

RESPONDENDO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS EM MOÇAMBIQUE



REPÚBLICA DE MOÇAMBIQUE
MINISTÉRIO DA ADMINISTRAÇÃO ESTATAL
INSTITUTO NACIONAL DE GESTÃO DE CALAMIDADES



Instituto Nacional de
Gestão de Calamidades



Instituto Nacional de Gestão de Calamidades (INGC)
FASE II

TEMA 8

Mudanças Climáticas Oceânicas

Outubro 2012

Alan Aldrin Meyer

TEMA 8

Detalhe de contactos para correspondência:

Alan Aldrin Meyer

ameyer@csir.co.za

Tel: +27 21 888 2400

Fax: +27 21 888 2693

PO Box 320

7599 Stellenbosch

South Africa



our future through science

Director do Projecto: Joao Tiago MM Ribeiro
Coordenadora do Projecto: Barbara van Logchem
Coordenador Científico: Antonio J Queface
Tradução: Alberto Mavume
Tradução: Carlos Vaz

Relatório a ser referenciado como:

Meyer, A.A.M. (ed.). 2012. *Respondendo as mudanças climáticas em Moçambique: Tema 8: Mudanças climáticas oceânicas.* Stellenbosch: CSIR.

Report layout:



Contact details: magdelvdm@gmail.com

SUMÁRIO EXECUTIVO

No relatório aqui apresentado, são investigados os possíveis impactos do aquecimento global no clima médio da Zona Económica Exclusiva (ZEE) de Moçambique. O aquecimento global é um processo pelo qual a temperatura da atmosfera da Terra está a aumentar rapidamente devido aos aumentos sistemáticos dos gases poluentes, de origem humana, com efeito de estufa. Os gases com efeito de estufa, tais como o dióxido de carbono e vapor de água, absorvem a radiação solar que se afasta da Terra, antes que esta possa escapar para o espaço. Desde os anos de 1960 a quantidade de gases com efeito de estufa na atmosfera do planeta escalou para os níveis mais altos dos últimos quatrocentos mil anos, levando a um aquecimento global acelerado. O rápido aquecimento da atmosfera da Terra está, por seu turno, a fazer com que outros sistemas terrestres, como as massas de terra e oceanos, mudem sistematicamente o seu clima médio, um processo que se projecta que continue ao longo do presente século e, possivelmente, dos próximos séculos. Os objectivos do estudo foram:

- 1) Em primeiro lugar, apresentar o estado actual do conhecimento científico sobre a climatologia oceanográfica do Canal de Moçambique,
- 2) Em segundo lugar, apresentar as tendências do clima para a atmosfera e oceanos do Hemisfério Sul, que influenciam a variabilidade do clima no Canal de Moçambique.
- 3) Em terceiro lugar, construir cenários de mudanças climáticas oceânicas, para a ZEE de Moçambique, baseados em tendências

oceânicas globais e regionais simuladas em modelos e já disponíveis, e

- 4) Por último, debater os possíveis impactos de mudanças climáticas oceânicas de grande escala na climatologia oceanográfica actual do Canal de Moçambique.

São apresentadas as climatologias (a média de longo prazo) da circulação geral, da temperatura, da salinidade, do nível do mar e da concentração de clorofila para o Sudoeste do Oceano Índico, no qual está localizada a ZEE de Moçambique. Esta climatologia foi então utilizada como referência para comparação com os cenários das mudanças climáticas oceânicas.

Para calcular a forma como a climatologia do Sudoeste do Oceano Índico se pode alterar com o aumento do aquecimento global, foram analisadas as tendências do clima para a circulação atmosférica e oceânica do Hemisfério Sul. A informação científica publicada sobre este tópico evidencia um aumento da deslocação para Sul dos ventos de alta altitude que sopram de oeste e uma intensificação simultânea da Corrente Circumpolar Antártica derivada do aquecimento global induzido antropogénicamente. Tem vindo a mostrar-se que o impacto das mudanças climáticas no Oceano do Sul tem sido canalizado em direcção ao Norte dos Oceanos Índico-Sul, Atlântico e Pacífico. Tendo por base o conjunto de informações combinadas sobre a climatologia média do Oceano Índico e sobre tendências climáticas do Hemisfério Sul, foi possível construir dois cenários de mudanças climáticas oceânicas para a região do Canal de Moçambique.

Os cenários de mudanças climáticas oceânicas apresentados neste relatório são os de “água mais quente” e de “água mais fria” para a ZEE de Moçambique.

O cenário de mudanças climáticas oceânicas de “água mais quente” é baseado no pressuposto de que a) a Corrente Equatorial Sul (CES), a principal fonte de fornecimento da camada superior da água oceânica para o Canal de Moçambique, não vai mudar da sua posição média actual e que, b) a CES está a aquecer em correlação com as tendências de aquecimento global. Assumindo tais pressupostos pode ser mostrado que a camada superior da água mais quente, será cada vez mais fornecida para o Canal de Moçambique através do ramo norte da Corrente Leste de Madagáscar levando a um clima oceânico de “água mais quente” comparado com a actual climatologia. Este cenário de mudanças climáticas oceânicas de “água mais quente” irá induzir maiores temperaturas e menores salinidades, subida do nível do mar e diminuição nas densidades da clorofila para o grande Canal de Moçambique, incluindo a ZEE.. Assume-se que no cenário de mudanças climáticas oceânicas de “água mais quente” o padrão médio de circulação irá manter-se igual ao actual, sendo o ramo Norte da Corrente Leste de Madagáscar, a principal fonte das massas de águas oceânicas quentes da camada superior para o canal.

O cenário de mudanças climáticas oceânicas de “água mais fria” é baseado nos pressupostos de que a) a Corrente Equatorial Sul vai migrar em direcção ao Sul da sua posição média actual e que, b) as águas quentes equatoriais da Corrente Equatorial Sul serão desviadas para longe da entrada do Canal de Moçambique, fornecendo por seu turno toda a água, via Sul

de Madagáscar, à Corrente das Agulhas. Perante tal pressuposto pode ser mostrado que, enquanto as águas quentes equatoriais são desviadas para longe do Canal de Moçambique, a Água Central por baixo das massas de água tropicais superiores, pode ressurgir à superfície do oceano, formando uma extensão do Giro Tropical do Índico Sul para o Norte. O Giro Tropical do Índico Sul, caracterizado por águas oceânicas “mais frias” e produção primária mais elevada, pode então fornecer águas “mais frias” para o Canal de Moçambique, devido à advecção em direcção ao Sul das suas águas, através da entrada à Norte. Na sua essência este processo pode induzir um cenário de mudança climática oceânica de “água mais fria”, comparado com o cenário de clima oceânico de “água mais quente” para a região. O cenário de mudança climática oceânica de “água mais fria”, implicará uma mudança na circulação média, águas oceânicas mais frias, descida do nível do mar e aumento nas densidades de clorofila, quando comparado com o cenário de “água mais quente”.

Actualmente, a falta de modelos climáticos regionais da interacção atmosfera-oceano para o Canal de Moçambique é um impedimento para a projecção de tendências climáticas futuras com elevada precisão. Desta forma, está para além do âmbito deste relatório fornecer informações específicas sobre em que medida a taxa de mudança actual, disponível a partir de fontes de informação publicadas, pode alterar-se no futuro. A Ciência das Mudanças Climáticas é ainda uma ciência em desenvolvimento, no entanto, as alterações climáticas planetárias projectadas por esta ciência são actualmente as melhores estimativas sobre as quais são tomadas decisões hoje para um amanhã melhor, com a contínua ameaça do aquecimento global.

CONTEÚDOS

<u>CAPÍTULO 1: ESTUDO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS OCEÂNICAS PARA A ZONA ECONÓMICA EXCLUSIVA DE MOÇAMBIQUE: FUNDAMENTAÇÃO E METODOLOGIA.</u>	9
1.1 INTRODUÇÃO	9
1.2 OBJECTIVO E QUESTÕES-CHAVE	10
1.3 ÁREA DE ESTUDO	11
1.4 METODOLOGIA	12
1.5 FORMATO DO RELATÓRIO	12
<u>CAPÍTULO 2: A CLIMATOLOGIA OCEANOGRÁFICA DO CANAL DE MOÇAMBIQUE</u>	14
2.1 INTRODUÇÃO	14
2.2 CLIMATOLOGIA GERAL	14
2.2.1 Circulação geral	14
2.2.1.1 <i>O Canal de Moçambique e a ZEE de Moçambique</i>	14
2.2.1.2 <i>O Banco de Sofala e Delagoa Bight</i>	17
2.2.2 Climatologia da temperatura e salinidade	18
2.2.2.1 <i>O Canal de Moçambique e a ZEE de Moçambique</i>	18
2.2.2.2 <i>O Banco de Sofala e Delagoa Bight</i>	19
2.2.3 Tendências na climatologia da elevação da superfície do mar	21
2.2.4 Climatologia da clorofila	23
2.2.4.1 <i>O Canal de Moçambique e a ZEE de Moçambique</i>	23
2.2.4.2 <i>O Banco de Sofala e Delagoa Bight</i>	24
<u>CAPÍTULO 3: TENDÊNCIAS FUTURAS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS OCEÂNICAS PARA O HEMISFÉRIO SUL</u>	27
3.1 INTRODUÇÃO	27
3.2 MUDANÇAS PROJECTADAS PARA A CLIMATOLOGIA DOS OCEANOS DO HEMISFÉRIO SUL DEVIDO AO AQUECIMENTO GLOBAL INDUZIDO PELA ACÇÃO ANTROPOGÉNICA.	27

- 3.3 MODOS OCEANICOS DE GRANDE ESCALA IMPORTANTES PARA O CLIMA OCEANICO NO CANAL DE MOÇAMBIQUE 30
- 3.4 PROJEÇÕES NUMERICAS DE MODELOS DE TENDENCIAS DAS MUDANÇAS CLIMATICAS OCEANICAS 33

CAPÍTULO 4: O CENÁRIO “ÁGUA MAIS QUENTE” NAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS OCEÂNICAS DO CANAL DE MOÇAMBIQUE 42

- 4.1 INTRODUÇÃO 42
- 4.2 RELACIONANDO O NÍVEL DO MAR COM A EXPANSÃO TÉRMICA/CONTRACÇÃO DA CAMADA SUPERIOR DAS MASSAS DE ÁGUA 42
- 4.3 O AQUECIMENTO DA SEC 43
- 4.4 TENDÊNCIA DE AQUECIMENTO NA REGIÃO DE ÁGUA QUENTE DENOMINADA INDO-PACÍFICO WARM POOL . 43
- 4.5 O CENARIO “AGUA MAIS QUENTE” NAS MUDANÇAS CLIMATICAS OCEANICAS DO CANAL DE MOÇAMBIQUE 44

CAPÍTULO 5: O CENÁRIO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS OCEÂNICAS DE “ÁGUA MAIS FRIA” PARA O CANAL DE MOÇAMBIQUE 45

- 5.1 INTRODUÇÃO 45
- 5.2 RELACIONANDO O NÍVEL DO MAR COM A EXPANSÃO/CONTRAÇÃO TÉRMICA DA CAMADA SUPERIOR DAS MASSAS DE ÁGUA 45
- 5.3 A MIGRAÇÃO PARA O SUL E A INTENSIFICAÇÃO DA CORRENTE EQUATORIAL SUL 46

CAPÍTULO 6: POSSÍVEIS IMPACTOS DO CENÁRIO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS OCEÂNICAS DE “ÁGUA MAIS QUENTE” PARA A ZEE DE MOÇAMBIQUE 47

- 6.1 INTRODUÇÃO 47
- 6.2 POSSÍVEIS ALTERAÇÕES NA CIRCULAÇÃO GERAL DO CANAL DE MOÇAMBIQUE 47
- 6.3 EVENTUAIS ALTERAÇÕES DA TEMPERATURA E SALINIDADE DO CANAL DE MOÇAMBIQUE 47
- 6.4 POSSÍVEIS ALTERAÇÕES À CLIMATOLOGIA DO NÍVEL DO MAR NO CANAL DE MOÇAMBIQUE 48
- 6.5 POSSIVEIS ALTERAÇÕES DA CLIMATOLOGIA DA CLOROFILA DO CANAL DE MOÇAMBIQUE 48

CAPÍTULO 7: POSSÍVEIS IMPACTOS DO CENÁRIO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS OCEÂNICAS DE “ÁGUA MAIS FRIA” NA ZEE DE MOÇAMBIQUE 50

- 7.1 INTRODUÇÃO 50
- 7.2 POSSÍVEIS ALTERAÇÕES NA CIRCULAÇÃO GERAL DO CANAL DE MOÇAMBIQUE 50
- 7.3 POSSIVEIS ALTERAÇÕES DA TEMPERATURA E SALINIDADE DO CANAL DE MOÇAMBIQUE 51
- 7.4 POSSÍVEIS ALTERAÇÕES DO NÍVEL DO MAR NO CANAL DE MOÇAMBIQUE 52

7.5	POSSÍVEIS ALTERAÇÕES DA CLIMATOLOGIA DA CLOROFILA NO CANAL DE MOÇAMBIQUE	52
------------	---	-----------

CAPÍTULO 8: MONITORIA DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA ZEE DE MOÇAMBIQUE **53**

8.1	INTRODUÇÃO	53
8.2	MONITORIA DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS OCEÂNICAS DE LONGO PRAZO EXISTENTES NA ZEE MOÇAMBICANA	53
8.3	MONITORIA SUGERIDA PARA A ZEE DE MOÇAMBIQUE	55
8.4	REFINAMENTO ESTATÍSTICO DA MODELAGEM CLIMÁTICA ACOPLADA DO SISTEMA OCEANO-ATMOSFERA	56
	<i>Conclusão</i>	57
	<i>Bibliografia:</i>	58

Figuras & Tabelas

- Figura 1.1: Um mapa do Google Earth da área de estudo que abrange o Canal de Moçambique e a região oceânica em torno de Madagáscar. 11
- Figura 2.1: A ilustração das principais características de circulação geral na África Austral (com base Lutjeharms *et al.* 2001). 14
- Figura 2.2: Vectores de velocidade modelados, a uma profundidade da água de 41 m, para o Sudoeste do Oceano Índico (com base em Biastoch e Krauß, 1999). 15
- Figura 2.3: Trajetórias combinadas de giros derivados de dados de teledetecção de satélite sobre a altura da superfície do mar. 16
- Figura 2.4: a) Resultado do modelo numérico (Biastoch, IFM-GEOMAR, University of Kiel, Alemanha) mostrando os GsCM ao longo da costa de Moçambique com correntes periféricas na ordem dos 1.6 m.s^{-1} (3 nós). b) Uma imagem de satélite da concentração (mg.m^{-3}) de clorofila-a (chl-a) na superfície ao longo do Banco de Sofala. A seta branca aponta para um filamento de águas de chl-a, que foi forçado para fora da plataforma continental, pelos giros do Canal de Moçambique, para águas profundas. 17
- Figura 2.5: a) Dados de temperatura colhidos na superfície da Delagoa Bight mostrando a circulação, no sentido dos ponteiros do relógio, quase permanente dentro desta região (Lutjeharms e Jorge da Silva, 1988); b) Imagem oceânica colorida da região de Delagoa Bight, sobreposta com os percursos de uma corrente de superfície, mostrando o movimento das águas ciclónicas na Delagoa Bight (Lamont *et al.*, 2010). 18
- Figura 2.6: As características temperatura-salinidade e temperatura-oxigénio das massas de água no Canal de Moçambique. As massas de água apresentadas no diagrama T/S são Águas do Oceano Índico Equatorial (Eq IOW) (também denominado Águas de Superfície Tropical), Águas do Oceano Índico Sul Subtropical (Subt SIOW), Água Central, Águas Intermédias do Antártico (Antarc IW), Águas Profundas do Índico Norte (NIDW) e Águas Profundas do Atlântico Norte (NADW). (adaptado de Lutjeharms, 2006). 18
- Figura 2.7: A salinidade superficial no Banco de Sofala recolhida num cruzeiro de 1982 (Lutjeharms, 2006). 20
- Figura 2.8: As características temperatura – salinidade das massas de água na Delagoa Bight, colhidas durante um cruzeiro hidrográfica dedicada ao verão austral de 1982 (segundo Lutjeharms e da Silva, 1988). 21
- Figura 2.9: Distribuição geográfica das tendências lineares alongo prazo do nível médio do mar (mm.yr^{-1}), de 1955 a 2003, baseada na reconstrução do nível do mar passado, com medidas de marés e dados altimétricos (actualizado de Church *et al.*, 2004). 22
- Figura 2.10: Pontos espaciais de anomalias anuais do nível médio do mar (cm/século) de seis experiências de modelos oceânicos, para 1961 a 2008, para o Oceano Índico (segundo Han *et al.*, 2010). 23

- Figura 2.11: a) As duas regiões sobre as quais foram calculadas as médias de concentração de clorofila. b) Variabilidade sazonal em termos de concentrações de clorofila em mg.m^{-3} , para as caixas I e II, para o período de 1998 a 2006 (Omta *et al.*, 2009). 25
- Figura 2.12: A imagem mostra a média de concentração de clorofila, baseada nos dados do SeaWIFS, de Setembro de 1997 a Setembro de 2005, com uma resolução de 9 km, para o Canal de Moçambique (Boge, 2006). São indicadas as duas áreas da plataforma continental com elevadas concentrações de clorofila, para o Banco de Sofala e a Delagoa Bight. 26
- Figura 3.1: Séries temporais de composição contínua de dados de 5 anos sobre o conteúdo de calor do oceano desde 1955 até 1998 para os primeiros 3000 m do Oceano Global e do Índico. A tendência linear é representada por uma linha vermelha (Levitus *et al.*, 2005). 28
- Figura 3.2: Tendência linear do conteúdo do calor integrado por zonas do Oceano Índico para camadas com uma espessura de 100 m. Os valores das tendências são representados no ponto médio de cada camada de 100 m. Os intervalos de contorno são $1 \times 10^{18} \text{ J/ano}$ (Levitus *et al.*, 2005). 28
- Figura 3.4: A profundidade média dinâmica da camada de 0 a 400 m (intervalo de contorno de 0,02 m), mostrando as conexões do Super Giro entre os giros sub-tropicais dos oceanos Atlântico, Índico e Pacífico. 29
- Figura. 3.5: Trajectos lagrangianos das parcelas de água numa simulação do modelo global do movimento da água do oceano global (Speich *et al.*, 2007). 31
- Figura. 3.6: Séries temporais normalizadas do índice 3.4 do Niño (linha vermelha) e do índice do IOD (linha azul) (Schott *et al.*, 2009). 33
- Figura 3.7: O gráfico mostra a área geográfica abrangida pela região de água quente denominada Indo-Pacífico Warm Pool (IPWP). A região sombreada representa (1948-2005) a média anual de longo termo da temperatura da superfície do mar para a região. A escala da SST é mostrada abaixo (após Wang and Mehta, 2008). 36
- Figura 3.8: Mapa espacial-temporal das anomalias da altura da superfície do mar modeladas (cm/Século) derivadas do HYCOM (Han *et al.*, 2010). 37
- Figura. 3.9: Mapa espacial-temporal de anomalias modeladas da da altura superfície do mar (cm/Século) derivadas do POP dyn (Han *et al.*, 2010). 37
- Figura. 3.10: Mapa espacial-temporal de anomalias modeladas da altura da superfície do mar (cm/Século) obtidas a partir da Execução Principal do LM (MR) e da Execução Experimental da LM (EXP) (Han *et al.*, 2010). 38
- Figura. 3.11: Mapa espacial-temporal de anomalias modeladas da altura da superfície do mar (cm/Século) derivadas do SODA total e SODA Dyn (Han *et al.*, 2010). 39
- Figura 3.12 Resultados do modelo a partir de um modelo climático acoplado oceano-atmosfera forçado com o aumento dos gases do efeito de estufa antropogénicos mostrando as tendências do conteúdo do calor oceânico acima dos 800 m para o Oceano Índico Sul em termos da temperatura média vertical, sobrepõe-se as correntes oceânicas (vectores). 41
- Figura 7.1: A semelhança da Figura 2.6. a linha oval vermelha indica as águas superficiais quentes Tropicais e Subtropicais que se serão deslocadas pela massa Central de Água subjacente sob o cenário de “água mais fria” do clima oceânico. 51
- Figura. 8.1: Distribuição espacial das bóias da Argo 3214 a partir de diferentes países no oceano global em Fevereiro de 2011. 55

CAPÍTULO 1: Estudo das Mudanças Climáticas Oceânicas para a Zona Económica Exclusiva de Moçambique: Fundamentação e metodologia.

1.1 INTRODUÇÃO

O aquecimento global da atmosfera terrestre e dos oceanos é um fenómeno que foi documentado como sendo real (IPCC, 2007). Projecta-se que os impactos do aquecimento do sistema da Terra irão manifestar-se na biosfera terrestre no século 21, fazendo com que a informação acerca das mudanças projectadas para os ambientes naturais, seja crítica para a definição de políticas no presente momento. No relatório aqui apresentado, são investigados os possíveis impactos do aquecimento global no clima médio do ambiente oceânico da República de Moçambique, de forma a definir como o domínio oceânico se irá manifestar no futuro. Tais visões futuristas são apenas possíveis com tecnologias sofisticadas actualmente disponíveis em investigações científicas, tais como modelos climáticos globais combinados de atmosfera-oceano-gelo, que permitem aos cientistas explorar climas futuros possíveis na Terra.

Projectar os climas futuros da atmosfera terrestre e dos oceanos, num contexto de crescentes emissões de gases de efeito de estufa (e.g., dióxido de carbono, CO₂), a causa do aquecimento global, é uma ciência relativamente nova. Actualmente estão disponíveis projecções de modelos climáticos maioritariamente à escala global, que fornecem indicações sobre a forma como o sistema global da terra irá responder ao rápido aumento das temperaturas atmosféricas e oceânicas. Na maioria dos casos estas projecções de modelos climáticos globais são a única informação disponível para legisladores e tomadores de decisão associados aos governos da comunidade global.

Restrições computacionais actuais impedem a aplicação de modelos climáticos globais com resoluções espaciais suficientemente altas para resolver feições topográficas regionais tais como cadeias montanhosas regionais e/ou cordilheiras e montes do fundo oceânico sendo ambos atributos importantes para simular correctamente em escalas espaciais e temporais regionais. Igualmente, as características de circulação de pequena escala (< 100 m de diâmetro), tais como giros oceânicos e padrões de circulação na plataforma continental, na maioria dos casos não aparecem representadas nas imagens devido às limitações computacionais de espaço e tempo. A consequência de tal lacuna de resolução é que as mudanças climáticas projectadas (resultantes do aquecimento global) por modelos climáticos globais serão sub- e sobre-estimadas nas escalas regionais, levando potencialmente a incorrectas estratégias de adaptação e mitigação às mudanças climáticas.

De forma a colmatar esta lacuna na resolução regional, os cientistas refinam os resultados dos grandes modelos climáticos globais utilizando modelos climáticos regionais de maior resolução. Esta prática científica é dispendiosa do ponto de vista computacional e financeiro e requer um grande volume de dados de campo regionais específicos, tanto para fornecer informações como para validar os modelos climáticos de escala regional. O refinamento para modelos climáticos regionais de elevada resolução pode, portanto, não ser acessível neste momento para países em vias de desenvolvimento no Hemisfério Sul, onde os dados de campo oceânicos são

dispersos e onde as capacidades computacionais e humanas, bem como os fundos para investigação para tais trabalhos de alta tecnologia, são limitados. No entanto, é nos países em vias de desenvolvimento onde este tipo de informação sobre mudanças climáticas será mais necessário.

No presente estudo as projecções do clima regional foram geradas utilizando resultados científicos publicados a partir de modelos climáticos globais. Embora os modelos climáticos globais não resolvam tendências de mudanças regionais específicas, eles fornecem condições de fronteira regionais específicas, dentro das quais podem-se acomodar os modelos climáticos específicos regionais. Estes últimos permitem uma parametrização ambiental dentro da qual os climas oceânicos futuros podem ser cientificamente conceptualizados para o ambiente oceânico Moçambicano.

Deve-se salientar que a informação apresentada neste relatório é destinada aos tomadores de decisão, e não é um tratado científico. É reconhecido que a comunicação entre legisladores / tomadores de decisão e os cientistas que criam a fundação sobre a qual estas decisões ambientais são baseadas, é de importância crucial, de tal forma que os dois grupos comunicam em linguagens que utilizam símbolos e terminologias diferentes. De forma a ultrapassar esta dificuldade, a informação científica apresentada neste relatório foi extraída de artigos examinados por revisores de jornais científicos de alta qualidade, e foram reescritos utilizando uma nomenclatura facilmente acessível aos tomadores de decisão que podem não ter necessariamente o conhecimento científico para ler bibliografia científica contemporânea. A informação apresentada no relatório é complementar ao 4º relatório de avaliação do Painel Intergovernamental das Mudanças Climáticas (IPCC), i.e., a informação aqui apresentada tem por base o relatório do IPCC, fornecendo informação sobre as mudanças climáticas, com resolução mais elevada, específica para a região de interesse.

Na essência, o autor procurou produzir uma breve visão sobre climas futuros plausíveis para o ambiente oceânico Moçambicano, contando com fundos limitados para investigação, limitados recursos de dados e informação científica limitada, para responder às perguntas chave colocadas no presente estudo, e para derivar os cenários futuros de mudanças climáticas oceânicas mais plausíveis para as águas oceânicas de Moçambique.

1.2 OBJECTIVO E QUESTÕES-CHAVE

O objectivo da presente análise de bibliografia e de dados é apresentar o estado actual do conhecimento científico sobre climatologia do ambiente oceânico de Moçambique e projectar, segundo os resultados dos modelos climáticos oceânicos globais já disponíveis, como a climatologia oceânica do momento presente se pode alterar à medida que a Terra aquece.

De forma a atingir o objectivo acima, são abordadas, na análise, as seguintes questões-chave:

- 1) Quais são as características actuais do clima oceânico amplo, a sua variabilidade e cenários de mudanças climáticas futuras para o Sudoeste do Oceano Índico, e especificamente para o ambiente oceânico de Moçambique?
- 2) Quais serão os efeitos do aumento das pressões antropogénicas nas dinâmicas oceânicas?
- 3) Quais serão os efeitos do aumento das pressões antropogénicas na temperatura e salinidade, no nível do mar e na climatologia da produtividade oceânica do Canal de Moçambique?

1.4 METODOLOGIA

O método científico utilizado para criar cenários futuros plausíveis para as mudanças climáticas oceânicas para a ZEE de Moçambique, foi o seguinte:

- 1) Em primeiro lugar, foi estabelecida a climatologia oceânica actual para o Canal de Moçambique, através de uma análise bibliográfica de informação científica examinada por um corpo editorial competente sobre este tema e posteriormente publicada. A climatologia oceânica implícita para o Sudoeste do Oceano Índico, que inclui o ambiente oceânico Moçambicano, foi utilizada como ponto de partida, ou base científica, sobre a qual foram construídos cenários futuros de mudanças climáticas oceânicas.
- 2) Em segundo lugar, os impactos do aquecimento global projectados para os oceanos do Hemisfério Sul, foram estabelecidos utilizando resultados de modelos climáticos atmosfera-oceano examinados por um corpo editorial competente e posteriormente publicados. A informação científica publicada sobre este tópico evidencia um aumento da deslocação para Sul dos ventos de alta altitude que sopram para oeste e uma intensificação simultânea da Corrente Circumpolar Antártica derivada do aquecimento global induzido antropogénicamente, o qual está sistematicamente a mudar a climatologia dos oceanos e da atmosfera do Hemisfério Sul. Deste modo, para determinar de que forma a climatologia oceânica actual do Sudoeste do Oceano Índico irá mudar devido ao aquecimento global, foram incluídas as tendências climáticas atmosféricas e oceânicas observadas no Hemisfério Sul, assim como projecções futuras, no conjunto de informação científica que foi utilizada para produzir cenários futuros de mudanças climáticas oceânicas para o ambiente oceânico de Moçambique.
- 3) Em terceiro lugar, foram utilizadas projecções de modelos de alterações climáticas globais para obter cenários regionais de mudança ao longo da área de interesse. Os modelos globais não fornecem informação de alta resolução para ambientes marinhos próximos da costa, tal como as águas oceânicas de Moçambique. Fornecem, no entanto, condições limite para a região, e.g. para o Sudoeste do Oceano Índico, que podem ser utilizadas para determinar mudanças de alta resolução e diferenças da climatologia oceânica actual para a região sob investigação.
- 4) Finalmente, os cenários futuros de mudanças climáticas oceânicas foram construídos por, a) dedução científica, b) trabalhando estritamente dentro dos limites dos dados e informações reunidos nos passos 1, 2 e 3 acima, e c) utilizando a física e a biogeoquímica do meio sob investigação, i.e. o oceano.

1.5 FORMATO DO RELATÓRIO

Os capítulos seguintes estão organizados sistematicamente de forma a ilustrar o processo científico seguido para chegar aos cenários futuros sobre o estado do oceano das águas oceânicas Moçambicanas, tal como descrito na metodologia.

No Capítulo Dois, é apresentada a climatologia média dos parâmetros oceânicos importantes para caracterizar o estado actual do ambiente oceânico de Moçambique. No Capítulo Três, é apresentada a informação científica contemporânea sobre o impacto do aquecimento global no clima médio dos oceanos Pacífico Sul e Índico Sul. Esta informação foi seguidamente utilizada

para derivar cenários qualitativos futuros de mudanças climáticas oceânicas para a região de interesse. No Capítulo Quatro, é apresentado o cenário de mudanças climáticas oceânicas de “água mais quente” para a ZEE de Moçambique e no Capítulo Cinco, é apresentado o cenário de mudanças climáticas oceânicas de “água mais fria”. Nos Capítulos Seis e Sete, são debatidos os possíveis impactos dos cenários de mudanças climáticas oceânicas de “água mais quente” e “água mais fria” para a ZEE de Moçambique. No Capítulo Oito, é debatida a monitorização das mudanças climáticas oceânicas para a ZEE de Moçambique.

CAPÍTULO 2: A climatologia oceanográfica do Canal de Moçambique

2.1 INTRODUÇÃO

O clima oceânico é determinado através da média dos parâmetros oceânicos colhidos durante longos períodos de tempo, normalmente estendendo-se durante 50 anos ou mais. Estes parâmetros oceânicos podem incluir a velocidade e a direção do fluxo de água oceânica, a temperatura, a salinidade, a altura da superfície do mar e a clorofila (representante da densidade do fitoplâncton).

Neste capítulo a climatologia oceânica contemporânea para o Canal de Moçambique é apresentada como ponto de partida para debater alterações climáticas oceânicas futuras para este ambiente oceânico. A informação aqui apresentada é retirada de publicações examinadas por revisores paritários de revistas científicas, que cobrem o período dos últimos 30 anos.

2.2 CLIMATOLOGIA GERAL

2.2.1 Circulação geral

2.2.1.1 O Canal de Moçambique e a ZEE de Moçambique

O comportamento da circulação geral no Canal de Moçambique antes do início do século 21 é marcadamente diferente daquilo que é hoje em dia tacitamente aceite como sendo a circulação média nesta região oceânica.

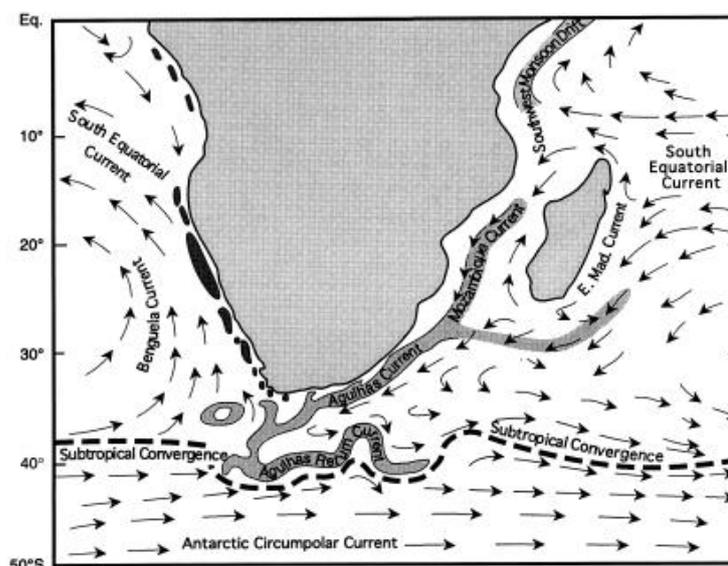


Figura 2.1: A ilustração das principais características de circulação geral na África Austral (com base Lutjeharms et al. 2001).

Os dados hidrográficos reunidos no Canal de Moçambique sugeriram em primeira instância, o fluxo contínuo em direcção ao Sul da Corrente do Canal de Moçambique (Figura 2.1). Esta corrente transportou, supostamente, as águas oceânicas salgadas e quentes em direcção ao Sul, próximo da costa de Moçambique. A corrente continha principalmente águas equatoriais e subtropicais, as quais, em retorno, forneceram a Corrente das Agulhas ao longo da costa este de África do Sul (Figura 2.1).

Este padrão da circulação geral do Canal de Moçambique foi primeiramente simulada por um modelo numérico de circulação geral, o qual ofereceu um imagem drasticamente diferente do fluxo (Figura 2.2). Biastoch e Krauß (1999) foram os primeiros a sugerirem que em vez de uma Corrente de Moçambique contínua, a física exigia a formação de vórtices anticiclónicos (rodando no sentido oposto ao dos ponteiros do relógio), também conhecidos como giros anti-ciclónicos do Canal de Moçambique (Giros do Canal de Moçambique) (GsCM), na parte mais estreita do canal (Figura 2.2). Esta hipótese numérica foi confirmada pelos instrumentos hidrográficos, que foram ancorados ao fundo do oceano ao longo dos estreitos do Canal de Moçambique, e também com dados de teledetecção de satélite (de Ruijter *et al.* 2002; Ridderinkhof & de Ruijter 2003; Schouten *et al.* 2003).

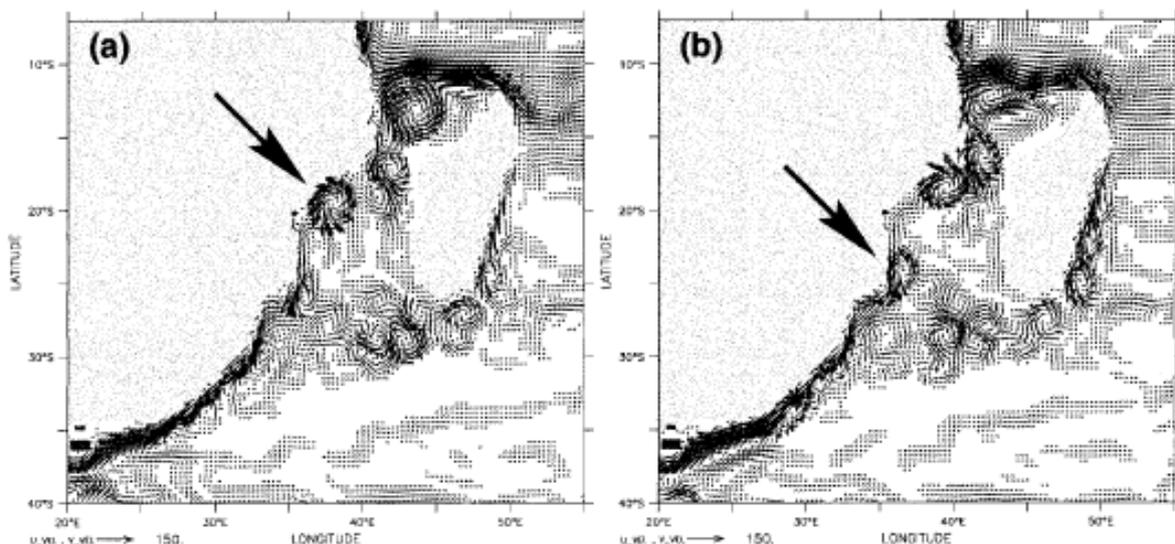


Figura 2.2: *Vectores de velocidade modelados, a uma profundidade da água de 41 m, para o Sudoeste do Oceano Índico (com base em Biastoch e Krauß, 1999).*

A seta preta indica o movimento de um giro no Canal de Moçambique, de Norte para Sul, perto da costa de Moçambique. É indicado o anticiclone fixado no Norte do Canal de Moçambique, assim como os giros mais pequenos da Corrente de Madagascar Este (CME), a Sul de Madagascar.

Foi mostrado que estes GsCM são formados na parte mais estreita do Canal de Moçambique, e são então desviados em direcção ao Sul, perto da costa de Moçambique (de Ruijter *et al.* 2002). Os GsCM são formados, em média, quatro vezes por ano com diâmetros de cerca de 200 km, com uma velocidade média de translação em direcção ao Sul de 4.5 cm s^{-1} (de Ruijter *et al.*, 2005). Os dados hidrográficos mostram que estes giros atingem o fundo do oceano desde a superfície, e transportam consigo as águas intermédias, termoclinas e superficiais quentes tropicais a uma taxa de transporte de 15 Sv ($= 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) (de Ruijter *et al.*, 2005).

A circulação ao longo da linha costeira, a Norte da parte mais estreita do Canal de Moçambique, da fronteira entre a Tanzânia e Moçambique até aos estreitos, é caracterizada por uma corrente costeira contínua, com velocidades na ordem dos $0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (de Ruijter *et al.*, 2005). Esta corrente costeira é a corrente fronteira ocidental de um giro oceânico anticiclónico que está fixado entre o norte das Comores e a parte mais estreita do Canal de Moçambique (Figura 2.2).

Foi recentemente determinado um fluxo profundo, ao longo do limite ocidental, abaixo dos 2000 m (de Ruijter *et al.*, 2002; van Aken *et al.*, 2004, Ridderinkhof e de Ruijter, 2003) como sendo uma extensão da Subcorrente das Agulhas (Beal e Bryden, 1997), transportando Águas Intermédias do Antártico e Águas Profundas do Atlântico Norte em direcção ao equador, perto da talude continental à ocidente do Canal de Moçambique.

Para além dos GsCM, são também formados outros giros proeminentes no vértice Sul de Madagáscar (Figura 2.2), onde são estrangulados na terminação da retroflexão da Corrente Leste de Madagáscar (CLM). Estes giros da CLM são mais pequenos em diâmetro do que os GsCM, e são impulsionados em direcção ao continente Africano, onde alguns deles interagem com a circulação da Delagoa Bight. A região costeira a partir da Delagoa Bight até à Ponta do Ouro (na fronteira entre Moçambique e a África do Sul), é uma região onde os giros do Canal de Moçambique e os da Corrente Leste de Madagáscar congregam-se e se misturam para formar a fonte de água da Corrente das Agulhas (Figura 2.3). Esta região é uma região de elevada energia cinética de giros (i.e., uma região de elevada mistura e turbulência) (Figura 2.3) (Lutjeharms, 2006).

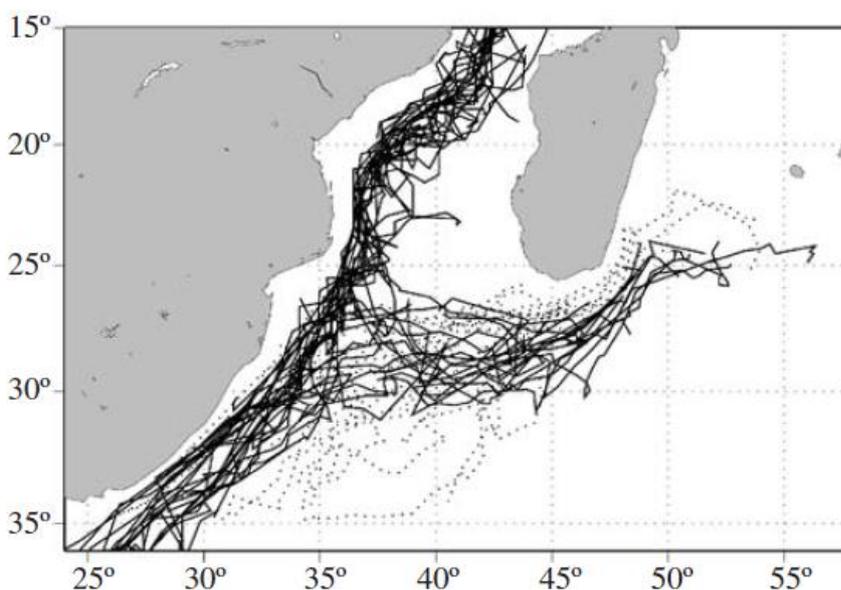


Figura 2.3: Trajetórias combinadas de giros derivadas de dados de teledetecção de satélite sobre a altura da superfície do mar.

A imagem mostra as regiões ao longo da costa de Moçambique e da costa Sudeste de Madagáscar onde dominam os giros (linha finas pretas). Estas duas vias de translação dos giros encontram-se na região centrada a cerca de 35° E e 27° S, onde os os giros interagem e se misturam para formar a fonte de água da Corrente das Agulhas. (Lutjeharms, 2006).

2.2.1.2 O Banco de Sofala e Delagoa Bight

A circulação geral no Banco de Sofala é largamente influenciada pelas características de circulação de mar alto, e.g., pelos giros anti-ciclónicos do Canal de Moçambique que passam em direcção ao Sul, que interagem com a coluna de água do Banco de Sofala (Lutjeharms, 2006; Tew-kai e Marsac, 2008; Weimerskirch *et al.*, 2004). Os GsCM têm correntes periféricas na ordem dos 3 nós (Figura 2.4a), que se demonstrou forçarem as águas ricas em clorofila do Banco de Sofala para mar alto, suportando um ecossistema rico em peixe de mar alto, fora da plataforma continental do Banco de Sofala (Weimerskirch *et al.*, 2004; Tew-kai e Marsac, 2008).

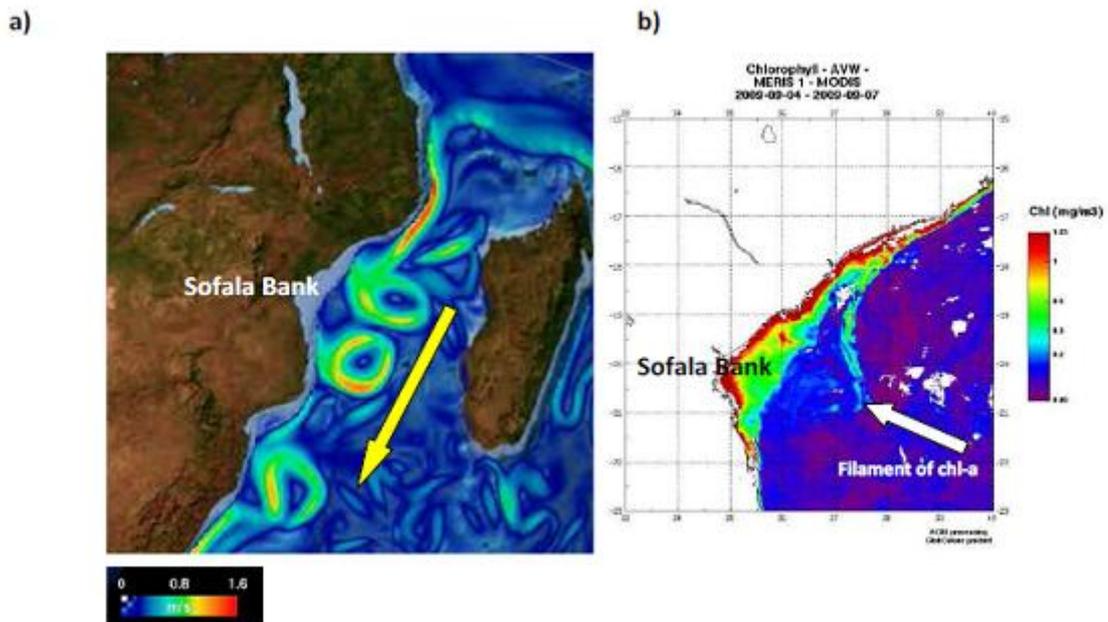


Figura 2.4: a) Resultado do modelo numérico (Biaostoch, IFM-GEOMAR, University of Kiel, Alemanha) mostrando os GsCM ao longo da costa de Moçambique com correntes periféricas na ordem dos $1.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (3 nós). b) Uma imagem de satélite da concentração ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$) de clorofila-a (chl-a) na superfície ao longo do Banco de Sofala. A seta branca aponta para um filamento de águas de chl-a, que foi forçado para fora da plataforma continental, pelos giros do Canal de Moçambique, para águas profundas.

A Delagoa Bight (25° S), a Sul do Banco de Sofala, forma a segunda plataforma continental mais proeminente na região de Moçambique. A circulação da Delagoa Bight tem sido descrita como um giro ciclónico quase permanente (Figura 2.5) (Lutjeharms e Jorge da Silva, 1988). Este giro é responsável pelo deslocamento da água fria, rica em nutrientes, para a superfície devido ao seu movimento ciclónico.

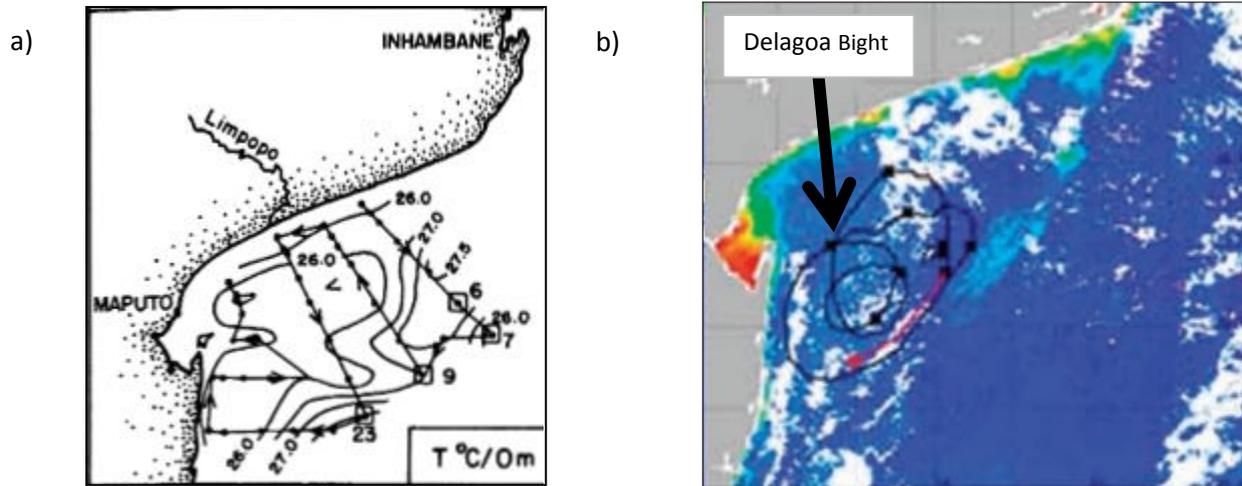


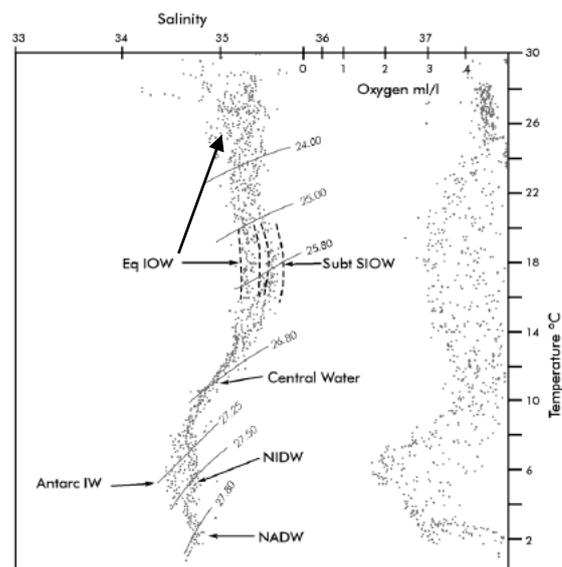
Figura 2.5: a) Dados de temperatura colhidos na superfície da Delagoa Bight mostrando a circulação, no sentido dos ponteiros do relógio, quase permanente dentro desta região (Lutjeharms e Jorge da Silva, 1988); b) Imagem oceânica colorida da região de Delagoa Bight, sobreposta com os percursos de uma corrente de superfície, mostrando o movimento das águas ciclônicas na Delagoa Bight (Lamont et al., 2010).

2.2.2 Climatologia da temperatura e salinidade

2.2.2.1 O Canal de Moçambique e a ZEE de Moçambique

Na Figura 2.6. são apresentadas as massas de água (águas oceânicas com propriedades distintas de temperatura e salinidade, encontradas a profundidades distintas, numa coluna de água) dentro do Canal de Moçambique. Os dados de temperatura e salinidade foram obtidos a partir de dados hidrográficos relativamente antigos, mas abrangem homoganeamente uma grande parte do canal comparativamente aos dados mais modernos (Lutjeharms, 2006).

Figura 2.6: As características temperatura-salinidade e temperatura-oxigênio das massas de água no Canal de Moçambique. As massas de água apresentadas no diagrama T/S são Águas do Oceano Índico Equatorial (Eq IOW) (também denominado Águas de Superfície Tropical), Águas do Oceano Índico Sul Subtropical (Subt SLOW), Água Central, Águas Intermédias do Antártico (Antarc IW), Águas Profundas do Índico Norte (NIDW) e Águas Profundas do Atlântico Norte (NADW). (adaptado de Lutjeharms, 2006).



As temperaturas e salinidades das massas de água encontradas no Canal de Moçambique variam entre 2°C e 30°C e entre 34 a 36 unidades de salinidade, respectivamente (Figura 2.6). A parte superior da coluna de água consiste de Águas de Superfície Equatoriais quentes, identificadas como águas relativamente doces, devido à elevada precipitação equatorial (Eq IOW, conferir Fig. 2.6). A Água de Superfície Equatorial é transportada para o canal através da entrada à Norte do Canal de Moçambique, como uma extensão da Corrente Equatorial Sul (Sætre e da Silva, 1984). A Água do Oceano Índico Equatorial (também denominada Água de Superfície Tropical) é muito encontrada nas partes norte e central do canal (Lutjeharms, 2006).

A Água Subtropical do Índico Sul (Subt SIOW, conferir Figura 2.6) ocupa os 300 m superiores da coluna de água, na parte sul do canal, enquanto a parte central do canal é em parte coberta pela Água de Superfície Tropical (Sætre e da Silva, 1984). A Água Subtropical do Índico Sul é identificada por uma salinidade máxima entre as 35.5 e as 35.7 unidades de salinidade, com temperaturas de cerca de 16°C e, à uma profundidade média de 200 m (Schumann, 2005). Schumann (2005) sugere que as águas Superficiais Subtropicais entram no Canal de Moçambique principalmente através da entrada à Sul do canal. À mesma temperatura, as Águas do Oceano Índico Equatorial são também observáveis com salinidades mais baixas, entre 35.1 e 35.3 (Lutjeharms, 1991).

Abaixo das águas de superfície mencionadas acima, a Água Central do Oceano Índico Sul (CW) é encontrada a uma profundidade que varia entre os 350 m e os cerca de 600 m (Schumann, 2005; Sætre e da Silva, 1984), sendo a Água Central mais profunda constituída por contribuições da Água Intermédia do Antártico (AAIW) e da Água Profunda do Índico Norte (NIDW) (Fig. 2.6).

Em baixo das águas centrais são encontradas massas de água intermédias e profundas. As Águas Intermédias Antárticas e do Índico Norte são encontradas com temperaturas tão baixas quanto 5°C e salinidades que variam entre 34.5 e 35.0. Abaixo destas, são encontradas as Águas Profundas do Atlântico Norte (NADW) principalmente transportadas para a região, a partir do Sul, através da Subcorrente Moçambicana (Ridderinkhoff e de Ruijter, 2003).

2.2.2.2 O Banco de Sofala e Delagoa Bight

As massas de água das regiões de plataforma continental mais amplas do Banco de Sofala e da Delagoa Bight são similares às massas de água do alto mar, nas mesmas profundidades (Lutjeharms, 2006). Existem, contudo, exceções, quando o escoamento de água corrente dos rios dilui as águas da plataforma continental, criando massas distintas de água da plataforma continental.

O Banco de Sofala é uma região de elevada descarga de água dos rios o que leva a uma profunda diluição das águas da superfície oceânica. A salinidade das águas de superfície próximas da foz do Rio Zambeze, no Banco de Sofala, pode cair até às 20 unidades de salinidade enquanto na plataforma continental a água tem 35.4 (Lutjeharms, 2006) (Figura 2.7).

A água doce pode expandir-se até uma profundidade de 15 m directamente ao largo da foz do Rio Zambeze, e até 30 m ao largo da foz do Rio LuaLa (Figura 2.7) (Lutjeharms, 2006). Os elevados valores de salinidade a Sul da cidade da Beira são justificados por escoamento de pântanos (Figura 2.7) (Lutjeharms, 2006).

As características de temperatura/salinidade da Delagoa Bight, recolhidas durante um cruzeiro hidrográfico dedicado ao verão austral de 1982, mostram variações de temperaturas entre 5 e 28°C e valores de salinidade entre 34.5 e 35.6 (Figura 2.8).

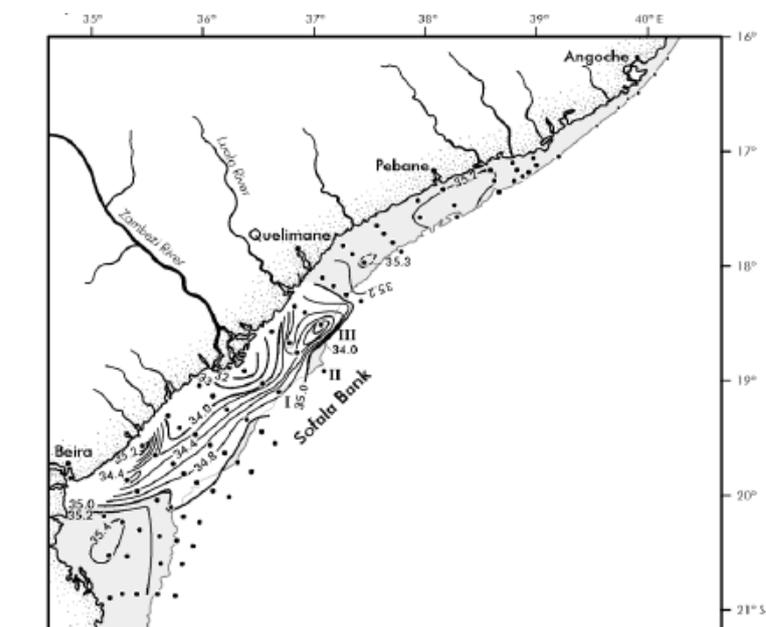


Figura 2.7: A salinidade superficial no Banco de Sofala recolhida num cruzeiro de 1982 (Lutjeharms, 2006).

As massas de água no giro da Delagoa Bight têm características de temperatura – salinidade que sugerem uma ressurgência dentro do núcleo do giro, a partir de profundidades de 900 m, trazendo águas ricas em nutrientes de baixo para a superfície, para produção primária (Lutjeharms, 2006).

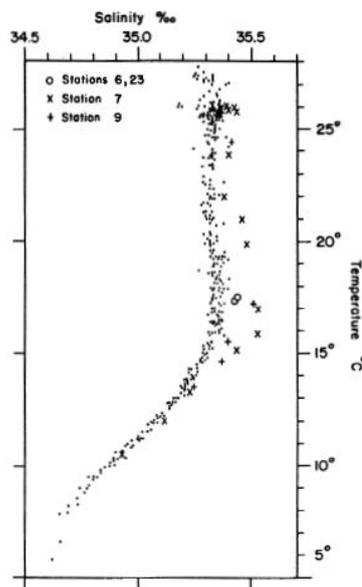


Figura 2.8: As características temperatura – salinidade das massas de água na Delagoa Bight, colhidas durante um cruzeiro hidrográfica dedicada ao verão austral de 1982 (segundo Lutjeharms e da Silva, 1988).

2.2.3 Tendências na climatologia da elevação da superfície do mar

A climatologia da elevação da superfície do mar para o Sudoeste do Oceano Índico, avaliada para um período de 48 anos, utilizando tanto medidas de marés costeiras como dados da elevação da superfície do mar provenientes de instrumentos de altimetria de satélite, mostram claramente as regiões de subida e descida do nível do mar, para o Sudoeste do Oceano Índico (Figura 2.9) (Church *et al.*, 2004). A descida do nível do mar é mostrada para as regiões a partir do equador em direcção ao Sul, até perto da fronteira entre a Tanzânia e Moçambique, e a partir da parte mais estreita do Canal de Moçambique, em direcção ao Sul, até perto da entrada Sul do canal (25° S). Por seu turno, a subida do nível do mar é observada na costa oriental de África do Sul e numa pequena região entre as Comores e a parte mais estreita do Canal de Moçambique (Figura 2.9). Os resultados do modelo numérico de Biastoch *et al.* (2009) mostram os mesmos padrões geo-específicos de subida e descida do nível do mar, tal como descritos pela climatologia do nível do mar de 48 anos de Church *et al.* (2004).

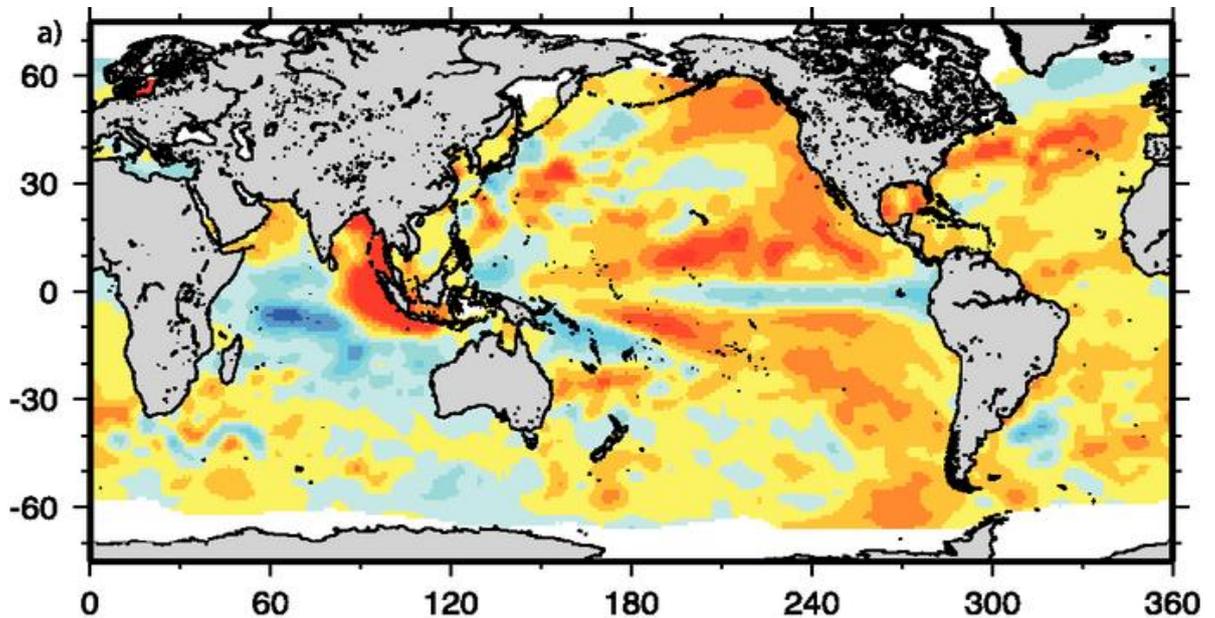


Figura 2.9: Distribuição geográfica das tendências lineares ao longo do tempo do nível médio do mar (mm.yr^{-1}), de 1955 a 2003, baseada na reconstrução do nível do mar passado, com medidas de marés e dados altimétricos (atualizado de Church et al., 2004).

As cores amarelo para vermelho representam a subida do nível do mar entre 0 e 2 mm.yr^{-1} , e as cores azul claro para azul escuro representam a descida do nível do mar entre 0 e -2 mm.yr^{-1} (fonte: IPCC, 2007).

Um estudo realizado por Han *et al.* (2010), que investiga tanto os resultados observados como os dos modelos numéricos das tendências do nível do mar no Oceano Índico, sugere padrões espaciais coerentes para as tendências da altura da superfície do mar. Han *et al.* (2010) apresenta 6 mapas espaciais de tendências do nível do mar (Figura 2.10) derivadas a partir de diferentes modelos numéricos e assimilados (os detalhes do esforço e pressupostos destes modelos serão debatidos no capítulo seguinte). Embora todos os resultados dos modelos mostrem uma descida do nível do mar para a costa da Tanzânia e para a região ao largo do Oceano Índico Equatorial (Giro Tropical do Índico Sul) e uma subida do nível do mar para a costa oriental de África do Sul, os resultados para a costa Moçambicana são menos conclusivos (Figura 2.10). As três experiências, i. e., HYCOM, SODA total e SODA dyn indicam uma subida do nível do mar entre 3 e 18cm/século, enquanto as outras três experiências, i. e., POP dyn, LM MR, e LM EXP, mostram uma descida do nível do mar de -3 a -15cm/século (Figura 2.10). Deve ser salientado que estes resultados dos modelos são indicativos das tendências do nível do mar, modeladas para o período 1961 a 2008.

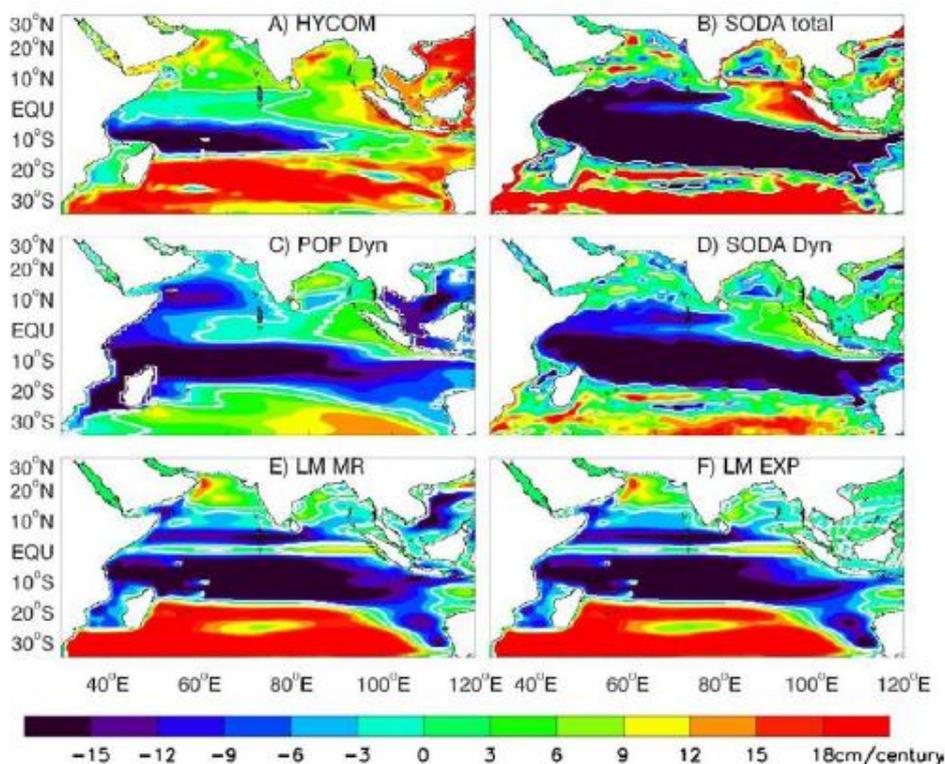


Figura 2.10: Pontos espaciais de anomalias anuais do nível médio do mar (cm/século) de seis experiências de modelos oceânicos, para 1961 a 2008, para o Oceano Índico (segundo Han et al., 2010).

A) Hybrid Coordinate Ocean Model (HYCOM), B) Simple Ocean Data Assimilation Model (SODA total), C) Parallel Ocean Program Model (POP), D) Simple Ocean Data Assimilation Model (SODA dynamic), E) e F) Linear Model (LM Main Run) e (LM Experimental Run). Cada um dos modelos é debatido com algum detalhe no capítulo 3 deste relatório.

2.2.4 Climatologia da clorofila

2.2.4.1 O Canal de Moçambique e a ZEE de Moçambique

Omta et al. (2009) apresenta uma climatologia da concentração de clorofila-a, de 8 anos, obtida a partir do instrumento de satélite *SeaWiFS* (Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor), para duas regiões oceânicas, que incluem a maior parte do Canal de Moçambique e a ZEE de Moçambique (ver Figura 2.11). Os valores máximos de concentrações de clorofila (Chl) foram obtidos para o Inverno austral e os mínimos para o Verão e Primavera austrais. As médias e amplitudes anuais associadas ao ciclo sazonal observado são de 0.3 e 0.1 mg Chl/m³, respectivamente (Omta et al., 2009). Para a caixa I os valores variam de 0.2 a 0.4 mg Chl/m³, e para a caixa II os valores variam entre 0.1 e 0.25 mg Chl/m³ (Figura 2.11). O florescimento de fitoplâncton, com valores de clorofila a variar entre 0.3 e 0.7 mg.m⁻³, aparecem em manchas localizadas, no Inverno, no Canal de Moçambique, comparadas com concentrações muito baixas de clorofila (até 0.2 mg.m⁻³) que caracterizam a maior parte da área na Primavera (Omta et al., 2009).

Além disso, um estudo estatístico, que envolve a junção entre as concentrações de clorofila da superfície do mar e as dinâmicas físicas oceânicas, no Canal de Moçambique, mostra elevada co-variância (Tew-kai e Marsac, 2008). Este último estudo mostra uma forte sazonalidade na

concentração de clorofila e a separação do Canal de Moçambique em regiões distintas de clorofila. As concentrações de clorofila nas partes Norte e Sul do Canal de Moçambique demonstram serem conduzidas pela sazonalidade, enquanto a secção central é conduzida por mecanismos sem sazonalidade. Na parte central do Canal de Moçambique, as dinâmicas de mesoescala conduzidas por giros ciclónicos e anticiclónicos aumentam a produção de fitoplâncton (Tew-kai e Marsac, 2008; Weimerskirch *et al.*, 2004). Tew-kai e Marsac (2008) identificaram três mecanismos, para melhoria da dinâmica de concentração de clorofila à superfície, para a parte central do Canal de Moçambique: 1) elevação ciclónica de águas profundas ricas em nutrientes no núcleo dos giros ciclónicos, 2) interacção entre giros que geram uma forte mistura central favorável à produção de fitoplâncton e 3) advecção de mar alto de águas enriquecidas de clorofila, do Banco de Sofala, pela passagem de giros de propagação em direcção a Sul.

2.2.4.2 O Banco de Sofala e Delagoa Bight

Em contraste com a maior parte do Canal de Moçambique, as regiões onde a plataforma continental é a mais vasta e menos profunda, i.e., o Banco de Sofala e a Delagoa Bight, exibem as concentrações mais elevadas de clorofila, dentro das águas oceânicas de Moçambique. Um estudo realizado por Boge (2006), que utilizou uma série temporal de 8 anos de dados da cor do oceano do *SeaWiFS*, revela estas áreas de elevada concentração de clorofila ao longo da costa de Moçambique (Figura 2.12).

A área entre os 15º S e os 22º S, que cobre a região do Banco de Sofala, e a área entre os 24º S e os 26º S, que cobre a maior parte da Delagoa Bight, podem ser claramente reconhecidas como regiões de plataforma continental com elevados níveis de clorofila, quando comparadas com o oceano aberto adjacente. Nestas regiões são encontrados, em média, valores superiores a 1 mg Chl/m³, não ultrapassando os 10 mg Chl/m³.

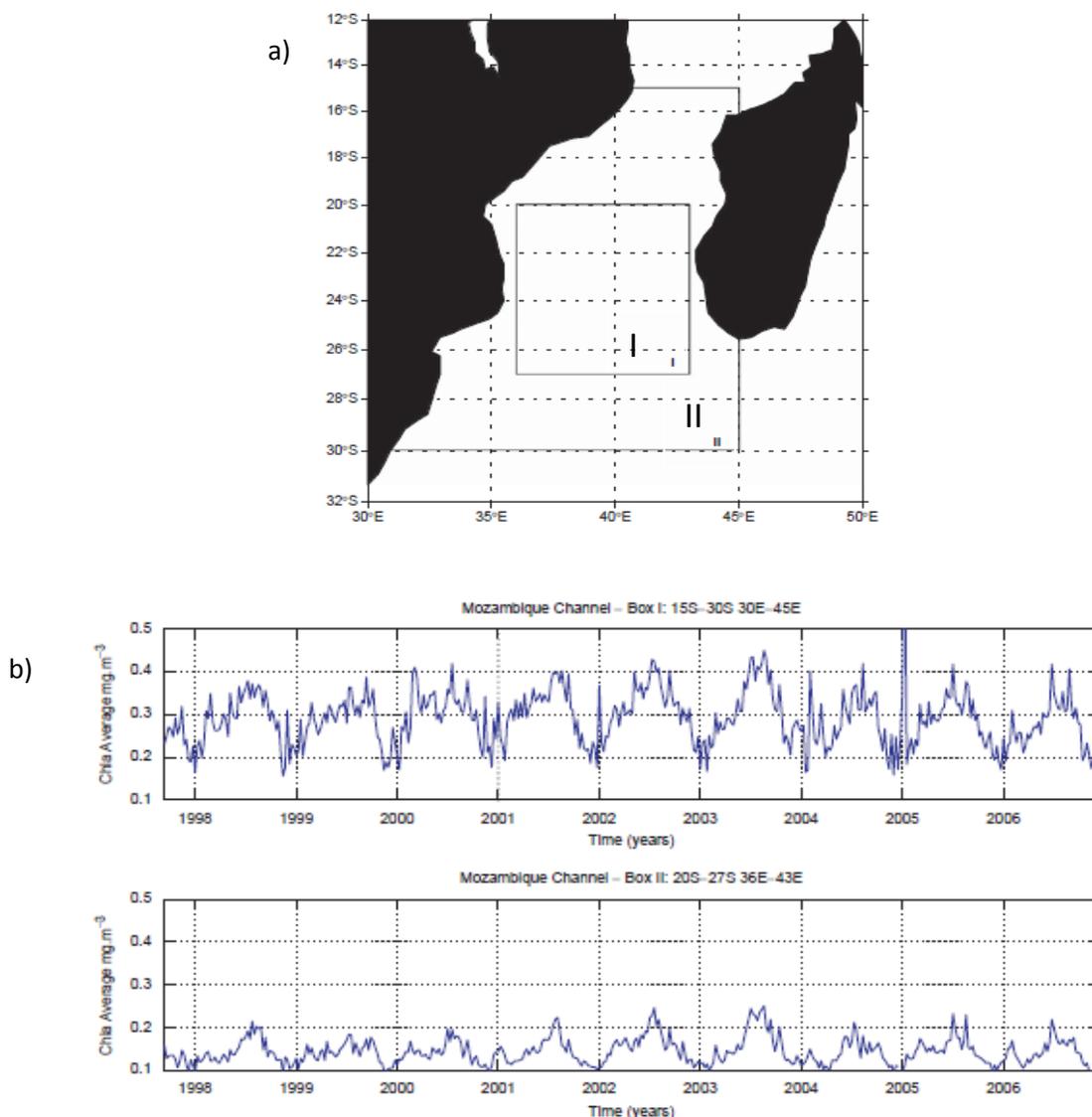


Figura 2.11: a) As duas regiões sobre as quais foram calculadas as médias de concentração de clorofila. b) Variabilidade sazonal em termos de concentrações de clorofila em mg.m^{-3} , para as caixas I e II, para o período de 1998 a 2006 (Omta et al., 2009).

Segundo Boge (2006) as elevadas concentrações de clorofila ao longo do Banco de Sofala são principalmente derivadas das elevadas cargas de nutrientes injectadas pelos vários rios a correr para o banco. Tew-kai e Marsac (2008) também sugerem o desenvolvimento do fitoplâncton devido à advecção de mar alto das águas da plataforma continental ricas em nutrientes, que necessitam de serem substituídas por águas oceânicas mais profundas, ricas em nutrientes, a partir da margem da plataforma. As elevadas concentrações de clorofila da Delagoa Bight são principalmente provenientes da ressurgência das águas a partir de profundidades até 900m, trazendo continuamente para a superfície águas frias profundas, ricas em nutrientes, uma vez que o giro ciclónico da Delagoa Bight movimentam-se dentro desta reentrância semi-fechada (Lutjeharms e Jorge da Silva, 1988).

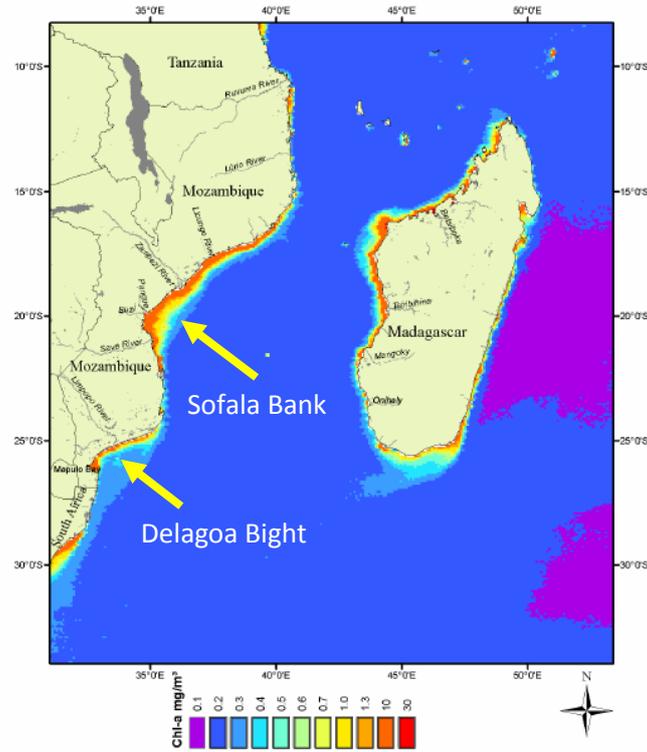


Figura 2.12: A imagem mostra a média de concentração de clorofila, baseada nos dados do SeaWiFS, de Setembro de 1997 a Setembro de 2005, com uma resolução de 9 km, para o Canal de Moçambique (Boge, 2006). São indicadas as duas áreas da plataforma continental com elevadas concentrações de clorofila, para o Banco de Sofala e a Delagoa Bight.

CAPÍTULO 3: Tendências futuras das Mudanças Climáticas Oceânicas para o Hemisfério Sul

3.1 INTRODUÇÃO

A circulação global dos oceanos é formada por vários canais e mecanismos de água complexos e inter-conectados que ligam cada uma das principais bacias oceânicas, i.e., as bacias do Pacífico, do Atlântico, do Índico, e as bacias oceânicas do Sul, juntamente numa só. Estes canais de interligações climáticas assim como outras de menor escala temporal mudam de uma região do oceano global para a outra. É neste contexto que se torna necessário apresentar as actuais tendências das correntes e as mudanças futuras projectadas do oceano global, de forma a conseguir chegar às mudanças oceânicas plausíveis para as águas oceânicas de Moçambique.

Para além disso, e de forma a criar cenários plausíveis de mudanças climáticas oceânicas para a região do Canal de Moçambique, devem ser tomados em consideração os modos climáticos inter-anuais, p.e., os modos do El Niño e La Niña, e o Dipólo do Oceano Índico, os quais têm mostrado terem um impacto no clima oceânico do Oceano Índico Ocidental Sul. Isto inclui as mudanças observadas e projectadas destes modos oceânicos sujeitos a um contínuo aquecimento global induzido pela acção antropogénica.

O capítulo conclui com uma breve descrição de três publicações seminais examinadas por revisores científicos influentes e que foram amplamente utilizadas para construir cenários de mudanças climáticas oceânicas para a ZEE de Moçambique. Estes três trabalhos apresentam os resultados científicos mais abrangentes sobre as actuais tendências climáticas oceânicas e projecções das futuras mudanças para a região de interesse, pois tomam em consideração as influências climáticas para o grande domínio oceânico que circunda o Canal de Moçambique, tais como as teleconexões no Indo-Pacífico através do Fluxo Canalizado da Indonésia e do Fluxo de Saída da Tasmânia, a Ponte Atmosférica do Indo-Pacífico, a região de águas quentes do Indo-Pacífico assim como as tendências climáticas do Oceano Sul.

3.2 MUDANÇAS PROJECTADAS PARA A CLIMATOLOGIA DOS OCEANOS DO HEMISFÉRIO SUL DEVIDO AO AQUECIMENTO GLOBAL INDUZIDO PELA ACÇÃO ANTROPOGÉNICA.

O oceano do mundo foi responsável pela absorção de aproximadamente 84% do aumento total do conteúdo de calor do sistema terrestre entre 1955 – 1998 (Levitus *et al.*, 2005). Como resultado, o conteúdo de calor do oceano global teve um acréscimo de 14.5×10^{22} J desde 1955 até 1998 correspondendo a um aumento médio de temperatura de 0.037° C (Fig. 3.1) (Levitus *et al.*, 2005). Com base nas emissões dos gases do efeito estufa a partir do 4º Relatório de Avaliação do IPCC, projecta-se que a tendência de aquecimento do oceano global continuará durante o Século 21.

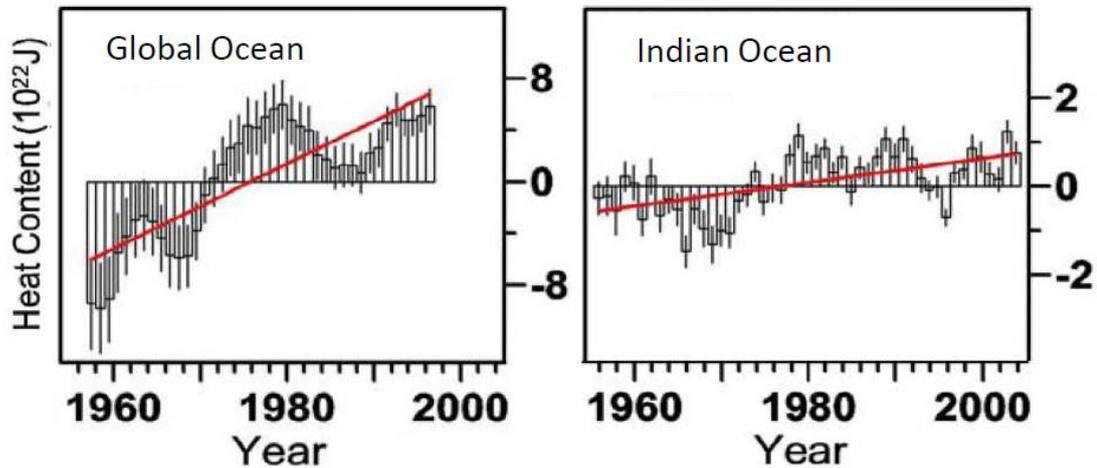


Figura 3.1: Séries temporais de composição contínua de dados de 5 anos sobre o conteúdo de calor do oceano desde 1955 até 1998 para os primeiros 3000 m do Oceano Global e do Índico. A tendência linear é representada por uma linha vermelha (Levitus et al., 2005).

O Oceano Índico como um todo mostra a tendência de aquecimento com a mesma média do oceano global e as outras bacias oceânicas (Figura 3,1; vide também Levitus et al., 2005). No entanto, o aquecimento do Oceano Índico não é homogêneo, mas sim apresenta distribuições geográficas específicas de aquecimento e arrefecimento. A climatologia de Levitus et al. (2005) mostra claramente que certas regiões do Oceano Índico também exibem tendências de arrefecimento rápido à superfície e à profundidade, por exemplo, a região tropical do Oceano Índico Sul entre o Equador e 10°S (Figura 3.2). Em contraste, a tendência de aquecimento do Oceano Índico é positiva e centrada aproximadamente por volta dos 43°S e 23°S (Figura 3.2) (Levitus et al., 2005).

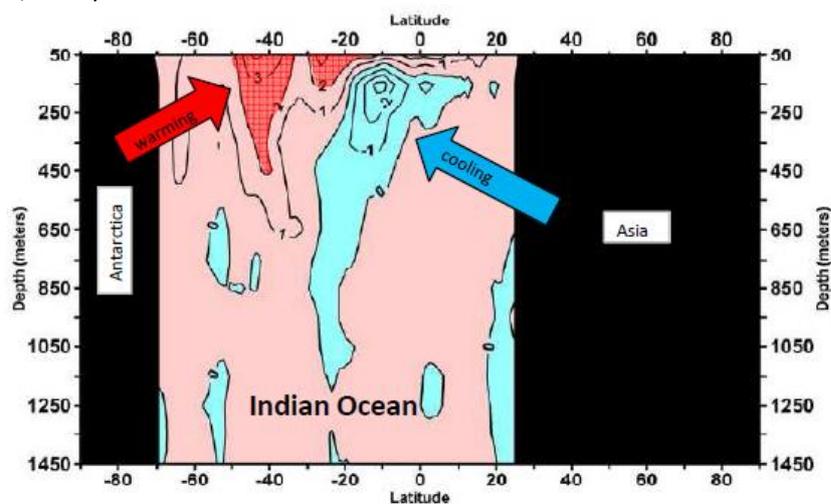


Figura 3.2: Tendência linear do conteúdo do calor integrado por zonas do Oceano Índico para camadas com uma espessura de 100 m. Os valores das tendências são representados no ponto médio de cada camada de 100 m. Os intervalos de contorno são 1×10^{18} J/ano (Levitus et al., 2005).

Os mecanismos físicos que desencadeiam estas tendências de aquecimento e arrefecimento na climatologia do Oceano Índico só podem ser compreendidos através da avaliação de dados oceânicos e atmosféricos observados e os resultados dos modelos numéricos do clima para o Hemisfério Sul (SH). A última informação científica, que é discutida a seguir, vincula sem ambiguidades a climatologia do Oceano Índico em mudança para alterações antropogénicas induzidas ao clima atmosférico e aos processos atmosféricos do Hemisfério Sul.

O principal modo climático do Hemisfério Sul é conhecido como o Modo Anular Sul (SAM), um índice de gradiente de pressão medido entre 40°S e 56°S. Um índice SAM alto (positivo) indica uma intensificação dos ventos do Oeste de latitude alta e menor (negativo) SAM indica um diminuídos ventos do Oeste sobre o Oceano Sul. O índice SAM tem vindo a aumentar ao longo dos últimos 40 anos devido ao aquecimento global induzido pelo efeito antropogénico e à destruição do ozono sobre a Antártida (Cai, 2006; Roemmich, 2007; Toggweiler e Russel, 2008). Os dados observados e os modelos climáticos contemporâneos mostram que a tendência positiva no SAM está associada a uma intensificação e deslocamento para o Sul dos ventos de Oeste das latitudes altas (Toggweiler and Russel, 2008). A mudança para o Sul dos ventos de Oeste das latitudes altas realocou-se directamente sobre a maior corrente oceânica do planeta, a Corrente Circumpolar Antártica (ACC) (Toggweiler e Russel, 2008). A intensificação dos ventos de Oeste sobrejacentes têm por sua vez, intensificado a ACC, devido à transferência directa da atmosfera para o oceano (Toggweiler e Russel, 2008).

Além disso, observações por satélite, *in-situ* e simulações de modelos climáticos todas revelam um amalgamento de Giros Sub-tropicais dos Oceanos Pacífico Sul, Índico e Atlântico (denominado por Super Giro do Hemisfério Sul) ligados via fluxos de saída inter-oceânicos do Sul da Austrália e de África (Figura 3.4) (Ridgway e Dunn, 2007; Speich *et al.*, 2007).

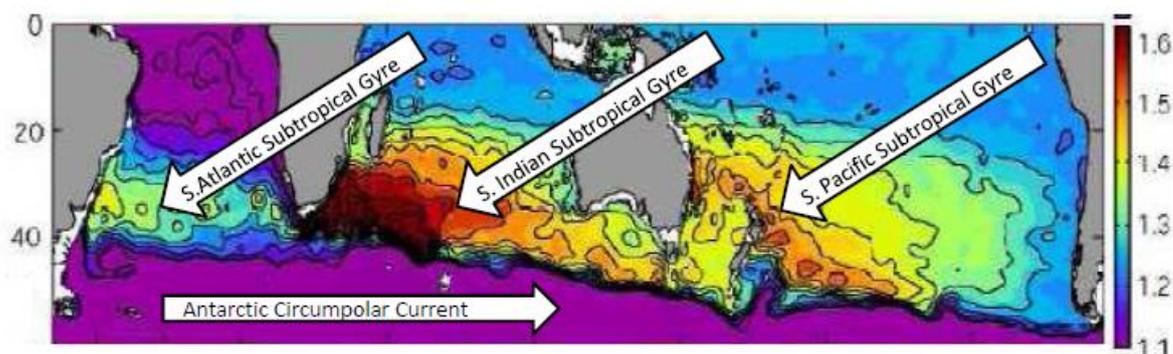


Figura 3.4: A profundidade média dinâmica da camada de 0 a 400 m (intervalo de contorno de 0,02 m), mostrando as conexões do Super Giro entre os giros sub-tropicais dos oceanos Atlântico, Índico e Pacífico.

A profundidade média dinâmica é uma medida de expansão e contracção na vertical da coluna de água oceânica entre a superfície e a profundidade de referência, no caso acima, a profundidade de 400 m. As conexões são através da retroflexão da Corrente das Agulhas e do Fluxo de Saída da Tasmânia, Sul da África e Austrália, respectivamente. O limite Sul do Super Giro está em contacto com a actual Corrente Circumpolar Antártica do Oceano do Sul (Ridgway e Dunn, 2007) que flui para Este.

Desde então, o limite Sul do Super Giro está em contacto com a ACC que flui para Leste, a aceleração da ACC devido ao aquecimento global devido a acção antropogénica tem demonstrado ter conduzido a uma intensificação e deslocamento para Sul dos giros nos últimos 40 anos (Saenko *et al.*, 2005).

O deslocamento para para o Sul do Giro Sub-tropical do Sul do Índico é em parte responsável pelo aquecimento ao longo dos 43°S, visto que a água quente transportada para esta região aumenta por via de uma Corrente das Agulhas mais forte (Cai *et al.*, 2007; Cai *et al.*, 2010; Rouault *et al.*, 2009). A mudança em direcção ao Sul e a intensificação do Giro Sub-tropical do Oceano Índico também é também responsável pela ressurgência da água além do equador devido à intensificação do Giro Tropical do Índico Sul, com a convergência da elevação termoclina a Norte de Madagascar (Cai *et al.* 2007).

Os modelos climáticos contemporâneos baseados nos níveis presentes de CO₂ atmosférico e níveis projectados de níveis CO₂ crescentes, motivado pelas estimativas do IPCC de 1% de aumento em CO₂ por ano até ao ano 2100, indicam que continuará a tendência do clima oceânico na circulação oceânica no HS (Hemisfério Sul) acima exposta (Saenko *et al.*, 2005). Os modelos climáticos elucidam o seguinte;

- 1) Uma intensificação adicional e deslocamento para o Sul dos ventos de Oeste das latitudes altas em conjunto com um aumento do transporte da Corrente Circum-polar Antártica,
- 2) A migração em direcção ao Sul e intensificação das circulações do Giro Sub-tropical do Hemisfério Sul;
- 3) A intensificação adicional das correntes de fronteira Oeste dos sistemas do Giro Sub-tropical do Hemisfério Sul- p.e., a Corrente Agulhas, a Corrente Leste Australiana e a Corrente do Brasil,
- 4) Aquecimento adicional dos oceanos do Hemisfério Sul entre os 40 a 50°S, com aumento da ressurgência de água abaixo da superfície além do equador e arrefecimento entre o Equador e os 10°S.

3.3 MODOS OCEANICOS DE GRANDE ESCALA IMPORTANTES PARA O CLIMA OCEANICO NO CANAL DE MOÇAMBIQUE

De forma a compreender os impactos dos modos oceânicos importantes, p.e., La Niña, El Niño, e o Dipólo do Oceano Índico, no clima oceânico do Sudoeste Oceano Índico é necessário primeiro compreender a circulação geral do Oceano Índico a Sul do Equador.

A característica mais proeminente do Oceano Índico Sul é a Corrente Equatorial Sul (SEC), a qual transporta águas equatoriais e sub-tropicais do sector Leste do Oceano Índico até o Oceano Índico de Sudoeste (Figura 3.5). A Corrente Equatorial Sul flui do sector oriental da Bacia do Oceano Índico para o sector Oeste entre os 15°S e os 20°S (Schott *et al.*, 2009). É uma corrente ampla e superficial, e deriva a maior parte da sua água a partir da recirculação de água dentro do Giro Subtropical do Oceano Índico Sul (Figura 3.5). O segundo maior contributo é a partir do Oceano Pacífico através da passagem Indonésia conhecidos como Fluxo Subsuperficial Indonésio (ITF) (Speich *et al.*, 2007; Ridgway e Dunn, 2007). O fluxo ITF diminui e aumenta de intensidade com os modos climáticos oceânicos El Niño e La Niña, respectivamente (Gordon, 2005). O terceiro maior contributo vem do Sul da Austrália, denominado Fluxo Subsuperficial da

Tasmânia, que contribui principalmente com massas de água intermédias (Speich *et al.*, 2007) (Figura 3.5).

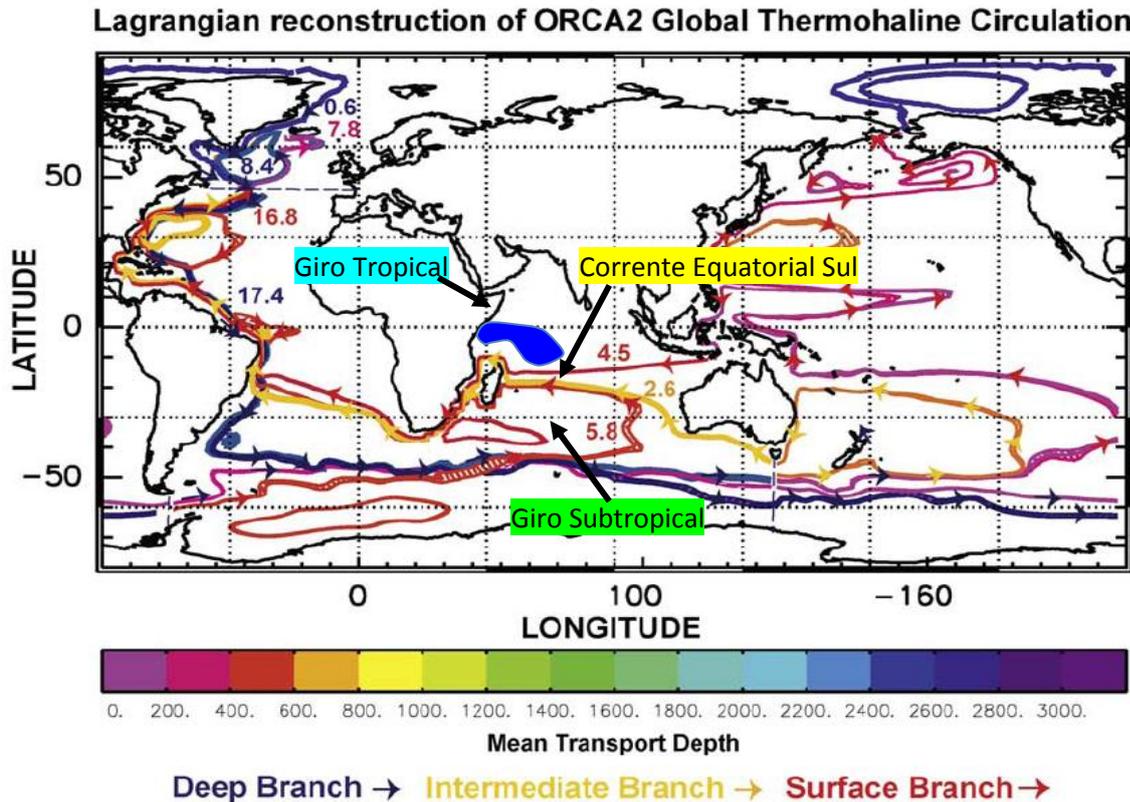


Figura. 3.5: Trajectos lagrangianos das parcelas de água numa simulação do modelo global do movimento da água do oceano global (Speich *et al.*, 2007).

A Corrente Sul Equatorial, o Giro Subtropical do Oceano Índico e o Giro Tropical do Oceano Índico Sul estão indicados dentro do Oceano Índico Sul.

A SEC forma a corrente periférica à norte do Giro Sub-tropical do Oceano Índico Sul (Figura. 3.5). A SEC flui de forma zonal até atingir a ilha de Madagáscar, onde bifurca em ramos Norte e Sul (Schott *et al.*, 2009). O ramo Norte (ramo Norte da Corrente Leste de Madagáscar) circunda a ponta norte de Madagáscar, parte do qual fornece massas de água superficial ao Canal de Moçambique. O ramo Sul (ramo Sul da Corrente Leste de Madagáscar) termina numa proeminente retroflexão a Sul da ilha, e espontaneamente lança vórtices anti-ciclónicos para a Costa Moçambicana. A SEC é a principal contribuinte das massas de água para o Canal de Moçambique (Ridderinkhof *et al.*, 2010).

O Giro Tropical do Oceano Índico Sul encontra-se imediatamente a Norte da SEC ocidental entre 5oS e os 12oS (Figura 3.5). Tem sido demonstrado que a intensidade da SEC está positivamente correlacionada com a intensidade do Giro Tropical, i.e, uma SEC mais forte (mais fraca) conduz a um Giro Tropical do Índico Sul mais forte (fraco) (Palastanga *et al.*, 2006; Schott *et al.*, 2009; Ridderinkhof *et al.*, 2010). A interacção entre a SEC e o Giro Tropical é fundamental para a compreensão da variabilidade inter-anual do clima oceânico no sector ocidental do Oceano

Índico (Schott *et al.*, 2009) e no Canal de Moçambique (Ridderinkhof *et al.*, 2010). Além disso, tem sido demonstrado que a SEC é influenciada pela variabilidade dos fluxos através dos trajectos Indonésios devido às transições dos modos climáticos oceânicos entre o El Niño e La Niña (Gordon, 2005; Schott *et al.*, 2009), i.e., o EL Niño (La Niña) conduz à diminuição (aumento) do ITF, que por sua vez induz fluxos ocidentais da SEC mais fracos (fortes). Ridderinkhof *et al.* (2010) também indicaram a teleconexão entre o modo do Dipólo do Oceano Índico e a intensidade da SEC, a qual controla directamente a quantidade de transporte através do Canal de Moçambique, i.e., +IOD (-IOD) cria uma SEC Ocidental mais fraca (forte). Todos os últimos estudos mostram que o estado do clima oceânico do Canal de Moçambique está intimamente ligado aos modos climáticos de grande escala de lugares tão distantes como o Oceano Pacífico Oriental.

Os modos El Niño y La Niña devem-se à mudanças no sistemas interacção atmosfera-oceano sobre o Pacífico Tropical (Scott *et al.*, 2009). Os aumentos (decréscimos) anómalos dos ventos de Leste Equatoriais do Oceano Pacífico Oriental, conduzem a profundidades termoclinas mais baixas (mais profunda) nesta região, causando os eventos La Niña (El Niño) (Schott *et al.*, 2009). Estes eventos causam impacto na climatologia oceânica em todas as principais bacias do oceano do mundo.

No Oceano Índico, o El Niño causa anomalias negativas de SST que incidem sobre os trajectos das ilhas Indonésias e do Oceano Índico Equatorial Oriental, criando aqui subsidência atmosférica e os ventos anómalos de Leste (Schott *et al.* 2009 e referências inclusas). Estas condições criam por sua vez ondas planetárias de grande amplitude que se propagam em direcção ao Sudoeste do Oceano Índico. As ondas planetárias subsidentes aumentam a profundidade da termoclina, especialmente a Norte de Madagáscar, conduzindo ao aquecimento da superfície das águas do mar, criando desta forma uma temperatura zonal da superfície do mar e um gradiente de pressão entre o Leste e o Oeste (Schott *et al.*, 2009).

Durante a fase El Niño o fluxo através dos trajectos Indonésios enfraquece, e a SEC Ocidental é reduzida devido em parte à subsidência da região do Giro Tropical e devido a contribuição reduzida do impulso proveniente do ITF (Gordon, 2005; Ridderinkhof *et al.*, 2010). Neste último cenário a SEC atinge a ilha de Madagáscar por volta dos 20oS, e cria a bifurcação da SEC em ramos Norte e Sul (Schott *et al.*, 2009). Neste cenário, a água quente tropical é distribuída através da corrente do braço norte e sul (Schott *et al.*, 2009) em torno da ponta norte da corrente de Madagáscar para o Canal de Moçambique. Durante os modos de La Niña, verifica-se o oposto.

A fase La Niña no Oceano Pacífico induz fluxos mais fortes através dos trajectos da Indonésia, criando condições que conduzem a uma SEC ocidental mais forte, e a uma deslocação para o Sul da SEC, e à intensificação e deslocação do Giro Tropical para o Sul (de Ruijter *et al.*, 2004; Gordon, 2005; Ridderinkhof *et al.*, 2010; Palastanga *et al.*, 2006). A intensificação do Giro Tropical traz água mais fria até a subsuperfície à Leste, Norte e Oeste do Norte de Madagáscar conduzindo à anomalias negativas da SST nesta região (Schott *et al.*, 2009). Durante a fase La Niña a maior parte da SEC é forçada para Sul de Madagáscar (de Ruijter *et al.*, 2004; Palastanga *et al.*, 2002). Palastanga *et al.* (2006) reportaram uma extensão a Norte (a Sul) da SEC e uma retracção (aumento) do Giro Tropical, associado com o enfraquecimento (fortalecimento) da SEC Ocidental.

O Segundo modo oceânico mais importante é o modo do Dipólo do Oceano Índico IOD). O Dipólo Positivo do Oceano Índico (+IOD) é tipicamente criado devido a ventos de Leste anómalos no

Oceano Índico Equatorial Oriental (EEIO) (Schott *et al.*, 2009). Este último induz a expansão volumétrica da termoclina na parte Leste Equatorial do Oceano Índico criando ali anomalias negativas na temperatura da superfície do mar (SST). Ao mesmo tempo, do lado oposto da bacia do Oceano Índico, o aquecimento ocorre em torno da ponta Norte de Madagáscar. O modo +IOD típico manifesta-se assim através de um gradiente zonal da SST tropical com arrefecimento ao longo de Sumatra e aquecimento do Sudoeste. Do Oceano Índico (Schott *et al.*, 2009).

O modo positivo do IOD alterna-se com o seu modo oposto, o Dipólo negativo do Oceano Índico (-IOD). Durante o modo -IOD, aparece no Oceano Índico Equatorial Oriental um aquecimento da superfície do mar, enquanto se observa um arrefecimento da superfície do mar no Giro Tropical do Sudoeste do Oceano Índico (Schott *et al.*, 2009). A expressão dos modos -IOD e IOD+ da superfície e de sub-superfície dos estados do clima oceânico são comparáveis com o estado do clima oceânico criado pelos modos EL Niño e La Niña, respectivamente. Os modos oceânicos IOD positivo/negativo e os modos oceânicos do El Niño e La Niña (Figura 3.6) são por vezes significativamente correlacionados (Schott *et al.*, 2009).

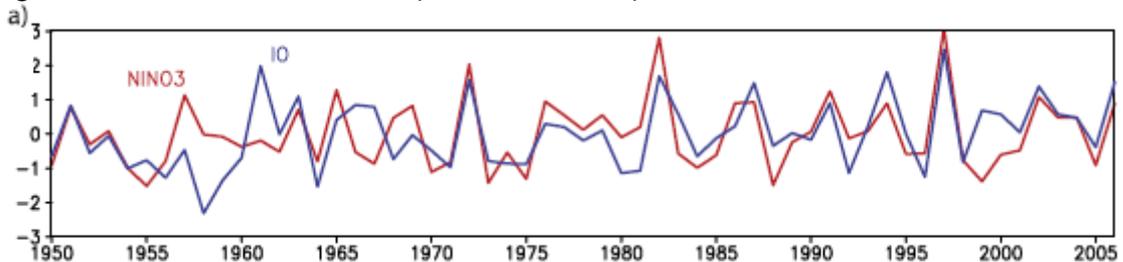


Figura. 3.6: Séries temporais normalizadas do índice 3.4 do Niño (linha vermelha) e do índice do IOD (linha azul) (Schott *et al.*, 2009).

3.4 PROJEÇÕES NUMERICAS DE MODELOS DE TENDENCIAS DAS MUDANÇAS CLIMATICAS OCEANICAS

São aqui apresentadas com algum detalhe três publicações científicas revistas por um corpo editorial e que são utilizadas para construir os cenários das mudanças climáticas para a ZEE de Moçambique. Essas publicações são as mais recentes investigações científicas que exploram as mudanças climáticas oceânicas do Oceano Índico sob contínuo aquecimento global induzido pela acção antropogénica para o Século XXI.

1) O aquecimento no Sistema da Corrente das Agulhas desde os anos 1980's (Rouault *et al.* 2009)

Neste trabalho Rouault *et al.*, (2009) utilizam em primeiro lugar dados temperatura da superfície do mar e da altura da superfície do mar obtidos por satélites para o período de 1985 a 2006, com o objectivo de investigar as tendências nestes parâmetros para o vasto Sistema da Corrente das Agulhas. Eles também usam fluxos de calor latente e sensível, medições *in-situ* da temperatura, da velocidade do vento à superfície para o período 1960 até 2005. Os dados mostram que a Corrente das Agulhas tem estado a aquecer a um ritmo de 0.7°C por década desde 1980s. Estes dados também elucidam que a Corrente Agulhas se intensificou desde os anos 80, criando um energia cinética acrescida dos giros na área de Retroflexão das Agulhas, à Sul do continente Africano.

Os dados indicam ainda que todos os parâmetros oceânicos sob investigação aumentaram em correlação com a temperatura da superfície da água depois dos anos 80. Rouault *et al.* (2009) mostram de seguida que as mudanças climáticas oceânicas, observadas no Sistema da Corrente de Agulhas estão significativamente relacionadas às mudanças do campo de ventos sobre o Oceano Índico do Sul. E uma vez que o transporte na Corrente de Agulhas é uma função do integral do rotacional da tensão de cisalhamento do vento sobre o Oceano Índico Sul, eles concluem que a força motriz por detrás das rápidas mudanças do clima do oceano no Sistema da Corrente das Agulhas desde os anos 80, é forçada pelo aumento do rotacional da tensão de cisalhamento do vento sobre o Oceano Índico Sul utilizando relações estatísticas entre as variáveis observadas.

Rouault *et al.* (2009), utilizam, além disso, o Sistema de Modelagem Oceânica Regional (ROMS) configurado especificamente para modelar numericamente a maior dinâmica da Corrente das Agulhas no Sudoeste do Oceano Índico e no Sudeste do Oceano Atlântico para detectar as possíveis causas e consequências da tendência de aquecimento no Sistema da Corrente das Agulhas por via da modelagem numérica. O modelo foi forçado utilizando o conjunto de dados de reanálise do oceano SODA (Assimilação Simples de Dados do Oceano) de 1958 até 1961. O modelo não foi forçado pela observação da SST.

Os resultados do modelo numérico reproduzem de forma evidente a tendência de aquecimento no Sistema da Corrente das Agulhas observada a partir dos dados das SST obtidas por satélite. Os resultados do modelo elucidam adicionalmente que a causa do aquecimento é derivada do aumento crescente dos fluxos de calor laterais da área de origem da própria Corrente das Agulhas. A Corrente das Agulhas possui duas vias principais de origem, i.e, a) o transporte das águas superiores equatoriais e sub-tropicais via Canal de Moçambique, e b) o transporte de águas sub-tropicais superiores via Corrente Leste de Madagáscar, que passa a Sul de Madagáscar.

Os resultados do modelo numérico mostram que o fluxo através do Canal de Moçambique não foi a fonte do seu aquecimento. No entanto, o fornecimento de água oceânica através do sul de Madagáscar foi identificado como a fonte da presente tendência de aquecimento no Sistema de Corrente de Agulhas.

Rouault *et al.* (2009) mostram nitidamente que o aquecimento da Corrente de Agulhas está relacionado com o aumento da tensão do vento sobre o Sul do Oceano Índico, o que é consistente com a mudança em direcção ao pólo dos sistemas dos ventos de Oeste das latitudes altas do Hemisfério Sul, e a intensificação e deslocação para o sul do Giro Subtropical do Oceano Índico Sul, devido ao aquecimento global induzido pela acção antropogénica.

As conclusões importantes que são utilizadas a partir deste trabalho para criar cenários de mudanças climáticas oceânicas são de que a fonte de aquecimento da Corrente das Agulhas deriva da Corrente Equatorial Sul que alimenta a Corrente das Agulhas com águas oceânicas via Sul de Madagáscar e não via Canal de Moçambique. Destas conclusões pode deduzir-se que a Corrente Equatorial Sul deve estar a aquecer devido ao aquecimento global induzido pela acção antropogénica.

2) Padrões de mudança do nível do mar do Oceano Índico num clima em aquecimento (Han *et al.*, 2010)

O objectivo definido neste trabalho foi o de melhorar as estimativas da variabilidade geográfica da mudança do nível do mar do Oceano Índico desde 1960, a partir de quando o aquecimento dos oceanos do mundo foi atribuído principalmente ao aumento da emissão dos gases do efeito de estufa.

Han *et al.* (2010) usam as melhores observações *in situ* e por satélite, dados de marégrafos, reanálise de dados de modelos assimilados, e depois usam os modelos gerais de circulação para investigarem as causas das tendências observadas para a mudança do nível do mar no Oceano Índico.

Observações baseadas em dados de marégrafos disponíveis para o Perímetro do Oceano Índico mostram que o nível da água do mar tem vindo a aumentar excepto ao largo da costa da Tanzânia (nota: não existem dados sistemáticos de marégrafos disponíveis para o Canal de Moçambique). As anomalias observadas no nível do mar do Oceano Índico foram bem simuladas com o modelo numérico HYCOM. O modelo HYCOM mostra uma grande região de descida do nível do mar de grande escala centrada no Oceano Índico Tropical Sul (Figura 2.10). Os dados altimétricos de satélite confirmaram esta tendência do nível do mar.

Han *et al.* (2010) concluem a partir da excelente concordância entre os dados e o modelo que o modelo HYCOM capturou alguns processos físicos importantes que determinam a variabilidade geográfica no nível do mar do Oceano Índico. Deve notar-se que o modelo HYCOM não inclui os efeitos do derretimento do gelo. O modelo HYCOM, assim como os outros modelos de circulação geral que foram utilizados, foram forçados por campos de vento para o período 1958-2001, e ajustados usando os campos de dados climatológicos mensais da COADS (Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Sets). Os resultados de todos os modelos indicam que a variabilidade geográfica na mudança do nível do mar é principalmente devida à mudança dos campos de vento sobre o Oceano Índico causando a redistribuição da massa, com expansão térmica e efeitos da salinidade, aumentando o nível médio da bacia.

Han *et al.* (2010) também descrevem as forças motrizes por detrás das mudanças no tensão do vento em todo o Oceano Índico. E, através do uso de dois modelos de circulação geral da atmosfera modernos, forçados pelas tendências da SST da região de água quente denominada Índico-Pacífico Warm Pool (Figura 3.7), foram reveladas as tendências da tensão do vento à superfície e do bombeamento de Ekman que se correlacionam com os padrões de mudança nível do mar.

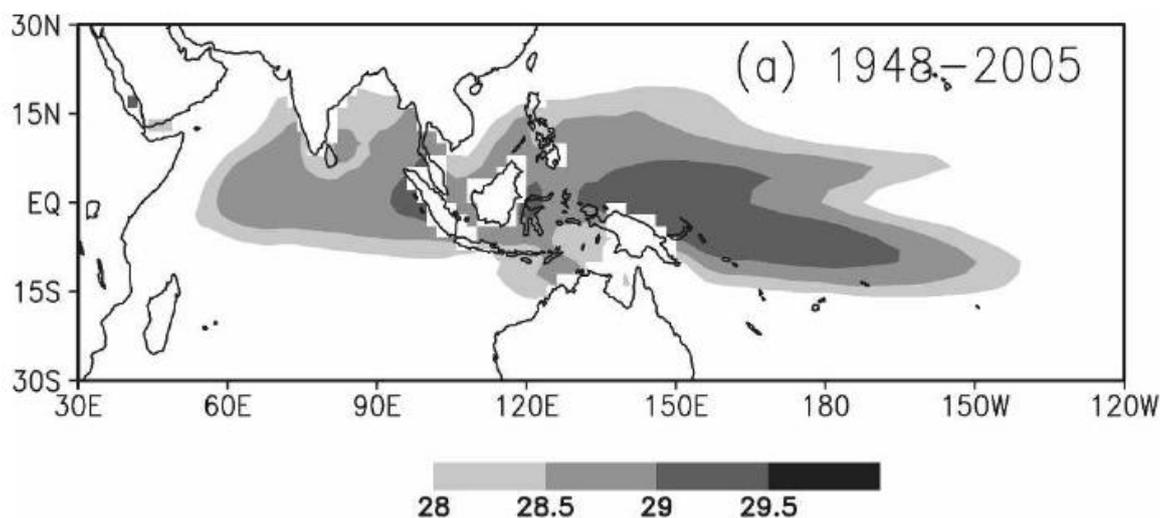


Figura 3.7: O gráfico mostra a área geográfica abrangida pela região de água quente denominada Indo-Pacífico Warm Pool (IPWP). A região sombreada representa (1948-2005) a média anual de longo termo da temperatura da superfície do mar para a região. A escala da SST é mostrada abaixo (após Wang and Mehta, 2008).

Os resultados mostram que os aumentos da SST na região de água quente denominada Indo-Pacífico Warm Pool (IPWP) durante as últimas décadas são principalmente causados por forças antropogénicas, devido ao aquecimento global. O aumento cada vez maior da SST ao longo da IPWP no Oceano Índico oriental tem levado ao aprimoramento combinado da Célula de Circulação Tropical Atmosférica de Hadley, e da Célula de Circulação Atmosférica Walker. Este aprimoramento combinado tem por sua vez levado a padrões específicos de mudanças dos campos de ventos que causam a ressurgência crescente das águas frias profundas na região do Giro Tropical do Sudoeste do Oceano Índico, e aumentando a subsidência no Giro Subtropical do Oceano Índico Sul, levando a uma crescente diminuição do nível da água do mar e a uma crescente subida do nível do mar nas regiões oceânicas respectivas.

O material suplementar do presente documento apresenta resultados numéricos de modelos de circulação, assim como resultados de modelos assimilados do Oceano Índico os quais foram utilizados na construção de cenários de mudanças climáticas oceânicas para o Canal de Moçambique. Cada modelo é descrito de forma breve abaixo:

1) O modelo Híbrido de Coordenadas Oceânicas (HYCOM) (Figura 3.8)

Este modelo foi configurado para a bacia do Oceano Indo-Pacífico com uma resolução horizontal de $0.33^\circ \times 0.33^\circ$ e 20 camadas na vertical. As fronteiras sul e norte (Oceano Índico) estão fechadas e são aplicadas camadas finas de 5° para relaxamento da temperatura do modelo e campos de salinidade para a climatologia de Levitus (Levitus *et al.*, 2005). O HYCOM foi ajustado para 30 anos usando campos climatológicos mensais de COADS (Slutz *et al.*, 1985) e forçado pelos campos de vento ERA40 para o período de 1958 até 2001. As anomalias do nível do mar do HYCOM incluem efeitos dinâmicos (principalmente pela redistribuição de massa pelos ventos), expansão térmica e efeitos da salinidade. O efeito da retirada do gelo continental não está incluída no HYCOM.

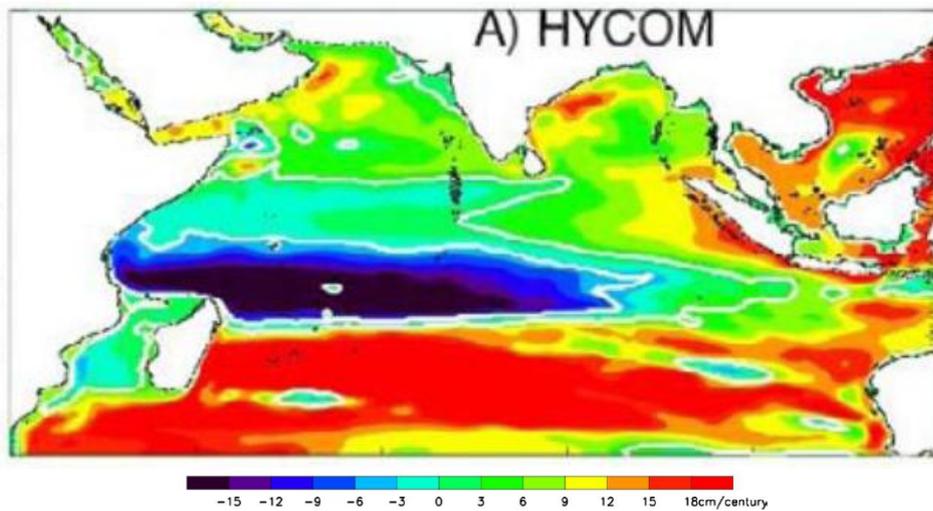


Figura 3.8: Mapa espacial-temporal das anomalias da altura da superfície do mar modeladas (cm/Século) derivadas do HYCOM (Han et al., 2010).

2) O Programa Oceano Paralelo (POP) (Figura 3.9)

O POP utilizado por Han *et al.* (2010) é a componente oceânica da versão 4 do Modelo de Sistema Comunitário do Clima (CCSM4) do National Center for Atmospheric Research (NCAR). O POP é forçado por um conjunto de dados inter- anuais variáveis (CORE.2-IAF), abrangendo 1948-2006. Os fluxos da superfície são calculados a partir de fórmulas enormes usando o prognóstico da SST do modelo do oceano SST e um estado atmosférico observado. A condição inicial para a experiência é um estado de repouso, com temperatura e salinidade prescritos pela distribuição climatológica global do World Ocean Atlas. A mudança de nível do mar dos modelos é dinâmica e resulta principalmente de distribuições de massa conduzidas pelo vento.

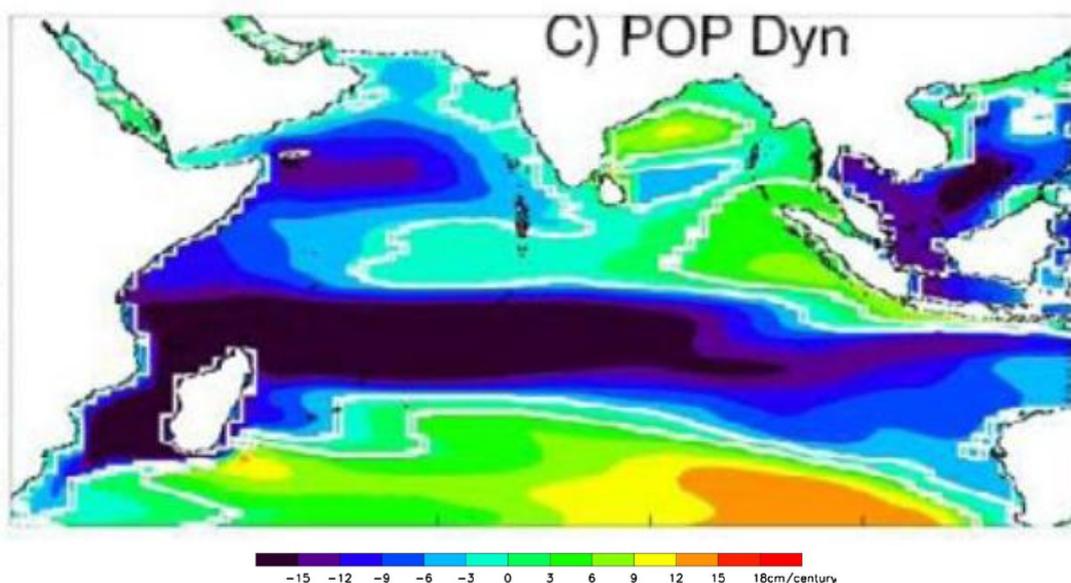


Figura. 3.9: Mapa espacial-temporal de anomalias modeladas da da altura superfície do mar (cm/Século) derivadas do POP dyn (Han et al., 2010).

3) Modelo Linear (LM) (Figura 3.10)

O modelo oceânico linear continuamente estratificado, está configurado para a Bacia do Indo-Pacífico com uma resolução horizontal de $0.33^\circ \times 0.33^\circ$. As equações do movimento são linearizadas sobre um estado de repouso com uma estratificação de fundo realista calculada a partir da climatologia da temperatura e salinidade de Levitus.

São aplicadas fronteiras fechadas no Norte e Sul do Oceano Índico. O modelo LM foi primeiramente ajustado para 30 anos e forçado pela climatologia da tensão do vento mensal de COADS. O forçamento da tensão do vento do ERA40 no período 1958-2001 foi utilizada para a experiência do LM MR (principal execução). Foi também realizada uma experiência paralela (LM EXP), na qual a tensão do vento do Pacífico foi fixada para a média de 1958-2001.

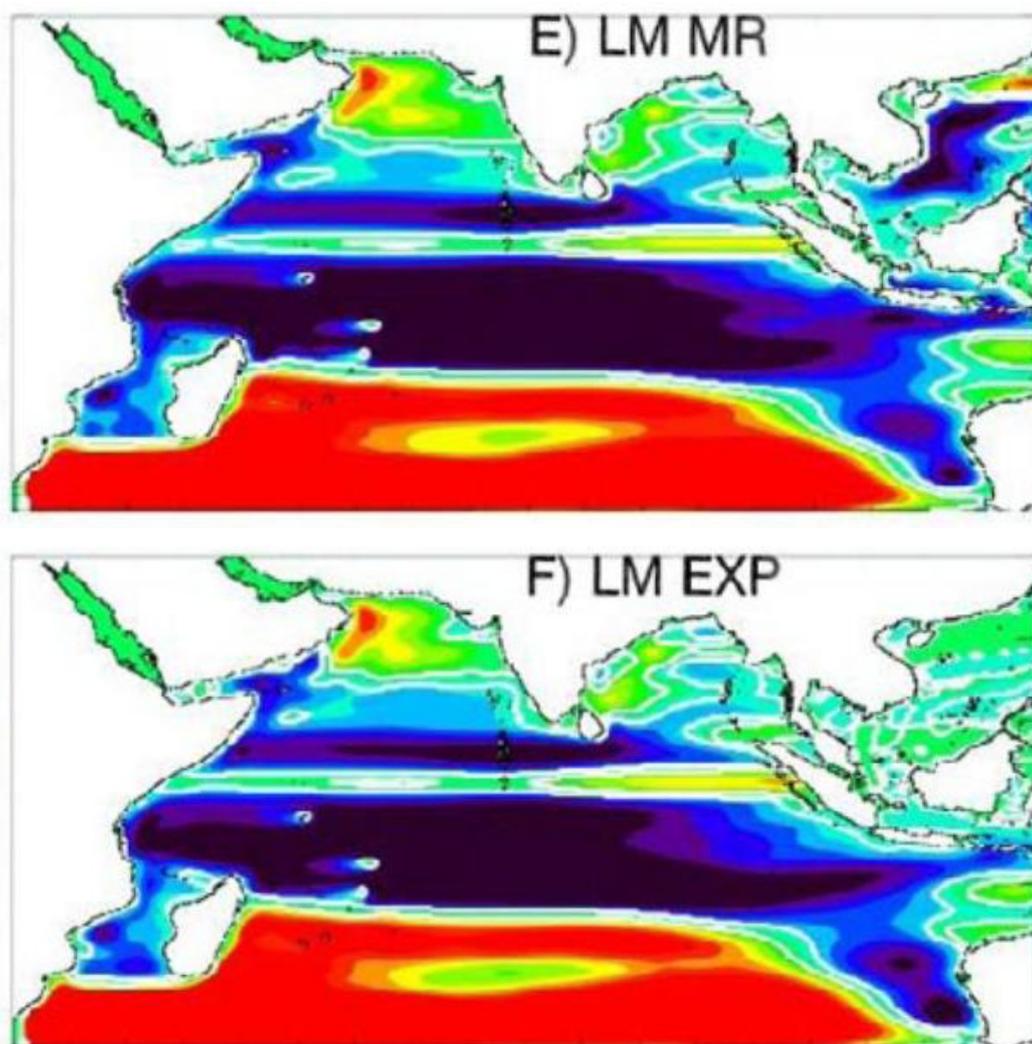


Figura. 3.10: Mapa espacial-temporal de anomalias modeladas da altura da superfície do mar (cm/Século) obtidas a partir da Execução Principal do LM (MR) e da Execução Experimental da LM (EXP) (Han et al., 2010).

4) Assimilação de Dados Oceânicos Simples (SODA) (Figura 3.11)

O SODA baseia-se na física do Programa Oceano Paralelo (POP) com uma resolução média de $0.25^\circ \times 0.4^\circ$ e 40 níveis. As observações incluem virtualmente todos os dados disponíveis sobre perfis hidrográficos, bem como dados das estações oceânicas, séries temporais da temperatura e da salinidade obtidas nas estações in-situ, observações da temperatura da superfície e da salinidade de vários tipos, e observações noturnas das SST de satélite na banda do infravermelho. O produto vem no formato de média mensal, mapeado sobre uma grelha de nível uniforme $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ e 40 níveis. A reanálise oferece três tipos de variáveis, aquelas bem constrangidas pelas observações, aquelas parcialmente constrangidas por relações dinâmicas em relação a variáveis frequentemente observadas, e as que são pouco constrangidas.

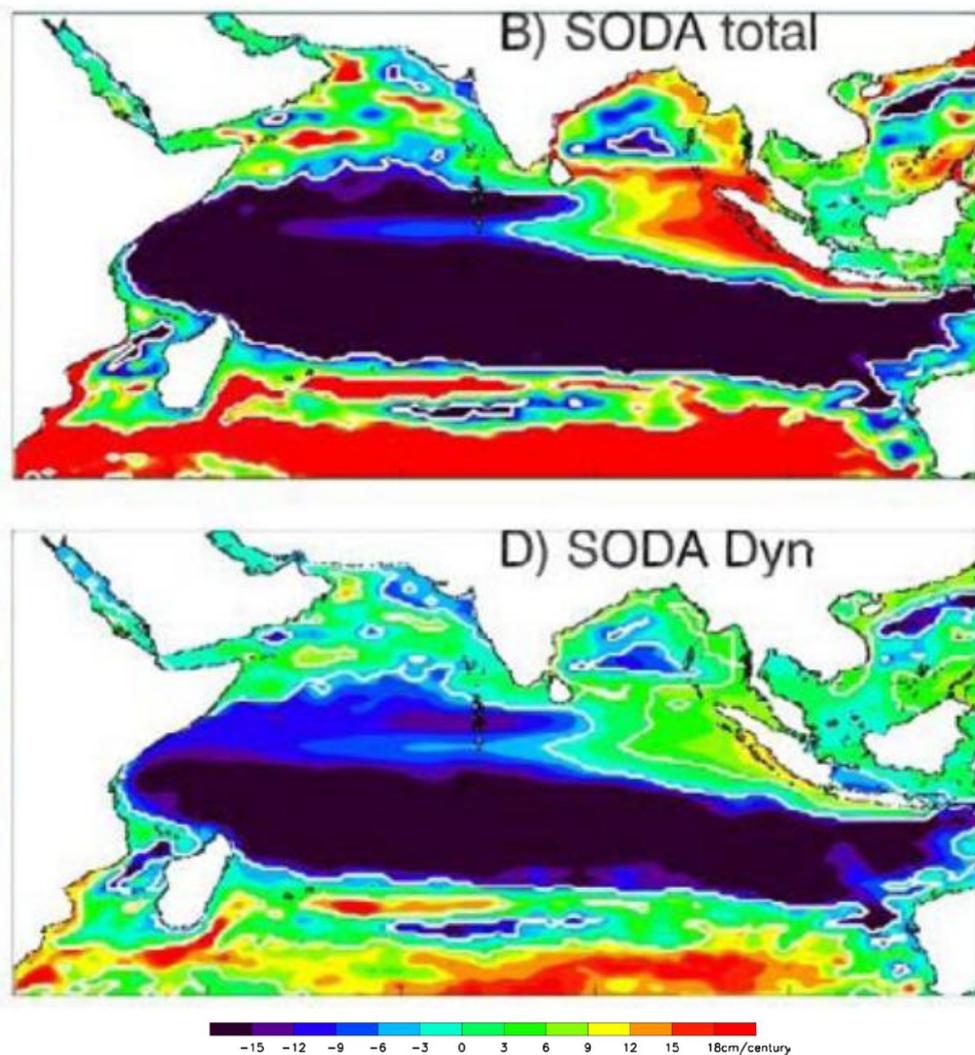


Figura. 3.11: Mapa espacial-temporal de anomalias modeladas da altura da superfície do mar (cm/Século) derivadas do SODA total e SODA Dyn (Han et al., 2010).

Todos os seis resultados espaciais mostram as características oceânicas dominantes destacadas pela publicação de Han *et al.*'s (2010);

- 1) A descida do nível do mar em grande escala para além do equador coincidindo com o prolongamento da região do Giro Tropical do Oceano Índico Sul estendendo-se desde o Oceano Índico ocidental até o Oceano Índico oriental.
- 2) A subida do nível do mar de grande escala associada com o Giro Subtropical do Oceano Índico Sul.
- 3) A subida do nível do mar ao longo da costa do Oceano Índico, na Baía de Bengal e no Mar da Arábia.

Contudo, os resultados para a região do Canal de Moçambique não são conclusivos, com 50% dos resultados espaciais a mostrarem uma subida do mar, e os outros 50% uma descida do nível da água do mar nos últimos 60 anos.

- 3) Forçamento antropogénico por aerossóis e a estrutura das tendências de temperatura no sul do Oceano Índico (Cai *et al.*, 2007).

Cai *et al.* (2007) utiliza um modelo climático acoplado atmosfera-oceano com um esquema de aerossól abrangente (sulfato, material orgânica particulada, carbono preto, poeira mineral, sal marinho, gases de efeito de estufa de vida longa, ozono e aerossóis vulcânicos) na sua simulação para o período 1871 a 2000, com e sem (experiência de controlo) os efeitos do aumento dos aerossóis antropogénicos. A publicação de Cai *et al.* (2007) no entanto, somente focaliza os resultados do período desde 1951. O modelo atmosférico utilizado neste estudo é uma versão de baixa resolução, com o fluxo ajustado (espectral R21) do modelo geral de circulação atmosférica CSIRO. O modelo R21 tem 18 níveis na vertical e a resolução horizontal de aproximadamente 5.6o de longitude e 3.2o de latitude. A componente oceânica tem a mesma resolução horizontal que o modelo atmosférico com 21 níveis na vertical.

Os resultados do modelo encontram-se bem correlacionadas com a climatologia do Oceano Índico obtidas por Levitus *et al.* (2005), mostrando uma tendência de aquecimento profundo atingindo os 800m centrada a 43oS e um arrefecimento para fora do equador da subsuperfície. Cai *et al.* (2005) explicam a tendência da temperatura observada no modelo devido à mudança e à intensificação do Giro Subtropical do Oceano Índico Sul em direcção aos pólos, e à transferência de calor do Oceano Índico para além do equador em direcção a um fluxo de saída mais forte para Sul da Corrente das Agulhas. Eles concluem que o ritmo de aquecimento mais forte nas latitudes médias deve-se ao aumento da transferência de calor das regiões fora do equador, que por seu turno criam tendências de arrefecimento mais fortes nos trópicos do Oceano Índico Sul. A distribuição horizontal da tendência acima realoca o Giro Sub-tropical do Oceano Índico Sul, centrado a 43oS e o Giro Sub-tropical do Oceano Índico Sul a 20oS, com a Corrente Equatorial Sul passando na ponta sul de Madagáscar (Figura 3.12).

As conclusões importantes que foram utilizadas a partir deste documento para construir cenários futuros de mudanças climáticas oceânicas foram, 1) a tendência de deslocação para o Sul do Giro Subtropical do Oceano Índico Sul, da Corrente Equatorial Sul e do Giro Subtropical do Oceano Índico Sul, e 2) a tendência de arrefecimento fora do Equador e de aquecimento do Giro Subtropical do Oceano Índico Sul, induzido pelo aquecimento global antropogénico.

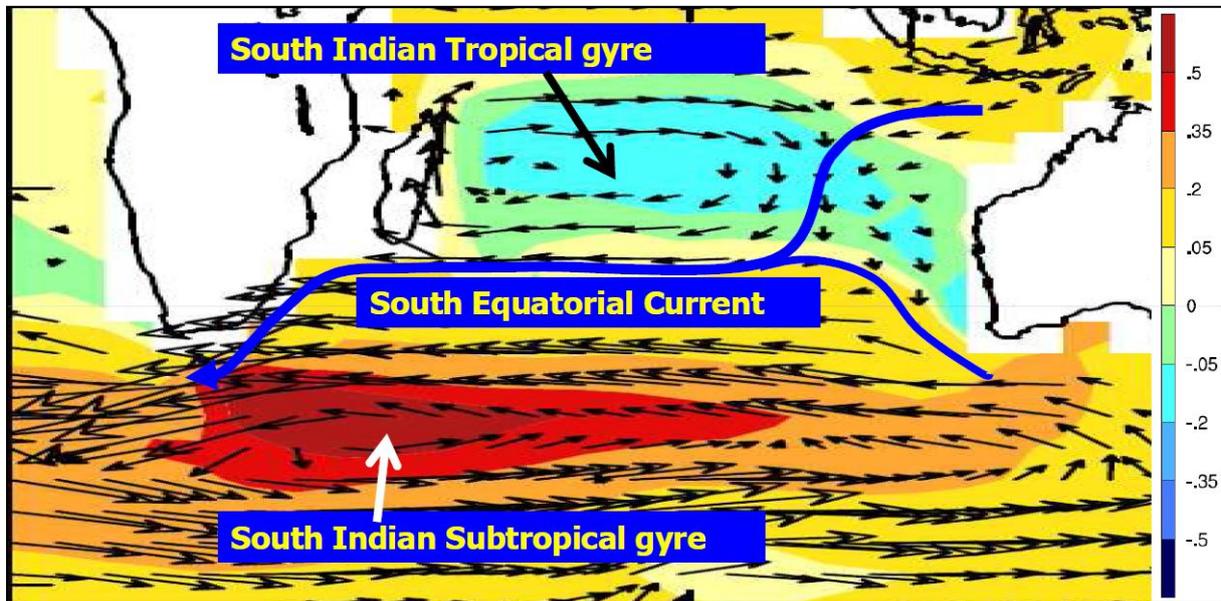


Figura 3.12 Resultados do modelo a partir de um modelo climático acoplado oceano-atmosfera forçado com o aumento dos gases do efeito de estufa antropogénicos mostrando as tendências do conteúdo do calor oceânico acima dos 800 m para o Oceano Índico Sul em termos da temperatura média vertical, sobrepõe-se as correntes oceânicas (vectores).

As unidades estão em °C por 50 anos (adaptado de Cai et al., 2007). A importância desta ilustração é indicar o deslocamento em direcção ao sul das características principais de circulação do oceano Índico Sul e possíveis posições futuras do Giro Tropical do Oceano Índico Sul, o Giro Subtropical do Oceano Índico Sul, e da Corrente Equatorial Sul sob aquecimento global contínuo.

CAPÍTULO 4: O cenário “água mais quente” nas mudanças climáticas oceânicas do Canal de Moçambique

4.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta a abordagem sistemática e pressupostos assumidos para a construção de um cenário denominado “água mais quente” no âmbito das mudanças climáticas oceânicas para o Canal de Moçambique.

4.2 RELACIONANDO O NÍVEL DO MAR COM A EXPANSÃO TÉRMICA/CONTRACÇÃO DA CAMADA SUPERIOR DAS MASSAS DE ÁGUA

Os resultados numéricos e assimilados do modelo apresentado por Han *et al.* (2010) mostram 50% de possibilidade da subida do nível do mar no Canal de Moçambique desde 1958 (Figura 2.10). Os resultados do modelo numérico HYCOM (Figura 3.8) e do modelo de assimilação SODA (Figura 3.11) mostram a possibilidade da subida do nível do mar entre 0 a 12 cm/século para a maior parte do Canal de Moçambique desde os últimos 60 anos. Além disso, os dois modelos SODA Total e SODA Dyn (Figura 3.11), mostram que a região costeira de Moçambique poderá ainda ter experimentado uma maior subida do nível do mar, na ordem dos 9 a 18 cm/século comparada com o resto do Canal. Uma vez que, em estudos realizados se presume que a subida do nível do mar esteja correlacionada com o aquecimento das águas oceânicas em estudos (por exemplo, Han *et al.*, 2010), a suposição que é feita aqui é, que a maior parte da subida do nível do mar indicada para o Canal de Moçambique se deve à expansão térmica da camada superior das massas de água quente indicada para o Canal de Moçambique.

A expansão térmica da água oceânica e o contributo da água doce para o derretimento do gelo polar são tidos como os principais contribuintes para a subida global do nível da água do mar (IPCC, 2007). No entanto, podem existir outras fontes de aumento da subida e descida do nível do mar. Por exemplo, Han *et al.* (2010) mostram em larga medida que a força dos ventos de superfície sobre o Oceano Índico podem causar tanto a subida do nível do mar como a sua descida devido à redistribuição geo-específica da massa relacionada com os padrões diferenciais de ventos que, por sua vez, são acoplados a SSTs mais frios ou mais quentes através de processos oceânicos dinâmicos de ressurgência e subsidência respectivamente. Portanto, o rotacional da tensão de cisalhamento do vento ciclónico irá conduzir a ressurgência das águas frias profundas para a superfície do oceano, criando uma anomalia negativa da SST e uma descida do nível do mar (Han *et al.*, 2010). O mais recente processo dinâmico é utilizado por Han *et al.* (2010) para explicar a grande área de descida da água do nível do mar para o Giro Tropical do Oceano Índico Sul, e desta forma ligando directamente águas oceânicas mais frias à redução dos níveis do mar.

O oposto é também válido. Por exemplo, no Giro SubTropical do Oceano Índico do Sul, onde o rotacional da tensão de cisalhamento do vento anti-ciclónico predominante gera subsidência que por sua vez leva ao aquecimento das massas de água superiores e eleva o nível do mar (Han *et al.*, 2010).

Outra suposição que precisa ser feita para o cenário de “água mais quente” nas mudanças climáticas oceânicas é a do aquecimento (expansão) de massas de água no Canal de Moçambique ser importado para o Canal de Moçambique devido à advecção térmica através da Corrente Oriental de Madagascar, que é uma extensão da Corrente Equatorial do Oceano Índico Sul (Schott *et al.*, 2009). Os modelos Han *et al.*'s (2010) indicam que a tendência do aquecimento (expansão) das águas superiores no Canal de Moçambique vai continuar até o Século XXI. Isso somente será plausível sob a suposição de que o mecanismo físico subjacente será responsável pelas tendências modeladas do nível do mar continuará a funcionar durante o Século XXI. Se este último se mantiver na verdade, será de esperar que a água aquecida importada para o Canal de Moçambique também venha a aumentar a sua temperatura. Portanto, a partir do último pressuposto é razoável esperar que a origem destas águas importadas terá de ser também aquecida, e que a SEC deve ser aquecida devido ao aquecimento global induzido antropogénico.

4.3 O AQUECIMENTO DA SEC

Rouault *et al.* (2010) mostram que o sistema da Corrente das Agulhas está a aquecer a uma taxa de 0.7°C por década e este aumento da intensidade do calor resulta do aquecimento da SEC. Portanto pode presumir-se a partir dos resultados acima referidos de Rouault *et al.* (2009) que as massas superiores água que se encontram no Canal de Moçambique também se tornarão mais quentes, à medida que a SEC aquece, uma vez que a SEC é a principal fonte de água do Canal de Moçambique.

Outra evidência científica para fundamentar uma SEC mais quente é encontrada na climatologia por zonas integrada de Levitus *et al.* (2005) (Figura 3.2). A climatologia da temperatura indicou duas regiões de aquecimento intenso no Oceano Índico Sul, i.e., centralizadas a 43°S e 23°S. Pode assumir-se que o aquecimento a 23°S que atinge a profundidade de 250m ilustra a tendência de aquecimento na Corrente Equatorial Sul que está, em média, localizado perto dos 20°S e é uma corrente superficial semelhante em profundidade à da climatologia da temperatura indicada por Levitus *et al.* (2005). Surge então a questão da causa do aquecimento do SEC.

4.4 TENDÊNCIA DE AQUECIMENTO NA REGIÃO DE ÁGUA QUENTE DENOMINADA INDO-PACÍFICO WARM POOL.

A região de água quente denominada Indo-Pacífico Warm Pool é uma região oceânica caracterizada pela persistência da temperatura da superfície do mar acima dos 28°C, que é o limiar de profunda convecção atmosférica (Wang e Mehta, 2008). A região abrange uma grande área geográfica (Figura 3.7) cobrindo o Pacífico Equatorial Ocidental e o Oceano Índico Equatorial Oriental, e inclui a região do Fluxo Subsuperficial Indonésio De acordo com Wang e Mehta (2008) esta região fornece massas de água das camadas superiores a ambas correntes oceânicas média e anómala. E já que a actual Corrente Equatorial Sul obtém aproximadamente 35% do seu transporte a partir do Fluxo Subsuperficial Indonésio (Speich *et al.*, 2007) pode supor-se que o IPWP fornece um aquecimento crescente à Corrente Equatorial Sul.

Numa experiência efectuada com os modelos circulação geral atmosférica da geração mais recente, forçados com tendências de SST da região de água quente denominada Indo-Pacífico Warm Pool, Han *et al.* (2010) mostram que as tendências de aquecimento de SST durante as

últimas décadas na IPWP são principalmente provocadas pela acção antropogénica. Eles explicam ainda que é o aumento da temperatura do IPWP que está a conduzir o actual rotacional da tensão de cisalhamento do vento sobre o Oceano Índico tropical e sub-tropical, que por sua vez é responsável pela tendência de arrefecimento (descida do nível do mar) e pela tendência de aquecimento (subida do nível do mar) ao longo do Oceano Índico.

Portanto é razoável supor-se que a SEC continuará a aquecer com a continuação do aquecimento global humanamente induzido esperado para o Século XXI.

4.5 O CENÁRIO “ÁGUA MAIS QUENTE” NAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS OCEÂNICAS DO CANAL DE MOÇAMBIQUE

Considerando as tendências ambientais acima referidas para o Oceano Índico, é possível assumir que como o aquecimento global vai continuar mais água quente será transportada pela entrada norte do Canal de Moçambique através do aquecimento da SEC, conduzindo cada vez mais a um cenário de clima oceânico de água “cada vez mais quente” comparativamente à climatologia dos nossos dias. Deve notar-se que o cenário de mudanças climáticas oceânicas de “água mais quente” é estruturado na importante suposição que a SEC permanecerá dentro da sua actual posição média, centrada em torno de 20°S, permitindo o fornecimento de água a partir do ramo Norte da Corrente do Leste de Madagáscar para o Canal de Moçambique.

CAPÍTULO 5: O cenário de mudanças climáticas oceânicas de “água mais fria” para o Canal de Moçambique

5.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta a abordagem sistemática e pressupostos assumidos para a construção de um cenário denominado “água mais fria” no âmbito das mudanças climáticas oceânicas para o Canal de Moçambique.

5.2 RELACIONANDO O NÍVEL DO MAR COM A EXPANSÃO/CONTRAÇÃO TÉRMICA DA CAMADA SUPERIOR DAS MASSAS DE ÁGUA

Tal como no cenário de mudanças climáticas oceânicas de “água mais quente” no capítulo anterior, os resultados do modelo numérico apresentados por Han *et al.* (2010) mostram que também existem 50% de possibilidades de descida do nível do mar no Canal de Moçambique desde 1958 (Figura 2.10). O modelo POP (Figura 3.9) e o LM (Figura 3.10) mostram que o nível do mar desceu entre 0 a -15 cm/século na maior parte do Canal de Moçambique, nos últimos 60 anos. O pressuposto que é feito aqui é, a descida do nível do mar indicada para o Canal de Moçambique por estes modelos é devida à contração térmica das massas de água frias da camada superior.

Este pressuposto também é feito por Han *et al.* (2010), que afirma que as águas frias são mais densas, e desta forma descem o nível do mar.

Para além disso, o resultado do modelo numérico POP mostra a possibilidade de uma descida uniforme do nível do mar no Canal de Moçambique entre -21 e -15 cm/século desde 1958 (Figura 3.9). Os resultados LM MR e LM EXP (Figura 3.10) mostram, contudo, que a região ao longo do Oeste de Madagáscar sofreu uma descida do nível do mar entre 0 e -6 cm/século, enquanto ao longo da costa de Moçambique o nível do mar desceu entre -9 a -15 cm/século. Pode-se assim assumir, apoiados na suposição de que a descida do nível do mar está relacionada com as águas frias à superfície, que os últimos resultados sugerem a possibilidade de existência de um fluxo de uma corrente de água fria perto da costa de Moçambique sob o cenário das mudanças climáticas oceânicas “água mais fria”.

É evidente que a partir dos mapas espaciais de Han *et al.*, (2010) que as águas oceânicas que originam a descida do nível do mar perto da costa de Moçambique resultaram do Giro Tropical do Índico Sul (Figura 3.10). Assim, com base nos resultados do modelo numérico de Han *et al.* (2010), pode assumir-se aqui que a causa da descida do nível do mar no Canal de Moçambique pode ser resultado da advecção térmica de águas mais frias do Giro Tropical Sul da Índia através do acesso Norte no Canal de Moçambique. A Figura 3.10 e mostra claramente a possibilidade da extensão do Giro Tropical do Índico Sul no Canal de Moçambique até ao acesso sul do Canal de Moçambique. O acesso Sul do Canal de Moçambique por sua vez é fechado por uma extensão quente em zona da Corrente Equatorial Sul a partir da ponta de Madagáscar até à Delagoa Bight (Figura 3.10).

5.3 A MIGRAÇÃO PARA O SUL E A INTENSIFICAÇÃO DA CORRENTE EQUATORIAL SUL

Conforme descrito no capítulo dois, o aquecimento global tem induzido a intensificação e migração para o Sul do Giro Subtropical do Oceano Índico Sul (Figura 3.12) (Cai *et al.*, 2007). Uma vez que a corrente periférica do Norte do Giro Subtropical do Oceano Índico Sul é a Corrente Equatorial Sul, assume-se aqui que a SEC também se intensificou e migrou para o Sul. Esta última hipótese apoia-se no modelo numérico de Rouault *et al.* (2009) que claramente sugere que o fornecimento de águas aquecidas da SEC para a Corrente Agulhas aumentou através do Sul de Madagáscar desde os anos 1980. Portanto fica claro que, de acordo com os resultados de Rouault *et al.*'s (2009), desde os anos 1980 o transporte da SEC foi lentamente desviado para Sul de Madagáscar em vez do Norte, devido ao aquecimento global induzido pela acção antropogénica. O desvio crescente da SEC quente a Sul de Madagáscar significa que menos água quente fluirá através do Norte do Canal de Moçambique (Rouault *et al.*, 2009). O desvio de águas quentes para fora do Canal de Moçambique poderá conduzir a ressurgência e advecção térmica de águas mais frias e mais densas para dentro o Canal de Moçambique e consequentemente ao aumento do cenário de mudanças climáticas oceânicas de “águas mais frias” em relação ao cenário de mudanças climáticas oceânicas “água mais quente”.

Espera-se que a intensificação e migração para Sul da SEC e do Giro Tropical do Oceano Índico Sul continuarão no Século 21 (Figura 3.12) (Cai *et al.*, 2007; Rouault *et al.*, 2009). O mecanismo combinado de uma migração para o sul da SEC e a tendência de aumento da massa divergente do Giro Tropical sustenta um cenário de mudanças climáticas oceânicas de “água mais fria” para o Canal de Moçambique.

CAPÍTULO 6: Possíveis impactos do cenário de mudanças climáticas oceânicas de “água mais quente” para a ZEE de Moçambique

6.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta os possíveis impactos do cenário de mudanças climáticas oceânicas de “água mais quente” para a ZEE de Moçambique. Apresenta principalmente as mudanças possíveis para a climatologia oceânica que foram apresentadas no capítulo 2, i.e., a circulação geral, climatologia da temperatura e da salinidade, climatologia do nível do mar e climatologia da clorofila.

6.2 POSSÍVEIS ALTERAÇÕES NA CIRCULAÇÃO GERAL DO CANAL DE MOÇAMBIQUE

O cenário de mudanças climáticas oceânicas de “água mais quente” baseia-se nos principais pressupostos de que a Corrente Equatorial Sul, a principal fonte de abastecimento de águas oceânicas para o Canal de Moçambique, a) não mudará a média da sua posição actual, e b) ficará mais quente em correlação ao aumento do aquecimento global induzido pela acção antropogénica. Isto sugere que a presente circulação geral tácita para o Canal de Moçambique permanecerá na mesma, excepto que águas oceânicas mais quentes serão fornecidas no Canal de Moçambique através da Corrente Oriental do Norte de Madagáscar.

Portanto espera-se que a actual circulação geral permaneça abaixo do cenário das mudanças climáticas oceânicas de “água mais quente”. Esta circulação geral pode ser comparada com a actual experiência durante os eventos climáticos El Niño e +IOD, quando o transporte da Corrente Equatorial Sul é reduzido devido a uma diminuição no ITF (Gordon, 2005; Ridderinkhof *et al.*, 2010).

Está previsto que o fluxo médio através do Canal de Moçambique continuará a ser feito, em grande parte, na forma de vórtices anti-ciclónicos, os quais transportam água quente do Norte do Canal de Moçambique para a entrada Sul, perto da costa de Moçambique.

6.3 EVENTUAIS ALTERAÇÕES DA TEMPERATURA E SALINIDADE DO CANAL DE MOÇAMBIQUE

O cenário de mudanças climáticas oceânicas de “água mais quente” comportará aumentos de temperaturas das massas de água supra equatoriais e sub-equatoriais encontradas actualmente no Canal de Moçambique. Actualmente, as Águas Superficiais Tropicais e Sub-tropicais têm uma amplitude térmica entre os 15°C e os 30°C (Lutjeharms, 2006). Pode esperar-se que sob o cenário de mudanças climáticas oceânicas de “água mais quente” a temperatura máxima possa ultrapassar os 30°C. Desconhece-se qual será o ritmo a que o aquecimento ocorrerá no Canal de Moçambique sob o cenário de mudanças climáticas oceânicas de “água mais quente”, e é extremamente complicado calcular tais tendências sem utilizar um modelo regional combinado atmosfera-oceano.

Um pressuposto sobre o qual o cenário de mudanças climáticas oceânicas de “água mais quente” assentou é que o acréscimo do conteúdo calor contido na SEC resulta da região de água quente do Indo-Pacífico (IPWP) através das passagens Indonésias. É sabido que a IPWP é uma região que recebe a entrada de água doce atmosférica no oceano com um valor líquido de 1-2 m/por ano (Wang and Mehta, 2008, e referências contidas). Este colector líquido de água doce atmosférica poderá por seu turno ser importante para reduzir a salinidade da SEC, o que vai conduzir a um decréscimo da salinidade climatológica no Canal de Moçambique.

6.4 POSSÍVEIS ALTERAÇÕES À CLIMATOLOGIA DO NÍVEL DO MAR NO CANAL DE MOÇAMBIQUE

O cenário de mudanças climáticas oceânicas de “água mais quente” implicará uma elevação do nível da água do mar devido à expansão térmica das massas de água superiores. Os resultados dos modelos numéricos e assimilados de Han *et al.* (2010) fornecem a melhor estimativa de subida do nível do mar no Canal de Moçambique entre 0 a 18cm/Século. Os resultados do modelo numérico HYCOM mostram uma elevação uniforme entre os 0 aos 9cm/Século para todo o Canal de Moçambique desde o acesso Norte (12°S) até ao acesso Sul (26°S) nos últimos 60 anos. Contudo, se a actual circulação geral se assume sob o cenário de mudanças climáticas oceânicas de “água mais quente”, espera-se que venha a manifestar-se no Canal de Moçambique uma distribuição mais heterogénea da subida do nível do mar, à medida que os vórtices de núcleo quente (maior expansão térmica) se propagam normalmente na direcção Sul perto da costa de Moçambique. O retrato do modelo de assimilação SODA é, portanto, mais realista (Figura 3.11) e mostra que a região costeira Moçambicana (sob o cenário de “água mais quente”) pode experimentar valores mais elevados do nível da água do mar, entre 9 a 18cm/Século comparado com 0 a 9cm/Século para o resto do Canal de Moçambique.

Deve notar-se que a alteração do nível do mar apresentada por Han *et al.* (2010) refere-se aos últimos 60 anos, e não projecções para o futuro. No entanto, estas taxas de mudança são de longe as melhores, caso se estabeleça o pressuposto que os mecanismos físicos subjacentes aos resultados de Han *et al.* (2010), continuarão a operar durante o Século XXI.

6.5 POSSÍVEIS ALTERAÇÕES DA CLIMATOLOGIA DA CLOROFILA DO CANAL DE MOÇAMBIQUE

Na actualidade a climatologia da clorofila para o mar aberto no Canal de Moçambique varia sazonalmente entre 0.1 a 0.4 mg Chl.m⁻³ (Omta *et al.*, 2009). É normalmente sabido que as águas oceânicas mais quentes (mais frias) contém menor (maior) concentração de clorofila (e. g., Machu *et al.*, 2005), e portanto é esperado que num cenário de mudanças climáticas oceânicas de “água mais quente” venham a diminuir os valores médios actuais do clima actual da clorofila.

Para o mar aberto da zona ZEE de Moçambique, as concentrações de clorofila podem tornar-se relativamente oligotróficas (baixa concentração de clorofila) e poderão cair para valores entre 0 a 0.1 mg Chl.m⁻³, que é a concentração superficial de clorofila na Corrente Equatorial Sul (Machu *et al.*, 2005). Sem um sistema regional de modelagem climática específico físico-biogeoquímico será difícil determinar se a região da plataforma continental irá experimentar uma diminuição nas

concentrações de clorofila, ou não, durante o cenário de “água mais quente” das mudanças climáticas oceânicas. Conforme mencionado por Lutjeharms (2006) a maior parte da água da plataforma continental deriva do oceano aberto, portanto a probabilidade de diminuição de concentrações de chl-a para as regiões da plataforma continental são uma possibilidade futura. Por sua vez, o cenário de mudanças climáticas oceânicas de “água mais quente” oferecerá um aumento da precipitação na costa levando a maiores quantidades de nutrientes dos principais rios para as plataformas continentais, e portanto a maiores concentrações de clorofila.

CAPÍTULO 7: Possíveis impactos do cenário de mudanças climáticas oceânicas de “água mais fria” na ZEE de Moçambique

7.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta os possíveis impactos do cenário das mudanças climáticas oceânicas de “água mais fria” para a ZEE de Moçambique. O Capítulo apresenta principalmente as mudanças possíveis, como consequência do cenário das mudanças climáticas oceânicas de “água mais fria” para a climatologia oceânica que foi apresentada no Capítulo 2, i.e., a circulação geral, climatologia da temperatura e da salinidade, climatologia do nível do mar e climatologia da clorofila.

7.2 POSSÍVEIS ALTERAÇÕES NA CIRCULAÇÃO GERAL DO CANAL DE MOÇAMBIQUE

O cenário de mudanças climáticas oceânicas de “água mais fria” baseia-se nos principais pressupostos de que a Corrente Equatorial Sul, a) migrará em direcção ao Sul da sua posição média, e b) como o aquecimento global continuará durante o Século XXI, fornecerá todas as suas águas quentes equatoriais do Sul de Madagáscar para o sistema da Corrente das Agulhas. Para além disso, encontra-se bem documentado que a migração para o Sul da Corrente Equatorial Sul coincide com a intensificação e extensão para o Sul do Giro Subtropical do Índico Sul, o qual eleva as águas frias para a superfície do oceano, originando uma descida do nível do mar a Norte e a Leste de Madagáscar (Han *et al.*, 2010; Ridderinkhof *et al.*, 2010; Palastanga *et al.*, 2006; de Ruijter *et al.*, 2004). Três resultados do modelo numérico de Han *et al.* (2010) mostram a possibilidade da extensão em para Sul do Giro Tropical do Indico Sul para dentro do Canal de Moçambique diminuindo assim o nível da água do mar e, portanto, forçando um cenário de mudanças climáticas de “água mais fria” no Canal de Moçambique (Figuras 3.9 e 3.10).

Han *et al.* (2010) é o único estudo científico que contempla algum modelo conceptual da possível circulação dentro do Canal de Moçambique debaixo do cenário de mudanças climáticas de “água mais fria”. Os resultados do modelo numérico apresentam a possibilidade de uma corrente de água fria que se estende desde o Giro Tropical na direcção Sul perto da costa de Moçambique (Figura 3.10).

Dois dos resultados do modelo que sustentam o cenário de mudanças climáticas de “água mais fria” sugerem que a costa Sul Moçambicana a partir de Delagoa Bight até a fronteira Sul Africana-Moçambicana estarão sob influência do aquecimento das águas da Corrente Equatorial Sul, e portanto esta região poderá experimentar um aumento de águas mais quentes fluindo para Sul perto da costa. Não obstante os resultados de Han *et al.* (2010) espera-se que sob o cenário de mudanças climáticas oceânicas de “água mais fria” a circulação média no Canal de Moçambique seja ciclónica, uma vez que esta região será amplamente influenciada pela circulação ciclónica do sistema do Giro Tropical do Oceano Indico Sul.

7.3 POSSÍVEIS ALTERAÇÕES DA TEMPERATURA E SALINIDADE DO CANAL DE MOÇAMBIQUE

O cenário das mudanças climáticas oceânicas de “água mais fria” assume que toda a água superficial quente tropical e sub-tropical será desviada para o Sul de Madagascar e longe da entrada Norte do Canal de Moçambique, removendo efectivamente a maior parte das águas superficiais quentes superiores do Canal de Moçambique. Isto terá um impacto, especialmente sobre a actual climatologia da temperatura e da salinidade da região.

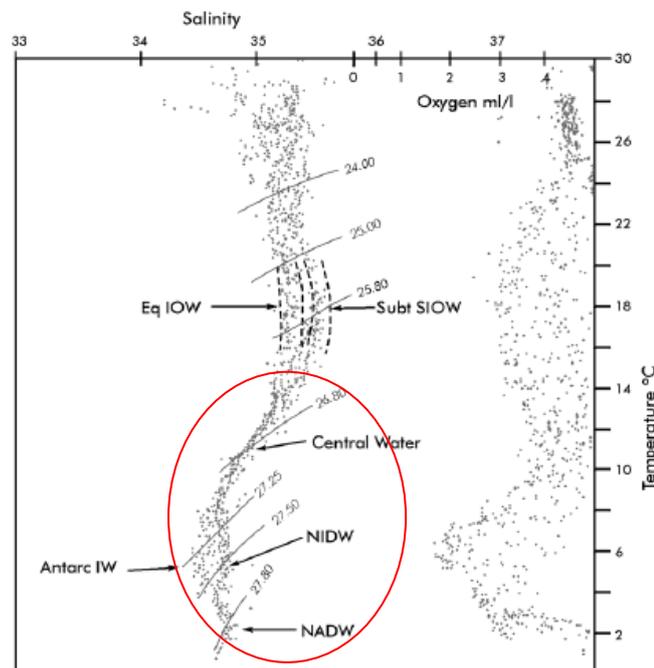


Figura 7.1: A semelhança da Figura 2.6. a linha oval vermelha indica as águas superficiais quentes Tropicais e Subtropicais que se serão deslocadas pela massa Central de Água subjacente sob o cenário de “água mais fria” do clima oceânico.

Assume-se que sob o cenário de mudanças climáticas oceânicas de “água mais fria” ambas águas, Tropicais e Subtropicais, (amplitude térmica = 15° a 30°C) serão removidas das camadas superiores do Canal de Moçambique (Figura 7.1, vermelho oval), o que forçará as águas frias centrais subjacentes (amplitude térmica = 6° ao 15°C) para a superfície como uma extensão do Giro Tropical do Índico Sul. A ressurgência da Água Central irá também introduzir águas menos salgadas na superfície, com salinidades abaixo dos 35,3, do que a média climatológica actual.

Apesar de que as temperaturas da superfície do mar para o Norte e o Centro do Canal de Moçambique poderão baixar para valores em torno dos 15° C, a radiação solar que chega poderá aquecer consideravelmente a camada superior da superfície para acima de 15° C. A parte Sul da costa de Moçambique, a partir de Delagoa Bight até a fronteira Sul-Africana, poderá ainda sentir a influência de águas mais quentes Subtropicais de superfície (amplitude térmica = 16 a 24°C; amplitude de salinidade = 35,3 a 35,7) à superfície, introduzidas desta forma pela Corrente Equatorial Sul através do sul de Madagascar (Han *et al.*, 2010).

7.4 POSSÍVEIS ALTERAÇÕES DO NÍVEL DO MAR NO CANAL DE MOÇAMBIQUE

O cenário das mudanças climáticas oceânicas de “água mais fria” implicará uma diminuição do nível do mar. Isto é apropriadamente retratado em três dos resultados do modelo numérico de Han *et al.*, (2010), que mostram claramente a possibilidade de penetração para Sul do Giro Tropical do Índico Sul no Canal de Moçambique. (Figura 3.9 e 3.10). O Giro Tropical Índico Sul é caracterizado pela ressurgência de águas mais frias e mais profundas para a superfície e pela descida do nível do mar (Schott *et al.*, 2009; Han *et al.*, 2010). Um dos resultados do modelo de Han *et al.*'s (2010) que apoia o cenário de mudanças climáticas de “água mais fria” indica uma descida uniforme do nível do mar entre -9 e -15 cm/Século nos últimos 60 anos para o Canal de Moçambique (Figura 3.9), enquanto os outros dois indicam uma distribuição heterogênea (Figura 3.10). Os dois últimos resultados do modelo mostram que a descida do nível do mar pode ver-se agravada ao longo da costa de Moçambique (-9 a -15 cm/Século) comparado com os (0 a -6cm/Século) ao longo da costa de Madagáscar. Esta última distribuição apoia a ideia conceptual de uma corrente oceânica fria, proveniente do Giro Tropical Índico Sul, fluindo para Sul perto da costa Moçambicana.

A ZEE Sul de Moçambique, desde Delagoa Bight até a fronteira Moçambicana com África do Sul, poderá, no entanto, continuar vulnerável à subida do nível da água do mar devido ao fornecimento e fluxo para Sul das águas aquecidas da Corrente Equatorial Sul estendendo-se para a Corrente das Agulhas.

7.5 POSSÍVEIS ALTERAÇÕES DA CLIMATOLOGIA DA CLOROFILA NO CANAL DE MOÇAMBIQUE

Conforme foi mencionado anteriormente, é comumente sabido que as águas frias oceânicas contêm maiores densidades de clorofila do que as águas aquecidas (e. g., Machu *et al.*, 2005). Desta forma pode-se assumir que no futuro, sob o cenário de mudanças climáticas oceânicas de “água mais fria”, serão encontradas maiores concentrações de clorofila do que na actual climatologia, nas águas superficiais do grande Canal de Moçambique.

Conforme foi apresentado, sob o cenário de mudanças climáticas oceânicas de “água mais fria” a principal entrada de águas frias no Canal de Moçambique poderá derivar do Giro Tropical do Índico Sul estendendo-se para o Canal. As águas mais frias do giro tropical mostram ser mais produtivas do que o resto do Oceano Índico Ocidental Sul (Machu *et al.*, 2005). Machu *et al.* (2005) calcularam entre 3 e 9 mg Chl. m⁻³ a concentração de clorofila no Giro Tropical, a qual se encontra acima da actual climatologia da clorofila do Canal de Moçambique. Além disso, a produção primária entre 100 e 180 gC/m²/ano no Giro tropical é muito maior que a do resto do Oceano Índico Ocidental Sul (Machu *et al.*, 2005). Desta forma, à medida que as águas do Giro Tropical penetram no Canal de Moçambique sob o cenário de mudanças climáticas oceânicas de “água mais fria”, uma maior produção primária e portanto maior concentração de clorofila manifestar-se-ão na maior parte da ZEE de Moçambique.

Novamente a ZEE de Moçambique será uma excepção, a partir de Delagoa Bight até a fronteira Moçambicana com a África do Sul, onde as águas oligotrópicas da extensão da Corrente Equatorial Sul irão conduzir ao aparecimento de águas oceânicas pobres em clorofila na região.

CAPÍTULO 8: Monitoria das Mudanças Climáticas na ZEE de Moçambique

8.1 INTRODUÇÃO

Para monitorar as tendências das mudanças climáticas oceânicas é necessário que seja realizada uma recolha sistemática de dados sensíveis às tendências oceânicas durante períodos de décadas ou mais. Os registos de dados através destes instrumentos devem ser feitos continuamente, sem longos períodos de interrupção. Desta forma, a aquisição e substituição dos instrumentos para a Monitoria das mudanças climáticas oceânicas deverá ser relativamente barata, e a manutenção, reparação e recolha de dados será facilmente acessível desde o continente.

É recomendável que se criem relações com organizações internacionais de monitoria oceânica estabelecidas a longo prazo, p. e. CLIVAR, OdinAfrica, GEOSS, etc., de forma a conjugar-se com programas de monitoria oceânica estabelecidos que têm tido anos de experiência. Tais alianças permitirão estabelecer um intercâmbio robusto de conhecimento especializado profissional, de *know-how* e de novas tecnologias. A importância de tal racionalização com sistemas globais de monitoria oceânica é que através da utilização dos mesmos instrumentos de monitoria global e métodos de análise de dados, os dados recentes de arranque da monitoria do oceano possam ser facilmente extrapolados ou correlacionados com recuo no tempo, permitindo uma maior cobertura espaço-temporal de parâmetros sensíveis às mudanças climáticas oceânicas para a região de interesse.

A racionalização do *modus operandi* do sistema de monitoria do oceano e o intercâmbio de séries de dados temporais são especialmente importantes entre países vizinhos com ZEEs ligadas. Isto é devido principalmente ao facto de que as mudanças climáticas oceânicas serem uma questão climática trans-fronteiriça que não respeitar fronteiras políticas. Tal cooperação entre países vizinhos permitirá uma compreensão mais abrangente das tendências do clima oceânico e da variabilidade espaço-temporal através das fronteiras políticas, e permitirá uma melhor calibração inter- institucional de sistemas de monitoria ambiental, e desta forma dados *in-situ* melhor controlados estarão disponíveis para análise científica. A cooperação na monitoria das mudanças climáticas oceânicas entre estados vizinhos com ZEEs ligadas, assim como com programas globais de monitoria, irão em última análise proporcionar a diminuição de incertezas das tendências climáticas oceânicas em escalas regionais, especialmente para os países em desenvolvimento do Hemisfério Sul. Um aumento de densidade dos dados ambientais de uma região levará a projecções de mudanças climáticas mais precisas que proporcionem estratégias de adaptação e mitigação das mudanças climáticas mais fiáveis para o presente e o futuro.

8.2 MONITORIA DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS OCEÂNICAS DE LONGO PRAZO EXISTENTES NA ZEE MOÇAMBIQUESA

O fluxo de água oceânica através do Canal de Moçambique (fluxo subsuperficial de Moçambique) forma parte de um cinturão termo-halino global de correntes inter-oceânicas que são críticas na compreensão do sistema climático global (Figura 3.4). O fluxo através do Canal de Moçambique tem um impacto imediato nas dinâmicas a jusante da Corrente das Agulhas, que por sua vez

determina a quantidade de água quente salina do Oceano Índico que será injectada no Oceano Atlântico, que por sua vez condiciona o Oceano Atlântico para a convecção profunda no mar da Gronelândia, que cria impacto no sistema climático global (Schott *et al.*, 2009, e referências inclusas). É por esta razão que um sistema de monitoria oceânica foi implantado desde o ano 2000 até á actualidade na região mais estreita do Canal de Moçambique (Ridderinkhof *et al.*, 2010). Os sistemas de monitoria oceânica consistem numa colecção de instrumentos oceanográficos que se encontram ancorados no fundo do oceano, prolongando-se desde a costa de Moçambique até a costa oriental de Madagáscar (ver Ridderinkhof *et al.*, 2010). Estas séries de dados são um dos conjuntos de dados hidrográficos mais longos publicados na literatura científica e têm revelado muitas características oceânicas interessantes ao longo da costa de Moçambique cuja existência não era antes conhecida.

Outros conjuntos de dados de longo prazo que se encontram actualmente disponíveis para a ZEE de Moçambique são dados de satélite recolhidos por vários instrumentos de detecção remota especificamente concebidos para monitorizar a variabilidade oceânica em escalas regionais. Alguns conjuntos de dados começaram no início da década de 1990. Prevê-se que a monitoria dos oceanos por satélite continuará no futuro, com instrumentos de satélites cada vez mais sofisticados com a descoberta de novas tecnologias. Actualmente existe uma variedade de conjuntos de dados disponíveis de instrumentos de monitoria oceânica por satélite os quais poderão ser facilmente acedidos para estudar o clima oceânico na ZEE de Moçambique. Os mesmos incluem dados bio-físicos da MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) do satélite Aqua da NASA e MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer) do satélite da ENVISAT, Agência Espacial Europeia. Encontram-se disponíveis os dados da temperatura do AMSR (Advanced Microwave Scanning Radiometer) do satélite Aqua, que permite medir através das nuvens a temperatura da superfície do mar (SST). Encontram-se também disponíveis dados da altura da superfície do mar (Sea-surface Altura (SSH) obtidos desde Jason, TOPEX/Poseidon, Geosat Follow-On, ERS-2 e altímetros do satélite Envisat que permitem o rastreamento de características de circulação à meso-escala (100 a 300 km de diâmetro) próxima das regiões costeiras.

Dados in-situ de instrumentos de senores de temperatura e de flutuadores da Argo que se encontram actualmente espalhados em todo o oceano global (Figura 8.1) medindo continuamente parâmetros sensíveis às mudanças climáticas oceânicas, e que também fluem através do Canal de Moçambique, estão disponíveis para o estudo das tendências de longo prazo da temperatura, salinidade e velocidade climatológicas no Canal de Moçambique.

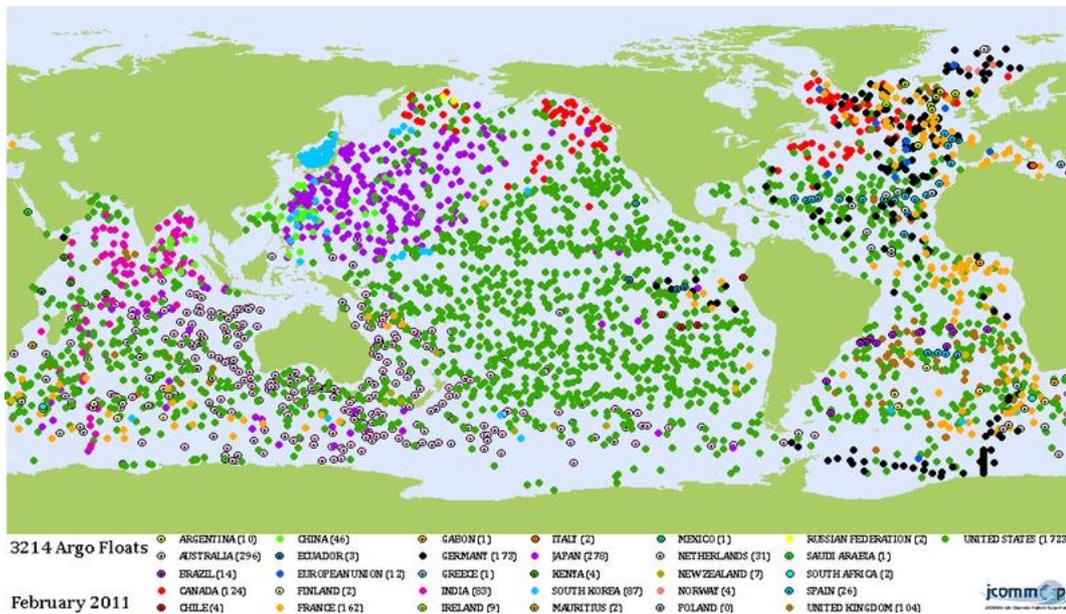


Figura. 8.1: Distribuição espacial das bóias da Argo 3214 a partir de diferentes países no oceano global em Fevereiro de 2011.

O acima referido é somente uma reflexão das muitas características de um esforço global para monitorar continuamente os oceanos e poder avaliar a sua resposta ao aquecimento global.

8.3 MONITORIA SUGERIDA PARA A ZEE DE MOÇAMBIQUE

Dois artigos científicos publicados, i. e., Church *et al.* (2004) e Han *et al.* (2010) destacam a ausência de dados de longo prazo de marégrafos ao longo da costa de Moçambique para a validação das tendências do nível das águas do mar. Para medir as tendências das mudanças climáticas na ZEE de Moçambique, recomenda-se vivamente que sejam utilizados marégrafos para efectuar medições de longo prazo de subidas e descidas do nível do mar. Os marégrafos são relativamente baratos e de fácil manutenção ao longo de décadas. Tal sistema maregráfico de monitoria costeira deverá incluir estações de marégrafos para o sector Norte da ZEE de Moçambique, ao Norte do estreito, para o sector central que abrange os Bancos de Sofala, e para o sector Sul que abrange a zona entre Delagoa Bight até à fronteira Moçambicana com África do Sul. As estações de marégrafos devem estar localizadas perto das cidades portuárias, quando não houver um instituto de pesquisa naval, instituto de navegação ou a presença da Marinha Moçambicana. Esta recomendação é feita para assegurar a operação contínua das estações de monitoria maregráfica por períodos superiores a 20 anos.

Outros parâmetros oceanográficos importantes que precisam de ser medidos por períodos superiores a 20 anos, em conjunto com medições maregráficas são as temperaturas debaixo da água do mar, pelo menos para as regiões da plataforma continental a Norte e a Sul dos estreitos, e da Delagoa Bight para Sul. A monitoria combinada do nível do mar e da temperatura oceânica da ZEE de Moçambique serão um sistema de monitoria razoável para avaliar as mudanças climáticas oceânicas, i. e., de “água mais quente” ou de “água mais fria” durante períodos que se podem prolongar durante décadas. A implementação destas duas medições oceanográficas não é dispendiosa, sendo relativamente barato configurar e manter por longos períodos de tempo,

desta forma é aqui recomendado que estas medições possam formar um sistema inicial de monitoria do clima oceânico para avaliar as mudanças climáticas oceânicas da ZEE de Moçambique sobre as quais poderão ser construídos sistemas de monitoria mais sofisticados (mais onerosos).

8.4 REFINAMENTO ESTATÍSTICO DA MODELAGEM CLIMÁTICA ACOPLADA DO SISTEMA OCEANO-ATMOSFERA

Foram concebidos modelos regionais para o Sudoeste do Oceano Índico e Sudeste do Oceano Atlântico para estudar a troca inter-oceânica do Sul entre os oceanos do Sul da África, e estes modelos não incluem o Fluxo através do Canal de Moçambique. Estes modelos incluem a física do Oceano (e. g., Biastoch *et al.*, 2009 e Rouault *et al.*, 2009), assim como a bio-geoquímica oceânica (e. g. Machu *et al.*, 2005). No entanto, não são modelos climáticos em si mesmos e dependem da climatologia do passado para calcular as tendências climáticas do oceano desde os anos 1960.

Conforme tem sido indicado no presente relatório, para se projectarem mudanças climáticas futuras dentro de escalas de tempo com elevada fiabilidade, serão necessários modelos de climáticos acoplados do sistema oceano-atmosfera para a região de interesse, os quais não se encontram actualmente disponíveis para o Canal de Moçambique. No entanto, trata-se de um empreendimento dispendioso. Mas é o único método científico disponível para efectuar projecções precisas relacionadas com as tendências climáticas oceânicas para o futuro, uma vez que o aquecimento global induzido pela acção antropogénica continua a alterar rapidamente a atmosfera e os oceanos do nosso planeta.

Conclusão

A climatologia oceanográfica e atmosférica, e as tendências climáticas, desde os anos 1960, apresentadas neste relatório para o Oceano Índico Sul, onde a ZEE de Moçambique se encontra situada, fornecem evidências de que as mudanças climáticas para a região são inevitáveis devido ao aquecimento global induzido pela acção antropogénica. Com base na compreensão das dinâmicas inerentes ao Oceano Índico Sul, na climatologia oceanográfica dos últimos 50 anos, e nas tendências climáticas do passado, resultantes dos modelos numéricos, atmosféricos globais e oceânicos, foi possível construir dois futuros cenários plausíveis de mudanças climáticas oceânicas para o Canal de Moçambique.

O cenário de mudanças climáticas oceânicas de “água mais quente” baseia-se na suposição de que a Corrente Equatorial Sul (SEC), a principal fonte de abastecimento de água oceânica da camada superior para o Canal de Moçambique, não vai mudar a sua posição média e que a SEC está a aquecer em correlação com as tendências do aquecimento global.

O cenário de mudanças climáticas oceânicas de “água mais fria” baseia-se na suposição de que a Corrente Equatorial Sul migrará para sul da sua actual posição média, e que as águas quentes equatoriais da Corrente Equatorial Sul serão desviadas para longe do acesso norte do Canal de Moçambique, abastecendo inversamente a Corrente das Agulhas através do Sul de Madagáscar.

Com base no facto de que Rouault *et al.* (2009) mostram que a água cada vez mais quente da SEC está a ser desviada para fora do Canal de Moçambique, está aqui implícito que o cenário de mudanças climáticas oceânicas de “água mais fria” possa ser mais provável do que o cenário de mudanças climáticas oceânicas de “água mais quente”.

A falta de modelos climáticos regionais para a região, os quais deveriam incorporar os efeitos ambientais combinados devido ao aquecimento global, p.e., as tendências da da região de águas quentes do Indo-Pacífico (IPWP), a migração para Sul e a intensificação do Giro Tropical do Índico Sul, não permitem que sejam efectuadas projecções mais precisas das mudanças climáticas oceânicas para o Canal de Moçambique. Estes modelos experimentais fornecidos com dados dos oceanos regionais específicos de longo termo, sensíveis às mudanças em escalas de tempo de décadas, é o único método que será capaz de dar uma projecção precisa dos climas futuros do Canal de Moçambique, permitindo uma maior certeza das estratégias de adaptação e mitigação das mudanças climáticas a nível regional.

Bibliografia:

- Beal, L. M., and H. L. Bryden (1997) Observations of an Agulhas Undercurrent. *Deep Sea Res. Part I*, 44(9–10), 1715–1724.
- Biastoch, A., and W. Krauß (1999) The role of mesoscale eddies in the source regions of the Agulhas Current. *Journal of Physical Oceanography*, 29, 2303-2317.
- Biastoch, A., Böning, C. W., Schwarzkopf, F. U., and J. R. E. Lutjeharms (2009) Increase in Agulhas leakage due to poleward shift of Southern Hemisphere westerlies. *Nature*, vol. 426, 495-499.
- Boge, F. I. (2006) Time Series analysis of the Chlorophyll content in the Mozambique Channel using GIS and remote sensing. Master's Thesis in Geography, Department of Geography, University of Bergen, pp 157.
- Cai, W. (2006) Antarctic ozone depletion causes an intensification of the Southern Ocean super-gyre circulation. *Geophysical Research Letters*, 33, L03712, doi:10.1029/2005GL024911.
- Cai, W., Cowan, T., Dix, M., Rotstayn, L., Ribbe, J., Shi, G. and S. Wijffels (2007) Anthropogenic aerosol forcing and the structure of temperature trends in the southern Indian Ocean, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L14611, doi:10.1029/2007GL030380.
- Cai, W., Cowan, T., Arblaster, J. M. and S. Wijffels (2010) On potential causes for an underestimated global ocean heat content trend in CMIP3 models. *Geophysical Research Letters*, 37, L17709, doi:10.1029/2010GL044399
- Church, J.A., White, N. J., Coleman, R., Lambeck, K., and J.X. Mitrovica (2004) Estimates of the regional distribution of sea-level rise over the 1950 to 2000 period. *Journal of Climate*, 17 (13), 2609-2625
- de Ruijter, W. P. M., Ridderinkhof, H., Lutjeharms, J. R. E., Schouten, M. W. And C. Veth (2002) Observations of the flow in the Mozambique Channel. *Geophys. Res. Lett.* 29, 1401–1403.
- de Ruijter, W. P. M., van Aken, H. M., Beier, E. J., Lutjeharms, J. R. E., Matano, R. P. and M. W. Schouten (2004) Eddies and dipoles around South Madagascar: formation, pathways and large-scale impact. *Deep-Sea Research I*, 51, 383-400.
- de Ruijter, W. P. M., Ridderinkhof, H. and M. W. Schouten (2005) Variability of the southwest Indian Ocean. *Philosophical transactions of the Royal Society A*, 363, 63-76.
- Gordon, A. (2005) Large-scale effects of the ITF. *Oceanography Vol.* 18(4), 16-27.
- Han, W., Meehl, G. A., Rajagopalan, B., Fasullo, J. T., Hu, A., Lin, J., Large, W. G., Wang, J., Quan, X, Trenary, L. L., Willcraft, A., Shinoda, T., and S. Yeager (2010) Patterns of Indian Ocean sea-level change in a warming climate. *Nature Geoscience*, 3, 546-550. Doi:10.1038/NG BO 901.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2007) *Climate Change 2007, The Physical Science Basis*. Eds: Solomon, S., Qin, D., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M. And H. L. Miller. Cambridge University Press.
http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/contents.html

- Lamont, T., Roberts, M. J., Barlow, R. G., Morris, T., and M. A. van den Berg (2010) Circulation patterns in the Delagoa Bight, Mozambique, and the influence of deep ocean eddies. *African Journal of Marine Science*, 32 (3), 553-562.
- Levitus, S., Antonov, J., and T. Boyer (2005) Warming of the world ocean, 1955-2003. *Geophysical Research Letters*, 32, L02604, doi:10.1029/2004GL021592.
- Lutjeharms, J. R. E. and A. Jorge da Silva, 1988. The Delagoa Bight eddy. *Deep-Sea Res.*, 35, 619-634.
- Lutjeharms, J. R. E. (1991) The temperature/salinity relationships of the South West Indian Ocean. *SA Geographer*, 18 (1\2), 15-30.
- Lutjeharms, J. R. E. (2006) The coastal oceans of south-eastern Africa. In: *The Sea*, Volume 14B, (eds) A. R. Robinson and K. H. Brink, Harvard University Press, Cambridge, MA, &83-834.
- Machu, E, Biastoch, A., Oschlies, A., Kawamiya, M., Lutjeharm, J. R. E., and V. Garcon (2005) Phytoplankton distribution in the Agulhas system from a coupled physical-biological model. *Deep-Sea Research I*, 52, 1300-1318.
- Omta, A. W., Llida, J., Garcon, V., Kooijman, S. A. L. M. and H. A. Dijkstra (2009) The interpretation of satellite chlorophyll observations: The case of the Mozambique Channel. *Deep-Sea Research I*, (56), 974-988.
- Palastanga, V., Van Leeuwen, P. J., and W. P. M. De Ruijter (2006) A link between low frequency meso scale eddy variability around Madagascar and the large scale Indian Ocean variability. *J. Geophys. Res.*, 111, C09029, doi:10.1029/2005JC003081
- Ridderinkhof, H. and W. P. M. de Ruijter (2003) Moored current observations in the Mozambique Channel. *Deep-Sea Res. II* 50, 1933-1955.
- Ridderinkhof, H., van der Werf, P. M, Ullgren, J. E., van Aken, H. M., van Leeuwen, P. J., and W. P. M. de Ruijter (2010) Seasonal and interannual variability in the Mozambique Channel from moored current observations. *J. Geophys. Res.*, 115, C06010, doi:10.1029/2009JC005619.
- Ridgway, K.R. and Dunn, J.R. (2007) Observational evidence for a Southern Hemisphere oceanic 'Supergyre'. *Geophysical Research Letters*, 34: L13612, doi:10.1029/2007GL030392
- Roemmich, D. (2007) Physical Oceanography: Super spin in the southern seas. *Nature*, 449, 34-35.
- Rouault, M., Penven, P. And B. Pohl (2009) Warming in the Agulhas Current system since the 1980's. *Geophysical Research Letters*, 36, L12602, doi: 10.1029/2009GL037987.
- Saenko, O. A., Fyfe, J. C. and M. H. England (2005) On the response of the oceanic wind-driven circulation to atmospheric CO₂ increase. *Climate Dynamics*, 25, 415-426.
- Sætre, R. and A. Jorge da Silva (1984) The circulation of the Mozambique Channel. *Deep-Sea Res.*, 31, 485-508.
- Schott, F. A., Shang-Ping, X. and J. P. McCreary, jr. (2009) Indian Ocean Circulation and Climate variability. *Reviews of Geophysics*, 47, RG1002, pp46.
- Schouten, M. W., de Ruijter, W. P. M., van Leeuwen, P. J. and H. Ridderinkhof (2003) Eddies and variability in the Mozambique Channel. *Deep-Sea Res. II* 50, 1987-2003.

- Schumann, E. H. (2005) The coastal ocean off southeast Africa, including Madagascar. In: Global coastal oceans, the regional studies and syntheses, (eds) K. H. Brink and A. R. Robinson, *Science*, p568.
- Siedler, G., Rouault, M., Biastoch, A., Backeberg, B., Reason, C. J. C. and J. R. E. Lutjeharms (2009) Modes of the southern extension of the East Madagascar Current. *J. Geophys. Res.*, 114, C01005, doi:10.1029/2008JC004921.
- Slutz, R.J., S.J. Lubker, J.D. Hiscox, S.D. Woodruff, R.L. Jenne, P.M. Steurer, and J.D. Elms, 1985: 'Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set; Release 1', Climate Research Program, Boulder, Colorado.
- Speich, S., Blanke, B. and W. Cai (2007) Atlantic meridional overturning circulation and the Southern Hemisphere supergyre. *Geophysical Research Letters*, 34, L23614, doi:10.1029/2007GL031583.
- Tew-Kai E., and F. Marsac (2008) Patterns of variability of sea-surface chlorophyll in the Mozambique Channel: a quantitative approach. *J Mar Syst* 77, 77–88.
- Toggweiler, J. R. and J. Russell (2008) Ocean circulation in a warming climate. *Nature*, 451 (17), 286-288.
- Van Aken, H. M., H. Ridderinkhof, and W. P. M. de Ruijter (2004) North Atlantic deep water in the south–western Indian Ocean, *Deep Sea Res. Part I*, 51(6), 755–776, doi:10.1016/j.dsr.2004.01.008
- Wang, H., and V. M. Mehta (2008) Decadal Variability of the Indo-Pacific Warm Pool and Its Association with Atmospheric and Oceanic Variability in the NCEP-NCAR and SODA Reanalyses. *Journal of Climate*, 21, 5545-5565.
- Weimerskirch, H., Le Corre, M., Jaquemet, S., Potier, M., and F. Marsac (2004) Foraging strategy of a top predator in tropical waters : great frigatebirds in the Mozambique Channel. *Marine Ecology Progress Series* 275, 287–308.