



Universidade Federal do Rio Grande

Instituto de Oceanografia

Laboratório de Estudos dos Oceanos e Clima - LEOC



Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica

Sobre a variabilidade da Energia Cinética Turbulenta (EKE) nas correntes de contorno oeste dos giros subtropicais do Hemisfério Sul

CAIO SAMPAIO FONTELES

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica, como parte dos Requisitos para obtenção do Título de Mestre.

Orientador: Prof.: Dr. Mauricio Magalhães Mata

Rio Grande – RS

Setembro – 2012



ATA ESPECIAL P/DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO - 013/2012

Às 09:30 horas do dia 14 de setembro do ano de dois mil e doze, na Sala de 1207 – Pav. 1 – FURG/Carreiros, reuniu-se a Comissão Examinadora da Dissertação de **MESTRADO** do Acad. **Caio Sampaio Fonteles** composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. Mauricio Magalhães Mata – Orientador/Presidente – IO/FURG, Prof. Dr. José Luiz Lima de Azevedo – IO/FURG e Dr. Leandro Calado-IEAPM/MARINHA DO BRASIL. Título da Dissertação: “**SOBRE A VARIABILIDADE DA ENERGIA CINÉTICA TURBULENTA (EKE) NAS CORRENTES DE CONTORNO OESTE DOS GIROS SUBTROPICAIS DO HEMISFÉRIO SUL**”. Dando início à reunião, o Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica, Prof. Dr. Mauricio Magalhães Mata, agradeceu a presença de todos e fez a apresentação da Comissão Examinadora. Logo após esclareceu que o candidato terá um tempo de 45 a 60 min. para explanação do tema, e cada membro da Comissão, um máximo de 30 min. para perguntas. A seguir, passou à palavra ao candidato que apresentou o tema e respondeu às perguntas formuladas. Após ampla explanação a Comissão reuniu-se na Sala da Secretária da Coordenação do Programa, para discussão do conceito a ser atribuído ao candidato. Durante este encontro ficou estabelecido o que segue: As sugestões de todos os membros da Banca Examinadora, que seguem em pareceres em anexo, foram aceitas pelo orientador/candidato para incorporação na versão final da Dissertação. Finalmente a Comissão Examinadora considerou o candidato **APROVADO**, por unanimidade. Nada mais havendo a tratar, foi lavrada a presente ata que após lida e aprovada, será assinada pela Comissão Examinadora, pelo candidato e pelo Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica.

Prof. Dr. José Luiz Lima de Azevedo

Prof. Dr. Mauricio Magalhães Mata
Presidente

Dr. Leandro Calado

Acad. Caio Sampaio Fonteles

Prof. Dr. Mauricio Magalhães Mata
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Oceanografia Física, Química e Geológica

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer em primeiro lugar a minha Mãe e minha Mãe Nara, pelo privilégio de ter duas mães! Pela educação, carinho e amor que sempre me deram que moldou o que eu sou hoje e o que eu serei em toda a minha vida. Além do apoio que sempre deram em todas as decisões que tomei na minha vida, nem sempre tão convencionais, mas que permitiram um amadurecimento e crescimento pessoal que não tem nada que pague. Vocês são as pessoas mais importantes da minha vida. À minha família por todo o amor e carinho que sempre tiveram comigo, mesmo estando distante a maior parte do tempo, quando estamos juntos é sempre muito bom e nem parece que ficamos tanto tempo distante!

Ao meu Orientador Mauricio por ter aceitado me orientar, num já distante ano de 2006, e pela amizade, ensinamentos, conselhos, e mesmo cobranças que foram fundamentais na minha formação pessoal e acadêmica.

Aos membros da banca, Leandro Calado e Zé Luis por terem aceitado ler e contribuir para melhoria deste trabalho. Em especial ao Zé Luis pelas ótimas conversas, quase devaneios, sobre energia, dinâmica dos oceanos, mesoescala, vórtices e mesmo filmes!

Aos amigos Fujita e Marina que ajudaram um quase analfabeto funcional a escrever esta dissertação que espero ter ficado melhor do que a monografia, sem falar da amizade de anos de laboratório e cassino!

Aos amigos do LEOC que sempre ajudaram em assuntos acadêmicos ou não. Pelas conversas no lab, nos churrascos, LEOC-CAFÉ ou mesmo no Larus. Em especial aos que dividiram sala comigo Mathias, Berger, Gabi, Lolo, Natal, R. Kerr que sempre deixaram a ida pro lab mais divertida.

Aos amigos do Cassino Helô, Catita, Jurema, Hulk, Tchê, Elef. Em especial ao Chris e ao Itu verdadeiros irmãos durante o tempo de cassino. A família do Paola Lumi, Laurinha e Colors. Aos amigos Luti, Bahia, Camilalá, Benja, Maira, Gobel, Adriano, Bruninho e muitos outros pela convivência e ajudas nesses anos de Cassinão.

Ao Programa de Pós-Graduação em Oc. Física, Química e Geológica e ao CNPQ pelo financiamento do meu Mestrado. Ao Projeto AVISO e ao CPC-NOAA pela disponibilização dos dados utilizados neste trabalho.

Sumário

RESUMO	VI
ABSTRACT	VII
LISTA DE FIGURAS.....	VIII
LISTA DE ACRÔNIMOS	XI
1 - INTRODUÇÃO:	1
1.1 - O HEMISFÉRIO SUL E SEUS OCEANOS	1
1.2.1 - A Corrente do Brasil	3
1.2.2 - A Corrente das Agulhas:	5
1.2.3 - A Corrente Leste Australiana	7
1.3 - ENERGIA CINÉTICA TURBULENTA (<i>EDDY KINETIC ENERGY, EKE</i>)	8
1.4 MODOS DE VARIABILIDADE CLIMÁTICA.....	10
1.4.1 – MODO ANULAR SUL (<i>SOUTHERN ANNULAR MODE, SAM</i>):	11
1.4.2 EL NIÑO – OSCILAÇÃO SUL (<i>EL NIÑO – SOUTHERN OSCILLATION, ENSO</i>).....	12
1.5 - OBJETIVOS	14
2 - MATERIAL E MÉTODOS:	15
2.1 - DADOS	15
2.2 - ANÁLISE DE VARIABILIDADE ESPACIAL.....	18
2.2.1 - Análise de Composições.....	18
2.3 - ANÁLISE DE VARIABILIDADE TEMPORAL:.....	19
2.3.1 - Regressão Linear	20
2.3.2 - Análise de Ondeletas (<i>Wavelet Analysis</i>):.....	21
2.3.3 - Correlação cruzada.....	22
3 – RESULTADOS.....	23
3.1 – CONFLUÊNCIA BRASIL-MALVINAS	23
3.1.1 - Variabilidade espacial	23
3.1.2 - Variabilidade Temporal da EKE	26
3.2 – CORRENTE DAS AGULHAS	30
3.2.1 – Variabilidade Espacial.....	30
3.2.2 – Variabilidade Temporal da EKE	34
3.3 – CORRENTE LESTE AUSTRALIANA	37
3.3.1 – Variabilidade Espacial.....	37

3.3.2 – Variabilidade Temporal da EKE	40
3.4 - RELAÇÕES ENTRE A EKE E OS MODOS DE VARIABILIDADE CLIMÁTICA	44
4 - DISCUSSÃO	51
4.1 – CONFLUÊNCIA BRASIL-MALVINAS	51
4.2 – CORRENTE DAS AGULHAS	55
4.3 – CORRENTE LESTE AUSTRALIANA	59
4.4 - RELAÇÕES ENTRE A EKE E OS MODOS DE VARIABILIDADE CLIMÁTICA	63
5 – CONCLUSÕES	66
6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:	69

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo estudar a variabilidade da energia cinética turbulenta (EKE) de três sistemas de corrente de contorno oeste do hemisfério Sul (HS): a Confluência Brasil-Malvinas (CBM), a Corrente das Agulhas (CA) e a Corrente Leste Australiana (CLA). Para a estimativa da EKE, foram utilizados dados altimétricos de anomalia de velocidade geostróficas e, ao mesmo tempo, beneficiou-se do produto altimétrico de topografia oceânica (MADT) para investigar as feições oceanográficas das regiões, entre 1992 e 2011. A variabilidade espacial foi investigada a partir de análises de composições em diferentes estágios energéticos da EKE (baixa, média e alta). Foram utilizadas tendências lineares, análises espectrais e de ondeletas para avaliar a variabilidade temporal da EKE, ainda foram feitas correlações cruzadas em relação a índices de modos de variabilidade climática. No geral, ficou marcado que no regime de baixas energias as correntes atingem sua maior extensão ao sul, no caso da Corrente do Brasil (CB) e da CLA, e a oeste na CA. O cenário mais energético ficou marcado pela presença de vórtices liberados pelas correntes e retração dos respectivos primeiros meandros de retroflexão. A EKE teve tendências de aumento significativas para a CBM e a CA, com 0,23 e 0,3 $\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$ por mês desde 1992, sendo na primeira um aumento mais monotônico ao longo do período. Na CBM, o aumento da EKE ocorreu provavelmente por duas causas: (i) o aumento da atividade de mesoescala relacionada a vórtices e (ii) devido a uma variabilidade interanual da posição média da CBM, relacionada com a intensificação dos campos de ventos de larga escala do HS. Na CA, a EKE teve aumentos significativos principalmente por dois períodos específicos, 1999-2001 e 2006-2008, onde devido à combinação do ciclo anual com dois modos de variabilidade interanual na região, SAM e ENSO, causaram uma migração anômala da posição da retroflexão para leste. A análise espectral e correlações cruzadas mostraram que a EKE está correlacionada com o ENSO, sendo uma evidência da modulação da mesoescala desta região por este modo de variabilidade climática. A CLA não mostrou tendências significativas na série de EKE ao longo dos últimos 18 anos. As principais frequências de variabilidades da EKE na CLA foram as entre 3 e 4 meses e a de 1 ano, relacionadas com os vórtices liberados pelo primeiro meandro da retroflexão e variação sazonal da posição da retroflexão, respectivamente. As frequências de modos como SAM e ENSO, apesar de não significativas, parecem ter papel na modulação da EKE na região da CLA, no entanto a alta atividade de mesoescala na região pode ter dificultado a identificação dessas modulações.

Palavras-chave: correntes de contorno oeste, EKE, CA, CLA, CBM, SAM, ENSO.

ABSTRACT

This work aimed to study the variability of eddy kinetic energy (EKE) at three western boundary current systems of the Southern Hemisphere (SH): the Brazil-Malvinas Confluence (BMC), the Agulhas Current (AC) and the East Australian Current (EAC). Data from geostrophic velocity anomalies derived from satellite altimetry measurements between 1992 and 2011 were used in order to estimate EKE, making use of Mean Absolute Dynamic Topography (MADT) to investigate the regions oceanographic features. Spatial variability was assessed from composite analysis in different EKE energetic stages (low, medium and high). Linear trends, spectral and wavelet analysis were used to assess the temporal variability of EKE. Moreover, EKE correlations with climate variability modes were also performed. Overall, it was evident that during low energy regimes the Brazil Current (BC) and the EAC reached their southernmost excursion, and the southern branch of the AC its westernmost position. The highest energetic stage was marked by the currents eddy shedding and retraction of first retroflection meanders. The EKE presented significant increasing trends for the AC and the BMC, marked by 0.3 and 0.23 $\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$ per month since 1992, the latter presenting an generally monotonic increase over the studied period. At the BMC, the EKEs increase probably occurred for two reasons: (i) mesoscale activity increase associated with eddies and (ii) mean BMC position interannual variability, caused by large scale wind fields intensification over the SH. At the AC, the EKE presented significant increase mainly during two specific periods, 1999-2001 and 2006-2008. That may have happened due to a combination of the local annual cycle variability with two modes of interannual variability, SAM and ENSO, which caused an anomalous migration of the retroflection position to east. The spectral analysis and cross-correlations showed that the EKE is correlated with ENSO, being an evidence that this climate variability mode may modulate mesoscale activity at the AC area. The EAC EKE series showed no significant trends over the last 18 years. In this region, the main EKE variability frequencies were of 3-4 months and 1 year, being related to eddy shedding by the first retroflection meander and to seasonal variation of the retroflection position, respectively. SAM and ENSO frequency modes, although not significant, appear to play a role in the modulation of EKE in the EAC region. However, the high mesoscale activity in that region in relation to the mean field may have hindered the identification of these modulations.

Keywords: western boundary currents, EKE, AC, EAC, BMC, SAM, ENSO.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Modelo esquemático de circulação oceânica. Fonte: Talley et al. (2011) modificada de Schmitz (1996b).....	1
Figura 2. Esquema da circulação superficial na região da CBM. Fonte: Teixeira et al. (2009).....	5
Figura 3. Esquema da circulação superficial na região da Corrente das Agulhas. Fonte: Schmitz (1996a).	6
Figura 4. Esquema da circulação superficial na região da CLA. Fonte: Mata et al. (2006).	7
Figura 5. Distribuição de EKE Global com filtro de passa-alta (300 dias). Fonte: Jia et al. (2011b).....	9
Figura 6. Mapa da média de MADT (cm) para a região da CBM compreendendo todo o período analisado. As linhas em preto representam as isóbatas de 500, 1000 e 4000 m.	17
Figura 7. Mapa da média de MADT (cm) para a região da CA compreendendo todo o período analisado. As linhas em preto representam as isóbatas de 500, 1000 e 3000 m.	17
Figura 8. Mapa da média de MADT (cm) para a região da CLA compreendendo todo o período analisado. As linhas em preto representam as isóbatas de 500, 1000 e 4000 m.	18
Figura 9. Série de EKE da CA com marcadores representando os campos escolhidos para cada composição de energia.	19
Figura 10. EKE ($\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$) média na região da CBM para todo o período analisado, entre OUT/1992 até JAN/2011. As linhas em magenta denotam as isóbatas de 500, 1000 e 4000 m.	24
Figura 11. Composições de EKE ($\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$) na região da CBM. A) cenário de baixa energia (valores inferiores à média menos um desvio-padrão (d.p.)), B) cenário de média energia (valores superiores à média menos um d.p. e inferiores à média mais um d.p.), C) cenário de alta energia (valores superiores à média mais um d.p.) e D) Diferença entre o cenário de alta e baixa.	25
Figura 12. Composições de MADT (cm) na região da CBM. A) cenário de baixa energia, B) cenário de média energia, C) cenário de alta energia e D) Diferença entre o cenário de alta e baixa.	26
Figura 13. Séries de EKE ($\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$) para região da CBM.	27

Figura 14. Tendência linear para CBM. A linha em cinza representa a série filtrada interanual da EKE e em preto o ajuste linear obtido pela regressão linear. Equação com base numa variação diária.	28
Figura 15. Análise de ondeletas para região da CBM. a) série com médias mensais normalizadas, b) espectro de energia da ondeleta em $\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$ (linha preta representa o cone de influência e contornos pretos o nível de significância de 5%), c) análise espectral da série e d) a integração da energia para cada ponto da série para a banda de 2-6 meses (mesoescala). Linhas tracejadas representa nível de confiança de 95%.	29
Figura 16. EKE ($\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$) média na região da CA para todo o período analisado, entre OUT/1992 até JAN/2011. As linhas em magenta denotam as isóbatas de 500, 1000 e 3000 m.	30
Figura 17. Composições de EKE ($\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$) na região da CA. A) cenário de baixa energia (valores inferiores à média menos um desvio-padrão (d.p.)), B) cenário de média energia (valores superiores à média menos um d.p. e inferiores à média mais um d.p.), C) cenário de alta energia (valores superiores à média mais um d.p.) e D) Diferença entre o cenário de alta e baixa.	32
Figura 18. Composições de MADT (cm) na região da CA. A) cenário de baixa energia, B) cenário de média energia, C) cenário de alta energia e D) Diferença entre o cenário de alta e baixa.	33
Figura 19. Séries de EKE ($\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$) para região da CA.	34
Figura 20. Tendência linear para CA. A linha em cinza representa a série filtrada interanual da EKE e em preto o ajuste linear obtido pela regressão linear. Equação com base numa variação diária.	35
Figura 21. Análise de ondeletas para região da CA. Legenda igual à figura 15.	36
Figura 22. EKE ($\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$) média na região da CLA para todo o período analisado, entre OUT/1992 até JAN/2011. As linhas em magenta denotam as isóbatas de 500, 1000 e 4000 m.	37
Figura 23. Composições de EKE ($\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$) na região da CLA. A) cenário de baixa energia (valores inferiores à média menos um desvio-padrão (d.p.)), B) cenário de média energia (valores superiores à média menos um d.p. e inferiores à média mais um d.p.), C) cenário de alta energia (valores superiores à média mais um d.p.) e D) Diferença entre o cenário de alta e baixa.	39
Figura 24. Composições de MADT (cm) na região da CLA. A) cenário de baixa energia, B) cenário de média energia, C) cenário de alta energia e D) Diferença entre o cenário de alta e baixa.	40
Figura 25. Séries de EKE ($\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$) para região da CLA.	41

Figura 26. Tendência linear para CLA. A linha em cinza representa a série filtrada interanual da EKE e em preto o ajuste linear obtido pela regressão linear. Equação com base numa variação diária.	41
Figura 27. Análise de ondeletas para região da CLA. Legenda igual à figura 15.	43
Figura 28. Séries filtradas dos índices dos modos de variabilidade climática em cinza e os ajustes lineares em preto, os índices são adimensionais.	45
Figura 29. Séries filtradas e normalizadas de EKE da CBM e dos índices dos modos de variabilidade climática (à esquerda) e correlações cruzadas das séries de médias mensais (à direita), as linhas em azul representam o intervalo de confiança de 95%.	46
Figura 30. Séries filtradas e normalizadas de EKE da CA e dos índices dos modos de variabilidade climática (à esquerda) e correlações cruzadas das séries de médias mensais (à direita), as linhas em azul representam o intervalo de confiança de 95%.	48
Figura 31. Séries filtradas e normalizadas de EKE ($\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$) da CLA e dos índices dos modos de variabilidade climática (à esquerda) e correlações cruzadas das séries de médias mensais (à direita), as linhas em azul representam o intervalo de confiança de 95%.	50

LISTA DE ACRÔNIMOS

AMOC – Atlantic Meridional Overturning Circulation

CA – Corrente das Agulhas

CB – Corrente do Brasil

CBM - Confluência Brasil-Malvinas

CCA – Corrente Circumpolar Antártica

CCO – Corrente de Contorno Oeste

CLA – Corrente Leste Australiana

CM – Corrente das Malvinas

CPC – Climate Prediction Center

CRA – Corrente de Retorno das Agulhas

DT – Delayed Time

EKE – Energia Cinética Turbulenta

ENSO – El Niño Oscilação Sul

HS – Hemisfério Sul

MADT – Mean Absolute Dynamic Topography

MKE – Energia Cinética Média

NAO – Oscilação do Atlântico Norte

NOAA – National Oceanographic and Atmospheric Agency

NPO – Oscilação do Pacífico Norte

OP – Oceano Pacífico

SAM – Modo Anular Sul

SLA – Sea Level Anomaly

SOI – Índice de Oscilação Sul

VA – Vórtices das Agulhas

1 - INTRODUÇÃO:

1.1 - O HEMISFÉRIO SUL E SEUS OCEANOS

A Terra possui aproximadamente 71% da sua superfície coberta por água. No entanto, essa cobertura não é igualmente distribuída entre os dois hemisférios. Enquanto no hemisfério Norte a proporção entre água e continente é de 1,5:1, no hemisfério Sul (HS) é de 4:1 (e.g., Talley et al., 2011). Além dessa maior quantidade de água na parte austral no planeta, outras características únicas conferem grande importância a essa porção dos oceanos, como a comunicação e distribuição de águas entre todas as bacias oceânicas através da Corrente Circumpolar Antártica (CCA). A Figura 1 mostra um esquema simplificado da circulação oceânica que será mais detalhada posteriormente.

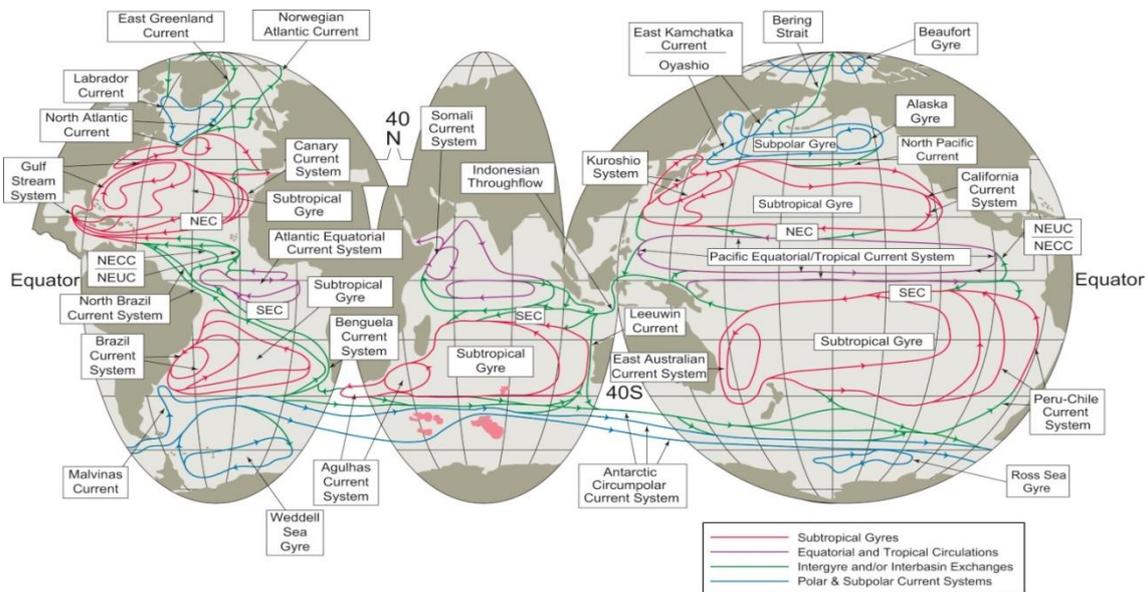


Figura 1. Modelo esquemático de circulação oceânica. Fonte: Talley et al. (2011) modificada de Schmitz (1996b).

A ausência de grandes barreiras topográficas, aliada a fortes gradientes de pressão atmosféricos permitem a formação de fortes campos de ventos no HS, os ventos de oeste (*westerlies*). Estes campos são importantes forçantes de processos oceanográficos, como a CCA e os processos de convergências e ressurgências os quais, em determinadas situações, resultam na formação de diversas massas de água que serão distribuídas e ocuparão diferentes níveis dos oceanos (e.g., Talley et al., 1999; Talley, 2008). A intensificação e o deslocamento latitudinal dos campos de pressão atmosféricos no HS podem causar

modificações na circulação atmosférica, oceânica e até mesmo na extensão de gelo marinho da Antártica (Hall & Visbeck, 2002).

Além do Oceano Austral, que ocupa todo o entorno do continente Antártico até a latitude da Frente Subtropical, entre 30°S a 46°S (Orsi et al., 1995), outras três bacias oceânicas compõem o HS. Dentre estas, encontra-se a bacia do Oceano Atlântico Sul, cujas principais correntes associadas ao giro subtropical são: a Corrente de Benguela, corrente de contorno leste, a Corrente Sul Equatorial, a Corrente do Brasil (CB) e a Corrente do Atlântico Sul, fechando o giro subtropical (e.g., Tomczak & Godfrey; Schmitz, 1996 e Talley et al., 2011). A Corrente das Malvinas, um braço da CCA, interage com a CB e forma uma região muito dinâmica e importante biologicamente (e.g., Tomczak & Godfrey, 1994; Moore & Abbott, 2000), a Confluência Brasil-Malvinas (CBM).

O setor do Oceano Índico, o qual apresenta a menor das bacias oceânicas do HS, possui vários aspectos singulares, como a comunicação com o Oceano Pacífico através da Indonésia, e com o Atlântico através da retroflexão das Agulhas. Outro ponto único é o regime das Monções, que modifica fortemente a dinâmica da circulação oceânica no setor norte deste oceano. Na porção sul do mesmo, as principais correntes são a Corrente Sul Equatorial, a Corrente das Agulhas (CA), a Corrente de Retorno das Agulhas (CRA) e a Corrente do Índico Sul (e.g., Tomczak & Godfrey; Schmitz, 1996 e Talley et al., 2011). A corrente de contorno leste deste oceano é de subsuperfície, ficando bem definida apenas a partir dos 200 m de profundidade (Talley et al., 2011).

O Oceano Pacífico (OP) apresenta a maior de todas as bacias oceânicas, com cerca de 46% da massa de água dos oceanos globais. O giro subtropical na porção sul é composto pela Corrente Peru-Chile a leste, seguida pela Corrente Sul Equatorial, a qual forma a Corrente Leste Australiana (CLA) que passa a fluir pra leste até passar a se chamar Corrente Leste de Auckland e depois Corrente do Pacífico Sul, completando o giro (Schmitz, 1996). Essa bacia tem como uma peculiaridade a *warm pool*, na região da Indonésia (0°S e 140°E), a qual faz a comunicação entre o OP e o Oceano Índico. Outro aspecto singular e de grande importância climática é o fenômeno conhecido como El Niño – Oscilação Sul (ENSO) capaz de gerar modificações importantes no clima de todo o planeta.

As correntes mais intensas nas três bacias oceânicas do HS descritas anteriormente são a CB, a CA e a CLA. Tais correntes possuem grande capacidade de transporte de calor dos trópicos para maiores latitudes, tendo importante papel no clima do planeta. Elas são conhecidas como correntes de contorno oeste (CCO) que fecham, os giros subtropicais de cada uma das respectivas bacias oceânicas e suas principais características serão descritas a seguir.

1.2 - CORRENTES DE CONTORNO OESTE (CCO)

O modelo de circulação superficial dirigida pelos ventos foi inicialmente descrito por Sverdrup em 1947, sendo posteriormente aprimorado por Stommel (1948) e Munk (1950). Esse modelo explica a formação dos giros anticiclônicos que caracterizam os oceanos subtropicais. Os giros subtropicais apresentam correntes de contorno leste pouco intensas e CCO intensas e estreitas.

As CCO possuem grande capacidade de transporte de propriedades físico-químicas, como temperatura, salinidade, nutrientes, entre outros. Com isso, possuem relevante papel na dinâmica e no clima global, sendo de suma importância o conhecimento, tanto do seu comportamento médio como da sua variabilidade, estando esta última associada à mesoescala nos oceanos. Essa escala de movimentos é representada principalmente por oscilações de intensidade e posição das correntes, meandros e vórtices. As CCO do HS serão descritas mais detalhadamente a seguir:

1.2.1 - A Corrente do Brasil

A CB se forma a partir da bifurcação da Corrente Sul Equatorial (CSE) em torno de 10-20°S. Desta bifurcação surgem a Corrente Norte do Brasil (CNB), que flui para o Equador, e a CB, que flui para sul (Stramma & England, 1999; Silveira et al., 2000; Rodrigues et al., 2007). Próximo à região de origem, a CB ocupa um pequeno estrato da coluna de água (aproximadamente 100 m), sendo composta apenas pela Água Tropical (AT). À medida que atinge maiores latitudes, a corrente torna-se mais profunda e passa a transportar também a Água Central do Atlântico Sul (ACAS) e a Água Intermediária Antártica (AIA). Estas massas de água passam a compor a CB próximo a 20°S e 25°S respectivamente e, então, são transportadas para sul (Stramma & England, 1999).

Müller et al. (1998), analisando medidas de corrente obtidas através de linhas de fundeio entre 20 e 28°S, observaram que, quanto mais ao sul, maior a profundidade (100 a 670 m) e a intensidade média da CB (1,3 a 16 Sv). Garfield (1990) encontrou velocidades máximas de 80 cm/s e transportes de 18 Sv, na latitude de 31°S. O limite sul da CB (Figura 2) é marcado pelo seu encontro com a Corrente das Malvinas (CM), um ramo da CCA que, ao atravessar a passagem de Drake, se desloca para norte seguindo a plataforma continental argentina até encontrar a CB, gerando a CBM. A posição da confluência varia sazonalmente de 33° (inverno) a 38°S (verão) (e.g. Gordon, 1989). Nesta região foram observadas fortes variabilidades, de mesoescala associadas a vórtices e meandramentos (Lentini et al., 2006), e em escalas interanuais, relacionadas com a posição média da confluência (Goni & Wainer, 2001; Lumpkin & Garzoli, 2011). Essas variabilidades podem estar associadas a fatores locais, como o deslocamento sazonal da corrente, ou a fatores remotos, tais como oscilações dos campos de ventos de larga-escala (Lumpkin & Garzoli, 2011).

A CBM é uma das regiões mais energéticas dos oceanos, e grande parte dessa energia está associada a processos de mesoescala como meandros e vórtices que já foram descritos por diversos autores (e.g., Lentini et al., 2002; Garcia et al., 2004; Saraceno et al., 2005; Lentini et al., 2006).

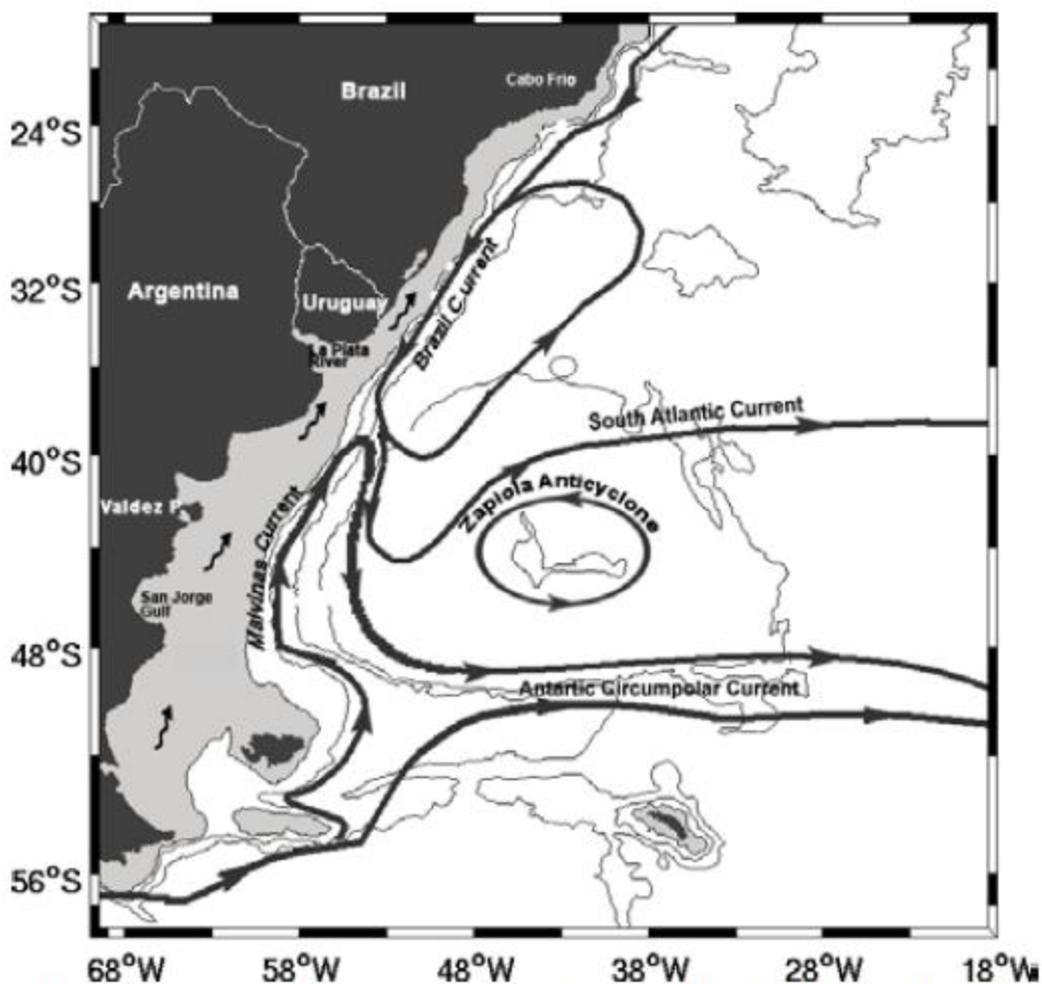


Figura 2. Esquema da circulação superficial na região da CBM. Fonte: Teixeira et al. (2009).

1.2.2 - A Corrente das Agulhas

A região ocupada pela CA e a sua retroflexão é a mais energética no HS. A CA pode atingir velocidades de até 250 cm/s e seu transporte médio é de 70 Sv (e.g., Gordon et al., 1987). Esta corrente é formada pela Corrente Leste de Madagascar e pelo fluxo em direção a sul através do canal de Moçambique, o qual ocorre principalmente em forma de anéis anticiclônicos.

A CA segue os contornos da plataforma continental até 36°S, quando então se separa da costa e passa a se deslocar para oeste, em direção ao Oceano Atlântico, até sofrer uma brusca mudança no sentido deslocamento e começar a fluir para leste, formando a CRA (Figura 3). Nesse processo de mudança de sentido de movimento, a retroflexão fica marcada pela liberação de grandes vórtices anticiclônicos, chamados Vórtices das Agulhas (VA), que se

dirigem para o Atlântico e levam águas do Oceano Índico, quentes e salinas, em seus núcleos. Estes vórtices têm diâmetros variando de 70 a 170 km e com velocidades de rotação de até 1 m/s na superfície. São lançados de 4 a 6 vórtices por ano (e.g., Gordon, 2003; Beal et al., 2011), os quais transportam entre 0,5 e 1,5 Sv cada um (Richardson et al., 2003). A injeção de águas salinas trazidas pelos vórtices pode variar de 2 a 15 Sv por ano (e.g., Beal et al., 2011). Essa contribuição de águas é relevante na intensidade da *Atlantic Meridional Overturning Circulation* (AMOC) (e.g., Biastoch et al., 2008; Beal et al., 2011).

Outras duas feições quase permanentes na região são os meandros da CRA. O primeiro meandro está associado ao Platô das Agulhas e posicionado em torno de 26°E e o segundo a 32°E, nos pontos onde a corrente muda de direção, indo para o norte (Figura 3). A presença da retroflexão, de meandros e a liberação de vórtices mostra a grande importância da mesoescala nessa área.

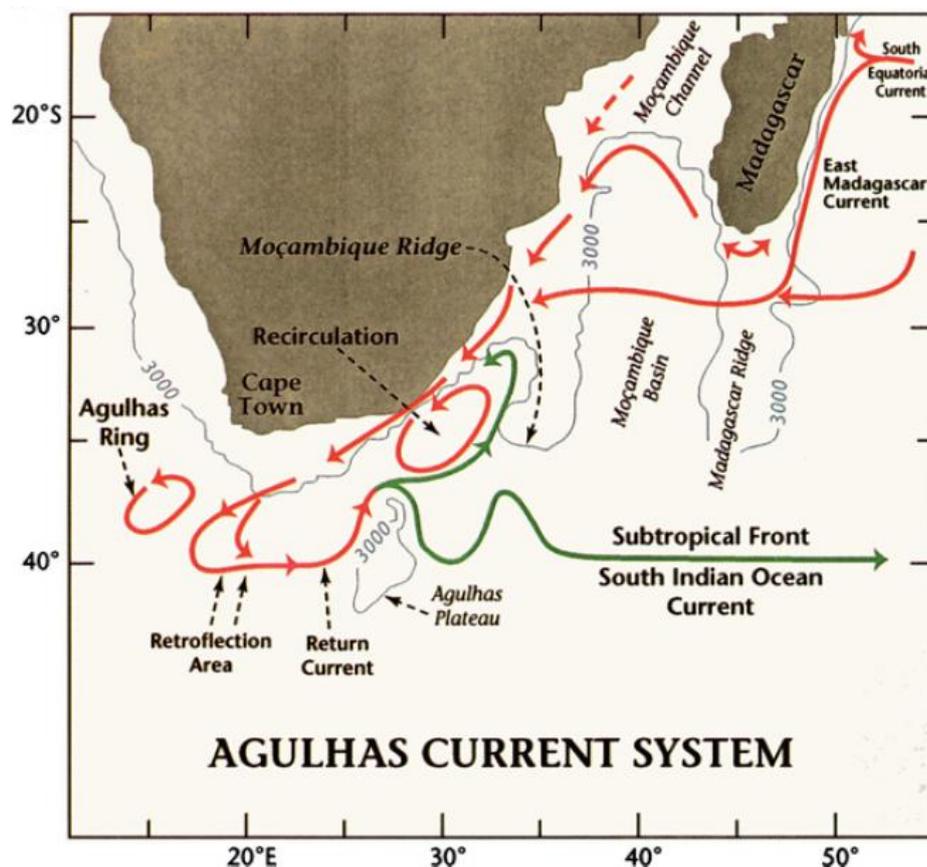


Figura 3. Esquema da circulação superficial na região da Corrente das Agulhas. Fonte: Schmitz (1996a).

A região da CA é marcada por altos níveis de Energia Cinética Turbulenta, sendo que os maiores valores estão associados à zona da retroflexão e à corrente de retorno e seus meandramentos (e.g., Stammer et al., 2006). A área com maior concentração de energia possui marcada variabilidade sazonal, estando localizada mais a oeste no inverno e mais a sul no verão (Quartly & Srokosz, 1993). O entendimento da variabilidade da energia de mesoescala nessa região é de grande importância, porém poucos estudos já abordaram esta problemática.

1.2.3 - A Corrente Leste Australiana

A formação da CLA se dá na bifurcação da Corrente Sul Equatorial entre as latitudes 15-20°S (Figura 4). Essa corrente flui para o sul até aproximadamente 32°S, quando passa a fluir para leste, para formar a Frente da Tasmânia. A CLA possui transporte em torno de 22 Sv (Mata et al., 2000) a 27 Sv (Ridgway & Godfrey, 1994) e velocidades de até 90 cm/s (Ridgway & Dunn, 2003).

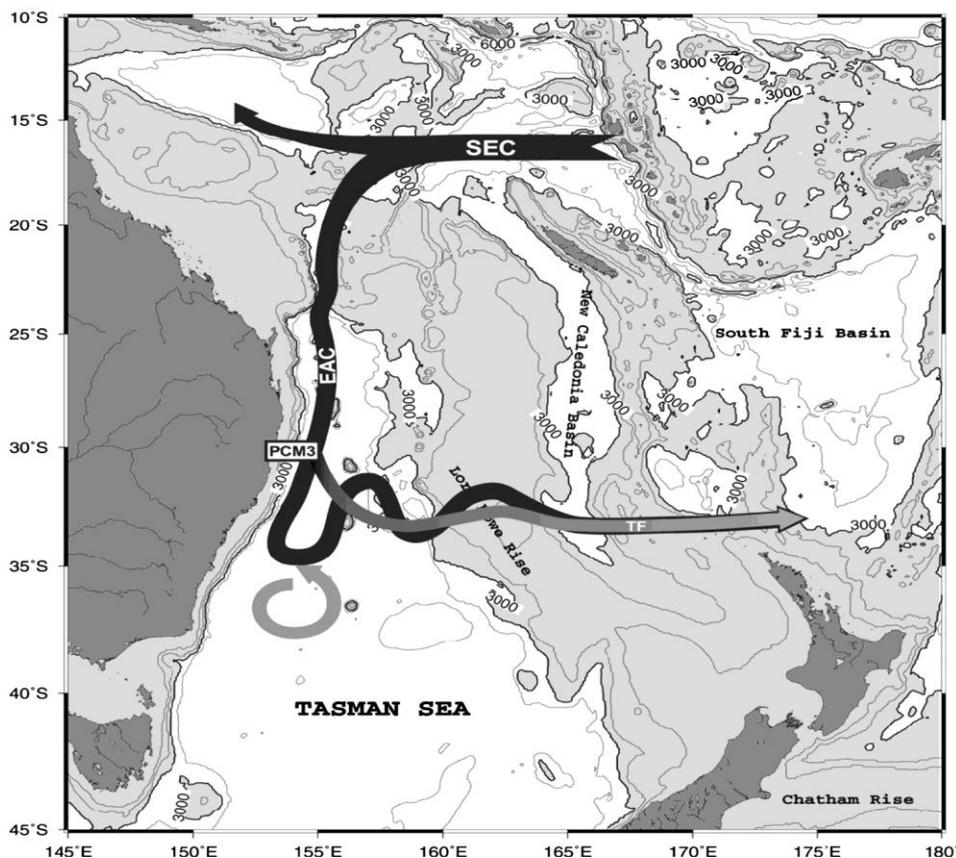


Figura 4. Esquema da circulação superficial na região da CLA. Fonte: Mata et al. (2006).

A CLA está extremamente relacionada com a complicada batimetria presente na região, caracterizada pela presença de muitas fossas, tricheiras, elevações e cadeias submarinas (Ridgway & Dunn, 2003). A corrente tende a ficar confinada principalmente num domínio de maior profundidade próximo à costa, a Planície Abissal da Tasmânia (Figura 4).

Os valores de velocidade do fluxo médio da CLA são comparáveis aos da mesoescala associada a ele. Isso por que a corrente sofre forte influência de uma série de vórtices quase permanentes em seu fluxo médio, levando-o a atingir valores comparáveis com as CCOs mais intensas dos oceanos, como a Corrente do Golfo, de Kuroshio e a CA (e.g., Gordon et al., 1983; Feron, 1995). Boland & Church (1981) encontraram velocidades superficiais de até 2 m/s, associadas a presença de vórtices.

O limite sul da CLA que, tipicamente, se afasta da costa a 32°S, é variável, podendo atingir latitudes de até 35°S antes da mudança de direção da corrente (Bowen et al, 2005). Segundo os mesmos autores, os processos ligados a essa variabilidade não são totalmente conhecidos, mas podem estar relacionados, entre outras coisas, com a liberação de vórtices pela corrente devido ao aumento da sua instabilidade. Alguns estudos encontraram forte variabilidade da CLA em períodos entre 90 e 140 dias (Boland, 1979; Walker & Wilkin, 1998; Feron, 1995; Mata et al., 2000). Mata et al. (2006) mostraram que esse período de variabilidade está relacionado com a variação da posição de separação da corrente e a liberação de vórtices pela mesma.

As variações de período mais longo também podem ser importantes na região, com a capacidade de modular a corrente média e a mesoescala presente. O ENSO e o *Southern Annular Mode* (SAM) foram os modos mais estudados e relacionados com as flutuações na CLA (Roemmich et al., 2007; Morrow et al, 2010).

1.3 - ENERGIA CINÉTICA TURBULENTA (*EDDY KINETIC ENERGY, EKE*)

A energia cinética associada aos movimentos de larga-escala nos oceanos pode ser dividida em energia cinética média (*Mean Kinetic Energy, MKE*) e energia cinética turbulenta (*EKE*), que é a variabilidade associada ao campo médio de velocidades. Os principais processos que representam essa variabilidade são: as oscilações sazonais dos fluxos médios, principal fonte de EKE nas regiões equatoriais e os meandramentos e vórtices associados

principalmente às CCOs, onde estão as áreas de maior concentração de EKE nos oceanos (Ferrari & Wunsch, 2009).

As primeiras descrições em escala global sobre esse tipo de energia só foram possíveis com o advento dos satélites altimétricos no início dos anos 1990, ex.: JASON-1, Topex/Poseidon (e.g. Stammer, 1997; Stammer & Wunsch, 1999). Ducet et al. (2000) fizeram uma descrição da circulação oceânica com campos altimétricos multisatélite de alta resolução ($0,25^\circ \times 0,25^\circ$) mostrando as características globais desses campos de energia e mostrando as maiores concentrações de EKE nos domínios das CCOs (Figura 5).

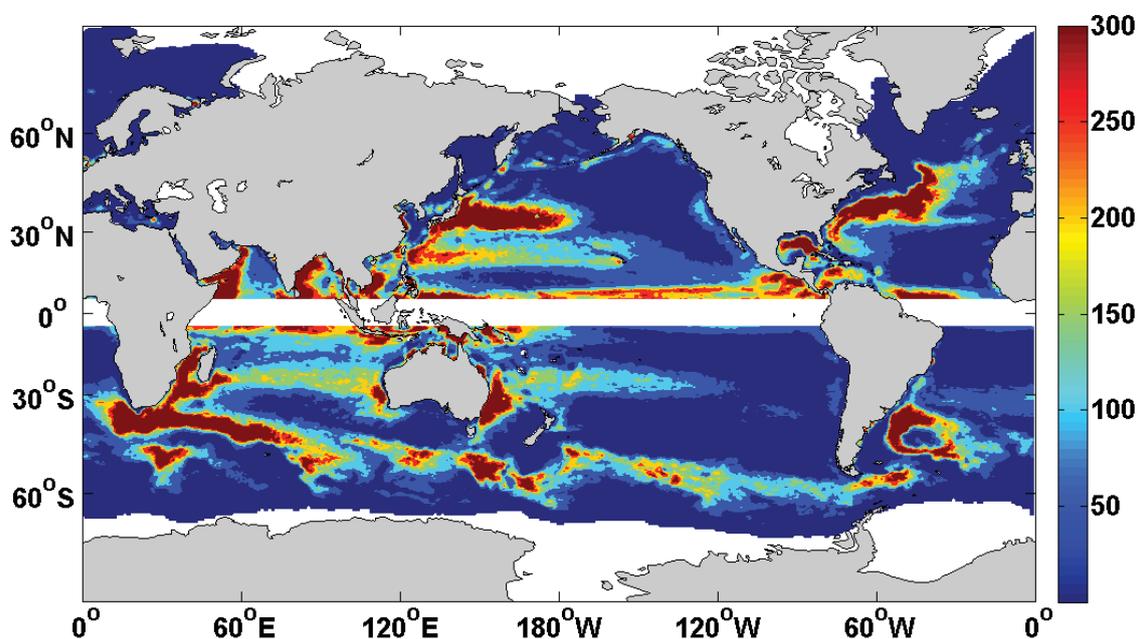


Figura 5. Distribuição de EKE Global com filtro de passa-alta (300 dias). Fonte: Jia et al. (2011b).

A EKE na CBM é caracterizada por uma forma de “C”, com os maiores valores concentrados na zona de encontro das correntes e de liberação de vórtices. O valor máximo da média da EKE nessa área é $1700 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ (Wilkin & Morrow, 1994; Stammer et al., 2006). Oliveira et al. (2009) encontraram valores superiores de EKE, pois utilizaram dados de boias que fornecem a velocidade absoluta, no entanto, a distribuição geral se manteve semelhante a dos outros autores. No centro do “C” as energias são baixas, pois estão relacionadas com o Anticiclone Zapiola, caracterizado por uma circulação quase estacionária (de Miranda et al., 1999; Teixeira et al., 2009). A CA é a mais energética do HS, possuindo valores máximos na média de EKE de $2700 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ na retroflexão (Wilkin & Morrow, 1994;

Ducet et al., 2000; Stammer et al., 2006). A CRA também tem altos valores de EKE, aproximadamente $2200 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ na média. A CLA tem as maiores energias, cerca de $2000 \text{ cm}^2/\text{s}^2$, concentradas na região onde o fluxo da corrente muda de direção (Wilkin & Morrow, 1994; Stammer et al., 2006). Essa corrente também é caracterizada pela liberação periódica de vórtices (Mata et al., 2006).

A forma como a EKE é dissipada ainda não é bem conhecida, mas as principais hipóteses estão relacionadas à interação de vórtices com a batimetria e com as bordas oeste dos oceanos. Zhai et al. (2010) mostraram que estas bordas são as principais fontes e sumidouros de energia de mesoescala. Os autores se referem a essas áreas como “cemitérios de vórtices”, pois esses tendem a ocupar essas regiões devido a sua autopropulsão para oeste (e.g. Nof, 1981; Azevedo et al., 2010; Azevedo et al., 2012). Zhai & Marshall (2012) calcularam que cerca de 80 % da energia que entra no giro subtropical do Oceano Atlântico Norte, através dos campos de ventos, é retirada do campo médio pela liberação de vórtices gerados por instabilidades baroclínicas. Além disso, segundo Ferrari & Wunsch (2009), 90% da energia cinética dos oceanos está armazenada em forma de EKE, ligada principalmente à presença dos vórtices. Sendo assim, é de extrema importância o entendimento da EKE nos oceanos, suas principais fontes e sumidouros, bem como seus principais padrões de variabilidade.

Como os maiores valores de EKE se concentram nas CCOs e estão fortemente relacionados à energia que dirige a circulação de larga-escala nos oceanos, o estudo da variabilidade da EKE, principalmente nessas regiões, pode ser uma boa ferramenta para um melhor entendimento da circulação geral dos oceanos.

1.4 MODOS DE VARIABILIDADE CLIMÁTICA

Dentre os principais períodos de variabilidade dos oceanos em larga-escala podemos citar o ciclo anual e o semianual. Esses padrões de oscilação são razoavelmente bem conhecidos e descritos, diferentemente da variabilidade interanual, visto que as séries temporais ainda não são longas o suficiente para a completa compreensão desta.

No contexto das mudanças climáticas, esses tipos de oscilações começaram a ganhar mais importância para o entendimento da dinâmica do clima na Terra. Dois desses modos de

variabilidade climática, que podem estar modulando parte da variabilidade da circulação oceânica, são descritos mais detalhadamente a seguir:

1.4.1 – MODO ANULAR SUL (*SOUTHERN ANNULAR MODE, SAM*):

No início do século XX, Sir Gilbert Walker definiu importantes oscilações atmosféricas de larga escala, dentre elas a Oscilação do Atlântico Norte (NAO), Oscilação do Pacífico Norte (NPO), Oscilação Sul (SO) e a Oscilação Antártica posteriormente conhecida como SAM, é resultado das variações nos campos de pressão atmosférica no entorno do continente antártico entre as médias e as altas latitudes no HS (Gong & Wang, 1999).

Diferenças de pressão induzem movimento aos fluídos. Dessa forma, os gradientes de pressão atmosféricos fazem o ar se movimentar, gerando os ventos. Portanto, o regime de ventos é dirigido pelos campos de pressão atmosféricos. No HS, a diferença na pressão atmosférica entre médias e altas latitudes é responsável por forçar os ventos de oeste. Estes possuem grande intensidade e são as principais fontes de energia da CCA. O SAM é o principal modo de variabilidade climática no HS (Thompson & Wallace, 2000) e, portanto, espera-se que tenha efeito sobre a circulação neste hemisfério.

Hall & Visbeck (2002) relacionam a variabilidade atmosférica, oceânica e do gelo marinho no HS com o SAM, a partir de dados de saídas de modelos numéricos. Segundo os autores, na atmosfera a fase positiva do SAM resulta numa intensificação nos ventos de oeste e o deslocamento dos mesmos em direção aos pólos. Nos oceanos, ocorreria o aumento do transporte da CCA, além de um aumento da ressurgência próximo ao continente antártico e convergência em torno dos 45° S. Os autores também apresentam um incremento de aproximadamente 5% na cobertura de gelo marinho Antártico.

Morrow et al. (2010), através da utilização de dados altimétricos, relacionaram as variações interanuais da EKE no HS com o SAM. Neste estudo, os autores encontraram que a resposta da EKE varia regionalmente em cada bacia oceânica. No Oceano Pacífico a variabilidade da EKE seria uma combinação entre dois modos de variabilidade, o SAM e o ENSO. Quando a fase positiva do SAM coincide com períodos de La Niña, leva a um incremento de energia, como o ocorrido em 1999. Quando a fase positiva do SAM é

combinada com o El Niño, os modos entram em oposição de fase e causam uma diminuição da EKE.

No sudeste do Oceano Índico, Jia et al. (2011a) reportaram uma modulação da EKE pelo SAM, apesar desta não ser a única forma de modulação da EKE na região. Quando o modo apresenta fase positiva, o campo de energia enfraquece, enquanto na fase negativa ocorre um incremento de energia na área de estudo. Outros modos, como o El Niño - Oscilação Sul (ENSO), também podem ser importantes nessa modulação, além da própria variabilidade da Corrente de Leeuwin.

Roemmich et al. (2007) avaliaram o impacto do SAM no oceano Pacífico Sul e encontraram um padrão semelhante ao descrito por Hall & Visbeck (2002). Os autores reportaram que durante os períodos de SAM positivo (1990-1999) ocorre um aumento da convergência em torno dos 40° - 45°S, associado à aceleração do giro subtropical. Após esse período, há um enfraquecimento do fluxo, coincidente com o decréscimo do índice SAM.

1.4.2 EL NIÑO – OSCILAÇÃO SUL (*EL NIÑO – SOUTHERN OSCILLATION*, ENSO)

O ENSO é um padrão de variabilidade climática que está relacionado a oscilações nas propriedades atmosféricas e oceânicas na região equatorial do oceano Pacífico. Esses eventos ocorrem, geralmente, em períodos entre 2 e 7 anos. Os primeiros sinais investigados dessa oscilação foram o aquecimento anômalo das águas na costa da América do Sul e seu consequente impacto direto sobre a pesca local, uma atividade econômica muito importante na região.

As principais propriedades estudadas para definir esse modo de variabilidade são o campo de pressão atmosférica e a temperatura superficial do mar (TSM). A variação do gradiente de pressão entre Darwin na Austrália (baixa pressão) e o Tahiti no OP central (alta pressão) é responsável pela variabilidade atmosférica relacionada ao ENSO. Já as variações das temperaturas superficiais do OP são o gatilho das oscilações geradas pela componente oceânica.

Este modo de variabilidade climática apresenta uma fase quente, conhecida como El Niño, que é caracterizada por um aumento na TSM próximo a América do Sul e uma

diminuição do gradiente de pressão atmosférico no OP equatorial. Além disso, há também a fase fria, chamada de La Niña, com características contrárias ao El Niño. As temperaturas das águas no OP leste ficam mais frias que a média e ocorre a intensificação do gradiente de pressão.

Como comentado anteriormente, o ENSO causa uma alteração dos ventos e das correntes na região do OP equatorial. No entanto, esse efeito não é sentido apenas localmente. A oscilação do padrão de ventos e da diferença entre as alturas superficiais do mar, no OP, geram movimentos nos oceanos e na atmosfera, que afetam outros locais no globo.

O ENSO influencia muitas regiões ao redor do mundo, sendo que uma das formas mais notadas e estudadas é seu impacto na variabilidade dos regimes de chuva. Por exemplo, em anos de El Niño ocorre uma diminuição da pluviosidade no nordeste do Brasil, ao passo que nesta mesma região as chuvas tornam-se mais abundantes em anos de La Niña.

Morrow et al. (2010) relacionaram a variação da EKE com o ENSO no OP Sul. Durante a fase quente, ele contribui para uma diminuição mesoescala, enquanto na fase fria o efeito é inverso e existe um ganho de EKE na área estudada. No entanto, a circulação nessa região é modulada também pelo SAM, sendo este resultado da combinação dos dois modos.

A importância dos oceanos do HS no clima e as longas séries de dados altimétricos serviram de motivação para que a variabilidade, em períodos interanuais, da energia de mesoescala associada às CCOs fosse estudada neste trabalho. Considerando que a EKE representa a maior parte turbulência associada à circulação de larga-escala nos oceanos, ela pode representar possíveis mudanças que estejam ocorrendo nesta escala de movimento. Sendo assim, é de suma importância conhecer a variabilidade espacial e temporal relacionada a esta forma de energia.

1.5 - OBJETIVOS

OBJETIVO GERAL

Estudar a variabilidade da energia cinética turbulenta (EKE) nos três principais sistemas de corrente de contorno oeste no hemisfério Sul a partir de 18 anos de dados altimétricos.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar a variabilidade espacial da EKE e das alturas superficiais do mar em cenários de baixa, média e alta energia para cada CCO;
- Identificar as principais feições oceanográficas associadas a cada cenário energético a partir das alturas superficiais do mar;
- Analisar a variabilidade temporal da EKE e identificar as tendências de longo período;
- Relacionar as tendências de longo período com possíveis modificações nos processos oceanográficos presentes em cada área;
- Identificar as principais frequências de variabilidade da EKE e os períodos onde essas foram mais significativas;
- Identificar possíveis modulações da EKE, em escala interanual, com eventos extremos de energia e correlacioná-los com os modos de variabilidade climática interanuais (SAM e ENSO);

2 - MATERIAL E MÉTODOS:

2.1 - DADOS

Neste trabalho foram utilizados os dados provenientes do banco de altimetria produzido pela Ssalto/Duacs e distribuído gratuitamente pelo AVISO (*Archive, Validation et Interpretation des donnees des Satellite Oceanographiques*), com suporte do CNES (aviso.oceanobs.com/duacs). Foram usados os produtos de anomalias de velocidade geostrófica zonal (u') e meridional (v'), calculadas a partir das medidas multisatelitais de anomalia do nível do mar (*Merged Sea Level Anomaly - MSLA*). As velocidades são calculadas com as seguintes equações (e.g., Jia et al., 2011a):

$$u' = -\frac{g}{f} \frac{\Delta\eta'}{\Delta y} \text{ (ms}^{-1}\text{)} ; \quad v' = \frac{g}{f} \frac{\Delta\eta'}{\Delta x} \text{ (ms}^{-1}\text{)} \quad (1)$$

Onde g é a aceleração da gravidade, f é o parâmetro de Coriolis, η' é a anomalia do nível do mar (SLA).

Também foram utilizados campos de topografia dinâmica absoluta média (*Mean Absolut Dynamic Topography, MADT*) do modo reprocessado (*Delayed Time - DT*). Estes produtos (u' , v' e MADT) contêm os dados da multimissão TOPEX/POSEIDON, ERS-1, ERS-2, Jason-1, Jason-2 e Envisat e estão na versão “Ref” de processamento, que é a recomendada para estudos de variabilidade. Os campos obtidos são produtos semanais, com espaçamento de $1/3^\circ \times 1/3^\circ$, para o período de outubro de 1992 até janeiro de 2011, totalizando 954 imagens.

Além dos campos de altimetria, foram utilizados índices dos modos de variabilidade climática: Modo Anular Sul (SAM), Índice de Oscilação Sul (SOI), NINO3.4 e Oscilação do Atlântico Norte (NAO). Os índices foram adquiridos junto ao Climate Prediction Center (CPC) da NOAA (*National Oceanographic and Atmospheric Agency*), apresentam valores mensais e foram obtidos para o mesmo período referente ao banco altimétrico. Os índices SAM, SOI e NAO são calculados a partir dos campos de pressão atmosférica para o Oceano Austral, Pacífico Equatorial e Atlântico Norte, respectivamente. O NINO3.4 é função da temperatura superficial do mar (TSM) no Oceano Pacífico Equatorial entre 5°N - 5°S e 120 - 170°W .

A partir das imagens de anomalia de velocidades geostróficas (u' e v'), foram selecionadas as áreas de interesse descritas acima e então calculada a Energia Cinética Turbulenta (EKE), por unidade de massa, conforme a equação (e.g., Jia et al., 2011a):

$$EKE = \frac{1}{2} (u'^2 + v'^2) \quad (m^2 s^{-2}) \quad (2)$$

Através dos valores de EKE obtidos para cada campo semanal, foi calculada a média para toda a área, definindo um único valor para cada imagem. A partir destes, foram feitas médias mensais para reduzir ruídos de alta frequência e para possibilitar a comparação com os índices mensais dos modos de variabilidade climática, assim como feito por Jia et al. (2011a).

Considerando a análise da variabilidade de longo período, foi aplicado um filtro de passa-baixa nas séries de EKE e dos modos de variabilidade climática. O filtro utilizado mantém apenas os eventos com período maior do que 1 ano, eliminando então os eventos de alta frequência que não são de interesse neste trabalho.

As regiões de estudo foram definidas segundo a localização média das correntes de contorno oeste (CCO) do hemisfério Sul (HS). Dessa forma, os limites definidos foram: 60°W-30°W e 30°S-50°S (Figura 6) para a Confluência Brasil-Malvinas (CBM); 0°E-30°E e 30°S-50°S (Figura 7) para a Corrente das Agulhas (CA) e 140°E-170°E e 20°S-40°S (Figura 8) representando a Corrente Leste Australiana (CLA).

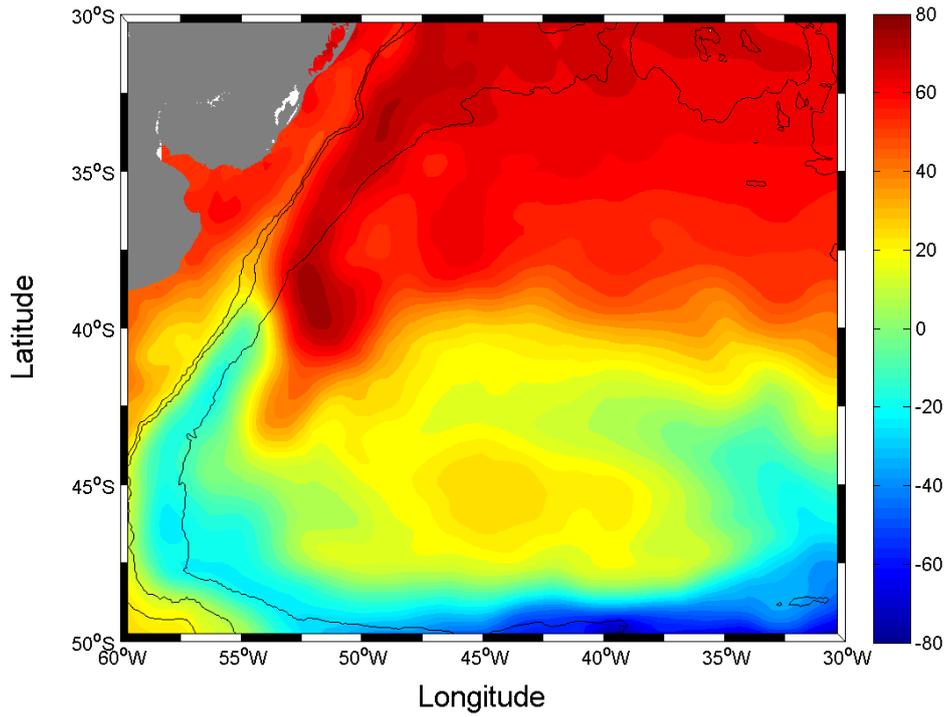


Figura 6. Mapa da média de MADT (cm) para a região da CBM compreendendo todo o período analisado. As linhas em preto representam as isóbatas de 500, 1000 e 4000 m.

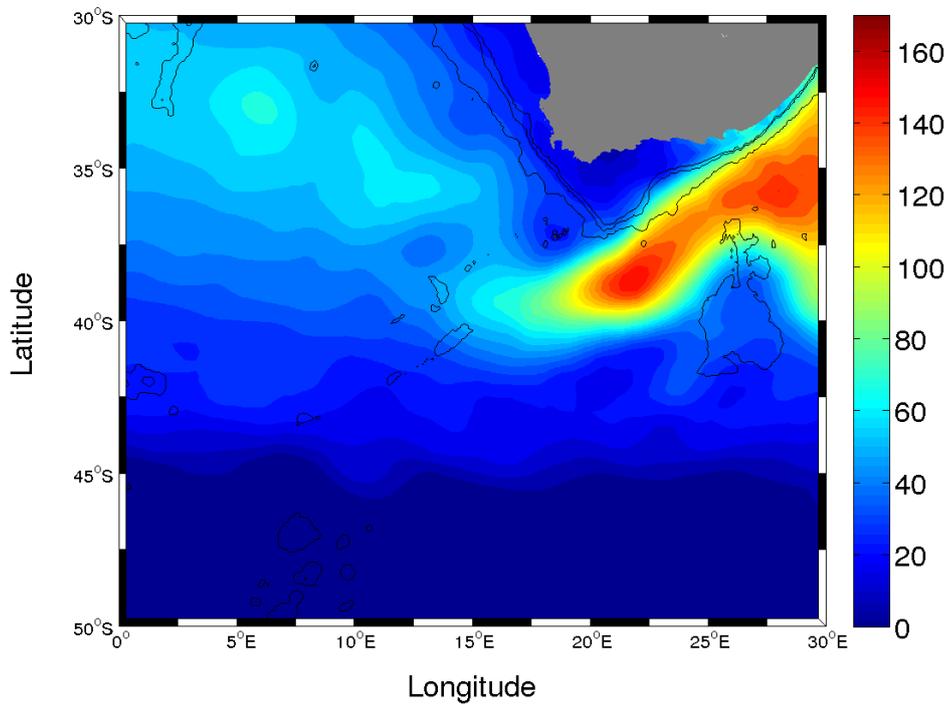


Figura 7. Mapa da média de MADT (cm) para a região da CA compreendendo todo o período analisado. As linhas em preto representam as isóbatas de 500, 1000 e 3000 m.

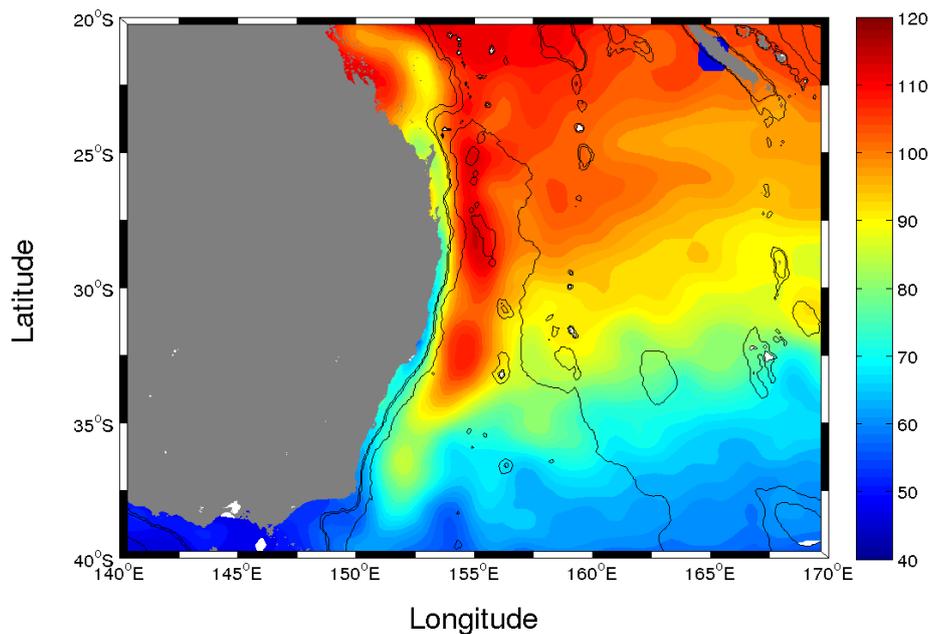


Figura 8. Mapa da média de MADT (cm) para a região da CLA compreendendo todo o período analisado. As linhas em preto representam as isóbatas de 500, 1000 e 4000 m.

2.2 - ANÁLISE DE VARIABILIDADE ESPACIAL

2.2.1 - Análise de Composições

Para investigar a variabilidade espacial foram utilizados os campos semanais. Primeiro foi feita uma média no tempo das imagens de EKE, para cada uma das regiões definidas, para averiguar se estas estavam em concordância com estudos pretéritos. Após, foi realizada um análise de composição (e.g., Mata et al., 2006) visando evidenciar os padrões espaciais da EKE nos cenários de baixa, média e alta energia. Mata et al. (2006) utilizaram uma metodologia semelhante para estudar a variabilidade espacial da CLA, com base em campos de SLA.

O primeiro passo da análise de composição foi a definição dos cenários energéticos. Foi utilizada a série de EKE com intervalo semanal como guia para separar quais imagens deveriam ser utilizada em cada composição. Dessa forma, foram considerados momentos de baixa energia todas as imagens com valor de EKE médio menor do que a média de todo o período analisado, menos um desvio-padrão. De forma semelhante, todas as imagens com valor médio de EKE maior do que a média mais um desvio-padrão foram considerados de alta energia. Os campos restantes, com valor de EKE médio entre a média e mais ou menos um desvio-padrão, foram considerados como sendo de energia média.

A Figura 9 mostra um exemplo de quais campos foram consideradas para cada um dos cenários propostos. Para a imagem final da composição foi feita a média de todas as imagens semanais enquadradas em cada estado energético.

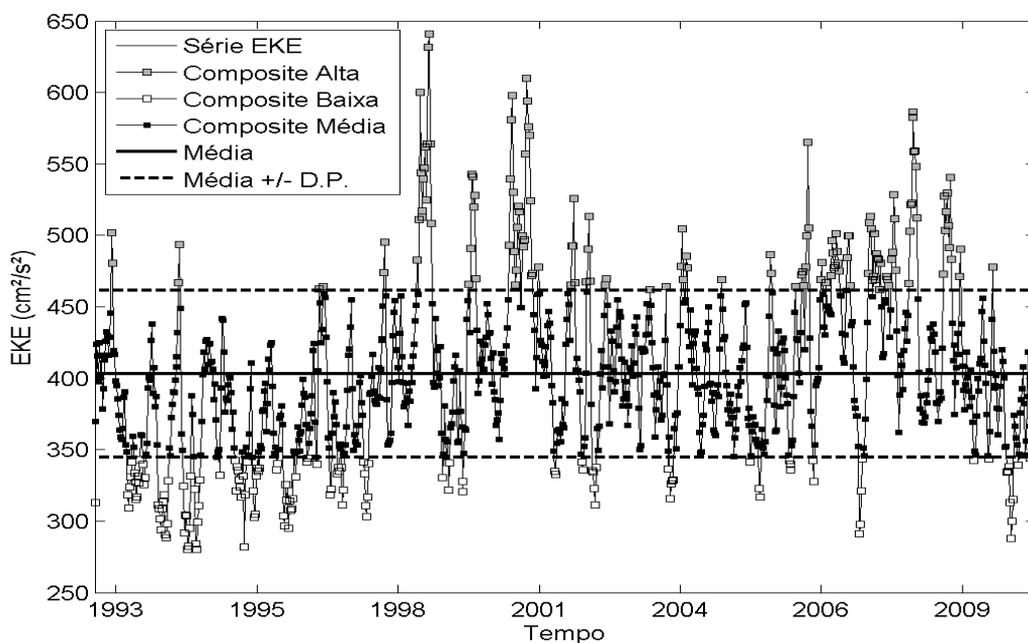


Figura 9. Série de EKE da CA com marcadores representando os campos escolhidos para cada composição de energia.

As mesmas posições no tempo das imagens determinadas para a análise de composição das EKE também foram utilizadas para as imagens de MADT. A aplicação desse método para essas imagens possibilita analisar a distribuição das alturas do nível do mar e possíveis feições dinâmicas associadas a esses desníveis da superfície (e.g. correntes, meandros, vórtices). As composições poderão mostrar o deslocamento espacial de algumas estruturas (e.g., retroflexão, meandros) e outras que só aparecem em um determinado cenário energético (e.g., vórtices).

2.3 - ANÁLISE DE VARIABILIDADE TEMPORAL:

Para a avaliação da variabilidade temporal da EKE durante as duas últimas décadas foram escolhidas três análises: regressão linear, análise de ondeletas e correlação cruzada.

As regressões lineares possibilitaram identificar as tendências da EKE nas últimas duas décadas para as regiões de interesse. A interpretação dos resultados das ondeletas

juntamente com as correlações possibilitará inferir sobre possíveis modulações de longo período nas três áreas estudadas.

2.3.1 - Regressão Linear

O método de regressão linear foi utilizado com o objetivo de identificar possíveis tendências de aumento ou diminuição da EKE nas três áreas de estudo, em termos da variabilidade interanual. Dessa forma, foram utilizadas as séries filtradas, com a remoção do sinal anual (Jia et al., 2011a).

Considerando o tempo como a variável independente e a EKE como variável dependente, será calculada a equação da reta a partir de uma regressão linear para chegarmos numa equação da seguinte forma:

$$\hat{y} = b_0 + b_1x \quad (3)$$

Esses parâmetros são estatísticos amostrais usadas para estimar parâmetros populacionais β_0 e β_1 . Os parâmetros amostrais podem ser usados para estimar os populacionais a partir das seguintes equações:

$$b_1 = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \quad (4)$$

$$b_0 = \bar{y} - b_1\bar{x} \quad (5)$$

Onde n representa o tamanho da amostra, b_1 a inclinação da reta e b_0 o intercepto com o eixo y .

Para determinar a capacidade da equação explicar a variação em y se calcula o coeficiente de correlação linear r , dado pela seguinte fórmula:

$$r = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \sqrt{n(\sum y^2) - (\sum y)^2}} \quad (6)$$

O valor de r deve estar entre -1 e 1. Se o valor for muito próximo a zero não existe correlação linear entre as variáveis. Se o r for próximo a -1 ou 1 a correlação é relevante.

Para verificar se a tendência é significativa estatisticamente, será aplicado um teste de significância, baseado no coeficiente de determinação r^2 e no n amostral. Considerando-se um nível de significância de 95%, para um n amostral maior que 100, o valor do r^2 deverá ser menor do que -0,196 ou maior que 0,196 (e.g., Emery & Thompson, 2001; Triola, 2005). Com isso, podemos definir quais das correlações lineares são significativas.

2.3.2 - Análise de Ondeletas (*Wavelet Analysis*):

Esta análise utiliza a Transformada de Ondeletas para o estudo de séries temporais. É uma ferramenta para suprir limitações das análises de Fourier, como a deficiência em captar sinais não-estacionários. As análises de Fourier são limitadas por não conseguirem determinar variações de altas e baixas frequências simultaneamente (Emery & Thompson, 2001).

A análise de ondeletas possui janelas móveis, no tempo ou no espaço, que se dilatam ou se comprimem para capturar sinais de baixa e alta frequência, respectivamente. Dessa forma, a técnica analisa as variações locais de energia dentro de uma série temporal pela decomposição da mesma em tempo-frequência-espaço, possibilitando a determinação dos modos dominantes de variabilidade e como estes variam no decorrer do tempo (Torrence & Compo, 1998).

Neste trabalho foi escolhida, como ondeleta-mãe, a ondeleta complexa *Morlet*, que é bastante utilizada em análises de séries temporais de dados atmosféricos e oceanográficos (e.g., Torrence & Compo, 1998; Hirata et al., 2011), além de ser eficiente na captura de sinais não-estacionários (Hirata et al., 2011). Essa ondeleta é representada pela seguinte equação:

$$\psi_0(t) = \pi^{-\frac{1}{4}} e^{i\omega_0 t} e^{-\frac{1}{2}t^2} \quad (7)$$

Onde ω_0 é uma frequência adimensional e t representa cada valor da série temporal. Depois da escolha da ondeleta-mãe, outros parâmetros de entrada do método foram adaptados de acordo com as características das séries temporais de EKE. Foram eles: o

$\delta j=0,125$, que representa o janelamento, $dt=1/12$ ou 1 mês, $pad=1$ (que é o preenchimento da série com zeros até a próxima potência de 2, recomendável segundo Torrence & Compo, 1998) e analisando sinais a entre 2 meses e 18 anos. Essas adaptações foram aplicadas nas séries das três regiões estudadas.

Em cada série analisada foi calculado o "ruído vermelho" (*red noise*), o qual é utilizado no método da análise de ondeleta. Essa parâmetro foi calculado através da autocorrelação da série com uma defasagem de 1 passo de tempo, o que gera linhas de significância mais robustas para a análise das séries. Dessa forma, foram utilizados os valores de "ruído vermelho" de 0,61, 0,56 e 0,79 para a CBM, CA e CLA, respectivamente.

A escolha dos parâmetros descritos acima foi feita com base no guia prático para análises de ondeletas de Compo & Torrence (1998) e no trabalho de Hirata et al. (2011). É importante ressaltar que foram retiradas as tendências lineares das séries antes da aplicação das ondeletas, para evitar contaminação em frequências longas, visto que o objetivo era analisar os comportamentos oscilatórios das séries.

2.3.3 - Correlação cruzada

Esta análise foi aplicada para comparar a variabilidade das séries de EKE com os modos de variabilidade climática (ENSO, SAM), visando avaliar uma possível modulação da energia das correntes estudadas por parte dos índices climáticos. Portanto, é uma ferramenta complementar aos resultados obtidos nas análises de ondeletas. Jia et al. (2011a) fizeram correlações cruzadas para comparar a variabilidade da Corrente de Leeuwin, no Oceano Índico, com alguns índices de modos com variabilidade interanual (SOI, NINO3.4, SAM e Dipolo do Índico) que poderiam estar atuando na região.

O método de correlação cruzada desloca uma série no tempo, e em cada defasagem temporal é calculada a correlação entre as séries. O cálculo da correlação é semelhante ao da correlação simples, porém serão obtidos coeficientes de correlação para cada defasagem (*lag*) temporal aplicada (e.g., Emery & Thompson, 2001; Triola, 2005). Assim como em Jia et al. (2011a), foram utilizados intervalos de confiança de 95% e defasagem de mais e menos 3 anos com *lags* mensais, o que corresponde a 36 dados da nossa série de médias mensais.

3 – RESULTADOS

As três áreas estudadas se mostraram bastante energéticas, apresentando valores médios máximos de energia cinética turbulenta (EKE) de 1700, 2000, 2700 $\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$ para a Confluência Brasil-Malvinas (CBM), a Corrente Leste Australiana (CLA) e a Corrente das Agulhas (CA), respectivamente. A seguir serão expostos os resultados de cada uma das áreas de estudo, começando pela variabilidade espacial, seguindo com a variabilidade temporal e por fim as correlações com os modos de variabilidade climática.

3.1 – CONFLUÊNCIA BRASIL-MALVINAS

3.1.1 - Variabilidade espacial

A CBM foi a região menos energética dentre as três correntes de contorno oeste (CCO) do hemisfério Sul (HS), com o valor máximo, no campo da média da EKE, em torno de 1700 $\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$, próximo de 42°S e 52°W (Figura 10). O padrão em forma de “C” na distribuição da EKE na região ficou bem marcado, assim como a elevação da superfície do mar conhecido como Anticiclone Zapiola. Essa feição está posicionada centralizada em 45°S e 45°W e é evidenciada na Figura 10 pelos baixos valores de EKE (Oliveira et al., 2009).

Os cenários energéticos gerados a partir da análise de composição para a região da CBM são apresentados na Figura 11. É possível observar que a composição dos eventos de baixa energia (Figura 11a) atingiu valores próximos a 1000 $\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$, o que representa quase metade do valor máximo da composição dos eventos médios (Figura 11b), aproximadamente 1700 $\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$. Por sua vez, os eventos de alta energia na região (Figura 11c) apresentaram valores máximos próximos a 3000 $\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$. Dessa forma, a variação de energia entre os períodos de alta, média e baixa atividade de mesoescala encontra-se bem caracterizada pelos cenários apresentados. Nota-se também que o Anticiclone Zapiola está ocupando uma região similar nas diferentes situações energéticas.

A diferença entre as composições de máxima e mínima energia (Figura 11d) mostrou maiores valores na região da confluência, com um máximo em torno de 2000 $\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$. Observa-se que o valor máximo da diferença entre as composições é superior ao valor máximo da composição de média energia, o que mostra que o campo de mesoescala é muito variável na região. Esses maiores valores da diferença ficaram marcados na imagem

(Figura 11d) com três regiões alongadas na direção norte-sul, posicionadas quase paralelas, com a porção central atingindo as maiores diferenças. Esses perfis alongados de diferença podem estar relacionados com uma migração para sul da posição média da confluência em frequências mais baixas.

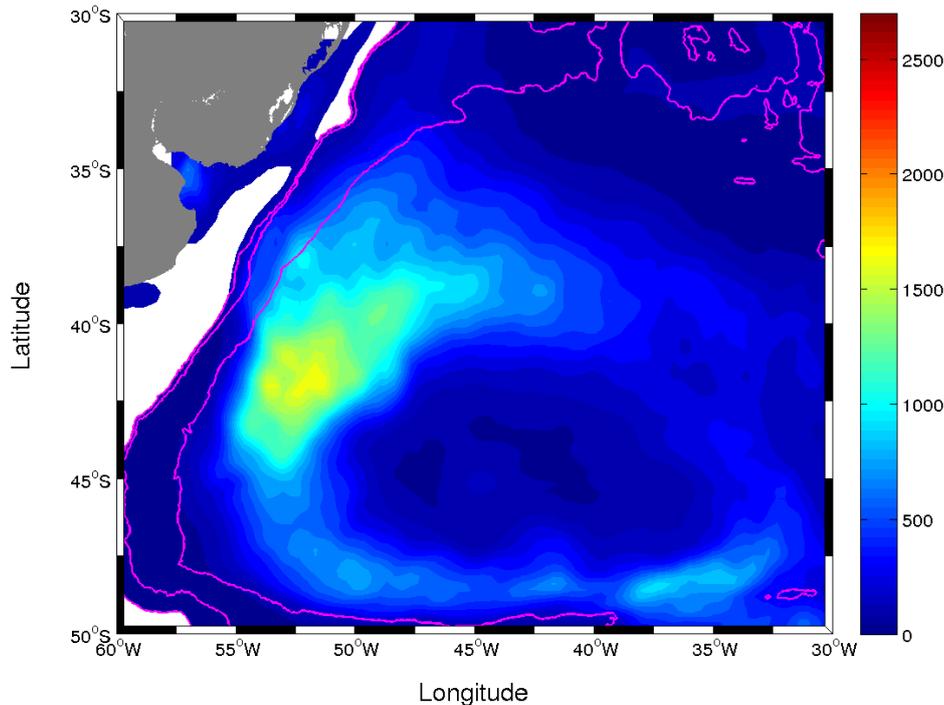


Figura 10. EKE ($\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$) média na região da CBM para todo o período analisado, entre OUT/1992 até JAN/2011. As linhas em magenta denotam as isóbatas de 500, 1000 e 4000 m.

A Figura 12 são apresentados os resultados das composições de MADT (Mean Absolute Dynamic Topography) para CBM. A posição da confluência atingiu o maior deslocamento para sul (44°S) na composição de menor energia (Figura 12a). Neste cenário não é tão evidente o caráter meandrante que a confluência adquire quando começa a se mover para leste. No entanto, no estágio de média energia (Figura 12b) o meandrimento da corrente é mais aparente, como esperado, visto que possui uma maior energia turbulenta.

No estado de maior energia as alturas superficiais demonstram a formação de um centro de circulação anticiclônico (Figura 12c), marcado por maiores elevações, centrado em 43°S e 54°W . Além disso, nota-se a contração da confluência em menores latitudes juntamente com um deslocamento para leste (42°S e 50°W), provavelmente efeito da liberação de vórtices na zona de retroflexão. As feições circulares bem marcadas, sejam elevações ou depressões, são características de vórtices. O meandrimento da corrente

também se encontra mais evidente, contribuindo para as maiores energias encontradas na região. A elevação do Anticiclone Zapiola permanece com características similares nos três estágios energéticos, com um pequeno aumento da altura no centro da área ocupada pelo anticiclone no cenário de alta energia.

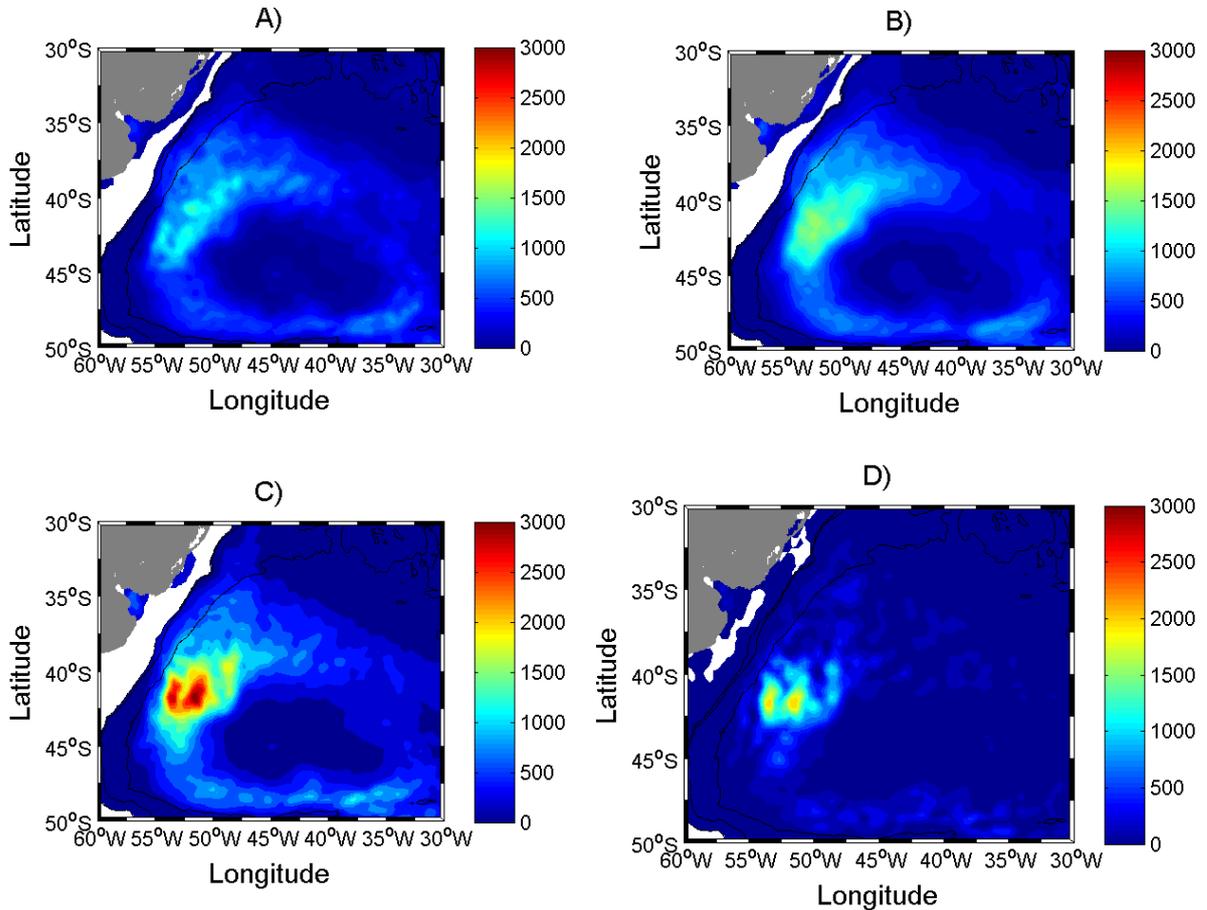


Figura 11. Composições de EKE ($\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$) na região da CBM. A) cenário de baixa energia (valores inferiores à média menos um desvio-padrão (d.p.)), B) cenário de média energia (valores superiores à média menos um d.p. e inferiores à média mais um d.p.), C) cenário de alta energia (valores superiores à média mais um d.p.) e D) Diferença entre o cenário de alta e baixa.

A diferença das composições de alta e baixa energia (Figura 12d) mostra três núcleos principais. Um mais próximo à costa com valores positivos, seguido por um centro com valores negativos com formato mais alongado e por último outro centro com diferenças positivas (entre 39-43°S e 55-48°W). A área onde a corrente afasta-se da costa, a leste, também mostra valores positivos.

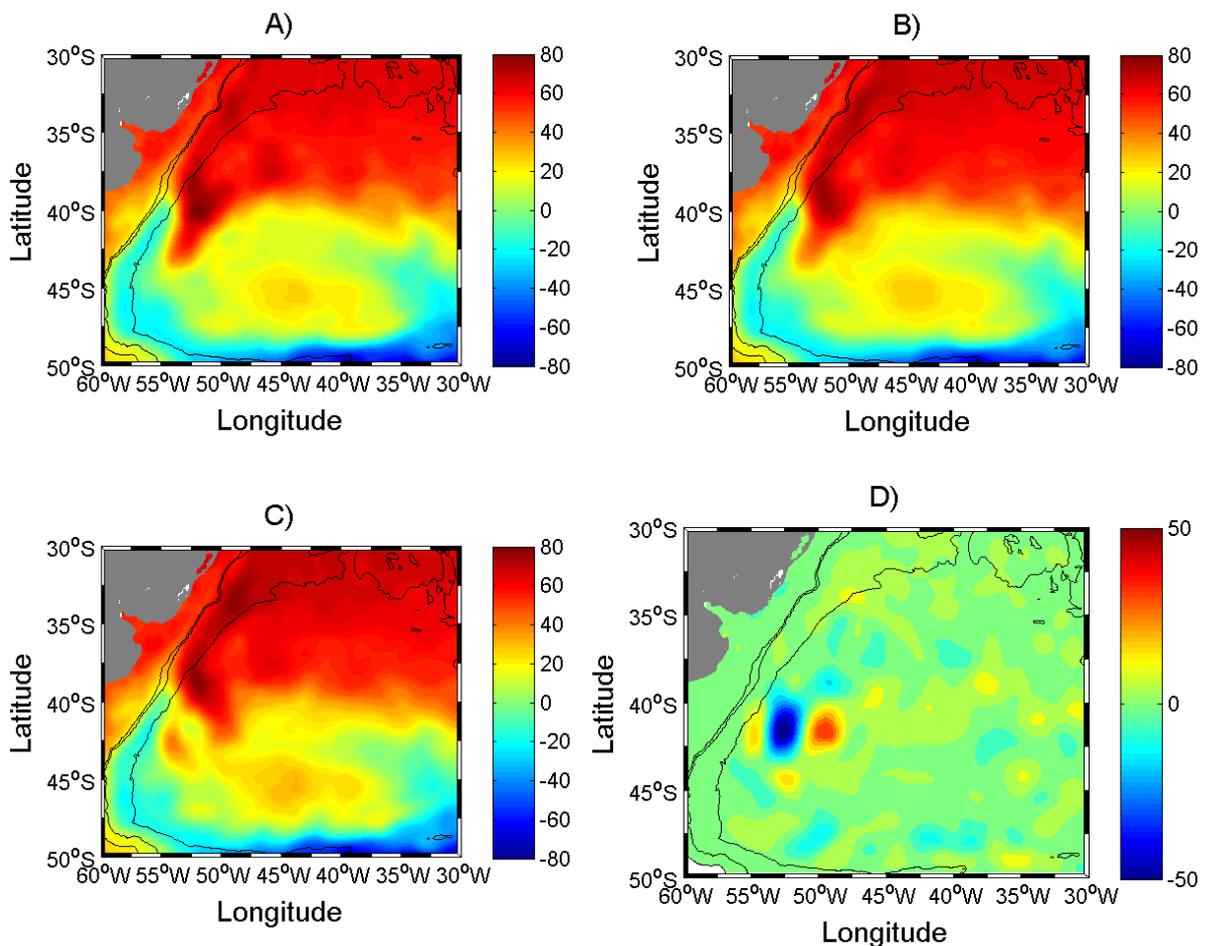


Figura 12. Composições de MADT (cm) na região da CBM. A) cenário de baixa energia, B) cenário de média energia, C) cenário de alta energia e D) Diferença entre o cenário de alta e baixa.

3.1.2 - Variabilidade Temporal da EKE

Para avaliação da variabilidade temporal da EKE, primeiro será analisada a série da EKE média das áreas de estudo. Serão expostas as séries brutas, com um dado a cada 7 dias, as filtradas com filtro passa-baixa de 1 ano (retendo somente as variações interanuais). A Tabela 1 sumariza os valores de EKE média, desvio-padrão e valores mínimos e máximos em cada uma das áreas.

Na Figura 13, o valor médio da EKE para a região da CBM foi de $326 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$ e o desvio-padrão foi $38,84 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$. Na série bruta, podemos ver a alta variabilidade da EKE na região. A série filtrada também mostra uma variabilidade significativa, chegando próximo a um desvio-padrão. Os valores extremos mínimos se concentram mais no início da série, enquanto os extremos máximos acontecem com maior frequência a partir do ano 2000.

Tabela 1. Médias, desvios padrão, valor máximo e mínimo da série de EKE para cada uma das áreas de estudo.

EKE ($\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$)	CBM	CA	CLA
Média	326	403	321
Desvio-padrão	38,84	58,5	52,8
Valor máximo	470	641	470
Valor mínimo	222	280	202

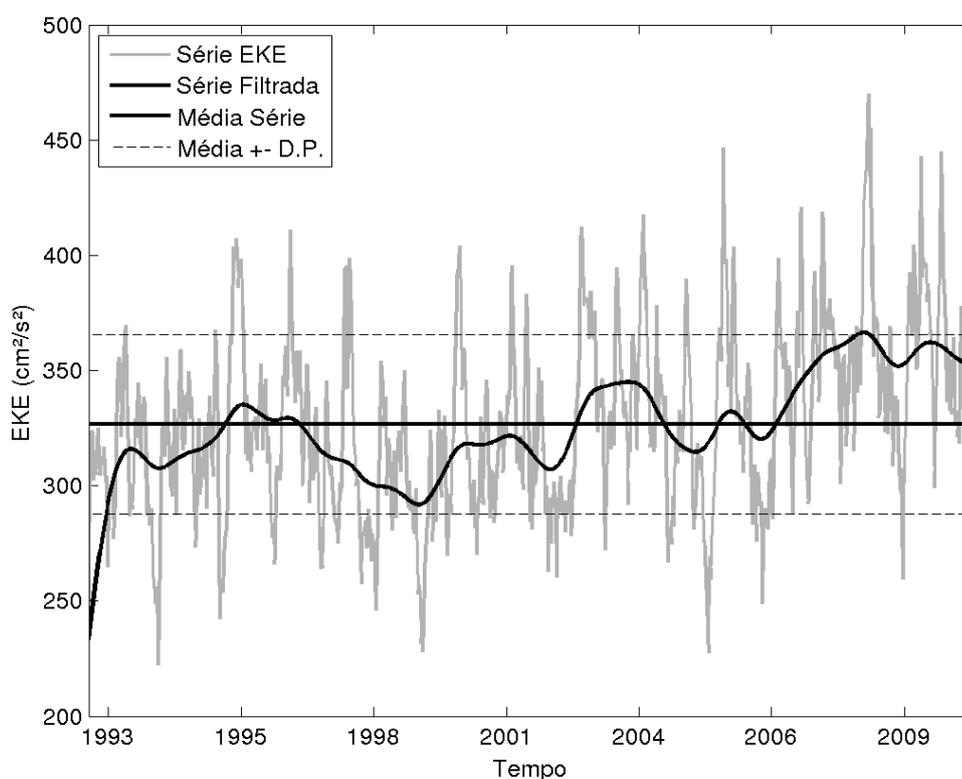


Figura 13. Séries de EKE ($\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$) para região da CBM.

Na Figura 14, que apresenta a série filtrada da EKE e a tendência linear desta propriedade na CBM, observa-se que houve um aumento significativo na energia ao longo dos 18 anos de dados analisados, com uma taxa de $0,23 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$ por mês, o que representa um aumento da energia de mesoescala na região neste período. O incremento de energia aconteceu de forma quase gradativa, porém, vale ressaltar que depois de um período com elevação da EKE (entre 1993 e 1995), houve um intervalo de diminuição significativa (entre 1996 e 1998), com posterior aumento da energia.

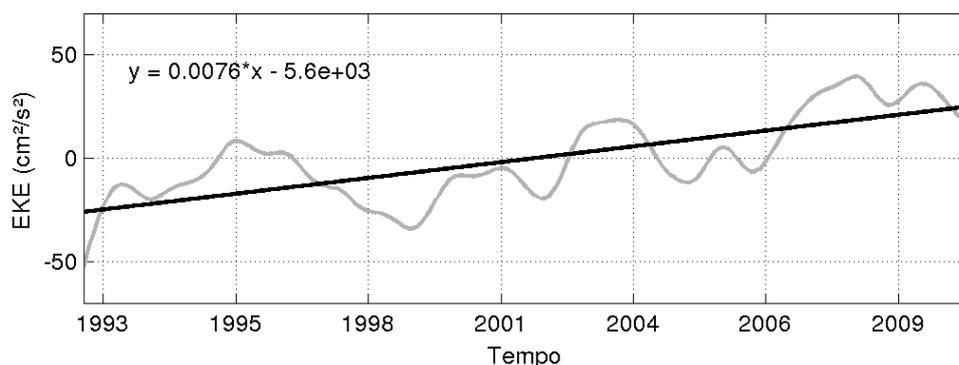


Figura 14. Tendência linear para CBM. A linha em cinza representa a série filtrada interanual da EKE e em preto o ajuste linear obtido pela regressão linear. Equação com base numa variação diária.

A fim de conhecermos as frequências dominantes de variabilidade da EKE nas CCO, foi realizada uma análise de ondeletas das médias mensais desta propriedade (Figura 15). Esta técnica fornece não só os períodos de variabilidade, como também os momentos no tempo que cada um deles foi mais importante para a energia da região.

Na Figura 15c, que representa a análise espectral da EKE na CBM, os principais períodos de variabilidade em termos energéticos foram o semianual e o anual. Este resultado era de certa forma esperado, pois as principais forçantes estão associados ao ciclo solar. A banda de energia anual ganha mais importância em alguns momentos da série, como no período entre 1996-1998, 2005-2006 e 2009, onde uma maior quantidade de energia esteve associada ao ciclo anual (quadro *b*). A banda de energia da mesoescala oscilou bastante, sendo significativa em vários momentos (1994, 1998, 2000, 2001, 2007, 2009).

No quadro *d*, podemos observar os meses nos quais houve maior energia associada à variabilidade em períodos entre 2-6 meses (mesoescala). Nos anos de 1995, 2004, 2007 e 2010 a média da variância foi significativa, essa banda de energia parece ter variações em escala interanual.

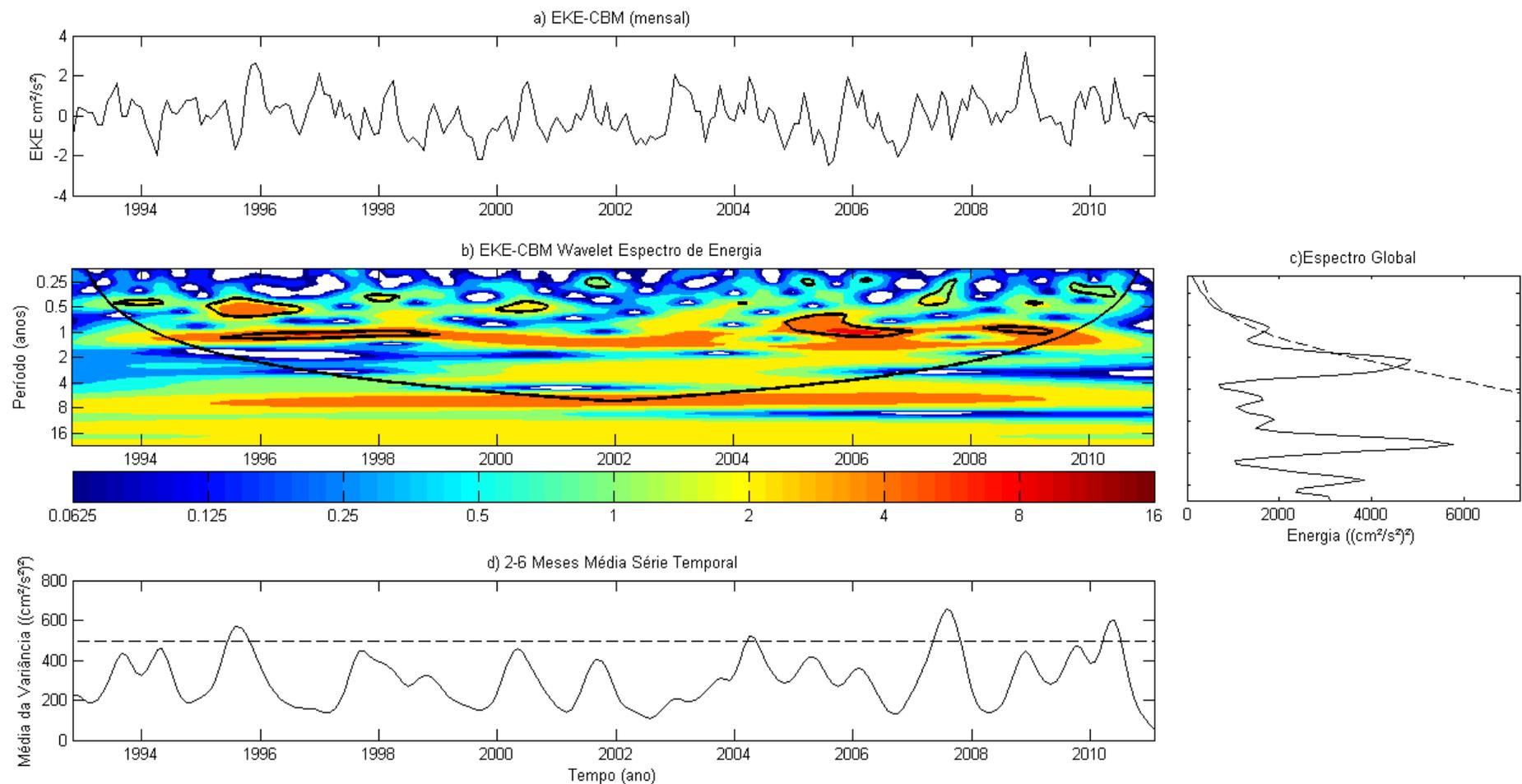


Figura 15. Análise de ondeletas para região da CBM. a) série com médias mensais normalizadas, b) espectro de energia da ondeleta em $\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$ (linha preta representa o cone de influência e contornos pretos o nível de significância de 5%), c) análise espectral da série e d) a integração da energia para cada ponto da série para a banda de 2-6 meses (mesoescala). Linhas tracejadas representa nível de confiança de 95%.

3.2 – CORRENTE DAS AGULHAS

3.2.1 – Variabilidade Espacial

A CA foi a mais energética das CCO analisadas, alcançando valores de EKE de $2700 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$ na região da retroflexão 38°S - 40°S e 18°E - 20°E (Figura 16), esta figura representa o campo médio da EKE ao longo do tempo. A Corrente de Retorno das Agulhas (CRA) também possui altos valores de EKE associados, com valores próximos a $2000 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$. Outra região (35°S e 24°E) que ficou com a energia ressaltada foi no eixo da CA (NE-SW) entre Porto Elizabeth e o Platô das Agulhas (40°S e 27°E), com valores próximos a $1500 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$.

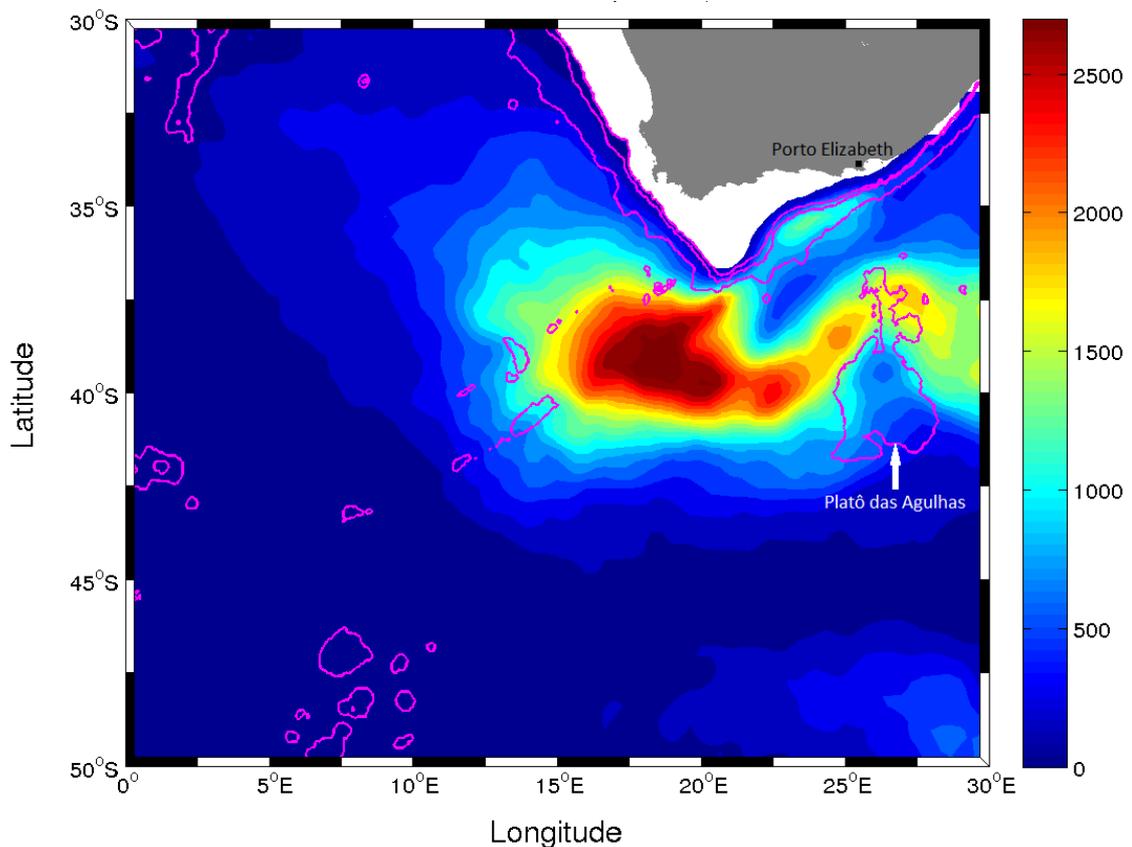


Figura 16. EKE ($\text{cm}^2 \text{ s}^{-2}$) média na região da CA para todo o período analisado, entre OUT/1992 até JAN/2011. As linhas em magenta denotam as isóbatas de 500, 1000 e 3000 m.

Nas três composições de EKE da região da CA (Figura 17), as mais altas energias se mantêm concentradas na região da retroflexão e na área de formação dos anéis das Agulhas (39°S e 17°E). A área da CRA também é uma região de alta energia, porém com valores um pouco menores, mas com sua forma bem definida, meandrando no Platô das Agulhas. Os valores máximos das composições de baixa e média energia (Figura 17a e 17b) foram

similares, aproximadamente $2700 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$, diferenciando-se pelo tamanho da área que concentra a energia, que no estado médio tem uma forma mais circular e cerca de quatro vezes maior.

A composição de maior energia (Figura 17c) teve seus máximos nas regiões anteriormente citadas e também na zona do primeiro meandro da CRA, com valor máximo de energia atingindo cerca de $3700 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$. A área com altos valores de energia no eixo da CA que ficou marcada na Figura 16, apresentando valores de EKE elevados ($2700 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$) apenas na composição de alta energia.

A diferença entre as composições (Figura 17d) mostrou que, enquanto nos cenários de baixas e médias EKE as áreas mais energéticas localizam-se na região de vazamento das Agulhas em torno de (39°S e 17°E), no cenário mais energético há o deslocamento desse centro com maiores valores de energia para leste, próximo a 41°S e 20°E . Diferenças de energia na região da CRA evidenciam um deslocamento do primeiro meandro em direção ao Platô das Agulhas ($37\text{-}42^\circ\text{S}$ e 25°E) nas altas energias. Uma zona com energia elevada no eixo da corrente (35°S e 24°E) também foi observada na imagem das diferenças.

Na composição de MADT para o cenário de baixa energia (Figura 18a), as alturas do mar mostraram uma corrente que segue a plataforma continental, com orientação NE-SW, e a sua retroflexão, que passa a ter orientação quase zonal (39°S e entre $15\text{-}20^\circ\text{E}$). Adjacente a CA aparece a feição que corresponde à corrente de retorno, contornando o Platô das Agulhas, sendo este o primeiro meandro da CRA. Uma elevação elíptica dentro do eixo da corrente, em torno 21°E e 40°W , é o ponto que apresenta a maior altura da superfície, possivelmente associado à retroflexão.

No estado intermediário (Figura 18b), a CA e a CRA deslocam seus eixos para sul. Os padrões das alturas para a região como um todo se mantêm semelhantes aos do cenário de menor energia. As alturas no entorno da retroflexão (39°S e 20°E) aumentam e atingem latitudes mais a oeste (14°E).

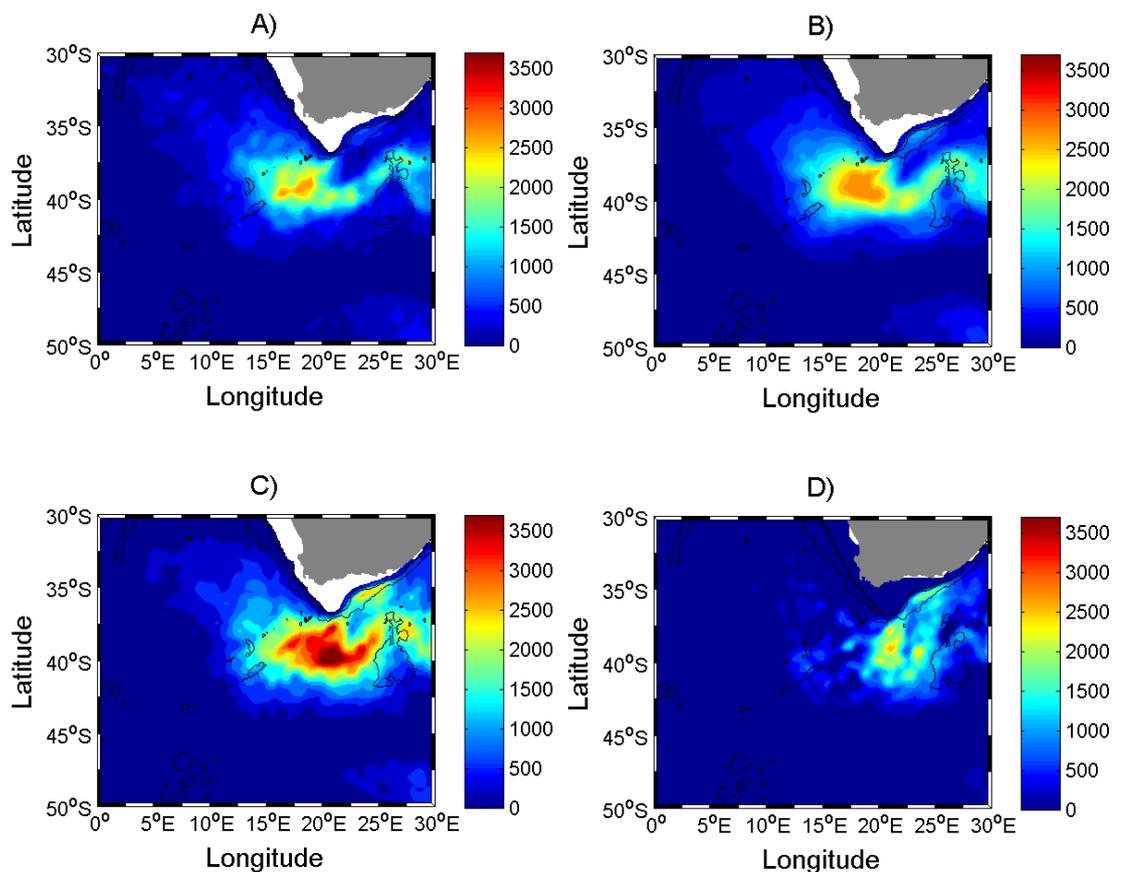


Figura 17. Composições de EKE ($\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$) na região da CA. A) cenário de baixa energia (valores inferiores à média menos um desvio-padrão (d.p.)), B) cenário de média energia (valores superiores à média menos um d.p. e inferiores à média mais um d.p.), C) cenário de alta energia (valores superiores à média mais um d.p.) e D) Diferença entre o cenário de alta e baixa.

Na composição de altas energias (Figura 18c) nota-se que, assim como na composição de média energia, há o deslocamento das correntes para sul, porém de forma mais evidente, com alturas de 70 cm atingindo o limite sul do Platô das Agulhas (42°S). Neste cenário mais energético também é possível observar a mudança de posição das áreas com maiores alturas, as quais passam a se concentrar no eixo da corrente, mostrando que a mesma se contrai, provavelmente após a liberação de um vórtice, e a retroflexão é deslocada mais para leste. Uma elevação (39°S e 14°E) adjacente ao local onde se concentravam as maiores alturas nas outras composições é observada, possivelmente, relacionada ao vórtice lançado. Nesse cenário, os eixos das correntes se afastam e as inclinações em torno do centro de maior altura diminuem com a CRA ficando mais próxima do platô.

As diferenças entre as composições de alta e baixa energia (Figura 18d) foram maiores na região da retroflexão, com alturas menores (30 cm) na composição de maior energia, o que pode significar sua retração. A área logo acima desta, 37°S e 18°E, teve forte diferença positiva, mostrando que esta fica mais intensa nas menores energias. Adjacente à retroflexão, próximo de 39°S e 14°E, as diferenças são positivas, chegando a valores maiores do que 30 cm, e apresentam uma forma circular. A presença das diferenças positivas na zona próxima ao platô, ocupada pela CRA, e das negativas logo após a elevação (30°S e 40°E), mostram que nas maiores energias ocorre a deriva da corrente para sul e do primeiro meandro para leste.

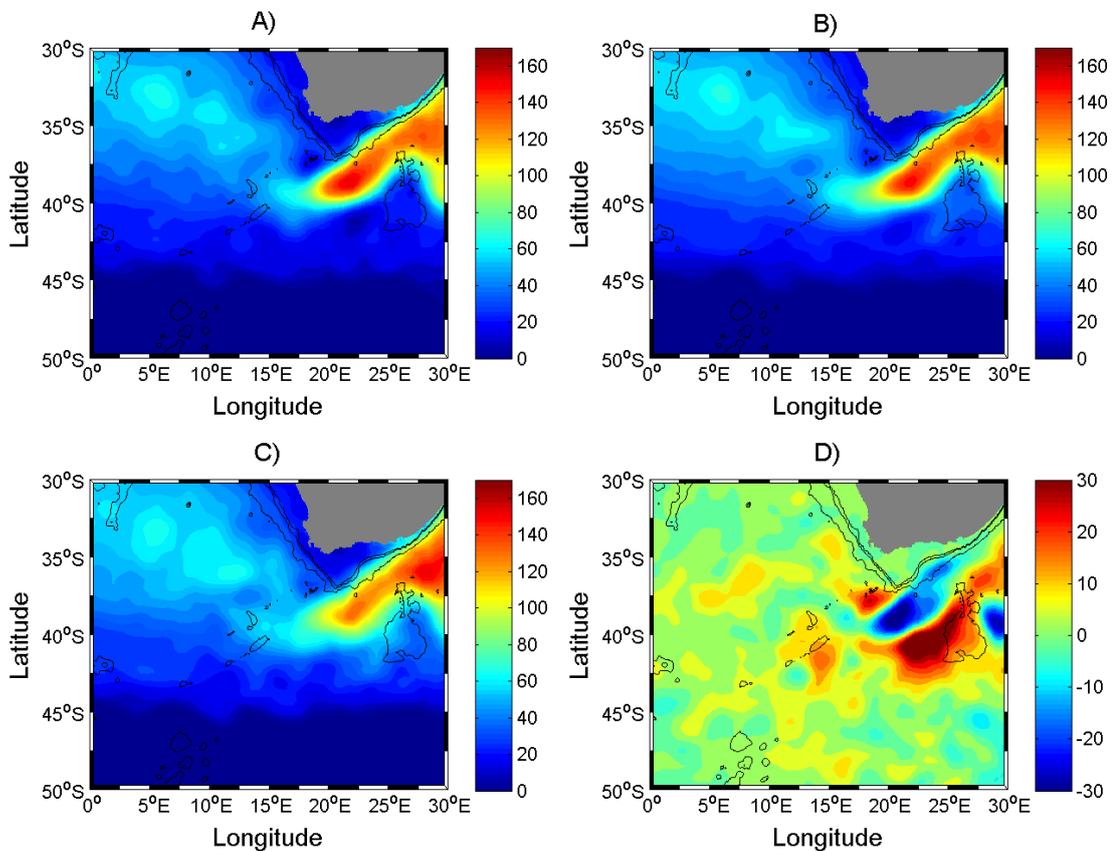


Figura 18. Composições de MADT (cm) na região da CA. A) cenário de baixa energia, B) cenário de média energia, C) cenário de alta energia e D) Diferença entre o cenário de alta e baixa.

Em todas as composições ficou marcada uma depressão (37°S e 18°E) acima da posição média da retroflexão, que fica menos intensa com o aumento da energia. Outro padrão que aparece em todas as composições é uma sequência de elevações e depressões a

partir da retroflexão (39°S e 20°E) até os 32°S e 5°E, formado uma espécie de corredor. Essas feições ficam mais circulares nas maiores energias.

3.2.2 – Variabilidade Temporal da EKE

A série de EKE da região da retroflexão das Agulhas (Figura 19) apresentou um valor médio de $403 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$, mais alto do que a CBM, como esperado, e desvio-padrão de $58,5 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$. A série bruta, assim como na CBM, possui grande variabilidade, os principais picos, tanto de baixa como alta energia, coincidem com os picos da série filtrada. A série filtrada foi, em alguns momentos, próxima a um desvio-padrão e no ano 2000 ultrapassou esse limite. A grande amplitude da série filtrada somada à coincidência entre os picos de energia extrema mostra a forte relação entre os valores extremos e a variabilidade interanual.

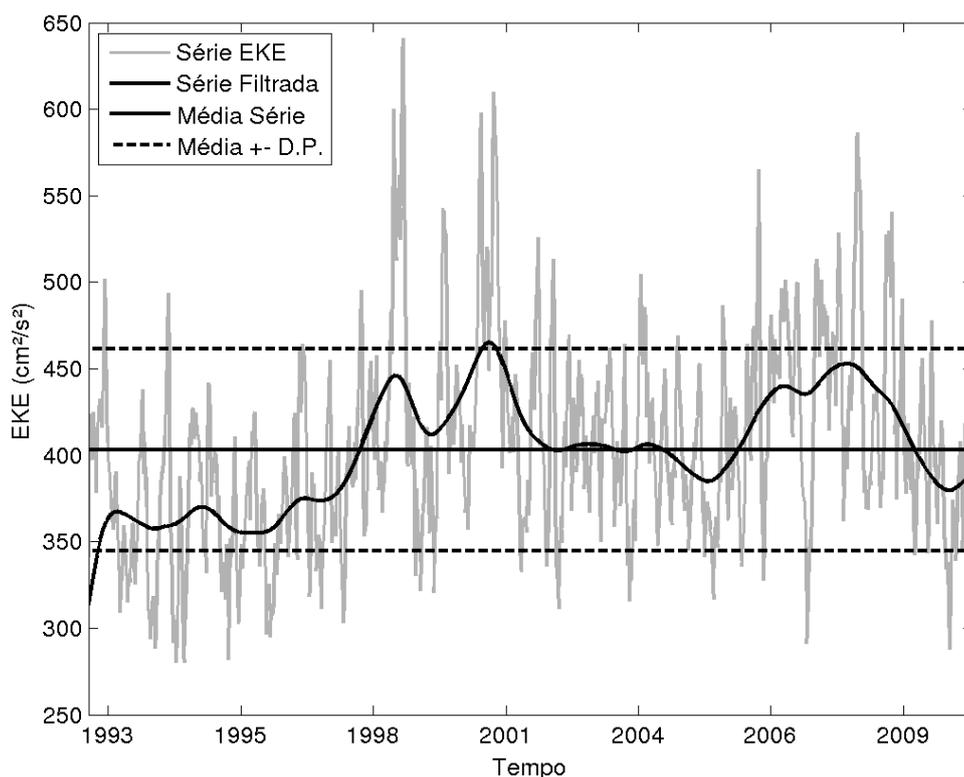


Figura 19. Séries de EKE ($\text{cm}^2 \text{ s}^{-2}$) para região da CA.

A tendência linear para a série filtrada de EKE da CA também apresentou uma tendência positiva significativa para o período, sendo que a taxa de aumento foi $0.30 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$ por mês (Figura 20). No entanto, esta ficou marcada por épocas de forte aumento e outras

com energia quase constante. Os períodos onde ficaram concentradas as maiores picos de energia na área foram de 1997 a 2001 e 2005 a 2008.

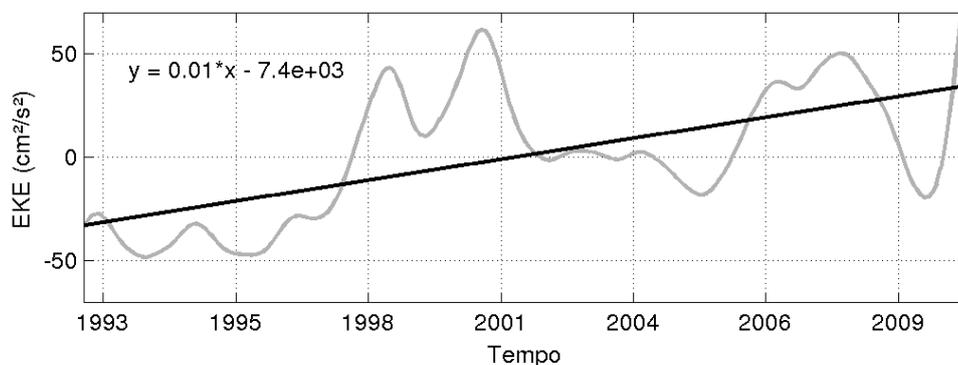


Figura 20. Tendência linear para CA. A linha em cinza representa a série filtrada interanual da EKE e em preto o ajuste linear obtido pela regressão linear. Equação com base numa variação diária.

Na região da CA, a análise espectral (Figura 21c) mostra que os picos energéticos foram significativos para os seguintes períodos: 4 meses, o ciclo anual e interanual de 7-8 anos. Além desses, outro pico de energia ficou marcado no período de 2 anos, mas não foi significativo. Assim como na análise da CBM, em alguns momentos da série a importância do ciclo anual aumenta, como em 1998-2001 e 2007-2009 (Figura 21b).

A integração da energia nas frequências de mesoescala (intervalo de 2 a 6 meses) se mostrou mais significativa em três momentos, 1994-1995, 1999-2003 e 2006-2009 (Figura 21d). O perfil dessa oscilação chamou atenção pela semelhança com a série filtrada da CA. Com isso, foi feita a correlação entre essas duas séries e encontrou-se um valor de 0,4 de correlação, sugerindo uma modulação interanual importante para a região.

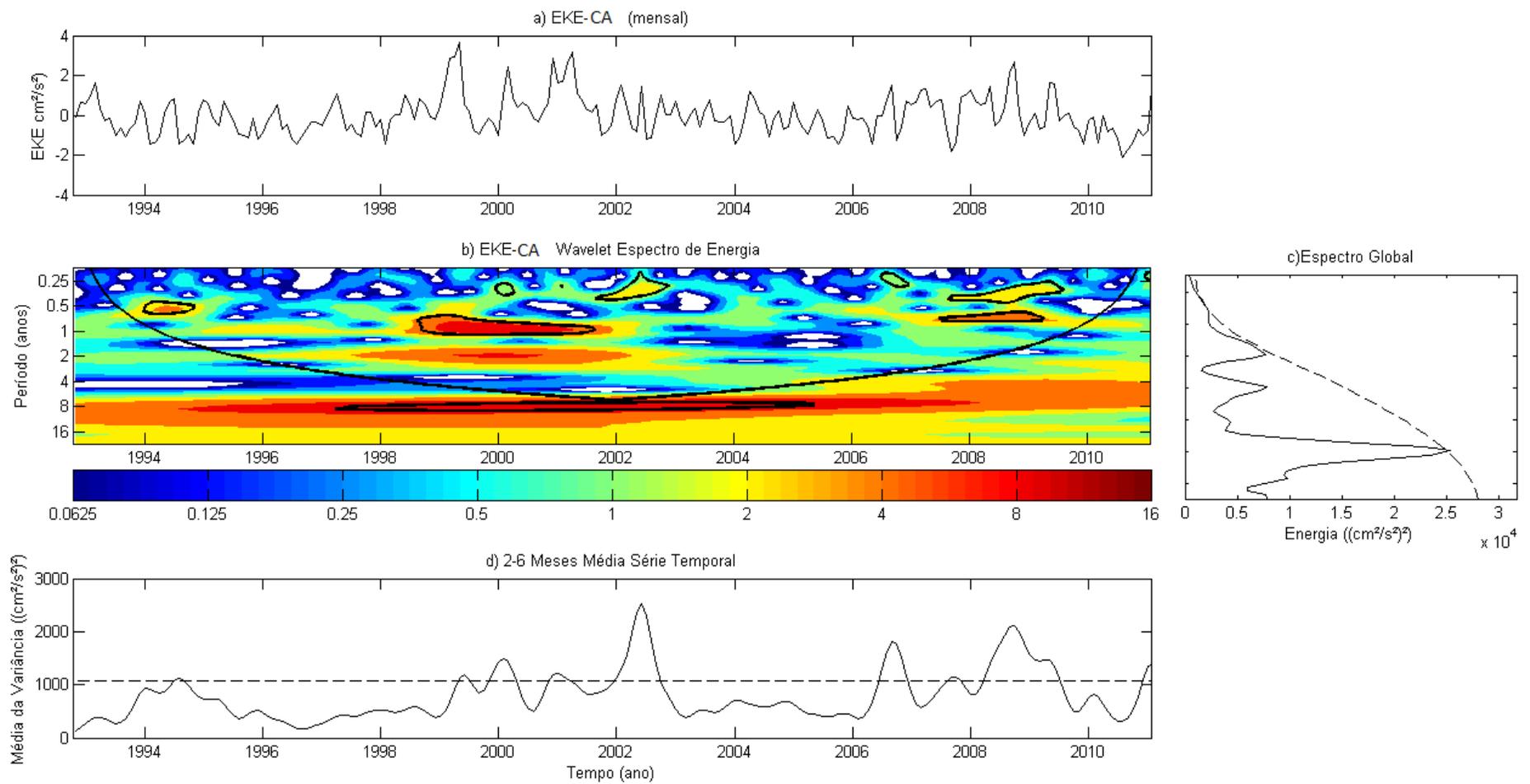


Figura 21. Análise de ondeletas para região da CA. Legenda igual à figura 15.

3.3 – CORRENTE LESTE AUSTRALIANA

3.3.1 – Variabilidade Espacial

A Figura 22 apresenta a média da EKE na CLA de todo o período dos dados. A avaliação da EKE mostra que esta é uma corrente de energia intermediária entre a CA e CBM, visto que o valor máximo encontrado foi próximo a $2000 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$. Os maiores valores de energia estão confinados na área com batimetria mais profunda na Planície Abissal da Tasmânia, com picos entre $32\text{-}35^\circ\text{S}$, mas com altas energia até 40°S . As áreas mais rasas possuem valores de EKE menor mesmo estando próximas da região de grande energia da corrente.

No norte, próximo à Grande Barreira de Corais, há alta concentração de energia, sendo provavelmente uma contaminação do dado satelital, pois este pode ter erros associados a medidas em zonas de batimetria rasa e irregular. No entanto, os desvios-padrão nessa área são baixos, não representando grande interferência nas análises de variabilidade.

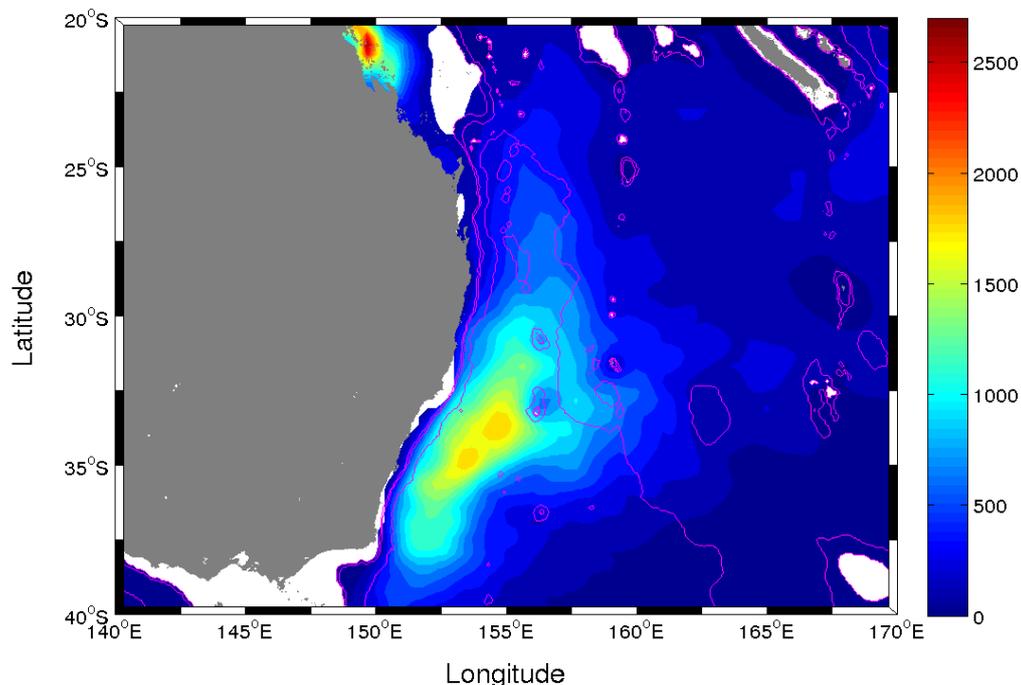


Figura 22. EKE ($\text{cm}^2 \text{ s}^{-2}$) média na região da CLA para todo o período analisado, entre OUT/1992 até JAN/2011. As linhas em magenta denotam as isóbatas de 500, 1000 e 4000 m.

A composição de baixa energia (Figura 23a) apresenta valores de EKE de até $1500 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$, próximo ao limite sul médio da CLA (32°S), enquanto na composição média o valor máximo foi de $1800 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$ (Figura 23b). As duas composições apresentaram uma área com maior concentração de EKE centrada em 33°S e 155°E , próximo à posição que a corrente se separa da costa. Entre a baixa e a média energia, de forma geral, houve um aumento da EKE no domínio da CLA e na região ao sul da zona de separação da costa.

No cenário de maior energia (Figura 23c) fica evidente uma sequência de núcleos de intensificação de EKE ao longo do eixo da corrente, bem como na região ao sul desta (de 33 a 39°S), atingindo valores de até $3000 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$. A posição do núcleo de maior energia fica mais ao sul, aproximadamente 35°S e 153°E , do que nos outros estados energéticos.

O resultado da diferença entre as composições de alta e baixa energia mostra a presença de núcleos circulares posicionados desde o eixo principal da corrente, de 25°S até 32° em média, e na região ao sul da retroflexão de 32°S até 37°S , sempre próximo a costa. Os maiores valores são em torno de $1700 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$, próximo dos valores máximos da composição média (Figura 23d).

Na Figura 24 são apresentadas as composições de MADT para a região da CLA, a qual apresentou padrões bastante complexos. No cenário de menor energia (Figura 24a), assim como na CBM, a posição da corrente atinge seu limite mais austral, com latitude em torno de 34°S . Nessa situação fica evidenciada uma estrutura circular, com alturas maiores do que seu entorno, na porção mais ao sul da corrente. A elevação da superfície em 38°S e 152°E pode ser um vórtice liberado pela corrente em outro momento.

No nível médio de energia (Figura 24b), a corrente passa a ter limites mais a norte ($32,5^\circ\text{S}$). Aparece nessa imagem uma estrutura circular próximo ao limite da corrente, sugerindo uma evolução do cenário anterior. Nesta composição ficou mais evidenciado o meandramento da corrente de retorno seguindo as estruturas batimétricas presentes na região.

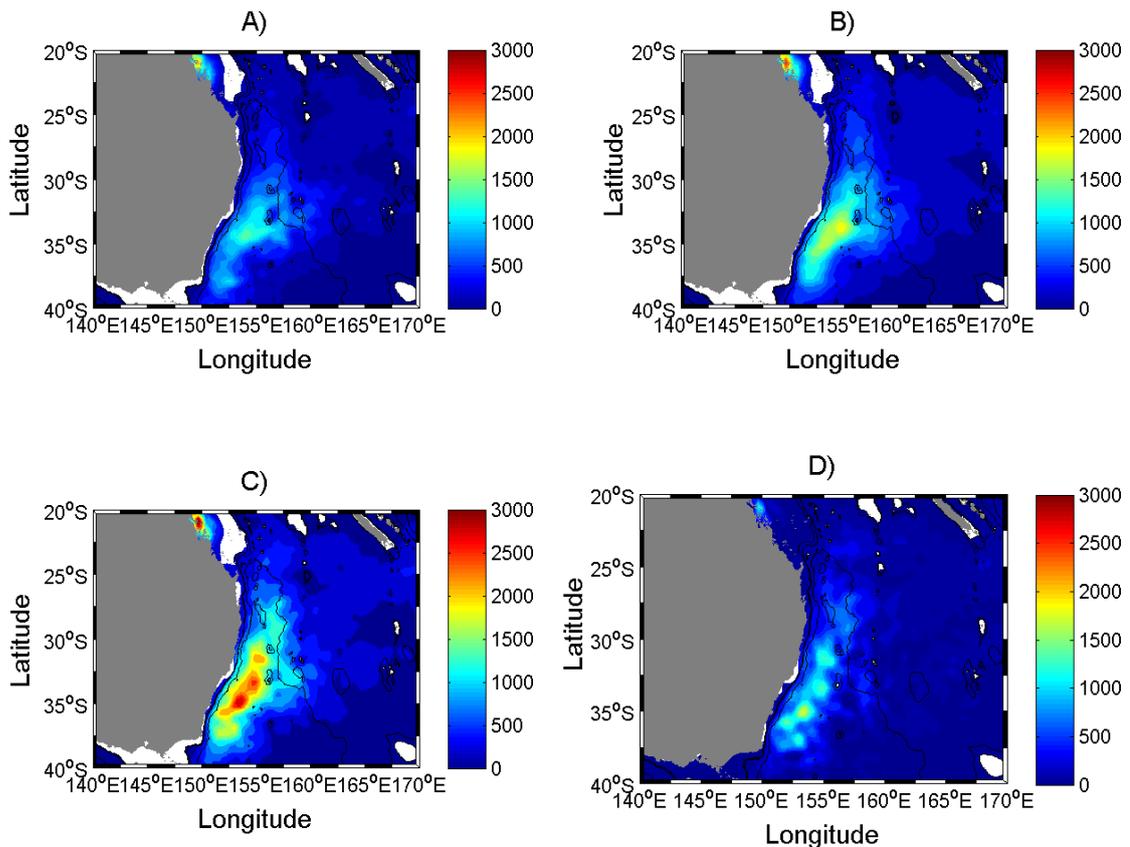


Figura 23. Composições de EKE ($\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$) na região da CLA. A) cenário de baixa energia (valores inferiores à média menos um desvio-padrão (d.p.)), B) cenário de média energia (valores superiores à média menos um d.p. e inferiores à média mais um d.p.), C) cenário de alta energia (valores superiores à média mais um d.p.) e D) Diferença entre o cenário de alta e baixa.

Nos momentos de alta EKE (Figura 24), o limite sul da CLA atinge sua posição mais ao norte, 30°S . Nesse cenário ficam marcados dois possíveis vórtices anticiclônicos, um próximo a 33°S e outro de 37°S , liberados pela corrente. Algumas outras estruturas circulares ficam aparentes na imagem, mas não tão marcadas quanto às elevações citadas.

A imagem referente às diferenças entre o cenário alta energia menos o de baixa das alturas superficiais do mar (Figura 24d), apresenta várias estruturas circulares, inclusive no eixo da CLA e da corrente de retorno, possivelmente associada a vórtices. As feições da EKE encontradas na região foram predominantemente circulares também.

As características das diferenças de altura, assim como as de EKE, foram bem distintas nas três áreas. Enquanto a CA e a CBM concentram as maiores diferenças

associadas aos limites das correntes, as retroflexões, na CLA esses altos valores estão distribuídos em mais áreas, como no eixo da corrente (31°S e 155°E), na zona ao sul da corrente (37°S e 152°E), na Frente da Tasmânia (em torno de 34°S) e também na retroflexão (34°S e 155°E).

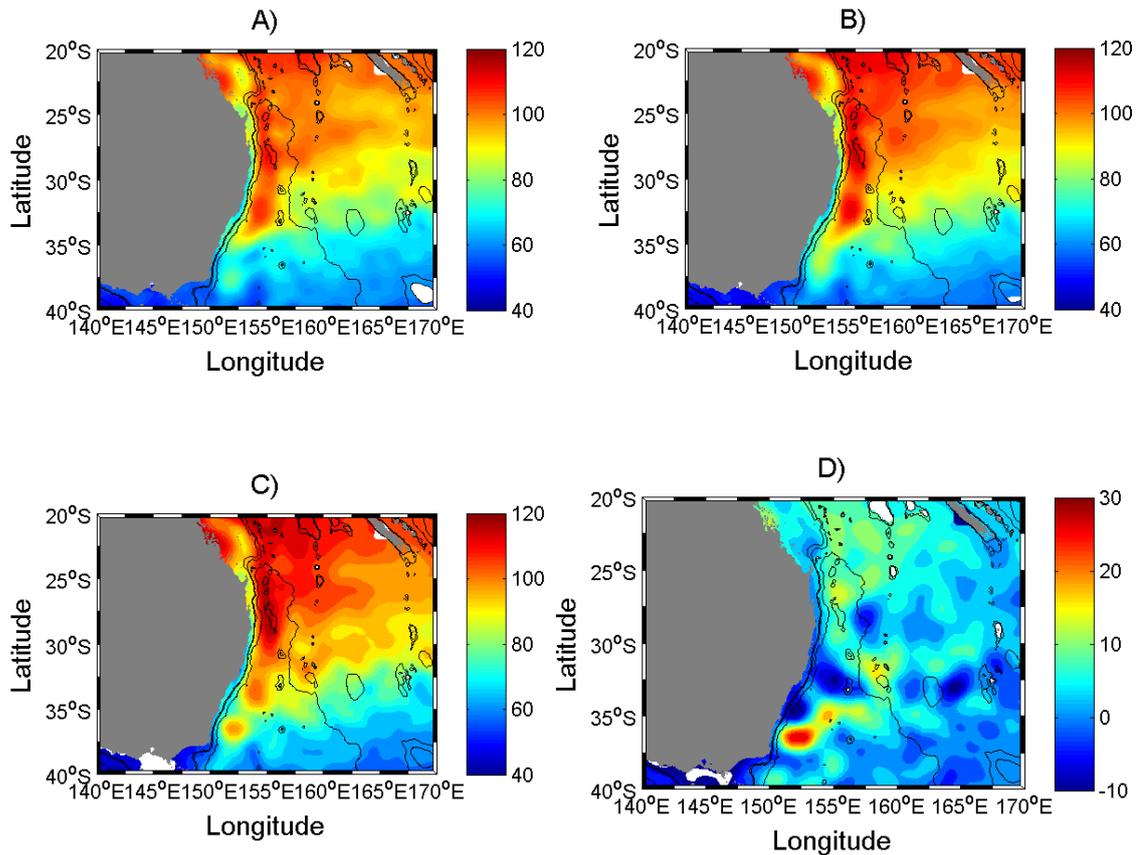


Figura 24. Composições de MADT (cm) na região da CLA. A) cenário de baixa energia, B) cenário de média energia, C) cenário de alta energia e D) Diferença entre o cenário de alta e baixa.

3.3.2 – Variabilidade Temporal da EKE

Dos sistemas analisados, a CLA foi a que apresentou a menor média de EKE, $321,87 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$, com um desvio-padrão de $52,8 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$. A série bruta (Figura 25) também se mostrou muito variável, com valores são muito semelhantes aos da CBM, mas apresentando maior variabilidade ao longo do tempo. Além disso, a série filtrada mostrou um padrão ondulatório mais evidente e mais variações quando comparada com as séries das outras áreas de estudo.

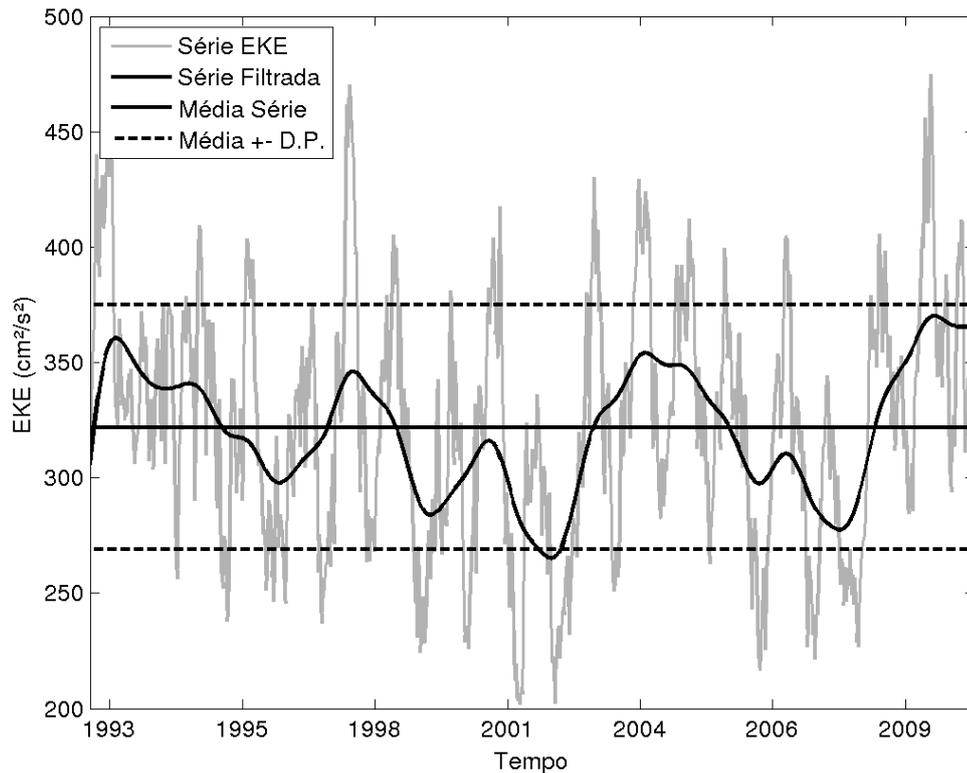


Figura 25. Séries de EKE ($\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$) para região da CLA.

A série da CLA apresentou uma tendência linear de aumento de EKE muito baixa, com taxas de $0,025 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$ por mês, não sendo significativa (Figura 26). Ela ficou marcada por intervalos com fortes aumentos, seguidos de intensa diminuição em forma de pulsos.

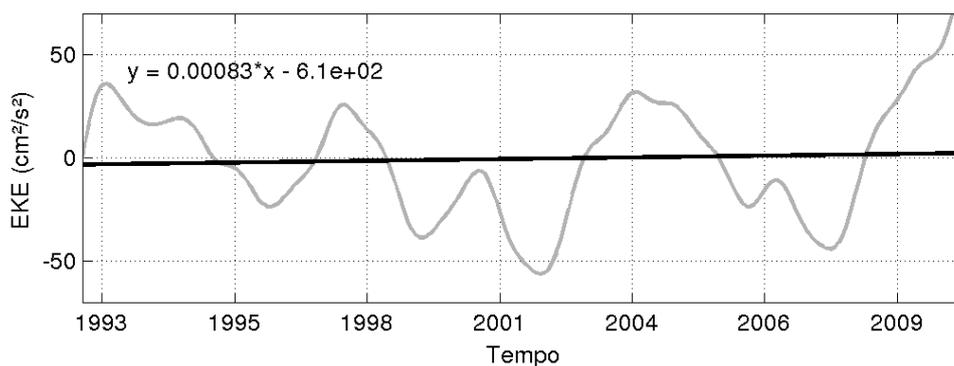


Figura 26. Tendência linear para CLA. A linha em cinza representa a série filtrada interanual da EKE e em preto o ajuste linear obtido pela regressão linear. Equação com base numa variação diária.

A CLA foi o sistema que mostrou um ciclo anual mais forte em relação às outras frequências (Figura 27c). No entanto, a frequência de 4 meses também foi significativo.

Outros picos de energia, porém não significativos, foram os de 3 anos e 7 anos. O ciclo anual da série referente à região da CLA, diferentemente das outras séries, não apresentou alta variabilidade ao longo do tempo, mantendo-se significativo desde 1995 (Figura 27b). Entre 1994 e 1996 o ciclo teve um forte aumento de variabilidade, a qual se manteve num mesmo nível até 2004, quando passou a diminuir. A energia de mesoescala integrada não se mostrou tão intensa, sendo sempre muito inferior ao limite de confiança de 95%, apesar da maior intensidade nos anos de 1995, 1998 e 2010 (Figura 27d).

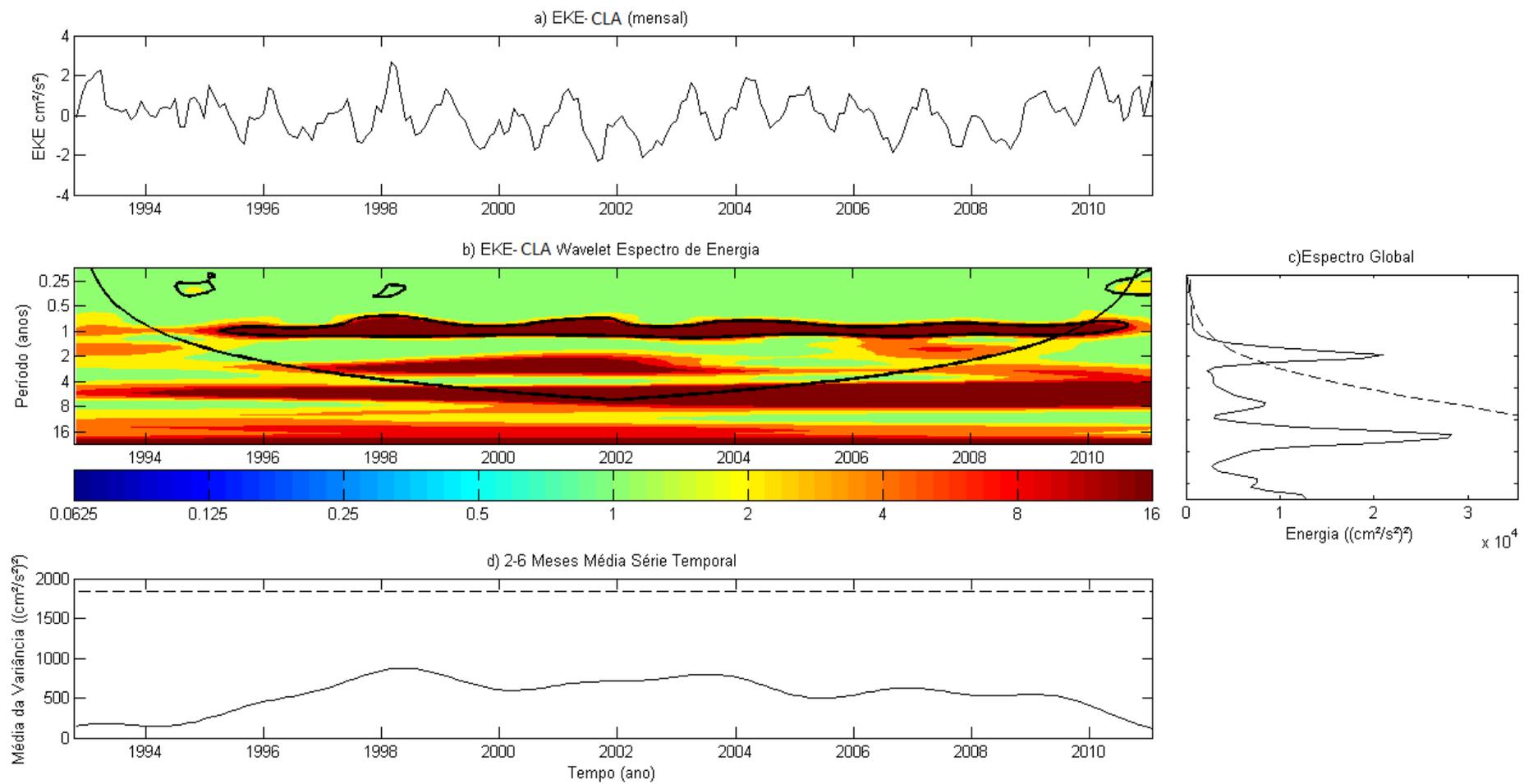


Figura 27. Análise de ondeletas para região da CLA. Legenda igual à figura 15.

3.4 - RELAÇÕES ENTRE A EKE E OS MODOS DE VARIABILIDADE CLIMÁTICA

Para tentar explicar a variabilidade interanual da EKE nas CCO estudadas, foram analisados alguns índices de modos de variabilidade climática como os do SAM, do SOI e do NINO3.4. As séries dos índices também foram filtradas para períodos maiores de que um ano.

A série do índice do SAM mostrou tendência negativa (Figura 28, quadro superior; -0,00043 por mês, os índices são adimensionais), mas possui oscilações em escalas de longo período, como 2 a 5 anos, em que o seu índice tem tempos de aumento e diminuição. Os anos em que o SAM teve a fase positiva mais forte foram 1993, 1997 a 1999, 2007 a 2008 e 2010. Já a fase negativa foi mais intensa em 2002, 2006. De 1994 a 1996 e 2003 a 2005 o índice se manteve próximo de zero.

O SOI foi o único dos índices que apresentou uma tendência significativa (Figura 28, quadro do meio). Com um crescimento nas últimas duas décadas de 0,0072 por mês, os períodos em que o índice do SOI teve os maiores valores foram de 1998 a 2000 e depois em 2007 e 2008. Seu mínimo aconteceu em 1997. De 2001 a 2006 as oscilações foram baixas, podendo ser considerado um período de estabilidade deste.

Por outro lado, a série do NINO3.4 (Figura 28, quadro inferior), que representa a componente oceânica do El Nino, apresentou tendências negativas de 0,0015 por mês, mas não significativas. Esse índice tem valores, em geral, contrários ao do SOI, sendo que os períodos em que o índice do NINO3.4 teve os menores valores foi de 1998 a 2000 e depois em 2007 e 2008. Seu máximo aconteceu em 1997 e de 2001 a 2006 as oscilações foram baixas, podendo ser considerado um período estável do modo.

O SAM e o SOI são obtidos a partir do campo de pressão atmosférica e o NINO3.4 a partir das temperaturas da superfície do mar. Dessa forma, esses índices demonstram a evolução características físicas do sistema climático, majoritariamente em gradientes de pressão atmosférica, que vão se refletir em mudanças no campo de ventos e na circulação oceânica, tanto localmente como remotamente.

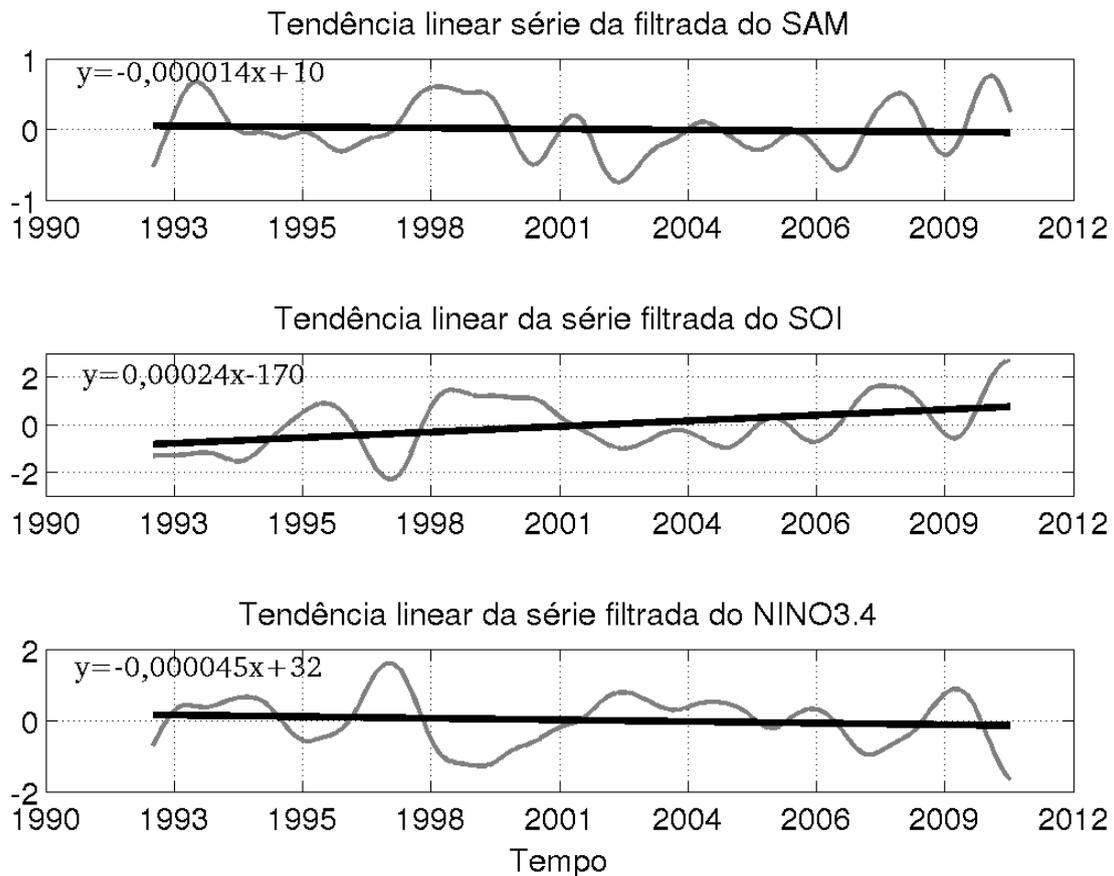


Figura 28. Séries filtradas dos índices dos modos de variabilidade climática em cinza e os ajustes lineares em preto, os índices são adimensionais.

Foram feitos testes de correlações com os modos de variabilidades citados anteriormente. Como forma de comparação, também foi feita a correlação com um índice que não se esperava ser correlacionado com as séries de EKE, o NAO, um modo climático do Atlântico Norte.

Na Figura 29, as correlações com a série de EKE da CBM não mostrou correlações significativas com os índices SOI, NINO3.4 e NAO. A correlação com o SAM foi significativa (0,26) no *lag* de 4 meses, com as séries em inversão de fase. Com isso, a energia na região da CBM parece não ter uma modulação por apenas um dos modos analisados e deve ser uma combinação de vários fatores que mascaram a influência destes.

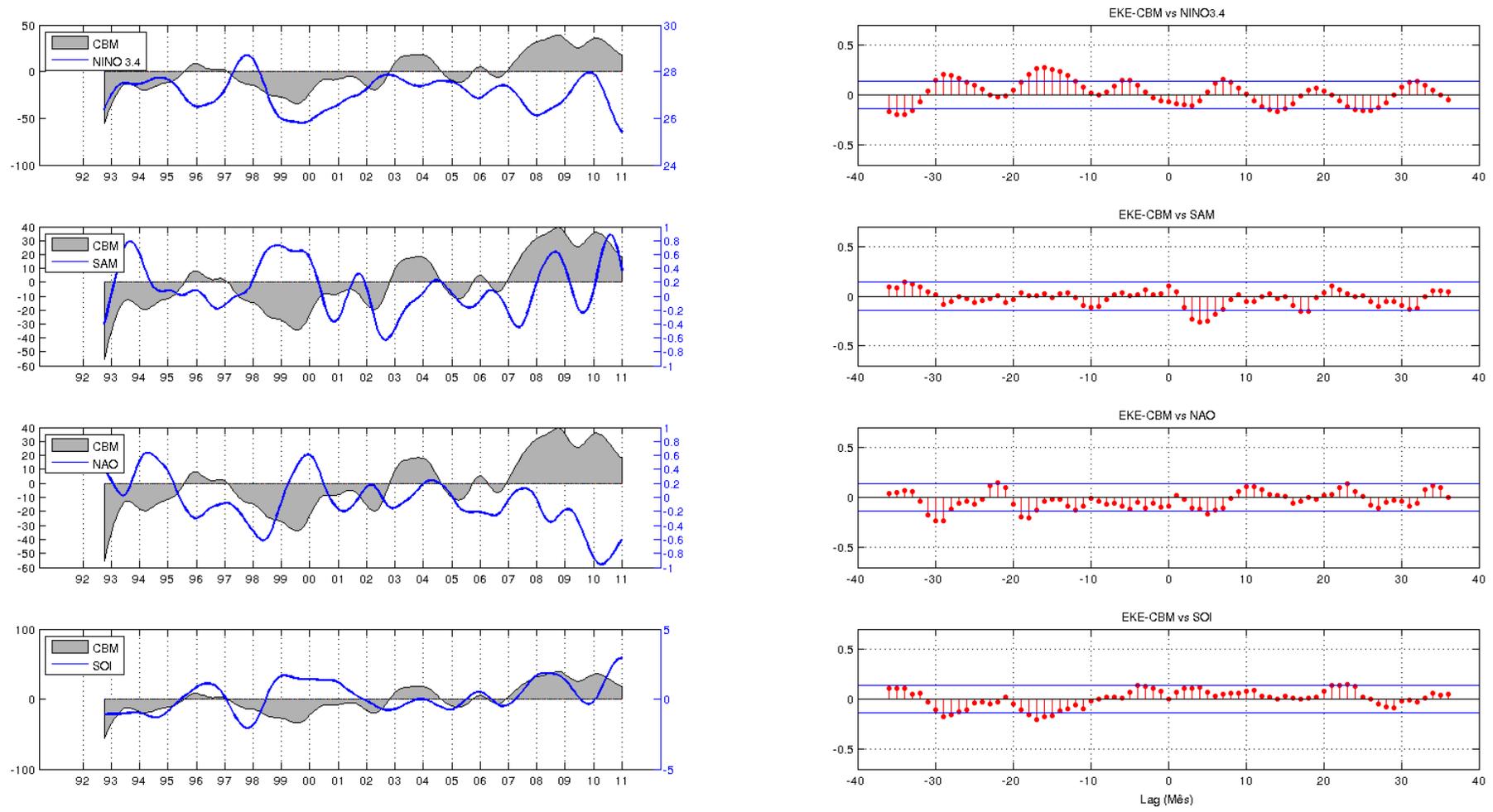


Figura 29. Séries filtradas e normalizadas de EKE da CBM e dos índices dos modos de variabilidade climática (à esquerda) e correlações cruzadas das séries de médias mensais (à direita), as linhas em azul representam o intervalo de confiança de 95%.

O resultado da análise espectral (Figura 21) na região da CA mostrou um pico significativo centrado em 7 anos, esse pico de energia da análise espectral é coincidente com a variabilidade do ENSO. A correlação cruzada com o SOI e o NINO3.4, índices que representam este modo de variabilidade, mostrou ser significativa com 0,32 (*lag* 0) e -0,35 (*lag* +3 meses), respectivamente. A correlação significativa, juntamente com a estatística espectral, sugere que realmente pode haver algum tipo de modulação desse fenômeno sobre a dinâmica da corrente e os processos de mesoescala relacionados à mesma.

A correlação com o SAM, apesar de não ter sido significativa, parece ter influência sobre a EKE na CA. Comparando os principais picos interanuais (1997 a 2001 e 2005 a 2008), estes coincidem com momentos de fase positiva mais intensa do SAM e do SOI, o que sugere que as duas atuem de forma sinérgica.

As formas como as modificações na circulação atmosférica e oceânica que estão relacionadas com o ENSO e SAM podem influenciar fisicamente o sistema da CA precisam ser melhores exploradas com outros tipos de dados para a confirmação desses indícios.

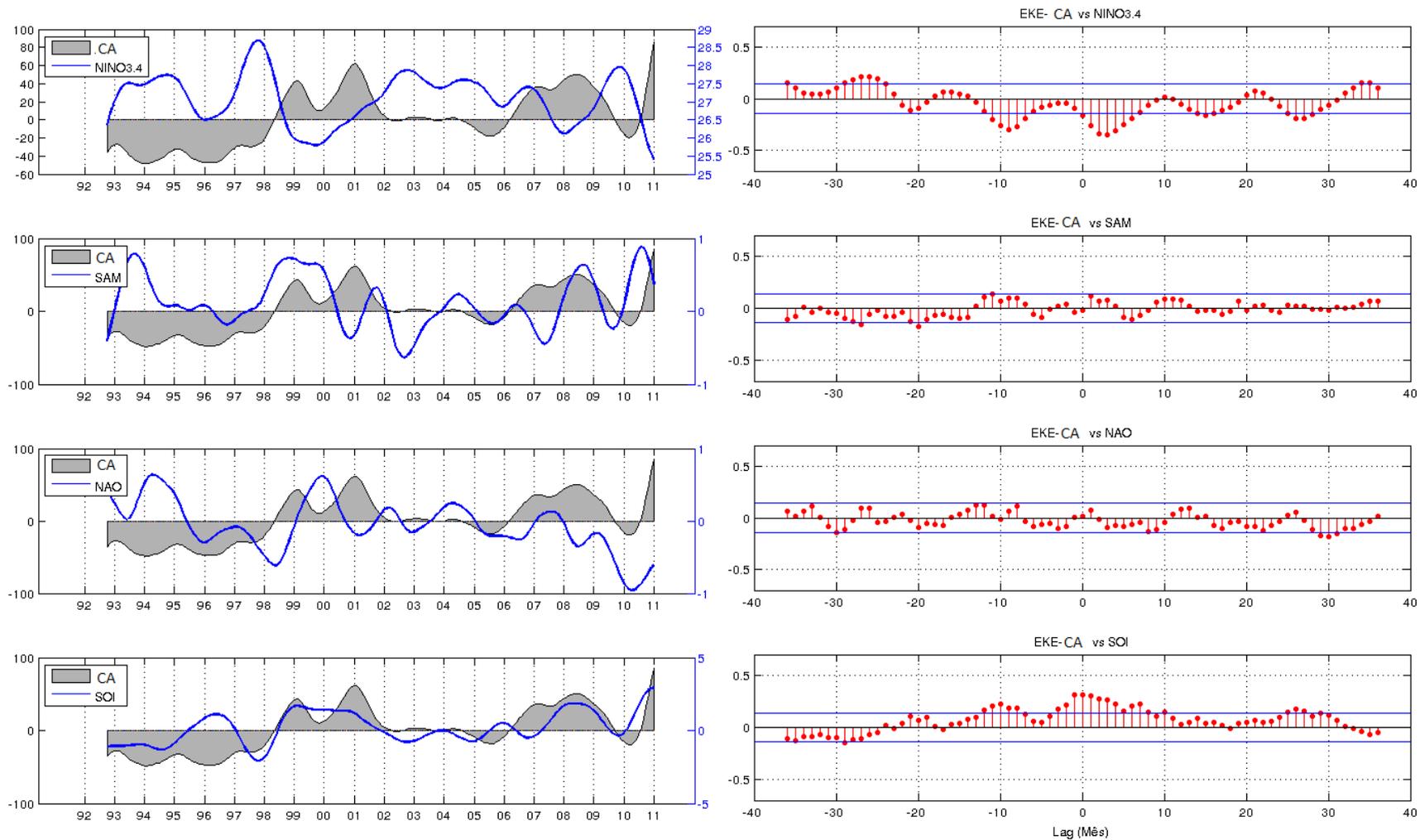


Figura 30. Séries filtradas e normalizadas de EKE da CA e dos índices dos modos de variabilidade climática (à esquerda) e correlações cruzadas das séries de médias mensais (à direita), as linhas em azul representam o intervalo de confiança de 95%.

Na CLA, onde já foram realizados diversos estudos sobre os impactos de variabilidades de longo período, os picos de energia em períodos maiores do que um ano não foram significativos na análise espectral, apesar de estarem pronunciados no perfil (3 e 7 anos).

A correlação entre a EKE e ENSO foi significativa (Figura 31), com valores altos (0,4 e 0,51 para SOI e NINO3.4, respectivamente) e uma defasagem de 7 meses. Apesar de alguns autores afirmarem a existência da modulação na intensidade da CLA pelo SAM (Roemmich et al., 2007 e Morrow et al., 2010), não foi encontrada correlação significativa entre as séries. No entanto, observando a séries filtradas, essas parecem ter tendências de 3 a 4 anos que são semelhantes.

É importante ter em mente que muitas variáveis são responsáveis por forçar a energia de mesoescala nos oceanos, sendo complexo distinguir causa e efeito de cada uma dessas forçantes. O período abrangido pela série, apesar de permitir uma primeira análise sobre a variabilidade de longo período, foi um limitante, visto que tais oscilações foram amostradas no máximo duas ou três vezes de forma independente. Alguns períodos de variabilidades importantes de cada região foram descritos dando indícios de processos que podem estar modulando a EKE. O complemento com séries mais longas e outros dados são essenciais para a confirmação desses resultados.

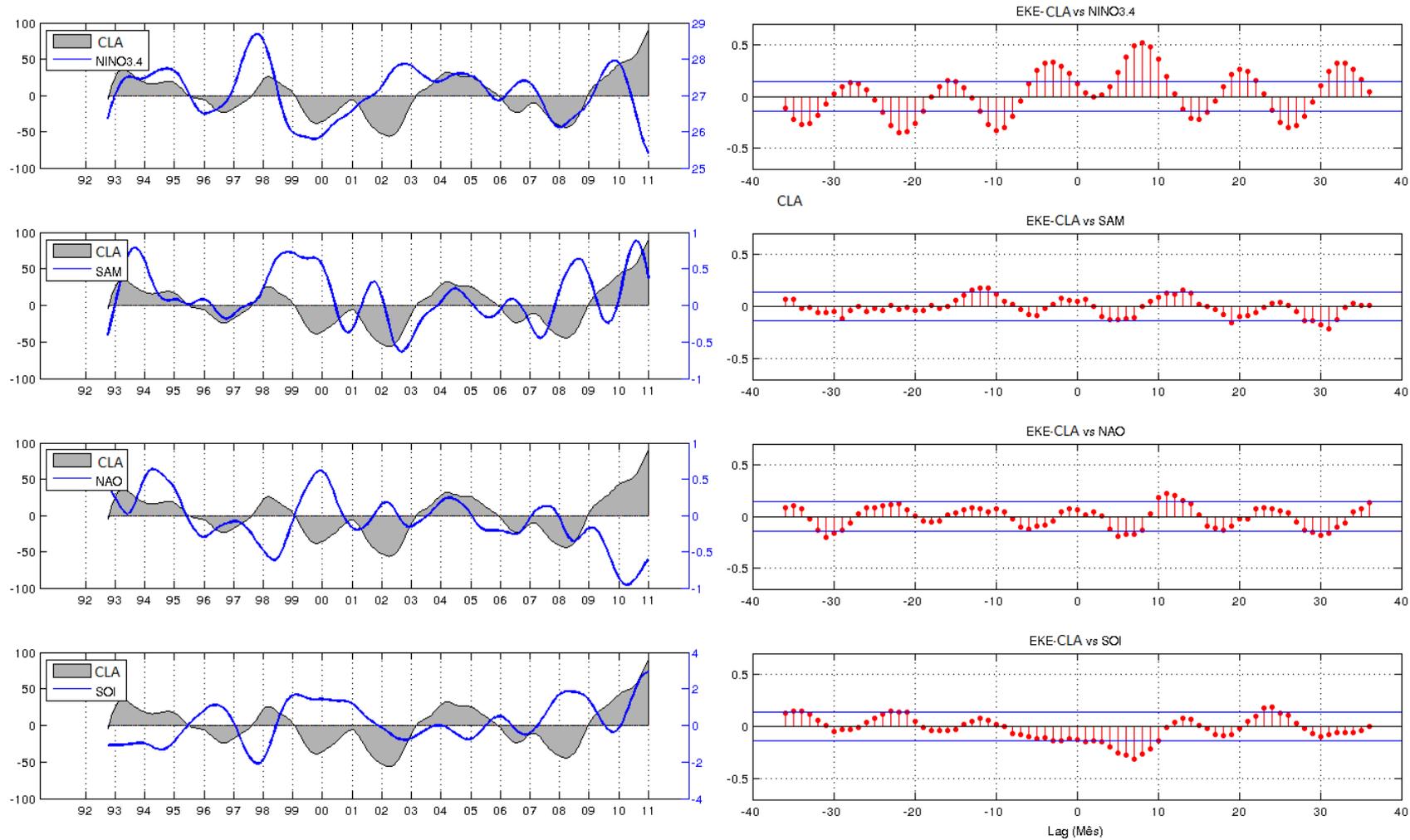


Figura 31. Séries filtradas e normalizadas de EKE (cm² s⁻²) da CLA e dos índices dos modos de variabilidade climática (à esquerda) e correlações cruzadas das séries de médias mensais (à direita), as linhas em azul representam o intervalo de confiança de 95%.

4 - DISCUSSÃO

4.1 – CONFLUÊNCIA BRASIL-MALVINAS

As três áreas de estudo avaliadas englobam a porção final dos três sistemas de corrente de contorno oeste (CCO) associados aos giros subtropicais do hemisfério Sul (HS). Essas regiões são das mais energéticas em termos globais e apresentaram uma distribuição média da energia cinética turbulenta (EKE) similar a diversos estudos pretéritos (e.g. Wilkin & Morrow, 1994; Stammer & Wunsch, 1999; Stammer et al., 2006 e Oliveira et al., 2009).

A CBM foi a região menos energética dentre as três, com a média da EKE para todo o período avaliado atingindo um máximo em torno de $1700 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$, próximo de 42°S e 52°W (Figura 10, pág. 24). O valor médio de EKE foi similares aos já descritos para a CBM (Wilkin & Morrow, 1994; Stammer et al., 2006 e Oliveira et al., 2009), com algumas diferenças devido as particularidades do banco de dados usado para o cálculo. Por exemplo, Oliveira et al. (2009) usaram dados de derivadores de superfície e encontraram valores de EKE maiores que os deste trabalho bem como nos outros citados acima, isso porque os derivadores medem as velocidades absolutas que tem valores superiores as estimadas pelos satélites altimétricos.

A distribuição característica da EKE em forma de “C” ficou bem marcada, evidenciando o efeito do Anticiclone Zapiola, centrado em 45°S e 45°W . Essa zona é conhecida por possuir uma circulação anticiclônica, quase estacionária, forçada por eventos de mesoescala da CBM e da Corrente Circumpolar Antártica (CCA) (e.g., de Miranda et al., 1999; Saraceno et al., 2005; Teixeira et al., 2009), que fica evidente pelos baixos valores de EKE no centro da feição e altos no entorno.

As composições dos diferentes estados energéticos (Figura 11) confirmam que a distribuição geral da EKE permanece igual em todos os cenários. A área entre $35\text{-}45^\circ\text{S}$ e $50\text{-}55^\circ\text{W}$, na qual concentram-se as maiores energias, é dominada pela variabilidade intra-anual da CBM (Gordon, 1989; Goni & Wainer, 2001). Os valores da diferença entre a alta e baixa energia apresentam um máximo de $2700 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$, bem superior ao da média ($1700 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$),

atestando a alta variabilidade da EKE na CBM. Tal variabilidade pode estar relacionada não apenas com oscilações intra-anuais, mas também com a variabilidade interanual.

As séries de EKE mostraram um aumento significativo da energia nos últimos 18 anos (Figura 14). Além disso, observou-se que os eventos de baixos e altos valores de EKE não se encontram distribuídos de forma homogênea ao longo da série. Particularmente, os primeiros se concentraram no início e os últimos no fim da série (Figura 13), devido à significativa tendência de aumento da EKE ($0,23 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$ por mês). No cenário de alta energia os maiores valores de EKE ocuparam posições mais para sul (até 45°S), o que pode ser função das flutuações interanuais da posição média da CBM. Goni & Wainer (2001), analisando a posição da Frente da Corrente do Brasil, observaram uma forte variabilidade em escala interanual do seu deslocamento meridional anual (1° a 6°). Lumpkin & Garzoli (2011), utilizando dados de altimetria, encontraram uma tendência de deslocamento para sul (entre $0,6^\circ$ a $0,9^\circ$ por década) da posição média anual da confluência entre 1992 e 2007. Essas evidências corroboram com a hipótese de um deslocamento para sul da CBM ao longo da série de dados analisados.

Esse avanço da CBM pode estar relacionado com um fortalecimento do giro subtropical no Oceano Atlântico Sul, o qual também se reflete na intensidade da EKE (Zhai & Marshall, 2012). Willis et al. (2004) mostraram um aumento da altura da superfície do mar nas médias latitudes (40°) no HS, de 1992 a 2003. Esse fenômeno já foi confirmando no Oceano Pacífico Sul por Roemmich et al. (2007) que, em análises preliminares, encontraram as mesmas evidências no Atlântico.

A partir do campo médio da topografia oceânica (*Mean Dynamic Absolute Topography* - MADT) para a região de maior concentração de EKE (não mostrada) ficou evidenciado um aumento da altura superficial (5 cm por década) ao longo dos 18 anos estudados. Isto sugere, também, um aumento da velocidade das correntes na região. Analisando médias anuais da MADT para a área (não mostradas), também ficou evidenciado um avanço para sul do eixo da Corrente do Brasil (CB). Esses mesmos campos apresentaram um aumento das alturas no centro do Anticiclone Zapiola (7,3 cm por década), que fortaleceria a intensidade da circulação anticiclônica característica deste local. Saraceno et al. (2009) sugeriram a intensificação da circulação nessa região. Essa intensificação era

esperada, visto que houve um significativo aumento da EKE e esta circulação é forçada pela mesoescala da região (de Miranda et al., 1999; Teixeira et al., 2009).

A alta atividade de mesoescala na região da CBM está relacionada, principalmente, à presença de vórtices na região. As composições de MADT (Figura 12) mostraram a distribuição das alturas para cada cenário energético. Na baixa e média energia, a CB tem o seu primeiro meandro com alcançando uma maior extensão para sul (44°S), enquanto no estado de alta energia aparecem estruturas elípticas separadas da corrente onde estava sendo ocupado pelo primeiro meandro. Provavelmente essa sucessão de feições reflete a liberação de vórtices pelo primeiro meandro da retroflexão, sendo esse o principal mecanismo de liberação de vórtice da CBM (e.g., Lentini et al., 2006).

Outra modificação marcante do cenário mais energético é o deslocamento do primeiro meandro para leste. Essas modificações ficam claras na diferença entre a alta e baixa energia, com núcleos positivos associados à área ocupada pelo vórtice liberado pela corrente e ao primeiro meandro deslocado (42°S , entre 55°W e 50°W , Figura 12d), e núcleo negativo no local ocupado pela corrente no cenário de baixa e média energia (42°S e 53°W). Outro núcleo positivo menor, presente em 44°S e 52°W , pode ser um reflexo do avanço da Corrente do Brasil (CB) para sul.

A variabilidade temporal das regiões de estudo foi analisada a partir da avaliação das séries bruta e filtrada, parâmetros estatísticos básicos, regressões lineares e análises de ondeletas. A CBM apresentou a EKE média semelhante à Corrente Leste Australiana (CLA), $326\text{ cm}^2\text{ s}^{-2}$ e $321\text{ cm}^2\text{ s}^{-2}$, respectivamente. No entanto, os desvios-padrão são bem diferentes, $38,8\text{ cm}^2\text{ s}^{-2}$ (CBM) e $52,8\text{ cm}^2\text{ s}^{-2}$ (CLA), o que demonstra que, apesar das médias semelhantes, a CBM é menos variável que a CLA.

A série bruta de EKE da CBM, bem como a filtrada, apresentaram grande variabilidade, sendo que a última teve flutuações próximas de um desvio-padrão da série bruta em vários momentos, como em 1998, 2008 e 2009 (Figura 13). No entanto, o aspecto mais importante nessas séries foi significativa tendência positiva da EKE ao longo dos 18 anos de dados analisados. O aumento da EKE torna-se evidente na tendência significativa de aumento de $0,23\text{ cm}^2\text{ s}^{-2}$ por mês apresentada pela série filtrada (Figura 14).

Tendências de longo período alturas dinâmicas no Atlântico Sul e da posição média da CBM já haviam sido sugeridas por vários autores (e.g. Willis et al., 2004; Roemmich et al., 2007 e Lumpkim & Garzoli, 2011). Os mesmo autores consideram que as mudanças das alturas dinâmicas podem gerar modificações na circulação média das correntes na região. Variações na velocidade da CB podem se refletir na EKE, além de modificar a posição média da CBM, já que essa tem sua variabilidade principalmente associada à intensidade da CB (e.g., Goni & Wainer, 2001). Dessa forma, as variações na topografia oceânica e na circulação devem ser refletidas na EKE, o que sugere que a forte tendência positiva de energia encontrada nos resultados pode ter acontecido em função: 1) do deslocamento da posição média da CBM e/ou 2) pelo aumento da atividade de mesoescala da região. A primeira hipótese é corroborada pelo aumento das alturas dinâmicas e uma maior projeção para sul da CB encontrados no presente estudo. Essa modificação na circulação pode estar associada a variações de longo período nos campos de vento de larga escala no Atlântico Sul (Lumpkim & Garzoli, 2011 e Young et al., 2011). Lumpkim & Garzoli (2011) observaram, usando dados de reanálises do NCEP/NCAR, que a máxima tensão relacionada ao rotacional do vento no Atlântico Sul teve uma tendência de deslocamento para sul, desde 1992 até 2008, o que também está de acordo com os resultados encontrados neste trabalho. O aumento das alturas no entorno do Anticiclone Zapiola, que é forçado por fenômenos de mesoescala, corroboram com a segunda hipótese. Além disso, podemos ver na série de EKE bruta que a presença de períodos de alta energia se concentra do meio para o final da série. A partir de 1999, as composições de maior energia mostram que esse estado energético é favorável à formação de vórtices a partir do primeiro meandro de retroflexa da CBM, podendo ser um reflexo também do aumento da mesoescala na região, ao longo do tempo analisado.

Na análise espectral da EKE para a CBM (Figura 15c, pág. 29) os principais picos de energia referem-se ao ciclo semianual e anual. Esses períodos de variabilidade foram encontrados por Goni & Wainer (2001) como sendo os principais períodos de flutuação meridional da CBM. Os resultados das ondeletas mostraram que esses períodos concentraram mais energia em alguns momentos específicos, como 1995, 2000, 2005, 2007 e 2009 (Figura 15b), mas no geral a EKE apresentou mais períodos significativos a partir de 1998. A integração da energia com períodos entre 2 e 6 meses (mesoescala) foi significativa

em vários momentos ao longo dos últimos 18 anos, mas a maioria concentrou-se depois de 1998 (Figura 15d).

A tendência de aumento da EKE na região da CBM ficou evidente em todos os resultados apresentados. A ocorrência de mais valores significativos no espectro de ondeletas a partir de 1998, tanto no ciclo anual como na energia de mesoescala, reforçam as hipóteses que esse aumento da EKE aconteceu em função do deslocamento da posição média da CBM e da maior atividade de vórtices de mesoescala na região.

4.2 – CORRENTE DAS AGULHAS

A CA apresentou uma EKE com um valor máximo da média de $2700 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$ (Figura 16) na região da retroflexão, centrada em 38°S e 18°E . Esse padrão foi semelhante a trabalhos anteriores na região (e.g., Wilkin & Morrow, 1994, Ducet et al., 2000 e Stammer et al., 2006). A alta concentração de EKE neste ponto se deve à presença de processos mesoescala, como a retroflexão da corrente e a liberação de grandes vórtices (denominados na CA de *anéis*) anticiclônicos (e.g., De Ruijter et al., 1999; Gordon, 2003; Lutjeharms, 2006). Wilkin & Morrow (1994) e Stammer et al. (2006) também encontraram valores similares de energia neste local, sendo que os primeiros utilizaram saídas de modelos e os demais dados de altimetria.

A Corrente de Retorno das Agulhas (CRA) também apresentou valores elevados de EKE média com valores máximos de $2000 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$, associados principalmente ao primeiro meandro de retroflexão, formado na passagem da corrente pelo Platô das Agulhas (Figura 16). A zona entre o Platô das Agulhas e Porto Elizabeth (35°S e 24°E), apesar de apresentar valores de EKE inferiores à retroflexão e à CRA, ficou ressaltada na média com valor máximo de $1500 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$. Lutjeharms et al. (1989), analisando dados hidrográficos e de satélite com sensor infravermelho (METEOSAT I e II), encontraram uma alta concentração de vórtices e meandros nessa área da CA, o que deve explicar essa relativamente alta concentração de EKE.

A retroflexão da CA concentrou a maior EKE nas composições dos cenários energéticos ($37\text{-}41^\circ\text{S}$ e $16\text{-}20^\circ\text{E}$, Figura 17). No entanto, o máximo de energia é transferido para sudeste no estado de alta energia, possivelmente com o deslocamento da retroflexão.

A posição da retroflexão e a liberação dos Vórtices das Agulhas (VA) são bastante variáveis (e.g., Lutjeharms & Ballegooyen, 1988; Lutjeharms, 2006; Dencausse et al., 2010). Esse deslocamento do ponto de máxima EKE para SE pode ser o reflexo da liberação dos VA e da mudança de posição da retroflexão.

A CRA apareceu bem marcada nas três composições, mas a diferença entre os cenários de alta e baixa energia mostra que ela variou muito, cerca de $2000 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$, valor semelhante à EKE média. Foi possível observar, através das diferenças entre os cenários de alta e baixa energia (Figura 17d), que a corrente ficou mais intensa e em uma posição mais para sul, mais próxima do Platô das Agulhas. Os meandros da CRA acontecem devido à interação entre a corrente e a batimetria, sendo dependente da intensidade da corrente. Quartly & Srokosz (1993) encontraram uma variabilidade sazonal na posição da retroflexão e da CRA, localizada mais a oeste no inverno e mais a sul do verão. No entanto esse estudo usou apenas 2 anos de dados do GEOSAT.

Considerando a dependência da intensidade da CA na variabilidade da CRA e seus meandros, seria esperado que a CRA respondesse às oscilações da EKE. Assim como em Quartly e Srokosz (1993), a variabilidade de período de um ano foi significativa na série apresentada neste estudo. Os outros períodos de variabilidade encontrados para a região da CA foram de 3 meses, próximo à frequência de 2 meses dos VA encontrada por Gordon (2003), e 7 anos, correspondente à variabilidade do El Niño – Oscilação Sul (ENSO). Dessa forma, é esperado que as variações espaciais do sistema da CA também estejam relacionadas com esses períodos.

A EKE concentrada entre o Platô das Agulhas e Porto Elizabeth (35°S e 24°E , Figura 17c) foi intensa apenas na composição das altas energias. Essa alta energia deve estar relacionada tanto com meandramentos da corrente como com os vórtices presentes nessa área, os quais são originados do cisalhamento da corrente na interação com o banco das Agulhas (Lutjeharms & van Ballegooyen, 1988). Consequentemente, essas feições devem ser formadas em momentos de maior intensidade da corrente e, portanto, de maior energia.

Os resultados das composições de MADT (Figura 18) estão de acordo com a variabilidade espacial da EKE na região. A diferença entre a alta e a baixa energia demonstra

o deslocamento para sudeste da região da retroflexão e da corrente de retorno, marcado pelas diferenças (~ 30 cm) negativas na posição média da retroflexão ($37\text{-}39^\circ\text{S}$ e $16\text{-}20^\circ\text{E}$) e positivas na porção a sul desta. Os valores negativos depois do Platô mostram que o meandro é deslocado para leste, como efeito das mudanças de posição da CA e da CRA, as quais estão relacionadas com a variabilidade sazonal (Quartly & Srokosz, 1993 e Dencausee et al., 2010). O núcleo com diferenças positivas de ~ 20 cm (41°S e 15°E) é, possivelmente, o local típico da liberação dos VA, os quais têm como rota de propagação preferencial a área entre este ponto e 32°S e 5°E . Essa rota fica marcada pela presença de um “trem” de elevações aproximadamente circulares em todas as composições. Schouten et al. (2000) acompanharam a dispersão de 21 vórtices, que apresentaram a rota de propagação descrita. A cordilheira oceânica *Walvis Ridge* ($30\text{-}33^\circ\text{S}$ e 2°E) é determinante na propagação dos VA no Oceano Atlântico, pois atenua a energia destes vórtices (e.g., Schouten et al., 2000). No entanto, pela área definida esse efeito não pode ser bem observado.

Outra feição que ficou marcada foi uma depressão no campo de MADT ao norte da retroflexão (37°S e 18°E , Figura 18). Essa feição representa os vórtices ciclônicos que tendem a ocupar esta região e são conhecidos como “*lee eddies*” (Peven et al., 2001; Lutjerharms et al., 2003). Esta área é marcada pela grande formação de vórtices ciclônicos (Morrow et al., 2004; Dencausse et al., 2010), sugerindo que estes formam um dipolo com a retroflexão (meandro anticiclônico). O fato desta depressão ficar menos intensa no cenário de maior energia, quando a retroflexão é deslocada para SE, corrobora a hipótese da formação de um dipolo entre os VA e os vórtices ciclônicos (Dencausse et al., 2010).

Acompanhando a borda da plataforma continental, o campo de MADT revela uma sequência de depressões, que também ficaram aparentes na Figura 18, referente à diferença entre os cenários energéticos (Figura 18, d). Esta região também é marcada pela formação de vórtices ciclônicos que se deslocam em geral para sudoeste (e.g. Morrow et al., 2004). Devido ao grande número de vórtices (ciclônicos e anticiclônicos) formados nessa região, ela foi chamada de *Cape Cauldron* (e.g. Boebel et al., 2003).

A CA foi o sistema de CCO mais energético avaliado neste estudo, com a média da série da EKE ($403 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$) sendo quase uma vez e meia das demais (CBM $326 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$, e CLA $321 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$), e também apresentou alta variabilidade, com desvio-padrão de $58,5 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$.

Nas séries brutas e filtradas (Figura 19), ficou marcada uma forte variabilidade interanual, com grandes aumentos acontecendo em períodos maiores que um ano, como: entre 1995 a 1998, 1999 a 2001 e 2004 a 2008. Os momentos de energia mais extrema, baixas e altas, no geral ficaram bem correlacionados com as variações da série filtrada, o que sugere uma modulação da EKE com forçantes em escalas interanuais.

Na Figura 20, a série filtrada da EKE teve uma tendência de aumento significativa para o período analisado, com taxas de $0,3 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$ por mês. No entanto, diferentemente da CBM, que teve um aumento mais gradativo, na CA ficaram marcados incrementos de energia em períodos determinados, conforme descrito acima. Dencausse et al. (2010), analisando uma série de EKE de 12,7 anos, mostraram uma retração anômala da variação longitudinal da retroflexão para uma posição a leste do Platô das Agulhas, no período entre 2000 e 2001, e relacionaram com a entrada em fase do ciclo anual e da componente interanual dominante na série (5 anos). Backeberg et al. (2012) também encontraram tendência positiva da EKE nos últimos 18 anos para o sistema da CA. No entanto, estes autores analisaram áreas mais específicas, como a Corrente de Madagascar, o Canal de Mozambique e a retroflexão. Além disso, mostraram que as tendências da EKE estavam associadas com a intensificação do campo de ventos no Oceano Índico.

Essas tendências da EKE podem ser reflexos de uma maior frequência de ocorrência de processos oceanográficos associados ao estado de alta energia, tais como os descritos nos resultados de MADT: a liberação de vórtices pela retroflexão e, na região entre Porto Elizabeth e o Platô das Agulhas, o deslocamento para leste da retroflexão e do primeiro meandro da CRA. Backeberg et al. (2012) associaram o aumento da EKE na região a um incremento de vórtices liberados pela retroflexão. No entanto, nenhuma evidência quanto à mudança na extensão para oeste deste sistema foi encontrada neste trabalho.

O resultado da análise espectral forneceu como frequências de variabilidade significativas as de 3 meses, 1 ano e de 7-8 anos (Figura 21c). O primeiro pode ser associado à frequência de liberação de VA (aproximadamente 2 meses) descrita por Gordon (2003). Na análise de ondeletas, o ciclo anual foi significativo em dois momentos, de 1998 a 2001 e entre 2007 e 2009, sendo que o primeiro período coincidiu com períodos de alta energia na escala de 2 anos e 7-8 anos. A presença de alta energia nesses três períodos de variabilidade

pode ter ocasionado a retração anômala encontrada por Dencausse et al. (2010), devido aos três ciclos entrarem em fase. No segundo momento, no qual o ciclo anual é significativo, pode ter acontecido o mesmo fenômeno, já que as EKE atingiram valores semelhantes aos de 1998 a 2001.

A energia integrada de mesoescala (2 a 6 meses) da análise de ondeletas foi significativa em diversos momentos no tempo, inclusive nos momentos onde o ciclo anual foi intenso (1998 a 2001 e de 2007 a 2009, Figura 21d). Além disso, a série integrada apresentou semelhança com a série filtrada interanual da EKE, sendo significativa a correlação entre elas, atingindo um coeficiente de correlação de 0,4. Esta é mais uma evidência de uma modulação interanual na EKE desta região, que reforça a sugestão de Backeberg et al. (2012) sobre a relação entre o incremento da EKE e uma maior quantidade de vórtices liberados pela CA.

4.3 – CORRENTE LESTE AUSTRALIANA

O valor máximo de EKE média atingida pela CLA ($2000 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$; Figura 22) é condizente com os valores encontrados por outros estudos (Wilkin & Morrow, 1994 e Stammer et al., 2006), bem como sua distribuição geral concentrada entre 25°S e 40°S dentro da Planície Abissal da Tasmânia. Essa distribuição está de acordo com as características da corrente, marcada pela presença de vórtices, e atingiu o seu valor máximo de EKE em torno de 32°S, posição média em que a corrente se separa da costa (Ridgway & Dunn, 2003). Entre 32°S e 40°S os valores de EKE possivelmente representam a corrente residual (Ridgway & Dunn, 2003) e os vórtices liberados pela CLA (Mata et al., 2006).

A região ocupada pela CLA possui uma batimetria muito complexa (Wilkin & Morrow, 1994, Fu & Cazenave, 2001), o que pode influenciar nos valores de EKE estimados na região (Ridgway & Dunn, 2003). As áreas mais rasas possuem baixos valores de EKE, mesmo estando na região de grande energia da corrente (montes submarinos em 30°S, 32°S e 154°E (Figura 23, pág. 39). Essa distinção pode ser consequência da tendência de diminuição do tamanho dos vórtices quando encontram elevações batimétricas ou apenas um artifício do método de medição, como por exemplo, uma deficiência do altímetro em captar corretamente o sinal de mesoescala em áreas rasas (e.g. Fu & Cazenave, 2001).

Na composição de baixa energia da CLA (Figura 23a), a maior parte da EKE concentra-se na retroflexão da corrente, em torno 32°S e 156°E. Isso deve ocorrer devido à menor influência de vórtices no regime de baixa energia, de forma que a EKE fica associada a flutuações na posição da retroflexão. No cenário de média energia (Figura 23b), a EKE aumenta na retroflexão, no eixo da corrente (entre 25°S e 32°S) e na porção ao sul da retroflexão. A composição de alta energia (Figura 23c) mostra uma série de núcleos de EKE mais elevada, desde 25°S até 37°S. Tais feições são evidências de que a variabilidade do campo médio nessa região está principalmente relacionada com vórtices, que já foram descritos por diversos autores (e.g. Ridgway & Dunn, 2003; Bowen et al., 2005 e Mata et al., 2006). Bowen et al. (2005) mostraram altos valores de conversão barotrópica na área onde se concentra a EKE. Esse processo representa a transferência de energia do fluxo médio para a mesoescala.

A diferença entre alta e baixa energia (Figura 23d) apresenta altos valores (chegando a 2000 cm² s⁻²), com escala e distribuição comparáveis à composição de média energia, o que denota a grande variabilidade da EKE na região. Torna-se evidente também que a intensificação da EKE se dá em núcleos consecutivos, o que sugere a presença contínua de vórtices de mesoescala, tanto no eixo da corrente como na porção ao sul da retroflexão, sendo que estes são liberados pela CLA (Mata et al., 2006) e tendem a se propagar para sudoeste (Bowen et al., 2005).

As composições de MADT (Figura 24) mostraram elevações no eixo da corrente em todos os cenários energéticos, que podem estar associadas à recirculações da própria corrente e a vórtices (Mata et al., 2006). Tais elevações se distribuem desde 25°S até 32°S, onde existe uma intensificação desses núcleos com o aumento da EKE. As elevações na porção ao sul da retroflexão ficam mais evidentes no cenário de maior energia e devem representar os vórtices liberados pela CLA, os quais têm períodos de liberação de aproximadamente 3-4 meses, que foi uma das frequências significativas na análise espectral da EKE nesta região (Mata et al., 2000). Essa sequência de elevações pode representar uma rota de migração para sul dessas feições ao longo do tempo. Na imagem de diferença da MADT (Figura 24d), fica marcada uma intensificação dos núcleos no eixo da corrente (de 25

a 30°S) e um núcleo com valor negativo em 32°S, posição média da retroflexão, que se retrai com a liberação de vórtices (Figura 24).

A CBM e a CA apresentaram a diferença dos cenários de alta e baixa EKE com perfis mais alongados, possivelmente relacionados com variações da posição média das correntes. Na CLA as diferenças foram caracterizadas por uma sequência de feições circulares bem definidas, o que pode indicar que os principais processos dinâmicos atuantes nas correntes são diferentes. Enquanto na CLA a EKE deve estar mais associada a vórtices de mesoescala, as demais possuem uma forte contribuição da variação da posição das retroflexões e meandros.

A CLA teve uma média da série bruta de EKE com valor de $321 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$, menos intensa que a CBM ($326 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$), mas com desvio-padrão bem superior $52,8 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$ contra $38,8 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$. Estes números indicam que a CLA sofre uma influência relativa maior do regime de mesoescala, em relação ao fluxo médio, que a CBM. Os valores de máxima e mínima energia na série bruta são semelhantes entre as duas correntes (Tabela 1). No entanto, a CLA é caracterizada por grandes oscilações durante toda a série, enquanto a CBM possui uma significativa tendência positiva, estando o valor mínimo mais próximo do início da série e o máximo próximo do seu fim.

Lentini et al. (2006) reportam que existem três principais formas de liberação de vórtices em CCO, dentre elas a liberação de núcleos anticiclônicos a partir do primeiro meandro da corrente, quando estas deixam de acompanhar a plataforma continental e passam a fluir para leste. Este é o principal modo de formação de vórtices da CBM e da CLA que, apesar de possuírem mecanismos similares de liberação de vórtices, apresentam a variabilidade da EKE diferentes tanto na série bruta como na filtrada. Estas diferenças de EKE sugerem diferentes fontes e forçantes da mesoescala nas duas regiões.

No domínio da CLA é conhecida a presença de vórtices de mesoescala (Mata et al., 2006), sendo que a maior parte da EKE deve estar associada a este tipo de feição. De forma diferente da CBM, onde encontramos evidências de uma variabilidade da posição média da confluência em longo período, esta pode ter sido uma fonte maior de EKE do que os vórtices liberados pela CB (e.g., Goni & Wainer, 2001; Lumpkin & Garzoli, 2011).

A série filtrada da EKE para a CLA foi a mais variável dentre as três correntes, sendo que na Figura 25 pode-se observar três ondas mais longas na série completa e algumas intermediárias no meio dessas ondas longas, com períodos entre 2 e 3 anos. Para a região, alguns estudos já demonstraram uma modulação da intensidade da corrente e da EKE por modos de variabilidade climática, tais como ENSO e Modo Anular Sul (SAM) (Roemmich et al. 2007 e Morrow et al., 2010). O padrão como a energia variou em escalas interanuais pode estar respondendo às oscilações na circulação atmosféricas e oceânicas características de cada um destes modos.

A regressão linear (Figura 26) da série de EKE para a CLA não foi significativa e teve taxa de aumento muito baixa, de $0,025 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$ por mês, uma ordem de grandeza menor do que nas outras correntes. De forma diferente dos outros dois sistemas de CCO analisados aqui, a CLA mostrou um padrão de oscilação interanual da EKE mais forte, com períodos bem marcados e sucessivos de aumento e diminuição da EKE. Roemmich et al. (2007) encontraram uma elevação das superfícies do mar no centro do giro subtropical do Oceano Pacífico Sul, o qual foi denominado de “*spin up*”. Entre os anos de 1995 e 2004, os autores associaram essa intensificação das correntes no giro ao efeito da SAM sobre a circulação atmosférica da região. A série filtrada interanual das alturas dinâmicas foi semelhante à série filtrada da EKE apresentada neste trabalho, sugerindo que a aceleração dos fluxos médios encontrados pelos autores também foram transferidos para a EKE.

A análise espectral da EKE forneceu, como picos de variabilidade significativa, as frequências de 3-4 meses e o ciclo anual (Figura 27c). O primeiro é próximo do período da liberação de vórtices pela CLA já encontrado na literatura, entre 90 e 140 dias (Boland, 1990; Feron 1995; Walker & Wilkin, 1998, Mata et al., 2000 e Mata et al., 2006), e consequente retração da retroflexão (Mata et al., 2006). Outros dois períodos, de 3 e 7 anos, se destacaram no resultado da análise espectral. Apesar de não serem significativos, possivelmente estão associados ao SAM e ao ENSO, respectivamente.

No resultado da análise de ondeletas (Figura 27b), o ciclo anual é significativo em grande parte da série, de 1995 até 2010. A variabilidade relacionada com o este ciclo aumenta de 1994 a 1996, mantendo altos valores até 2004, quando passa a diminuir de intensidade. Esse período de 1996 a 2004, em que fica marcada a maior variabilidade

associada ao ciclo anual, é o mesmo em que Roemmich et al. (2007) encontraram o fortalecimento da circulação do giro subtropical, podendo esta alta variabilidade da EKE estar relacionada com esse fenômeno. A energia de mesoescala integrada de 2 a 6 meses não foi significativa em nenhum momento. No entanto, esta energia pode ter sido mascarada pela grande intensidade do sinal anual encontrado na análise de ondeletas.

4.4 - RELAÇÕES ENTRE A EKE E OS MODOS DE VARIABILIDADE CLIMÁTICA

As séries filtradas da EKE variaram de forma diferente para as três áreas. Na CBM, ocorreu um aumento mais gradativo, na CA o aumento esteve relacionado com momentos específicos, enquanto a CLA apresentou-se quase sem tendência e com fortes oscilações ao longo do tempo.

As análises de ondeletas forneceram informações sobre os picos de energia significativos de cada uma das séries e os períodos em que esses concentravam mais energia. Com essas informações sobre a variabilidade temporal da EKE podemos averiguar alguns padrões climáticos que estariam modulando essa variabilidade de longo período. Jia et al. (2011a) relacionaram a variabilidade interanual da EKE com alguns modos climáticos no Oceano Índico, os quais chegam a modular 20% da variabilidade total. Com base nos principais períodos de variabilidade de longo período encontrados em cada região, foi analisada a variabilidade de dois importantes modos climáticos do HS, o SAM e o ENSO (Figura 28). O índice que representa a variabilidade da SAM teve uma pequena tendência negativa, não significativa, nos últimos 18 anos. O NINO3.4 (*proxy* oceânico do ENSO) teve tendência semelhante a do SAM. O SOI (Índice de Oscilação Sul), que representa a componente atmosférica do ENSO, teve tendência positiva e significativa nos últimos 18 anos.

As correlações entre os índices dos modos e as séries de EKE filtradas mostraram-se significativas em vários cenários. A CBM mostrou correlação significativa apenas com o SAM (-0,26; Figura 29). No entanto, as tendências e variações da SAM não explicam bem a variabilidade da EKE da CBM ao longo dos 18 anos de dados. Além disso, na análise espectral, o período de variabilidade do SAM não foi significativo. É possível ver, por

exemplo, que a partir de 2001, tanto a EKE como o índice têm tendências positivas acentuadas, não indicando uma oposição de fase, como mostrou o resultado da correlação.

Considerando que o SAM tem influência no campo de ventos no entorno da Antártica, os quais forçam a Corrente Circumpolar Antártica (CCA), e sendo a Corrente das Malvinas um ramo da CCA, essa deve ser afetada pelas oscilações dos ventos de oeste (Hall & Visbeck, 2002). No entanto, como foi descrito anteriormente, a Corrente das Malvinas tem papel menos importante na dinâmica da CBM, a qual responde mais as variações na intensidade da CB (Goni & Wainer, 2001). A EKE na região da CBM, como já falado anteriormente, deve ter respondido mais às variações nos campos de ventos do Oceano Atlântico Sul (Lumpkin & Garzoli, 2011). Portanto, o SAM pode não ter sido significativo na variabilidade da EKE devido às intensas modificações nos campos de ventos na parte subtropical do HS nas últimas duas décadas (Young et al., 2011).

A CA teve correlações significativas com os índices do ENSO, assim como teve o período de 7-8 anos significativo na análise espectral, que pode estar relacionado com o próprio ENSO. As correlações foram de 0,32 e -0,35 para o SOI e NINO3.4, respectivamente (Figura 30). Esses indícios se somam ao episódio apresentado por Dencausse et al. (2010) de uma oscilação anormal da retroflexão, entre 2000 e 2001, devido à combinação entre os efeitos do ciclo anual com uma componente interanual dominante. Essa componente interanual pode estar relacionada com o ENSO, visto que o período em que este fenômeno aconteceu coincide com um valor de SOI positivo e NINO3.4 negativo maiores que o normal. Esses fatores também podem ter se somado ao efeito da SAM, apesar dessa não apresentar correlação significativa. Entre 2005 e 2008, a EKE da CA aumentou e atingiu valores extremos positivos, também coincidentes com valores positivos de SOI e SAM além de uma intensificação do sinal anual na análise de ondeletas. É possível que nesse intervalo de tempo um fenômeno similar ao relatado por Dencausse et al. (2010), que caracteriza-se por uma migração anômala da retroflexão, tenha acontecido novamente. Este pode ser um fenômeno típico da região, o qual apresenta modulação por forçantes interanuais.

A EKE na CLA teve correlações significativas com os índices do ENSO, -0,4 e 0,51 para SOI e NINO3.4, respectivamente (Figura 31). Essas correlações, relativamente altas, sugerem que a energia é modulada em escalas interanuais pela variabilidade do ENSO. O SAM não

teve correlação significativa com a EKE da CLA, mas a correlação entre essas duas componentes já foi sugerida por outros trabalhos na região (Roemmich et al., 2007; Morrow et al., 2010).

Roemmich et al. (2007) encontraram, a partir de dados hidrográficos, relação entre a intensificação da velocidade do giro subtropical com a intensificação da fase positiva do SAM entre 1996 e 2004. Já Morrow et al. (2010) descreveram a variabilidade da EKE no OP Sul como sendo uma combinação das contribuições da SAM e o ENSO. Por exemplo, quando a fase positiva do SAM coincide com a negativa do ENSO (La Niña) a EKE é amplificada, e quando o SAM positiva coincide com a fase positiva (El Niño) a EKE tende a diminuir de intensidade.

A variabilidade da oceânica, que pode ser representada pela EKE, é resultado de uma combinação de forçantes atmosféricas e oceânicas, sendo que a contribuição de cada fator é difícil de separar e quantificar. No entanto, alguns indícios de modulações interanuais na EKE foram encontrados e ganham importância quando os modos que influenciam as áreas se combinam, evidenciando o efeito destes, como aconteceu na EKE da CA em dois momentos distintos (2000-2001 e 2005-2008) e possivelmente na CLA (2007 a 2010). A CBM, no entanto, apesar de ter apresentado forte tendência positiva, não mostrou clara associação com os modos de variabilidade climática analisados. Outra combinação de modos, ou mesmo aspectos regionais da variabilidade, pode ser mais importante na modulação de longo período da EKE dessa área.

5 – CONCLUSÕES

Neste estudo, a série de 18 anos do banco de dados altimétricos utilizado permitiu a comparação da variabilidade dos três sistemas de correntes de contorno oeste (CCO) associados aos giros subtropicais do hemisfério Sul (HS). Com esta base de dados homogênea, foi possível representar bem os padrões gerais observados na literatura. As séries possibilitaram a identificação das tendências de longo período da energia cinética turbulenta (EKE) e inferir sobre possíveis modulações por fenômenos de escala interanual, tais como os modos de variabilidade climática considerados.

A EKE na Confluência Brasil-Malvinas (CBM) apresentou uma intensificação ao longo do período analisado (1992-2011), com um padrão espacial característico (em forma de “C”). A área que apresentou os maiores valores de EKE foi onde ocorre a migração anual da CBM e a liberação de vórtices. As composições de altura da superfície do mar mostraram que, nos cenários de menor energia, a CB tem sua maior extensão para sul e, com o aumento da energia, esta tende a liberar vórtices e ter o primeiro meandro da retroflexão deslocado para nordeste.

A série de EKE média para a área da CBM mostrou uma tendência positiva nos últimos 18 anos, com a maior ocorrência de períodos de alta energia a partir de 1998. Esse aumento da EKE se refletiu num deslocamento para sul da posição média da CBM e, provavelmente, em uma intensificação dos processos de mesoescala, como vórtices e meandramentos. A circulação média em torno do Anticiclone Zapiola também foi intensificada durante o intervalo de tempo analisado, associada a um aumento na mesoescala em torno desta feição.

Os principais períodos de variabilidade da EKE na CBM foram os ciclos semianual e anual. A EKE não mostrou uma associação clara com os modos de variabilidade climática utilizados nesse trabalho (Modo Anular Sul - SAM e El Niño Oscilação Sul - ENSO). Com isso, a intensificação da mesoescala e o deslocamento da posição média da confluência podem estar associados à intensificação e deslocamento para sul dos campos de ventos de larga-escala no Oceano Atlântico Sul ou a outros modos não analisados (e.g., Oscilação

Multidecadal do Atlântico, Modo Meridional do Atlântico, Oscilação Decadal do Pacífico, etc.).

A Corrente das Agulhas (CA) teve, como padrão de variabilidade espacial, uma maior extensão para oeste da retroflexão no cenário de menor energia, enquanto que na maior energia a retroflexão e a Corrente de Retorno das Agulhas (CRA) são deslocadas para SE, provavelmente em função da liberação de Vórtices das Agulhas (VA). Foi observada uma região com alta atividade de mesoescala a leste do Banco das Agulhas, no eixo da CA, entre Porto Elizabeth e o Platô das Agulhas. O deslocamento para leste do primeiro meandro da CRA ocorreu no cenário mais energético. O corredor de VA e a região de formação de *lee eddies*, na porção oeste do banco das Agulhas, também ficou bem caracterizada, sendo uma região de alta concentração de vórtices.

A EKE na CA também teve tendências de aumento significativa nos últimos 18 anos, mas ficou marcada por dois períodos onde os incrementos de EKE foram mais acentuados. Esses eventos foram resultado, possivelmente, da combinação da variabilidade anual da corrente somado ao efeito de forçantes com períodos interanuais que entraram em fase, resultando numa intensificação da variação longitudinal da retroflexão. Esta intensificação também pode estar associada a uma migração anômala da retroflexão para uma posição a leste do Platô das Agulhas, conforme observado nos campos de topografia dinâmica. Os principais períodos de variabilidade encontrados para a EKE foram de 3 meses, 1 ano e de 7-8 anos, que devem estar associados com a liberação de VA, a migração longitudinal da retroflexão e com o ENSO, respectivamente. Vale ressaltar que a SAM (com período de aproximadamente 3 anos) também parece modular a EKE na região, como nos eventos de migração anômala para leste (após o Platô das Agulhas) da retroflexão (2000-2001 e 2006-2008).

O sistema da Corrente Leste Australiana (CLA) apresentou a EKE concentrada no eixo da corrente média, na retroflexão e na região ao sul da retroflexão. As diferenças mostraram uma sequência de núcleos positivos de altura dinâmica desde 25°S até 37°S, representando a forte ligação da EKE dessa região com vórtices de mesoescala. Os campos de topografia dinâmica (MADT) tiveram uma distribuição que foi de acordo com a EKE, sendo que a retroflexão teve sua maior extensão para sul no cenário menos energético. Em altas energias

a CLA tende a liberar vórtices e migrar para NE. As alturas dinâmicas mostraram alguns centros de recirculação no eixo da corrente e elevações, possivelmente representando os vórtices liberados pela CLA, migrando para sul.

A EKE na CLA ficou marcada por grande variabilidade, tanto da série bruta como da filtrada. Os principais períodos de oscilação encontrados foram os de 4 meses e o ciclo anual. Os períodos centrados em 3 e 7 anos não foram significativos, mas ficaram ressaltados na análise espectral. O período de 4 meses está possivelmente associado com a liberação de vórtices pelo primeiro meandro de retroflexão da corrente. A modulação em escala interanual parece evidente quando se observa a série filtrada. A correlação entre a EKE da CLA e o ENSO foi relativamente alta ($SOI=-0,4$ e $NINO3.4=0,51$), mostrando que esse modo de variabilidade climática deve controlar uma parte considerável da variabilidade da EKE na CLA, apesar da análise espectral não ter apresentado significância para esses períodos.

Em resumo, pode-se afirmar que, no cenário de baixa energia, as correntes atingem uma maior extensão para sul, na CBM e CLA, e para oeste na CA. O cenário de maior energia fica caracterizado pela liberação de vórtices e retração do primeiro meandro de retroflexão nos sistemas de CCO do Hemisfério Sul. Finalmente, embora fosse esperado que a variabilidade temporal respondesse mais diretamente aos modos de variabilidade climática analisados, isso não foi observado para todos os sistemas, provavelmente, devido a variabilidade da EKE ser uma resposta da combinação de diversas forçantes em diferentes escalas. Estas, por sua vez, podem acabar mascarando o sinal dos modos interanuais considerados, sendo que esses só ficam evidentes quando são muito intensos e/ou atuam em fase com outros modos de variabilidade.

6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

Azevedo, J. L. L. & Mata, M. M., (2010). O Mecanismo de Autopropulsão de Vórtices Oceânicos: Uma Revisão. *Revista Brasileira de Geofísica*, vol.28, n. 3, ISSN 0102-261X.

Azevedo, J. L. L., Nof, D. & Mata, M. M., (2012). Eddy-Train Encounters with a Continental Boundary: A South Atlantic Case Study. *Journal Of Physical Oceanography* (no prelo).

Backeberg, B. C, Penven, P. and Rouault, M., (2012). Impact of intensified Indian Ocean winds on mesoscale variability in the Agulhas system, *Nature Climate Change*.Vol. 2, n. 8. 608-612.DOI: 10.1038/NCLIMATE1587

Beal, L. M., De Ruijter, W. P. M.; Biastoch, A. & Zahn, R., (2011). On the role of the Agulhas system in ocean circulation and climate. *Nature* 472, 429–436.

Biastoch, A., Böning, C. W.& Lutjeharms, J. R. E., (2008) Agulhas Leakage dynamics affects decadal variability in Atlantic overturning circulation. *Nature* 456, 489–492.

Boebel, O., Lutjeharms, J., Schmid, C., Zenk, W., Rossby, T. & Barron, C., (2003). The Cape Cauldron: A regime of turbulent inter-ocean exchange, *Deep Sea Res. II*, 50, 57 – 86.

Boland, F. M., (1979). A time series of expendable bathythermograph (XBT) sections across the East Australian Current, *Aust. J. Mar. Freshw. Res.*, 30, 303–313.

Boland, F., & Church, J. A., (1981). The east Australian current, *Deep Sea Res., Part A*, 28(9), 937– 957.

Bowen, M. M., Wilkin, J. L. & Emery, W. J., (2005). Variability and forcing of the East Australian Current, *J. Geophys. Res.*, 110, C03019, doi:10.1029/2004JC002533.

de Miranda, Barnier, A. P., B. & Dewar, W. K., (1999). On the dynamics of the Zapiola Anticyclone, *J. Geophys. Res.*, 104, 21,137–21,149, doi:10.1029/1999JC900042.

De Ruijter, W.P.M., Biastoch, A., Drijfhout, S.S., Lutjeharms, J.R.E., Matano, R.P., Pichevin, T., van Leeuwen, P.J., Weijer, W., (1999). Indian–Atlantic interocean exchange: dynamics, estimation and impact. *J. of Geophys. Res.*, 104, 20885–20910.

Dencausse, G., Arhan, M. & Speich, S., (2010). Spatio-temporal characteristics of the Agulhas Current retroflexion. *Deep Sea Res.* 57, 1392–1405.

Ducet, N., Le Traon, P. Y. & Riverdin, G., (2000). Global high-resolution mapping of ocean circulation from TOPEX/Poseidon and ERS-1 and 2, *J. Geophys. Res.*, 105(C8), 19,477–19,498.

Emery, W.J. & Thomson, R.E., (2001). *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*. Elsevier. 638 pp.

Feron, R. C. V., (1995). The southern ocean western boundary currents: Comparison of fine resolution Antarctic model results with Geosat altimeter data, *J. Geophys. Res.*, 100(C3), 4959–4975.

Ferrari, R. & Wunsch, C. (2009). Ocean circulation kinetic energy: reservoirs, sources, and sinks. *Ann. Rev. Fluid Mech.* 41, 253–282.

Fu, L.-L. & Cazenave, A., (2001). *Satellite Altimetry and Earth Sciences. A Handbook of Techniques and Applications*, Academic Press ed. Eds., Academic Press, 133-169.

Garfield III, N., (1990). *The Brazil Current at subtropical latitudes*. Tese de doutorado. University of Rhode Island. 121 p.

Garcia, C. A. E., Sarma, Y. V. B.; Mata, M. M., (2004). Chlorophyll variability and eddies in the Brazil-Malvinas Confluence region. *Deep-Sea Res. Part II-Topical Studies in Oceanography*, v. 51, n. 1-3, pp. 159-172.

Gong, D. & Wang, S., (1999). Definition of Antarctic oscillation index, *Geophys. Res. Lett.*, 26(4), 459–462.

Goni, G. J., & Wainer, I., (2001), Investigation of the Brazil Current front variability from altimeter data, *J. Geophys. Res.*, 106, 31,117– 31,128.

Gordon, A.L., Lutjeharms, J.R.E. & Gründlingh, M.L., (1987). Stratification and circulation at the Agulhas Retroflexion. *Deep-Sea Res.*, 34(4): 565–599.

GORDON, A., (1989). Brazil-Malvinas confluence. *Deep-Sea Research*, v.36, n. 3, p.359-384.

Gordon, A.L., (2003). The browniest retroflection. *Nature*, 421: 904–905.

Hall, A. & Visbeck, M., (2002). Synchronous variability in the Southern Hemisphere atmosphere, sea ice and ocean resulting from the Annular Mode. *Journal of Climate*, 15, 3043-3057.

Hiarata F. E., Moller, O. O. J. & Mata M. M., (2010). Regime shifts, trends and interannual variations of water level in Mirim Lagoon, southern Brazil. *Pan-American Journal of Aquatic Sciences* 5(2):254-266.

Jia, F., Wu, L., Lan, J. & Qiu, B. (2011a), Interannual modulation of eddy kinetic energy in the southeast Indian Ocean by Southern Annular Mode, *J. Geophys. Res.*, 116, C02029, doi:10.1029/2010JC006699.

Jia, F., Wu, L. & Qiu, B., (2011b), Seasonal modulation of eddy kinetic energy and its formation mechanism in the southeast Indian Ocean. *Journal Of Physical Oceanography*, 41, 657–665.

Lentini, C. A. D., Olson, D. B. & Podesta, G. P., (2002). Statistics of Brazil Current rings observed from AVHRR: 1993 to 1998, *Geophys. Res. Lett.*, 29(16), 1811, doi:10.1029/2002GL015221.

Lentini, C. A. D., Goni, G. J. & Olson, D. B., (2006). Investigation of Brazil Current rings in the confluence region, *J. Geophys. Res.*, 111, C06013, doi:10.1029/2005JC002988.

Lumpkin, R., & Garzoli, S., (2011). Interannual to decadal changes in the western South Atlantic's surface circulation, *J. Geophys. Res.*, 116, C01014, doi:10.1029/2010JC006285.

Mata, M. M., Tomczak, M., Wijffels, S. E. & Church, J. A., (2000). East Australian current volume transports at 30°S: Estimates from the World Ocean Circulation Experiment hydrographic sections PR11/P6 and the PCM3 current meter array, *J. Geophys. Res.*, 105(C12), 28,509–28,526.

Mata, M. M., Wijffels, S. E., Church, J.A. & Tomczak, M. (2006). Eddy shedding and energy conversions in the East Australian Current, *J. Geophys. Res.*, 111, C09034, doi:10.1029/2006JC003592.

Lutjeharms, J.R.E. and Ballegooyen, R.C. van, (1988). Anomalous upstream retroflection in the Agulhas Current, *Science*, 240(4860): 1770–1772.

Lutjeharms, J.R.E., (2006). *The Agulhas Current*. Springer-Verlag 329 pp.

Moore, J.K. & Abbott, M.R., (2000). Phytoplankton chlorophyll distribution and primary production in the Southern Ocean, *J. of Geophys. Res.*, 105, 28709–28722.

Morrow, R., Birol, F., Griffin, D. & J. Sudre, J., (2004). Divergent pathways of cyclonic and anti-cyclonic ocean eddies, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L24311, doi:10.1029/2004GL020974.

Morrow, R., Ward, M. L., Hogg, A. M. & Pasquet, S., (2010). Eddy response to Southern Ocean climate modes, *J. Geophys. Res.*, 115, C10030, doi:10.1029/2009JC005894.

Müller, T. J., Ikeda, Y., Zangenberg, N. & Nonato, L. V. (1998). Direct measurements of the western boundary currents between 20°S and 28°S. *J. Geophys. Res.*, 103(C3): 5429-5543.

Munk, W.H., (1950). On the wind driven ocean circulation. *Meteor.* 7, 79-93.

Nof D., (1981). On the β -Induced Movement of Isolated Baroclinic Eddies. *Journal of Physical Oceanography*, 11: 1662–1672.

Oliveira, L. R., Piola, A. R., Mata, M. M. & Soares, I. D., (2009). Brazil Current surface circulation and energetics observed from drifting buoys, *J. Geophys. Res.*, 114, C10006, doi:10.1029/2008JC004900.

Orsi, A.H., Whitworth, T. & Nowlin, W.D., (1995). On the meridional extent and fronts of the Antarctic Circumpolar Current. *Deep Sea Research I*, 42, 641-673.

Penven, P., Lutjeharms, J.R.E., Marchesiello, P., Roy, C., Weeks, S.J., (2001). Generation of cyclonic eddies by the Agulhas Current in the lee of the Agulhas Bank. *Geophys. Res. Lett.*, 27, 1055–1058.

Quartly, G.D. & M.A. Srokosz, (1993). Seasonal variations in the region of the Agulhas retroflection: studies with Geosat and FRAM. *Journal of Physical Oceanography*, 23(9): 2107–2124.

Richardson, P.L., Lutjeharms, J.R.E. & Boebel, O., (2003). Introduction to the “Inter-ocean exchange around southern Africa”. *Deep-Sea Res. II*, 50(1): 1–12.

Ridgway, K. R., & Godfrey, J. S., (1997). Seasonal cycle of the East Australian Current, *J. Geophys. Res.*, 102(C10), 22,921 – 22,936.

Ridgway, K. R., & Dunn, J. R., (2003). Mesoscale structure of the mean East Australian Current System and its relationship with topography, *Progress in Oceanography*, 56, 189–222.

Rodrigues, R.R.; Rothstein, L. & Wimbush, M., (2007). Seasonal variability of the South Equatorial Current bifurcation in the Atlantic Ocean: A numerical study. *Journal Of Physical Oceanography*. 37: 16-30.

Roemmich, D., Gilson, J., Davis, R., Sutton, P., Wijffels, S. & Riser, S., (2007). Decadal spinup of the South Pacific subtropical gyre. *Journal Of Physical Oceanography*, 37, 162-173.

Saraceno, M., Provost, C., & Piola, A. R. , (2005), On the relationship between satellite-retrieved surface temperature fronts and chlorophyll a in the western South Atlantic, *J. Geophys. Res.*, 110, C11016, doi:10.1029/2004JC002736.

Saraceno, M., Provost, C. & Zajaczkovski, U., (2009). Long-term variation in the 38 anticyclonic ocean circulation over the Zapiola Rise as observed by satellite altimetry: 39 evidence of possible collapses. *Deep-Sea Res. Part I: Oceanographic Research 40 Papers*, 56(7), 1077-1092.

Schmitz, W. J. Jr., (1996a). On the world ocean circulation: Volumel some global features/North Atlantic circulation, Tech Rep. WHOI-96-03, Woods Hole Oceanogr. Inst., Woods Hole, Mass.

Schmitz, W. J. Jr., (1996b). On the eddy field in the Agulhas Retroflection, with some global considerations, *J. Geophys. Res.*, 101(C7), 16,259–16,271, doi:10.1029/96JC01143.

Schouten, M.W., de Ruijter, W.P.M., van Leeuwen, P.J. & Lutjeharms, J.R.E., (2000). Translation, decay and splitting of Agulhas rings in the south-eastern Atlantic ocean, *J. Geophys. Res.*, 105(C9): 21,913–21,925.

Smith, D. C., & O'brien, J.J., (1983). The Interaction of a Two-Layer Isolated Mesoscale Eddy With Bottom Topography. *Journal of Physical Oceanography*, 13: 1681–1697.

Silveira, I. C. A. Da, Schmidt, A. C. K., Campos, E. J. D., Godoi, S. S. & Ikeda, Y., (2001). A Corrente do Brasil ao Largo da Costa Leste Brasileira, *Revista Bras. Oceanog.*, 48(2): 171-183.

Stammer, D., (1997). Global characteristics of ocean variability estimated from regional TOPEX/POSEIDON altimeter measurements, *Journal Of Physical Oceanography*. 27, 1743–1769.

Stammer, D. & Wunsch, C., (1999). Temporal changes in the mesoscale variability of the oceans. *Deep-Sea Res. II*, 46:77–108

Stammer, D., Wunsch, C., & Ueyoshi, K., (2006). Temporal changes in ocean eddy transports, *Journal Of Physical Oceanography*, 36, 543 – 550.

Stramma, L. & England, M., (1999). On the water masses and mean circulation of the South Atlantic Ocean. *J. Geophys. Res.* 104(C9): 20863-20883

Stommel, H., (1948). The westward intensification of wind-driven ocean currents. *Trans. Amer. Geophys. Union* 29, 202-206.

Sverdrup, H.U., (1947). Wind-driven currents in a baroclinic ocean; with application to the equatorial currents of the eastern Pacific. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 33, 318-326.

Talley, L. D., (1999). Some aspects of ocean heat transport by the shallow, intermediate and deep overturning circulations. In *Mechanisms of Global Climate Change at Millennial Time Scales*, *Geophys. Mono. Ser.*, 112, American Geophysical Union, ed. Clark, Webb and Keigwin, 1-22.

Talley, L. D., (2008). Freshwater transport estimates and the global overturning circulation: shallow, deep and throughflow components. *Progress in Oceanography*, 78, 257-303, doi:10.1016/j.pocean.2008.05.001.

Talley, L.D., Pickard, G.L., Emery, W.J. & Swift, J.H., (2011). *Descriptive Physical Oceanography: An Introduction (Sixth Edition)*, Elsevier, Boston, 560 pp.

Teixeira, C.E.P., Mata, M.M., Lentini, C.A.D., Garcia, C.A.E. & Campos, E.J.D., (2009). On the temporal variability of the sea surface temperature in the southwestern Atlantic based on the analysis of "Pathfinder AVHRR/NOAA" images. *Rev. Bras. Cartogr.* 61 (3), 207-21.

Thompson, D. W. J. & Wallace, J. M., (2000). Annular modes in the Extratropical Circulation. Part I: Month-to-Month Variability, *Journal of Climate*, 13, 1000–1016, 2000.

Tomczak, M. & Godfrey, J. J., (1994). *Regional Oceanography: An introduction*. Elsevier, New York, 422p.

Torrence, C. & Compo, G. P., (1998). A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79: 61-78.

Triola, M. F., (2005). *Introdução à Estatística*. 9 ed. Rio de Janeiro: LTC, pp. 682.

Young, I. R., Zieger, S. & Babanin, A. V., (2011). Global trends in wind speed and wave height. *Science* 332, 451–455.

Walker, A. E., & Wilkin, J. L., (1998). Optimal averaging of NOAA/NASA Pathfinder satellite sea surface temperature data, *J. Geophys. Res.*, 103, 12,869– 12,883.

Wilkin, J. L., & Morrow, R. A., (1994). Eddy kinetic energy and momentum flux in the Southern Ocean: Comparison of a global eddy-resolving model with altimeter, drifter, and current-meter data, *J. Geophys. Res.*, 99(C4), 7903 – 7916, doi:10.1029/93JC03505.

Willis, J. K., Roemmich, D. & Cornuelle, B., (2004). Interannual variability in upper ocean heat content, temperature, and thermosteric expansion on global scales, *J. Geophys. Res.*, 109, C12036.

Zhai, X., Johnson, H. L. & Marshall, D. P., (2010). Significant sink of ocean-eddy energy near western boundaries. *Nature Geoscience*, 3, 608–612.

Zhai, X. & Marshall, P., (2012). On the eddy energy cycle in subtropical and subpolar gyres. *Journal of Physical Oceanography*. (submitted).