



Universidade de Aveiro

Ano 2021

**Enoque Canganjo**

**Vasco**

**Hidrologia e Dinâmica das águas da Zona  
Económica Exclusiva Angolana**



**Universidade de Aveiro**  
**Ano 2021**

**Enoque Canganjo**  
**Vasco**

**Hidrologia e dinâmica das águas da Zona**  
**Económica Exclusiva Angolana**

Tese apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Doutor em Ciências, Tecnologia e Gestão do Mar – Gestão sustentável dos recursos Marinhos, Programa Doutoral DO\*Mar, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor Jesus Manuel Pedreira Dubert, Professor Auxiliar do Departamento de Física da Universidade de Aveiro, Prof. Doutor Paulo José Relvas de Almeida, Professor Auxiliar da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade do Algarve e Doutora Maria Rita Nolasco, Investigadora da Universidade de Aveiro.

Dedico este trabalho à minha querida mãe, Avelina Chinossolo, à minha companheira e querida esposa, Benvinda Vasco, aos meus filhos Suzanete Canjala Vasco, Avelina Vasco, Rosa Vasco e Egas Vasco, aos meus irmãos e parentes.

## **O júri**

Presidente

Doutora Maria Adelaide Pinho Almeida  
Professora Catedrática da Universidade de Aveiro

Vogais

Doutor João Miguel Sequeira Silva Dias  
Professor Catedrático da Universidade de Aveiro

Doutora Carmen González Castro  
Investigadora Científica Titular do Instituto de Investigacións Mariñas  
do Consejo Superior de Investigaciones Científicas

Doutor Álvaro Júdice Ribeiro Peliz  
Professor Auxiliar da Universidade de Lisboa

Doutor Jesús Manuel Pedreira Dubert  
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro (Orientador)

Doutora Alexandra Maria Francisco Cravo  
Professora Auxiliar da Universidade do Algarve



## Agradecimentos

Exprimo os meus sinceros agradecimentos aos meus orientadores: Prof. Doutor Jesus Manuel Pedreira Dubert, o Professor Doutor Paulo José Relvas de Almeida e a Doutora Maria Rita Nolasco, pelo prestimoso encorajamento, orientações, ajuda técnica e conselhos, que incansavelmente prestaram na elaboração deste trabalho.

À Universidade de Aveiro, Departamento de Física pela cedência das Instalações do Edifício Complexo Interdisciplinar das Ciências Físicas Aplicadas atório de Nanotecnologia e à Oceanografia, Laboratório de Oceanografia Física, em especial o Doutor Nuno Cordeiro pela ajuda para o desenvolvimento deste trabalho.

À Universidade de Vigo, precursora do programa Doutoral DO\*MAR, ministrado em várias Universidades espanholas e portuguesas, sendo a maior parte das disciplinas curriculares (cursos).

À Doutora Carmen Gonzalez Castro, Investigadora de Investigação Marinha de Vigo, Espanha, e ao Doutor Paulo N. B. Oliveira, Investigador do Instituto Português do Mar e da Atmosfera, Lisboa, que foram os Supervisores da Comissão de Acompanhamento da Tese durante os anos de formação, pelas sábias indicações de objectivos e rumo a seguir.

Ao Ministério das Pescas e do Mar da República de Angola, em especial Sua Excelentíssima Ministra Victória de Barros Neto, que gentilmente cedeu a bolsa de estudo para a concretização e cumprimento do Programa Doutoral “DO\*MAR” em Ciências, Tecnologia e Gestão do Mar.

À Direcção Geral e Técnica do Instituto Nacional de Investigação Pesqueira e do Mar de Angola pela autorização pela permissão do acesso aos dados.

Ao Programa Nansen, Instituto Norueguês, que gentilmente, nas pessoas dos Doutores Marek Ostrowski e Inês Bernardes pela cedência de dados (<http://www.imr.no/forskning/utviklingssamarbeid/eaf/nansen/programmet/nansis/en>) dos Cruzeiros Nansen do período entre 1994 à 2014 analisados neste trabalho.

Ao Programa PREFACE, pelos Cruzeiros de Investigação pelos Cruzeiros de Investigação onde tivemos a oportunidade de fazer parte.

A todos colegas do INIP, em especial do Centro Regional de Investigação Pesqueira e do Mar de Benguela, pelo apoio moral e encorajamento.

**Palavras-chave** Sistema de correntes Angola-Benguela, Cruzeiros oceanográficos, Medições hidrográficas, CTD, Detecção remota, SST, SSH, SSS, Climatologia oceânica, Anomalias interanuais.

## Resumo

A costa de Angola situa-se entre as regiões tropical a norte e subtropical a sul da costa ocidental Africana, entre as latitudes de 5° S (Cabinda) e 17° 15' S (Cunene). Tem cerca de 1650 km de extensão e possui duas estações principais bem definidas, denominadas estações quente e fria (Verão e Inverno austrais, respetivamente). As precipitações diminuem gradualmente de Norte para Sul, sob influência dos ventos Alísios de Sudeste. A Corrente quente de Angola, consiste num escoamento estreito entre a superfície e cerca de 250 m, na margem continental, fluindo para Sul e é alimentada pelo transporte para este das correntes equatoriais. A sul, está localizado o sistema de Correntes de Benguela que escoam para Norte, consequência do forçamento resultante dos ventos alísios, favorável ao afloramento. A interação entre estes dois sistemas, resulta no sistema frontal Angola - Benguela. Existem observações históricas de grande escala, mas um número escasso de estudos é dedicado à margem angolana. Tendo por base os dados recolhidos historicamente pelo navio "Dr. Fridtjof Nansen", no âmbito do programa Nansen, entre 1984 - 2014 disponibilizados pelo Institute of Marine Research (IMR), foi possível realizar um estudo da hidrografia e das correntes associadas a duas campanhas oceanográficas realizadas nas estações quente (Março) e fria (Agosto) durante esses anos. Após uma revisão da bibliografia e de um enquadramento histórico é feito um estudo consistente na análise de dados de satélite de superfície de diferentes parâmetros físicos (SST, SSS, SLA) para pôr em evidência os mecanismos de forçamento remoto através de ondas de Kelvin equatoriais (IEKW) entre outros. Descreve-se a climatologia da margem continental angolana com base nos dados *in situ* (1994 - 2014) disponíveis, previamente analisados, por forma a caracterizar esta em termos dos valores médios climatológicos. Posteriormente, por comparação com os valores climatológicos, são calculadas e analisadas as anomalias em relação à climatologia, para identificação de anos extremos, quentes e frios, que são estudados em detalhe num capítulo dedicado à análise de secções de anos extremos representativos por comparação com as secções climatológicas anteriormente descritas. Ao mesmo tempo que as condições hidrológicas clássicas, foi estudada a distribuição horizontal e vertical do oxigénio dissolvido. Foram identificadas regiões com baixos valores de oxigénio associadas às águas centrais (hipoxia), assim como as regiões de transição com a superfície, e os mecanismos principais que explicam os afloramentos de águas com baixo teor de oxigénio dissolvido, em direção às camadas superficiais.

**Keywords**

Angola-Benguela current system, Oceanographic cruises, Hydrographic measurements, CTD, Remote sensing, SST, SSH, SSS, Ocean climatology, Temperature, Salinity, Oxygen, Interannual anomalies.

**Abstract**

The coast of Angola is located between the tropical and the subtropical regions of the West African coast, between latitudes 5° S (Cabinda) and 17° 15' S (Cunene). It is about 1650 km long and has two well-defined main seasons, called hot and cold (austral summer and winter, respectively). Precipitations gradually decreases from North to South, under the influence of the Southeast trade winds. The warm Angolan current, consisting of a narrow flow between the surface and about 250 m on the continental margin, flows south and is fed by the eastward transport of the equatorial currents. In the south, is located the Benguela Current system that flows in the equatorward direction, as a result of the forcing from the (upwelling favourable) trade winds. The interaction between these two systems results in the Angola - Benguela frontal system. Large-scale historical observations exist, but a scarce number of studies are devoted to the Angolan margin. Based on the data historically collected by the R/V "Dr. Fridtjof Nansen" as part of the Nansen programme between 1984 - 2014 made available by the Institute of Marine Research (IMR), it was possible to carry out a study of the hydrography and currents associated with two oceanographic cruises carried out in the warm (March) and cold (August) seasons during those years. After a review of the bibliography and a historical framework, a consistent study is made on the analysis of surface satellite data of different physical parameters (SST, SSS, SLA) to highlight the remote forcing mechanisms through equatorial Kelvin waves (IEKW) among others. The climatology of the Angolan continental margin is described on the basis of the available in situ data (1994 - 2014), previously analysed, in order to characterise it in terms of climatological mean values. Subsequently, by comparison with climatological values, anomalies in relation to climatology are calculated and analysed, in order to identify extreme years, hot and cold, which are studied in detail in a chapter dedicated to the analysis of representative extreme year sections by comparison with the climatological sections previously described. At the same time as the classical hydrological conditions, the horizontal and vertical distribution of dissolved oxygen was studied. Regions with low oxygen values associated with central waters (hypoxia) were identified, as well as the transition regions with the surface, and the main mechanisms explaining the upwelling of low dissolved oxygen waters towards the surface layers.

## Índice

Índice .....	I
Índice de Figuras.....	III
Acrónimos/Abreviaturas.....	VII
 1.0. INTRODUÇÃO GERAL .....	 1
1.1. Introdução. ....	1
1.2. Corrente de Angola. ....	3
1.3. Giro de Angola. ....	5
1.4. Corrente de Benguela .....	6
1.5. O Sistema Frontal Angola-Benguela. ....	7
1.6. El Niño Benguela.....	8
1.7. Massas de água.....	10
1.8. Plumas dos Rios do Norte de Angola.....	12
1.9. Oxigénio dissolvido nos sistemas de afloramento .....	14
 2.0. CONTEXTO HISTÓRICO E METODOLOGIA .....	 18
2.1. Contexto histórico. ....	18
2.2. Reforço da Cooperação Internacional Bilateral e Regional.....	22
2.3. Motivação e objetivos .....	25
2.4. Metodologia. ....	27
2.4.1. Desenho de Cruzeiros. Divisão da área de estudo.....	27
2.4.2. Instrumentos e variáveis observadas <i>in situ</i> .....	28
2.4.3. Natureza dos dados.....	30
2.4.4. Leitura e tratamento dos dados. ....	30
 3.0. ENQUADRAMENTO OCEANOGRÁFICO: DETEÇÃO REMOTA E DADOS CLIMATOLÓGICOS.....	 36
3.1. Introdução. ....	36
3.2. Dados de satélite e variáveis climatológicas. ....	37
3.3. Resultados.....	38
3.3.1. Distribuição do vento climatológico COADS ao longo do ciclo annual .....	38
3.3.2. Distribuição sazonal da temperatura e salinidade superficiais, e da superfície livre do oceano.....	39
3.3.3. Propagação de sinais ao longo do equador e da costa africana.....	45
 4.0. CLIMATOLOGIA DAS ÁGUAS DA ZONA ECONÓMICA EXCLUSIVA DE ANGOLA.....	 51
4.1. Introdução. ....	51
4.2. Dados e métodos.....	51
4.3. Resultados. ....	54
4.3.1. Secções climatológicas verticais de temperatura salinidade, oxigénio dissolvido e	

correntes. ....	54
4.3.1.1. Secção do Congo. ....	54
4.3.1.1.1. Temperatura, salinidade e oxigénio dissolvido. ....	54
4.3.1.1.2. Correntes.....	55
4.3.1.2. Secção de Palmeirinhas.....	59
4.3.1.2.1. Temperatura, salinidade e oxigénio dissolvido. ....	59
4.3.1.2.2. Correntes.....	59
4.3.1.3. Secção do Lobito. ....	63
4.3.1.3.1. Temperatura, salinidade e oxigénio dissolvido. ....	63
4.3.1.3.2. Correntes.....	63
4.3.1.4. Secção do Namibe. ....	67
4.3.1.4.1. Temperatura, salinidade e oxigénio dissolvido. ....	67
4.3.1.4.2. Correntes.....	68
4.3.1.5. Secção do Cunene. ....	71
4.3.1.5.1. Temperatura, salinidade e oxigénio dissolvido. ....	71
4.3.1.5.2. Correntes.....	72
4.3.2. Resultados das distribuições climatológicas horizontais .....	75
4.3.2.1. Distribuições climatológicas horizontais (estação quente).....	75
4.3.2.2. Distribuições climatológica horizontais (estação fria).....	77
4.4. Distribuição de Massas de Águas na margem angolana.....	83
4.4.1. Estação quente. ....	83
4.4.2. Estação fria. ....	84
4.5. Discussão. ....	85
 5.0. ANOMALIAS HIDROLÓGICAS. ....	 91
5.1. Introdução. ....	<b>91</b>
5.2. Métodos. ....	<b>92</b>
5.3. Resultados. ....	<b>93</b>
5.3.1. Variabilidade interanual de temperatura, salinidade e oxigénio. ....	93
5.3.1.1. Estação quente.....	93
5.3.1.2. Estação fria. ....	96
5.3.2. Discussão.....	99
 6.0. CARATERIZAÇÃO DAS ANOMALIAS DAS VARIÁVEIS HIDROLÓGICAS.....	 103
6.1. Introdução. ....	<b>103</b>
6.2. Resultados.....	104
6.2.1. Variabilidade durante a estação quente: Extremos .....	104
6.2.1.1. Congo. ....	104
6.2.1.2. Lobito.....	106
6.2.1.3. Cunene. ....	108
6.2.2. Variabilidade durante a estação fria: Extremos. ....	110

6.2.2.1. Congo. ....	110
6.2.2.2. Lobito.....	112
6.2.2.3. Cunene. ....	114
6.2.3. Discussão e conclusão. ....	115
7.0. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS.....	119
7.1. Conclusões e perspectivas de futuros trabalhos.....	119
8.0. BIBLIOGRAFIA.....	124

## Índice de figuras

FIG. 1.1. Batimetria da Margem continental angolana. São representadas as isóbatas 200 m, 1000 m, 2000 m, 3000 m e 4000 m.....	03
FIG. 1.2. Representação esquemática do sistema de correntes do Oceano Atlântico sul.....	05
FIG. 1.3 Esquema da circulação oceânica da costa angolana e do sudoeste africano no verão austral .....	08
FIG. 1.4 diagramas $\theta$ -S e massas de água identificadas ao largo da margem angolana estendida entre 6° S a 21° S e de 8° W até a costa.....	11
FIG. 1.5. Caudal médio mensal do Rio Congo para os anos 2004, 2005, e médio do período 1980-2005. Adaptado de Denamiel et al (2013) .....	12
FIG. 2.1 Mapa das secções realizadas durante as estações quente e fria durante o período 1994 - 2014.....	28
FIG. 2.2 Matrizes das 5 linhas de monitorização (Congo, Palmeirinhas, Lobito, Namibe e Cunene), com duas janelas para cada secção, na estação quente (Q) e na estação fria (F) .....	33
FIG. 3.1 Variação climatológica de velocidade do vento e tensão do vento ao largo da zona económica exclusiva de Angola .....	39
FIG. 3.2. Variação climatológica mensal de temperatura ao largo da zona económica exclusiva de Angola (a), e por quadrimestres (b).....	41
FIG. 3.3. a) Variação climatológica de salinidade ao largo da Zona Económica Exclusiva de Angola.....	43
FIG. 3.4. Variação climatológica de anomalias da superfície do mar SLA (Sea level anomaly) por quadrimestre e para o período 1993 - 2018 .....	44
FIG. 3.5. Diagrama de Hövmoller das anomalias de SST (°C) em relação ao ciclo sazonal, ao longo de uma banda de 1° entorno do equador (longitudes desde 10°W até a costa) e numa banda de 1° em relação à linha de costa, desde o equador (0°S) até os 25°S.....	46
FIG. 3.6a. Anomalias SSH sazonais do nível do mar, obtidas através da SLA do AVISO (b), médias do período 1993-2017.....	48
FIG. 3.6b. Anomalias SSH interanuais do nível do mar obtidas através da SLA do AVISO, médias do período 1993 - 2017.....	49

FIG. 4.1 Mapa da costa de Angola, com as secções principais (a vermelho) e secções secundárias (a preto) utilizadas na estação quente e na estação fria, de 1994 - 2014.....	53
FIG. 4.2 Distribuições climatológicas de temperatura, salinidade e oxigénio dissolvido para a secção de Congo na estação quente (1ª linha) e na estação fria (2ª linha).....	57
FIG. 4.3 ADCPs climatológicos aos 6° S (Congo). Velocidades climatológicas das correntes (cor azul - valores negativos, corrente advectada em direção ao polo Sul; cor castanha - valores positivos, fluxo em direção ao equador). Estação quente (a) e estação fria (b).....	58
FIG. 4.4. Distribuições climatológicas de temperatura, salinidade e oxigénio dissolvido para a secção das Palmeirinhas, na estação quente (1ª linha) e na estação fria (2ª linha). ....	61
FIG. 4.5. ADCPs climatológicos aos 9° S (Palmeirinhas). Velocidades climatológicas das correntes cor azul - valores negativos, corrente advectada em direção ao polo Sul; cor castanha - valores positivos, fluxo em direção ao equador). Estação quente (A) e estação fria (b).....	62
FIG. 4.6. Distribuições climatológicas de temperatura, salinidade e oxigénio dissolvido para a secção do Lobito, na estação quente (1ª linha) e na estação fria (2ª linha). ....	65
FIG. 4.7. ADCPs climatológicos aos 10° - 12° S (Lobito). Velocidades climatológicas das correntes (cor azul - valores negativos, corrente advectada em direção ao polo Sul; cor castanha - valores positivos, fluxo em direção ao equador). Estação quente (a) e estação fria (b).....	66
FIG. 4.8 Distribuições climatológicas de temperatura, salinidade e oxigénio dissolvido para a secção Namibe, na estação quente (1ª linha) e na estação fria (2ª linha).....	69
FIG. 4.9. ADCPs climatológicos aos 15° S (Namibe). Velocidades climatológicas das correntes (cor azul - valores negativos, corrente advectada em direção ao polo Sul; cor castanha - valores positivos, fluxo em direção ao equador). Estação quente (a) e estação fria (b). ....	70
FIG. 4.10. Distribuições climatológicas de temperatura, salinidade e oxigénio dissolvido para a secção Cunene, na estação quente (1ª linha) e na estação fria (2ª linha). ....	73
FIG. 4.11. ADCPs climatológicos aos 16° - 17° S (Cunene). Velocidades climatológicas das correntes (cor azul - valores negativos, corrente advectada em direção ao polo Sul; cor castanha - valores positivos, fluxo em direção ao equador). estação quente (a) e estação fria (b).....	74
FIG. 4.12. Distribuição climatológica de temperatura perto da superfície, 10, 30, 100 e 200 m de profundidade. estação quente (1ª linha), estação fria (2ª linha). Note-se as diferentes escalas de temperatura entre profundidades para as duas estações. ....	79
FIG. 4.13. Distribuição climatológica de salinidade perto da superfície, 10m, 30, 100 e 200 m de profundidade. estação quente (1ª linha), estação fria (2ª linha). Note-se as diferentes escalas de salinidade entre profundidades para as duas estações.....	80
FIG. 4.14. Distribuição climatológica de oxigénio perto da superfície, 10m, 30, 100 e 200 m de profundidade. estação quente (1ª linha), estação fria (2ª linha). Note-se as diferentes escalas de oxigénio entre profundidades para as duas estações. ....	81
Fig. 4.15. Lado esquerdo: Diagrama T-S para as principais secções verticais durante a estação quente. Diferentes cores são usadas para caracterizar as diferentes secções, com tons quentes nas secções a Norte (Congo e Palmeirinhas) e frios a Sul (Namibe e Cunene). Note-se que a Salinidade foi limitada a valores superiores a 34, e a Temperatura a valores superiores a 10 °C, para uma melhor visualização. Lado direito: Diagrama T-O, usando o mesmo código de	

cores.....	84
Fig. 4.16. Lado esquerdo: Diagrama T-S para as principais secções verticais analisadas durante a estação fria. Diferentes cores são usadas para caraterizar as diferentes secções, com tons quentes nas secções a Norte (congo e palmeirinhas) e frios a Sul (namibe e Cunene). Lado direito: Diagrama T-O, usando o mesmo código de cores.....	85
FIG. 5.1. Variação interanual de anomalias das principais secções aos 100 m (verão).....	95
FIG. 5.2. Variação interanual de anomalias das principais secções aos 100 m (inverno).....	98
FIG. 6.1. Secção do Congo. Distribuição vertical de temperatura, salinidade e oxigénio dissolvido de 1995 e 2006, anos sazonalmente quentes (1ª e 2ª linhas), do ano climatológico (3ª linha à azul), e de 2005 e 2000 anos sazonalmente frios (4ª e 5ª linhas), estação quente...	106
FIG. 6.2. Secção do Lobito. Distribuição vertical de temperatura, salinidade e oxigénio dissolvido de 1995 e 1996, anos sazonalmente quentes (1ª e 2ª linhas), do ano climatológico (3ª linha à azul), e de 1997 e 2010 anos sazonalmente frios (4ª e 5ª linhas), estação quente...	108
FIG. 6.3. Secção de Cunene. Distribuição vertical de temperatura, salinidade e oxigénio dissolvido de 2007 e 2006, anos sazonalmente quentes (1ª e 2ª linhas), do ano climatológico (3ª linha à azul), e de 2008 e 2014 anos sazonalmente frios (4ª e 5ª linhas), estação quente...	110
FIG. 6.4. Secção do Congo. Distribuição vertical de temperatura, salinidade e oxigénio dissolvido de 2007 e 2006, anos sazonalmente quentes (1ª e 2ª linhas), do ano climatológico (3ª linha à azul), e de 2008 e 2014, anos sazonalmente frios (4ª e 5ª linhas), estação fria.....	112
FIG. 6.5. Igual a figura 6.1, para a secção do Lobito, para a época fria. Os anos correspondentes às anomalias quentes/frias, são 1998-2009 (quentes) e 1995-2001 (frios).....	113
FIG. 6.6. Igual a figura 6.1, para a secção do Cunene, para a época fria. Os anos correspondentes às anomalias quentes/frias, são 2008 - 2013 (quentes) e 2006 - 20019 (frios).....	115





## **Acrónimos e abreviaturas**

<b>AAIW</b>	Água Intermediária Antártica
<b>ABF</b>	Frente Angola – Benguela
<b>ACAS</b>	Águas Centrais do Atlântico Sul
<b>ABFZ</b>	Angola-Benguela-Frente -Zone
<b>AC</b>	Corrente de Angola
<b>AD</b>	Dome de Angola
<b>ADCPs</b>	Acoustic Doppler Current Profilers
<b>AVISO</b>	Archiving, Validation and Interpretation of Oceanographic Satellite
<b>BC</b>	Corrente de Benguela
<b>BCC</b>	Benguela Current Community
<b>BCLME</b>	Benguela Current Large Marine Ecosystem
<b>CCMP</b>	Cross Calibrated Multi-Platform
<b>CIP</b>	Centro de Investigação Pesqueira
<b>COADS</b>	Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set
<b>CR</b>	Rio Congo
<b>CTDs</b>	Conductivity, Temperature and Depth.
<b>CTW</b>	Coastal Trapped Waves
<b>CWT/UCW</b>	Água Central Tropical ou Superior
<b>EUC</b>	Corrente Equatorial
<b>ESACW</b>	Água Central do Atlântico Sul Oriental
<b>GC</b>	Corrente do Gabão
<b>IEKW</b>	Interannual Equatorial Kelvin Waves
<b>IMR</b>	Institute of Marine Research, Bergen, Norway
<b>INIPM</b>	Instituto Nacional de Investigação das Pescas e do Mar
<b>LSSW</b>	Low Salinity Surface water
<b>MEBPA</b>	Missão de Estudos Bioceanológicos e de Pescas de Angola
<b>MIRAS</b>	Microwave Interferometric Radiometer with Aperture Synthesis

<b>N/I Goa</b>	Navio de Investigação Goa
<b>NADW</b>	Águas Profundas do Atlântico Norte
<b>NCAR</b>	<i>National Center for Atmospheric Research</i>
<b>NOAA</b>	National Oceanic and Atmospheric Administration
<b>NORAD</b>	Agência Norueguesa para o Desenvolvimento e Cooperação
<b>OLM</b>	Ocean Linear Model
<b>OMZ</b>	Oxygen Minimum Zones
<b>PIRATA</b>	Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic
<b>SACW</b>	Água Central do Atlântico Sul não está presente
<b>SECC</b>	Conta-corrente Sul Equatorial
<b>SECC</b>	Corrente Sul Equatorial
<b>SLA</b>	Sea Level Atmospheric
<b>SMOS</b>	Soil Moisture and Ocean Salinity
<b>SSH</b>	Sea Surface Hight
<b>SSS</b>	Sea Surface Salinity
<b>TSW</b>	Água de Superfície Tropical
<b>TSCW</b>	Água Central Superior
<b>ZEE</b>	Zona Economica Exclusiva

## INTRODUÇÃO GERAL

**1.1. Introdução.**

A costa de Angola (Figura 1), localiza-se na costa SW de Africa no Oceano Atlântico Sul, entre as latitudes de 5° S (Cabinda) e 17° 15' S (Cunene), com fronteiras a Norte com as Repúblicas do Congo e República Democrática do Congo e a Sul com a República da Namíbia. Localiza-se na transição das regiões tropical e subtropical da costa oriental do Atlântico Sul. A linha da costa tem uma extensão de aproximadamente 1650 km.

A sua climatologia caracteriza-se por possuir duas estações principais bem definidas: a estação quente (Janeiro a Abril, o verão austral) e a estação fria (Junho a Setembro, o inverno austral), (Bianchi, 1986; Pereira, 1986; CIP, 1982; Berrit & Dias, 1977). A zona costeira está sujeita à influência dos ventos denominados “Alísios de Sudeste” induzidos pela depressão térmica da parte Sul do Continente Africano e um máximo de altas pressões sobre o Atlântico Sul, que influenciam o regime de circulação oceânica e a distribuição da temperatura à superfície. Esses ventos climatológicos, de componente sul, induzem na costa angolana um afloramento costeiro. As precipitações ao longo da costa angolana diminuem gradualmente de Norte para Sul e a zona mais seca é a região costeira do deserto do Namibe, situado no Sul de Angola.

Apesar dos levantamentos hidrográficos se terem iniciado nos anos 60, a plataforma continental e a vertente, não têm sido ainda suficientemente descritas na literatura científica. Nos últimos 30 anos têm vindo a realizar-se cruzeiros semestrais com o "R/V Dr. Fridtjof Nansen" no âmbito do Programa Nansen. A existência desses dados são a motivação principal para o desenvolvimento deste trabalho.

Do ponto de vista económico, as águas territoriais costeiras angolanas são caracterizadas por ser um ecossistema de alta produtividade, associado ao fenómeno de afloramento durante o inverno austral (Ostrowski *et al.*, 2009; Berrit & Dias, 1977;

Berrit, 1976). A interação entre o Sistema de Corrente fria de Benguela proveniente do Sul, e do Sistema de Corrente de Angola em direção a Sul, junto com o afloramento induzido pelos ventos alísios, tem como consequências o desenvolvimento da dinâmica do fitoplâncton, do zooplâncton, e consequentemente de toda cadeia trófica (da Silva, 2004; Berger *et al.*, 1998). Este ecossistema marinho, tem um importante papel socioeconómico para a população angolana que maioritariamente está concentrada na região costeira. O sector das pescas é o terceiro em importância económica logo após o sector dos hidrocarbonetos e do sector mineiro (BCLME, 1998). A região norte do sistema de Benguela suporta um ecossistema marinho altamente produtivo em termos pesqueiros regionais, associado ao afloramento costeiro neste processo. O afloramento no inverno austral, torna a produtividade biológica elevada (Carr & Kearns, 2003; Lass *et al.*, 2000), com condições ambientais favoráveis. Por exemplo, a biomassa anual dos recursos pesqueiros (espécies demersais, pelágicas, crustáceos e cefalópodes) estimada para Angola nos últimos 20 anos é de cerca de 750000 toneladas (BCLME, 1998;). As alterações globais afetam o ecossistema e as pescarias (Lass *et al.*, 2000; Parrish *et al.*, 2000; Monteiro *et al.*, 2008; Ostrowski *et al.*, 2009; Nicholson, 2010; Tchupalanga *et al.*, 2018).

Outras preocupações surgem com a presença de águas com valores mínimos de oxigénio dissolvido na região sub-superficial por baixo das águas da termoclina de superfície na corrente de Benguela (Shannon & O'Toole, 1999; Monteiro *et al.*, 2002, 2006, 2008; Mohrholz *et al.*, 2008). As concentrações de oxigénio são também influenciadas pelo afloramento de águas profundas menos oxigenadas e com elevadas concentrações de nutrientes.

Do ponto de vista oceanográfico, o ecossistema costeiro de Angola está influenciado por dois sistemas de correntes principais que, a larga escala, fluem em sentidos opostos: a Corrente quente de Angola em direção a Sul (ou na direção do Pólo, na linguagem oceanográfica), e o Sistema de Corrente de Benguela, que flui na direção Norte (ou na direção do Equador).

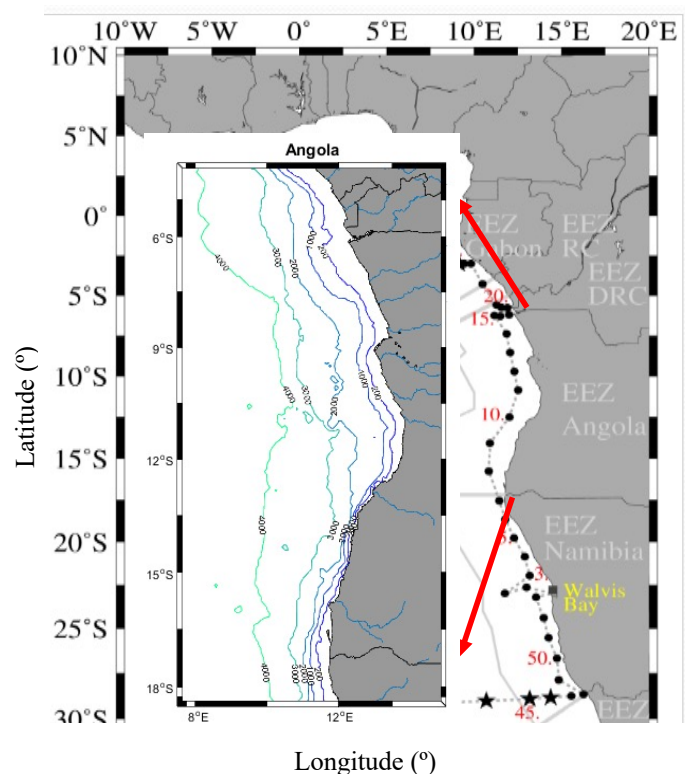


FIG. 1.1. Batimetria da Margem continental angolana. São representadas as isóbatas 200 m, 1000 m, 2000 m, 3000 m e 4000 m.

Seguidamente descrevem-se brevemente os principais aspetos relacionados com a oceanografia física da região de Angola.

## 1.2. Corrente de Angola.

A Corrente quente de Angola é associada à extremidade (borda) leste do giro ciclónico do Golfo da Guiné, conforme representado no esquema de circulação de superfície do Atlântico Sul (Figura 1.2). É formada pelo ramo Sudeste da Contra-corrente Sul Equatorial e tem um fluxo rápido e estreito (Strømme *et al.* 1989; Berrit, 1976). Embora a presença da Corrente de Angola tenha sido provavelmente reconhecida já na época dos navegadores portugueses desde o século XV, na viagem para a região do Cabo de Boa Esperança em 1486, a primeira referência à Corrente de Angola, com esse nome, foi feita por Moroshkin *et al.* (1970), que caracterizou-a como um

escoamento estreito e estável, que desde a superfície até os 250 m e 300 m circula no declive e na plataforma continental, transportando para Sul águas quentes e salinas. Lass *et al.* (2000), caracterizam a Corrente de Angola por uma temperatura superficial superior a 24 °C e uma salinidade até 36.4. Durante o inverno austral (Junho - Setembro) e a primavera austral (Outubro-Dezembro) as águas mais quentes, com temperatura entre 27 °C a 30 °C ficam confinadas a norte, e são substituídas por águas mais frias com temperaturas entre 20 °C e 26 °C, associadas ao fenómeno de afloramento que ocorre centrado a Sul na costa da Namíbia.

A origem da Corrente de Angola foi discutida na literatura, sendo comum associar esta ao deslocamento em direção a Este de correntes equatoriais, nomeadamente a Corrente equatorial de sub-superfície (Equatorial Undercurrent), a Corrente Equatorial de sub-superfície do Sul (South Equatorial Undercurrent), a Contracorrente Equatorial do Sul, (South Equatorial Counter-current).

Outros autores referiram recentemente que a variabilidade da Corrente de Angola é parcialmente controlada pela propagação de ondas de Kelvin equatoriais, associadas a anomalias de ventos zonais na região equatorial (Peterson *et al* 1998; Rouault, 2012). A variabilidade interanual da Corrente de Angola, foi também estudada por Ostrowski, *et al* (2009), assim como mais recentemente por Kopte *et al* (2017); Kounge *et al* (2017) com base em observações de satélite, e por Bachèlery *et al* (2016) com base na modelação numérica.

A Corrente de Angola está ainda caracterizada pelo transporte de águas com baixa concentração de oxigénio em direção ao Sul, e afetando os balanços de oxigénio do sistema de afloramento de Benguela a Sul, (Garzoli *et al.*, 1996; Signorini *et al.*, 1999; Hardman-Mountford *et al.*, 2003; Rouault *et al.*, 2006, 2007, 2012).

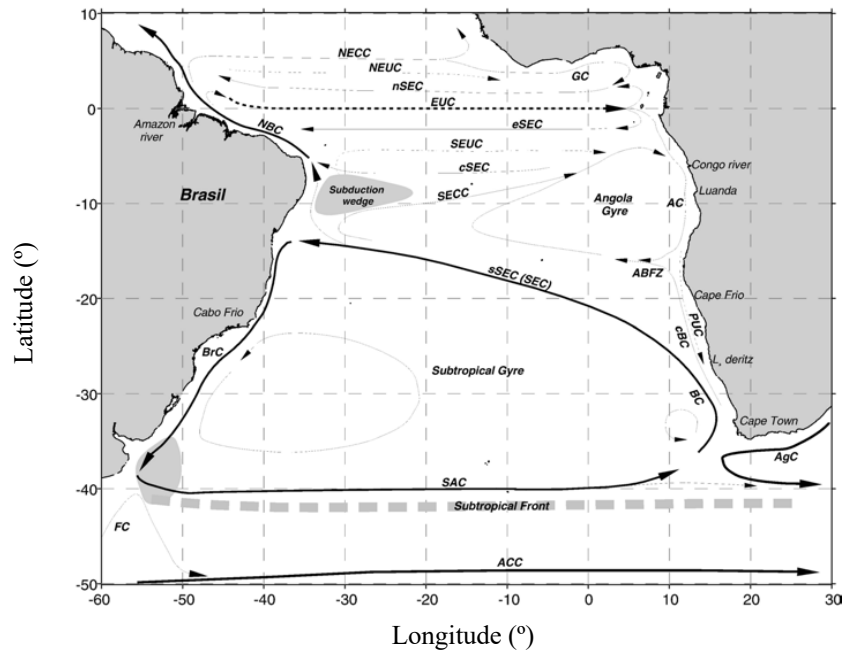


FIG. 1.2. Representação esquemática (Lass & Mohrholz, 2007) do sistema de correntes do oceano Atlântico sul. Abreviações: contracorrente equatorial norte (NECC), subcorrente equatorial norte (NEUC), corrente da guiné (GC), corrente equatorial sul (ramo norte (NSEC), equatorial (ESEC), central (CSEC), sul (SSEC)), subcorrente equatorial (EUC), subcorrente equatorial sul (SEUC), corrente norte do Brasil (NBC), contracorrente equatorial sul (SECC), corrente de Angola (AC), zona da frente Angola / Benguela (ABFZ), corrente de Benguela (BC; litoral: CBC), subcorrente em direção ao pólo (PUC), corrente do Brasil (BRC), corrente atlântica sul (SAC), a corrente circumpolar antártica (ACC) e a corrente das agulhas (AGC).

### 1.3. Giro de Angola.

Na região localizada ao largo de Angola central, forma-se um giro ciclônico de grande escala (ver Figuras 1.2 e 1.3a), que se estende da superfície até os 300 m de profundidade, com um transporte de cerca de  $5 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (5 Sv), descrito por Gordon & Bosley (1990), cujo tempo de residência é estimado, por estes autores, em cerca de 4.4 a 8.5 anos, o que faz com que o oxigênio disponível seja consumido por processos biogeoquímicos, resultando num mínimo de concentração de oxigênio inferior a 1 mL/L por baixo da termoclina. Esta deficiência de oxigênio parece ser propagada para Sul através da corrente de Angola, como referido acima.



Ainda dentro desta região do Giro de Angola, é observado o denominado ‘Angola Dome’ (Mohrolz, 2001; Lass *et al.*, 2000; Gammelsrød *et al.*, 1997; Mazeika, 1967), que consiste numa sobre-elevação da termoclina observada principalmente durante os meses de Janeiro a Maio, numa posição variável de ano a ano (entre 12° S a 11° E à 10° S a 9° E), e centrada em 11° S, 11° E, sem qualquer assinatura em superfície, requerendo amostragem hidrográfica para a sua localização. A hipótese mais plausível para a sua formação tem a ver com a estrutura do rotacional do vento, que induz um afloramento local por divergência do transporte de Ekman.

#### **1.4. Corrente de Benguela.**

A Corrente de Benguela é parte do giro anticiclónico subtropical do Atlântico Sul e flui para Norte ao largo da costa Sudoeste Africana (ver figura 1.2). Tem início ao largo do Cabo de Boa Esperança e influencia as costas da África do Sul, Namíbia e de Angola (Fig. 1.3). As suas fontes incluem águas da termoclina subtropical dos Oceanos Índico e do Atlântico Sul, mais salinas. Expande-se para o largo entre 200 km e 300 km e pode atingir 750 km ao largo mais a Norte (Shannon, 1986*ab*; Shannon, 1987; Taounton & Shannon, 1988; Grundlingh, *et al.*, 1979; Strømme *et al.* 1989; Garzoli *et al.*, 1996). No entanto, Shannon (1986) e Wedepohl *et al* (2010) referiram que a definição do seu limite é ambígua. A sua velocidade é variável, com um valor médio à superfície de cerca de 17 cm/s a Norte da Zona Frontal Angola-Benguela, onde convergem os Sistemas da Corrente de Angola e da Corrente de Benguela. Devido ao enfraquecimento dos ventos alísios, a Corrente de Benguela enfraquece no verão (Janeiro - Abril). Na estação invernal (Maio - Agosto), a temperatura à superfície é de 17 °C a 21 °C e a salinidade aumenta para 35.3 a 36 (Strømme *et al.*, 1989). Durante o verão do hemisfério sul (Janeiro - Abril), a intensidade dos ventos alísios de sudoeste é reduzida e, consequentemente a velocidade da Corrente de Benguela.

### 1.5. O Sistema Frontal Angola-Benguela.

O Sistema Frontal Angola-Benguela é um sistema permanente onde interagem a Corrente de Angola em direção a Sul e a Corrente de Benguela em direção a Norte. O Sistema de grande escala Angola - Benguela pode considerar-se subdividido em três subsistemas: O Sistema Norte, dominado pela Corrente de Angola, a Frente Angola - Benguela, e o Sistema de Afloramento de Benguela (estendendo-se desde África do Sul, Namíbia e Sul de Angola). Estes sistemas de correntes estendem-se ao largo, até uma distância superior a 200 km, com uma orientação aproximadamente paralela à costa, e influenciam a dinâmica do ecossistema costeiro angolano provocando alterações nos processos físico-químicos e biológicos (Shannon *et al.*, 1987; Taouanton & Shannon, 1988; Strømme *et al.* 1989). A posição da Frente Angola - Benguela varia entre 14° S aproximadamente no inverno austral e cerca de 17° S no verão austral, estando esta migração relacionada com o ciclo anual do afloramento proveniente de Sul, mais intenso durante o inverno (Rouault, 2012). Mohrholz *et al* (2001, 1999), referiram que as frentes são mais intensas nos primeiros 50 m de profundidade, e que a camada superior está sob domínio de águas da Corrente de Benguela até ao limite da frente, e a Corrente de Angola se estende por baixo do sistema frontal, no sentido Norte - Sul.

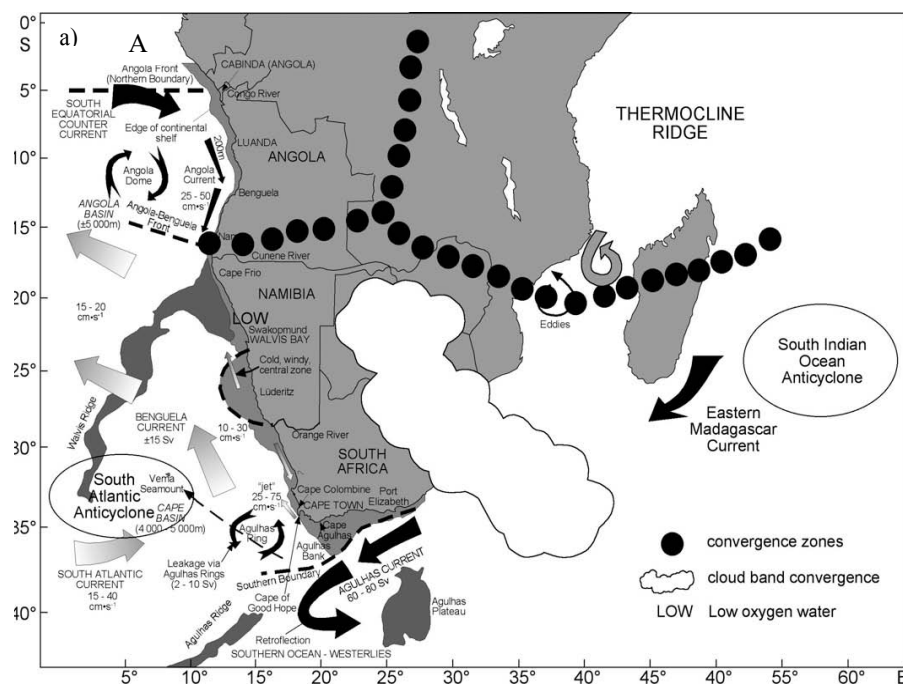


FIG. 1.3. Esquema da circulação oceânica (adaptado Rouault *et al.* 2007) da costa angolana e do Sudoeste africano no verão austral, incluindo a temperatura superficial, e correntes: Contra Corrente Equatorial do Sul (SECC), Corrente de Angola (AC), Dome de angola (AD), Frente Angola Benguela (ABF) e Corrente de Benguela (BC).

### 1.6. El Niño Benguela.

Como referido acima, a costa angolana está inserida nos dois ecossistemas da costa ocidental da África austral, o ecossistema da Corrente fria de Benguela e o Ecossistema da Corrente quente de Angola descritos anteriormente. Shannon & Nelson (1996); Shannon *et al* (1999, 1992); Shannon (2003), referiram a existência de eventos anómalos, observam com intervalos de alguns anos anomalias quentes da temperatura oceânica na região costeira, consistentes com a advecção de águas mais quentes e salinas da Corrente de Angola, que se deslocam em direção à região frontal ABFZ (Angola-Benguela Frontal Zone) e para as latitudes da bacia de Namíbia, podendo atingir os 25° S. Estes eventos foram denominados Benguela-Niño, por analogia com o El-Niño/ENSO da região equatorial e tropical a E do Oceano Pacífico (Shannon, 1986; Binet *et al.*, 2001; Shannon, 2003; Mohrholz *et al.*, 2004; Moloney *et al.*, 2005).

A principal origem destes eventos tem a ver com o relaxamento dos ventos alísios equatoriais no verão austral (Fevereiro - Abril) a Oeste do Atlântico (Moloney *et al.*, 2005; Kounge *et al.*, 2017; Illig *et al.*, 2018; Bachèlery *et al.*, 2019; Illig & Bachèlery, 2019). Estas anomalias geram a propagação de ondas de Kelvin em direção a E, a partir da região equatorial que continuam para Sul ao longo da costa africana, passando pela costa angolana, atingem a região da Namíbia e consistem no afundamento da termoclina e no aquecimento das águas costeiras desta região. O efeito contrário (frio) relacionado com a temperatura média do ano negativa em relação ao ano médio se denomina “La Niña”.

Os anos com maiores eventos Benguela-Niño constatados por vários autores foram, 1984, 1995, 1999, 2001, 2006, 2007 e 2011 (Gammelsrød *et al.*, 1998, 1997; Lass *et al.*, 2000; Hardman - Mountford *et al.*, 2003; Florenchie *et al.*, 2003; Rouault *et al.*, 2012). Uma descrição do episódio de 2001 é detalhada em Rouault *et al* (2007), e descrições mais gerais são realizadas em Hardman-Mountford *et al* (2003).

Vasco (2010) mostra nas anomalias anuais de temperatura da estação fixa do Lobito, em relação ao ano médio (1968-2007), que os anos de 1968, 1970, 1973, 1984, 1986, 1987, 1998, 1999, 2000, 2001, 2003, 2005 e 2007 foram os anos quentes, sendo, 1984, 1998, 1999 e 2005 os anos mais quentes, os quais foram referenciados também por vários autores como anos em que o fenómeno El Niño Benguela ocorreu (Gammelsrød *et al.*, 1997, Lass *et al.*, 2000; Hardman-Mountford *et al.*, 2003; Rouault *et al.*, 2007;).

Os anos frios foram 1969, 1971, 1992, 1974 à 1983, 1985, 1989, 1991, 1992, 1997 e 2004, sendo 1972, 1978, 1980, 1989, e 2004 os mais frios, correspondendo à ocorrência do fenómeno oposto “La Niña”.

### 1.7. Massas de água.

As águas centrais e intermedias observadas na bacia angolana são as águas Centrais do Atlântico Sul (SACW), as águas Centrais do Este do Atlântico Sul (ESACW). Estas águas centrais estendem-se até uma profundidade de cerca de 500 m. Por baixo deste nível, localizam-se as águas Intermédias Antárticas (AAIW) e as águas Profundas do Atlântico Norte (NADW). Um diagrama  $\theta$ -S destas massas de água para o intervalo de profundidade 100-1200m é mostrado na Figura 1.4.

Segundo Hagen & Schemainda (1987) e Mohrholz *et al* (2001), a SACW é definida pela reta no espaço  $\theta$ -S: 16 °C, 35.65 até 8 °C, 34.7 e está localizada a Norte da frente ABFZ (perto dos 16° S) até aproximadamente os 500 m onde se encontra a parte superior da AAIW. ESACW foi caracterizada por Poole & Tomczak, in Pardo *et al* (1999), como situada abaixo da termoclina, com uma temperatura 14.4 °C, 35.3 °C até 5.96 °C, 34.41, por cima da AAIW, localizada a Sul de 16° S e é advectada pela Corrente de Benguela desde a sua área de origem localizada na região da retroflexão das Agulhas. A massa de água na região do Giro de Angola é essencialmente SACW. O núcleo da AAIW encontra-se a profundidade perto dos 800 m em toda a área de estudo. As águas profundas no Atlântico Norte (NADW) se encontra a profundidade superiores a 1100 m.

A temperatura e a salinidade não são propriedades conservativas na camada superficial devido aos fluxos de calor e de água doce. Assim, segundo descrito em Strømme *et al.*, 1991; Binet, 1997; Mohrholz *et al.*, 2001, existem nesta camada as denominadas Água Superficial de Baixa Salinidade (LSSW), Água Tropical de Superfície (TSW), águas centrais superiores (UCW). A água superficial de baixa Salinidade (LSSW) situa-se à norte de 12° S, na camada superficial fina (inferior aos 30 m), e é influenciada principalmente pelas plumas de água dos rios Congo e de outros rios da costa atlântica nessa região (Fig. 1.4), e são caracterizadas por uma temperatura de até 30°C e salinidade mínima de 31 à superfície. Por baixo desta seguem as Águas Tropicais de Superfície (TSW), com temperaturas de até 31 °C e salinidade próxima a 36.5

sendo estas águas encontradas em toda a região a norte da frente Angola - Benguela (ABFZ). Na transição entre estas águas de superfície e as águas centrais se localizam as denominadas águas centrais superiores (UCW) com valores de  $\theta$ -S intermédios entre as águas superficiais referidas e as duas águas centrais principais (SACW e ESACW).

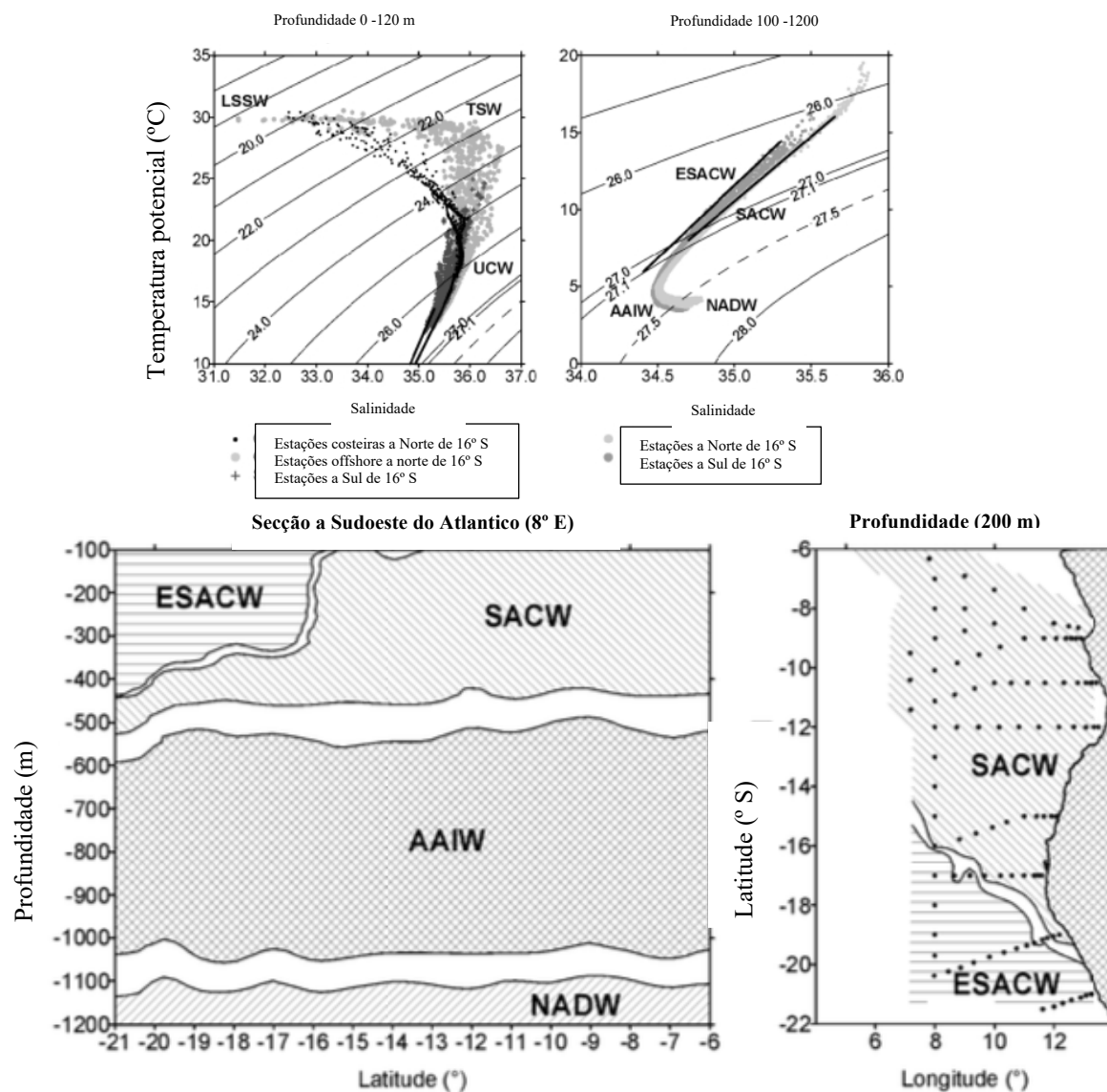


FIG. 1.4. Parte superior: diagramas  $\theta$ -S e massas de água identificadas ao largo da margem angolana estendida entre 6° S a 21° S e de 8° W até a costa. Adaptado de Mohrolz *et al* (2001). À esquerda, entre a superfície e uma profundidade de 100 m e à direita, entre 100 m e 1200 m de profundidade. Parte inferior: Localização geográfica das massas de água referidas no texto.

**TABELA 1.I.** Massas de água do oceano atlântico, segundo os diferentes autores.

Parâmetro	SACW (Giro de Angola, Mohrholz <i>et al.</i> , 2008)		WSACW (Pole & Tomczak, in Pardo <i>et al.</i> , 1999)		ESACW (Pole & Tomczak, in Pardo <i>et al.</i> , 1999)	
Temperatura (°C)	8.0	16.0	6.55	16.27	6.00	14.41
Salinidade	34.72	35.64	34.40	35.69	34.41	35.30
Oxigenio (mL/L)	0.50	1.53	5.71	5.27	6.60	5.49
Nitratos (μmol/L)	37.86	21.91	13.33	0	11.77	0

### 1.8. Plumas dos Rios do Norte de Angola.

Na fronteira entre o Congo e Angola desagua o Rio Congo (cuja descarga de água é a segunda maior após o Rio Amazonas), com uma distribuição bimodal, com descargas máximas de  $\sim 57000 \text{ m}^3/\text{s}$  em Novembro/Dezembro e um segundo pico em Maio ( $\sim 39000 \text{ m}^3/\text{s}$ ), e dois mínimos centrados nos meses de Agosto e Março (Hopkins *et al* (2013), Figura 1.5.

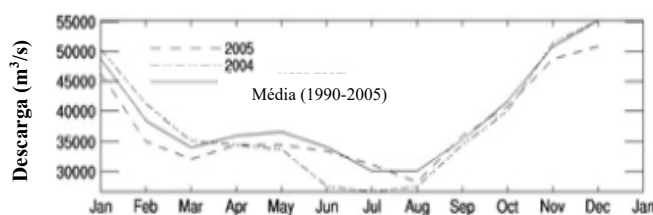


FIG. 1.5. Caudal médio mensal do Rio Congo para os anos 2004, 2005, e médio do período 1980-2005. Adaptado de Denamiel *et al* (2013).

A pluma do Rio Congo pode ser classificada, de acordo com Yankowsky & Chapman (1997 *a, b*), Yankovsky *et al* (1997) e Dewar & Huang (1995), como adve-tada em superfície (surface-advected), em que a pluma flutuante permanece na superfície formando uma camada fina que, desacoplada do fundo, pode afastar-se por centenas de quilómetros para o largo. A sua espessura fora do estuário é de cerca de 10 m a 20 m misturando-se com a águas por baixo, por efeito da tensão do vento. A sua dinâmica está associada aos processos oceanográficos, incluindo a rotação da terra (Coriolis, e a sua variação latitudinal, efeito  $\beta$ ), tensão do vento, as correntes de maré e os padrões de circulação oceânica de grande escala.

A pluma é caracterizada por uma região de baixa salinidade ( $<30$ ) e um máximo de clorofila-a ( $>2 \text{ mg/m}^3$ ), estende-se de forma aproximadamente radial até cerca de 400 km para o largo, junto com uma extensão para NW ao longo da costa da República do Congo (Hopkins *et al.*, 2013; Denamiel *et al.*, 2013). Entre Novembro e Janeiro, estendem-se a noroeste, a mais de 800 km a 1000 km da foz e em Fevereiro a pluma reduz-se a 600 km da foz. A assinatura em SST (temperatura da superfície) não é clara nas imagens de satélite (anomalia quente para o largo e fria no ramo costeiro para NW). A assinatura em SSH (altura da superfície do mar) é consistente com uma anomalia positiva ( $>4 \text{ cm}$ ) numa banda costeira.

Devido à proximidade do equador, a influência da rotação da terra (força de Coriolis) tem uma importância menor do que as plumas de latitudes mais altas, em que o jato costeiro se dirige no sentido da propagação das ondas de Kelvin, neste caso para Sul. Modelos numéricos (Denamiel *et al.*, 2013) reproduzem este efeito do ramo da pluma costeiro em direção a Sul, embora o estudo por satélite de Hopkins *et al.* (2013) não o possa confirmar. A Sul do Rio Congo, ao longo da costa Norte de Angola, existem outros rios. Destaca-se o rio Kuanza, a Sul da zona norte, e o segundo maior contribuinte da costa angolana no que se refere à vazão fluvial para a costa atlântica E. Na área intermédia desta Zona destacam-se os rios Ambrizete (Lodge), Ambriz e Dande, com caudais consideráveis, embora pequenos em relação aos rios Congo e Kwanza, o que induz a existência de outras plumas, cujo efeito na região costeira será estudado neste trabalho. Na Zona Centro, os rios Longa, Keve, Kabongo, Cubal, Catumbela e Cuporolo também contribuem para a localização de plumas, sobretudo durante a estação quente. Na Zona Sul os rios Bero e Cunene, sobretudo, não possuem caudais com vazão suficiente para o mar por ser uma zona desértica com precipitações escassas.



### 1.9. Oxigénio dissolvido nos sistemas de afloramento.

O oxigénio que na atmosfera está em proporção razoavelmente constante é intercambiado com o oceano através de processos físicos. A capacidade do oceano para dissolver o oxigénio depende de forma inversa com a temperatura, i.e., águas mais frias/quentes têm mais/menos capacidade de dissolver o oxigénio.

O oxigénio está fortemente ligado à vida no oceano. Uma mudança na concentração do oxigénio dissolvido numa determinada área pode ter impactos significativos sobre a sobrevivência na composição de espécies no ecossistema, com consequentes mudanças na cadeia trófica e produtividade (Heymans & Baird, 2000; Castro *et al.*, 2000, 2002; Ippe *et al.*, 2002; Ekau *et al.*, 2005; Kuypers *et al.*, 2005).

Em sistemas de afloramento o oxigénio dissolvido faz parte dos principais ciclos biogeoquímicos: Por um lado existe um intercâmbio de oxigénio entre a atmosfera e as camadas superficiais oceânicas, controlado pelas condições atmosféricas (vento e ondas, entre outros) e oceânicas (temperatura do oceano e estado de saturação do oxigénio na superfície do oceano). Uma vez que o oxigénio dissolvido entra no oceano, está sujeito aos processos de mistura na camada superficial, controlados mais uma vez pela atmosfera, e pela estratificação superficial. Ao mesmo tempo que é misturado vertical e horizontalmente, o oxigénio dissolvido é transportado pelas correntes, seja superficiais (transporte de Ekman), seja longitudinais. Este processo é particularmente importante nos sistemas onde estes tipos de correntes são significativos, tal como o caso dos sistemas de correntes de Angola (para Sul) e Benguela (para Norte).

Por outro lado, o oxigénio está sujeito aos principais processos biogeoquímicos dos sistemas de afloramento. É produzido durante a fotossíntese, associado ao processo de fotossíntese, constituindo o que genericamente se denomina produção primária. O oxigénio é consumido pelos organismos vivos, em todos os restantes níveis da cadeia trófica, sendo utilizado nos processos de respiração (Castro *et al.*, 2002 e 2000; Cravo *et al.*, 2008; Monteiro *et al.*, 2008; Vaquer-Sunyer&Duarte, 2008). O

oxigénio dissolvido é ainda utilizado nos processos de remineralização da matéria orgânica que se afunda, e que utiliza oxigénio para se degradar. Resultante deste processo de remineralização são os principais nutrientes necessários para a produção primária. Este processo de remineralização está fortemente associado à existência das OMZ, pois ao mesmo tempo que se produzem nutrientes o oxigénio é fortemente consumido, e acontece em sub-superfície, a profundidades variáveis, tipicamente por baixo dos 80m de profundidade.

O fenómeno de hipoxia, consiste numa baixa concentração de oxigénio dissolvido numa região do oceano o que pode causar dificuldades à sustentação da vida animal ou vegetal. A sua ocorrência no oceano aberto é atribuída a diversos fatores e pode ser causada, entre outros processos, por: mecanismos de transporte de oxigénio, como por exemplo a advecção de águas com baixas concentrações de oxigénio dissolvido; processos biológicos de consumo de oxigénio dissolvido, como é o caso nos sistemas de afloramento em que ocorrem os processos de remineralização acima descritos.

Segundo Monteiro *et al* (2008) e Vaquer-Sunyer & Duarte (2008), a hipoxia é um problema crescente que afeta as águas costeiras de todo mundo, com graves consequências para a vida marinha, tem aumentado devido aos efeitos combinados da disseminação contínua da eutrofização costeira e do aquecimento global, e relataram um crescimento exponencial de locais costeiros onde a hipoxia foi relatada entre 1916 a 2006.

No estudo de Vaquer-Sunyer & Duarte (2008), faz-se uma ampla análise comparativa de organismos bentónicos marinhos, onde estabelecem os limiares de hipoxia para os diferentes taxóns de organismos bentónicos marinhos. Elaboraram uma serie de tabelas e uma ampla lista da literatura publicada sobre os limiares de hipoxia, com concentrações medias subletais e letais de oxigénio para os diferentes organismos marinhos bentónicos feitos em avaliações experimentais, que se situam entre 0,28 a 4

mg/L (cerca de 0,2 a 2,8 mL/L), para os valores de hipoxia e entre 0,19 a 10,20 mg/L (0,10 a 8 mL/L) para os diferentes níveis de tolerância, tendo sido convencionada a concentração de 2 mg/L (cerca de 1,40 mL/L) ou inferior para designar as águas como hipóxicas, e que devido à diversidade de adaptações comportamentais e fisiológicas à este fenómeno, estes limites de oxigénio em que ocorrem os impactos letais e subletais também são inadequados para descrever o início dos impactos de hipoxia para muitos organismos.

Uma avaliação da literatura (Monteiro *et al.*, 2006, 2008; Mohrholz *et al.*, 2007; Gilbert *et al.*, 2009; Zhang *et al.*, 2010) mostra em vários relatórios as zonas de concentrações mínimas de oxigénio (OMZ) ao nível das profundidades entre os 300 e 400 m, e, evidências de um aumento inequívoco do número de zonas de hipoxias e sua extensão. O número de casos de locais de hipoxia está a aumentar tanto perto da costa como em mar aberto (Mohrholz *et al.*, 2007; Monteiro *et al.*, 2008; Gilbert *et al.*, 2009). Na região da Corrente fria de Benguela até à zona de convergência, o oxigénio dissolvido tem vindo a diminuir ao longo do tempo, com agravamento dos fenómenos de hipoxia (Wasmund *et al.*, 2005; Huchcings *et al.*, 2009).

O fenómeno de anoxia, consiste no agravamento da hipoxia de valores subletais para valores letais, onde a concentração de valores de oxigénio dissolvido apresenta valores mais críticos para a sobrevivência de organismos vivos, tendo em conta os valores de tolerância específicos. A anoxia também pode ser provocada por cianobactérias em sistemas marinhos, cujas causas principais incluem entre outras, a eutrofização por elevadas concentrações de nutrientes, por exemplo de elevadas concentrações de fosfatos.

Esses dois fenómenos (hipoxia e anoxia) têm sido amplamente debatidos e estudados e têm vindo a tornar-se problema mundial no oceano global costeiro, em estuários, águas costeiras, zonas de afloramento, fiordes e bacias semifechadas e o número de locais de hipoxia tem estado a aumentar tanto perto da costa como em mar aberto e em profundidade, em estudos de tendências realizados abaixo de 200 m,

sobretudo, e abaixo da termoclina sazonal em zonas costeiras (Mohrholz *et al.*, 2007; Monteiro *et al.*, 2008; Vaquer - Sunyer & Duarte, 2008; Gilbert *et al.*, 2009; Zhang, *et al.*, 2010).

Em todo mundo, as principais zonas de mínimos de oxigénio (OMZ) foram identificadas (Stramma *et al.*, 2008), e as regiões das bacias da Namíbia e Sul de Angola estão entre estas zonas de mínimos de oxigénio. Segundo vários autores (Wasmund *et al.*, 2005; Huchtings *et al.*, 2009), na região da Corrente fria de Benguela, em estudos de tendências deste parâmetro, o oxigénio dissolvido tem vindo a diminuir ao longo do tempo, devido ao agravamento dos fenómenos de hipoxia e anoxia.

## CONTEXTO HISTÓRICO E METODOLOGIA

**2.1. Contexto histórico.**

A partir de 1418, o rei João I de Portugal, e seu filho, o príncipe Henrique o Navegador", utilizaram os recursos portugueses para encontrar um caminho marítimo para as Índias. Depois de quinze anos de esforço, conseguiram que Gil Eanes navegasse além do Cabo Bojador (o promontório da África Ocidental), em 1433. Depois de 50 anos um navio português navegou em torno do Cabo da Boa Esperança em 1486. É difícil definir uma data exata em que os primeiros europeus navegaram em águas da Corrente de Angola e a própria Angola não foi colonizada até 1575, quando os portugueses estabeleceram a cidade costeira de Luanda (Peterson *et al.*, 1998, 1991; Steinberg, 2001).

A Expedição Alemã a bordo do Navio Meteor entre 1925 - 1927 que realizou duas campanhas transatlânticas, fez medições hidrográficas e forneceu uma imagem geral da distribuição de massa de água e oxigênio na região tropical e sul do Atlântico até ao Porto de Moçâmedes, no sul de Angola (Wüst, 1935, *in* Reid 2006; Wattenberg, 1938, *in* Kopte *et al.*, 2017), pode ser considerada como ponto de partida dos estudos físicos da oceanografia em Angola. Outra referência é a de um primeiro levantamento hidrográfico detalhado a norte da Namíbia realizado pela URSS a bordo do RV Akademik Kurchatov entre abril e junho de 1968, cujos dados obtidos foram usados para uma primeira descrição da circulação de fronteira oriental dos oceanos (Moroshkin *et al.*, 1970).

Na costa angolana alguns trabalhos de levantamentos oceanográficos e biológicos começaram a ser feitos entre os anos 50 - 60 (Berrit & Dias, 1976; MEBPA, 1970-1974). Foram feitas algumas descrições das condições hidrológicas e distribuição de principais espécies de recursos pesqueiros de Angola (Arquivos MBPA, CIP-

Lobito). Em 1960, pesquisadores da expedição AtlantNIRO detectaram um fluxo de água ao longo da plataforma do sudoeste da África tendo medido sua velocidade na plataforma, entre 17° S a 24° S com fluxo para sul de 5 cm/s a 34 cm/s (Kuderskiy, 1964, in Moroshkin *et al.* 1970). Ainda Moroshkin *et al.* (1970) disseram que o termo dessa corrente não reflectia a posição geográfica do fenómeno e “Corrente de Angola” seria o melhor termo, já que segue a costa de Angola por uma longa distância e atinge a intensidade mais alta em águas desse território.

Com o estabelecimento da Missão de Estudos Bioceanológicos e de Pescas em Angola nos anos 1967 - 1968, pelo então Governo Geral Português de Angola, denominada oficialmente Missão de estudos Bioceanológicos e de Pescas de Angola (MEBPA), foi implementado em Angola um sistema de recolha de dados para estudos de oceanografia sinóptica, de ecorastreio e hidroacústica, hidroclimatologia costeira e estimação de abundâncias de peixes pelágicos (carapau, sardinellas e atuns), demersais (pescada e esparídeos) e crustáceos (camarões e caranguejos de profundidade) para avaliação de recursos e estudos bioestatísticos relativos a *stocks* destes recursos ao longo da costa, coordenado pelo Engenheiro Geógrafo Carlos Afonso Dias entre 1968 e 1975 (MEBPA), criado pelo despacho da Junta de Investigações do Ultramar, Portaria N° 666/71 de 3 de Dezembro. Foram criadas na altura estações fixas costeiras e linhas de monitorização (secções), com destaque das estações fixas de Luanda (8° 44' S, 13° 24' E), Lobito (12° 19' S, 13° 35' E), Santa Marta (13° 50' S, 12° 22' E); Lucira (13° 51' S, 12° 31' E) e Moçâmedes (15° 09' S, 12° 00' E), para recolhas rotineiras de dados oceanográficos e de prospeção de recursos pesqueiros, enquadradas nesse amplo programa do governo português cuja finalidade última é a gestão racional dos recursos marinhos vivos (MEBPA, relatórios 1970 - 1974; Dias, 1973).

A partir desta altura começou a realização de várias observações hidrológicas e de prospeção de recursos pesqueiros ao longo da costa angolana. Foi constituída primeira base de dados com a qual Dias, 1983a, b; Dias *et al.*, 1974; Berrit & Dias, 1977), caracterizaram a hidrografia da região costeira de Benguela (1968-1975)

(<https://oceanografia-angola.net/>), e ainda Berrit, 1976, que caracterizou a região central de África com dados da estação fixa da Ponta Negra (Congo Brazaville). Os dados iniciais foram utilizados para demonstrar a variabilidade sazonal (estações primárias e secundárias) (Berrit e Dias, 1977). As estações fixas costeiras de Luanda, Santa Marta, Lucira e Moçâmedes, funcionaram até 1975.

Ainda no âmbito desse programa, outros levantamentos importantes foram feitos em algumas linhas ao longo da costa, destacando-se o paralelo 12° S a partir de 1967, um transecto de cerca de 300 milhas náuticas (560 km), onde foram realizadas observações com frequência de 4 a 6 vezes por ano com o N/I GOA produzindo-se uma primeira estimativa da variabilidade sazonal da circulação da fronteira leste do Atlântico Sul (Dias, 1983). Um estudo sistemático que cobriu a plataforma do sul de Angola começou em 1968 a bordo do N/I Goa em Setembro e Novembro de 1970 e em Março e Junho de 1971. O objetivo foi a caracterização do oceano da superfície até aos 1000 m de profundidade. Obtiveram-se ainda registos batitermográficos e dados de nutrientes até aos 500 m para melhor caracterização das massas de água. Esta latitude foi escolhida principalmente por causa das frentes de SST bem definidas e bastante duradouras, e porque vórtices de propagação para oeste e outras estruturas de recirculação semelhantes a ondas com comprimentos de onda de 250 km a 400 km, são características dinâmicas dominantes nessa região.

Os dados batitermográficos resultantes da digitalização dos registos de arquivos foram obtidos por Afonso-Dias junto com o padrão de variabilidade na Estação Fixa do Lobito, idêntica à descrita por Berrit (1958, 1961) para a Estação Costeira de Ponta-Negra (5° S), (<https://oceanografia-angola.net/>). A guerra desavinda no período pós independência fez com que a maior parte dos serviços estivessem paralisados. Uma boa parte da literatura, relatórios e dados coletados encontrava-se concentrados no Centro de Investigação Pesqueira do Lobito, sob orientação do engenheiro Afonso Dias, foi transferido para Luanda com a mudança destes serviços. Peruchin, 1980, in Arquivos CIP-Lobito, usando dados das observações hidrológicas e de prospecção de

recursos pesqueiros, fez uma descrição preliminar da relação entre as condições hidrológicas da zona costeira da região de Benguela e a dinâmica das capturas na plataforma de Angola.

Depois da independência, o Engenheiro Afonso Dias continuou na direção onde permaneceu até 1981. O governo angolano, ciente da importância que o sector pesqueiro tem, dá sequência ao programa e transforma a MEBPA em Centro de Investigação Pesqueira, que, anos depois foi transformado em Instituto Nacional de Investigação Pesqueira, mantendo os Centro de Investigação Pesqueira a nível regional. O estudo do hidroclima costeiro e do ambiente da Zona Económica Exclusiva mediante levantamentos e campanhas hidrológicas permitiu além da compreensão de processos físico-químicos, conhecer as relações ecológicas existentes entre os organismos marinhos vivos, possibilitando um melhor controlo e utilização ótima e sustentável dos recursos marinhos vivos. No princípio foram sendo feitos alguns cruzeiros esporádicos e continuada a realização de cruzeiros com o N/I Goa e embarcação Sardinella, angolanos, dando continuidade ao programa concebido antes da independência. Iniciaram-se também cruzeiros com outros navios da Ex - URSS, Cuba, etc., mediante assinatura de protocolos e acordos no domínio das pescas e oceanografia. Os cruzeiros de investigação com R/V GUIJIGA realizado em outubro de 1979 é um dos primeiros exemplos. Foram realizados vários trabalhos como os resultantes da recolha de dados nas pescarias e de amostragens biológicas, e trabalhos oceanográficos. A série de dados de 1968 - 1982 (Arquivos, MEBPA, CIP-Lobito), com vários trabalhos internos encontram nos centros regionais.

O papel do Instituto Nacional de Investigação Pesqueira (INIP) e Centros Regionais de Investigação Pesqueira CIP) é o de formular e executar programas de Investigação com o objetivo de se obter conhecimento sobre os recursos marinhos, pescarias e ambiente marinho, para proporcionar aos gestores recomendações sobre os níveis ótimos de capturas, tendo em atenção o estudo das condições hidrológicas da plataforma costeira e Zona Económica Exclusiva, que afetam a distribuição das espécies e consequente proteção do ambiente marinho. As responsabilidades do INIP



incluíam a aquisição de dados oceanográficos em estações fixas ao longo das linhas de monitorização, apesar de muitas lacunas e inatividade da maioria das estações fixas. Por constrangimentos de vária ordem, apenas no Centro de Investigação Pesqueira, no Lobito, as observações oceanográficas diárias (temperatura da água e do ar, densidade, salinidade, transparência, oxigénio, nutrientes, humidade relativa, nebulosidade), continuaram até 2016, na estação fixa do Lobito, de forma consecutiva. A caracterização de longo termo resultante dessa monitorização (1968 - 2007) foi realizada por Vasco, (2010). O apoio à gestão começa pela análise dos efeitos da pesca sobre os ‘stocks’, para determinar os potenciais exploráveis e a formulação de propostas de regulamentação das pescarias para sua exploração adequada e preservação. O governo angolano, ciente desse papel, procurou estabelecer protocolos de cooperação na área das pescas e oceanografia. Vários acordos na área das pescas foram firmados na década de 80 com vários países (Rússia, Espanha, Cuba, China, Portugal, etc.). No domínio da Investigação, os acordos mais importantes foram firmados no primeiro quinquénio da década 80 com os Reinos da Noruega, da Suécia e também com a UNESCO e com a FAO. Com o Reino da Noruega foi estabelecido o programa de cooperação mais sólido com a República de Angola para a gestão das pescas que se mantém até os dias de hoje.

## **2.2. Reforço da Cooperação Internacional Bilateral e Regional.**

No âmbito de um Programa amplo sob a égide da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO), foi enquadrado o Programa Nansen, co-financiado pelo governo norueguês através da Agência Norueguesa para o Desenvolvimento e Cooperação (NORAD) cujo navio “Dr. Fridtjof Nansen”, foi lançado à água em 1974 (Bianchi *et al.*, 2016). Em Angola, o ‘Programa Nansen’ teve início em 1984. Em 1985 com a realização do cruzeiro R/V Nansen no verão e no inverno austrais (março - abril e agosto - setembro, respetivamente), marcou uma nova era na avaliação dos recursos pesqueiros e na monitorização dos parâmetros oceanográficos do oceano costeiro angolano. Entre 1986 - 1989 as campanhas foram realizadas apenas no verão austral, e os cruzeiros bianuais foram retomados com regularidade em 1991

e de forma contínua a partir de 1994, cobrindo toda a extensão da plataforma continental angolana. A capacitação entre a Noruega e Angola no domínio da investigação pesqueira tem sido o foco de longo prazo no âmbito do programa Nansen (Bianchi *et al.*, 2016), e envolveu a formação e fortalecimento de habilitações técnicas de cientistas angolanos relacionadas à instrumentação oceanográfica em cruzeiros com o Dr. Fridtjof Nansen e RV Meteor (Tchipalanga *et al.*, 2018). Em conformidade com o acordo estabelecido entre a NORAD, a FAO e o IMR, o Memorando de entendimento sobre a sua execução entre INIP e FAO, estabelecia o IMR Norueguês fornecer o líder do cruzeiro, dois investigadores técnicos e dois técnicos de instrumentação, cabendo ao INIP o fornecimento do Co-líder e restantes técnicos.

Este programa tem sido implementado ao longo dos anos até à presente data com o Governo Angolano através do Instituto Nacional de Investigação Pesqueira. Ainda, no âmbito do programa amplo, diferentes acordos bilaterais foram estabelecidos e navios de diferentes países, principalmente da Alemanha, Espanha, Portugal, Grã-Bretanha, Rússia e Cuba, realizaram algumas campanhas oceanográficas em águas da ZEE angolana.

A nível regional, também vários acordos foram assinados. Angola está inserida no grupo de Integração Regional do Sistema do Ambiente de Benguela e Formação no domínio das Pescas (BENEFIT), hoje Benguela Current Community (BCC). A cooperação entre Angola, Namíbia e África do Sul foi aprimorada através dos programas BENEFIT, (1999 - 2009) e BCLME (Grande Ecossistema Marinho da Corrente de Benguela (2002 - 2008) – agora, Comissão da Corrente de Benguela, BCC). O BCC, abordou particularmente a variabilidade climática com eventos ambientais extremos, incluindo o aquecimento do oceano também chamado Benguela Niños (Tchipalanga *et al.* 2018). Sob a égide desses programas regionais foram realizados vários cruzeiros com os navios alemães RV Poseidon, Meteor, Petr Kottsov e o com RV Humboldt e da África do Sul. Mais recentemente, foi implementado o projeto NansClim (2009 - 2014), entre Noruega, Angola, Namíbia e África do Sul (Jarre *et al.*, 2015a, b; Tchipalanga *et al.*, 2018), que visa estudar a variabilidade do oceano, do

clima e as correspondentes mudanças na biodiversidade marinha. Entre as atividades que têm sido realizadas destacam-se os cruzeiros de avaliação de recursos e do ambiente do sistema de Benguela. Como exemplo temos os Dados dos Cruzeiros realizados em águas transfronteiriças das regiões a Norte e Sul de Angola.

Um conjunto extenso desta documentação encontra-se no Instituto nacional de investigação Pesqueira e no Centro de Investigação Pesqueira de Benguela, no Lobito. Com a finalidade de se compreender melhor a variabilidade hidrográfica e meteorológica da plataforma continental da província de Benguela, algumas descrições resultantes das prospeções e monitorização contínua feitas na Baía de Benguela, na estação fixa do Lobito, no interior da Baía do Porto do Lobito e na estação meteorológica de Benguela, pelo Instituto nacional de Investigação Marinha, através do Centro Regional de Investigação Marinha do Lobito, foram por mim apresentadas em conferências nacionais, regionais e internacionais e alguns durante os cruzeiros oceanográficos, que têm vindo a realizar-se em Angola.

O objetivo final para o qual se estabeleceu essa cooperação de pesquisas, é o de auxiliar o governo angolano na melhoria do conhecimento geral da biologia e dinâmica populacional das principais espécies dos recursos pesqueiros em relação ao ambiente ecossistémico marinho e avaliação de stocks (Relatórios de cruzeiros R/V Dr. Fridtjof Nansen, BENEFIT, BCC, INIP/MINP).

Os dados dos últimos 30 anos resultantes dos cruzeiros "R/V Dr. Fridtjof Nansen", não só das principais linhas de monitorização ambiental, mas também das linhas secundárias e de outras secções oceanográficas realizadas no princípio e no fim de cada arrasto de pesca, foram compilados e arquivados em bases de dados do Instituto Nacional de Investigação Pesqueira e do Mar (INIPM) e no Instituto Norueguês (IMR).

A existência desses dados, e por nós sermos participantes na maioria das campanhas oceanográficas realizadas a bordo do R/V Dr. Fridtjof Nansen entre 1994

a 2016, é o motivo principal que nos levou ao desenvolvimento deste trabalho. Preferencialmente, dessa base de dados, escolhemos os correspondentes ao período 1994 - 2014.

### **2.3. Motivação e objetivos.**

A motivação original para o desenvolvimento deste trabalho de doutoramento foi a existência de um conjunto de dados único, recolhidos desde os anos 80 até a atualidade. Deste conjunto, tivemos acesso desde o ano 1994 até 2014.

Esses dados consistem como descrito à frente em dados de hidrologia: Temperatura, Salinidade e Densidade, junto com dados de Oxigénio dissolvido, e nos últimos anos, correntes usando o ADCP de casco, e foram recolhidos a bordo do Navio de investigação norueguês Dr. Fridtjof Nansen. Dispôr de acesso à base de dados gerada pelas campanhas bianuais nas estações quente e fria, permitiu estudar diversos aspectos primariamente relacionados com a gestão das pescas, na República de Angola. Este conjunto de dados foi já parcialmente utilizado em estudos anteriores sobre: i) propagação de ondas de Kelvin com origem equatorial (Ostrowsky *et al.*, 2009), ii) circulação na região do centro de Angola consistente numa amarração de cerca de dois anos de duração apresentada e discutida em Kopke, 2017, e Tchivalanga *et al.*, (2018) e iii) sobre os efeitos do clima na biodiversidade (Jarre *et al.*, 2015).

Assim, tornou-se o objetivo principal deste trabalho o fazer um estudo geral da hidrologia e da dinâmica das águas da Zona Económica Exclusiva angolana, de forma integrada no tempo, durante um período de cerca de 21 anos, com duas realizações por ano. Isto foi possível por um lado ao dispor do conjunto de dados históricos, e por outro existir financiamento para uma bolsa de doutoramento do autor desta tese, funcionário do Instituto Nacional de Investigação Pesqueira de Angola.

Vários objetivos específicos foram visados:

- Fazer um enquadramento comparativo entre as campanhas oceanográficas realizadas *in situ*, com dados superficiais obtidos por: deteção remota, tais como SST (Sea surface temperature) ou SLA (Sea level anomalies); climatologias oceânicas clássicas (COADS, WOA).
- Estudar os principais aspetos da hidrologia e a circulação na região costeira angolana, permitindo aferir as condições médias da hidrologia e correntes na região de estudo, focando a atenção na plataforma e declive continentais nos seguintes aspetos:
  - i) Estudo da influência relativa dos sistemas contrapostos de Benguela e de Angola ao longo do gradiente geográfico da Margem Angolana;
  - ii) Caracterização do ciclo anual da hidrologia e correntes, baseado nos dados de duas épocas contrastantes, verão e inverno austral.
- Estudar as anomalias em relação ao valor médio das variáveis hidrológicas, a escalas interanuais, tentando enquadrar estas em fenómenos de escalas geográficas regionais (propagação de ondas, El Niño/La Niña Benguela).
- Estudar eventos de anos extremos durante o período acima definido, i.e., anos anormalmente quentes ou frios em relação à climatologia anteriormente definida, identificando as características destes no que se refere às variáveis hidrológicas.

Estes estudos foram ao longo do seu desenvolvimento, mais ligados à componente de oceanografia física, no entanto, torna-se necessário para o futuro fazer a ligação com outros aspetos mais ligados ao ecossistema da região, estudando a produtividade, e as capturas, relacionando estas com o estado físico do ecossistema.

## 2.4. Metodologia.

### 2.4.1. Desenho de Cruzeiros. Divisão da Área de estudo.

A Plataforma continental angolana e a sua ZEE estão divididas em três Zonas:

Zona Norte - entre o rio Congo ( $6^{\circ}$  S) e Palmeirinhas ( $9^{\circ}$  S).

Zona Centro - entre Ponta das Palmeirinhas ( $9^{\circ}$  S) e paralelo  $13^{\circ} 25'$  S, Sul da Baía Farta, Benguela.

Zona Sul - entre Baía Farta-Benguela ( $13^{\circ} 25'$  S) e o rio Cunene ( $17^{\circ} 15'$  S).

Foram contabilizados 42 cruzeiros oceanográficos em 21 anos, tendo-se realizado 2 cruzeiros por ano, um no verão austral e outro no inverno austral. As secções foram desenhadas o mais perpendicular possível em relação à linha de costa (Fig.2.1). Foram seguidas as normas definidas para o desenho de secções oceanográficas ao longo da costa. As secções secundárias e respetivas profundidades são definidas em função do objetivo principal e da estação do ano. Em cruzeiros pelágicos os estratos de profundidade a atingir, são em regra inferiores em relação às profundidades das secções dos cruzeiros demersais, onde se procura atingir a maior profundidade (Relatórios R/V Dr. Fridtjof Nansen). Tendo em conta que um dos objetivos principais dos cruzeiros R/V Nansen é a avaliação de stocks dos recursos marinhos vivos, foram introduzidas mais secções (secções secundárias e secções ocasionais), para além das Linhas Principais de Monitorização, conforme se enumera abaixo:

- 5 Linhas de Monitorização Principal (Congo, Palmeirinhas, Lobito, Namibe e Cunene).
- 17 Linhas de Monitorização Secundária.
- 21. Transectos Stantards.

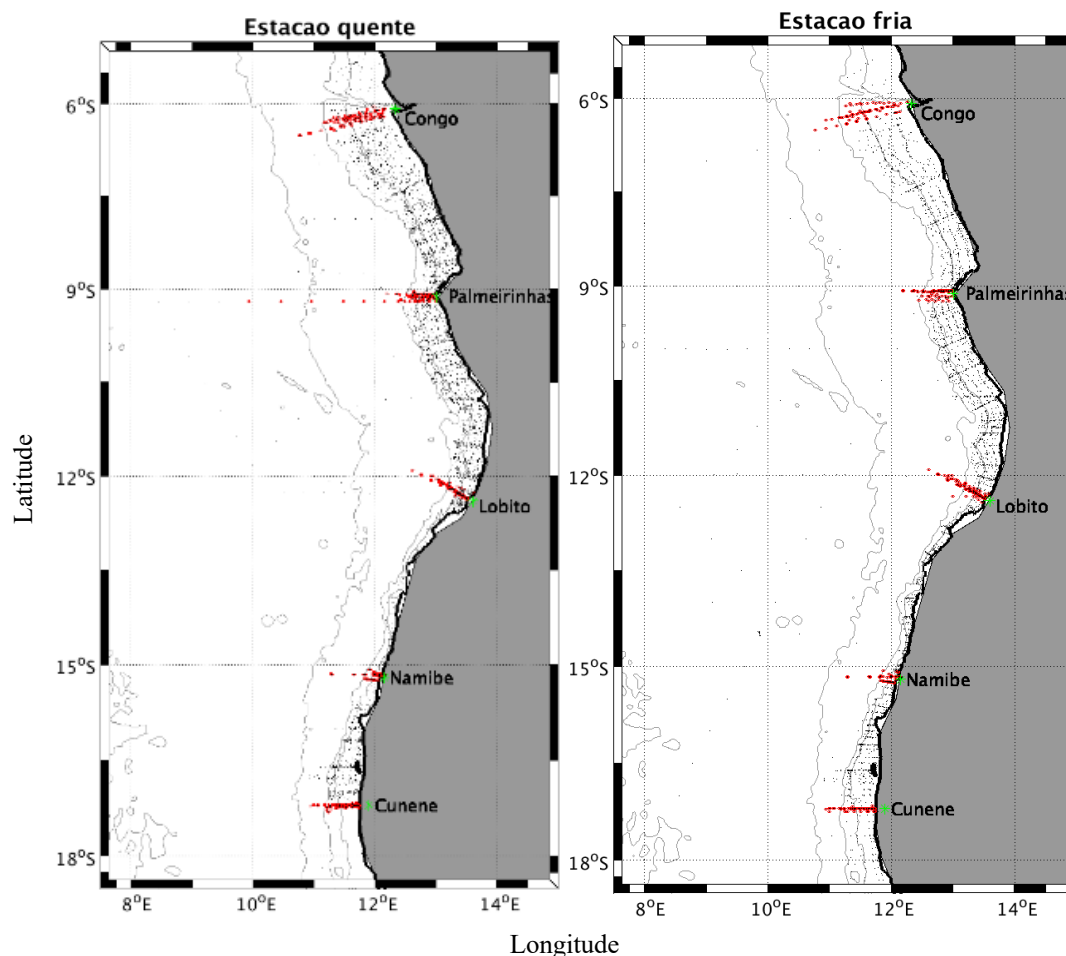


FIG. 2.1. Mapa das secções realizadas durante as estações quente e fria durante o período 1994-2014. Linhas de monitorização principais (a vermelho), secções secundárias e outras (a negro), e batimetria das três zonas.

#### 2.4.2. Instrumentos e variáveis observadas *in situ*.

As variáveis oceanográficas Temperatura (T), Salinidade (S) e Oxigénio dissolvido ( $O_2$ ) foram observadas *in situ* com uso da sonda CTD+911, acoplada à Rosette para obtenção de perfis verticais em tempo real através do software Seabird Seawave PC.

Nesse processo, os perfis de temperatura, salinidade e oxigénio foram obtidos em tempo real através do registo pelos respectivos sensores. Apesar de o CTD

contar com sensor para medir a fluorescência, esta variável não foi estudada no presente trabalho pois não dispomos do fator de calibração para as campanhas, que nos permite obter as concentrações de clorofila em função da fluorescência.

A manutenção dos sensores e controlo da qualidade dos dados foi da responsabilidade da equipa técnica da NORAD, IMR, e realizada pelos técnicos de instrumentação, pelo que, a calibração só foi feita quando fosse necessário e sob orientação destes. Para calibração, quando necessário, amostras de salinidade e oxigénio foram recolhidas em frascos de vidro de 100 mL e 50 mL, respetivamente, através de garrafas Niskin acopladas à rosette, a profundidades predefinidas (5 m, termoclina sazonal, mais 5 níveis abaixo determinadas pela mudança visual brusca nos perfis de temperatura, salinidade e oxigénio).

Através de um salinómetro AUTOSAL, a calibração da salinidade foi determinada pelo método condutivimétrico, que se baseia na razão entre as condutividades da amostra e a condutividade da água padrão, International Standard Sea Water, estabelecido em 1978 (UNESCO, 1981).

Para o oxigénio dissolvido, as amostras foram obtidas em frascos previamente calibrados, de modo a se obter volume e peso específicos. A calibração do sensor foi feita a partir de amostras de água recolhidas em frascos de 50 mL/L com um conjunto de titulação de Winkler, usando analisadores Multi-Dosimat e baseou-se no método proposto por Winkler em 1888 e Grupo Misto de tabelas e Normas Oceanográficas da UNESCO, JPOTS.

A Densidade Potencial ( $\sigma_\theta$ ), foi calculada usando dados de temperatura e salinidade mediante a equação de estado da água do mar estabelecida pela UNESCO (1985), referida ao nível de superfície.



### 2.4.3. Natureza dos dados.

Para o trabalho a que nos propusemos, os dados usados são do período compreendido entre 1994 a 2014. Estes dados pertencem ao Governo da República de Angola, Instituto Nacional de Investigação Pesqueira, Ministério das Pescas e do Mar.

As principais categorias de dados existem em arquivos em formato texto-ASCII, em unidades físicas. Alguns arquivos de dados, sobretudo os mais antigos, estão disponíveis noutros formatos, num universo de dados de 1985 - 2014.

Este conjunto de dados foi disponibilizado em formato texto, pelo IMR-Noruega, aos investigadores do Instituto Nacional de Investigação Pesqueira do Ministério das Pescas e do Mar. Parte destes dados foi recentemente tornada pública por colegas do INIP, em <http://www.remss.com>, tal como descrito em Tchipalanga *et al* (2018).

### 2.4.4. Leitura e tratamento dos dados.

O desenvolvimento deste trabalho foi realizado em múltiplas etapas. A recolha da informação oceanográfica resultante dos cruzeiros de Investigação a bordo do R/V Fridtjof Nansen foi uma das primeiras tarefas. Para esta tarefa, procedeu-se ao inventário e à recolha desta informação oceanográfica consistente em dados de CTD, e Oxigénio dissolvido. Foi feito o levantamento de dados dos cruzeiros bianuais (verão e inverno austrais) do “Programa Nansen” acima descritos. Após ter descarregado os dados disponibilizados pelo NORAD-IMR via ftp, procedeu-se a leitura destes dados, que consistiram em ficheiros de texto com a informação oceanográfica, utilizando rotinas Matlab.

Os mesmos foram transformados a ficheiros em formato Matlab contendo a informação da cada uma das estações, com a sua informação geográfica e horaria (latitude, longitude e profundidade, dia e hora), e a informação oceanográfica. A seguir utilizando rotinas Matlab foi realizada uma primeira visualização gráfica dos dados

oceanográficos consistentes em perfis verticais de todas estações e os ‘outliers’ foram removidos.

No total, foram lidos e processados dados de 13 secções na Zona Norte, 15 secções na Zona Centro e 11 secções na Zona Sul, para cada um dos anos do período 1994 - 2014. Não nos foi possível aceder aos dados de anos anteriores (1985 - 1993). Com recurso a um procedimento automatizado realizado em Matlab, para cada um dos anos de estudo (1994 - 2014), durante os dois cruzeiros (verão e inverno), foram construídos gráficos das referidas secções, com base em rotinas em Matlab, a partir da informação extraída das coordenadas geográficas e temporais das estações consistentes no dia, hora, latitude e longitude. Estas secções foram ainda inspecionadas manualmente por forma a determinar possíveis anomalias, e estas foram corrigidas de forma manual, eliminando as estações com valores anómalos.

Dado que a posição e o tempo de amostragem das secções foram próximos de um ano para outro (meses de Março - Abril para o verão austral e Agosto - Setembro para o inverno austral), foi possível realizar um tratamento estatístico consistente no cálculo dos valores médios de cada uma das grandezas observadas, para cada uma das duas estações (verão e inverno austrais), e assim poder construir climatologias destas grandezas. Este procedimento foi realizado através da criação de secções verticais standard, realizando a interpolação das estações observadas para as linhas standard para cada secção. Este procedimento foi repetido para cada uma das variáveis observadas, o que permitiu fazer o cálculo de secções climatológicas das 5 secções principais referidas (Congo, Palmeirinhas, Lobito, Namibe e Cunene).

Com vistas a poder calcular as médias climatológicas das variáveis hidrológicas estudadas, o número mínimo de ocorrências a ter em cada uma das secções foi feito com base no software Matlab, através de interpolação dos dados das diferentes campanhas, para a grelha construída. Para tal efeito, efetuaram-se cálculos estatísticos de filtragem, binagem e alisamento por janela móvel e interpolação linear em função

do tamanho dos perfis, profundidade máxima de cada secção e frequências de amostragem, usando algoritmos que permitem a interpolação das observações em grelhas regulares de profundidades na direcção vertical (em metros) e em distâncias horizontais a linha de costa (em km), nas estações quentes e frias, respetivamente, para as variáveis de interesse (T, S, O<sub>2</sub>). Observa-se que o maior número de estações com dados válidos é obtido na região da plataforma continental diminuindo este número em direcção ao largo (Fig.2.2). Verifica-se que, nas 5 secções, o número de ocorrências igual ou superior a 5 (anos) cobre praticamente as extensões das secções das zonas norte e centro até 160 km, 80 km, 100 km ao largo no Congo, palmeirinhas e Lobito, respetivamente, deixando a faixa mais oceânica de cada secção com o número de ocorrências inferior à 5 anos. Na zona sul, o número de ocorrências de 5 anos limitou-se aos 60 km da costa no Namibe, e aos 70 km e 100 km no Cunene.

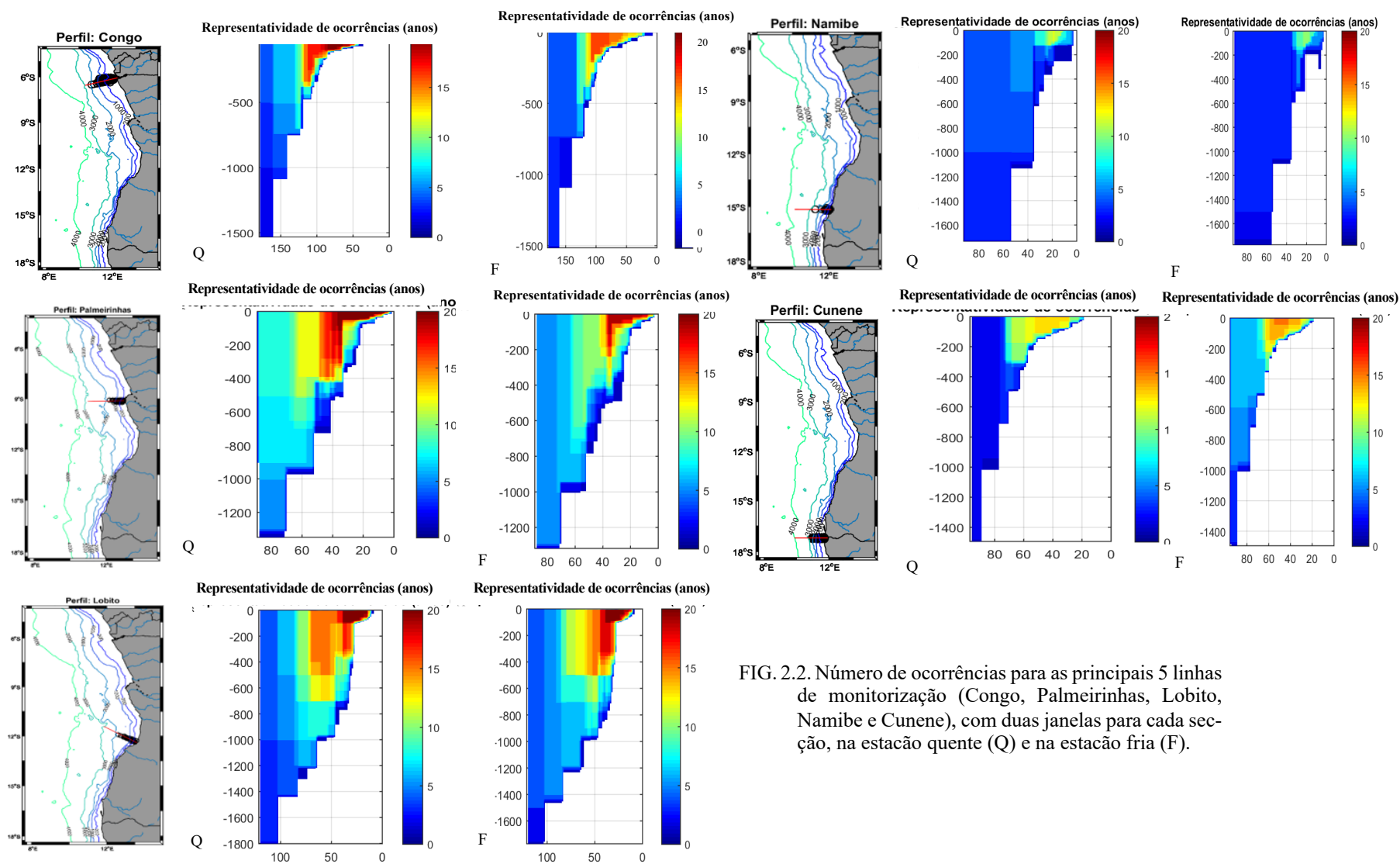


FIG. 2.2. Número de ocorrências para as principais 5 linhas de monitorização (Congo, Palmeirinhas, Lobito, Namibe e Cunene), com duas janelas para cada secção, na estação quente (Q) e na estação fria (F).

Foram calculadas as médias climatológicas para as diferentes profundidades e construíram-se secções verticais para cada uma das duas estações, tendo em conta o número de vezes de ocorrências ao longo dos 21 anos. Considerou-se que para poder obter uma climatologia numa determinada secção, são necessárias como mínimo 5 realizações ao longo do período de 1994 - 2014, ver Figura 2.2. Ao longo das secções verticais (da costa até ao largo), foram eliminadas as estações (normalmente ao largo) em que não havia um mínimo de 5 anos de dados que contribuem para a climatologia. Com os valores climatológicos foram realizados diagramas  $\theta$ -S e  $\theta$ -O com base nas distribuições climatológicas das 5 principais secções climatológicas que nos permitem caracterizar as massas de água principais na época quente e fria.

Este procedimento de criação de climatologias foi ainda estendido ao resto das secções secundárias (estações a preto na Figura 2.1), por forma a poder estimar os valores climatológicos das variáveis em estudo as diferentes profundidades, para as estações quente e fria. O conjunto destas análises será desenvolvido e discutido no capítulo 4.

Partindo das secções climatológicas para as estações principais, foram calculadas as anomalias das variáveis oceanográficas em relação ao seu valor climatológico, por subtração dos valores médios previamente calculados.

Com base nestas anomalias calculadas, foram geradas séries temporais resultantes da integração costa-largo e em profundidade (entre os zero e os 100 m de profundidade), para cada uma das 5 secções principais, desde Congo a Norte até Cu-nene a Sul.

Foi ainda possível identificar os anos em que aconteceram anomalias positivas (anos quentes) e anomalias negativas (anos frios) para cada uma das campanhas oceanográficas, nas 5 principais secções. Os dados resultantes deste cálculo são analisados no capítulo 5.

Desta forma foi possível identificar os anos anómalos em cada uma das variáveis para as campanhas de verão e de inverno. Estes anos anómalos foram estudados no capítulo dedicado aos valores extremos das variáveis hidrológicas (capítulo 6).

## CAPÍTULO 3

## ENQUADRAMENTO OCEANOGRÁFICO: DETEÇÃO REMOTA E DADOS CLIMATOLÓGICOS.

**3.1. Introdução.**

Uma das principais ferramentas na observação dos parâmetros ambientais oceânicos é a detecção remota, ciência que se ocupa da aquisição da informação sobre a superfície da terra, sem, no entanto, estar em contacto direto. A aquisição de dados é feita através de sensores instalados em satélites, aviões, barcos, e muito recentemente em drones. Os sensores adquirem a informação através da radiação emitida pelo oceano (seja em micro-ondas ou em infravermelhos, ou outras, o que constituem sensores passivos) ou pelo próprio sensor (sensores ativos), processando o sinal de volta (normalmente na banda das micro-ondas). Esta informação primária acerca da radiação é enviada diretamente ou com um certo atraso aos centros de recolha de dados em terra que a canalizam para as diversas instituições de investigação, onde são processadas, analisadas e divulgadas aos utilizadores. Alguns dos sensores a bordo de satélites de onde se pode extrair dados oceanográficos são o MODIS e o SeaWiFS (para a SST e a cor do oceano), com os quais se pode analisar e caracterizar dados de diferentes parâmetros físicos, tais como a temperatura, a salinidade e estimar a clorofila na camada superficial. Por outro lado, as climatologias realizadas com os dados históricos numa determinada região permitem aferir o estado médio no passado recente, e podem servir para enquadrar os resultados obtidos em campanhas oceanográficas.

Neste capítulo pretende-se apresentar um conjunto de dados provenientes de bases de dados obtidos por satélite e bases de dados climatológicas, que permitam esclarecer e melhor enquadrar os aspetos da oceanografia discutidos nos capítulos mais a frente.

### 3.2. Dados de satélite e variáveis climatológicas.

Os dados obtidos por sensores a bordo de satélites, tais como o vento e a tensão de vento, a temperatura, a salinidade, e a superfície livre do oceano, permitem calcular as suas médias climatológicas e as suas respectivas anomalias. Por outro lado, com os dados históricos *in situ* e por deteção remota, são construídas climatologias das diferentes variáveis oceanográficas de interesse para este estudo.

Em referência ao vento, as climatologias da velocidade e tensão do vento foram obtidas através de COADS (Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set). Foram extraídas ao largo da Zona Económica Exclusiva de Angola e nas regiões adjacentes, entre 4° S e 18° S, e a partir de -3°W, até a costa.

De forma similar, as médias da temperatura superficial foram obtidas usando a base de WOA05 (World Ocean Atlas, 2005). Foram também extraídas as anomalias da temperatura obtidas por sensores que estimam SST com base no produto NOAA Optimum Interpolation (OI), que consiste numa mistura de dados obtidos por satélite e observações *in-situ*, disponibilizadas, através de [www.remss.com](http://www.remss.com) ao longo da banda costeira e do equador, e que abrangem o período 1998 - 2019.

A salinidade climatológica (médias mensais) foi obtida através da WOA05 similarmente à temperatura. Foi ainda extraída a salinidade baseada nos resultados da missão SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity), e do sensor MIRAS (Microwave Interferometric Radiometer with Aperture Synthesis), do período 2010 – 2017, com dados processados como descrito em Kolodziejczyk *et al* 2016.

As anomalias interanuais da superfície livre foram obtidas através de SLA (Sea level anomaly) do AVISO (Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data). Foram também calculadas as anomalias SSH sazonais médias do nível do mar para o período 1993 – 2017, na banda equatorial e na zona costeira, como detalhado em baixo.



### **3.3. Resultados.**

#### **3.3.1. Distribuição do vento climatológico COADS ao longo do ciclo anual.**

A evolução do ciclo climatológico sazonal da tensão do vento, é apresentada na figura 3.1, com a representação da tensão do vento de COADS. A principal característica dos padrões climatológicos do vento é a presença ao longo de todo o ano de ventos de componente SE, denominados ventos alísios, com variabilidade meridional entre o N (ventos mais fracos) e Sul (alísios mais intensos), e com efeito de corte na direção zonal, i.e ventos mais fortes ao largo e mais fracos na região costeira. Ao longo do ciclo anual importa referir que a direção do vento varia pouco ao longo do ano e que a intensidade do vento apresenta valores mínimos durante o verão austral (janeiro - março, também denominada época quente) incrementando o seu valor até atingir um máximo durante o inverno austral (Julho - Setembro, época fria) conforme se observa na Figura 3.1.

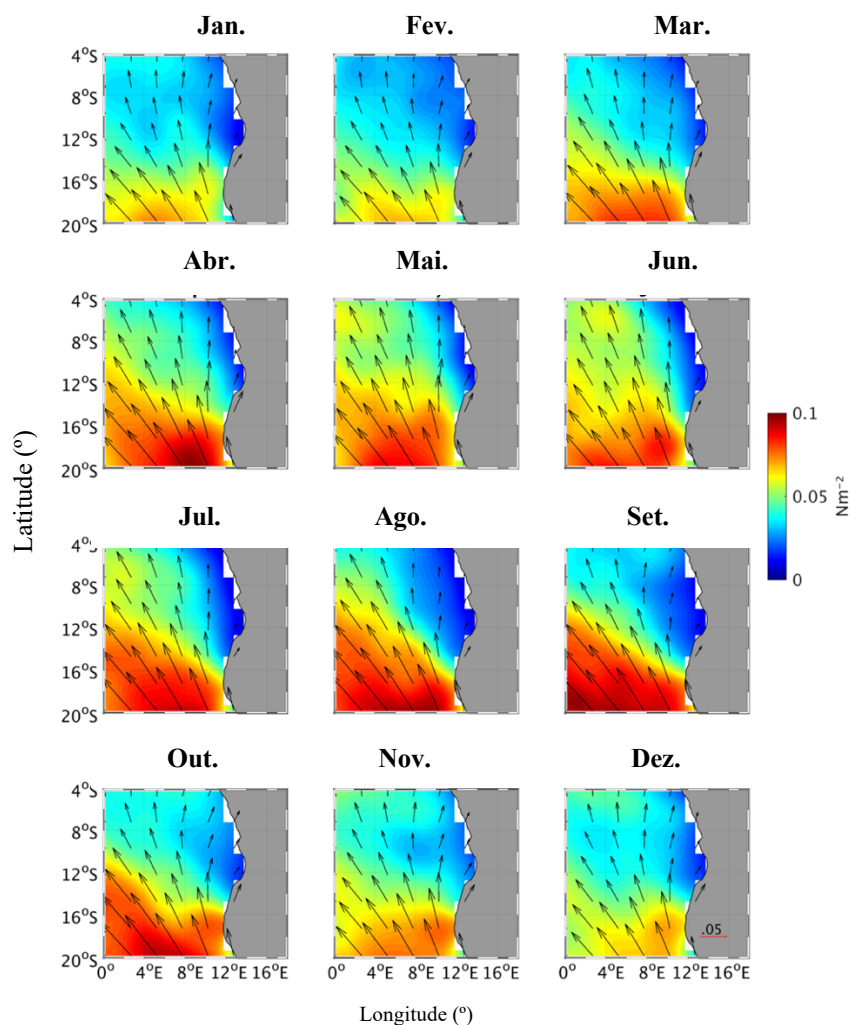


Fig. 3.1. Variação climatológica de velocidade do vento e tensão do vento ao largo da Zona Económica Exclusiva de Angola, obtida com a climatologia COADS.

### 3.3.2. Distribuição sazonal da temperatura e salinidade superficiais, e da superfície livre do oceano.

As médias mensais climatológicas de temperatura obtidas através da base de dados WOA05, (Figura 3.2a) apresentam temperaturas oceânicas mais elevadas a Norte de Angola, e mais frias a Sul, e se bem o seu gradiente latitudinal é razoavelmente constante ao largo, observa-se que as isotermas na região mais próxima da costa estão inclinadas para Sul, associado à presença da corrente de Angola que flui nessa direção, no bordo da plataforma continental. Na Figura 3.2 é ainda observada uma

região perto da costa com um forte gradiente de temperatura, perto dos 16° S, denominada Zona frontal Angola-Benguela (ver Capítulo 1).

Ao mesmo tempo que se observam gradientes espaciais, o ciclo sazonal mostra que como era de esperar, existe um ciclo sazonal na plataforma e zona oceânica em que as temperaturas são mais elevadas no verão austral, Janeiro - Março, e os mínimos no inverno austral, entre Junho - Setembro. Estes campos de temperatura obtidos a partir da climatologia WOA05 são similares aos obtidos por satélite, na Figura 3.2b linha de baixo, como se observa nos padrões obtidos para os três quadrimestres do ano, (Janeiro - Abril, Maio - Agosto e Setembro - Dezembro), para o período 1998 - 2019. Nesta figura pode-se apreciar com mais detalhe a estrutura espacial do campo de sst, em particular na região a Sul onde o afloramento associado ao sistema de Benguela é predominante.

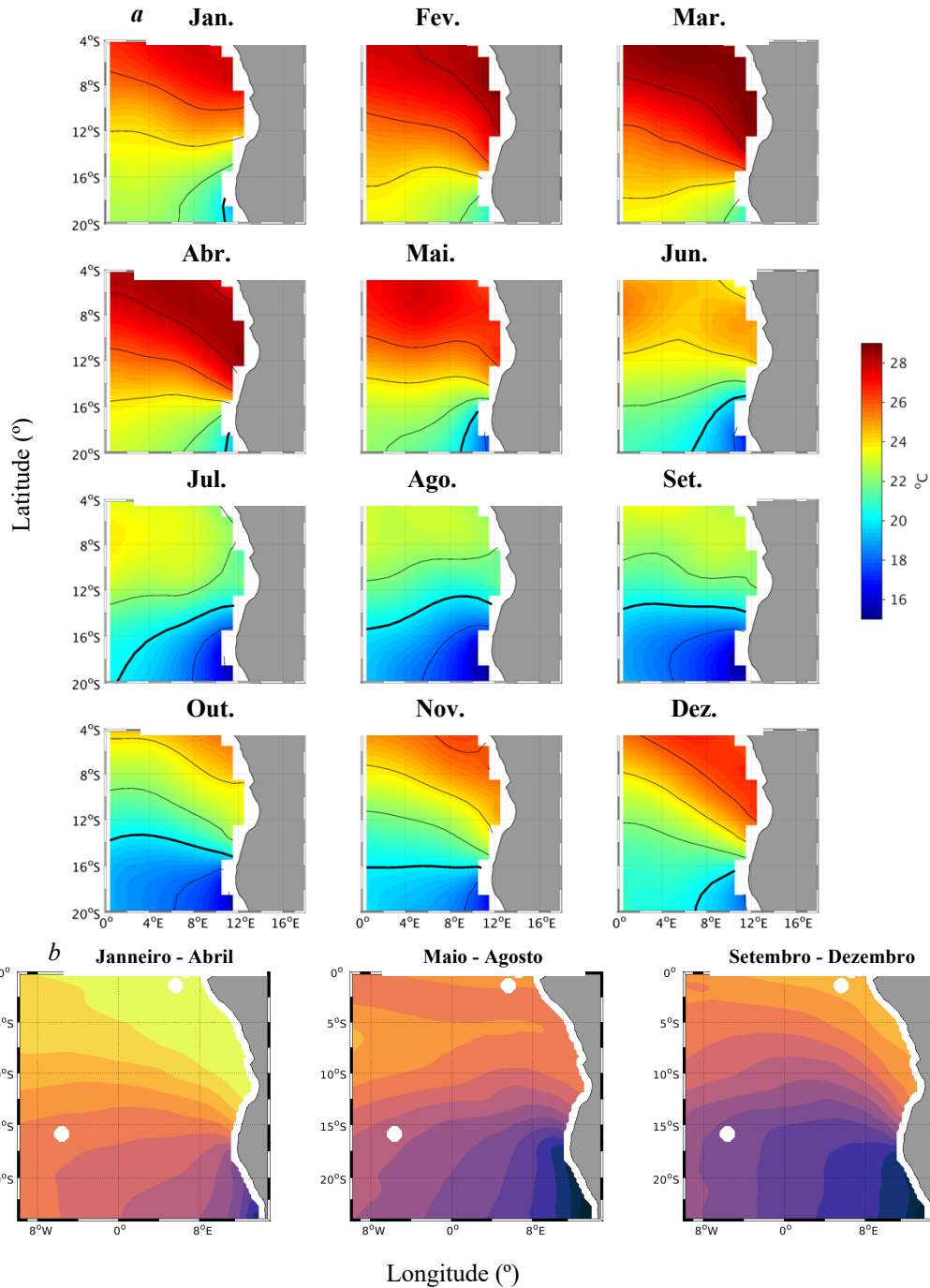


FIG. 3.2. Variação climatológica mensal de temperatura ao largo da zona económica exclusiva de Angola (a) resultante da climatologia WOA05, e por quadrimestres (b). A linha a negrito da Fig.3.2a indica o levitus climatológico.

No que diz respeito ao campo da salinidade, na climatologia WOA05, observa-se uma região de baixas salinidades a Norte e Centro (Fig.3.3a), associada à pluma do rio Congo, e dos principais rios da região do Norte de Angola. A pluma do rio Congo observada através do campo da salinidade climatológica está controlada

pelo escoamento do Rio Congo (ver figura 1.5) que, segundo Hopkins *et al* (2013), em termos climatológicos tem dois picos 56880 m<sup>3</sup>/s em novembro/dezembro e 38890 m<sup>3</sup>/s em Maio. Na Figura 3.3., observa-se pluma intensa que inicia em dezembro, atinge máximos entre Fevereiro a Abril e se estende até Maio.

Fora da região de influência da pluma do Rio Congo a salinidade apresenta valores máximos na região entre os 12° S e 15° S com variações sazonais (salinidades mais reduzidas/elevadas no verão/inverno austrais). A Sul, influenciada pelo sistema de afloramento de Benguela as salinidades na região costeira apresentam valores menores.

Os padrões sazonais do campo de salinidade média quadrimestral obtidos pela missão SMOS (Fig. 3.3*b*) são similares aos resultados do WOA05 (Fig. 3.3*a*), embora com mais detalhes espaciais da distribuição das plumas dos principais rios da região Norte e Centro de Angola.

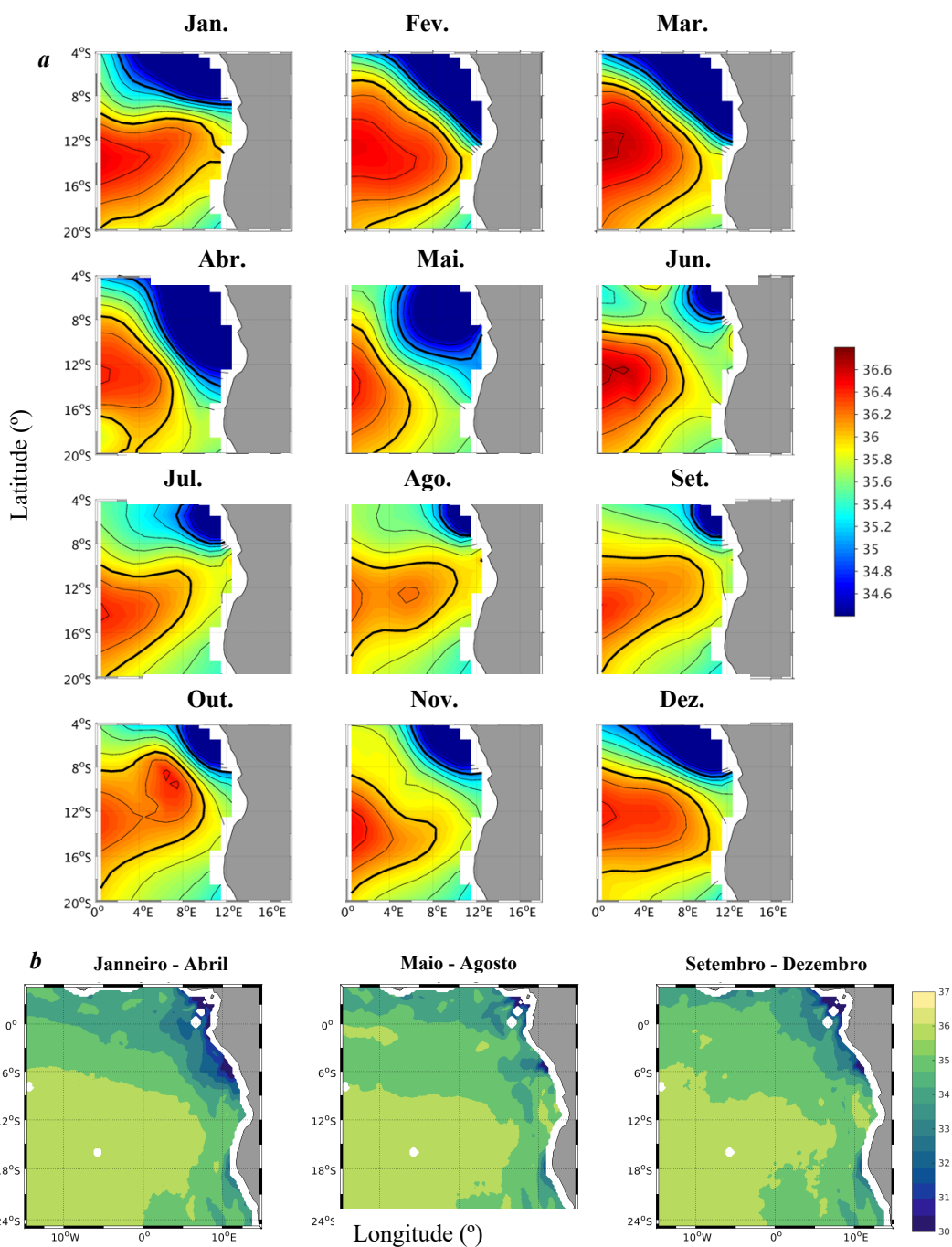


FIG. 3.3. Variação mensal do campo de salinidade superficial da região de Angola, obtida com a base de dados WOA05 (a). Evolução quadrimestral do campo de salinidade superficial obtida pelo sistema SMOS, para o período 2010-2017 (b). A linha a negrito da Fig.3.3a indica o levitus climatológico.

No que diz respeito a altimetria, foi calculada a evolução sazonal do campo de anomalia da superfície do mar SLA (Sea level anomaly), obtida através do sistema

AVISO, para o período 1993 - 1998 e visualizada na figura 3.4. As anomalias positivas durante o primeiro quadrimestre que correspondem ao verão austral mostra a predominância para um nível do mar elevado na região costeira, compatível com a presença da corrente de Angola que flui para Sul. O segundo quadrimestre apresenta o comportamento oposto, i.e, um decréscimo do nível do mar associado a presença de afloramentos costeiros, por um lado associados a dinâmica do sistema de Benguela e os ventos alísios, e por outro com evidências de sinais de nível do mar mais baixo, vindos da região equatorial, associado à propagação de sinais a partir do guia equatorial, como discutido mais a frente.

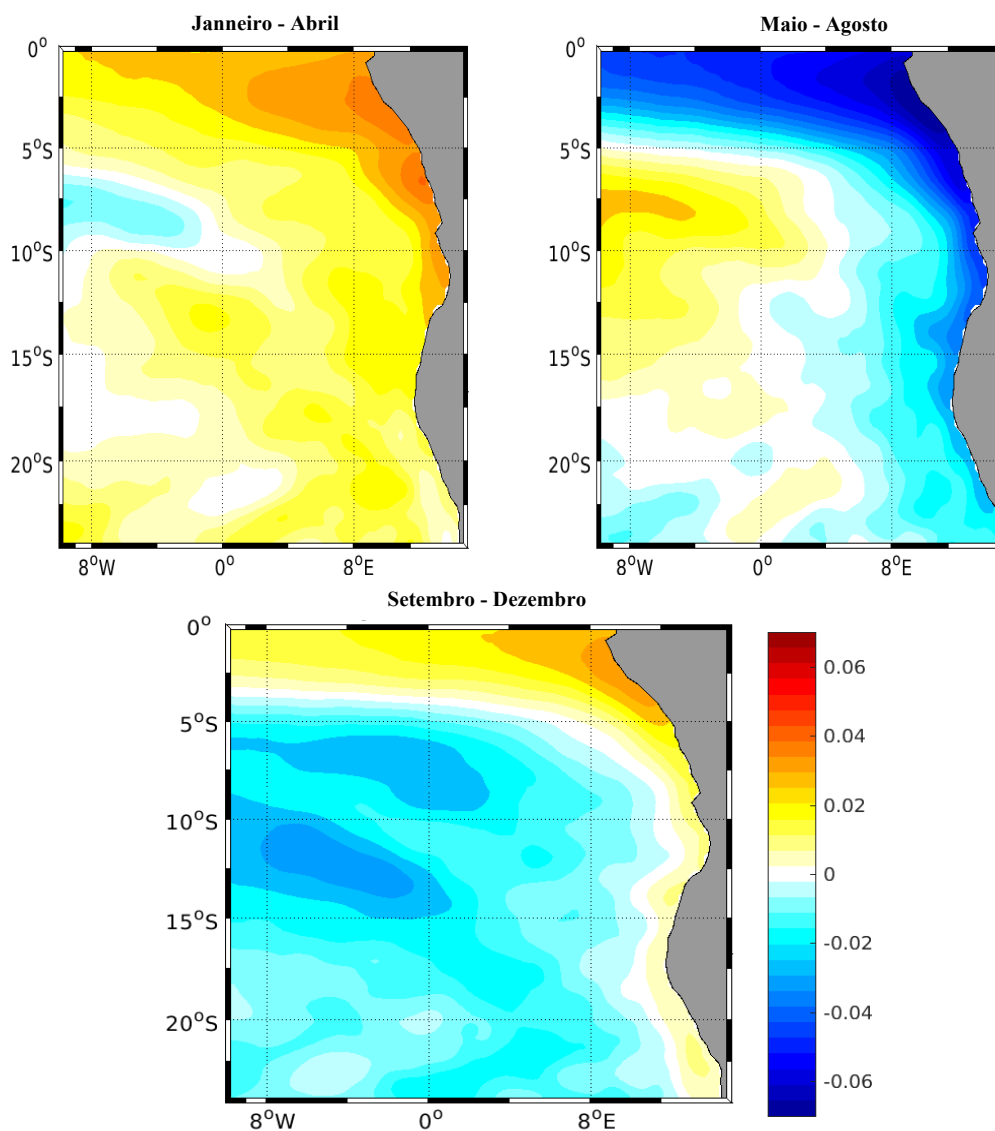


FIG. 3.4. Variação climatológica de anomalias da superfície do mar SLA (Sea level anomaly) por quadrimestre e para o período 1993 – 2018.

### 3.3.3. Propagação de sinais ao longo do equador e da costa africana.

Por forma a poder estudar a propagação de sinais ao longo da guia equatorial, e da região costeira, tais como ondas de Kelvin equatoriais e CTW (Coastal Trapped Waves), foi realizada a extração de dados de SST (do site [www.remss.com](http://www.remss.com)) de uma banda de 1° de largura de cada lado na zona equatorial, desde 10° W até a costa, prosseguindo ao longo da região costeira, até os 25° S. Com esta informação, foi realizado um gráfico (diagrama de Hovmoller, Figura 3.5) da evolução temporal desde 1998 até 2019, das anomalias de SST nessa banda em relação ao ciclo sazonal previamente calculado, por forma a identificar as anomalias quentes e frias, ao longo da banda equatorial (lado esquerdo do gráfico) e ao longo da costa africana (lado direito do gráfico). Esta metodologia foi previamente utilizada por Kounge *et al* (2017), para identificar estes eventos. Alguns destes eventos serão logo identificados e analisados nos capítulos 5 e 6 nas diferentes secções amostradas. Entre os eventos quentes podemos identificar por exemplo os anos 1998, 1999, 2001, 2006, 2007 e 2011 e entre os eventos frios, os anos 2004, 2005, 2010, e 2012.

Normalmente as anomalias quentes ou frias são originadas no equador, e propagadas ao longo do guia equatorial seguindo a dinâmica das ondas de Kelvin equatorial, e chegando à zona costeira são propagadas na direção ciclônica, deixando a costa a sua esquerda (no hemisfério Sul), em forma de CTW. A origem dessas anomalias está relacionada com alterações do sistema acoplado oceano-atmosfera, consistente em alterações dos padrões da circulação atmosférica equatorial, que enfraquecem/aumentam os ventos zonais no equador, o que causa perturbações na termoclina, e a propagação destas através das ondas referidas. Estas perturbações podem propagar-se até o Sul de Angola e Namíbia, como se pode ver na Figura 3.5.



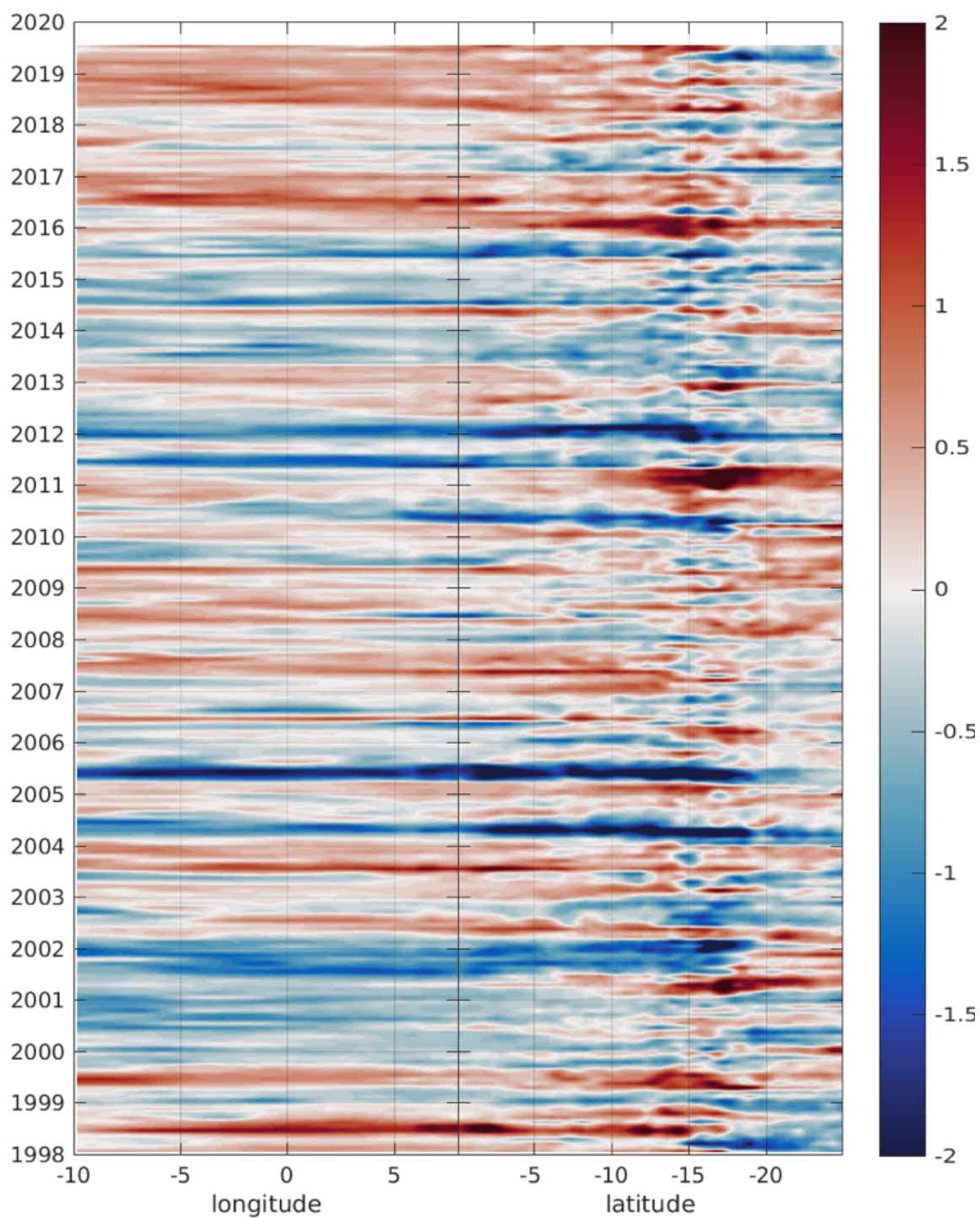


FIG. 3.5. Diagrama de Hövmoller das anomalias de SST ( $^{\circ}\text{C}$ ) em relação ao ciclo sazonal, ao longo de uma banda de  $1^{\circ}$  entorno do equador (longitudes desde  $10^{\circ}\text{W}$  até a costa) e numa banda de  $1^{\circ}$  em relação à linha de costa, desde o equador ( $0^{\circ}\text{S}$ ) até os  $25^{\circ}\text{S}$ .

De forma similar, foram realizados diagnósticos para as anomalias do nível do mar (SLA), obtidas por altimetria por satélite, usando os dados do sistema AVISO, (Figura 3.6 *a, b*).

Inspirado-nos nos trabalhos de Kopke (2017) e no artigo de Tchipalanga *et al.* 2018, foi realizado um gráfico similar ao da figura 3.5, mas usando a SLA, fazendo a média mensal para o período 1993 - 2018 (Figura 3.6*a*), da SLA na banda equatorial de 1° de largura para N e S, dos 40°W até a costa, seguida da SLA ao longo da banda costeira de 1° para fora da linha de costa. A linha vertical separa a propagação W - E ao longo do equador da propagação N-S ao longo da costa.

Na Figura 3.6*a* é possível verificar a existência de anomalias do nível do mar mostrando a propagação de um sinal de afloramento (SLA negativa) a partir de Junho, e afundamento (SLA positiva) em dois períodos, outubro e fevereiro em que ondas de Kelvin se propagaram de Oeste a Leste ao longo do equador, continuando a sua propagação ao longo da região costeira até o Sul de Angola.

Ao detalhar para os diferentes anos do período 1993 - 2017 (Fig3.6*b*) confirma-se este comportamento, embora haja anos em que estas anomalias de nível do mar são particularmente pronunciadas, e em geral em concordância com as anomalias de SST em relação ao ciclo sazonal, previamente apresentadas (Fig 3.5).

Esta informação corrobora de forma independente utilizando dois tipos de grandezas (SST e SLA) a origem e a variabilidade dos eventos denominados El Niño-Benguela / La Niña-Benguela, que consistem na propagação de anomalias com origem na banda equatorial e que se propagam ao longo desta, continuando ao longo da costa em forma de ondas de Kelvin e CTW. Estas anomalias serão discutidas no capítulo 5 com mais detalhe, e exemplos de secções de hidrologia para alguns anos anómalas, a várias latitudes ao longo da costa angolana, serão discutidos no capítulo 6.

Para além deste comportamento sugerindo a presença de forçamento não local existe também a resposta ao forçamento direto, principalmente do vento tal como discutido recentemente por Lübbecke *et al.* 2019, para um evento quente em 2016, com anomalias de temperatura atingindo os 3 °C.

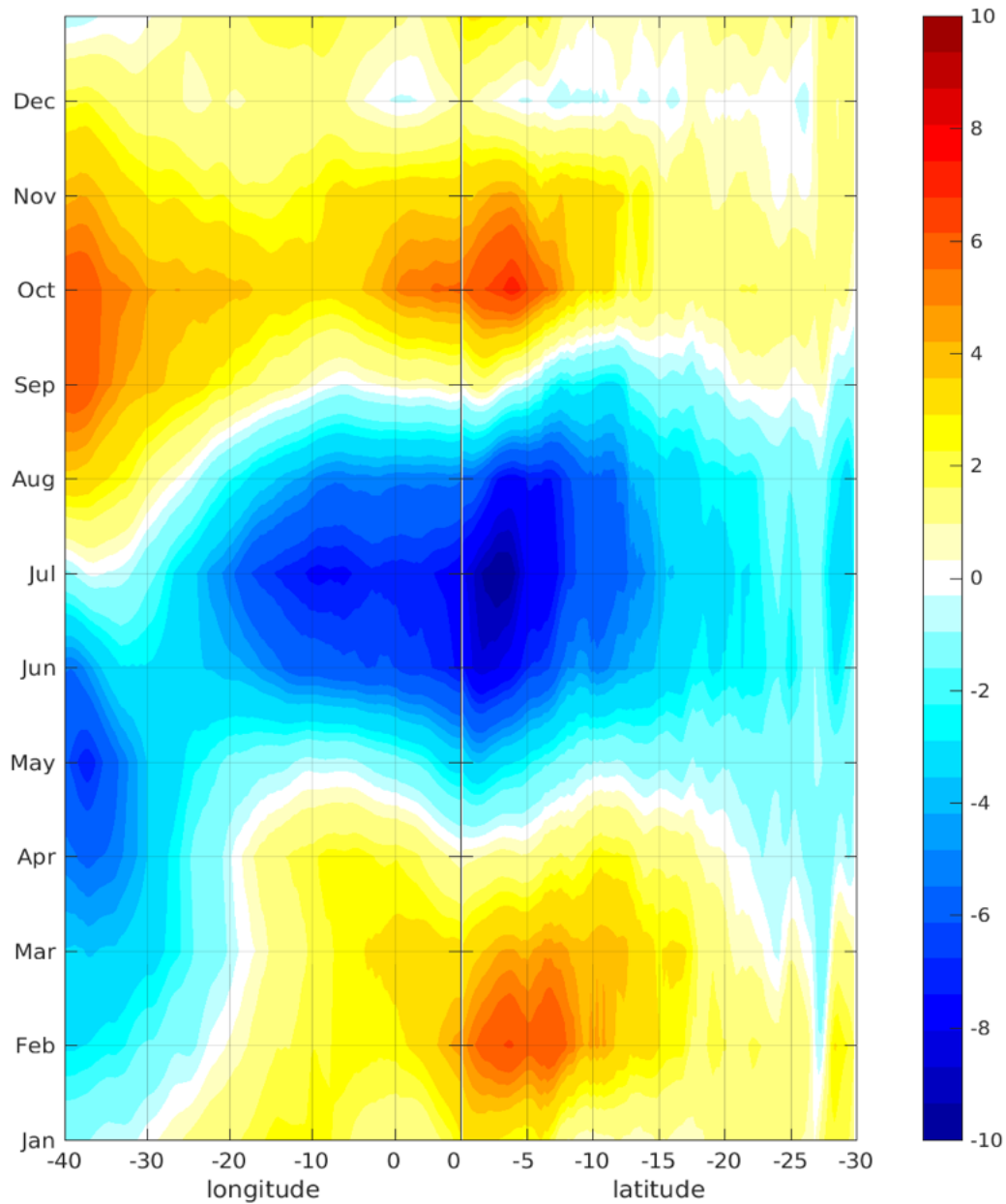


FIG. 3.6a. Anomalias SSH intersazonais do nível do mar obtidas através da SLA do AVISO, período 1993 - 2017, em cada ponto da Grelha.

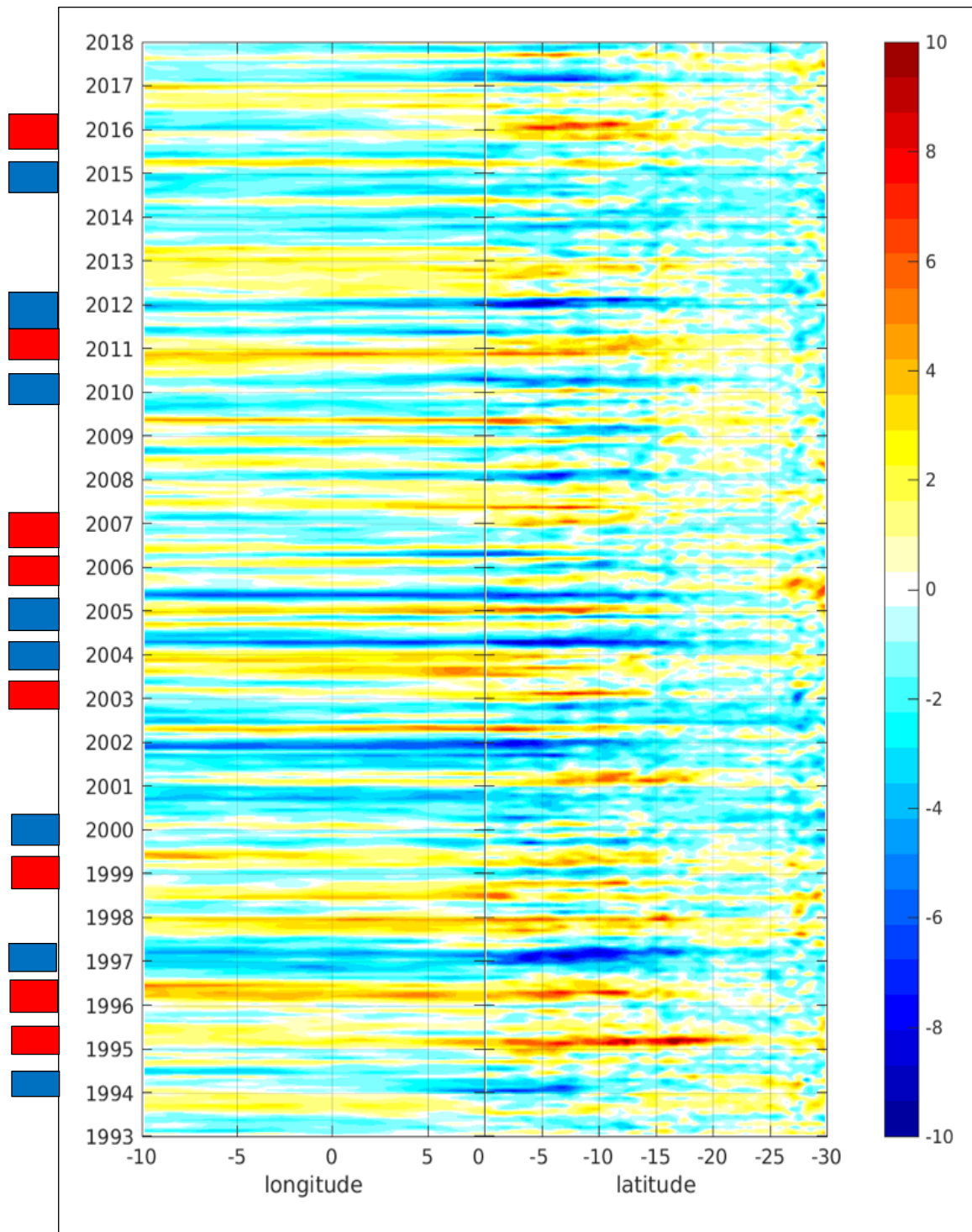


FIG. 3.6b. Anomalias SSH interanuais do nível do mar obtidas através da SLA do AVISO, médias do período 1993 - 2017. Os rectângulos a vermelho indicam a ocorrência de eventos quentes (anomalias positivas, anos sazonalmente quentes), e os rectângulos a azul a ocorrência de eventos frios (anomalias negativas, anos sazonalmente frios).



## CAPÍTULO 4

# CLIMATOLOGIA DAS ÁGUAS DA ZONA ECONÓMICA EXCLUSIVA DE ANGOLA.

### 4.1. Introdução.

O clima na região costeira de Angola, caracteriza-se por possuir duas estações principais bem definidas: o verão austral (ou estação quente, entre Janeiro - Abril) e o inverno austral (ou estação fria, entre Maio - Agosto).

Nos últimos 30 anos têm vindo a realizar-se cruzeiros semestrais com o "R/V Dr. Fridtjof Nansen " no âmbito do Programa Nansen, como referido nos capítulos 1 e 2. As secções amostradas foram desenhadas o mais perpendicular possível em relação à linha de costa segundo as normas definidas, conforme se observa nas 5 linhas principais posicionadas ao longo da costa de Angola (Fig.4.1). Neste capítulo descreve-se a climatologia sazonal de alguns parâmetros físico-químicos principais (temperatura, salinidade, densidade e correntes, assim como o oxigénio dissolvido). Para o efeito, foi realizada a divisão entre o verão (época quente) e inverno (época fria), por forma a realizar a caracterização da variabilidade sazonal.

A Corrente quente de Angola em direção ao Pólo e a corrente fria de Benguela em direção ao Equador, ambas de sentidos opostos, são os principais fatores que determinam a dinâmica da plataforma continental e talude (Moroshkhin *et al.*, 1970; Berrit, 1976; Berrit & Dias, 1977; Shannon, 1985; Strømme *et al.*, 1991; Wedepohl *et al.*, 2010).

### 4.2. Dados e métodos.

Para este trabalho foram processados dados de 21 anos, tendo-se realizado 2 cruzeiros por ano, um na estação quente e outro na estação fria. Foram analisadas as principais secções definidas na Figura 4.1, em função da sua extensão e frequência de amostragem,

conforme detalhado no capítulo 2. Para o cálculo foram tidos em conta o tamanho dos perfis, e a profundidade máxima de cada secção. Foram desenvolvidos procedimentos que permitem a interpolação das observações para profundidades e distâncias regulares em relação à costa, tal como descrito no capítulo 2.

Os dados de hidrologia foram disponibilizados pela NORAD - IMR para o desenvolvimento deste trabalho. Tivemos também acesso à base de dados de ADCPs de casco do navio Nansen, disponibilizados online pelo Instituto Nacional de Investigação das Pescas e do Mar de Angola (por Tchipalanga *et al.* (2018), que foram processados para calcular as velocidades paralelas à costa para cada uma das secções principais.

Os perfis verticais médios da corrente (ADCPs) paralela à costa, resultantes de médias climatológicas para a estação quente e para a estação fria, sub-índice ‘*a*’ para a estação quente, e ‘*b*’ para a estação fria, são apresentadas e discutidas a seguir as secções verticais de temperatura, salinidade e oxigénio dissolvido. Valores negativos da corrente (cores azuis) são representativos de correntes em direcção ao Pólo (para Sul), e os valores positivos (cores castanhas) representam fluxos em direcção ao Equador (para Norte). Devido a que o ADCP do casco do Navio está situado a cerca de 6 m de profundidade, e que a camada de água superficial mais próxima do ADCP não é corretamente amostrada, os primeiros 25 m de profundidade da coluna de água não foram considerados na análise.

Para a apresentação dos resultados foi realizada a divisão entre a denominada época quente que correspondente as campanhas realizadas entre os meses de Fevereiro a Março, e a época fria que corresponde às campanhas realizadas durante os meses de Julho a Agosto por forma a poder diferenciar a variabilidade sazonal, embora de forma limitada porque apenas são realizadas duas campanhas por ano.

Foram ainda realizadas médias climatológicas incluindo todas as estações disponíveis (Fig. 1) por forma a poder analisar a variabilidade na direcção N-S ao longo da costa angolana. Concentramos a nossa análise na camada superficial aos 10 m de

profundidade, e duas camadas subsuperficiais, aos 100 m e 200 m de profundidade, por baixo da termoclina sazonal.

Foram também analisados diagramas  $\theta$ -S e  $\theta$ -O, para os dados resultantes das climatologias realizadas nas 5 secções principais.

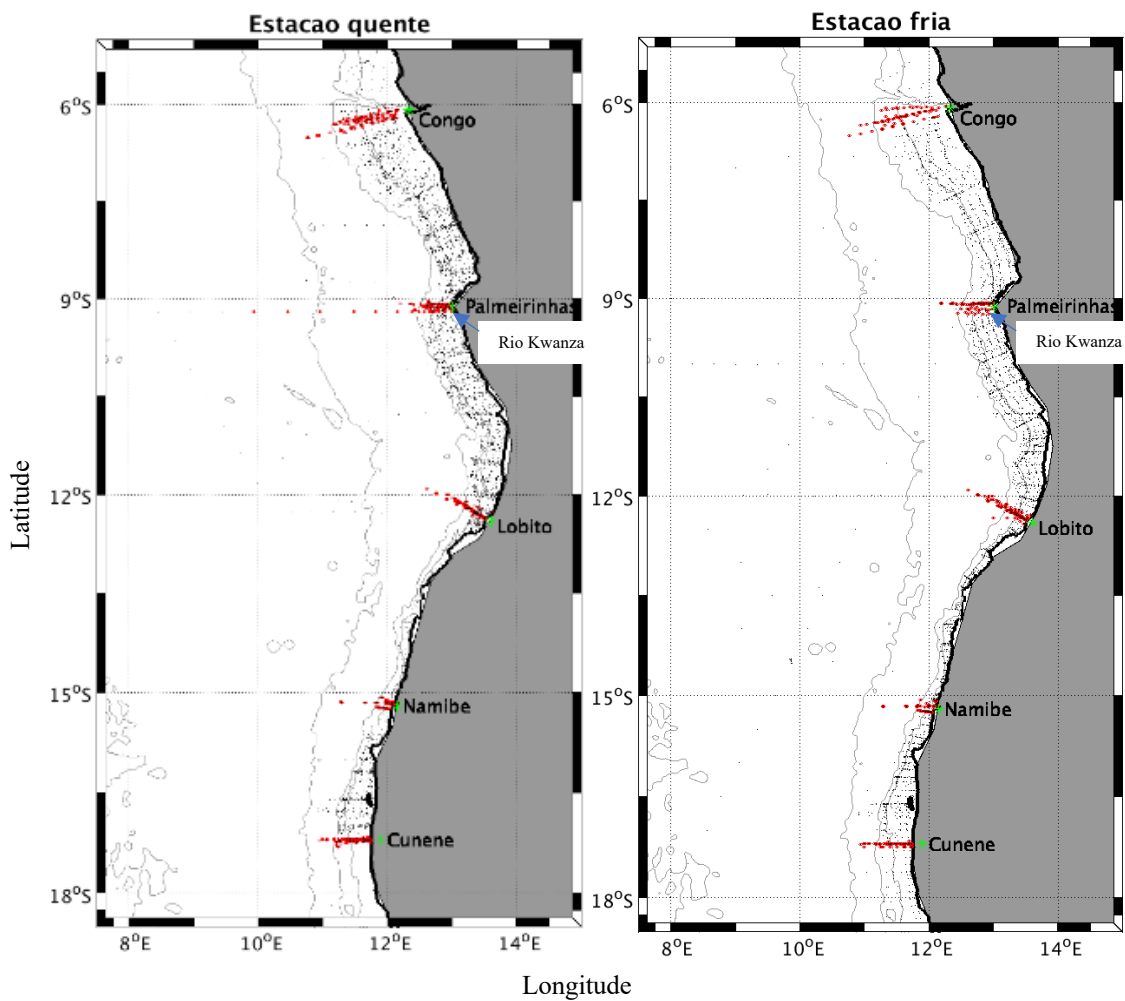


FIG. 4.1. Mapa da costa de Angola, com as secções principais (a vermelho) e secções secundárias (a preto) utilizadas na estação quente e na estação fria, de 1994 - 2014.



### **4.3. Resultados.**

#### **4.3.1. Secções climatológicas verticais de temperatura salinidade, oxigénio dissolvido e correntes.**

Os resultados descritos neste estudo estão baseados na climatologia calculada através da média de longo termo de temperatura, salinidade, oxigénio dissolvido e correntes de cada uma das secções principais (Congo, Palmeirinhas, Lobito, Namibe e Cunene), determinados com base na metodologia descrita no capítulo 2.

##### **4.3.1.1. Secção do Congo.**

###### **4.3.1.1.1. Temperatura, salinidade e oxigénio dissolvido.**

Na secção de Congo (Fig.4.2, 1ª linha), na estação quente, observa-se a presença da corrente de Angola em direção Sul, que está associada ao afundamento ao largo (entre 100 km a 150 km) do campo da temperatura e salinidade em direção à costa entre os 50 m e os 150 m de profundidade, (com um sinal de salinidade mais elevado na camada subsuperficial, com valores à volta dos 36. Nesta secção climatológica é clara a presença da pluma do rio Congo com valores de salinidade inferiores a 34 associada às precipitações mais elevadas e a fluxos do caudal do rio Congo durante esta época do ano. O valor mínimo de salinidade representado na escala, 35, está saturado (Figura 1.5). O campo de oxigénio é caracterizado por baixos valores nas camadas mais profundas, ao nível das águas centrais, por baixo da termoclina sazonal, enquanto a camada de superfície apresenta valores mais elevados de oxigénio dissolvido, superiores a 4 mL/L. O campo da densidade potencial (representado pelas isopícnas 1025 a 1026.5 kg.m<sup>-3</sup>) por baixo da pluma está mais influenciado pela temperatura.

Na estação fria (Fig.4.2, 2ª linha; com escalas de cores diferentes da estação quente para uma melhor visualização), é observada a tendência para a inversão do sentido da corrente subsuperficial, associada à tendência para afloramento costeiro, devido à presença de ventos de Sul (alísios de sudeste) característicos da circulação atmosférica durante este período, conforme se constata nas figuras 4.2 e 4.3b). O campo de salinidade na plataforma continental reflete as mudanças devido à circulação induzida pelo vento. O oxigénio dissolvido também acompanha o sinal de afloramento perto da plataforma continental, embora apresenta uma camada superficial menos espessa, e com valores mais elevados em relação à estação quente na camada mais superficial. O sinal de afloramento descrito traz como consequência a elevação de águas com níveis inferiores de oxigénio dissolvido.

#### **4.3.1.1.2. Correntes.**

Durante a estação quente, aos 6° S (Figs. 4.3a), correspondente com a latitude da secção do Congo, entre a perto da superfície e o nível dos 70 m de profundidade, é observada ao largo, a presença de uma corrente em direção ao pólo, que pode ser associada à denominada Corrente de Angola, com velocidades médias para Sul de até cerca de 10 cm/s, localizadas entre o bordo da plataforma continental e a região mais para o largo, até o limite da seção (170 km ao largo). Esta corrente estende-se para profundidades superiores na região mais ao largo. Desde uma distância de perto de 150 km até a costa, é observado um escoamento em direção ao equador com velocidades compreendidas entre 1 cm/s e 10 cm/s, que é compatível com a denominada Corrente de Benguela e seu transporte em direção ao equador. Esta corrente tem características sub-superficiais ao largo e superficiais na plataforma continental (desde a isobata 75 m até a costa).

Na estação fria, (Figs. 4.3b), é observada a predominância de escoamento para o equador (máximo de 10 cm/s), correspondente com a Corrente de Benguela, embora escoamento fraco para Sul pode ser observado a meio da plataforma continental (isóbata 50 m), entre 100 m e 200 m e perto do fundo, correspondendo este

escoamento com evidências da Corrente de Angola mais fraca durante o inverno austral, com características compatíveis com as de subcorrentes em direção aos pólos, associadas aos sistemas de afloramento na extremidade leste (Borda) Leste.

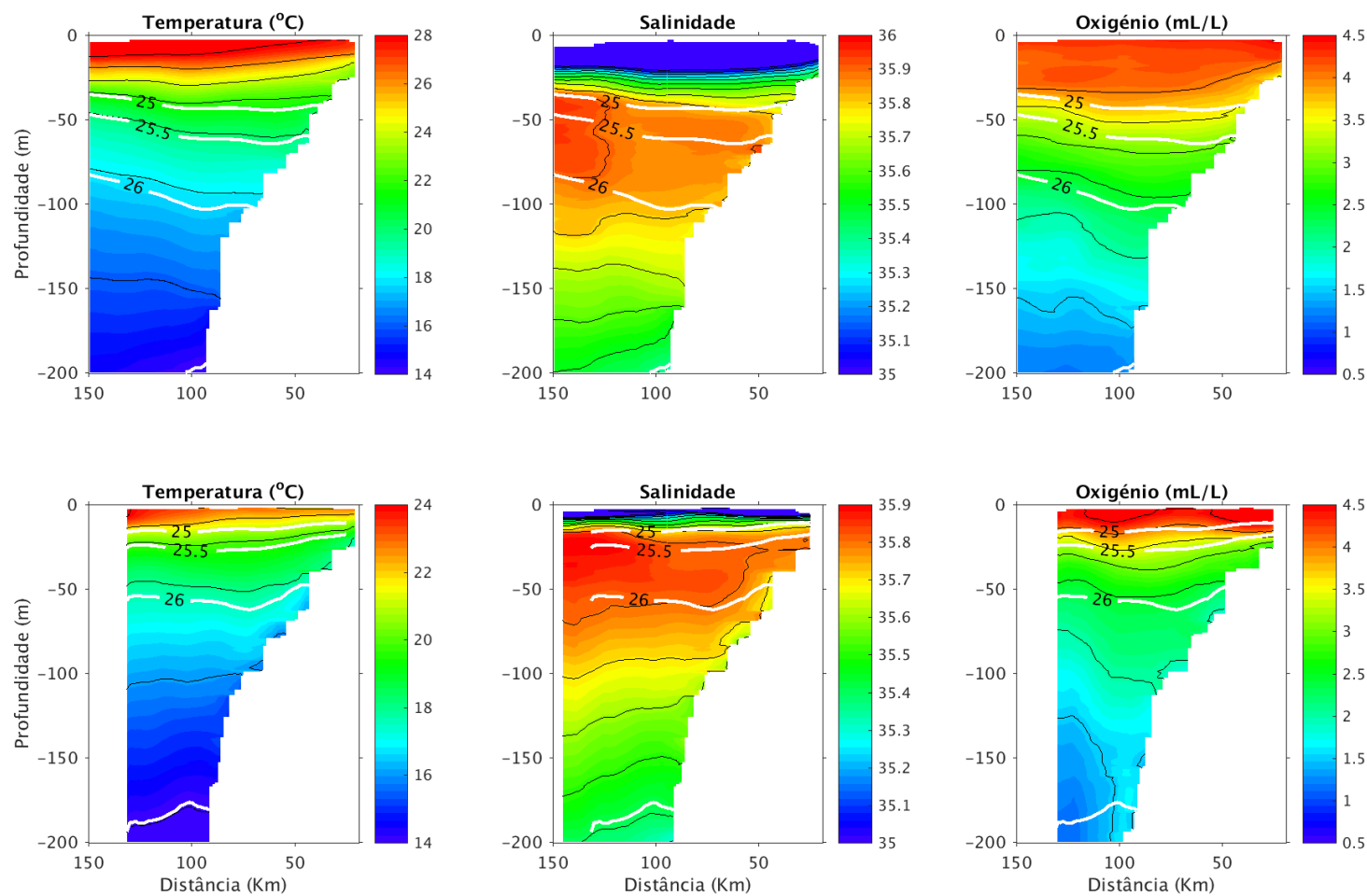


FIG. 4.2. Distribuição climatológica de temperatura, salinidade e oxigênio dissolvido para a secção de Congo na estação quente (1ª linha) e na estação fria (2ª linha). As isolinhas desenhadas a cor preta são iguais às representadas nas barras de cores. As isopícnas de densidade potencial são representadas em linhas de contorno brancas.

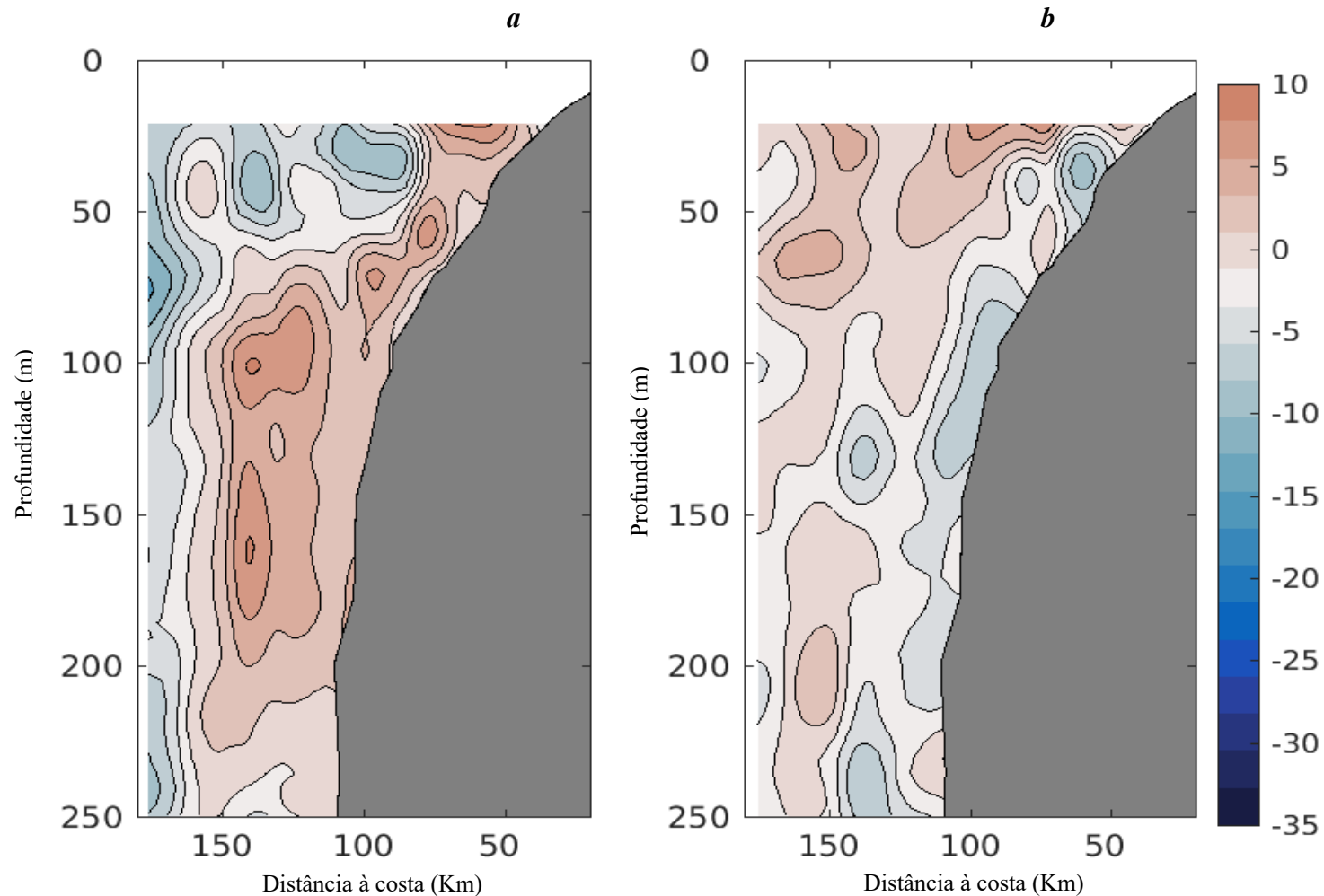


FIG. 4.3. Correntes climatológicas aos 6°S (Congo). Velocidades climatológica das correntes (cor azul - valores negativos, corrente advectada em direção ao pólo Sul; cor castanha - valores positivos, fluxo em direção ao equador). Estação quente (*a*) e estação fria (*b*).

#### **4.3.1.2. Secção de Palmeirinhas.**

##### **4.3.1.2.1. Temperatura, salinidade e oxigénio dissolvido.**

Na secção das Palmeirinhas (Fig.4.4, 1ª linha), na estação quente observa-se tendência para o afundamento das isotermas e isohalinas associadas da Corrente de Angola fluindo na direcção Sul, começando a profundidades entre 30 m a 40 m até perto dos 200 m de profundidade. A pluma de águas pouco salinas (salinidade inferior a 34, note-se que a escala está saturada) estende-se ao longo da secção, mas é ligeiramente reduzida em relação à pluma do rio Congo, porque o Rio Kwanza, principal fonte de água doce associada a esta pluma, tem menor caudal do que o Rio Congo. As águas superficiais apresentam as maiores concentrações de oxigénio, observando uma diminuição da sua concentração que se estende desde os 100 m aproximadamente em direcção ao fundo, e com padrões de isolinhas de oxigénio dissolvido similares as do campo de temperatura.

Na estação fria (Fig.4.4, 2ª linha), os campos de temperatura e salinidade, são caracterizadas pelo afloramento na camada mais superficial e costeira de águas frias e menos salinas em direcção à costa. A pluma de águas pouco salinas é muito menos intensa do que na secção do Congo, e com uma extensão limitada à plataforma continental, o que é associado à vasão do Rio Kwanza associado a forte diminuição das precipitações significativas nesta região. A camada de superfície é caracterizada por altas concentrações de oxigénio (4 mL/L a 4,5 mL/L), e acompanha a tendência de afloramento costeiro de águas com menor concentração na região perto da costa.

##### **4.3.1.2.2. Correntes.**

Na secção de Palmeirinhas localizada à latitude centrada em 9° S (Figs. 4.5a), na época quente (verão austral), é observada a presença de um escoamento intenso para Sul com valores máximos perto da superfície de cerca de 25 cm/s a 30 cm/s, localizado na região externa da plataforma a cerca de 40 km da costa. Esta corrente

tem um efeito de corte vertical intenso e estende-se desde a superfície até perto do fundo até da profundidade máxima amostrada. O seu núcleo tem uma largura de cerca de 40 km. Esta corrente corresponde a Corrente de Angola, e é (através da relação do vento térmico) associada ao efeito de afundamento do campo de temperatura e salinidade descrito acima. O escoamento para norte é observado na região mais ao largo entre 50 km e 80 km da costa, e em profundidades superiores a 100 m aproximadamente, ou seja, aqui a Corrente de Benguela tem características de uma corrente de sub-superfície no verão austral.

No inverno austral (Figs. 4.5*b*), se observa ao longo da secção das Palmeirinhas escoamento em direcção ao equador na plataforma continental até aos 100 m de profundidade, associado ao afloramento local descrito acima, enquanto escoamento para Sul associado a Corrente de Angola se estende mais à profundidades superiores, com um carácter mais barotrópico, e com valores menos intensos do que no verão. Escoamento de cerca de 15 cm/s se estende desde a superfície até os 170 m aproximadamente. Mais para o largo é observado que a Corrente de Benguela (escoamento positivo) se estende desde perto da superfície até a profundidade máxima de amostragem do ADCP, com valores até 10 cm/s e esta bem separada da Corrente de Angola numa banda centrada a cerca de 60 km ao largo.

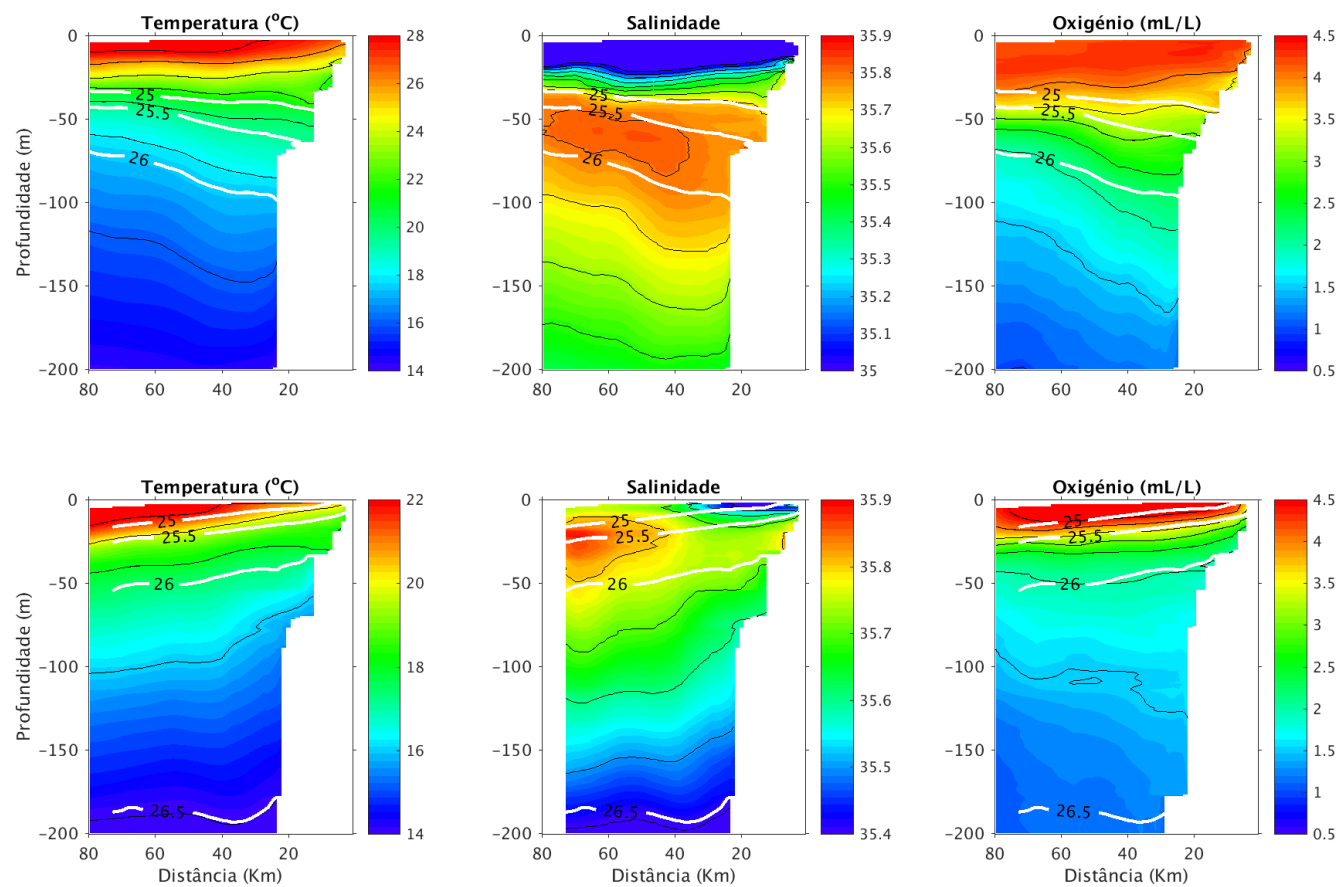


FIG. 4.4. Distribuição climatológica de temperatura, salinidade e oxigénio dissolvido para a secção de Palmeirinhas na estação quente (1ª linha) e na estação fria (2ª linha). As isolinhas desenhadas a cor preta são iguais as representadas nas barras de cores. A isopícnas de densidade potencial são representadas em linhas de contorno brancas.



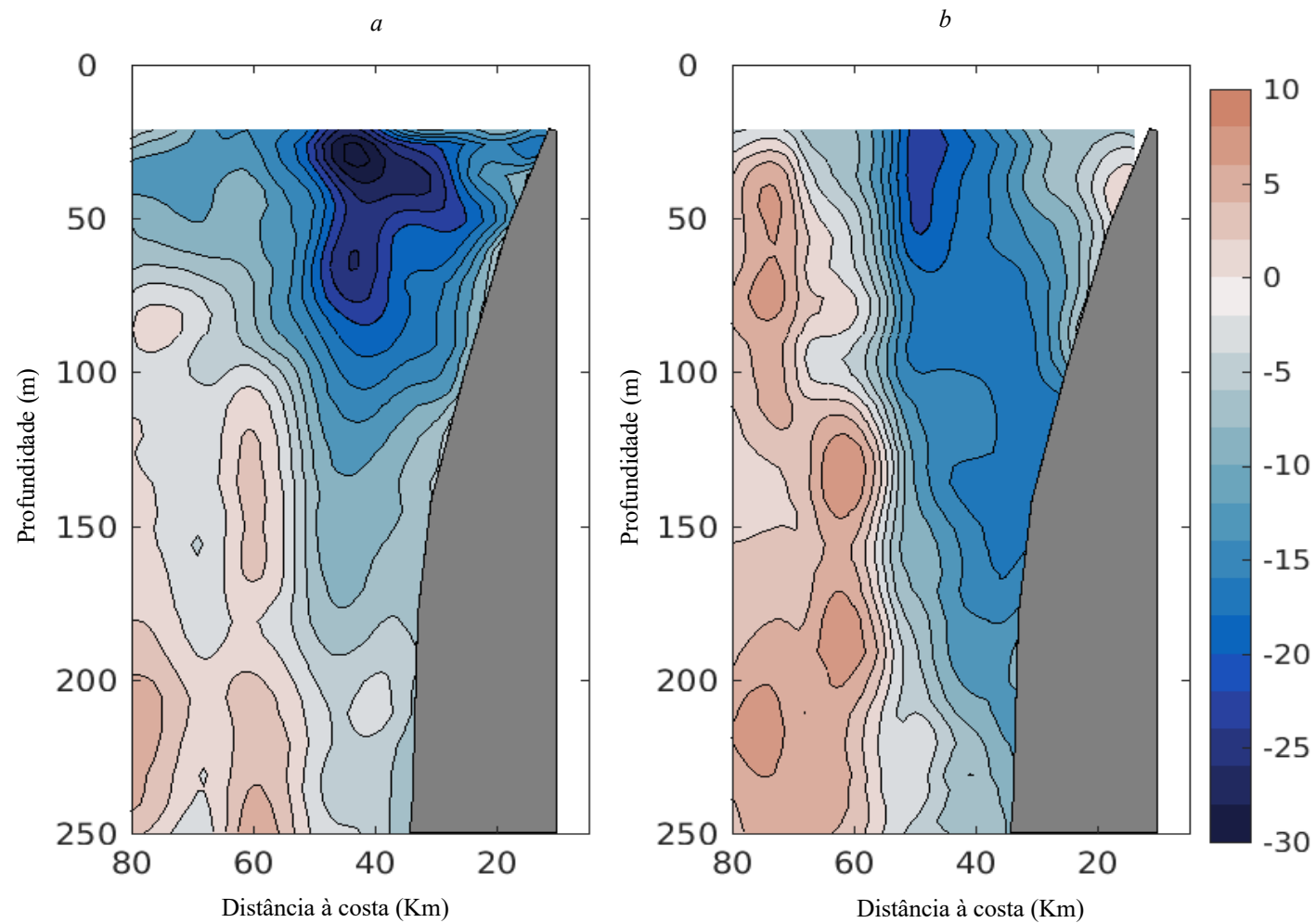


FIG. 4.5. Correntes climatológicas aos 9° S (Palmeirinhas). Velocidades climatológica das correntes (cor azul - valores negativos, corrente advectada em direção ao pólo Sul; cor castanha - valores positivos, fluxo em direção ao equador). Estação quente (*a*) e estação fria (*b*).

#### **4.3.1.3. Secção do Lobito.**

##### **4.3.1.3.1. Temperatura, salinidade e oxigénio dissolvido.**

Na secção do Lobito (Fig. 4.6, 1ª linha), na estação quente, a presença da corrente de Angola é distinguível nos campos de temperatura, salinidade e oxigénio, associada ao afundamento destes campos do largo para a costa. Associado ao campo de salinidade superficial observa-se que a pluma de água menos salgada associada aos rios desta zona é menos intensa do que nas duas regiões anteriores mais a Norte, devido à redução da pluviosidade nesta região. A pluviosidade média anual em Lobito não passa dos 25 mm. Os valores baixos de oxigénio dissolvido estendem-se ainda mais em direção à superfície, alcançando a isolinha 1.5 mL/L os 100 m de profundidade, enquanto se verifica a existência de uma camada de superfície bem oxigenada até os 40 m de profundidade.

Na estação fria (Fig.4.6, 2ª linha), verifica-se a tendência para o afloramento costeiro nos campos de temperatura, salinidade e oxigénio, consistente com o ramo costeiro da corrente fria de Benguela associado ao deslocamento do anticiclone do Atlântico Sul para latitudes inferiores e à intensificação de ventos em direção ao equador, característicos do afloramento costeiro. Verifica-se a elevação das isohalinas de cerca de 80 m desde 80 km ao largo até a costa. No que diz respeito ao oxigénio, observa-se claramente o efeito do afloramento, fazendo com que a região de baixa concentração de oxigénio por baixo de 1,5 mL/L atinja cerca 50 m em valores climatológicos. As águas mais oxigenadas apresentam valores similares aos da época quente ( $O_2 > 4$  mL/L), embora a temperatura de superfície seja cerca de seis graus inferior à da época quente.

##### **4.3.1.3.2. Correntes.**

Na secção média de correntes obtidas pelo ADCP de casco do navio, centrada na região do Lobito, 12° S (Figs. 4.7a), na época quente observam-se de forma

qualitativa, resultados similares aos da secção das Palmeirinhas, embora a Corrente de Angola, em direcção a Sul, não atinge a mesma intensidade, sendo mais próxima dos 15 cm/s a 20 cm/s. Esta corrente coexiste com a Corrente de Benguela, subsuperficial, observada a partir dos 150 m até ao limite da secção. Existem ainda evidências de escoamento para norte na parte interna da plataforma continental associado ao afloramento local, que atinge as camadas superiores.

No inverno austral (Figs. 4.7*b*), se observa relaxamento da Corrente de Angola, embora se estenda a profundidades superiores a 200 m e, passa a ser subsuperficial. Evidências claras de escoamento para norte associada à Corrente de Benguela ao largo que se vêem no extremo oeste (ao largo). Há também evidências claras de escoamento para norte, característico do afloramento induzido pelo vento na região da plataforma continental, com velocidades próximas de 10 cm/s, ao nível mais superficial amostrado.

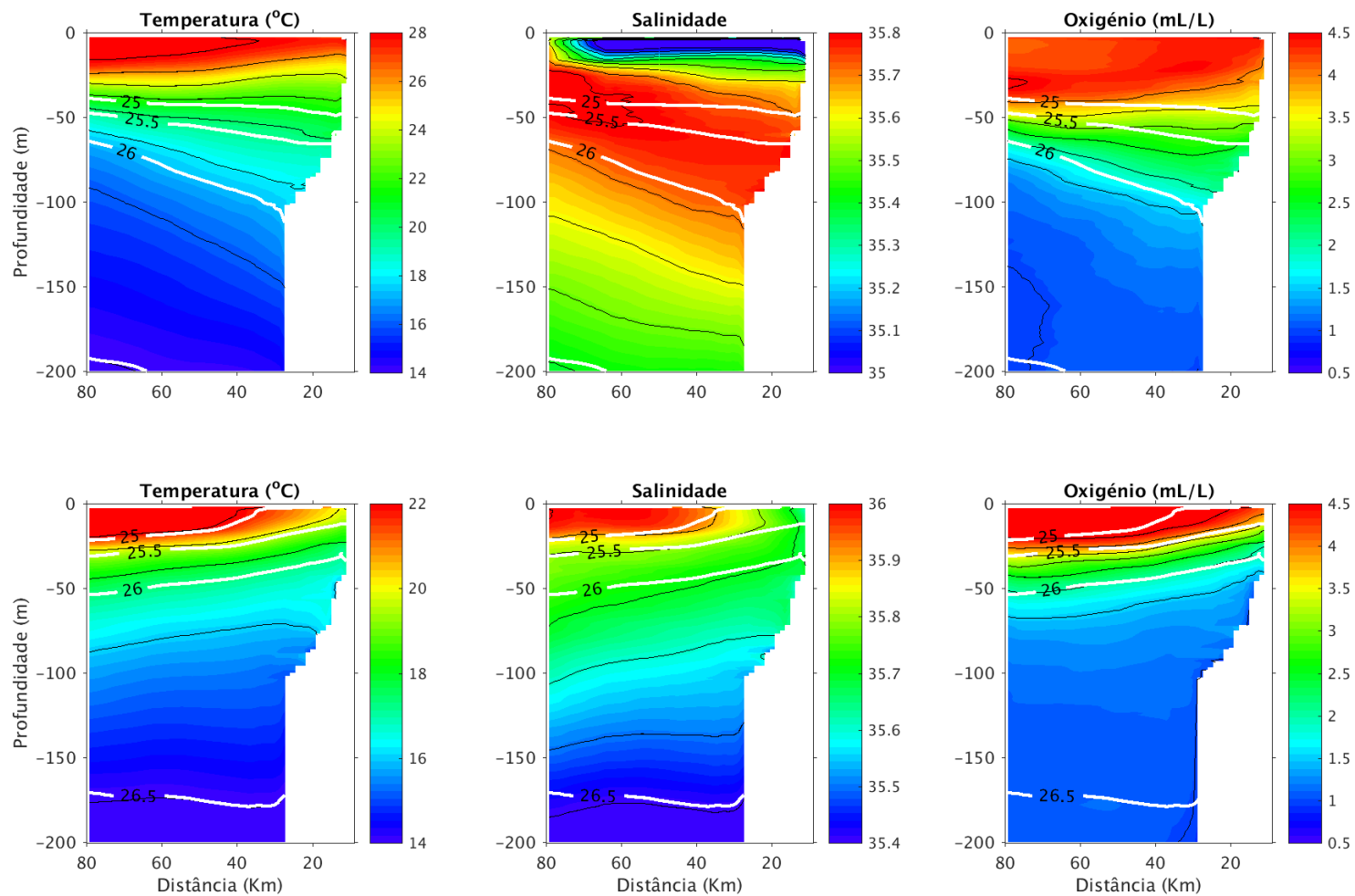


FIG. 4.6. Distribuição climatológica de temperatura, salinidade e oxigênio dissolvido para a secção de Lobito na estação quente (1ª linha) e na estação fria (2ª linha). As isolinhas desenhadas a cor preta são iguais as representadas nas barras de cores. A isopícnas de densidade potencial são representadas em linhas de contorno brancas.

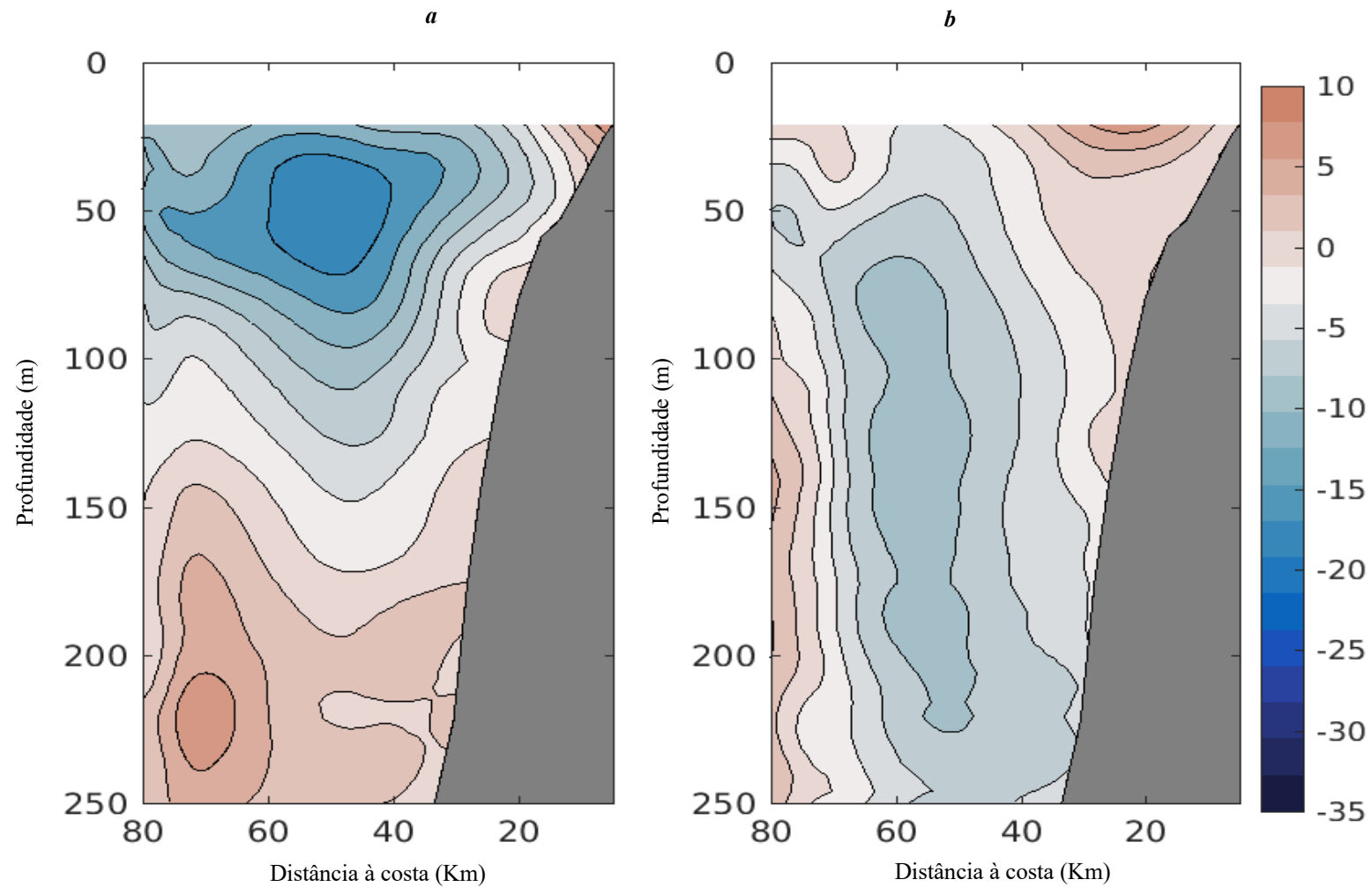


FIG. 4.7. Correntes climatológicas aos 10 - 12° S (Lobito). Velocidades climatológica das correntes (cor azul - valores negativos, corrente advectada em direção ao pólo Sul; cor castanha - valores positivos, fluxo em direção ao equador). Estação quente (*a*) e estação fria (*b*).

#### **4.3.1.4. Secção do Namibe.**

##### **4.3.1.4.1. Temperatura, salinidade e oxigénio dissolvido.**

Durante a época quente, na região de Namibe, localizada aos 15° S (Fig.4.8, 1ª linha), é possível distinguir a influência do sistema de correntes de Angola na secção de temperatura, associado a uma faixa com uma largura de cerca de 60 km a partir da extremidade (borda) da plataforma (cerca de 20 km ao largo) em que é visível o afundamento das isotermas por baixo dos 25 m. Em superfície e na banda mais costeira, até os 20 km ao largo, ao contrário, o campo de temperatura na estação quente, apresenta uma situação de afloramento médio. É de referir que as temperaturas das águas perto da superfície durante esta época decresceram significativamente com respeito às temperaturas das secções a norte anteriormente descritas, não ultrapassando os 25 °C em média. Isto está associado à proximidade da região frontal denominada Frente Angola-Benguela (ABFZ). O campo de salinidade apresenta uma distribuição qualitativamente similar à da temperatura, não sendo visível qualquer evidência de plumas de água fluvial na superfície, ao contrário das secções anteriores da região norte de Angola. Na secção de oxigénio dissolvido observa-se mais uma vez a tendência de afloramento de águas com baixo teor de oxigénio dissolvido, chegando a isolinha de 1.5 mL/L até perto dos 50 m de profundidade, enquanto as águas mais superficiais apresentam valores mais elevados de oxigénio dissolvido.

Durante a época fria (Fig.4.8, 2ª linha), as secções são mais estreitas (cerca de 30 km de largura), mas continua a existir evidência da corrente de Angola na sub-superfície, e afloramento perto da superfície, existindo uma descida de cerca de 7 °C em relação à época quente. A salinidade segue padrões similares aos da temperatura. A distribuição do oxigénio dissolvido mostra a influência do afloramento na camada superficial, com valores de cerca de 3 mL/L perto da costa e valores baixos em sub-superfície.

#### 4.3.1.4.2. Correntes.

No transecto localizado a 15° S, secção do Namibe (Figs. 4.9a), no verão austral se observa a presença de um jato intenso em direção a Sul, com velocidades superiores a 35 cm/s, com uma largura reduzida de aproximadamente 20 km a 30 km, localizado na extremidade da plataforma continental (que nesta região é muito estreita), o que faz com que a Corrente de Angola nesta secção se aproxime mais à costa que nas secções a norte anteriormente descritas. Na região ao largo, não se observam regimes de correntes bem definidos, embora haja evidências de escoamento para norte mais ao largo, a uma distância superior a 70 km da costa, e um núcleo de sub-superfície (5 cm/s) no limite inferior da Corrente de Angola, abaixo de 180 m de profundidade, e da costa aos 50 km.

No inverno austral, nesta secção do Namibe (Figs. 4.9b), é observado praticamente o desaparecimento do jato da Corrente de Angola em direção para Sul. Ao mesmo tempo observa-se a Corrente de Benguela e uma intensificação do seu escoamento para norte com máximos superiores a 10 cm/s, estendendo-se na direção vertical até ao limite inferior amostrado.

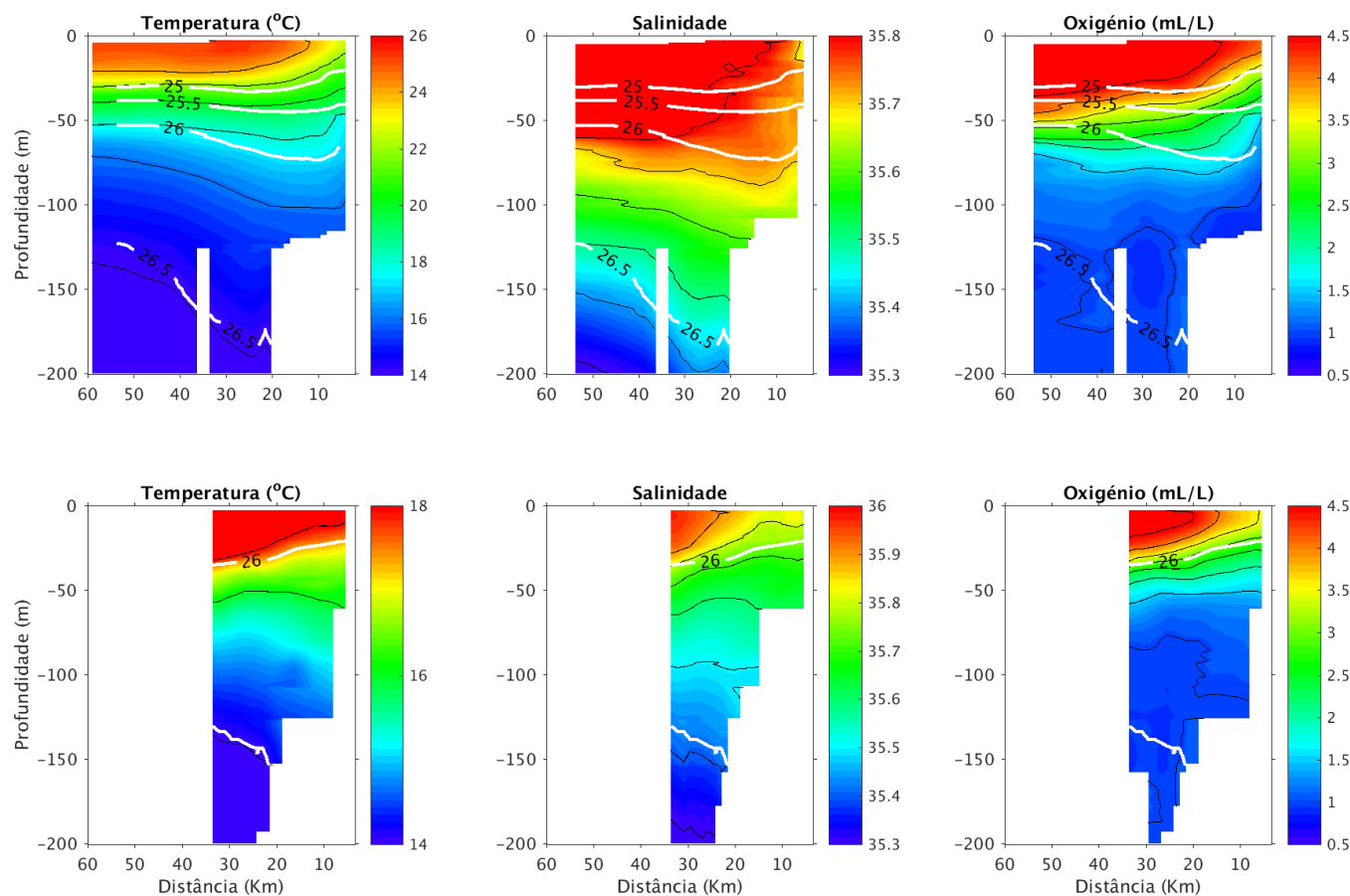


FIG. 4.8. Distribuição climatológica de temperatura, salinidade e oxigénio dissolvido para a secção de Namibe na estação quente (1ª linha) e na estação fria (2ª linha). As isolinhas desenhadas a cor preta são iguais as representadas nas barras de cores. A isopícnas de densidade potencial são representadas em linhas de contorno brancas.



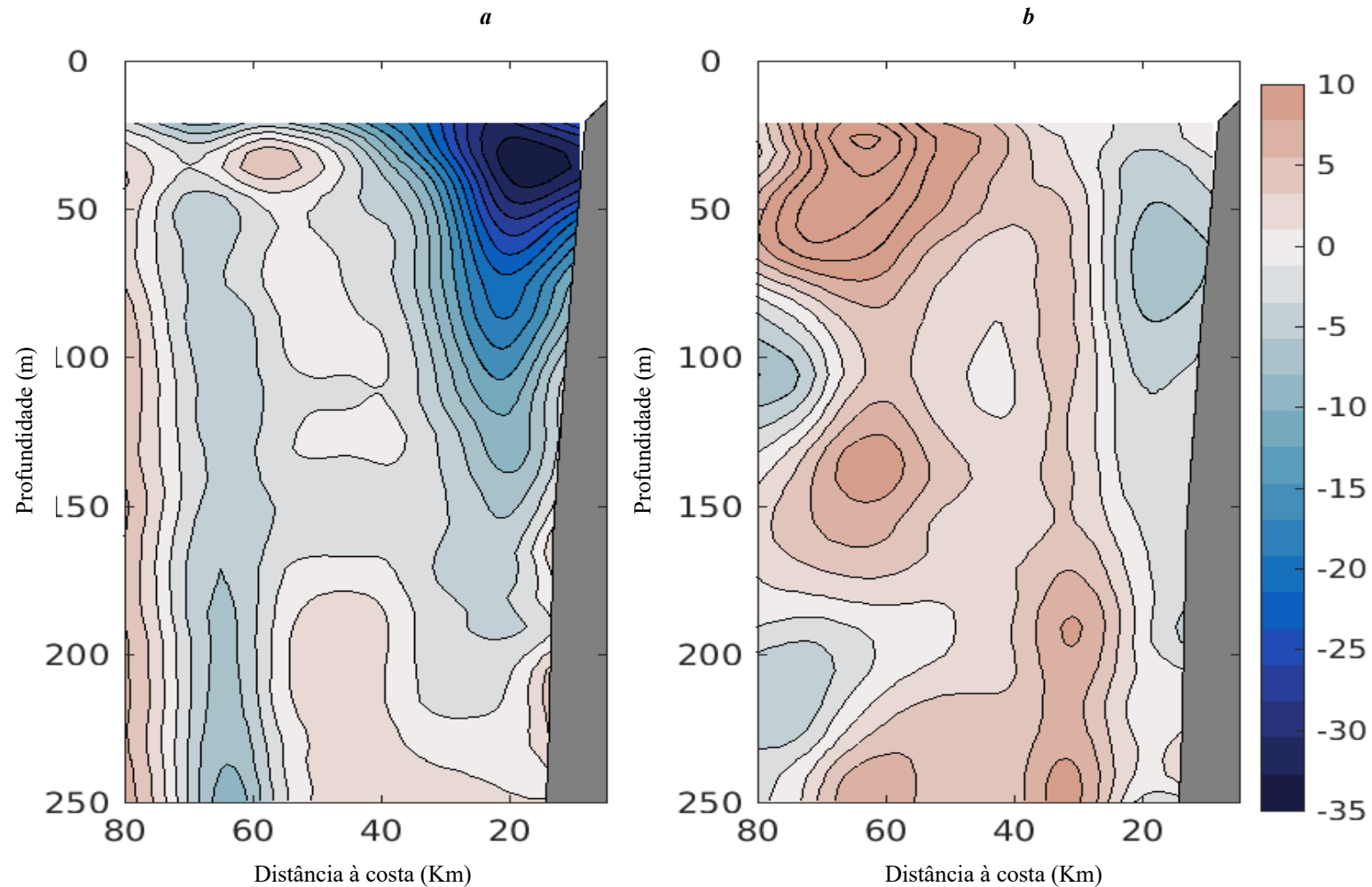


FIG. 4.9. Correntes climatológicas aos 15° S (Namibe). Velocidades climatológica das correntes (cor azul - valores negativos, corrente advectada em direção ao pólo Sul; cor castanha - valores positivos, fluxo em direção ao equador). Estação quente (*a*) e estação fria (*b*).

#### 4.3.1.5. Secção do Cunene.

##### 4.3.1.5.1. Temperatura, salinidade e oxigénio dissolvido.

Na secção de Cunene (Fig. 4.10, 1ª linha), durante a época quente, é visível a influência do sistema de Corrente de Benguela através do afloramento observado perto da superfície no campo de temperatura, embora por baixo dos 70 m é observado afundamento característico da Corrente de Angola em direção ao Pólo. É de notar que as temperaturas são consideravelmente mais baixas do que na secção anterior (Namibe), pois Cunene situa-se a Sul da Zona Frontal Angola - Benguela (ABFZ). Do campo de salinidade emergem padrões similares ao da temperatura, com um afloramento acima dos 50 m das isohalinas e um afundamento similar na zona de prevalência da Corrente de Angola de sub-superfície. Este efeito de afloramento superficial observa-se também no campo do oxigénio dissolvido em que águas com menor concentração que se encontram abaixo dos 50 m de profundidade a cerca de 50 km da costa ( $\sim 3$  mL/L) atingem a superfície, deixando perto da superfície, e afastada da costa, as águas mais oxigenadas. As águas pouco oxigenadas ( $< 1.50$  mL/L) situam-se aqui a cerca de  $\sim 75$  m.

Durante a estação fria (Fig. 4.10, 2ª linha), observa-se uma diminuição drástica da estratificação vertical, assim como uma subida acentuada para a costa das isotérmicas e isoalinas a partir dos 100 km ao largo e desde cerca de 125 m de profundidade. Este padrão não se verifica nas secções mais a norte. A temperatura à superfície não ultrapassa os  $17^\circ\text{C}$  na zona costeira analisada. Os valores da salinidade são consideravelmente inferiores aos que se observam nas secções mais a norte, com sinais de afloramento acompanhando o campo das isotermas. O campo de densidade potencial aumentou com respeito as secções anteriores, não sendo visíveis as isopícnas por baixo de  $1026\text{ kgm}^{-3}$ . Embora a salinidade seja mais baixa, não existe evidência de qualquer pluma de origem fluvial. Estes baixos valores são o sinal do transporte meridional de águas menos salinas provenientes do sistema de Benguela situado a sul. O

oxigênio dissolvido apresenta também as concentrações mais baixas de todas as secções perto da superfície e uma distribuição vertical característica do afloramento costeiro. Estas características hidrográficas indicam a influência da corrente de Benguela nesta região, que se encontra a sul da ABFZ.

#### **4.3.1.5.2. Correntes.**

Em relação ao transecto médio de correntes para a secção de Cunene para o verão austral, (Figs. 4.11*a*), escolheu-se a secção média de 16° S a 17° S. Nesta região observa-se que o escoamento para sul correspondente a Corrente de Angola é deslocado para o largo, ao contrário da secção do Namibe, onde esta se localiza na região costeira (Figs. 13*b*). O escoamento máximo para sul (associado ao afundamento do campo de temperatura ao largo) se localiza a uma distância de 70 km da costa com valores próximos de 20 cm/s. Na direção vertical, este núcleo da Corrente de Angola, se estende até aproximadamente 150 m. O escoamento para o equador, correspondente ao afloramento costeiro, se estende em profundidade desde os 70 m até aos 250 m com os valores máximos perto do fundo.

Para o inverno austral, na secção média de 16° S a 17° S (Figs. 4.11*b*), se observa que o escoamento para sul (Corrente de Angola) é mais estreito e está centrado a cerca de 60 km da costa. O escoamento para norte (ramo costeiro da Corrente de Benguela) se concentra em forma de jato ao longo da plataforma continental, associado ao regime de afloramento devido aos ventos alísios.

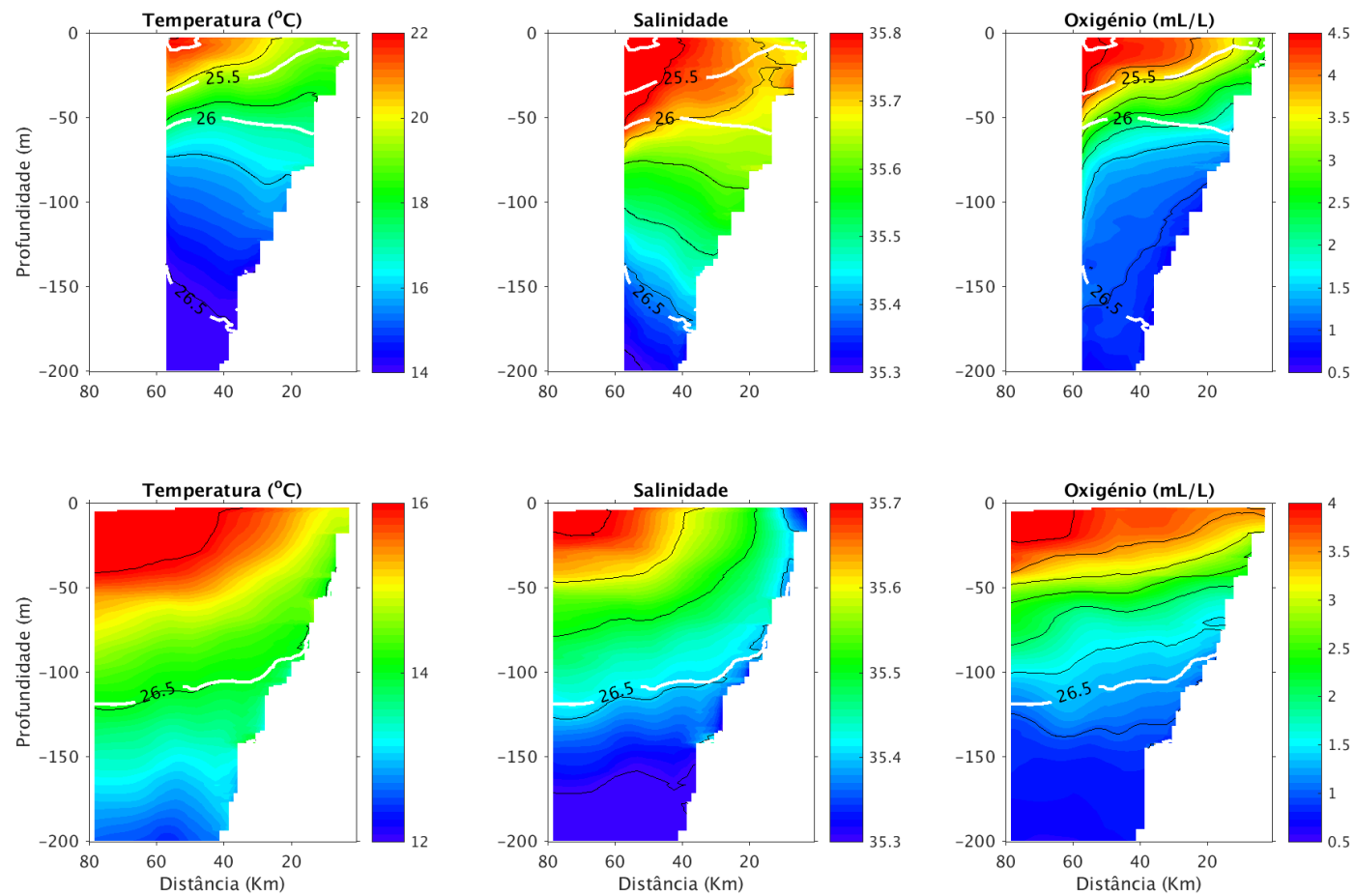


FIG. 4.10. Distribuição climatológica de temperatura, salinidade e oxigénio dissolvido para a secção de Cunene na estação quente (1ª linha) e na estação fria (2ª linha). As isolinhas desenhadas a cor preta são iguais as representadas nas barras de cores. A isopícnas de densidade potencial são representadas em linhas de contorno brancas.

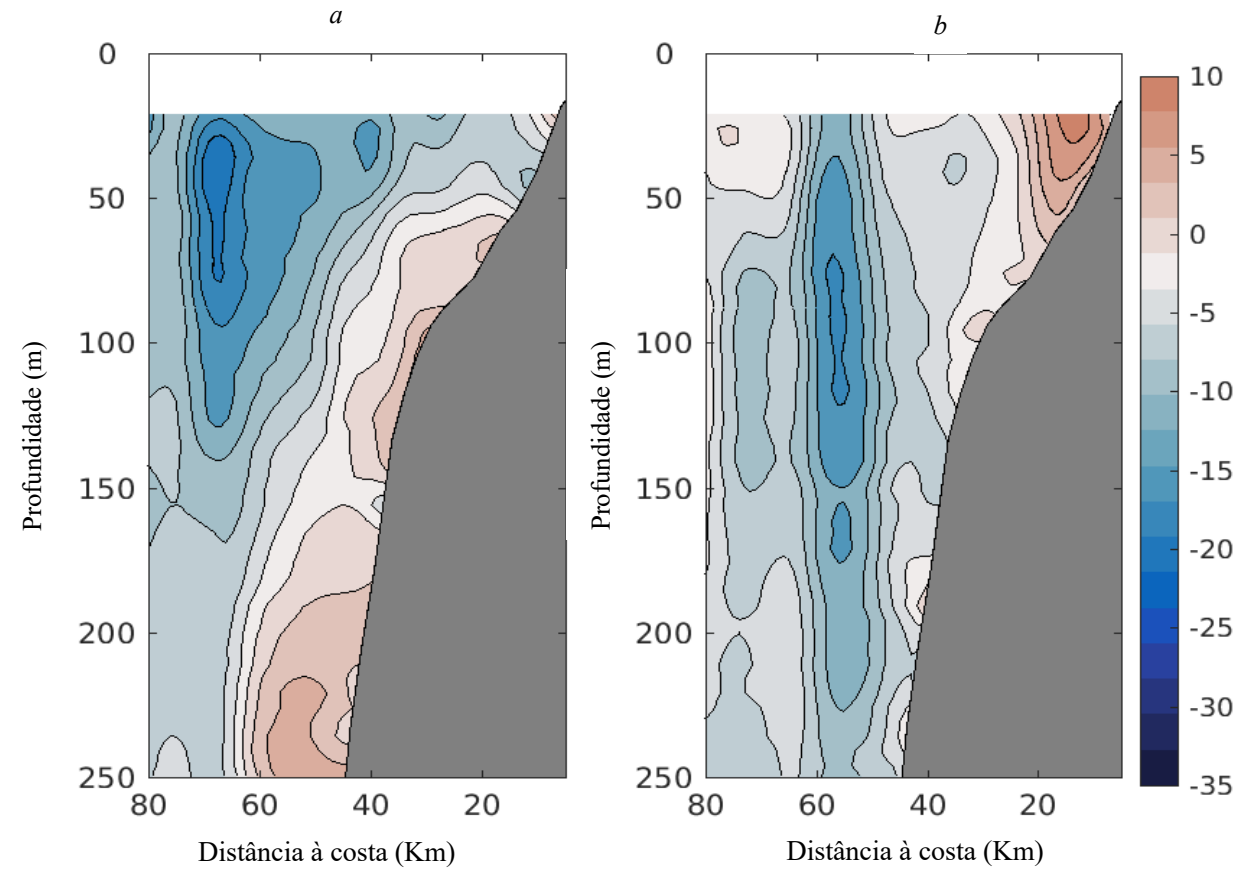


FIG. 4.11. Correntes climatológicas aos 16° - 17° S (Cunene). Velocidades climatológica das correntes (cor azul – valores negativos, corrente advectada em direção ao polo Sul; cor castanha – valores positivos, fluxo em direção ao equador). estação quente (A) e estação fria (b).

Nas duas secções desta Zona Sul, e também nas secções das Zonas anteriores, as concentrações superficiais de oxigénio da estação fria, apresentam uma camada fina com máximos absolutos amiúde. Observa-se ainda, em geral, inflexão de isolinhas para a superfície na zona costeira nas duas estações.

#### **4.3.2. Resultados de Distribuições climatológicas horizontais.**

Para se poder obter uma visão integrada da distribuição geográfica das principais variáveis amostradas para toda a costa de Angola, são apresentadas as secções horizontais a profundidades até 200 m, (perto da superfície,  $z = -10$  m; sub-superfície;  $z = -100$  m e  $z = -200$  m).

Como foi discutido no capítulo 2 em relação às metodologias, são utilizadas todas as estações disponíveis incluindo as consideradas secundárias, com espaçamento entre secções aproximadamente de 5 secções por cada grau de latitude, cerca de 1 secção em cada 25 km aproximadamente. Os campos horizontais da temperatura, salinidade e oxigénio estão representados nas Figuras 4.12, 4.13 e 4.14, para a estação quente (aos 10 m, 100 m e 200 m, a esquerda) e fria (aos 10 m, 100 m e 200 m, a direita).

##### **4.3.2.1. Distribuições climatológicas horizontais (estação quente).**

Durante a estação quente (Fig. 4.12 aos 10 m, 100 m e 200 m, painel à esquerda), no que diz respeito à temperatura superficial (10 m), diferenciam-se claramente duas regiões separadas aproximadamente à latitude perto de Benguela ( $13^{\circ}$  S): A Norte observamos uma temperatura superior a  $27^{\circ}\text{C}$  associada à corrente de Angola que se estende gradualmente a partir da região do rio Congo ( $6^{\circ}$  S) para Sul. Uma faixa de água intermédia mais fria situa-se entre Benguela ( $\sim 13^{\circ}$  S) e Namibe ( $15^{\circ}$  S), enquanto na região mais a Sul do Namibe, associado ao afloramento de Benguela, a temperatura é consideravelmente mais baixa. A separação entre ambas corresponde à denominada região frontal Angola-Benguela, como será discutido mais

a frente. Nos níveis sub-superficiais observa-se um comportamento similar, embora a zona associada ao maior gradiente esteja localizada mais a sul, perto da secção de Namibe, conforme se observa aos 100 m de profundidade (Figs. 4.12, 1ª linha). A Sul desta secção verifica-se a influência da Corrente fria de Benguela.

Esta distribuição evidencia o gradiente meridional da temperatura, sendo esta mais elevada na região tropical a norte e mais baixa a sul, deixando em evidência a localização da região de máximo gradiente, denominada frente Angola-Benguela (ABFZ, Angola - Benguela Frontal Zone, na literatura), na latitude de 14° S a 15° S, e uma frente secundária na região da Baía Farta, aproximadamente a 13° S. Aos 200 m de profundidade também é observada a diferença entre as temperaturas a N e a Sul da ABFZ.

O campo da salinidade na estação quente (Figs. 4.13, aos 10 m, 100 m e 200 m, a esquerda), perto da superfície, aos 10 m de profundidade, está fortemente influenciado pelas plumas fluviais do Rio Congo a norte e dos Rios Kwanza na região entre Luanda - Palmeirinhas, e rios Longa e Keve a norte de Lobito, aproximadamente a 11.5° S. A pluma do Congo induz valores da salinidade muito baixos, inferiores a 33 em média climatológica. Na região Sul a salinidade superficial sobe para valores entre 35 e 36. Aos 100 m de profundidade o sinal das baixas salinidades do escoamento fluvial desaparece e as salinidades mais elevadas (~35.8) ocorrem a norte, evidenciando o carácter menos salino da corrente de Benguela a sul com salinidades na ordem de 35.6. Nesta profundidade, a zona de maior gradiente meridional de salinidade coincide com o maior gradiente meridional de temperatura, o que não se verifica nos níveis superficiais por influência do escoamento fluvial.

No que diz respeito ao oxigénio dissolvido na estação quente, (Figs.4.14, aos 10 m, 100 m e 200 m, a esquerda), no nível mais superficial, as concentrações de oxigénio dissolvido são superiores a 4 mL/L. Contudo, verifica-se um gradiente meridional com concentrações mais altas de oxigénio dissolvido na área compreendida entre Baía Farta (13° S) e Cunene (17° 20' S aos 10 m de profundidade, enquanto na região da corrente de Angola a norte, as concentrações não ultrapassam os 4.3 mL/L.

Este gradiente inverte-se em sub-superfície, aos 100 m de profundidade onde são observadas concentrações de oxigénio dissolvido crescentes de sul para norte, com concentrações muito baixas a sul, associadas ao sistema de afloramento de Benguela tal como descrito nas secções verticais em 4.3.1. Águas da Corrente fria de Benguela vindas de sul, são menos salinas e menos oxigenadas por baixo da camada oxigenada superficial que em geral é bem oxigenada.

#### **4.3.2.2. Distribuições climatológica horizontais (estação fria).**

Na estação fria (Figs. 4.12, 4.13, 4.14, aos 10 m, 100 m e 200 m, à direita, estação fria) observa-se claramente o efeito da sazonalidade, com temperaturas superficiais inferiores em cerca de 5 °C em relação à época quente. Este efeito está associado ao regime de ventos predominantes (alísios de Sudeste), conforme representado na figura da distribuição de ventos (capítulo 3, Figs. 3.1), que induzem um afloramento ao longo da costa de Angola. A norte de 12° S observa-se um gradiente térmico costal largo acentuado, com temperaturas inferiores perto da costa e mais altas ao largo, consistente com o regime de ventos favoráveis ao afloramento. Em particular, na região do promontório da Ponta das Palmeirinhas (9° S), observa-se uma intensificação deste afloramento, com temperaturas inferiores a Norte da Ponta das Palmeirinhas, que pode relacionar-se com o efeito do promontório (Figs.4.12, Estação fria). Na região Sul, o afloramento é mais intenso, mantendo-se a diferença de temperaturas em relação à época quente de aproximadamente 6 °C. A frente ABFZ que na estação quente se situa a sul de 15° S, nesta época fria é deslocada para N, acima de 15° S. Aos 100, e 200 m de profundidade, observa-se um padrão similar, apesar de os efeitos do afloramento não serem tão visíveis como perto da superfície. Observa-se um gradiente meridional contínuo de temperaturas na estação fria, como era de esperar associado à transição entre a corrente quente de Angola e o ramo costeiro da corrente fria de Benguela.

Durante a época fria, o campo de salinidade perto da superfície (Figs.4.13, aos 10 m, a direita) na região norte apresenta evidências da pluma do Rio Congo, embora muito reduzida com respeito a época quente associado ao menor caudal da pluma



do Rio Congo (cerca de 30000 m<sup>3</sup>/s em relação a época quente com cerca de 50000 m<sup>3</sup>/s). A pluma fica limitada à região mais próxima da desembocadura com valores médios da salinidade perto de 35.5. É ainda observado um sinal de menor salinidade aos 9°S associada ao rio Kwanza. A Sul é observada uma diminuição gradual da salinidade, sendo esta influenciada pelo sistema de afloramento de Benguela com salinidades mais baixas. Aos 100 e 200 m de profundidade, observa-se um gradiente de salinidade entre os valores mais elevados a norte de Angola até os valores mais baixos no Cunene.

O oxigénio dissolvido apresenta maiores concentrações nos níveis superficiais, mais de 4.5 mL/L em toda área sob influência permanente da pluma até sul de Benguela (12° S) (Figs.4.14, aos 10 m, época fria, a direita). Aos 100 m de profundidade, o padrão de decréscimo de oxigénio dissolvido em direção a Sul observado durante a estação quente se confirma durante a estação fria. Esta redução associa-se ao sistema de afloramento de Benguela, como será discutido em baixo.

## Temperatura (°C) Distribuição horizontal climatológica, 1994 – 2014

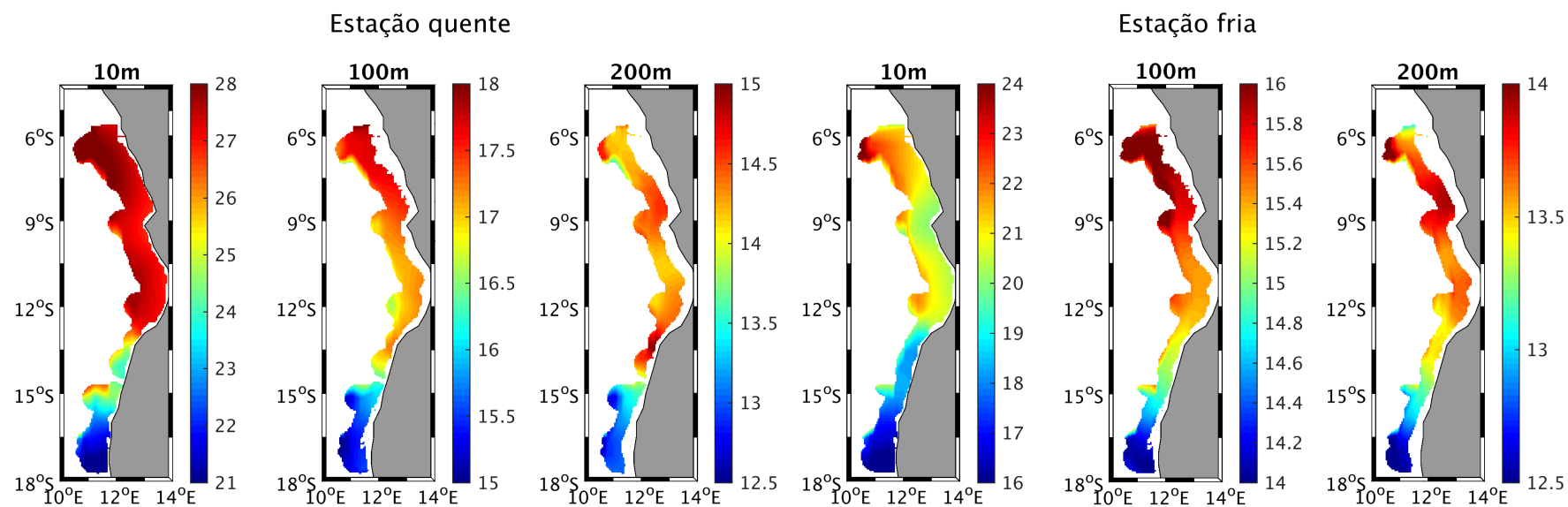


FIG. 4.12. Distribuição climatológica de temperatura aos 10, 100 e 200 m de profundidade. Estação quente (esquerda), Estação fria (direita). Note-se as diferentes escalas de temperatura entre profundidades e entre estações.

## Salinidade Distribuição horizontal climatológica, 1994 – 2014

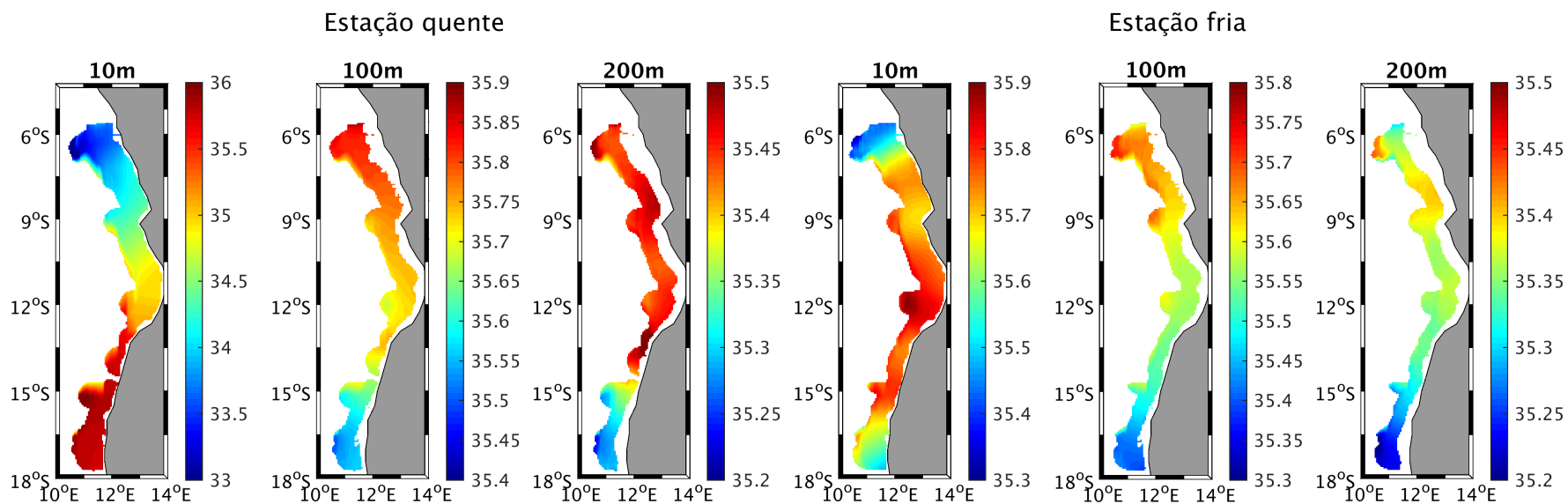


FIG. 4.13. Distribuição climatológica de salinidade aos 10 m, 100 m e 200 m de profundidade. Estação quente (esquerda), Estação fria (direita). Note-se as diferentes escalas de salinidade entre profundidades e entre estações.

## Oxigénio (mL/L) Distribuição horizontal climatológica, 1994 – 2014

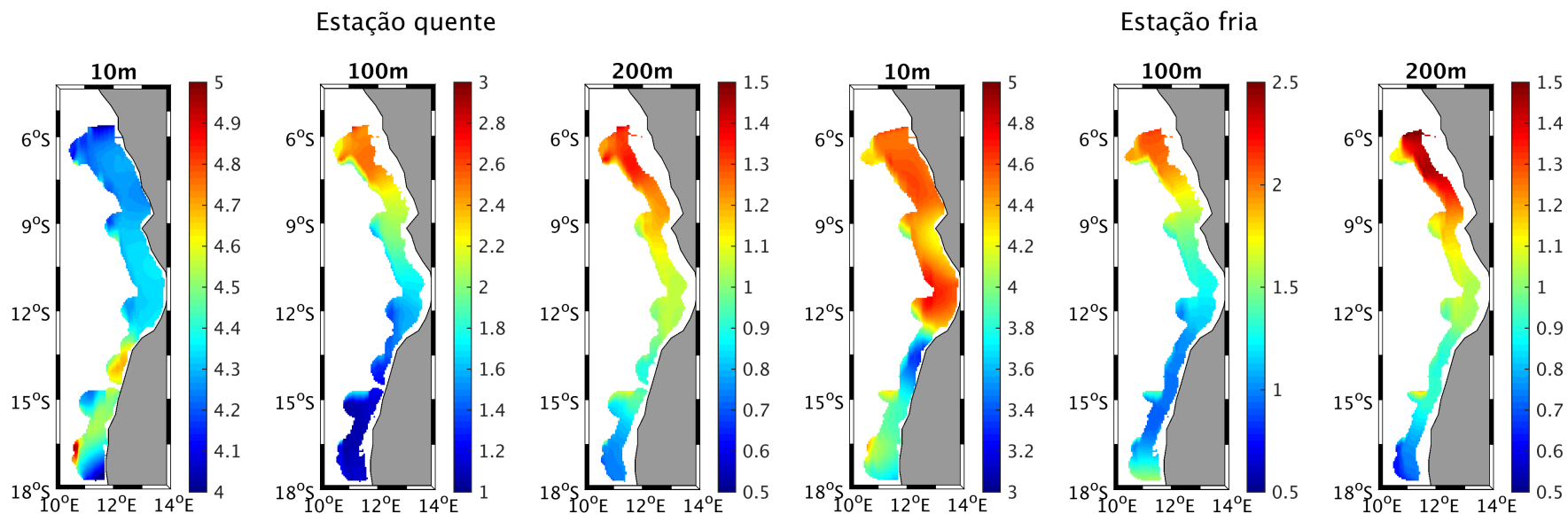


FIG. 4.14. Distribuição climatológica de oxigénio aos 10, 100 e 200 m de profundidade. estação quente (esquerda), estação fria (direita). Note-se as diferentes escalas de oxigénio entre profundidades para as duas estações.



#### 4.4. Distribuição de Massas de Águas na margem angolana.

Com base nas climatologias construídas para as secções principais analisadas acima, foi construído um diagrama T - S, por forma a caraterizar as principais massas de águas observadas na margem angolana.

##### 4.4.1. Estação quente.

Durante a estação quente (Fig. 4.15), no diagrama T - S (esquerda), são visíveis as Águas Centrais Principais localizadas na região, constituídas pelas SACW, Águas Centrais do Oceano Atlântico Sul, de forma similar ao estudo de Lass *et al* (2001). No diagrama, essas águas centrais se estendem aproximadamente desde (T, S) = (10 °C, 34.92) e (15 °C, 35.5).

Localizadas acima das Águas Centrais encontram-se as Águas Centrais Superiores, UCW, aproximadamente entre os 16 °C e 22 °C e salinidades próximas de 35.8, que ligam as Águas Centrais com as Águas de Superfície, denominadas Águas Tropicais de Superfície (TSW), que são caraterizadas por temperaturas superiores a 22 °C, podendo ter ou não influência de plumas de rios. Na figura 4.15 estas águas são predominantemente representadas pelas secções de Cunene, Namibe e Lobito.

Lass *et al* (2001), ainda distinguem especificamente o caso das LSSW (águas de superfície de baixa salinidade) constituídas por águas com temperaturas superiores a 22°C e com um sinal claro de baixa salinidade, que neste caso são claramente observadas nas secções de Palmeirinhas e Congo.

No que diz respeito ao diagrama T - O da estação quente (Fig. 4.15, direita), observa-se que as Águas Centrais anteriormente referidas, SACW, com temperaturas inferiores a 15° têm um sinal de baixo conteúdo em oxigénio dissolvido, (em geral inferior a 1 mL/L), mas, mesmo assim se confirma o gradiente com valores decrescentes em direção a Sul descrito nas secções horizontais de Oxigénio dissolvido (Fig. 4.14).

No que diz respeito às Águas Centrais Superiores (UCW, com temperaturas entre 16 - 22 °C), observa-se um incremento do oxigénio dissolvido, sentindo a influência das camadas superficiais mais oxigenadas. Estas águas superficiais (TSW e LSSW), com temperaturas superiores aos 22 °C apresentam valores mais elevados de oxigénio dissolvido, em geral acima de 4 mL/L.

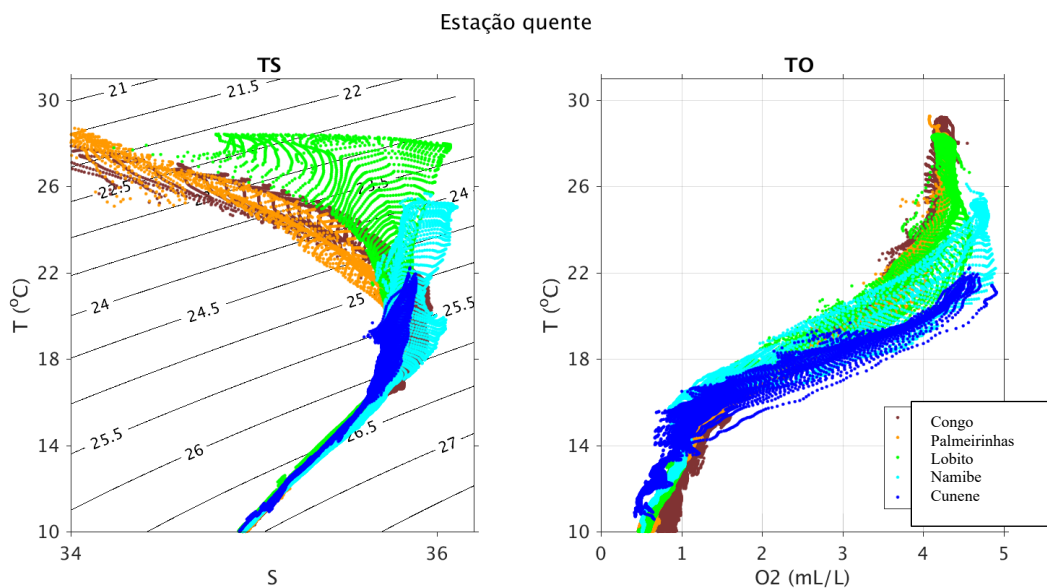


Fig. 4.15. Lado esquerdo: Diagrama T-S para as principais secções verticais analisadas na secção 4.3.1, durante a estação quente. Diferentes cores são usadas para caraterizar as diferentes secções, com tons quentes nas secções a Norte (congo e palmeirinhas) e frios a Sul (namibe e Cunene). Note-se que a Salinidade foi limitada à valores superiores a 34, e a Temperatura a valores superiores a 10 °C, para uma melhor visualização. Lado direito: Diagrama T-O, usando o mesmo código de cores.

#### 4.4.2. Estação fria.

Na estação fria (Fig. 4.16), a diferença na distribuição das massas de água em relação à estação quente é observada à nível das camadas superficiais, por cima das Águas Centrais. Confirma-se a diferença de cerca de 6 °C em relação à estação quente nas secções do Norte de Angola. As camadas influenciadas pelo escoamento fluvial, ficam restritas às secções do Rio Congo, e Palmeirinhas em menor medida.

Na secção T- O, durante a estação fria à nível das Águas Centrais, a situação é semelhante à já descrita durante a estação quente. As principais diferenças surgem a nível das Águas Centrais Superiores e nas Águas de Superfície. Assim as águas mais a Sul (secções de Namibe e Cunene) são agora caracterizadas por temperaturas significativamente mais baixas para os mesmos intervalos de transição em O<sub>2</sub> entre as águas centrais e as águas de superfície. Isto é associado ao afloramento intenso observado nas secções do Sul de Angola. Também é visível o maior conteúdo de oxigénio dissolvido nas águas superficiais à Norte de Lobito, associado às menores temperaturas e maior atividade fotossintética.

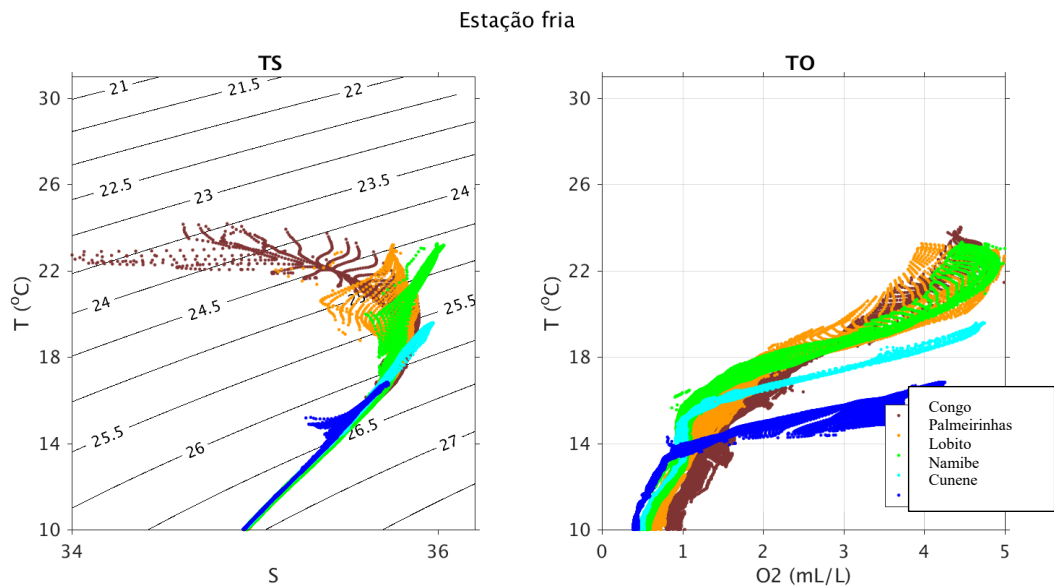


Fig. 4.16, Igual à Figura 4.15, para a estação fria.

#### 4.5. Discussão.

Neste capítulo são apresentados resultados da distribuição climatológica das principais variáveis hidrológicas da margem continental de Angola, aproximadamente entre os 5° S e os 17° 20' S, com fronteiras com as República do Congo e República Democrática do Congo a norte e Namíbia a sul, e com uma linha de costa de cerca de 1650 km.



A margem continental de Angola está localizada entre o sistema de correntes de Benguela na região Sul, com escoamento em direção ao equador (Norte) e o sistema de correntes com origem tropical denominado genericamente Corrente de Angola, que flui em direção o Pólo (para Sul), transportando calor nessa direção. A região de Angola está diretamente afetada pelo sistema de afloramento que é induzido pelos ventos alísios que apresentam uma componente em direção ao equador. Este afloramento, (que na região sul é quase-permanente) intensifica-se durante o inverno austral, (Julho - Setembro), representando assim um ecossistema com elevada produtividade biológica e em termos piscatórios.

Por baixo da região superficial mais produtiva, as águas estão com baixas concentrações de oxigênio dissolvido, e forma uma das mais pronunciadas zonas com mínimos de oxigênio (OMZ, oxygen depleted zones) do planeta (Monteiro *et al.*, 2006, 2008; Mohrlhoz *et al.*, 2008). Observações sugerem que estas OMZ estão a expandir-se (Stramma *et al.*, 2008, Kopte, 2017). Assim, há evidências de transporte de águas centrais com temperatura igual ou inferior a 15 °C e salinidade igual ou inferior a 35, e com baixo conteúdo em oxigênio dissolvido, denominadas Águas Centrais do Atlântico Sul (SACW, South Atlantic Central Waters) advectadas para sul pela Corrente de Angola, tendo como consequência a presença destas águas à norte do sistema de afloramento de Benguela, contribuindo para as concentrações de oxigênio dissolvido muito baixas, próximas de situações de hipóxia e até de anóxia na plataforma continental a sul de Angola (Mohrlhoz *et al.*, 2008; Monteiro *et al.*, 2008; Jarre *et al.*, 2014).

Até recentemente, a margem continental de Angola tem sido relativamente pouco explorada do ponto de vista da oceanografia física, sendo os estudos principalmente efetuados através de campanhas pontuais, incluindo hidrologia e correntometria de ADCP do navio (e.g., Lass *et al.*, 2000; Mohrholz *et al.*, 2001). Tem sido, no entanto, razoavelmente bem amostrada por programas internacionais tais como o programa Nansen que forneceu os dados para este estudo, e mais recentemente por estudos baseados em amarrações em pontos fixos durante períodos longos superiores a um ano (e.g., Kopte *et al.*, 2018).

A principal conclusão dos estudos recentes é que a Corrente de Angola não tem um escoamento estável e permanente em direção a Sul, mas sim com períodos alternativos de escoamento em ambas direções, embora com prevalência para Sul. Também recentemente (Batchelery *et al.*, 2016, Kounge, *et al.*, 2017) foi confirmada a hipótese de forçamento remoto através de ondas de Kelvin equatoriais, que induzem anomalias quentes ou frias na margem continental estendendo-se até a fronteira sul com Namíbia.

Mesmo tendo em conta estes elementos da variabilidade, poucos estudos têm sido feitos para caracterizar o estado médio da hidrologia e a circulação na margem oceânica na região de Angola. Tchupalanga *et al.*, 2018 descreveram a circulação numa franja em torno da amarração descrita por Kopte *et al.*, 2017 aos 11° S.

Neste capítulo foram desenvolvidas climatologias para toda a margem angolana, baseado nas cinco principais secções repetidas duas vezes por ano nas épocas quente e fria (verão e inverno austrais). Aproveitando a disponibilidade e o acesso aos dados do programa Nansen (ver capítulo 2) foi possível construir as secções climatológicas com médias integradas das secções principais e secundárias tal como descrito no presente capítulo.

Quanto às secções verticais do campo de velocidade paralela à costa, obtida com base em médias dos valores obtidos com base no ADCP do navio, para o verão austral (época quente), observa-se um transporte predominante para sul associado à corrente de Angola (valores negativos da velocidade, em tons azuis), na camada perto da superfície, que se caracteriza por valores variáveis em cada secção da velocidade paralela a costa de norte para sul, com um incremento no transporte da secção do Congo para a de Palmeirinhas e de Lobito para Namibe, onde parece atingir um máximo de transporte a Norte da frente Angola - Benguela, o que sugere a existência de zonas de alimentação da corrente de Angola por transporte do largo para a costa.

Observa-se em todas as secções um transporte bi-direccional, por um lado o transporte para Sul associado a Corrente de Angola que coexiste com um transporte em direção a Norte, associado a intrusão da corrente de Benguela em direção ao equador. A Corrente de Angola está principalmente concentrada entre a superfície e os 150 m de profundidade, enquanto a corrente na direção contrária se estende por baixo desta. Por contra, na época fria (inverno austral) se observa um caráter mais barotrópico e a presença de velocidades mais baixas da Corrente de Angola quando comparadas à época quente, com duas regiões em que se observam os máximos das velocidades, Palmeirinhas e Cunene. É observada uma tendência mais clara para um escoamento positivo (em direção ao equador) durante esta época em relação à época quente, devido a presença de ventos favoráveis ao afloramento e a dinâmica da Corrente de Benguela, que nesta altura, o ramo costeiro desta corrente é mais superficial.

A dinâmica acima descrita para a distribuição de velocidades paralelas à costa é, em geral compatível com a distribuição de temperatura e salinidade, através da relação do vento térmico, com afundamento dos campos de temperatura e salinidade associados à Corrente de Angola para Sul, e afloramento destes campos hidrológicos associados ao escoamento em direção ao equador (Norte). Entre a secção mais a Norte (Congo) e a mais a Sul (Cunene), são observadas diferenças nos campos hidrológicos de temperatura, salinidade e oxigênio dissolvido ao longo da latitude, tanto para o verão austral, como para o inverno austral. No campo de temperatura, um regime de transição entre águas tropicais mais quentes a Norte, com evidências de afundamento na parte externa da margem angolana e escoamento para sul como parte da denominada Corrente de Angola, e águas mais a sul com uma influência do regime de afloramento costeiro na distribuição climatológica. Este comportamento é acompanhado pelas distribuições climatológicas da salinidade em que o comportamento ao longo do gradiente latitudinal é similar às do campo de temperatura. Desta forma, as secções horizontais reforçam o discutido nas 5 principais secções verticais.

Tal como referido no capítulo 1, ( secção 1.9), o oxigénio dissolvido tem a sua própria dinâmica nos sistemas de afloramento, estando a bacia de Angola influenciada principalmente por águas centrais, denominadas SACW como se mostra nos diagramas T - S e T - O acima, cuja origem na região de estudo é por um lado nas correntes equatoriais (capítulo 1), que dão lugar de uma parte à Corrente de Angola, mas cujas águas recirculam parcialmente num giro ciclónico denominado Giro de Angola (ver Fig. 1.2). Isto tem como consequência, que a ventilação destas águas é reduzida, pelo que o seu conteúdo em oxigénio dissolvido é baixo, por baixo de 1mL/L, (ver diagrama T - O da figura 4.15), o que pode entrar dentro do regime considerado como de hipoxia nas maiores profundidades (ver secção 1.9), como relatado em Monteiro *et al* (2006).

Por cima das águas centrais SACW circulam águas em que o seu conteúdo de oxigénio dissolvido aumenta rapidamente até valores iguais a 4 mL/L, as denominadas Águas Centrais Superiores (UCW), que representam uma transição com as águas acima, as Águas Tropicais de Superfície (TSW) que estão em contato com a atmosfera, com valores de oxigénio dissolvido em geral superiores a 4 mL/L.

Quando por algum motivo existe consumo de oxigénio dissolvido nas águas da UCW, (tipicamente por remineralização da matéria orgânica), estas águas também podem entrar num regime de hipoxia, conforme referido anteriormente.

O facto de que a Corrente de Angola transporte águas com baixo conteúdo em oxigénio dissolvido para sul abaixo de 100 m de profundidade, como constatado no capítulo 4, pode contribuir para o fenómeno de Águas com pouco oxigénio dissolvido (LOW, Low oxygen waters) que causa problemas ecológicos graves no sistema de afloramento de Benguela, a norte da Zona Frontal, do qual a margem angolana faz parte.

A presente análise foi dedicada aos valores médios das variáveis hidrológicas durante duas campanhas realizadas sazonalmente no pico do verão austral e no

pico do inverno austral, não permitindo obter mais informações sobre o ciclo sazonal das grandezas analisadas.

Esta definição dos valores climatológicos irá permitir estudar nos capítulos a seguir: as anomalias em relação a este valor climatológico (capítulo 5), e os extremos observados durante o período analisado (capítulo 6).

## ANOMALIAS HIDROLÓGICAS.

**5.1. Introdução.**

O Oceano Atlântico equatorial é caracterizado por um ciclo anual com componentes anuais e semi-aneais que incluem a propagação de anomalias em direção a este e a oeste da SSH (sea surface height) e da interface da termoclina no equador (Ding *et al.*, 2009; Lübbecke *et al.*, 2010; Rouault, 2012; Brandt *et al.*, 2016; Koungue *et al.*, 2016; Illig *et al.*, 2007, 2018, 2019, 2020). A escalas inter-aneais o oceano Atlântico é caracterizado, especialmente na região equatorial e na sua fronteira este, pela propagação de ondas associadas ao guia equatorial (Illig, 2004). Estas consistem em ondas de Kelvin equatoriais (IEKW, Interannual Equatorial Kelvin Waves), forçadas principalmente pela intensificação ou relaxamento dos ventos alísios na região equatorial. Estas ondas de Kelvin equatoriais, propagam-se em direção a Leste, transmitindo-se em seguida na direção dos polos ao longo da costa, como ondas costeiras aprisionadas à plataforma continental (CTW, coastal trapped waves), que transmitem a sua energia associada fora da região equatorial no hemisfério sul ao longo das costas de Gabão, Congo, Angola e continuam para Sul em direção a Namíbia.

Estas anomalias propagadas através de CTW pensa-se estarem na origem da maioria dos episódios quentes e frios do sistema de correntes Angola-Benguela, denominados genericamente Benguela-Niños/Niñas (Cane *et al.*, 1981; Ascani *et al.*, 2006; Polo *et al.*, 2008; Ostrowski *et al.*, 2009; Hormann *et al.*, 2009; Brandt, *et al.*, 2016; Koungue *et al.*, 2017). Estas anomalias explicam cerca de 80 % da variabilidade do nível do mar e da temperatura da superfície, assim como dos parâmetros biogeoquímicos (nutrientes, oxigénio dissolvido, fluorescência e outras variáveis hidrológicas) ao longo do bordo Este do oceano Atlântico Sul a escalas inter-aneais (Bachèlery *et al.*, 2015, 2016).

Em Koungue *et al* (2017) foi estudada exaustivamente esta propagação para

o período 1998 a 2012 com ajuda do sistema operacional PIRATA (Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic, Servain *et al* 1998), com observações por satélite da SST e da SSH, e de estudos de modelos lineares de propagação de ondas OLM (Ocean Linear Model, Illig *et al.*, 2004, 2006). Estes autores conseguiram demonstrar que a propagação de anomalias por IEKW ao longo do equador estão relacionadas com os episódios mais importantes de anomalias quentes e frias no sistema de correntes Angola - Benguela, e que a propagação de ondas IEKW adianta por aproximadamente um mês em relação às anomalias costeiras ao longo da costa de Angola.

Para além deste mecanismo de forçamento remoto, existem a escalas intrasazonais, mecanismos que explicam a geração de anomalias quentes e frias na região Angola - Benguela que são discutidos mais a frente.

## **5.2. Métodos.**

Por forma a identificar a variabilidade nos períodos em que dispomos de dados, 1994 a 2014, para cada uma das secções de Norte a Sul, com destaque para as 5 secções principais (Congo, Palmeirinhas, Lobito, Namibe e Cunene), foram calculados os valores médios climatológicos para as principais variáveis hidrológicas, Temperatura, Salinidade e Oxigênio dissolvido, tal como descrito no capítulo 2, sendo o resultado discutido no capítulo 4. A partir destas distribuições climatológicas, para cada um dos anos, foram calculadas as anomalias em relação à estas médias climatológicas, integrando entre a costa e o largo, e entre a superfície e uma certa profundidade de referência, cuja escolha foi  $z = -100$  m. Este procedimento foi realizado separadamente para as campanhas da estação quente (verão austral, centradas no mês de Março), e para as da estação fria (inverno austral, centradas no mês de Agosto). Os valores climatológicos (integrados no ciclo anual) são diferentes para ambas as estações como previamente discutido.

### 5.3. Resultados.

#### 5.3.1. Variabilidade interanual de temperatura, salinidade e oxigénio.

##### 5.3.1.1. Estação quente.

Na figura 5.1, as anomalias integradas de temperatura, salinidade e oxigénio dissolvido, para a estação quente (verão austral) estão representadas graficamente num diagrama de barras em que as diferentes cores (em cada ano), representam as 5 principais secções anteriormente referidas, com tons vermelho-laranja para as secções da região mais a norte, Congo e Palmeirinhas, verde para a secção de Lobito, em azul para as secções da zona Sul de Angola, Namibe e Cunene. Quando num ano particular alguma das secções não foi amostrada, as anomalias não são representadas. Nesta figura são visíveis as anomalias para cada secção ao longo dos anos. São observadas anomalias positivas e negativas com valores superiores a 2 °C em alguns anos.

Os anos em que foram encontradas anomalias positivas encontrados *in situ* são consistentes com SST, SSH do período 1994 - 2014 observado por nós, (referidos no Capítulo 3, ver discussão, na secção 5.4). Uma análise pormenorizada da Figura 5.1 mostra-nos que, durante a época de verão podemos verificar que os anos com anomalias positivas e negativas do campo de temperaturas são:

Anos com anomalias positivas e negativas do campo de temperaturas estação quente, para zlim de 100 m.

1995, 1996, 2001, 2006, 2007, 2011	Anomalias positivas
1994, 1997, 2004, 2005, 2008	Anomalias negativas

No que diz respeito às anomalias da salinidade (Fig.5.1), em geral apresentam padrão oposto ao da temperatura, i.e, anomalias positivas de temperatura associam-se a anomalias negativas da salinidade, o qual tem um efeito de compensação na densidade. Uma exceção a este facto é observada no ano 2011 onde anomalias positivas de temperatura não correspondem com anomalias negativas de salinidade numa das secções da zona Sul (Cunene).



No que diz respeito ao campo de oxigénio dissolvido (Fig 5.1), nas anomalias integradas da camada 0 m a 100 m de profundidade, observa-se uma relação positiva com as anomalias de temperatura, i.e anomalias positivas de oxigénio associadas a anomalias positivas de temperatura, com uma correlação positiva, ao contrário do que seria de esperar (i.e águas anormalmente quentes associadas a anomalias negativas de oxigénio dissolvido). Apenas em alguns anos, por exemplo (1995, 1996), as águas anormalmente quentes foram associadas às anomalias negativas de oxigénio, com anomalias inferiores ( $\leq -1$  mL/L).

Os valores das correlações entre Temperatura, Salinidade e Oxigénio durante a estação quente são apresentados em baixo:

Valores das correlações entre Temperatura, Salinidade e Oxigénio durante a estação quente, para zlim de 100 m.

#### Correlações, Estação quente

	'Congo'	Palmeirinhas'	'Lobito'	'Namibe'	'Cunene'
Cor. TS	-0.69	-0.60	-0.38	-0.34	0.70
Cor. TO	0.02	0.48	0.57	0.72	0.29

# ANOMALIAS INTERANUAIS

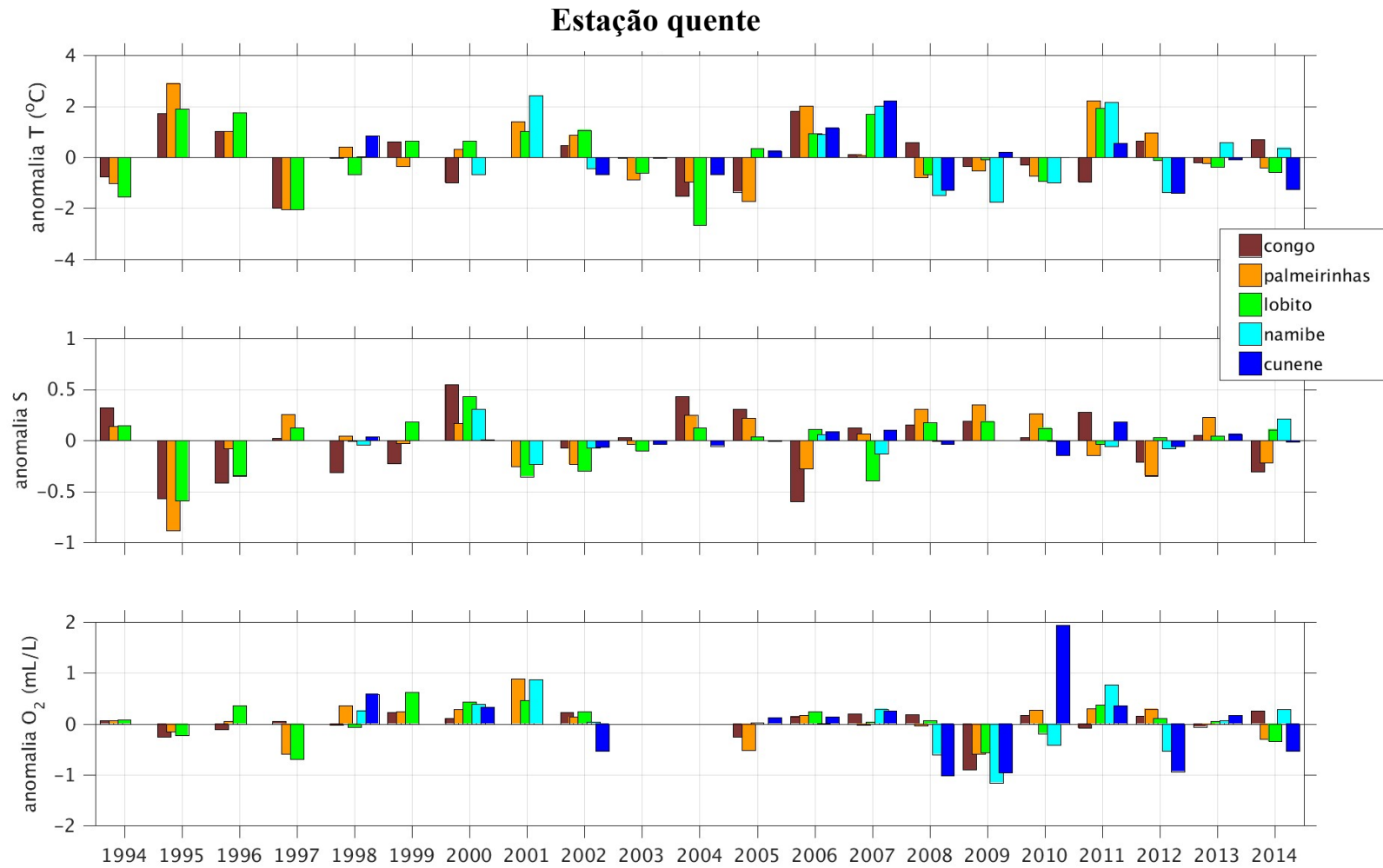


FIG. 5.1. Variação interanual de anomalias de Temperatura, Salinidade e Oxigénio dissolvido para as principais secções aos 100 m (verão austral).

### 5.3.1.2. Estação fria.

No que diz respeito as anomalias observadas na estação fria (Figs.5.2), em que as campanhas observacionais foram realizadas centradas no mês de agosto, as maiores anomalias positivas de temperatura foram observadas nas secções da região Norte em 2008 e 2009 e com valores de anomalias da temperatura integrada entre a superfície e os 100 m em alguns casos superiores a 2 °C, com uma anomalia máxima próxima de 4° para a secção de Congo. No que diz respeito as anomalias negativas observadas durante a época fria, se destacam os anos 2000 até 2005, embora com valores em geral inferiores a -1°C, assim como os anos 1994 e 2013.

1998, 1999, 2008, 2009	Anomalias positivas
1994, 1996, 2000, 2001, 2002, 2004, 2005, 2013	Anomalias negativas

As anomalias do campo de salinidade durante a época fria são numericamente inferiores às da época quente, sendo estas em geral inferiores a 0.25 ao longo de todo o período de amostragem e não se observa correlação oposta entre essas e as da temperatura, mas sim uma forte correlação positiva.

No caso das anomalias de oxigénio dissolvido, durante a época fria, há uma série de anos em que houve ausência de dados (2002 – 2004, 2007 e 2014). Para os anos com dados, não se observa um padrão claro entre anomalias de oxigénio dissolvido e as dos campos de temperatura e salinidade, embora nos anos 1998 e 2008 as anomalias positivas descritas acima são acompanhadas por anomalias positivas de oxigénio dissolvido. Observa-se uma correlação positiva significativa entre oxigénio dissolvido e temperatura nas zonas Norte e Centro, e uma correlação negativa na Zona Sul.

Os valores das correlações entre Temperatura, Salinidade e Oxigénio durante a estação fria são apresentados em baixo:

# ANOMALIAS INTERANUAIS

## Correlações, Estação fria

	‘Congo’	Palmeirinhas’	‘Lobito’	‘Na- mibe’	‘Cunene’
Cor. TS	0.82	0.80	0.66	0.91	0.95
Cor. TO	0.24	0.027	0.34	-0.33	-0.43

# ANOMALIAS INTERANUAIS

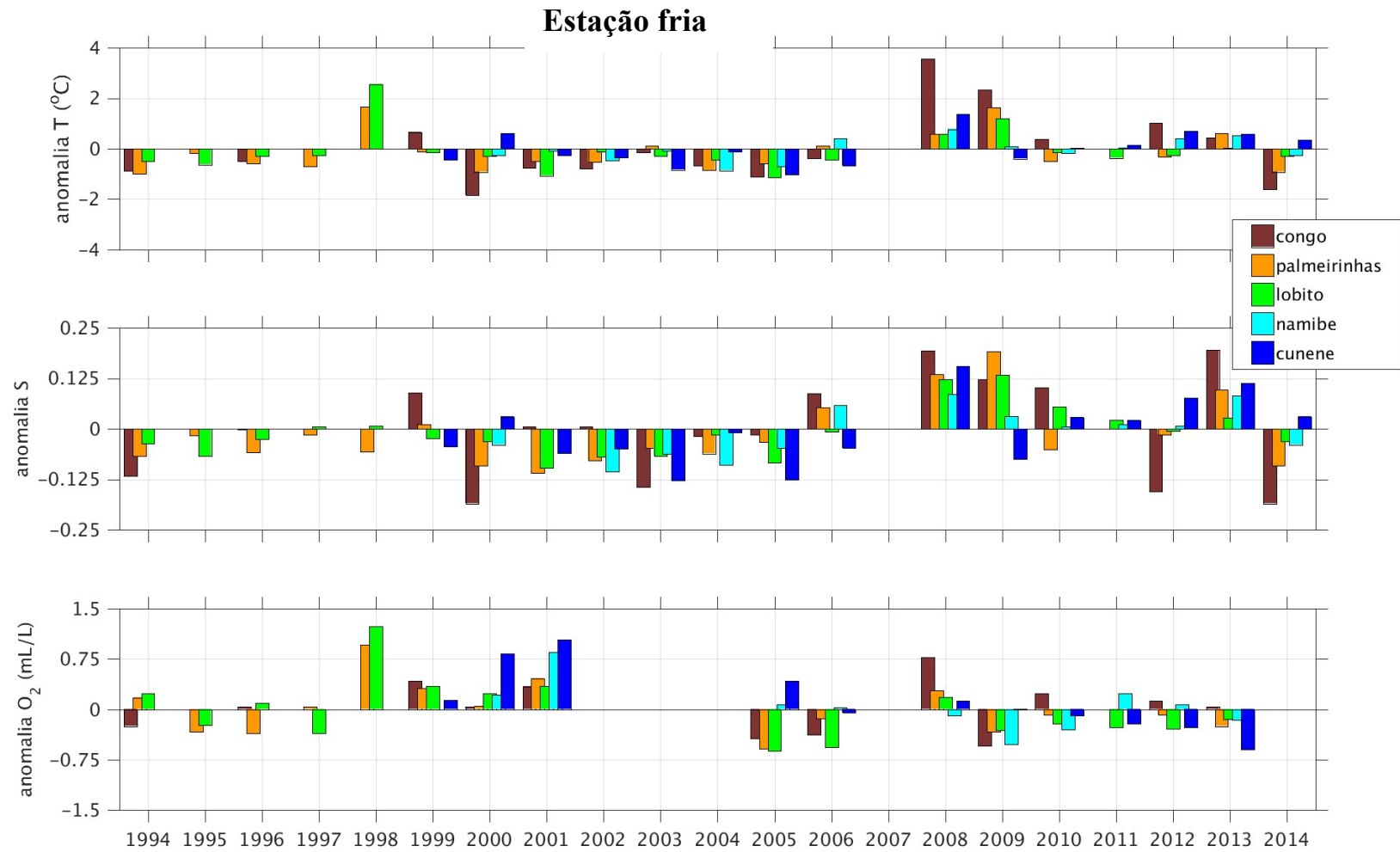


FIG. 5.2. Variação interanual de anomalias de Temperatura, Salinidade e Oxigénio dissolvido para as principais secções aos 100 m (inverno austral).

### 5.3.2. Discussão

A conexão entre as IEKW (ondas de Kelvin que se propagam ao longo do guia equatorial), e as anomalias observadas ao longo da costa africana no hemisfério sul, na região de Angola foi estabelecida usando metodologias robustas (observações de satélite de SST, SSH da rede PIRATA e modelos lineares) por Kounge *et al* (2017), assim como por Bachèrely *et al* (2016), utilizando modelos de alta resolução à escala da bacia africana forçados em modos local e remoto, por forma a separar a influência de ambos modos na circulação na margem angolana. Previamente a estes estudos foram acumuladas evidências dos mecanismos remotos por (Illig *et al.*, 2007; Polo *et al.*, 2008; Rouault, M., 2012), para as escalas temporais interanuais, sendo estabelecido que as anomalias do forçamento local (ventos e outros fluxos atmosféricos), são importantes para escalas intra-anuais (Richter *et al.*, 2010; Lübbecke *et al.*, 2019).

Esses estudos validaram a propagação de ondas (IEKW), da banda equatorial para leste e depois para Sul ao longo da costa africana, principalmente os resultados de Kounge *et al* 2017, que mostram 80 % da variabilidade 99nteranula do sistema de Correntes Angola-Benguela que são remotamente forçados pela propagação de ondas no oceano Atlântico Equatorial.

Recentemente, Lübbecke (2019), realizou uma discussão de um evento de aquecimento na região de Angola e Namíbia, em Janeiro – Fevereiro de 2016, em que foram observadas anomalias de temperatura de cerca de 3 °C, não havendo evidências diretas de ser consequência de um evento El Niño - Benguela associado a IEKE. Os principais fatores associados a este evento foram um enfraquecimento dos ventos paralelos a costa, forçadores do afloramento costeiro, e a forte injeção de água doce por parte dos rios do Norte de Angola e precipitação associada. Este evento desapareceu com a re-intensificação do vento em Março de 2016. Este trabalho mostrou explicitamente que os efeitos locais como geradores de anomalias da temperatura, podem também ser importantes em certas condições como as aqui descritas.

As anomalias das temperaturas mostradas na figura 5.1 para a estação quente, em geral concordam com as obtidas mediante detecção remota. Assim, as fortes anomalias positivas da estação quente detetadas nos anos 1995, 1996, 2001, 2007, 2011, da Figura 5.1 podem ser visualizadas na Figura 3.6b, associadas ao sinal positivo de anomalia do nível do mar. As anomalias negativas (eventos frios) da estação quente observadas nos anos 1997, 2004, 2005 (a Norte de Angola), 2008 e 2012 têm correspondência com eventos de anomalias negativas do nível do mar da Figura 3.6b.

No que diz respeito à estação fria, Figura 5.2, observa-se que as anomalias de temperatura são em geral menores do que na estação quente, e têm menos influência nas anomalias do nível do mar, reportadas na Figura 3.6b. Assim dos anos 1998, 2008 e 2009 em que houve anomalias positivas da temperatura (Figura 5.1) apenas em 1998 se consegue observar evidências claras de anomalia positivas do nível do mar durante o inverno austral. Quanto às anomalias negativas da época fria (inverno austral), é observada a predominância de anomalias frias durante o período 2000 a 2002 e 2004, que são em geral associadas às anomalias negativas de nível do mar durante essa época.

Esta correspondência entre as anomalias observadas nas campanhas oceanográficas analisadas e as obtidas por detecção remota põe em evidência a capacidade das técnicas de detecção remota para melhor compreender as anomalias da temperatura, que por sua vez estão relacionadas com as outras variáveis importantes para o presente estudo: A salinidade e o oxigénio dissolvido.

Outro dos pontos que requer um estudo dedicado, consiste em perceber se as anomalias reportadas neste capítulo têm origem local ou não local. Para responder a esta questão teria que ser realizado um estudo similar ao de Lübbcke *et al* 2019, incluindo informação acerca dos forçamentos da circulação, (ventos e fluxos de calor) fazendo um estudo pormenorizado para cada ano, como o que foi realizado para o evento de 2016 nesse trabalho.

Por outro lado, as anomalias referidas são em geral concordantes com os resultados reportados na literatura, revista recentemente por Kounge et al 2017. O facto de se fazer a integração entre a costa e o largo, e entre a superfície e os 100 m implica perder toda a informação sobre estrutura espacial das situações. No entanto, esta técnica permite aferir quais são os anos em que houve anomalias importantes. Isto leva-nos a seleccionar esses anos, e a fazer um estudo com mais pormenor em anos extremos que foram seleccionados com base nestas séries e na disponibilidade de dados. Este estudo será feito no capítulo seguinte.





## 6.0 CARATERIZAÇÃO DAS ANOMALIAS DAS VARIÁVEIS HIDROLÓGICAS.

**6.1. Introdução.**

No capítulo 4, foi estudada a climatologia dos campos hidrológicos incluindo a temperatura, a salinidade e a concentração de oxigénio dissolvido, baseando-nos nas secções principais, situadas a diferentes latitudes (Congo, Palmeirinhas, Lobito, Namibe e Cunene), e nas distribuições horizontais em superfície e em subsuperfície. Estas distribuições permitiram-nos descrever o estado médio do oceano costeiro nas diferentes regiões da costa angolana.

No presente capítulo iremos centrar a nossa atenção no estudo das anomalias em relação ao estado médio descrito anteriormente, limitando-nos por simplicidade a uma secção para a região Norte (secção do Congo), uma para região Centro (secção de Lobito), e finalmente uma para a região Sul (Cunene). Assim, pretendemos descrever as distribuições hidrológicas na margem angolana, para anos anómalos quentes e anos anómalos frios. A eleição destes anos foi condicionada pelos resultados obtidos no capítulo 5.

Foram seleccionados dois anos quentes e dois anos frios para cada uma das 3 secções principais. O critério de seleção foi não só o de obter as anomalias máximas de temperatura, mas também o de possuir uma secção com suficiente extensão para o largo, que permita visualizar os padrões associados as anomalias. As distribuições hidrológicas de temperatura, salinidade e oxigénio dissolvido para cada uma das secções são visualizadas graficamente e discutidas, para o caso das anomalias positivas, também denominadas anos quentes, assim como para as anomalias negativas de temperatura, denominadas anos frios. Esta visualização repete-se para as campanhas da época quente (centrada no mês de Março) e para as campanhas da época fria (centrada no mês de Agosto), permitindo ter uma visão acerca das distribuições extremas

para cada uma das duas estações anuais principais. Note-se que a batimetria de fundo não está representada, mas sim a profundidade máxima em que cada estação foi realizada, que varia de ano para ano.

## **6.2. Resultados.**

### **6.2.1. Variabilidade durante a estação quente: Extremos**

#### **6.2.1.1. Congo.**

Na secção de Congo, os anos de 1995 e 2006 (Fig. 6.1, 1ª coluna, linhas 1, 2), foram anos que apresentaram anomalias de temperatura positivas maiores em relação à respetiva média climatológica (linha 3). Esses anos caracterizam-se por apresentarem uma forte termoclina (variação de cerca de 5 °C em 10 m) em baixo da camada de mistura de superfície, perto dos 20 m a 25 m de profundidade, observando uma termoclina menos profunda na plataforma interior mais perto da zona costeira.

No que diz respeito ao campo de salinidade (Fig. 6.1, coluna central, linhas 1, 2), esta caracteriza-se pela presença de uma pluma com uma espessura superior à dos seus valores climatológicos que se estende até o limite da secção, a mais de 100 km em direção ao largo, e que ocupa uma extensão similar à camada de mistura do campo de temperatura, com fortes gradientes verticais superiores a 2 unidades em 20 m.

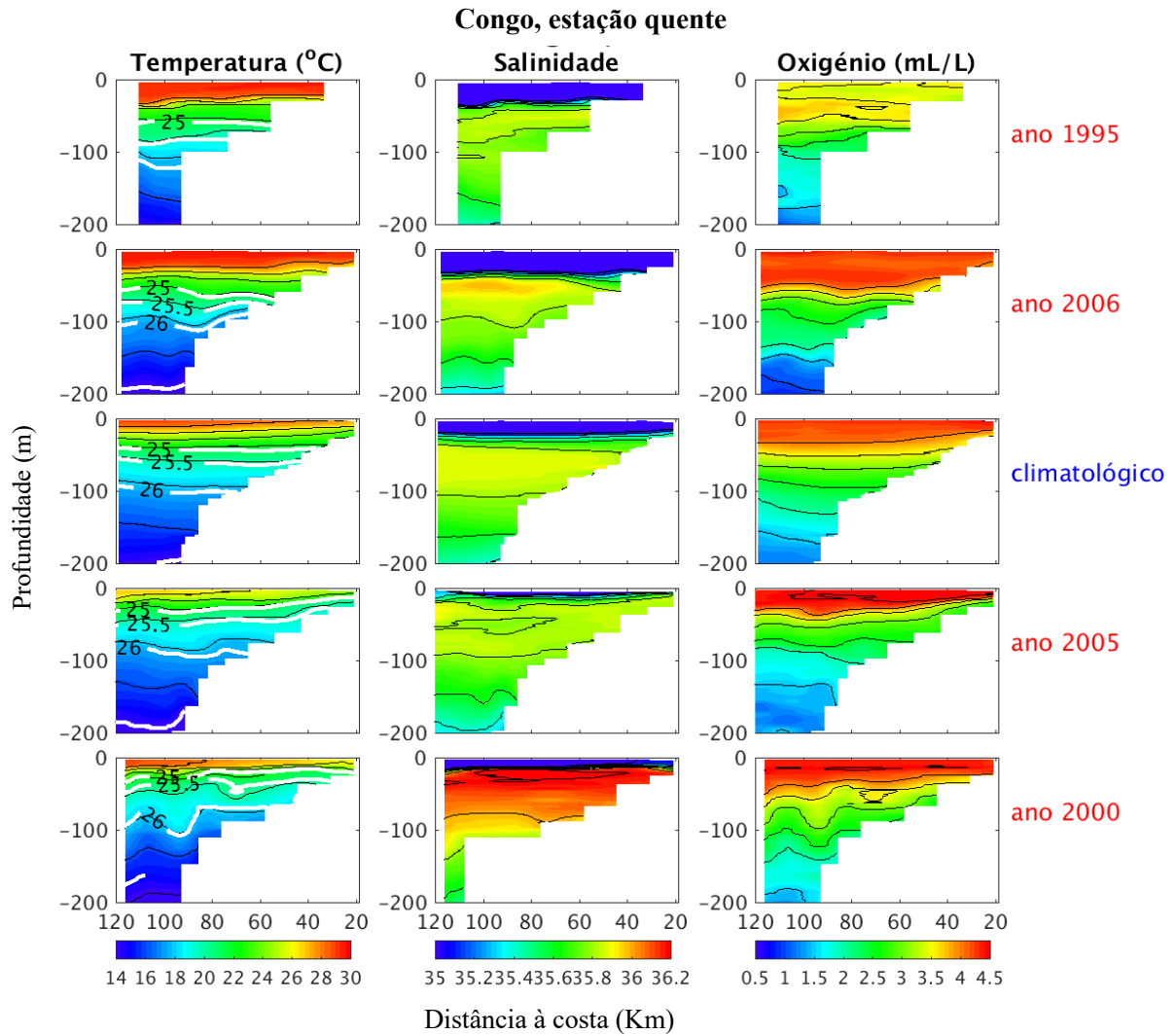
Respeitante ao campo de oxigénio dissolvido (Fig. 6.1, 3ª coluna, linhas 1, 2), a variação é diferenciada, observando-se que no ano 1995, os valores climatológicos de oxigénio dissolvido são menores, o que resulta compreensível dada a anomalia positiva de temperatura, enquanto no ano 2006 apresenta concentrações similares aos valores climatológicos, embora com uma espessura superior, apresentando valores de oxigénio dissolvido em geral superiores a 4 mL/L na camada de superfície.

Os anos escolhidos para ilustrar as anomalias negativas de temperatura,

durante a época quente, relativamente à climatologia (Fig. 6. 1, 1ª coluna, linhas 4 e 5), são 2000 e 2005. Nestes anos, as anomalias negativas de temperatura são associadas a uma tendência para afloramento do campo da temperatura, associado à presença de uma camada de mistura com menor espessura do que nos anos anormalmente quentes.

O campo de salinidade (Fig. 6.1, 2ª coluna, linhas 4 e 5), para o ano 2005, apresenta como principal característica a presença de uma pluma com menor espessura em relação aos valores climatológicos, e valores da salinidade muito próximos aos valores climatológicos na região sub-superficial por baixo da pluma. No campo de salinidade do ano 2000, observa-se uma pluma com espessura inferior à climatológica, assim como valores anormalmente altos (em perto de meia unidade) no campo de sub-superficial (camada dos 20 - 100 m).

O campo de oxigénio dissolvido apresenta em ambos os anos valores superiores aos da climatologia na camada superficial (Fig. 6. 1, 3ª coluna, linhas 4 e 5), com evidências do afloramento anteriormente descrito para o campo de temperatura. Estas anomalias positivas do campo de oxigénio dissolvido são compatíveis com os valores negativos da anomalia de temperatura descritos.



**FIG. 6.1.** Secção do Congo para a estação quente. Distribuição vertical de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), salinidade e oxigénio dissolvido ( $\text{mL/L}$ ) de 1995 e 2006, anos sazonalmente quentes (1<sup>a</sup> e 2<sup>a</sup> linhas), do ano climatológico (3<sup>a</sup> linha) e de 2005 e 2000, anos sazonalmente frios (4<sup>a</sup> e 5<sup>a</sup> linhas). As isopícnas  $\sigma_{\theta}$ , 25 a 26.5 são representadas sobrepostas ao campo da temperatura. Os valores das isolinhas para T, S,  $\text{O}_2$  se correspondem com os representados nas barras de cor. No eixo das abscisas está representada a distância a costa em km e das ordenadas a profundidade em m. A localização das secções está visível na figura 4.1

#### 6.2.1.2. Lobito.

Na secção do Lobito (Fig. 6.2, linhas 1, 2), foram seleccionados 1995 e 1996 como anos com anomalias positivas significativas em relação à climatologia para a secção de temperatura realizada no verão austral. A distribuição das isotermas para o ano de 1995 mostra um campo de temperatura quase plano, estando as anomalias positivas concentradas por baixo da termoclina superficial. As isopícnas de referência

também se observam afundadas em relação aos valores climatológicos. A principal característica da distribuição de temperatura para 1996 consiste no incremento na espessura da camada de mistura superficial e na intensificação do afundamento característico do sistema da Corrente de Angola por baixo da termoclina e 150 de profundidade.

No campo da salinidade (Fig. 6.2, 2ª coluna, linhas 1, 2), associada às anomalias positivas de T, observa-se a intensificação das plumas na camada superficial, em relação à média climatológica, assim como a tendência para o afundamento das isohalinas na região sub-superficial em 1996.

Para o campo de oxigénio dissolvido (Fig.6.2, 3ª coluna, linhas 1 e 2), as anomalias dos anos 1995 e 1996 são negativas em relação aos valores climatológicos, e a sua estrutura acompanha de forma aproximada à estrutura do campo de temperatura.

No que diz respeito a anos com anomalias negativas durante o verão austral (Fig.6.2, linhas 4 e 5), foram analisados os anos 1997 e 2010. O campo da temperatura apresenta tendências de afloramento na plataforma continental nestes dois anos, enquanto que no campo de salinidade destaca-se o desaparecimento da pluma fluvial, e consequentemente o aparecimento de anomalias positivas de salinidade em relação aos valores climatológicos.

No campo de oxigénio dissolvido (Fig.6.2, 3ª coluna, linhas 4 e 5) para 1997 e 2010 observa-se uma anomalia positiva desta grandeza, em consonância com as anomalias negativas de T, assim como uma elevação das águas com baixo teor de oxigénio dissolvido, associado às condições de afloramento nestes anos.

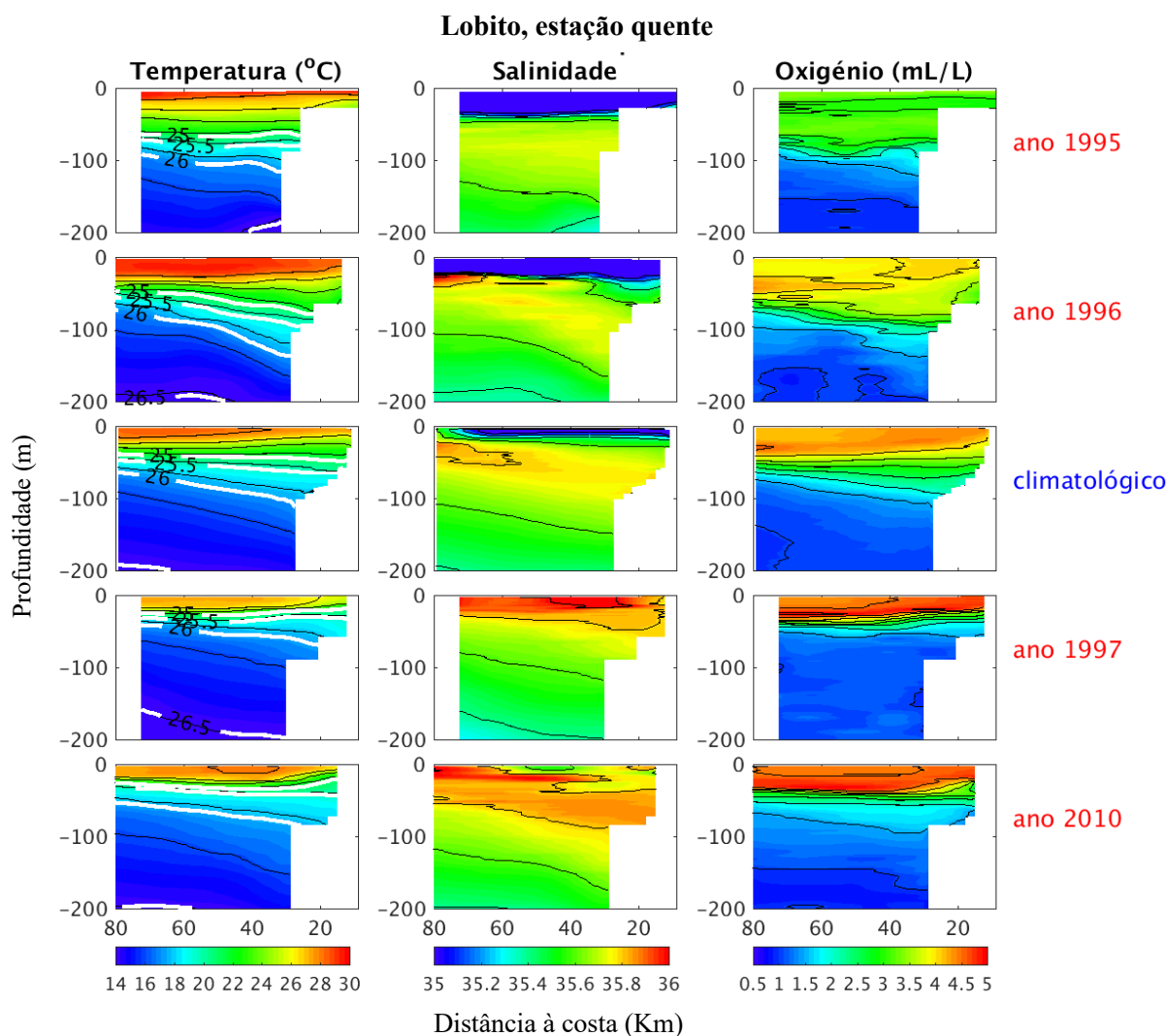


FIG. 6.2. Igual a figura 6.1, para a secção do Lobito, para a estação quente. Os anos correspondentes às anomalias quentes/frias, são 1995, 1996 (quentes) e 1997-2010 (frios)

### 6.2.1.3. Cunene.

Para a secção de Cunene (Fig.6.3, linhas 2 e 3), durante o verão austral foram escolhidos os anos 2006 e 2007 como anos com anomalias positivas de temperatura. O ano de 2006 apresenta uma distribuição de temperatura (coluna 1) similar a sua distribuição climatológica, com isotermas a subir para a costa, e a presença de uma frente à superfície a cerca de 40 km da costa, separando as águas superficiais mais quentes situadas ao largo, das águas afloradas. No ano de 2007 é visualizado um regime de afundamento intenso das isotermas (acompanhado pelo campo isopical) desde o largo até a região costeira, trazendo como consequência um padrão de circulação

oposto ao climatológico.

Em ambos os anos (2006 e 2007), o campo de salinidade acompanha os padrões do campo de temperatura, observando-se em 2006 padrões do campo de salinidade similares à distribuição, e opostos em 2007 (Fig.6.3, 2ª coluna, linhas 1 e 2, respectivamente). Os campos de oxigênio dissolvido seguem padrões similares aos da temperatura em 2007 e 2006, (Fig.6.3, 3ª coluna, linhas 1, 2).

Para os anos escolhidos como anomalias de temperatura negativas (Fig.6.3, linhas 4 e 5), observa-se uma diminuição da estratificação, assim como padrões de variação similares aos climatológicos, com evidências de afloramento nas camadas superiores e afundamento em profundidade.

Os padrões de salinidade (Fig.7.3, 2ª coluna, linhas 4 e 5), evidenciam em todos os casos a ausência de qualquer pluma superficial, associada a inexistência de escoamento fluvial importante nessa região, assim como padrões compatíveis com a climatologia de salinidade.

Os campos de oxigênio dissolvido (Fig.6.3, 3ª coluna, linhas 4 e 5), evidenciam o afloramento costeiro de forma similar aos valores climatológicos, trazendo para perto da superfície, valores de águas pouco oxigenadas, embora anomalias positivas de oxigênio dissolvido podem ser observadas perto da superfície para o ano 2014 e essencialmente negativas para o ano de 2008 em relação à climatologia.



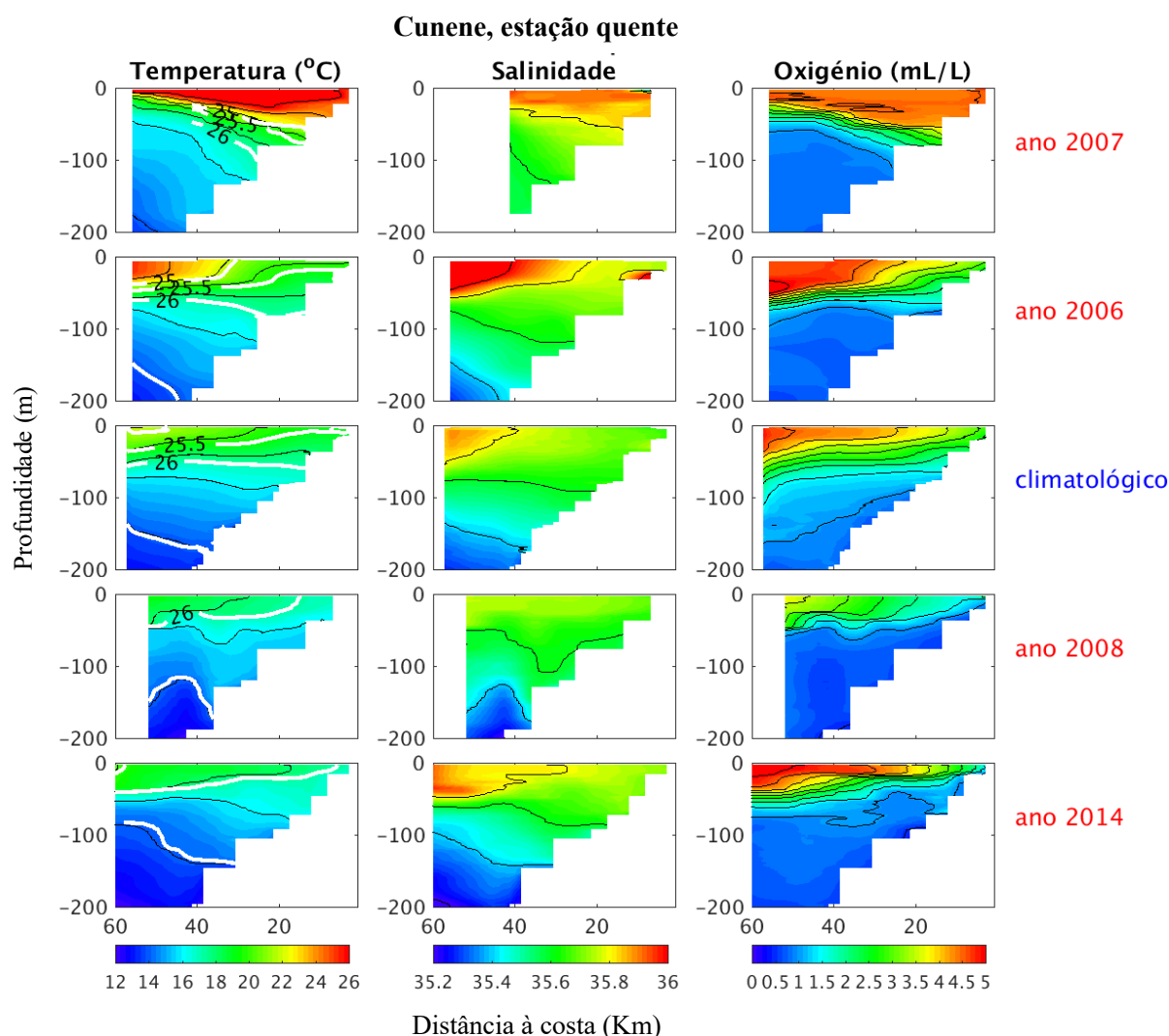


FIG. 6.3. Igual a figura 6.1, para a secção do Cunene, para a estação quente. Os anos correspondentes às anomalias quentes/frias, são 2006 -2007 (quentes) e 2008 - 2014 (frios).

## 6.2.2. Variabilidade durante a estação fria: Extremos.

### 6.2.2.1. Congo.

Durante o inverno austral (estação fria), os anos com anomalias positivas de temperatura escolhidos foram 2008 e 2009 (Fig.6.4, 1ª coluna, linhas 1 e 2). Estes anos caracterizam-se pela existência de uma camada superficial quente mais espessa do que a observada nos valores climatológicos, com cerca de 25 m de espessura. Por baixo desta camada é observada ao largo a tendência para algum afundamento das isoterms, sugerindo uma maior influência da Corrente de Angola em direção ao Sul.

No que diz respeito ao campo de salinidade (Fig. 6.4, linhas 1 e 2, coluna central), observa-se a presença de uma pluma, mais espessa do que os seus valores climatológicos, associada ao caudal do Rio Congo, que nesta estação é menor do que na estação quente, como discutido anteriormente. Por baixo da pluma encontra-se uma camada de águas subsuperficiais com uma anomalia positiva do campo de salinidade.

No que diz respeito a distribuição do oxigénio dissolvido (Fig. 6.4, 3ª coluna, linhas 1 e 2), o ano de 2008 apresenta uma camada superficial bem oxigenada com padrões similares aos do campo de temperatura acima descritos. No entanto para o ano 2009 isto não é observado, mas sim observa-se uma anomalia negativa de oxigénio em relação à climatologia, cuja distribuição sugere um afloramento na plataforma continental, que, no entanto, não é observado no campo da temperatura.

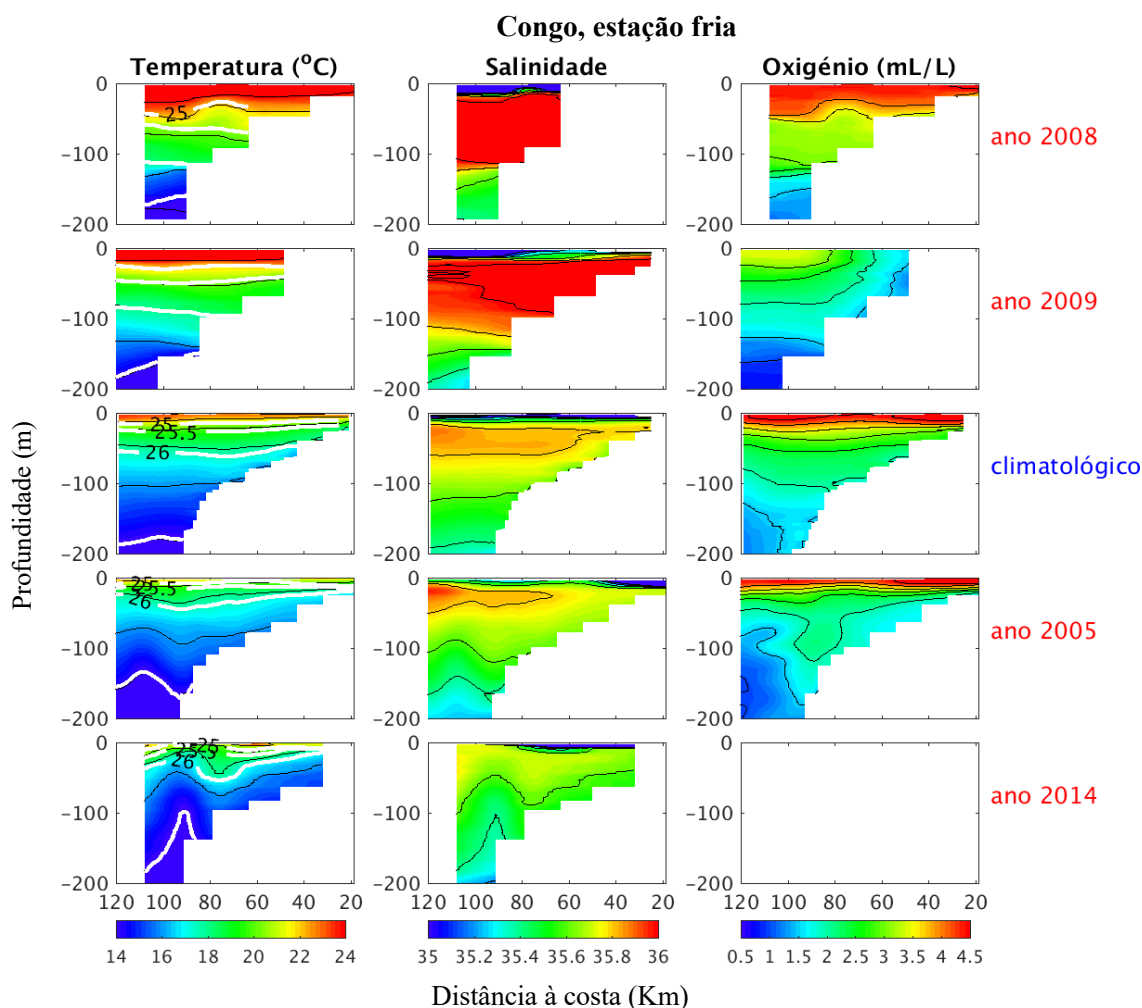


FIG. 6.4. Igual a figura 6.1, para a secção do Congo, para a estação fria. Os anos correspondentes às anomalias quentes/frias, são 2008 - 2009 (quentes) e 2005 - 2014 (frios).

#### 6.2.2.2. Lobito.

Na secção do Lobito, na estação fria, foram escolhidos os anos de 1998 e 2009 como representativos de anomalias de temperatura positiva (Fig. 6.5, linhas 1 e 2). Estes anos, apresentam estrutura vertical similar aos valores climatológicos, embora com uma maior espessura da camada de mistura superficial. Duas situações contrastantes são evidenciadas: Enquanto para 1998 é observado afundamento dos campos de temperatura e salinidade, em 2009 a situação oposta acontece, no entanto com anomalias de temperatura inferiores ao caso de 1998.

Para o campo de oxigénio dissolvido, anomalias opostas aos valores

climatológicos são observadas, positivas em 1998 e negativas em 2009.

Em anos com anomalias de temperatura negativas, 1995 e 2001 (Fig. 6.5, linhas 4 e 5), o afundamento é observado abaixo de 100 m de profundidade em 1995 nos três campos, mas em 2001 há predomínio do afloramento em todos campos, e a salinidade deste ano apresenta valores próximos aos climatológicos. O campo de oxigênio dissolvido apresenta em superfície padrões similares aos climatológicos para ambos os anos, enquanto em 2001 é visualizada uma anomalia positiva em relação ao valor climatológico de oxigênio dissolvido.

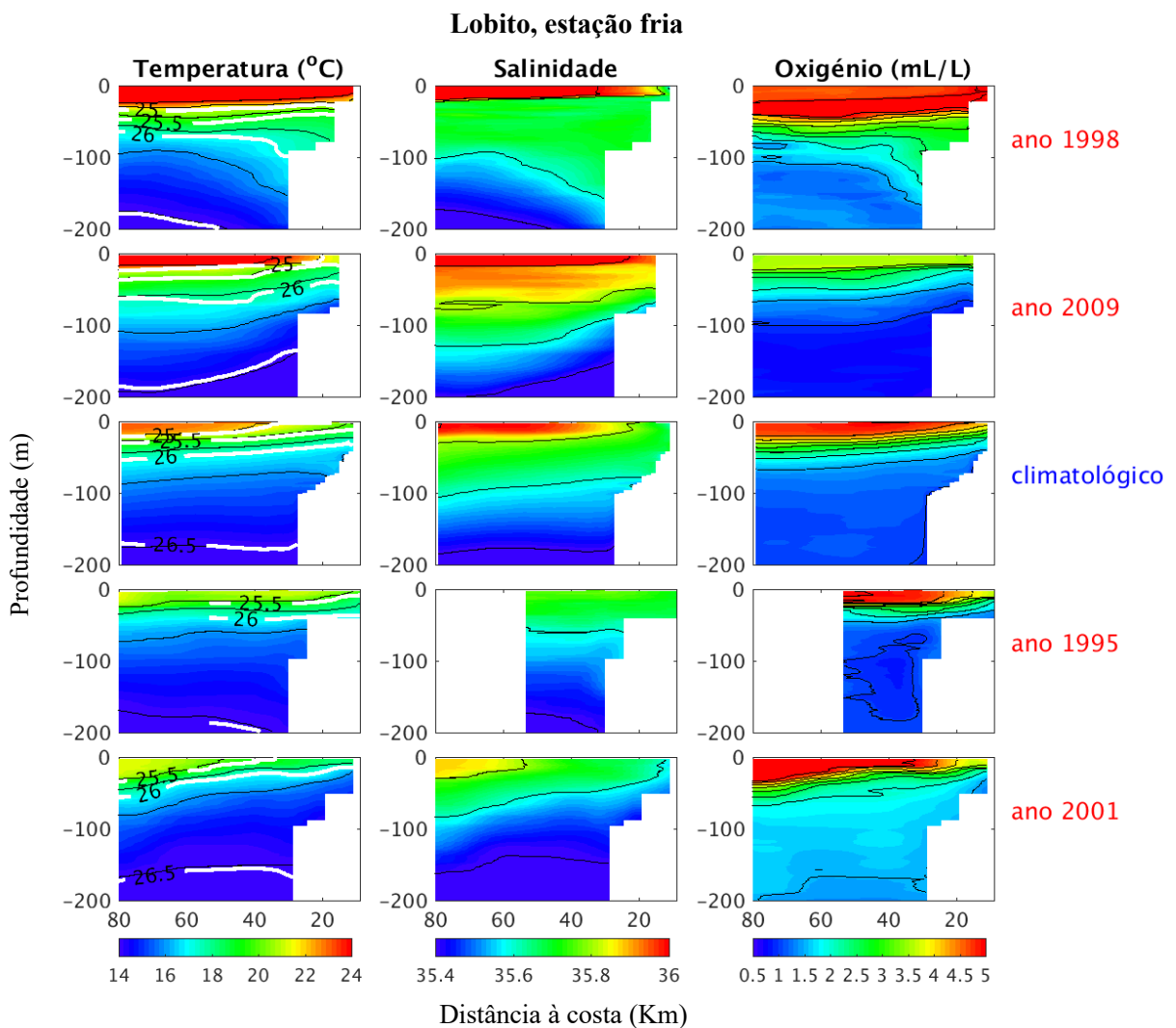


FIG. 6.5. Igual a figura 6.1, para a secção do Lobito, para a época fria. Os anos correspondentes às anomalias quentes/frias, são 1998 - 2009 (quentes) e 1995 - 2001 (frios).

### 6.2.2.3. Cunene.

Na secção do Cunene, os anos de anomalias positivas escolhidos foram 2008 e 2013 (Fig. 6.6, linhas 1 e 2). Durante o inverno austral, estes dois anos apresentam distribuição de temperatura similar, embora 2008 apresente uma camada superficial de mistura com espessura superior a 2013. Na camada sub-superficial da temperatura observa-se a tendência para o afundamento em ambos os anos de forma mais pronunciada que na climatologia.

No campo de salinidade (Fig. 6.6, 2ª coluna, linhas 1 e 2), verifica-se uma proximidade da sua distribuição aos dos padrões da temperatura nos dois anos.

Verifica-se a presença de uma camada superficial de água mais salgada, especialmente ao largo, previsivelmente associada a uma maior evaporação nesses anos.

O campo de oxigénio dissolvido (Fig. 6.6, 3ª coluna, linhas 1 e 2), apresenta um padrão ligeiramente diferente ao da temperatura e salinidade em 2008, as concentrações de 3 - 3,5 mL/L que se situam perto de 80 m de profundidade ao largo, afloram a superfície a 20 km da costa, com valores superiores mais ao largo, abaixo são vistos valores influenciados por águas da Corrente de Angola. Em 2013, o afloramento não é muito intenso nos três campos, mas se observa uma ascensão significativa de águas com baixo conteúdo em oxigénio dissolvido.

Para os anos com presença de anomalias de temperatura negativas, 2006 e 2009 (Fig. 6.6, linhas 4 e 5), associadas ao afloramento intenso, observam-se padrões consistentes aos campos da temperatura nos campos de salinidade e oxigénio dissolvido. É de destacar o sinal de baixa salinidade das águas afloradas, mas com oxigénio dissolvido com valores iguais ou superiores a 3 mL/L a partir de 100 m para as camadas superiores.

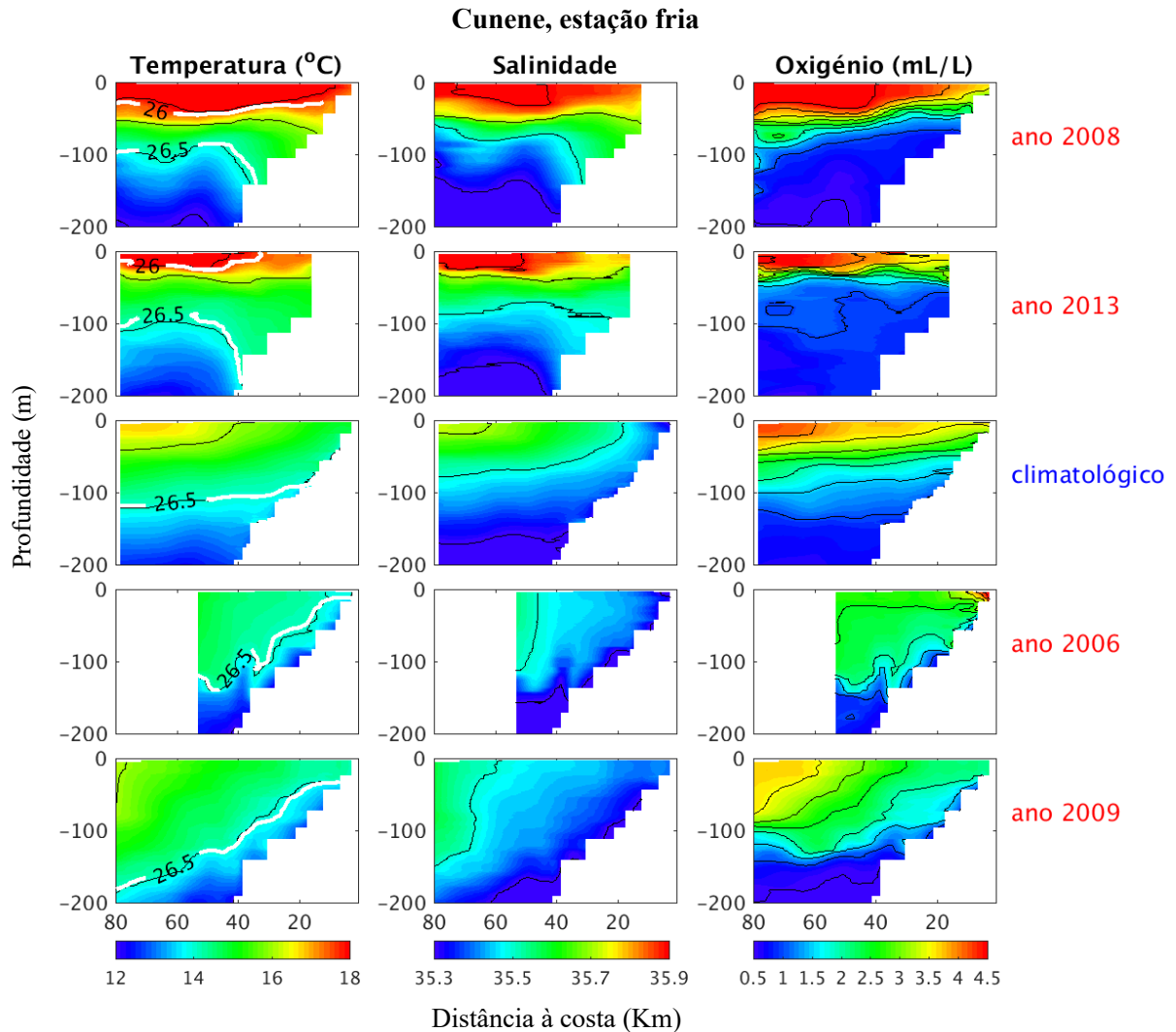


FIG. 6.6. Igual a figura 6.1, para a secção do Cunene, para a época fria. Os anos correspondentes às anomalias quentes/frias, são 2008 - 2013 (quentes) e 2006 - 2009 (frios).

### 6.2.3. Discussão e conclusão.

Neste capítulo foram descritas as características hidrológicas dos principais anos considerados como anomalias quentes e frias em relação às distribuições climatológicas, para as duas estações em que dispomos de dados: verão austral, ou época quente e inverno austral, ou época fria. Na literatura estão bem descritos os anos em que acontecem as anomalias quentes e frias, principalmente associadas à propagação de ondas equatoriais de Kelvin, tal como descrito com base em dados observacionais e de satélite por Koungue *et al* (2017), ou por estudos de modelação numérica (Batchèlery, 2016), embora anomalias atribuídas a fenómenos locais

associados a anomalias no vento e nos fluxos de calor com a atmosfera, também causam anomalias na margem angolana (Lübecke, 2016).

Note-se que a maior parte dos estudos são focados em processos de escalas maiores do que a plataforma/margem continental, baseados em informação obtida por satélite (SST, SSH, SSS), e em poucas ocasiões estudos baseados em dados ‘*in situ*’ estão disponíveis na literatura. Daí a pertinência do presente estudo, focado na descrição das principais estruturas observadas na hidrologia da costa angolana.

As principais anomalias quentes são observadas na camada superficial associadas a um afundamento da termoclina em relação à situação climatológica, principalmente devido a propagação de ondas de Kelvin em direção a sul, enquanto que as anomalias frias estão principalmente associadas a um afloramento do campo de temperatura. As anomalias do campo de salinidade nas regiões Norte e Centro, associadas a anomalias quentes, são mais intensas na superfície, e geralmente associadas a presença ou ausência de plumas dos rios. Em geral a inclinação na direção costa-largo do campo de salinidade acompanha as do campo de temperatura de forma consistente.

No que diz respeito as anomalias do campo de oxigênio dissolvido associadas às anomalias de temperatura, foi constatada a sua correlação positiva durante o verão austral. No inverno austral não se verificou uma correlação clara entre ambas propriedades. Isto é possível porque no verão austral, a actividade fotossintética à superfície (produção primária) aumenta, e conseqüentemente, aumenta a concentração de oxigénio dissolvido.

No entanto, o comportamento acima não é sempre linear, porque associado à anomalias de temperatura há fenómenos advectivos de transporte de águas com menor quantidade de oxigênio dissolvido, procedentes tipicamente ou da região a Norte de Angola, ou águas que foram incorporadas a corrente de Angola desde o largo a partir da região denominada Giro de Angola, em que é bem conhecida a presença de águas recirculadas com baixo conteúdo em oxigênio. Para além deste mecanismo, os afloramentos locais induzidos pelo vento trazem por advecção vertical águas mais

profundas, com baixo conteúdo de oxigênio dissolvido, para perto da superfície, (Monteiro *et al*, 2008, 2006), o que pode explicar a correlação directa/inversa entre temperatura e oxigénio dissolvido.

Conclui-se que, se bem que não foi possível desenvolver uma análise detalhada dos mecanismos forçadores das anomalias descritas, para cada um dos anos anómalos aqui referidos, foi possível realizar uma caracterização hidrológica dos anos anómalos principais para cada uma das três secções principais.





## CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS.

**7.1. Conclusões e perspectivas de futuros trabalhos.**

Na presente tese de doutoramento, foram analisados os dados de um conjunto de campanhas oceanográficas realizadas pelo programa de cooperação NANSEN entre o Reino da Noruega e a República de Angola, entre os anos 1994 e 2014. Este conjunto contém dados de sondas CTD amostrados em duas campanhas realizadas duas vezes por ano, uma durante o verão austral (também denominado estação quente, centrada no mês de Março) e outra durante o inverno austral (estação fria, centrada no mês de Agosto).

O acesso a estes dados de CTD em bruto foi garantido pelo IMR (Institute of Marine Research, Bergen, Noruega), e estes foram processados desde o início, tal como descrito no capítulo 2, com procedimentos standard utilizando rotinas em Matlab, por forma a remover os ‘outliers’ (dados errados) com um procedimento semi-manual. Os dados foram colocados em forma gráfica, e posteriormente armazenados com geolocalização, para serem utilizados nas análises detalhadas nos capítulos 4, 5 e 6.

As análises realizadas consistiram na criação de climatologias para a região da plataforma e margem continental de Angola, em que as cinco secções principais localizadas de Norte a Sul na foz do Rio Congo, na Ponta das Palmeirinhas (perto de Luanda), em Lobito, em Namibe, e na foz do Rio Cunene, que delimita a fronteira com Namíbia. Foram ainda calculadas as climatologias médias para o resto das estações com menor cobertura para o largo, por forma a ter uma malha apertada que nos permita aferir os valores climatológicos das distribuições da hidrologia (temperatura, salinidade e oxigênio dissolvido) para toda a margem continental angolana. Foi ainda possível ter acesso aos dados do correntómetro acústico por efeito doppler (ADCP) de casco do Navio Friedrich Nansen, por forma a poder obter a corrente desde os 25 até os 250 m de profundidade nas secções principais e foi possível calcular a respectiva climatologia. Estas secções foram analisadas em conjunto com as secções de hidrologia no capítulo 4 para poder obter uma visão integrada dos aspectos termohalinos e da circulação na margem angolana.

Uma vez construídos os campos das variáveis climatológicas, foram analisadas as anomalias das variáveis hidrológicas em relação a estas, de duas formas: a primeira por integração costa largo, e superfície até os 100 m, para cada uma das secções principais e cada ano (capítulo 5); e em seguida, uma vez identificados os anos anómalos, foi realizada uma caracterização destes, no capítulo 6.

No que diz respeito aos resultados foi possível realizar para toda a região de Angola uma caracterização climatológica para as duas estações principais, verão austral e inverno austral, da hidrologia e cinemática. Assim, foi caracterizada a presença dos dois principais sistemas de correntes na margem continental angolana: A Corrente de Angola que durante o verão austral se desloca de Norte para Sul, (em direção ao pólo) transportando águas relativamente quentes em direção a Sul, visível na secção do Congo em forma de um afundamento do campo termohalino na parte exterior da margem na zona mais superficial até os 150 m de profundidade, estendendo-se depois para Sul na secção de Palmeirinhas, continuando nas secções de Lobito (ainda na parte externa da margem) e de Namibe (mais próxima da costa em forma de jato com máximos próximos de 35 cm/s) e ainda visível na secção de Cunene no extremo Sul de Angola (na parte externa da margem). É observada uma variação da intensidade da corrente de Angola ao longo da latitude, sugerindo que existem interações com o oceano aberto na região do denominado giro de Angola.

Na direção contrária à Corrente de Angola, é observada em todas as secções a presença de escoamento em direção a Norte, geralmente como corrente subsuperficial. Este escoamento é frequentemente identificado como um ramo costeiro do denominado Sistema de Correntes de Benguela, cuja origem é bem mais a Sul, em águas da África do Sul, associada ao forçamento do vento, de forma similar a outros sistemas de afloramento do hemisfério Sul (Humboldt) e do hemisfério Norte (Califórnia e Canarias).

Durante o inverno austral, associada à presença de ventos alísios mais intensos, é intensificada a influência do Sistema de Correntes de Benguela, com a presença de escoamentos em direção ao equador (Norte) na região da plataforma continental, assim como na região da margem ao largo, como extensão do ramo oceânico da Corrente de Benguela. Esta tendência

para escoamento em direção ao equador coexiste com a presença nesta época de inverno austral da Corrente de Angola que é mais fraca, e com um carácter mais barotrópico.

O estudo da temperatura, da salinidade e da corrente acima referido complementa-se com a variável do oxigénio dissolvido. Os seus valores médios e anomalias foram calculados seguindo a mesma metodologia usada para a temperatura e a salinidade. A informação sobre a distribuição geral do oxigénio dissolvido realizada no capítulo 4 permite inferir a presença de águas com valores muito baixos de oxigénio dissolvido, ao nível das águas centrais (SACW), em geral inferiores a 1.5 mL/L, o que de acordo com a literatura (Monteiro *et al.*, 2006), corresponde com valores hipóxicos. Como discutido na literatura a origem destes baixos valores de oxigénio dissolvido tem a ver com a sua elevada ‘idade’ (tempo após o contato com a atmosfera, e, portanto, pouca ventilação), associada a processos de recirculação no denominado Giro ciclónico de Angola. Nos últimos anos tem sido dada maior importância a este fenómeno pois a corrente de Angola exporta parte dessas águas em finais do verão austral para o denominado Sistema de Benguela, que já pela própria dinâmica do afloramento local induz a presença de áreas de mínimos de oxigénio, que leva frequentemente a situações de anóxia.

Por cima das águas centrais, a proximidade da superfície induz um gradiente de oxigénio dissolvido que faz com que na denominada camada de águas centrais superiores (UCW) a concentração de oxigénio dissolvido se incremente de 1 para 4 a 5 mL/L perto da superfície, o que significa que são águas com concentrações de oxigénio dissolvido ideais, que permitem o desenvolvimento de atividade biológica.

Estes valores climatológicos descritos no capítulo 4 dão uma indicação da variação sazonal e interanual, mas não de forma clara, devido à natureza da sua amostragem, uma amostragem no verão austral e outra no inverno austral. No entanto outros estudos recentes, (ver discussão do capítulo 5) provam a existência de variabilidade intra-anual da corrente de Angola, e a existência de inversões frequentes da circulação em escalas de semanas-meses. Dado o tipo de amostragem realizado (campanhas semestrais realizadas em períodos fixos) não é possível estudar este tipo de escalas na circulação. As maiores variabilidades conhecidas na região são associadas a existência de episódios quentes ou frios, que perturbam fortemente os padrões de circulação durante vários meses seguidos, cuja origem são ondas equatoriais de

Kelvin, que se propagam ao longo da região costeira, denominados El-Niño/La-Niña - Benguela, para episódios quentes/frios respectivamente por analogia com o fenómeno equivalente no oceano pacífico.

Os anos quentes e frios foram identificados, e comparados com as observações reportadas na literatura, e discutidas no capítulo 5. Para fazer um estudo detalhado destes fenómenos seria conveniente realizar simulações numéricas que permitissem reproduzir e analisar os resultados, o que foi inicialmente equacionado, mas não conseguindo ser realizado devido às elevadas dificuldades técnicas de fazer as configurações numéricas, e explorar devidamente os resultados.

Outro tema de trabalho que foi inicialmente equacionado foi o estudo das tendências dos parâmetros hidrológicos, em particular a temperatura, mais relevante ainda no âmbito das alterações climáticas. Embora tenham sido feitas tentativas de encontrar tendências, o carácter dos dados, com duas amostragens anuais e a enorme variabilidade dos campos hidrológicos referida anteriormente dificulta a extração de tendências, se bem que a literatura indica que elas existem, pelo menos a nível da temperatura da superfície do mar (obtida através da monitorização por satélite e bem identificada na literatura).

Com base na identificação dos anos extremos descrita no capítulo 5 foi possível realizar a tarefa de descrever com mais detalhe, para três secções representativas das regiões Norte, Centro e Sul, as características principais em termos de Temperatura, Salinidade e Oxigénio dissolvido, para os anos anormalmente quentes e frios. Com esta descrição foi possível caracterizar as escalas e a estrutura espacial das anomalias destas variáveis nos anos extremos. Foi observado na camada de superfície que variações verticais da posição da termoclina, variações da espessura da camada de mistura, e presença/ausência de haloclina associada ao escoamento fluvial local, são as principais consequências dos episódios denominados quentes ou frios. Se bem que maioria destes episódios são parcialmente forçados por ondas provenientes do equador, como referido acima, fenómenos locais associados a anomalias do vento local também contribuem para as anomalias dos parâmetros hidrológicos, embora não tenha sido possível fazer uma análise pormenorizada dado o elevado volume de dados que representam 21 anos de dados em 42 campanhas.

No que diz respeito à variável de oxigénio dissolvido, os eventos extremos estudados no capítulo 6 têm como consequência a forte variabilidade da distribuição deste parâmetro. No entanto, a dinâmica resultante em alguns anos com anomalias frias é compatível com afloramentos muito intensos que advectam para a superfície, através de níveis mais profundos, águas com baixo teor de oxigénio, associadas as OMZ, onde se observa a presença de águas que podem ser consideradas como hipóxicas.

Este conjunto de dados hidrológicos e correntométricos, poderá ser posteriormente utilizado para completar estudos à escalas climáticas, incluindo outras variáveis amostradas tais como a clorofila (que teria que ser devidamente calibrada), e outras amostras de capturas de peixe recolhidas e utilizadas para a gestão de ‘stocks’ de pesca por parte das autoridades angolanas. Estes dados poderão também contribuir para validação de modelos oceanográficos a realizar para estudar a variabilidade na região de Angola.

Finalmente este estudo representa uma contribuição para a capacitação dos recursos humanos para um melhor conhecimento do ecossistema marinho angolano. Angola tem recursos na área de ciências do mar, entre os que destaca o navio de investigação oceanográfico Baia Farta, que precisa de equipas científicas que possam realizar estudos oceanográficos, e desenvolver investigação sobre o meio marinho.

## 8. BIBLIOGRAFIA

1. Arquivos do Centro de Investigação Pesqueira, Lobito.
2. Bachèlery M. L., S. Illig, I. Dadou, 2016: Forcings of nutrient, oxygen, and primary production interannual variability in the southeast Atlantic Ocean. *Geophysical Research Letters*, V43, pp.8617-8625, doi.org/10.1002/2016GL070288.
3. BCLME, 1998. Benguela Dinamic South African Journal of Marine Science.
4. Berger W. H., G. Wefer, C. Richter, C. B. Lange, 1998: The Angola-Benguela upwelling system: Paleocenographic synthesis of shipboard results from leg 175. *Proceedings of the Ocean Drilling Program*, V175, pp.505-528.
5. Berger H., 2014. Dynamics of an Equatorial River Plume: Theory and Numerical Experiments Applied to the Congo Plume Case. *Journal of Physical Oceanography*. V44, pp.980-994, doi:10.1175/JPO-D-13-0132.1.
6. Berrit, G. R. 1976 : Les eaux froides côtières du Gabon à L'Angola sont-elles dues à un upwelling d'Ekman. *Cahiers ORSTOM, Séries Océanographie*, 14, 473–478.
7. Berrit G. R. & Dias, C. A. 1977: Hydroclimatologie des Régions Côtières de L'Angola. *Cahiers ORSTOM, Séries Océanographie*, 15, 181–196.
8. Bianchi G., 1982. Demersal assemblages of the continental shelf and upper slope of Angola. Institute of Marine Research, Division for International Development Programmes, PO Box 1870, Nordnes.
9. Bianchi G., 1986: Guia de campo para a identificação de espécies comerciais de águas marinhas e salobras de Angola. FAO.
10. **Bianchi, G.** 1992. Demersal assemblages of the continental shelf and upper slope of Angola. *Marine Ecology Progress Series*, 81: 101-120.
11. Bianchi C., Mendoza, L. P. O., Fernández L., Natali M. P., Meza A.; Moirano J., 2016: Time series of atmospheric water vapour and troposphere zenith total delay, over Central and South America, from a homogeneous GNSS reprocessing (MAGGIAZTD & IWV Solution1). *PANGAEA*, <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.858234>.
12. Binet D., 1997: Climate and pelagic fisheries in the Canary and Guinea currents 1964-1993: The role of trade winds and the southern oscillation. *Oceanologica Acta*, V20(1), pp.177-190.

13. Binet D., Gobert B. & Maloueki L., 2001: El Niño-like warm events in the Eastern Atlantic (6°N, 20°S) and fish availability from Congo to Angola (1964-1999). *Aquatic Living Resources*, V14, pp.99-113, [doi.org/10.1016/S0990-7440\(01\)01105-6](https://doi.org/10.1016/S0990-7440(01)01105-6).
14. Boyd A. J. & Nelson G., 1998: Variability of the Benguela Current off the Cape Peninsula, South Africa. *South African Journal. of Marine Science*, V19, pp.27-40, doi: 10.2989/025776198784126665.
15. Carr M.E., Kearns E. J., 2003: Production regimes in four Eastern Boundary Current systems. *Deep-Sea Research*, V50, pp.3199–3221, [doi.org/10.1016/j.dsr2.2003.07.01](https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2003.07.01)
16. Castro C. G., F. Pérez, F. Álvarez-Salgado, X. A. Fraga, F., 2000: Coupling between the thermohaline, chemical and biological fields during two contrasting upwelling events off the NW Iberian Peninsula. *Continental Shelf Research*, V20, pp.189-210, [doi.org/10.1016/S0278-4343\(99\)00071-0](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(99)00071-0).
17. Castro C. G., T. R. Baumgartner, J. Steven, R. Castro, P. C. Francisco, C. A. Collins, 2002: Introduction to 'The 1997–8 El Niño Atlas of oceanographic conditions along the west coast of North America (23°N–50°N)'. V54, pp.503-511, doi:0.1016/S0079-6611(02)00066-6.
18. Chapman P., L.V. Shannon, 1987: Seasonality in the oxygen minimum layers at the extremities of the Benguela system in the Benguela and comparable ecosystems. *S. South African Journal of Marine Science*, V5, pp.85-94, [doi.org/10.2989/025776187784522162](https://doi.org/10.2989/025776187784522162).
19. Chapman D., & S. J. Lentz, 1997: Adjustment of Stratified Flow over a Sloping Bottom. *Journal of Physical Oceanography*, V27, pp.340-356, [doi.org/10.1175/1520-0485\(1997\)027<3C0340:AOSFOA>3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1997)027<3C0340:AOSFOA>3E2.0.CO;2).
20. Coynel A., P. Seyler, H. Etcheber, M. Meybeck, D. Orange, 2005: Spatial and sazonal dynamics of total suspended sediment and organic carbon species in the Congo River. *Global Biogeochem. Cycles*, V19, GB4019, doi:10.1029/2004GB002335.
21. Colberg F. & C. J. C. Reason, 2006: A model study of the Angola Benguela Frontal Zone: Sensitivity to atmospheric forcing. *Geophysical Research Letters*, V33, doi:10.1029/2006GL027463.
22. Cravo A, P. Relvas, S. Cardeira, F. Rita, M. Madureira, R. Sanchez, 2010: An upwelling filament off south west Iberia: Effect on the chlorophyll *a* and nutrients export. *Continental Shelf Research*, V30, pp.1601-1613.



23. Cruise Report Dr. Fridtjof Nansen No 2/2014. Survey of the demersal resources of Angola, 7 March – 6 April 2014. Institute of Marine Research IMR, Bergen, Norway and Instituto Nacional de Investigação Pesqueira INIP, Luanda.
24. Cuchlaine, A. M., King, M. A., London, 1962: *Oceanography for Geographers*.
25. Da Silva A. J., 2004: Verteilung des Zooplanktons im Bereich der Angola – Benguela – Frontal – Zone und seine Bedeutung für die kommerziell wichtige Schildmakrele (*Trachurus spp*) im august/september 2000 zur Erlangung des akademischen Grades Dipl. Pariser, Str. Der.
26. Denamiel C., W. P. Budgell & R. Toumi, 2013: The Congo River plume: Impact of the forcing on the far-field and near-field dynamics, *J. Geophys. Res. Oceans*, V118, pp.964–989, doi:10.1002/jgrc.20062.
27. Dewar W. K & R. X. Huang, 1995: Fluid flow in loops driven by freshwater and heat fluxes. *Journal of Fluid Mechanics*, V297, pp.153-191, doi.org/10.1017/S0022112095003041.
28. Dias C.A., 1983a: Note on the evidence of a permanent southward flow of the upper oceanic tropospheric waters off Angola at 12°S. *Collection of Scientific Papers International Commission for the Southeast Atlantic Fisheries*, V10, pp.99-102.
29. Dias C. A., 1983b: Preliminary report on the physical oceanography off southern Angola, March and July 1971. *Collect. Sci. Pap. Int. Comm. Southeast. Atl. Fish*, V10, pp.103-116.
30. Ekau W., H. M. Verheye, 2005. Influence of oceanographic fronts and low oxygen on the distribution of ichthyoplankton in the Benguela and Southern Angola currents. *Afr. J. Mar. Sci.*, V27, pp.629 – 639, doi.org/10.2989/18142320509504123.
31. Ekau W., H. H.-O. Auel, D. P. Gilbert, 2010: Impacts of hypoxia on the structure and processes in pelagic communities (zooplankton, macro-invertebrates and fish). *Biogeosciences*, V7, pp.1669-1699, doi:10.5194/bg-7-1669-2010, 17264170.
32. Fischer Jens-Georg, 2008: Circulation in the Gulf of Guinea. Diploma Thesis. Faculty of Mathematics and Natural Sciences at the Christian Albrechts University in Kiel.
33. Florenchie P., J. R. E. Lutjeharms & C. J. C. Reason, 2003: The source of Benguela Niños in the South Atlantic Ocean. *Geophysical Research Letters*, V30, doi:10.1029/2003GL017172.

34. Florenchie P., Reason C. J. C., Lutjeharms J. R. E. & Rouault, M. 2004: Evolution of interannual warm and cold events in the southeast Atlantic Ocean. *Journal of Climate*, V17, pp.2318-2334, doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<3C2318:EOIWAC>3E2.0.CO;2.
35. Gallard F., Reynald T., V.Thierry, Karina Von Schuckmann, Kolodziejczyk N., 2016: In Situ-Based Reanalysis of the Global Ocean Temperature and Salinity with ISAS: Variability of the Heat Content and Steric Height. *Journal of Climate*, V28, pp. 1305-1323, doi:10.1175/JCLI-D-15-0028.1.
36. Gammelsrød T., R.C. Duncombe, V. Filipe, J. Botha, B. Ellertsen, P. Fossum, R. Cooper, H. Plarre, A. Risser, M. de Lourdes Sardhinha, S. Floen, T. Bornman, M. Fernandez-Tejedor, 1997: Survey of the Angola Benguela front and the Angola Dome. *Cruise Report R/V Dr. Fridtjof Nansen*. No 1/97, pp.1-101.
37. Gammelsrød T., C. H. Bartolomae, D. C. Boyer, V.L.L. Filipe, M. J. O'Toole, 1998: Intrusion of warm surface water along the Angolan–Namibian coast in February–March 1995: the 1995 Benguela Niño. *South Afr. J. Mar. Sci.* V19, pp.41-56, doi.org/10.2989/025776198784126719.
38. Garzoli S.L. and A.L. Gordon, 1996: Origins and variability of the Benguela Current. *Journal of Geophysical Research*, V101, pp. 897-906, doi.org/10.1029/95JC03221.
39. Gilbert D., Sundby B., Gobeil C., Mucci A., Tremblay G.-H., 2005 (9): A seventy two year record of diminishing deep-water oxygen in the St. Lawrence estuary: the north-west Atlantic connection. *Limnology and Oceanography*, V50, pp. 1654–1666.
40. Gooday A. J., J F. orissen, L. A. Levin, J. J. Middelburg, S. W.A. Naqvi, N. N. Rabalais, M. Scranton, J. Zhang, 2009: Historical records of coastal eutrophication-induced hypoxia. *Progress in Oceanography*, V6, pp.1707-1745, doi:10.5194/bg-6-1707-2009.
41. Gordon A. L. & K. Bosley, 1990: Cyclonic gyre in the Tropical South - Atlantic. *Deep-Sea Research Part a-Oceanographic Research Papers*, V38 pp.323-343.
42. Gordon A. M., J. R. King, R. J. Beamish, 2000: Have there been recent changes in climate? Ask the fish. *Progress in Oceanography*, V47, pp. 147-169, doi:10.1016/S0079-6611(00)00034-3.
43. Grasshoff K., M. Ehrhardt, K. Kremling, 1983: Methods of seawater analysis. *Determination of Oxygen*. Verlag Chemie, Chapter 4: Weinheim.

44. Hagen E. & R. Schemaida, 1987: On the zonal distribution of South Atlantic Central Water (SACW) along a section off Cape Blanc, Northwest Africa. *Oceanologica Acta*, Special issue (0399-1784) (Gauthier-Villars).
45. Hagen E., R. Feistel, J.J. Agenbag, T. Ohde, 2001: Seasonal and interannual changes in intense Benguela upwelling. *Oceanology Acta*, V24, pp.557–568, doi.org/10.1016/S0399-1784(01)01173-2.
46. Hamukuaya, H., O 'Toole, M.J. & Woodhead, P.M.J. 1998 Observations of severe hypoxia and offshore displacement of Cape hake over the Namibian shelf in 1994. In S.C. Pillar, C.L. Moloney, A.I.L. Payne & F.A. Shillington, eds. Benguela dynamics: impacts of variability on shelf-sea environments and their living resources. *South African Journal of Marine Science*, 19: 57-61.
47. Hardman-Mountford N.J., A.J. Richardson, J.J. Agenbag, E. Hagen, L. Nykjaer, F.A. Shillington, C. Villacastin, 2003: Ocean climate of the South East Atlantic observed from satellite data and wind models. *Progress in Oceanography*, V59, pp.181-221, doi.org/10.1016/j. pocean.2003.10.001.
48. Heymans J.J., D. Baird, 2000: A carbon flow model and network analysis of the norther Benguela upwelling system, Namibia. *Ecology Modelling*, V126, pp.9-32, doi:10.1016/S0304-3800(99)00192-1.
49. Hopkins Jo, M. Lucas, C. Dufau, M. Sutton, J. Stum, O. Lauret, C. Channelliere, 2013: Detection and variability of the Congo River plume from satellite derived sea surface temperature, salinity, ocean colour and sea level. *Remote Sensing of Environment*, V139, pp.365-385, doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.015.
50. Huthcings L., C.D. van der Lingen, L.J. Shannon, R.J.M. Crawford, H.M.S. Verheye, C.H. Bartholomae, A.K. van der Plas, D. Louw, A. Kreiner, M. Ostrowski, Q. Fidel, R.G. Barlow, T. Lamont, J. Coetzee, F. Shillington, J. Veitch, J.C. Currie, P.M.S. Monteiro, 2009: The Benguela Current: An ecosystem of four components. *Progress in Oceanography*, V83, pp.15-32, doi:10.1016/j. pocean.2009.07.046.
51. Illig S., M. L. Bachelery, E. Cadier, 2018: Subseasonal Coastal-Trapped Wave Propagations in the Southeastern Pacific and Atlantic Oceans: 2. Wave Characteristics and Connection with the Equatorial Variability. *Journal Geophysical Oceans Research Oceans*, V123, pp.3942-3961, doi.org/10.1029/2017JC013540.

52. Illig S., M. L. Bachèlery, 2019: Propagation of Subseasonal Equatorially-Forced Coastal Trapped Waves down to the Benguela Upwelling System. *Sci Rep* 9, 5306. doi.org/10.1038/s41598-019-41847-1.
53. Instituto Nacional de Investigação Pesqueira (INIP). Relatórios de actividades.
54. Instituto Nacional de Investigação Pesqueira (INIP) 2011. *Relatórios de Avaliação do Estado dos Principais Recursos Pesqueiros de Angola e Recomendações de Medidas de Gestão para 2011*. Luanda. 41 pp.
55. IPIMAR, 2002. Campanha de investigação pesqueira luso-angolana nas águas da costa continental de Angola.
56. Jarre A., Hutchings L., Kirkman S. P., Kreiner A., Tchipalanga P. C.M., Kainge P. Uanivi., U. van der Plas, A. K. Blamey, L.K. Coetzee, J. C. Lamont, T. Samaai, T. Verheye, H. M. Yemane, D. G. Axelsen, B. E., M. Ostrowski, E.K. Stenevik, H. Loeng, 2015a: Synthesis: Climate effects on biodiversity, abundance and distribution of marine organisms in the Benguela. V24, pp.122-149, doi:10.1111/fog.12086.
57. Jarre A., L. Hutchings, M. Crichton, K. Wieland, T. Lamont, L. K. Blamey, C. Illert, E. Hill, M. Van Den Berg, 2015b: Oxygen-depleted bottom waters along the west coast of South Africa, 1950–2011. *Fisher Oceanography*, V24, pp.56-73, doi.org/10.1111/fog.12076.
58. John, H.-Ch. V. Mohrholz, J.R.E. Lutjeharms, 2001: Cross-front hydrography and fish larval distribution at the Angola–Benguela Frontal Zone. *Journal of Marine Systems*, V28, pp.91-111, doi.org/10.1016/S0924-7963(00)00085-3.
59. Kolodziejczyk N., Boutin J., Vergely J. L., Marchand S., Martis N., Reverdin G., 2016: Mitigation of systematic errors in SMOS sea surface salinity. *Journal of Marine Systems*, V180, pp.164-177, doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.061.
60. Kolodziejczyk N., Llovel W., & Portela E. 2019: Interannual variability of upper ocean water masses as inferred from Argo Array. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, V124, pp.6067-6085. https://doi.org/10.1029/2018JC014866.
61. Kopte, R., P. Brandt, M. Dengler, Tchipalanga, P.C.M., M. Macueria, M. Ostrewik, 2017. The Angola Current: flow and hidrographic characteristics as observed at 11° S. *J. Geophy.res.oceans*, V122, pp.1177-1189, doi:101002/2016jc012374.

62. Kopte R., 2017: The Angola Current in a Tropical Seasonal Upwelling System. Seasonal Variability in Response to Remote Equatorial and Local Forcing. PhD Tesis, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Christian Albrechts University, Kiel, German.
63. Kopte R., P. Brandt, M. Claus, M. Schmidt, J. G. Richard, M. Dengler, 2018: Role of equatorial basin-mode resonance for the seasonal variability of the Angola Current at 11°S. *J. Geophys. Res. Oceans*, V48, pp.261-281, doi :10.1175/JPO-D-17-0111.1.
64. Kostianoy A.G., J.R.E. Lutjehans, 1999: Atmospheric effects in the Angola- Benguela front zone. *Journal of Geophysical Research*, V104, pp.20,963-20,970.
65. Koungue Imbol R. A., S. Illig, M. Rouault, 2017: Role of interannual Kelvin wave propagations in the equatorial Atlantic on the Angola Benguela Current. *Journal of Geophysical Research*, V122, pp.4685-4703, doi:org/10.1002/2016JC012463.
66. Kuypers M M. M., G. Lavik, D. Woebken, M. Schmid, B. M. Fuchs, R. Amann, B. B. Jørgensen, S. M. J. Mike, 2005: Massive nitrogen loss from the Benguela upwelling system through anaerobic ammonium oxidation. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 3;102(18):6478-83, doi.org/10.1073/pnas.0502088102.
67. Lass H. U., M. Schmidt, V. Mohrholz, G. Nausch, 2000: Hydrographic and current measurements in the area of the Angola-Benguela Front. *Journal of Physical Oceanography*, V30, pp.2589-2609, doi:10.1175/1520-0485(2000)030<2589:HACMIT>2.0.CO;2.
68. Lass H. U., V. Mohrholz, 2007: On the interaction between the subtropical gyre and the subtropical cell on the shelf of the se Atlantic. *Journal of Physical Oceanography*, V74, pp.1-43, doi:10.1175/jrmarsys.2007.09.008.
69. Lass H. U., M. Schmidt, V. Mohrholz, G. Nausch, W. Fennel, T. Junker, V. Mohrholz, 2012: Response of the Benguela upwelling systems to spatial variations in the wind stress. *Journal of Physical Oceanography*, V45, pp.65-77, doi:10.1175/jcp.2012.06.004.
70. Lübbecke J. F. C. Boning, N. Keenlyside, S. Ping Xie, 2010: On the connection between Benguela and equatorial Atlantic Niños and the role of the south Atlantic anticyclone. *Journal of Geophysical Research*, V115, doi:10.1029/2009JC005964.
71. Lübbecke J. F., Brandt P., Dengler M., Kopte R., Lüdke J., Richter I., Martins M. S., Tchikalanga P. C. M., 2018. Causes and evolution of the southeastern tropical Atlantic

- warm event in early 2016. *Clim Dyn*, V53, pp.261-274, doi.org/10.1007/s00382-018-4582-8.
72. Lübbecke J. F., Rudloff, D., & Stramma L. 2019: Stand alone eastern Pacific Coastal Warming events. *Geophysical Research Letters*, V46, 12,360–12,367, doi.org/10.1029/2019GL084479.
  73. Mazeika P.A., 1967: Thermal domes in the eastern Atlantic Ocean. *Limnology and Oceanography*, V12, pp.537-539, doi.org/10.4319/lo.1967.12.3.0537.
  74. MEBPA, 1970-1974: Relatórios de atividades e trabalhos realizados.
  75. Meeuwis J. M., J. R. E. Lutjeharms, 1990: Surface thermal characteristics of the Angola-Benguela front, *South African Journal of Marine Science*, V9, pp.261-279, doi: 10.2989/025776190784378772.
  76. Mohrholz, V., M. Schmidt, J.R.E. Lutjeharms, 2001: The hydrography and dynamics of the Angola–Benguela frontal zone and environment in April 1999. *South African Journal of Science*, V97, pp.199-208.
  77. Mohrholz V, M. Schmidt, J.R. Lutjeharms, E. Johon, 2004: Space–time behaviour of the Angola–Benguela Frontal Zone during the Benguela Niño of April 1999. *International Journal of Remote Sensing*, V25, pp.1337-1340, doi:10.1080/01431160310001592265.
  78. Mohrholz V., C.H. Bartholomae, A.K. van der Plas, H.U. Lasse, 2008: The seasonal variability of the northern Benguela undercurrent and its relation to the oxygen budget on the shelf. V28, pp.424-441, doi:10.1016/j.csr.2007.10.001.
  79. Mohrholz V., A. Eggert, T. Junker, G. Nausch, Thomas Ohde, M. Schmidt, 2014: Cross shelf hydrographic and hydrochemical conditions and their short-term variability at the northern Benguela during a normal upwelling season. *Journal of Marine Systems*, V140, pp.92-110, doi.org/10.1016/j.jmarsys.2014.04.019.
  80. Moloney C. L., A. Jarre, H. Arancibia, Y-M. Bozec, S. Neira, J-P. Roux, L. J. Shannon, 2005: Comparing the Benguela and Humboldt marine upwelling ecosystems with indicators derived from inter-calibrated models. *ICES Journal of Marine Science*, V62, pp.493-502, doi.org/10.1016/j.icesjms.2004.11.009.
  81. Monteiro P.M.S., A.K. van der Plas, G.W. Bailey, Q. Fidel, 2002: Low oxygen variability in the Benguela ecosystem: a review and new understanding. *BCLME Research Report (EV/LOW/02/01) /www.bclme.orgS*, V14.

82. Monteiro P.M.S., G. Nelson, A. van der Plas, E. Mabilille, G.W. Bailey, E. Klingelhoeffer, 2005: Internal tide-shelf topography interactions as a potential forcing factor governing the large-scale sedimentation and burial fluxes of particulate organic matter (POM) in the Benguela upwelling system. *Continental Shelf Research*, V25, pp.1864-1876, doi:10.1016/j.csr.2005.06.012.
83. Monteiro P.M.S., Van der Plas, A.K., 2006. Low oxygen water variability in the Benguela system. In: Shannon, V., Hempel, G., Malanotte-Rizzoli, P., Moloney, C., Woods, J. (Eds.), *The Benguela: Predicting A Large Marine Ecosystem*, vol. 14. Elsevier, New York.
84. Monteiro P.M.S., A.K. Van der Plas, V. Mohrholz, E. Mabilille, A. Pascall, W. Joubert, 2006: Variability of natural hypoxia and methane in a coastal upwelling system: oceanic physics or shelf biology? *Geophysical Research Letters*, V33, L16614, doi.org/10.1029/2006GL026234.
85. Monteiro P. M. S., A. K. van der Plas, J. L. Mélice, P. Florenchie, 2008: Interannual hypoxia variability in a coastal upwelling system: Ocean-shelf exchange, climate and ecosystem-state implications. *Deep Sea Research, Oceanography Research Papers*, V55, pp.435-450, doi:10.1016/j.dsr.2007.12.010.
86. Moroshkin K.V., V.A. Bubnov, R.P. Bulatov, 1970: Water circulation in the eastern South Atlantic. *Oceanology*, V10, pp.27–34.
87. NANSEN PROGRAMME, 2007. Survey of the pelagic resources, R/V Dr Fridjof Nansen, 7 July – 16 August 2007, Angola.
88. NANSEN PROGRAMME, 1995: Nansen Courses in Environmental Physics.
89. Nelson G., Hutchings L., 1983: The Benguela upwelling area. *Progress in Oceanography*, V12, pp.333-356, doi.org/10.1016/0079-6611(83)90013-7.
90. Oliveira, P: B., R. Nolasco, J. Dubert, T. Moita, & Á. Peliz, 2009: Surface temperature, chlorophyll and advection patterns during a summer event off central Portugal. *Continental Shelf Research*, V29, pp.759-774, doi.org/10.1016/j.csr.2008.08.004.
91. O'Neill L.W., D.B. Chelton, S.K. Esbensen, 2003: Observations of SST-induced perturbations of the wind stress field over the Southern Ocean on seasonal timescales. *J. Climate*, V16, pp.2340–2354, doi:10.1175/2780.1.
92. Ostrowski M. 2007: Impact of equatorial Kelvin waves on aggregation of sardinellas (*Sardinella* spp.) in Angolan waters. ICES Document CM 2007/G: 08.

93. Ostrowski M., da Silva J. C. B., Sangolay Bazik B. 2009: The response of sound scatterers to El Niño and La Niña-like oceanographic regimes in the southeastern Atlantic. *ICES Journal of Marine Science*, V66, pp.1063-1072, doi.org/10.1093/icesjms/fsp102.
94. O'Toole M.J., 1980: Seasonal distribution of temperature and salinity in the surface waters off south west Africa, 1972-1974. *Rep. Sea Fisheries Institute of South Africa, Cape Town*.
95. Pardo P. C., F. F. Pérez, A. Velo, M. Gilcoto, 1999: Optimum Multiparameter analysis of the water mass structure in the Atlantic Ocean thermocline. Deep Sea Research Part I Oceanographic Research Papers 46(11):1895-1921. DOI:10.1016/S0967-0637(99)00025-4.
96. Peterson G.G & W.B. White, 1998: Slow oceanic teleconnections linking the Antarctic Circumpolar Wave with the tropical El Niño-Southern Oscillation. *Journal of Geophysical Research*, V103, pp.24,573-24,584, doi.org/10.1029/98JC01947.
97. Peterson R. G., L. Stramma, 1991: Uppr-level circulation in the South Atlantic Ocean. *Progress in Oceanog.* V26, pp.1-73, doi.org/10.1016/0079-6611(91)90006-8.
98. Philander S.G.H., 1990: El Niño, La Nina and the Southern Oscillation. *Academic Press*, International Geophysics Series, V248, pp.904-905, doi: 10.1126/science.248.4957.904.
99. Picaut J. 1982: Propagation of the seasonal upwelling in the eastern equatorial Atlantic. *Journal of Physical Oceanography*, V13, pp.18-37, doi.org/10.1175/1520-0485(1983)013<3C0018: POTSUI>3E2.0.CO;2.
100. Postel L., da Silva A. J., Mohrholz V., Lass Hans-Ulrich, 2007: Zooplankton biomass variability off Angola and Namibia investigated by a lowered ADCP and net sampling. *Journal of Marine Systems*, V68, pp.143-166, doi:10.1016/j.jmarsys.2006.11.005.
101. Reid J.L. (2006): Some Advances and Retreats in the Study of Ocean Circulation since 1935. In: Jochum M., Murtugudde R. (eds) *Physical Oceanography*. Springer, New York, NY . [https://doi.org/10.1007/0-387-33152-2\\_11](https://doi.org/10.1007/0-387-33152-2_11).
102. Richardson P.L., & S.L. Garzoli. 2002: Characteristics of intermediate water flow in the Benguela current as measured with RAFOS floats. *Deep-Sea Research II*, V50 pp.87-118, doi.org/10.1016/S0967-0645(02)00380-6.



103. Ritcher, I., S. K. Behera, Y. Masumoto, B. M. Taguchi, N. Komari, T. Yamagata, 2010: On the triggering of Benguela Niños: Remote equatorial versus local influences. *Geophysical Research Letters*, V37, doi.org/10.1029/2010GL044461.
104. Ritcher, I., S. K. Behera, Y. Masumoto, B. M. Taguchi, H. Sasaki, T. Yamagata, 2012: Multiple causes of interannual sea surface temperature variability in the equatorial Atlantic Ocean. *Nature Geoscience*, V 6, pp.43-47, doi:10.1038/NGEO1660.
105. Rouault M., S. Illig, C. Bartholomae, C.J.C. Reason & A. Bentamy, 2007: Propagation and origin of warm anomalies in the Angola Benguela upwelling system in 2001. *Journal of Marine Systems*, V68, pp.473-488, doi.org/10.1016/j.jmarsys.2006.11.010.
106. Rouault M., 2012: Bi-annual intrusion of tropical water in the northern Benguela upwelling. *Geophysical Research Letters*, V39, doi:10.1029/2012GL052099.
107. Sætelsdal G., Bianchi G. & Strømme, T. 1999: The Dr Fridtjof Nansen Programme 1975-1993. FAO Fisheries Technical Papers 391.
108. Shannon L. V., R. J. M. Crawford, D. E. Pollock, L. Hutchings, A. J. Boyd, J. Taunton-Clark, A. Badenhorst, R. Melville-Smith, C. J. Augustyn, K. L. Cochrane, I. Hampton, G. Nelson, D. W. Japp & R. J. Q. Tarr, 1992: The 1980s – a decade of change in the Benguela ecosystem, *South African Journal of Marine Science*, V12, pp.271-296, doi: 10.2989/02577619209504707.
109. Shannon L. V. & G. Nelson, 1986: The Benguela: Large Scale Features and Processes and System Variability. *The South Atlantic*, pp.163-210.
110. Shannon, L. V., A. J. Boyd, G. B. Brundrie, J. Taunton-Clark, 1986: On the existence of an El Niño-type phenomenon in the Benguela System. *Journal of Marine research*, V44, pp.495-520, doi:10.1357/002224086788403105.
111. Shannon, L. V., J. J. Agenbag, M. E. L. Buys, 1987: Large- and mesoscale features of the Angola-Benguela front, *South African Journal of Marine Science*, V5, pp.11-34, doi: 10.2989/025776187784522261.
112. Shannon L. V., J. J. Agenbag, 1990: A large-scale perspective on interannual variability in the environment in the South-East Atlantic, *South African Journal of Marine Science*, V9, pp.161-168, doi:10.2989/025776190784378727.
113. Shannon L. V. & M. J. O'Toole, 1999: Sustainability of the Benguela: ex Africa semper aliquid novi. *Ocean Docs*, 10.

114. Shannon L. J., C. L. Moloney, A. Jarre, J. G. Field, 2003: Trophic flows in the southern Benguela during the 1980s and 1990s. *Journal of Marine Systems*, V49, pp.83-116, doi:10.1016/S0924-7963(02)00250-6.
115. Signorini S.R., R.G. Murtugudde, C. R. McClain, J.R. Christian, J. Picaut, A.J. Busalacchi, 1999: Biological and physical signatures in the tropical and subtropical Atlantic. *Journal of Geophysical Research*, V104, pp.18367-18382, doi.org/10.1029/1999JC900134.
116. Steinberg P. E, 2001: The social construction. ISBN 0 521 804434 hardback.
117. Stramma L. & R.G. Peterson, 1989: Geostrophic transport in the Benguela Current region. *Journal of Physical Oceanography*, V19, pp.1440-1448, doi.org/10.1175/1520-0485(1989)019<3C1440:GTITBC>3E2.0.CO;2.
118. Stramma L. & F. Schott, 1999a: The mean flow field of the tropical Atlantic Ocean. *Deep-Sea Research II*, V46, 11-2, pp.279-303, doi:10.1016/S0967-0645(98)00109-X.
119. Stramma L. & England, 1999b: Upper-layer currents system for the southern Atlantic Ocean, from. *Journal of Geophysical Researchs Oceans*, V104, pp.20863-20883, doi.org/10.1029/1999JC900139.
120. Stramma L., G.C. Johnson, J. Sprintall, V. Mohrholz, 2008: Expanding Oxygen-Minimum Zones in the Tropical Oceans. *Deep-Sea Research*, V320, pp.655-658, doi 10.1126/science.1153847.
121. Sverdrup H.U., M.W. Johnson, R.H. Fleming, 1942: The Oceans. their physics, chemistry, and general biology. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, V70, pp.159-160, doi.org/10.1002/qj.49707030418.
122. Tait R.V., 1971: Elementos de ecologia marinha. ISBN 9781461382997.
123. Taunton-Clark, L. V. Shannon, 1988: Annual and interannual variability in the South-East Atlantic during the 20th century, *South African Journal of Marine Science*, V6:1, pp.97-106, doi:10.2989/025776188784480654.
124. Tchupalanga P., M. Dengler, P. Brandt, R. Kopte, M. Macuéria, P. Coelho, M. Ostrowski, N. Keenlyside, 2018: Eastern boundary circulation and hydrography off Angola – building Angolan oceanographic capacities. *Bull. Amer.Meteor. Soc.*, V 99, 8, pp.1589-1605, doi:10.1175/BAMS-D-17-0197.1.

125. Valderrama J.C., 1986: Manual de Métodos de Análisis de águas Marinas. Lab. Hidrografia, Dirección Nacional de Pesca, Gotemburgo, Suécia. *Inst. Esp. Ocean.*, Tomo 6, 329, pp.209-220.
126. Vaquer-Sunyer R., & C. M. Duarte, 2008: Thresholds of hypoxia for marine biodiversity. Department of Global Change Research, Instituto Mediterraneo de Estudios Avanzados (Consejo Superior de Investigaciones Científicas-Universidad de las Islas Baleares), Esporles (Mallorca) 07190, Spain, doi.org/10.1073/pnas.0803833105.
127. Vasco E. 2010: Caracterização Hidrográfica e Química de longo termo na região costeira de Benguela. McS Thesis, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade do Algarve, Portugal.
128. Vic Clément, H. Berguer, A. M. Terguier, X. Clouvelard, 2014: Dynamics of an Equatorial River Plume: Theory and Numerical Experiments Applied to the Congo Plume Case. *Journal of Physical Oceanography*, V44, pp.980-994, doi:10.1175/JPO-D-13-0132.1.
129. Wasmund N., H.U. Lass & G Nausch, 2005: Distribution of nutrients, chlorophyll and phytoplankton primary production in relation to hydrographic structures bordering the Benguela-Angolan frontal region, *African Journal of Marine Science*, V27:1, pp.177-190, doi:10.2989/18142320509504077.
130. Wauthy B., 1977: Revision de la classifcassión de surface du Golfe de Guinée Cahiers ORSTOM, *Séries Oceanographie*, v15, pp.279-295.
131. Woodhead, P.M., Hamukuaya, H., O'Toole, M.J. & McEnroe, M. 1998: Effects of oxygen depletion in shelf waters on hake populations off central and northern Namibia. In V. Shannon & M.J. O 'Toole, eds. *International Symposium, Environmental Variability in the South East Atlantic*. Namibia, National Marine Information and Research Centre.
132. Wedepohl P. M, J. R. E. Lutjeharms , M. Meewis, 2010: Surface drift in the South-East Atlantic Ocean. *South African Journal of Marine Science*, V22:1, pp.71-79, doi: 10.2989/025776100784125672.
133. Yankowsky A. E., D. C. Chapman, 1997a: A Simple Theory for the Fate of Buoyant Coastal Discharges. *Journal of Physical Oceanography*, V27, pp.1386-1400, doi.org/2F10.1175/2F1520-0485.

134. Yankowsky A. E., D. C. Chapman, 1997*b*: Anticyclonic eddies trapped on the continental shelf by topographic irregularities. *Journal of Geophysical Research*, V102, pp.5625-5639 doi.org/10.1029/96JC03452.
135. Yankovsky A. E., B. M. Hickey, A. K. Munchow, 1997*c*: Impact of variable inflow on the dynamics of a coastal buoyant plume. *Journal of Geophysical Research*, V106, pp.19,809-19,824, doi:10.1029/2001JC000792.
136. Zhang J., Gilbert D., Gooday A. J., Levin L., Naqvi S. W. A., Middelburg J. J., Scranton M., Ekau W., Peña A., Dewitte B., Oguz T., Monteiro P. M. S., Urban E., Rabalais N. N., Ittekkot V., Kemp W. M., Ulloa O., Elmgren R., Escobar-Brion, 2010: Natural and human-induced hypoxia and consequences for coastal areas: Synthesis and future development. *Biogeosciences*, V7 (5), pp.1443-1467, doi:10.5194/bg-7-1443-2010.