte: Laboratório de Oceanografia Física (LOCF).

Os pontos foram selecionados correspondendo às principais correntes no Oceano Atlântico Sul. O **Ponto 1** correspondendo à região oceânica da Corrente Sul Equatorial. O **Ponto 2** correspondendo também a Corrente Sul Equatorial, porém na região mais próxima à plataforma continental, aproximadamente onde ocorre a bifurcação que vai originar a Corrente Norte do Brasil seguindo para o norte e a Corrente do Brasil seguindo para o Sul. E finalmente o **Ponto 3** e o **Ponto 4**, já em regiões mais próximas à costa, correspondendo à Corrente Norte do Brasil e à Corrente do Brasil, respectivamente.

A partir dos pontos selecionados, foram elaborados os diagramas de temperatura e salinidade (diagrama TS). O diagrama do Ponto 1 (**figura 16**), situado na região oceânica da Corrente Sul Equatorial, apresenta pouca variabilidade na salinidade, com valores ao redor de 36,6 psu e apresenta uma faixa de valores de temperatura entre 23°C e 28°C, valores mais frios que as águas costeiras.

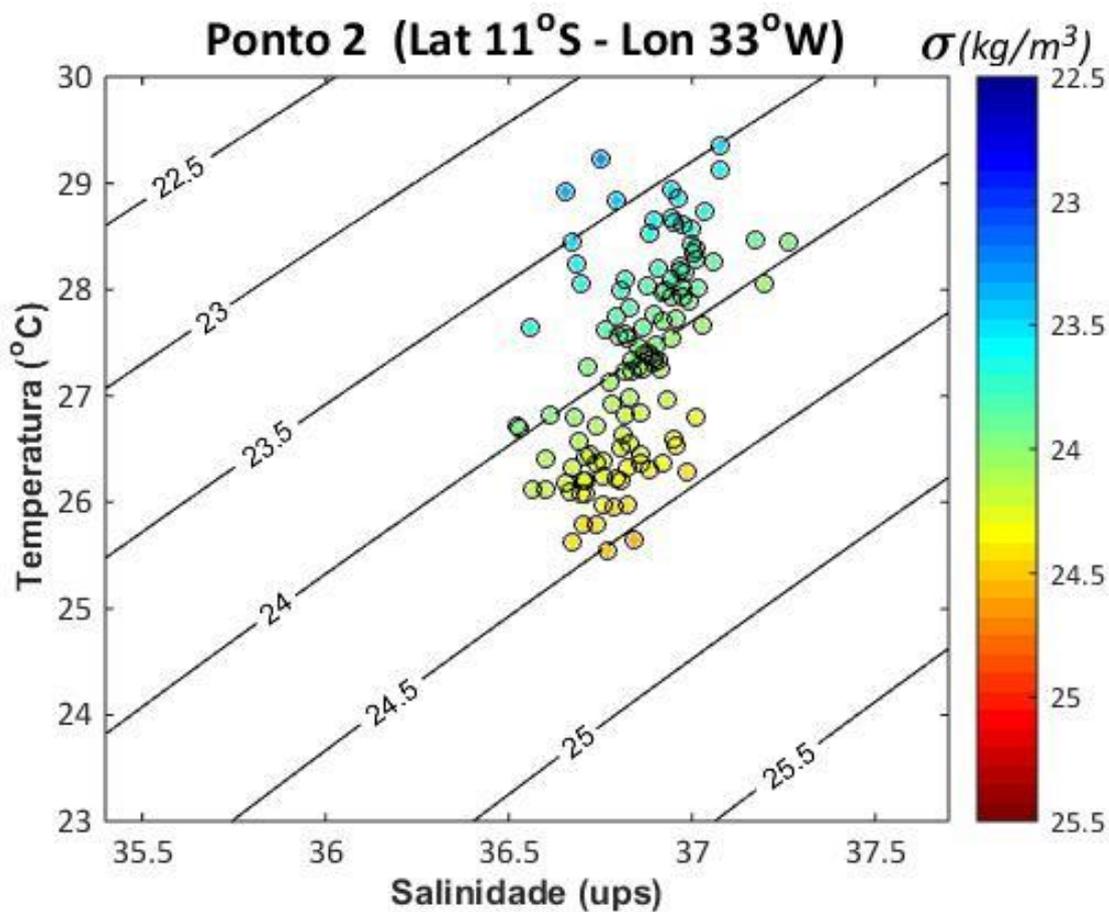
Figura 16 - Diagrama TS correspondente ao Ponto 1 (latitude 10° Sul e longitude 20° Oeste).



Fonte: Laboratório de Oceanografia Física (LOCF).

Já o diagrama do Ponto 2 (**figura 17**), situado também na Corrente Sul Equatorial, porém em uma região já mais próxima da plataforma continental, apresenta também valores de salinidade ao redor de 36,6 psu, porém com valores de temperatura mais quentes, entre 25,5°C e 29,5°C, o que é de se esperar para uma região mais próxima da costa.

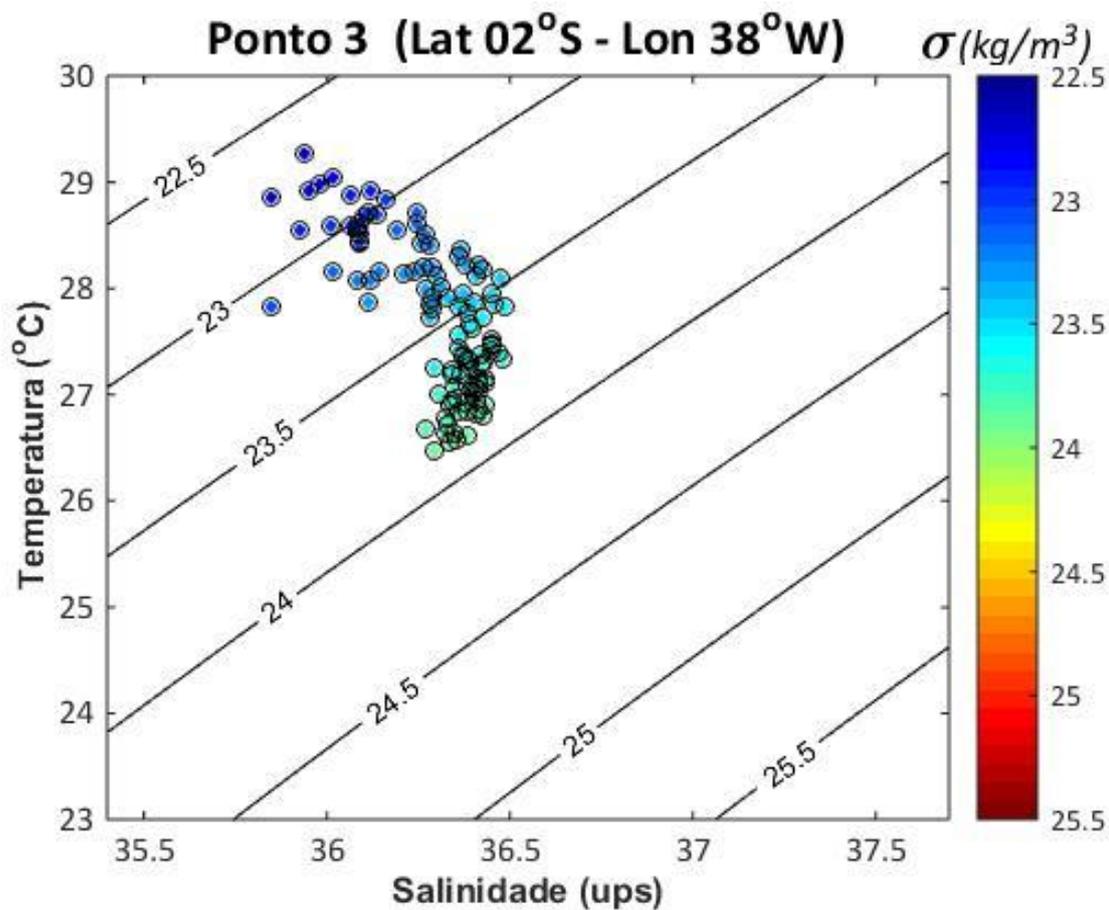
Figura 17 - Diagrama TS correspondente ao Ponto 2 (latitude 11° Sul e longitude 33° Oeste).



Fonte: Laboratório de Oceanografia Física (LOCF).

O diagrama do Ponto 3 (**figura 18**), situado na Corrente Norte do Brasil, já em uma região ainda mais próxima da costa e em latitude mais próxima ao Equador, apresenta maior variação na salinidade, com valores mais baixos entre 35,7 psu e 36,5 psu e apresenta uma faixa de valores de temperatura entre 26°C e 29,5°C.

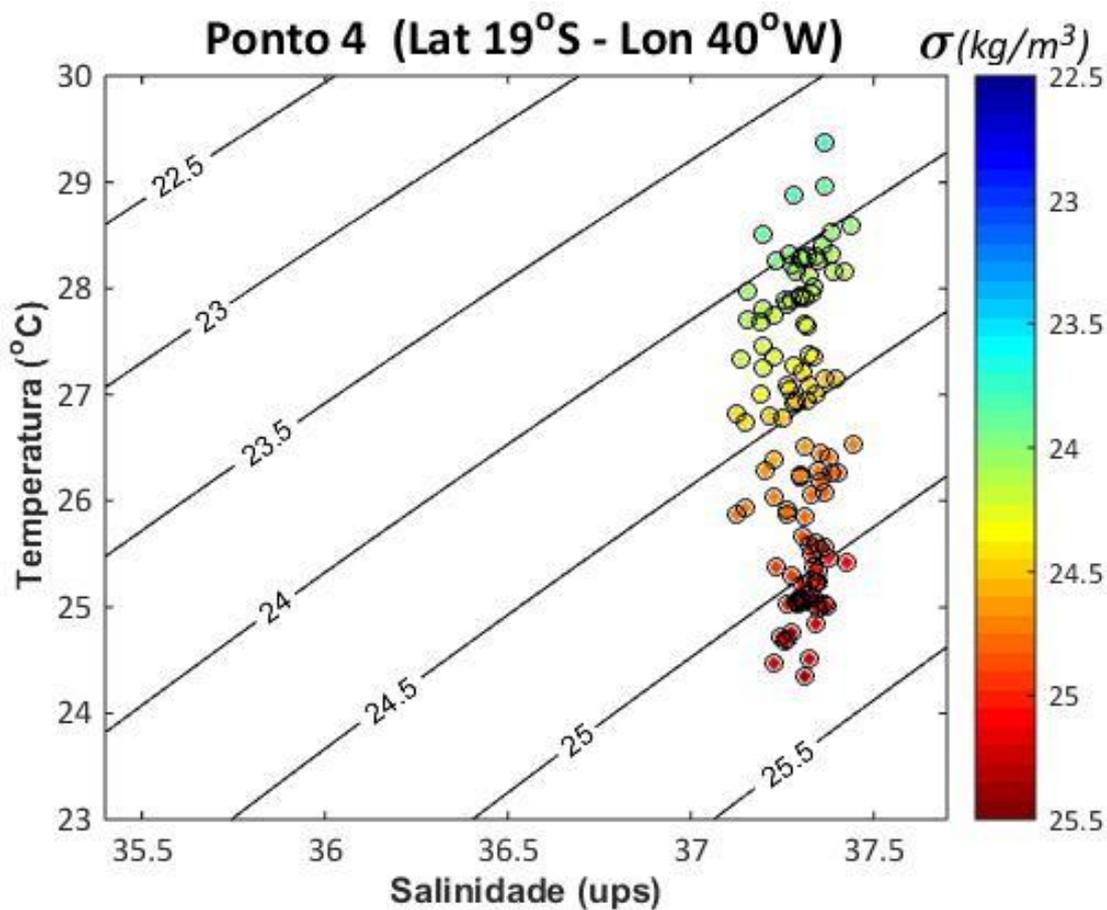
Figura 18 - Diagrama TS correspondente ao Ponto 3 (latitude 02° Sul e longitude 38° Oeste).



Fonte: Laboratório de Oceanografia Física (LOCF).

E por fim o diagrama do Ponto 4 (**figura 19**), situado já na Corrente do Brasil, em uma região também próxima da costa, porém em latitudes mais altas, apresenta valores de salinidade mais altos entre 37 psu e 37,5 psu e uma faixa de valores de temperatura mais extensa, entre 24°C e 29,5°C, refletindo uma maior influência sazonal.

Figura 19 - Diagrama TS correspondente ao Ponto 4 (latitude 19° Sul e longitude 40° Oeste).

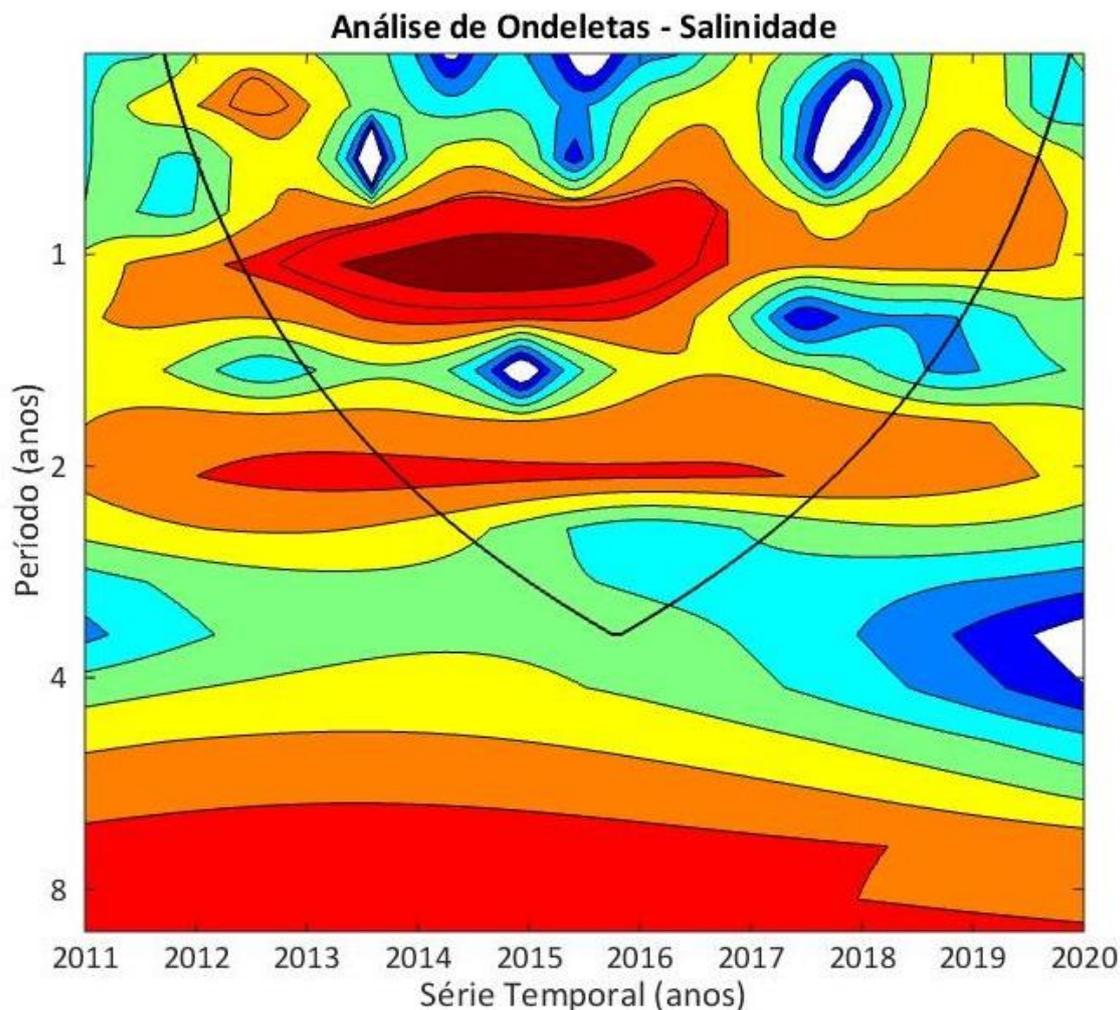


Fonte: Laboratório de Oceanografia Física (LOCF).

5.6 Análise de Ondeletas (Wavelets)

Para a avaliação das periodicidades de salinidade e temperatura foi utilizado a técnica de ondeletas. E então elaborados os gráficos como mostram a **figura 20** e a **figura 21**, respectivamente. A análise de ondeletas para a salinidade (**figura 20**) demonstra que, dentro dos 95% do intervalo de confiança, há uma predominância na frequência de 1 ano sendo contínua entre os anos 2012 e 2017, não sendo detectada para os anos a partir de 2017. Apresentando também variabilidade com oscilações de períodos mais longos de dois anos entre 2014 e 2017.

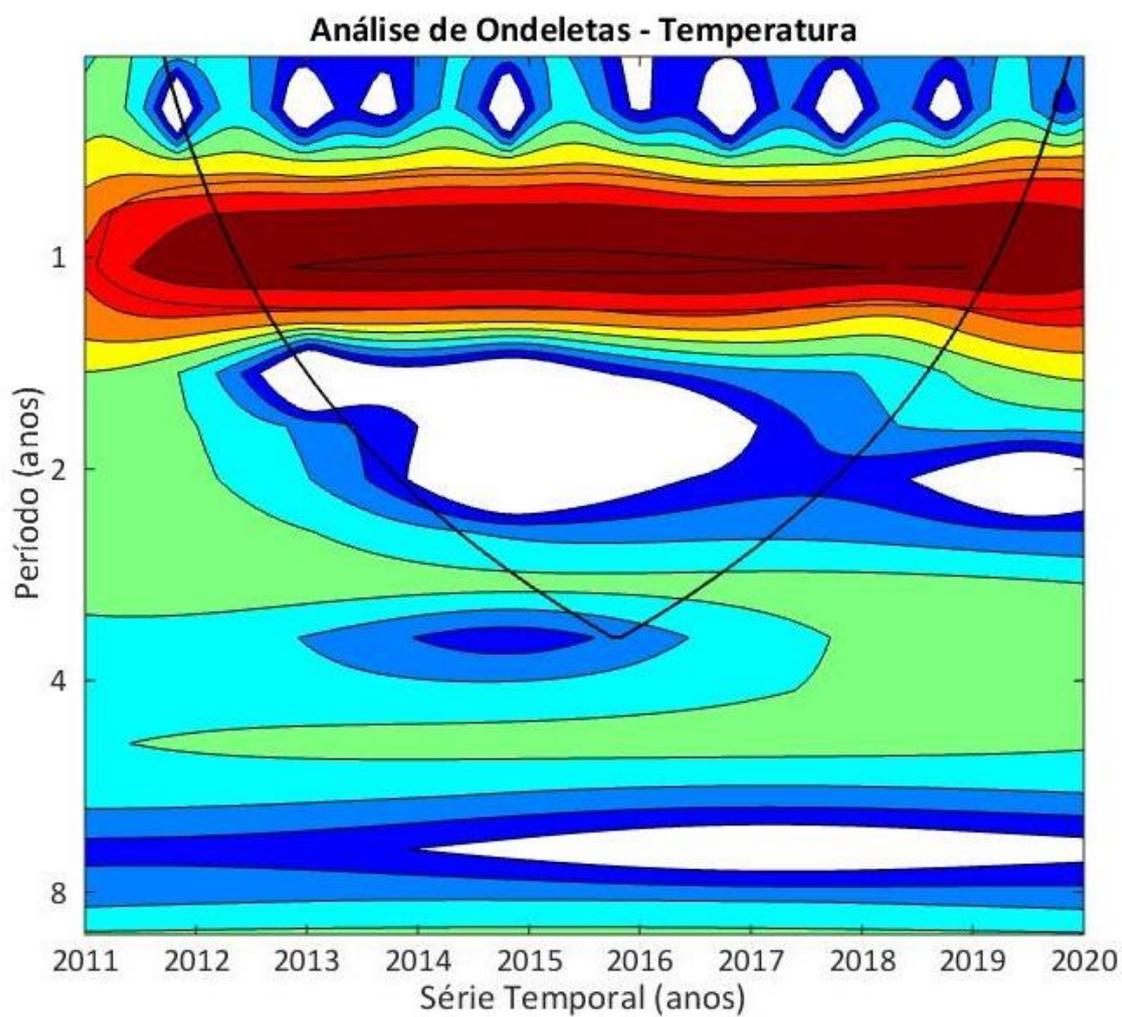
Figura 20 - Gráfico da análise de ondeletas para a salinidade.



Fonte: Laboratório de Oceanografia Física (LOCF).

Por fim, a análise de ondeletas para a temperatura (**figura 21**) demonstra grande variabilidade com oscilações de períodos curtos, em torno de um ano, durante praticamente todo o intervalo de estudo, entre os anos de 2011 e 2020.

Figura 21 - Gráfico da análise de ondeletas para a temperatura.



Fonte: Laboratório de Oceanografia Física (LOCF).

6 CONCLUSÃO

Foi possível concluir com o presente trabalho que há uma variabilidade bem definida na distribuição espaço-temporal da salinidade da superfície do mar, tanto mensal quanto sazonal.

Para as correntes ficou revelado que há uma distinção clara entre a Corrente Sul Equatorial (CSE), a Corrente Norte do Brasil (CNB) e a Corrente do Brasil (CB). As correntes se apresentam mais fracas entre Maio e Agosto, e mais fortes entre Novembro e Março.

A variação sazonal dos campos de salinidade da superfície do mar (SSM) indicou uma distribuição espaço-temporal bastante semelhante entre os dados do modelo HYCOM e os dados do satélite SMOS, bem como entre os dados do HYCOM e os da base de dados da rede de flutuadores do ARGO.

Para a circulação residual, com base nos campos de corrente superficial, encontramos os valores das direções principais da SNB e SBC. Sendo 0.3 m/s para a componente zonal da SNB e 0.04 m/s para a componente meridional da SBC.

O transporte de sal integrado indicou a existência de uma sazonalidade no transporte da SNB, onde os meses com velocidades menores das correntes, permitem uma maior penetração da SNB fluindo para norte, e quando as correntes são fortes, contrapõem este fluxo, resultando em valores menores. Já para a SBC, como está localizada mais à sul, aproximadamente 10°S, não há muita influência das correntes, pois as mesmas mantêm valores médios com magnitudes semelhantes, sem muita variação sazonal.

Os diagramas TS revelaram as diferentes propriedades físicas das principais correntes superficiais do Oceano Atlântico Sul. Cada estação apresentou características correspondentes às correntes e região de origem e uma distinção clara entre a Corrente Sul Equatorial (CSE), a Corrente Norte do Brasil (CNB) e a Corrente do Brasil (CB).

E por fim, a análise de ondeletas indicou uma grande variação de periodicidade para a salinidade, tanto em baixa frequência, em torno de um ano, como também na faixa de frequência em torno de dois anos. Já a temperatura demonstra variação apenas na faixa de baixa frequência, em torno de um ano, para todo o período de estudo.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDREOLI, R. V.; M. T. KAYANO. **Multi-scale variability of the sea surface temperature in the Tropical Atlantic**, J. Geophys. Res. 2004, 109, C05009, doi:10.1029/2003JC002220.

BROECKER, W. **Massive ice berg discharges as triggers for global climate change**. Nature 1994, v. 372, p. 421-424.

FONT, J. et al. **SMOS: The challenging sea surface salinity measurement from space**. Proc. IEEE 2010, 98, 649–654.

GARZOLI, S. L.; MATANO, R. **The South Atlantic and the Atlantic Meridional Overturning Circulation**. Deep Sea Res. II 2011, 58, 1837–1847.

HAARSMA, R. J.; CAMPOS, E.; HAZELEGER, W. **Influence of the meridional overturning circulation on tropical Atlantic climate and variability**. J. Clim. 2008, 21, 1403–1416.

JOHNS, W. E. et al. **Annual cycle and variability of the North Brazil Current**. Journal of Physical Oceanography 1998, v.28, n.1, pp. 103- 128.

JOHNS, W. E. et al. **The North Brazil Current Retroflection: Seasonal Structure and Eddy Variability**. Journal of Geophysical Research 1990, v. 95, n.C12, p. 22103-22120.

KERR, Y. et al. **The SMOS mission: New tool for monitoring key elements of the global water cycle**. Proc. IEEE 2010, 98, 666–687.

MASSON, S.; DELECLUSE, P. **Amazon River runoff on the tropical Atlantic**. Phys. Chem. Earth B 2001, 26, 137–142.

MCMULLAN, K. D. et al. **SMOS: The payload**. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2008, 46, 594–605.

OLMEDO, E. et al. **Debiased non-Bayesian retrieval: A novel approach to SMOS sea surface salinity**. Remote Sens. Environ. 2017, 193, 103–126.

SCHETTINI C. A. F. et al. **Seasonal variability of water masses and currents at the eastern Brazilian continental shelf (7.5–9° S)**. *Regional Studies in Marine Science*. 2017, 16, 131-144.

TORRENCE, C.; G. P. COMPO. **A Practical Guide to Wavelet Analysis**. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 1998, 79, 61-78.

WENG, H.; K. -M. LAU. **Wavelets, period doubling, and time-frequency localization with application to organization of convection over the tropical western Pacific**. *J. Atmos. Sci.* 1994, 51, 2523-2541.