

**Universidade Federal do Rio Grande - FURG**

**Instituto de Oceanografia**

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

**PRODUÇÃO E EXPORTAÇÃO DE ÁGUAS PROFUNDAS  
NO ENTORNO DO CONTINENTE ANTÁRTICO**

**RODRIGO KERR DUARTE PEREIRA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Doutor.

Orientador: *Prof. Dr.* MAURICIO M. MATA

Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Brasil.

Co-orientadora: *Professor* KAREN J. HEYWOOD

University of East Anglia (UEA), Reino Unido.

Rio Grande, RS, Brasil

Novembro 2010

# **PRODUÇÃO E EXPORTAÇÃO DE ÁGUAS PROFUNDAS NO ENTORNO DO CONTINENTE ANTÁRTICO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Física,  
Química e Geológica, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de  
Doutor

por

**RODRIGO KERR DUARTE PEREIRA**

Rio Grande, RS, Brasil

Novembro 2010

© A cópia parcial e a citação de trechos desta tese são permitidas sobre a condição de que qualquer pessoa que a consulte reconheça os direitos autorais do autor. Nenhuma informação derivada direta ou indiretamente desta obra deve ser publicada sem o consentimento prévio e por escrito do autor.

KERR, RODRIGO

Produção e exportação de águas profundas no entorno do continente Antártico./ Rodrigo Kerr Duarte Pereira. – Rio Grande: FURG, 2010.

277 p.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande. Doutorado em Oceanografia Física, Química e Geológica. Área de Concentração: Oceanografia Física.

1. Oceanografia. 2. Oceano Austral. 3. Água de Fundo Antártica. I. Título.

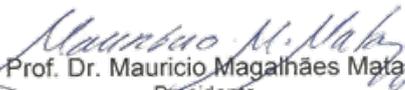


UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG  
IO – INSTITUTO DE OCEANOGRAFIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA  
FÍSICA, QUÍMICA E GEOLÓGICA.  
E-mail: [ccpofgg@furg.br](mailto:ccpofgg@furg.br) – <http://www.oceanfisqueo.furg.br>

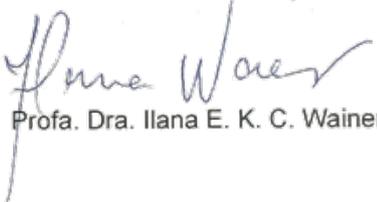


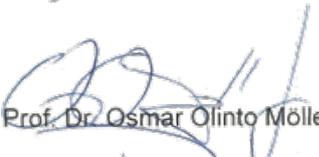
#### ATA ESPECIAL P/DEFESA DE TESE DE DOUTORADO 03/2010

Às oito horas e trinta minutos do dia trinta de novembro do ano dois mil e dez, na Sala Lagoa – Cidec-Sul – Campus Carreiros/FURG, reuniu-se a Comissão Examinadora da Tese de **DOUTORADO** de **RODRIGO KERR DUARTE PEREIRA**, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. Mauricio Magalhães Mata – IO/FURG – Orientador/Presidente, Prof. Dr. Carlos Alberto Eiras Garcia – IO/FURG, Prof. Dr. Osmar Olinto Möller Jr. – IO/FURG, Profa. Dra. Ilana E. K. C. Wainer – IO/USP e Prof. Dr. Luciano Ponzi Pezzi – INPE. A tese foi apresentada sob o título: **“PRODUÇÃO E EXPORTAÇÃO DE ÁGUAS PROFUNDAS NO ENTORNO DO CONTINENTE ANTÁRTICO”**. Dando início à sessão pública, o Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica, e presidente da sessão, Prof. Dr. Mauricio Magalhães Mata, agradeceu a presença de todos e fez a apresentação da Comissão Examinadora. Logo após esclareceu que o candidato teria um tempo de 45 a 60 minutos para explanação da tese, e cada membro da Comissão, um tempo máximo de 30 minutos para perguntas. A seguir, passou a palavra ao candidato que apresentou a tese e respondeu às perguntas formuladas pela Comissão Examinadora. Após ampla explanação, a Comissão Examinadora reuniu-se na Sala 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 tese. 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, foi assinada pela Comissão Examinadora, pelo candidato e pelo Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Oceanografia Física, Química e Geológica.

  
Prof. Dr. Mauricio Magalhães Mata  
Presidente

  
Prof. Dr. Carlos Alberto Eiras Garcia

  
Profa. Dra. Ilana E. K. C. Wainer

  
Prof. Dr. Osmar Olinto Möller Jr.

  
Prof. Dr. Luciano Ponzi Pezzi

  
Acad. Rodrigo Kerr Duarte Pereira

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

*“Pluralitas non est ponenda sine neccesitate.”*

*(Se em tudo o mais forem idênticas as várias explicações  
de um fenômeno, a mais simples é a melhor.)*

*- William de Ockham (1288-1348)*

*Aos meus queridos Tio Zé e Tia Evanir (in memoriam),  
por estarem presentes em momentos tão bons da minha vida.*

# Agradecimentos

Alcançar objetivos, concretizar sonhos e ser feliz pessoal e profissionalmente é, ou pelo menos deveria ser, uma constante busca na vida de qualquer pessoa. Com a finalização deste trabalho termino uma fase importante da minha vida profissional, que busquei de forma incessante desde o momento em que decidi que a Oceanografia estaria presente de forma contínua na minha vida. Novos sonhos, novos objetivos e metas começam a partir deste ponto. Entretanto, eu não poderia deixar de expressar meu imenso agradecimento a todos àqueles que de alguma forma colaboraram para a realização deste trabalho, e conseqüentemente, para a concretização de meus sonhos e objetivos. Assim, eu agradeço e deixo aqui o meu muito obrigado:

Aos meus pais, Francisco e Elizabeth, aos meus irmãos, Bruna, Rafael, Fernando e Francisco, e aos meus sobrinhos, João Pedro, Maria Eduarda e Luiza, que formam a minha base familiar e estiveram sempre ao meu lado em todos os momentos da minha vida.

Aos meus demais familiares pelos momentos felizes em conjunto, em especial as minhas avós Yolanda e Ana, que sempre me incentivaram e me ajudaram ao longo da minha trajetória acadêmica.

Ao meu orientador e amigo, Mauricio Mata, que sempre acreditou no meu potencial acadêmico-científico e, principalmente, por estender a mão nos momentos mais conturbados, sempre me mostrando que mesmo em adversidades podemos levantar e seguir em frente.

A minha co-orientadora, Karen Heywood, por me receber tão bem nas minhas duas passagens por Norwich e por me orientar nas mais diversas (e às vezes banais) dúvidas.

Ao amigo, Carlos Rafael, por me apresentar uma das melhores cidades do mundo, por dividir comigo uma casa, pelas viagens em conjunto, pelas pizzas degustadas, pelas conversas de horas no *skype*, e pelo grande auxílio na fase final da tese, mas principalmente pela amizade verdadeira.

Às amigas, Priscila Giordano e Júlia Reisser, e a galera da “Holmes” por me ajudarem durante as minhas idas e vindas entre Rio Grande e Rio de Janeiro ao longo dos últimos 4 anos.

Aos amigos de sala, José Luiz Azevedo, Ricardo Acosta, Amábile Ferreira, Ana Dogliotti e Leopoldo Oliveira pelas conversas e momentos divididos, em especial ao Zé e a Amábile pela ajuda na reta final da tese.

À amiga Bárbara Franco, por ser sempre prestativa nas diversas solicitações de manuscritos, pelas conversas e pela amizade.

À Marina Azaneu e Ingrid Angel-Benavides, por serem "loucas" o suficiente em aceitar a minha "desorientação" em suas iniciações científicas, mas principalmente, pela ajuda incondicional nos diversos momentos solicitados.

Ao amigo Carlos Fujita, por me ajudar inúmeras vezes na solução dos problemas do computador.

Aos demais amigos e colegas do Laboratório de Oceanografia Física e do Laboratório de Estudos dos Oceanos e Clima: Vagner Duarte, Ana Cristina Freitas, Amália Detoni, Camila Marin, Lorena Collares, Mathias van Caspel, Ana Berger, Caio Fonteles, Renan Peixoto, Patrícia Baldasso, Juliana Marson, Igor Monteiro, Igor Carneiro, Giovanni Ruggiero, Fernando Hirata, Ella, Marcelo Almeida e Willian Marques, pela boa convivência diária e pela ajuda em determinados momentos.

Aos colegas do "The Beach": Gillian Damerrel, Jenny Grahان, Matthew Thomas, Nick Earl, Ben Harden, Ben Webber, Stuart Hall e Cedric Chavanne, pela ajuda prestada nos momentos solicitados e pela convivência durante a minha passagem pela Inglaterra.

Ao secretário do Programa de Pós-Graduação, Clabisnei, por ser sempre prestativo quando solicitado.

Aos membros da banca, Dr. Carlos A. E. Garcia, Dra. Ilana Wainer, Dr. Luciano Pezzi e Dr. Osmar O. Möller Jr., por aceitarem em participar da mesma e por colaborarem para a finalização deste trabalho com sugestões, correções e idéias.

E finalmente, ao CNPq (SWE 201843/2008-0), ao INCT-Criosfera, a CAPES e ao POGO-SCOR pelas bolsas de estudo fornecidas durante o curso de Doutorado.

# Índice

<b>Agradecimentos</b>	vii
<b>Lista de Figuras</b>	xiv
<b>Lista de Tabelas</b>	xxiv
<b>Lista de Acrônimos, Abreviações e Símbolos</b>	xxv
<b>Resumo</b>	xxix
<b>Abstract</b>	xxx
<b>Prefácio</b>	01
<b>Hipótese</b>	03
<b>Capítulo I: Introdução</b>	04
1.1. Objetivos	10
Objetivo geral	11
Objetivos específicos	11
<b>Capítulo II: O oceano Austral</b>	12
2.1. Setores do oceano Austral	13
2.2. Frentes e correntes do oceano Austral	14
2.3. Setor Mar de Weddell	19
2.4. Setor Oceano Índico	24
2.5. Setor Oceano Pacífico Oeste	28
2.6. Setor Mar de Ross	31
2.7. Setor Mares de Bellingshausen e Amundsen	35
2.8. Gelo marinho e plataformas de gelo permanente	38

---

2.9. Alterações do oceano Austral e da Antártica	42
<b>Capítulo III: Metodologia e Dados</b>	<b>46</b>
3.1. Dados históricos	47
3.2. Modelo OCCAM	48
3.3. Seções hidrográficas simuladas	50
3.3.1. Seções hidrográficas transversais às margens continentais	50
3.3.2. Seções hidrográficas paralelas às margens continentais	53
3.4. Definição de águas profundas	55
3.5. Definição das zonas oceânicas da margem continental Antártica a partir da Anomalia geopotencial	57
3.6. Cálculo do transporte de volume	58
3.7. Cálculo dos parâmetros médios e da temperatura e salinidade média ponderada pelo transporte de volume	59
3.8. Diagrama de Taylor	61
3.9. Análise de correlação cruzada	63
3.10. Espectros de ondeletas	64
3.11. Mapas de composição ( <i>composite analysis</i> )	66
<b>Capítulo IV: Representação da simulação do modelo oceânico global OCCAM 1/12°</b>	<b>68</b>
4.1. Seções hidrográficas simuladas	69
4.1.1. Seções hidrográficas transversais às margens continentais	69
4.1.2. Seções hidrográficas paralelas às margens continentais	70
4.2. Massas de água	80
4.3. Camadas representativas das águas-fontes da AABW	91

4.4. Circulação oceânica	95
4.5. Gelo marinho	104
<b>Capítulo V: Produção e exportação das águas profundas</b>	<b>115</b>
5.1. Transporte de volume de toda a coluna d'água	116
Setor Mar de Weddell	116
Setor Oceano Índico	119
Setor Oceano Pacífico Oeste	120
Setor Mar de Ross	121
Setor Mares de B&A	122
5.2. Transporte de volume das águas profundas	125
Setor Mar de Weddell	125
Setor Oceano Índico e Oceano Pacífico Oeste	128
Setor Mar de Ross	130
5.2.1. Confiabilidade das séries do transporte de volume das águas profundas	131
5.3. Variabilidade do transporte de volume das águas profundas	133
5.3.1. Ciclo anual do transporte de volume	134
5.3.2. Variabilidade interanual do transporte de volume	135
Setor Mar de Weddell	138
Setor Oceano Índico e Oceano Pacífico Oeste	142
Setor Mar de Ross	145
5.4. Dinâmica do transporte de volume nas margens continentais	147
Setor Mar de Weddell	147

---

Setores Oceano Índico e Oceano Pacífico Oeste	151
Setor Mar de Ross	154
<b>5.5. Formação das águas profundas</b>	<b>156</b>
Setor Mar de Weddell	157
Setor Oceano Índico e Oceano Pacífico Oeste	160
Setor Mar de Ross	162
Variabilidade das taxas de formação das águas profundas	163
<b>Capítulo VI: Variedades regionais da AABW e fluxos de exportação</b>	<b>167</b>
6.1. Setor Mar de Weddell	168
6.2. Setores Oceano Índico e Pacífico Oeste	176
6.3. Setor Mar de Ross	177
6.4. Variedades regionais da AABW	185
6.5. Transporte lateral e fluxos de exportação da AABW para os oceanos globais	189
<b>Capítulo VII: Variabilidade climática e os impactos na exportação da AABW</b>	<b>193</b>
7.1. Modos de variabilidade climática	194
7.1.1. Modo Anular Sul ( <i>Southern Annular Mode – SAM</i> )	194
7.1.2. Oscilação Semi-Annual ( <i>Semi-Annual Oscillation – SAO</i> )	197
7.1.3. El Niño-Oscilação Sul ( <i>El Niño-Southern Oscillation – ENSO</i> )	199
7.1.4. Dipolo Antártico ( <i>Antarctic Dipole</i> )	201
7.2. Impacto da variabilidade temporal das propriedades das águas-fontes no transporte de volume da AABW	203
7.3. Conexão entre o clima extrapolar e a exportação e produção da AABW	218

<b>Capítulo VIII: Conclusões</b>	238
<b>Referências Bibliográficas</b>	246
<b>Apêndice I: Tendências</b>	260
<b>Apêndice II: Médias climatológicas</b>	265
<b>Apêndice III: Séries temporais de <math>\theta</math> e S</b>	268
<b>Produção Bibliográfica Associada</b>	277

## Lista de Figuras

**Figura II-1.** Setores do oceano Austral (marcados pelas linhas brancas) delimitados neste estudo e seus principais mares regionais e regiões continentais e oceânicas. A batimetria [m] é apresentada em escala de cores. As linhas de cor preta e cinza referem-se, respectivamente, as isóbatas de 500 m e 4000 m. PA = Península Antártica, SWP = Bacia Sudoeste Pacífico, SEP = Bacia Sudeste Pacífico, PET = Depressão Princesa Elizabeth, P = Plataforma, C = Cordilheira. **13**

**Figura II-2.** Principais zonas, correntes oceânicas e frentes do oceano Austral. A posição das frentes é baseada em Orsi *et al.* [1995]. AZ = Zona Antártica, ACC = Corrente Circumpolar Antártica, ACoC = Corrente Costeira Antártica, PF = Frente Polar, PFZ = Zona da Frente Polar, RSP = Região subpolar, SACCF = Frente Sul da ACC, SAF = Frente Sub-Antártica, SAZ = Zona Sub-Antártica, SBDY = Frente do Limite Sul da ACC. \*A AZ inclui também a RSP. **16**

**Figura II-3.** Esquema das trajetórias da Corrente Costeira Antártica (ACoC; amarelo), Frente de Talude Antártico (ASF, azul) e Frente de Weddell (WF, vermelho) na região norte do mar de Weddell de acordo com Heywood *et al.* [2004]. **19**

**Figura II-4.** Setor Mar de Weddell e suas principais regiões. O esquema do padrão de circulação superficial do Giro de Weddell (linha cheia vermelha) e das principais trajetórias de exportação das águas profundas e de fundo (linhas tracejadas amarelas) são baseados nos trabalhos de Gordon *et al.* [2001], von Gyldenfeldt *et al.* [2002] e Naveira Garabato *et al.* [2002a]. As principais áreas de formação da AABW são indicadas pelos círculos azuis de acordo com Hay [1993]. A batimetria [m] é mostrada em escala de cor. As linhas de cor cinza e branca correspondem, respectivamente, as isóbatas de 500 m e 4000 m. PA = Península Antártica. **20**

**Figura II-5.** Diagrama temperatura potencial-salinidade-oxigênio dissolvido ( $\theta$ SO) para as águas com profundidade superior a 200 m das estações hidrográficas do Setor Mar de Weddell (figura inserida). Os dados são provenientes do conjunto de dados de CTD do WOD05 [Boyer *et al.* 2006]. As linhas de cor cinza indicam as superfícies isopicnais de densidade potencial com relação à superfície ( $\sigma_\theta$ ;  $\text{kg m}^{-3}$ ). A barra de cores indica a concentração de oxigênio dissolvido em mL/L. AASW = Água Superficial Antártica, BW = Água do Estreito de Bransfield, HSSW = Água de Plataforma de Alta Salinidade, ISW = Água de Plataforma de Gelo, LSSW = Água de Plataforma de Baixa Salinidade, MWDW = Água Profunda Cálida Modificada, WDW = Água Profunda Cálida, WSDW = Água Profunda do Mar de Weddell, e WSBW = Água de Fundo do Mar de Weddell. **22**

**Figura II-6.** Setor Oceano Índico e suas principais regiões. O esquema do padrão de circulação superficial da região, da recirculação na Baía Prydz (linha cheia vermelha) e das principais trajetórias de saída das águas profundas e de fundo (linhas tracejadas) são baseados nos trabalhos de Mantyla & Reid [1995], Wong *et al.* [1998] e Meredith *et al.* [1999]. As linhas tracejadas de cor cinza e marrom referem-se, respectivamente, as variedades regionais da AABW formada no Setor Oceano Índico e no Setor Oceano Pacífico Oeste. As principais áreas de formação da AABW são indicadas pelos círculos azuis de acordo com Hay [1993]. A batimetria [m] é mostrada em escala de cor. As linhas de cor cinza e branca correspondem, respectivamente, as isóbatas de 500 m e 4000 m. PET = Depressão Princesa Elizabeth. **25**

**Figura II-7.** Diagrama temperatura potencial-salinidade-oxigênio dissolvido ( $\theta$ SO) para as águas com profundidade superior a 200 m das estações hidrográficas do Setor Oceano Índico (figura inserida). Os dados são provenientes do conjunto de dados de CTD do WOD05 [Boyer *et al.* 2006]. As linhas de cor cinza indicam as superfícies isopicnais de densidade potencial com relação à superfície ( $\sigma_\theta$ ;  $\text{kg m}^{-3}$ ). A barra de cores indica a concentração de oxigênio dissolvido em mL/L. AABW = Água Antártica de Fundo, AASW = Água Superficial Antártica, CDW = Água Profunda Circumpolar, ISW = Água de Plataforma de Gelo, LSSW = Água de Plataforma de Baixa Salinidade, e MCDW = Água Profunda Circumpolar Modificada. **27**

**Figura II-8.** Setor Oceano Pacífico Oeste e suas principais regiões. O esquema do padrão de circulação superficial da região (linha cheia vermelha) e das principais trajetórias de exportação das águas profundas e de fundo (linhas tracejadas) são baseados nos trabalhos de [Rintoul \[1998\]](#), [Bindoff et al. \[2000\]](#) e [Williams et al. \[2008\]](#). As principais áreas de formação da Água de Fundo Antártica são indicadas pelos círculos azuis de acordo com [Hay \[1993\]](#). As linhas tracejadas de cor marrom, azul e púrpura referem-se, respectivamente, as variedades regionais da AABW formada no Setor Oceano Pacífico Oeste, a variedade denominada ADLBW e a variedade mais densa da RSBW. A batimetria [m] é mostrada em escala de cor. As linhas de cor cinza e branca correspondem, respectivamente, as isóbatas de 500 m e 4000 m. **29**

**Figura II-9.** Diagrama temperatura potencial-salinidade-oxigênio dissolvido ( $\theta$ SO) para as águas com profundidade superior a 200 m das estações hidrográficas do Setor Oceano Pacífico Oeste (figura inserida). Os dados são provenientes do conjunto de dados de CTD do WOD05 [\[Boyer et al. 2006\]](#). As linhas de cor cinza indicam as superfícies isopicnais de densidade potencial com relação à superfície ( $\sigma_0$ ;  $\text{kg m}^{-3}$ ). A barra de cores indica a concentração de oxigênio dissolvido em mL/L. AASW = Água Superficial Antártica, ADLBW = Água de Fundo de Adelie, CDW = Água Profunda Circumpolar, MCDW = Água Profunda Circumpolar Modificada, SW = Água de Plataforma, e RSBW = Água de Fundo do Mar de Ross. **30**

**Figura II-10.** Setor Mar de Ross e suas principais regiões. O esquema do padrão de circulação superficial do Giro de Ross (linha cheia vermelha), da recirculação na Plataforma de Gelo Ross e das principais trajetórias de exportação das águas profunda e de fundo (linhas tracejadas) são baseados nos trabalhos de [Reid \[1997\]](#), [Assmann et al. \[2003\]](#) e [Ozaki et al. \[2009\]](#). A principal área de formação da AABW é indicada pelo círculo azul de acordo com [Hay \[1993\]](#). As linhas tracejadas de cor púrpura, verde e azul referem-se, respectivamente, as variedades regionais de maior e menor salinidade da RSBW e a variedade advectada do Setor Oceano Pacífico Oeste denominada ADLBW. A batimetria [m] é mostrada em escala de cor. As linhas de cor cinza e branca correspondem, respectivamente, as isóbatas de 500 m e 4000 m. **32**

**Figura II-11.** Diagrama temperatura potencial-salinidade-oxigênio dissolvido ( $\theta$ SO) para as águas com profundidade superior a 200 m das estações hidrográficas do Setor Mar de Ross (figura inserida). Os dados são provenientes do conjunto de dados de CTD do WOD05 [\[Boyer et al. 2006\]](#). As linhas de cor cinza indicam as superfícies isopicnais de densidade potencial com relação à superfície ( $\sigma_0$ ;  $\text{kg.m}^{-3}$ ). A barra de cores indica a concentração de oxigênio dissolvido em mL/L. AABW = Água Antártica de Fundo, AASW = Água Superficial Antártica, CDW = Água Profunda Circumpolar, HSSW = Água de Plataforma de Alta Salinidade, ISW = Água de Plataforma de Gelo, LSSW = Água de Plataforma de Baixa Salinidade, MCDW = Água Profunda Circumpolar Modificada, e MSW = Água de Plataforma Modificada. **34**

**Figura II-12.** Setor Mares de Bellingshausen e Amundsen (B&A) e suas principais regiões. O esquema do padrão de circulação superficial (linha cheia vermelha) é baseado nos trabalhos de [Reid \[1989, 1994, 1997\]](#), [Klinck et al. \[2004\]](#) e [Assmann et al. \[2005\]](#). A batimetria [m] é mostrada em escala de cor. As linhas de cor cinza e branca correspondem, respectivamente, as isóbatas de 500 m e 4000 m. **36**

**Figura II-13.** Diagrama temperatura potencial-salinidade-oxigênio dissolvido ( $\theta$ SO) para as águas com profundidade superior a 200 m das estações hidrográficas do Setor Mares de B&A (figura inserida). Os dados são provenientes do conjunto de dados de CTD do WOD05 [\[Boyer et al. 2006\]](#). As linhas de cor cinza indicam as superfícies isopicnais de densidade potencial com relação à superfície ( $\sigma_0$ ;  $\text{kg m}^{-3}$ ). A barra de cores indica a concentração de oxigênio dissolvido em mL/L. AABW = Água de Fundo Antártica, AASW = Água Superficial Antártica, CDW = Água Profunda Circumpolar, e MCDW = Água Profunda Circumpolar Modificada. **37**

**Figura II-14.** Climatologia mensal da área coberta por gelo marinho com concentração >50% de acordo com [Zwally et al. \[1983\]](#), mostrando os meses de concentração máxima (Setembro; linha vermelha) e mínima (Fevereiro; linha azul). A batimetria [m] é mostrada em escala de cor. Principais plataformas de gelo permanentes: 1 = Plataforma de Gelo Larsen, 2 = Plataforma de Gelo Ronne-Filchner, 3 = Plataforma de Gelo Fimbul, 4 = Plataforma de Gelo Amery e 5 = Plataforma de Gelo Ross. **39**

**Figura II-15.** Esquema dos mecanismos e processos envolvidos na formação das polínias costeiras e oceânicas. **40**

**Figura III-1.** Setores do oceano Austral delimitados pelas linhas brancas e seções hidrográficas selecionadas para análise da exportação da Água de Fundo Antártica. As seções representadas por linhas cheias, tracejadas e pontilhadas referem-se, respectivamente, às margens do tipo ativa, passiva e nula de acordo com [Baines & Condie \[1998\]](#) – ver texto para detalhes. Os números indicam o número correspondente de cada seção hidrográfica transversal às margens continentais descrita na Tabela III-I. A batimetria [m] é mostrada em escala de cor. A linha preta e cinza refere-se, respectivamente, às isóbatas de 500 m e 4000m. **51**

**Figura III-2.** Setores do oceano Austral delimitados pelas linhas brancas e seções hidrográficas selecionadas para análise da produção da Água de Fundo Antártica. Os números indicam o número correspondente de cada seção hidrográfica paralela a batimetria de 1000 m descrita na Tabela III-II. A batimetria [m] é mostrada em escala de cor. A linha preta e cinza refere-se, respectivamente, às isóbatas de 500 m e 4000m. **54**

**Figura III-3.** Climatologia do mês de Setembro do modelo OCCAM 1/12° para o campo de temperatura potencial (°C; isolinhas) e densidade neutra ( $\text{kg m}^{-3}$ ; barra de cores) da Seção 1 do mar de Weddell. **56**

**Figura IV-1.** (a-t) Perfil batimétrico (cinza claro) representado pelo modelo OCCAM 1/12° e divisões das zonas oceânicas para as seções hidrográficas transversais às margens continentais Antárticas selecionadas nos respectivos setores do oceano Austral (Fig. III-1), conforme indicado. Painel superior: anomalia geopotencial (linha preta) e gradiente da anomalia geopotencial (linha cinza). Painel inferior: zonas diferenciadas de acordo com a coloração, *i.e.* plataforma continental (cinza escuro), talude continental (cinza) e oceano profundo (branco). **70**

**Figura IV-2.** (a-g) Perfil batimétrico (cinza claro) representado pelo modelo OCCAM 1/12° e principais cânions oceânicos presentes nas seções hidrográficas paralelas às margens continentais Antárticas selecionadas nos respectivos setores do oceano Austral (Fig. III-2), conforme indicado. Painel superior: anomalia geopotencial (linha preta) e gradiente da anomalia geopotencial (linha cinza). Painel inferior: batimetria de fundo. **78**

**Figura IV-3.** Diagrama  $\theta S$  dos (pontos cinza) dados observados do WOD05 e das (linhas pretas) médias anuais simuladas pelo modelo OCCAM 1/12° no Setor Mar de Weddell para as seções de exportação indicadas. As linhas tracejadas referem-se respectivamente às isolinhas de densidade neutra de 27.8, 28, 28.1, 28.27 e 28.40  $\text{kg m}^{-3}$ . A linha pontilhada indica o ponto de congelamento da água do mar. **82**

**Figura IV-4.** Padrões estatísticos descrevendo a climatologia da camada de água superficial ( $\gamma^n < 28 \text{ kg m}^{-3}$ ) simulada pelo modelo OCCAM 1/12° nas seções de exportação (indicadas pelos números) do Setor Mar de Weddell. Os pontos em vermelho, preto e azul referem-se, respectivamente, à temperatura potencial, salinidade e densidade neutra. As linhas serrilhadas, pontilhadas e tracejadas indicam, respectivamente, o coeficiente de correlação, o desvio padrão padronizado e o CRMSD. A linha tracejada cinza em destaque marca a região onde a variabilidade dos valores simulados melhor se ajusta aos observados. R = Referência. Para maiores detalhes ver o texto e o Apêndice II. **84**

**Figura IV-5.** Assim como a Fig. IV-4, sendo que para a camada de água intermediária ( $28.0 < \gamma^n < 28.26 \text{ kg m}^{-3}$ ). **85**

**Figura IV-6.** Assim como a Fig. IV-4, sendo que para a camada de água profunda ( $\gamma^n \geq 28.26 \text{ kg m}^{-3}$ ). **86**

**Figura IV-7.** Diagrama  $\theta S$  dos (pontos cinza) dados observados do WOD05 e das (linhas pretas) médias anuais simuladas pelo modelo OCCAM 1/12° nos Setores Oceano Índico e Oceano Pacífico Sul para as seções de exportação indicadas. As linhas tracejadas referem-se

respectivamente às isolinhas de densidade neutra de 27.8, 28, 28.1, 28.27 e 28.40 kg m<sup>-3</sup>. A linha pontilhada indica o ponto de congelamento da água do mar. **87**

**Figura IV-8.** Padrões estatísticos descrevendo a climatologia da camada de água superficial ( $\gamma^n < 28 \text{ kg m}^{-3}$ ) simulada pelo modelo OCCAM 1/12° nas seções de exportação (indicadas pelos números) dos Setores Oceano Índico e Oceano Pacífico Oeste. Os pontos em vermelho, preto e azul referem-se, respectivamente, à temperatura potencial, salinidade e densidade neutra. As linhas serrilhadas, pontilhadas e tracejadas indicam, respectivamente, o coeficiente de correlação, o desvio padrão padronizado e o CRMSD. A linha tracejada cinza em destaque marca a região onde a variabilidade dos valores simulados melhor se ajusta aos observados. R = Referência. Para maiores detalhes ver o texto e o Apêndice II. **88**

**Figura IV-9.** Assim como a Fig. IV-8, sendo que para a camada de água intermediária ( $28.0 \leq \gamma^n < 28.26 \text{ kg m}^{-3}$ ). **89**

**Figura IV-10.** Assim como a Fig. IV-8, sendo que para a camada de água profunda ( $\gamma^n \geq 28.26 \text{ kg m}^{-3}$ ). **89**

**Figura IV-11.** Diagrama  $\theta$ S dos (pontos cinza) dados observados do WOD05 e das (linhas pretas) médias anuais simuladas pelo modelo OCCAM 1/12° nos Setores Mar de Ross e Mares de B&A para as seções de exportação indicadas. As linhas tracejadas referem-se respectivamente às isolinhas de densidade neutra de 27.8, 28, 28.1, 28.27 e 28.40 kg m<sup>-3</sup>. A linha pontilhada indica o ponto de congelamento da água do mar. **90**

**Figura IV-12.** Padrões estatísticos descrevendo a climatologia das camadas de água superficial ( $\gamma^n < 28 \text{ kg m}^{-3}$ ; pontos), água intermediária ( $28.0 \leq \gamma^n < 28.26 \text{ kg m}^{-3}$ ; quadrados) e água profunda ( $\gamma^n \geq 28.26 \text{ kg m}^{-3}$ ; estrelas) simulada pelo modelo OCCAM 1/12° nas seções de exportação (indicadas pelos números) dos Setores Mar de Ross e Mares de B&A. Os valores em vermelho, preto e azul referem-se, respectivamente, à temperatura potencial, salinidade e densidade neutra. As linhas serrilhadas, pontilhadas e tracejadas indicam, respectivamente, o coeficiente de correlação, o desvio padrão padronizado e o CRMSD. A linha tracejada cinza em destaque marca a região onde a variabilidade dos valores simulados melhor se ajusta aos observados. R = Referência. Para maiores detalhes ver o texto e o Apêndice II. **90**

**Figura IV-13.** Climatologia média dos campos de (esquerda) temperatura potencial [°C] e (direita) salinidade, simulados pelo modelo OCCAM 1/12° na (a, b) camada de mistura superficial (SML) e na (c, d) camada intermediária (ILD). **91**

**Figura IV-14.** Climatologia média dos campos de (esquerda) temperatura potencial [°C] e (direita) salinidade, obtidos do banco de dados do WOCE SOA [Orsi & Whitworth 2007] na (a, b) camada de 150 m e (c, d) 500 m. Os círculos pretos delimitam a região do oceano Austral definida neste estudo (*i.e.* acima de 60°S). **93**

**Figura IV-15.** Circulação média [cm s<sup>-1</sup>] do oceano Austral para o período simulado pelo modelo OCCAM para a (a) SML, (b) a ILD e para (c) a profundidade aproximada de 2000 m. As linhas azuis marcam as batimetrias de 1000 m e 4000 m. **96**

**Figura IV-16.** Assim como a Figura IV-14, sendo que mostrando um zoom no Setor Mar de Weddell. **98**

**Figura IV-17.** Assim como a Figura IV-14, sendo que mostrando um zoom no Setor Oceano Índico. **99**

**Figura IV-18.** Assim como a Figura IV-14, sendo que mostrando um zoom no Setor Oceano Pacífico Oeste. **100**

**Figura IV-19.** Assim como a Figura IV-14, sendo que mostrando um zoom no Setor Mar de Ross. **101**

**Figura IV-20.** Assim como a Figura IV-14, sendo que mostrando um zoom no Setor Mares de B&A. **102**

- Figura IV-21.** Média climatológica mensal da concentração (SIC; %) e espessura (SIT; cm) do gelo marinho para cada setor do oceano Austral. **105**
- Figura IV-22.** Média climatológica da concentração de gelo marinho (SIC) para o mês de fevereiro dos períodos indicados para os dados do modelo OCCAM (a-c) e do sensor SSM/I (d-f) obtidos do *National Snow and Ice Data Center* (NSIDC). **106**
- Figura IV-23.** Média climatológica da concentração de gelo marinho (SIC) para o mês de setembro dos períodos indicados para os dados do modelo OCCAM (a-c) e do sensor SSM/I (d-f) obtidos do *National Snow and Ice Data Center* (NSIDC). **107**
- Figura IV-24.** (painel superior) Médias mensais e (painel inferior) desvios da (a) concentração [%] e (b) espessura [cm] do gelo marinho no Setor Mar de Weddell. As figuras inseridas mostram a média climatológica mensal para todo o período de simulação do OCCAM 1/12°. As linhas tracejadas nos painéis inferiores mostram a tendência dos desvios. **110**
- Figura IV-25.** (painel superior) Médias mensais e (painel inferior) desvios da (a) concentração [%] e (b) espessura [cm] do gelo marinho no Setor Oceano Índico. As figuras inseridas mostram a média climatológica mensal para todo o período de simulação do OCCAM 1/12°. As linhas tracejadas nos painéis inferiores mostram a tendência dos desvios. **111**
- Figura IV-26.** (painel superior) Médias mensais e (painel inferior) desvios da (a) concentração [%] e (b) espessura [cm] do gelo marinho no Setor Oceano Pacífico Oeste. As figuras inseridas mostram a média climatológica mensal para todo o período de simulação do OCCAM 1/12°. As linhas tracejadas nos painéis inferiores mostram a tendência dos desvios. **112**
- Figura IV-27.** (painel superior) Médias mensais e (painel inferior) desvios da (a) concentração [%] e (b) espessura [cm] do gelo marinho no Setor Mar de Ross. As figuras inseridas mostram a média climatológica mensal para todo o período de simulação do OCCAM 1/12°. As linhas tracejadas nos painéis inferiores mostram a tendência dos desvios. **113**
- Figura IV-28.** (painel superior) Médias mensais e (painel inferior) desvios da (a) concentração [%] e (b) espessura [cm] do gelo marinho no Setor Mares de B&A. As figuras inseridas mostram a média climatológica mensal para todo o período de simulação do OCCAM 1/12°. As linhas tracejadas nos painéis inferiores mostram a tendência dos desvios. **114**
- Figura V-1.** Transporte de volume [Sv] das águas profundas padronizado em relação à média e ao desvio padrão do período (linha preta) simulado pelo modelo OCCAM 1/12° e (linha vermelha) observado por (direita) F95 e (esquerda) F01 na Seção 1 do Setor Mar de Weddell. **132**
- Figura V-2.** Velocidade da corrente [ $\text{cm s}^{-1}$ ] das águas de fundo, perpendicular à seção e padronizada em relação à média e ao desvio padrão do período, (linha preta) simulada pelo modelo OCCAM 1/12° e (linha vermelha) observada por F01 na Seção 1 do Setor Mar de Weddell. **133**
- Figura V-3.** Padrões estatísticos descrevendo a série temporal da velocidade (F01) e do transporte de volume (F95) da camada profunda simulada pelo modelo OCCAM 1/12° na Seção 1 do Setor Mar de Weddell. As linhas serrilhadas, pontilhadas e tracejadas indicam, respectivamente, o coeficiente de correlação, o desvio padrão padronizado e o CRMSD. A linha tracejada cinza em destaque marca a região onde a variabilidade dos valores simulados melhor se ajusta aos observados. R = Referência. **133**
- Figura V-4.** Ciclo anual do transporte de volume cumulativo médio das águas profundas para as seções indicadas do (a) Setor Mar de Weddell, (b) Setores Oceano Índico e Oceano Pacífico Oeste e (c) Setor Mar de Ross. As unidades estão padronizadas e indicam o número de desvios padrão a partir da média geral. Os valores absolutos de cada mês são informados na tabela V-II. **135**
- Figura V-5.** Variabilidade interanual do transporte de volume cumulativo médio das águas profundas para as seções indicadas do (a) Setor Mar de Weddell, (b) Setores Oceano Índico e

Oceano Pacífico Oeste e (c) Setor Mar de Ross. As unidades estão padronizadas e indicam o número de desvios padrão a partir da média geral. **136**

**Figura V-6.** Tendência decadal para as séries temporais de (esquerda) transporte de volume [ $\text{Sv década}^{-1}$ ] e (direita) densidade neutra [ $\text{kg m}^{-3} \text{ década}^{-1}$ ] das águas profundas simuladas pelo modelo OCCAM 1/12°. **138**

**Figura V-7.** Série temporal da média (linha pontilhada) mensal e (linha cheia) anual do transporte de volume [ $\text{Sv}$ ] cumulativo das águas profundas para as seções do Setor Mar de Weddell (conforme indicado) simuladas pelo modelo OCCAM 1/12°. Os valores em negrito reportam a tendência decadal [ $\text{Sv década}^{-1}$ ] e os valores em itálico indicam a média e o desvio-padrão para os 17 anos simulados. **139**

**Figura V-8.** Espectro de energia de ondeletas (considerando a ondeleta mãe Morlet) das séries de anomalia do transporte de volume das águas de fundo nas seções de exportação localizadas na região noroeste (*i.e.* Seção 1 e 2) e sul (*i.e.* Seção 3) do Setor Mar de Weddell. A área branca limita a região do cone de influência onde a variância é reduzida. Os contornos pretos delimitam as regiões com nível de significância superior a 90% para o processo de ruído vermelho com coeficiente de defasagem igual a 0.72. **140**

**Figura V-9.** Assim como a legenda da Fig. V-8, sendo que para as seções simuladas da região leste do Setor Mar de Weddell. **141**

**Figura V-10.** Assim como a legenda da Fig. V-7, sendo que para as seções simuladas dos Setores Oceano Índico e Oceano Pacífico Oeste. **142**

**Figura V-11.** Assim como a legenda da Fig. V-8, sendo que para as seções simuladas do Setor Oceano Índico. **143**

**Figura V-12.** Assim como a legenda da Fig. V-8, sendo que para as seções simuladas do Setor Oceano Pacífico Oeste. **144**

**Figura V-13.** Assim como a legenda da Fig. V-7, sendo que para as seções simuladas do Setor Mar de Ross. **145**

**Figura V-14.** Assim como a legenda da Fig. V-8, sendo que para as seções simuladas do Setor Mar de Ross. **146**

**Figura V-15.** Média simulada do transporte de volume de toda a coluna d'água ao longo das margens continentais do Setor Mar de Weddell. O transporte foi integrado verticalmente e dividido pela distância entre as estações ao longo das seções simuladas (conforme indicado) pelo modelo OCCAM 1/12°. A área sombreada mostra a variabilidade durante todo o período simulado (*i.e.* períodos máximos e mínimos simulados). As barras verticais cheias e tracejadas marcam, respectivamente, o término da plataforma continental e do talude continental. Os valores em negrito indicam a média e o desvio-padrão para todo o período simulado do transporte de volume cumulativo [ $\text{Sv}$ ] de cada zona oceânica ao longo da seção, se não mostrados indicam um transporte insignificante. Notar que as escalas verticais são diferentes para uma melhor visualização do transporte em cada seção. **149**

**Figura V-16.** Média simulada do transporte de volume das águas profundas ao longo das margens continentais do Setor Mar de Weddell. O transporte foi integrado verticalmente e dividido pela distância entre as estações ao longo das seções simuladas (conforme indicado) pelo modelo OCCAM 1/12°. A área sombreada mostra a variabilidade durante todo o período simulado (*i.e.* períodos máximos e mínimos simulados). As barras verticais cheias e tracejadas marcam, respectivamente, o término da plataforma continental e do talude continental. Os valores em negrito indicam a média e o desvio-padrão para todo o período simulado do transporte de volume cumulativo [ $\text{Sv}$ ] de cada zona oceânica ao longo da seção, se não mostrados indicam um transporte insignificante. Notar que as escalas verticais são diferentes para uma melhor visualização do transporte em cada seção. **150**

**Figura V-17.** Assim como a legenda da Fig. V-15, sendo que para as seções simuladas dos Setores Oceano Índico e Oceano Pacífico Oeste. **152**

**Figura V-18.** Assim como a legenda da Fig. V-16, sendo que para as seções simuladas dos Setores Oceano Índico e Oceano Pacífico Oeste. **153**

**Figura V-19.** Assim como a legenda da Fig. V-15, sendo que para as seções simuladas do Setor Mar de Ross. **154**

**Figura V-20.** Assim como a legenda da Fig. V-16, sendo que para as seções simuladas do Setor Mar de Ross. **155**

**Figura V-21.** Série temporal da média (linha pontilhada) mensal e (linha cheia) anual do transporte de volume [Sv] cumulativo das águas profundas para as seções de produção do oceano Austral (conforme indicado) simuladas pelo modelo OCCAM 1/12°. Os valores em negrito reportam a tendência decadal [Sv década<sup>-1</sup>] e os valores em itálico indicam a média e o desvio-padrão para os 17 anos simulados. **157**

**Figura V-22.** Média simulada da produção das águas profundas no oceano Austral. O transporte foi integrado verticalmente e dividido pela distância entre as estações ao longo das seções de produção simuladas (conforme indicado) pelo modelo OCCAM 1/12°. A área sombreada mostra a variabilidade durante todo o período simulado (*i.e.* períodos máximos e mínimos simulados). As barras verticais cheias marcam o limite entre os principais cânions da região. Os valores em negrito indicam a média e o desvio-padrão para todo o período simulado do transporte de volume cumulativo [Sv] de cada região ao longo da seção, se não mostrados indicam um transporte insignificante. Notar que as escalas verticais são diferentes para uma melhor visualização do transporte em cada seção. **160**

**Figura V-23.** Série temporal da média (linha pontilhada) mensal e (linha cheia) anual do transporte de volume [Sv] cumulativo das águas profundas simuladas pelo modelo OCCAM 1/12° para a seção de produção adicional localizada dentro da plataforma continental oeste do mar de Ross, considerando a isóbata de 500 m. O valor em negrito reporta a tendência decadal [Sv década<sup>-1</sup>] e o valor em itálico indica a média e o desvio padrão para os 17 anos simulados. **162**

**Figura V-24.** Assim como a legenda da Fig. V-8, sendo que para a seção de produção da região noroeste do Setor Mar de Weddell (Seção I). **163**

**Figura V-25.** Espectros preservando a variância das séries temporais do transporte de volume cumulativo das águas profundas para as seções de produção da região noroeste do Setor Mar de Weddell (Seção I) e da região da Terra de Adelie do Setor Oceano Pacífico Oeste (Seção VI) simuladas pelo modelo OCCAM 1/12°. Os valores em negrito (cinza) reportam o período de cada pico em anos (meses). A linha pontilhada marca o nível de significância de 95%. **164**

**Figura V-26.** Transporte de volume [Sv km<sup>-1</sup>] de toda a coluna d'água padronizado em relação à média para cada par de estações normal a (linha azul) Seção I do modelo OCCAM 1/12° e a (linha vermelha) radial ilustrada em Muench & Gordon [1995]. A linha preta corresponde ao volume das águas profundas no modelo OCCAM 1/12°. Valores positivos indicam um transporte para leste. **166**

**Figura VI-1.** Série temporal da média mensal (linha pontilhada) e anual (linha cheia) da temperatura ponderada pelo transporte de volume [ $T_{TW}$ ; °C] das águas profundas para as seções (conforme indicado) do Setor Mar de Weddell simuladas a partir do modelo OCCAM 1/12°. Os valores em negrito reportam a tendência decadal [°C década<sup>-1</sup>] e os valores em itálico indicam a média e o desvio-padrão para os 17 anos simulados. **169**

**Figura VI-2.** Série temporal da média mensal (linha pontilhada) e anual (linha cheia) da salinidade ponderada pelo transporte de volume [ $S_{TW}$ ] das águas profundas para as seções (conforme indicado) do Setor Mar de Weddell simuladas a partir do modelo OCCAM 1/12°. Os valores em negrito reportam a tendência decadal [ $\times 10^{-3}$  década<sup>-1</sup>] e os valores em itálico indicam a média e o desvio-padrão para os 17 anos simulados. **170**

**Figura VI-3.** Série temporal da média mensal (linha pontilhada) e anual (linha cheia) da densidade neutra [kg m<sup>-3</sup>] das águas profundas para as seções (conforme indicado) do Setor Mar de Weddell simuladas a partir do modelo OCCAM 1/12°. Os valores em negrito reportam a

tendência decadal [ $\text{kg m}^{-3} \text{ década}^{-1}$ ] e os valores em *itálico* indicam a média e o desvio-padrão para os 17 anos simulados. **171**

**Figura VI-4.** Série temporal da média mensal (linha pontilhada) e anual (linha cheia) da velocidade [ $\text{cm s}^{-1}$ ] perpendicular a batimetria das águas profundas para as seções (conforme indicado) do Setor Mar de Weddell simuladas a partir do modelo OCCAM 1/12°. Os valores em **negrito** reportam a tendência decadal [ $\text{cm s}^{-1} \text{ década}^{-1}$ ] e os valores em *itálico* indicam a média e o desvio-padrão para os 17 anos simulados. **172**

**Figura VI-5.** Série temporal da média mensal (linha pontilhada) e anual (linha cheia) da temperatura ponderada pelo transporte de volume [ $T_{TW}$ ; °C] das águas profundas para as seções de produção (conforme indicado) do oceano Austral simuladas a partir do modelo OCCAM 1/12°. Os valores em **negrito** reportam a tendência decadal [°C  $\text{década}^{-1}$ ] e os valores em *itálico* indicam a média e o desvio-padrão para os 17 anos simulados. **173**

**Figura VI-6.** Série temporal da média mensal (linha pontilhada) e anual (linha cheia) da salinidade ponderada pelo transporte de volume [ $S_{TW}$ ] das águas profundas para as seções de produção (conforme indicado) do oceano Austral simuladas a partir do modelo OCCAM 1/12°. Os valores em **negrito** reportam a tendência decadal e os valores em *itálico* indicam a média e o desvio-padrão para os 17 anos simulados. **174**

**Figura VI-7.** Série temporal da média mensal (linha pontilhada) e anual (linha cheia) da densidade neutra [ $\text{kg m}^{-3}$ ] das águas profundas para as seções de produção (conforme indicado) do oceano Austral simuladas a partir do modelo OCCAM 1/12°. Os valores em **negrito** reportam a tendência decadal [ $\text{kg m}^{-3} \text{ década}^{-1}$ ] e os valores em *itálico* indicam a média e o desvio-padrão para os 17 anos simulados. **175**

**Figura VI-8.** Assim como a legenda da Fig. VI-1, sendo que para as seções simuladas dos Setores Oceano Índico e Oceano Pacífico Oeste. **179**

**Figura VI-9.** Assim como a legenda da Fig. VI-2, sendo que para as seções simuladas dos Setores Oceano Índico e Oceano Pacífico Oeste. **180**

**Figura VI-10.** Assim como a legenda da Fig. VI-3, sendo que para as seções simuladas dos Setores Oceano Índico e Oceano Pacífico Oeste. **181**

**Figura VI-11.** Assim como a legenda da Fig. VI-4, sendo que para as seções simuladas dos Setores Oceano Índico e Oceano Pacífico Oeste. **182**

**Figura VI-12.** Assim como a legenda da Fig. VI-1, sendo que para as seções simuladas do Setor Mar de Ross. **183**

**Figura VI-13.** Assim como a legenda da Fig. VI-2, sendo que para as seções simuladas do Setor Mar de Ross. **183**

**Figura VI-14.** Assim como a legenda da Fig. VI-3, sendo que para as seções simuladas do Setor Mar de Ross. **184**

**Figura VI-15.** Assim como a legenda da Fig. VI-4, sendo que para as seções simuladas do Setor Mar de Ross. **184**

**Figura VI-16.** (a) Transporte de volume da AABW cruzando cada seção de exportação. Os números se referem à soma do transporte de volume de cada variedade da AABW definida em (b). As variedades da AABW são identificadas a partir do diagrama TS, linhas cinza indicam as superfícies de densidade neutra [ $\text{kg m}^{-3}$ ] indicadas. A contribuição de cada variedade ao longo das seções de exportação é mostrada em (c). **186**

**Figura VI-17.** Esquema do transporte de volume da AABW ao longo do talude continental do oceano Austral baseado nas médias do transporte simulado pelo modelo OCCAM 1/12°. As linhas vermelhas, verdes e azuis se referem às seções de exportação analisadas, classificadas segundo [Baines & Condie \[1998\]](#), respectivamente, como margens ativa, passiva e nula para o fluxo descendente de AABW. Os números e os vetores em preto, cinza e azul-escuro indicam,

respectivamente, o transporte estimado pelo modelo no talude continental, o volume de água de fundo esperado para ser advectado da/para seção e o volume de AABW produzida para balancear o esquema do transporte lateral. Os círculos indicam as áreas-fonte de AABW de acordo com Hay [1993]. Os círculos cortados indicam ausência da AABW na região. A linha preta e cinza indica as isóbatas de 1000 m e 4000 m, respectivamente. A escala de cores representa a profundidade da região em metros. AP = Península Antártica, B&A = Bellingshausen & Amundsen, DDS = Mar Dumont D'Urville, LIS = Plataforma de Gelo Larsen, P = Plataforma, PB = Baía Prydz, PET = Depressão Princesa Elizabeth. **190**

**Figura VII-1.** Índice SAM entre 1988 e 2004. A linha preta corresponde a média móvel de 6 meses do índice. **195**

**Figura VII-2.** Esquema das alterações oceânicas e atmosféricas ocasionadas quando o índice SAM é positivo. Figura modificada de Hall & Visbeck [2002]. **196**

**Figura VII-3.** Esquema das mudanças de pressão e circulação atmosférica em fases de expansão e contração da Oscilação Semianual (SAO). Vetores tracejados mostram a localização das maiores mudanças no campo de pressão e os vetores cheios indicam a mudança da circulação associada por ocasião da contração. Figura modificada de van den Broeke [2000a]. **198**

**Figura VII-4.** Índice NINO3.4 entre os anos de (a) 1950-1986 e (b) 1986-2010. As barras pretas marcam o limite de  $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$  para consideração de ocorrência de eventos de (azul) El Niño e (vermelho) La Niña. **200**

**Figura VII-5.** Mapas de composições da anomalia da temperatura superficial do mar (SST;  $^{\circ}\text{C}$ ) para (a) condição de El Niño e (b) condição de La Niña. Os mapas de composições são resultados da média da SST a partir do mês de maio anterior ao evento do ENSO totalmente desenvolvido até o mês de abril seguinte, e considerando cinco eventos de El Niño e La Niña, respectivamente. Esquemas do fluxo do jato subtropical (STJ) e polar (PJ), dos centros anômalos e persistentes de baixa (L) e alta pressão (H) atmosférica e dos fluxos de calor anômalo devido à circulação meridional média são indicados sobre os mapas de composições da SST. SIC = concentração do gelo marinho. Figura modificada de Yuan [2004]. **202**

**Figura VII-6.** Mapas de correlação cruzada entre as médias mensais do transporte de volume da Seção 1 (linha cinza) do Setor Mar de Weddell com (a & b) a temperatura potencial e (c & d) salinidade da (a & c) SML e (b & d) ILD, lag-0. Coeficientes de correlação maiores que 0.5 em módulo são significantes em 99%. **204**

**Figura VII-7.** Assim como a legenda da Fig. VII-6, sendo que para lag-5. **206**

**Figura VII-8.** Assim como a legenda da Fig. VII-6, sendo que para a Seção 13 do Setor Mar de Ross. **211**

**Figura VII-9.** Assim como a legenda da Fig. VII-6, sendo que para a Seção 13 do Setor Mar de Ross com lag-5. **213**

**Figura VII-10.** Assim como a legenda da Fig. VII-6, sendo que para a Seção 3 do Setor Mar de Weddell. **214**

**Figura VII-11.** Assim como a legenda da Fig. VII-6, sendo que para a Seção 3 do Setor Mar de Weddell com lag-5. **215**

**Figura VII-12.** Assim como a legenda da Fig. VII-6, sendo que para a Seção 14 do Setor Mar de Ross. **216**

**Figura VII-13.** Assim como a legenda da Fig. VII-6, sendo que para a Seção 14 do Setor Mar de Ross com lag-5. **218**

**Figura VII-14.** Mapas de diferenças da *de composições* da (a) concentração do gelo marinho (SIC; %), da (b) espessura do gelo marinho (SIT; cm), da (c) componente zonal e (d) meridional do estresse do vento [ $\text{N m}^{-2}$ ] entre os (e) períodos anômalos de (azul) máximo e (vermelho) **218**

mínimo transporte de volume da AABW na Seção 1 do Setor Mar de Weddell. As linhas pretas em (e) marcam os períodos máximos e mínimos utilizados para elaboração dos mapas de composições. **220**

**Figura VII-15.** Assim como a legenda da Fig. VII-14, sendo que para a Seção 13 do Setor Mar de Ross. **221**

**Figura VII-16.** Esquema dos impactos das condições dos eventos dos períodos de La Niña atuando sobre a circulação oceânica e as consequências sobre a exportação da AABW do oceano Austral durante longo período de atuação da forçante extrapolar. A situação oposta ocorre em eventos de El Niño. SIC = concentração de gelo marinho, SIT = espessura do gelo marinho. Os círculos em branco marcam os giros ciclônicos de Weddell e Ross. A seta preta marca o deslocamento da Corrente circumpolar Antártica (ACC). **223**

**Figura VII-17.** Assim como a legenda da Fig. VII-14, sendo que para a Seção 10 do Setor Oceano Pacífico Oeste. **224**

**Figura VII-18.** Assim como a legenda da Fig. VII-14, sendo que para a Seção I do Setor Mar de Weddell. **226**

**Figura VII-19.** Índice NINO3.4 e relação com a exportação e produção da AABW na região noroeste do Setor Mar de Weddell. As linhas pretas marcam o período da simulação. A linha tracejada marrom escura (clara) marca o início de períodos de exportação máxima (mínima). A linha tracejada cinza (preta) marca o início de períodos de produção máxima (mínima). As setas ascendente (descendente) marcam a tendência do índice NINO3.4 durante o início dos períodos de produção mínima (máxima) da AABW. A marcação em cinza delimita o período anômalo de produção da AABW por volta do ano 2000. **227**

**Figura VII-20.** Índices (linha laranja) SAM e (linha verde) NINO3.4 sobre as séries temporais de anomalias de produção e exportação da AABW, respectivamente, (painel superior) na Seção I e (painel inferior) e na Seção 1 do Setor Mar de Weddell. **229**

**Figura VII-21.** Assim como a legenda da Fig. VII-14, sendo que para a Seção 3 do Setor Mar de Weddell. **231**

**Figura VII-22.** Assim como a legenda da Fig. VII-14, sendo que para a Seção 14 do Setor Mar de Ross. **232**

**Figura VII-23.** Anomalias de densidade neutra [ $\text{kg m}^{-3}$ ],  $T_{\text{TW}}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ],  $S_{\text{TW}}$  e velocidade [ $\text{cm s}^{-1}$ ] da camada profunda da Seção 1 do Setor Mar de Weddell. **233**

**Figura VII-24.** Anomalias de densidade neutra [ $\text{kg m}^{-3}$ ],  $T_{\text{TW}}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ],  $S_{\text{TW}}$  e velocidade [ $\text{cm s}^{-1}$ ] da camada profunda da Seção 13 do Setor Mar de Ross. **235**

**Figura VII-25.** Anomalias de densidade neutra [ $\text{kg m}^{-3}$ ],  $T_{\text{TW}}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ],  $S_{\text{TW}}$  e velocidade [ $\text{cm s}^{-1}$ ] da camada profunda da Seção I do Setor Mar de Weddell. **236**

## Lista de Tabelas

**Tabela III-I.** Nomenclatura e posição das seções hidrográficas transversais às margens continentais selecionadas para cada setor do oceano Austral. **52**

**Tabela III-II.** Nomenclatura e posição das seções hidrográficas paralelas à isóbata de 1000 m selecionadas nas margens continentais de cada setor do oceano Austral. **54**

**Tabela III-III.** Percentual de dados negativos (N) nas séries do transporte de volume da camada de fundo para cada seção hidrográfica e para cada setor do oceano Austral. O número total de dados de cada seção é igual a 204 (*i.e.* médias mensais para os 17 anos simulados). **60**

**Tabela IV-IV.** Extensão total das zonas oceânicas das seções de exportação (*i.e.* 1-20) e produção (*i.e.* I-VII) simuladas pelo modelo OCCAM 1/12° e distância entre as estações da grade do modelo ao longo da seção. **77**

**Tabela V-I.** Médias mensais ( $\pm$  desvio-padrão mensal) do transporte de volume cumulativo [Sv] de toda a coluna d'água perpendicular às seções de exportação e considerando todo o período da simulação do OCCAM utilizada. Valores positivos indicam sentido anti-horário (para oeste). Os valores destacados em vermelho (azul) marcam os meses de transporte máximo (mínimo) de cada seção. **124**

**Tabela V-V.** Médias mensais ( $\pm$  desvio-padrão mensal) do transporte de volume cumulativo [Sv] da água profunda perpendicular às seções de exportação e considerando todo o período da simulação do OCCAM utilizada. Valores positivos indicam sentido anti-horário (para norte/oeste) e vice-versa. Os valores destacados em vermelho (azul) marcam os meses de transporte máximo (mínimo) de cada seção. **129**

## Lista de Acrônimos, Abreviações e Símbolos

### A

**AABW** – Água de Fundo Antártica  
(*Antarctic Bottom Water*)

**AAIW** – Água Intermediária Antártica  
(*Antarctic Intermediate Water*)

**AASW** – Água Superficial Antártica  
(*Antarctic Surface Water*)

**ACC** – Corrente Circumpolar Antártica  
(*Antarctic Circumpolar Current*)

**ACoC** – Corrente Costeira Antártica  
(*Antarctic Coastal Current*)

**ACW** – Onda Circumpolar Antártica  
(*Antarctic Circumpolar Wave*)

**ADCP** – Perfilador acústico de corrente  
(*Acoustic Doppler Current Profiler*)

**ADELIE** – Projeto *Antarctic Drift Experiment Link to Isobaths and Ecosystems*

**ADLBW** – Água de Fundo de Adelie  
(*Adelie Land Bottom Water*)

**API** – Ano Polar Internacional  
(*International Polar Year*)

**AR4** – Quarto relatório do IPCC

**ASF** – Frente de Talude Antártico  
(*Antarctic Slope Front*)

**AZ** – Zona Antártica (*Antarctic Zone*)

### B

**B&A** – Mares de Bellingshausen e Amundsen

**BW** – Água do Estreito de Bransfield  
(*Bransfield Water*)

### C

**C** – Cordilheira

**CDW** – Água Profunda Circumpolar  
(*Circumpolar Deep Water*)

**CRMSD** – Diferença centrada do erro médio quadrático

**CTD** – Sistema Condutividade-Temperatura-Profundidade  
(*Conductivity-Temperature-Depth*)

### D

**DBDB5** – Banco de dados batimétricos *Digital Bathymetric Data Base 5-minute*

**DDS** – mar Dumont D'Urville

### E

**ENSO** – El Niño-Oscilação Sul (*El Niño-Southern Oscillation*)

### F

**FT** – Transformada de Fourier

**F95** – Fahrbach *et al.* [1995]

**F01** – Fahrbach *et al.* [2001]

## G

**GEBCO** – Carta Batimétrica Geral dos oceanos (*General Bathymetric Chart of the Oceans*)

**GOAL** – Grupo de Oceanografia de Altas Latitudes

## H

**HSSW** – Água de Plataforma de Alta Salinidade (*High Salinity Shelf Water*)

## I

**iAnZone** – *International Antarctic Zone*

**IHO** – Organização Hidrográfica Internacional (*International Hydrographic Organization*)

**ILD** – Profundidade da camada intermediária (*Intermediate layer depth*)

**IOC** – Comissão Oceanográfica Internacional (*International Oceanographic Commission*)

**IPCC** – Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel of Climate Changes*)

**ISW** – Água de Plataforma de Gelo (*Ice Shelf Water*)

## K

**KPP** – Parametrização da mistura vertical (*K-Profile Parameterization*)

## L

**LADCP** – Perfiladores de corrente acústico (*Lowered Acoustic Doppler Current Profiler*)

**LCDW** – Água Profunda Circumpolar Inferior (*Lower Circumpolar Deep Water*)

**LIS**– Plataforma de Gelo Larsen

**LSSW** – Água de Plataforma de Baixa Salinidade (*Low Salinity Shelf Water*)

## M

**MCDW** – Água Profunda Circumpolar Modificada (*Modified Circumpolar Deep Water*)

**M&G95** – Muench & Gordon [1995]

**MOC** – Célula global de revolvimento meridional (*Meridional Overturning Circulation*)

**MSW** – Água de Plataforma Modificada (*Modified Shelf Water*)

**MWDW**– Água Profunda Cálida Modificada (*Modified Warm Deep Water*)

## N

**NADW** – Água Profunda do Atlântico Norte (*North Atlantic Deep Water*)

**NOCS** – Centro Oceanográfico Nacional de Southampton, Reino Unido (*National Oceanography Center, Southampton*)

**NODC** – Banco de dados históricos do *National Oceanographic Data Center*

**NSIDC**– Banco de dados de gelo e neve (*National Snow and Ice Data Center*)

## O

**OCCAM** – Modelo Avançado do Clima e da Circulação Oceânica (*Ocean Circulation and Climate Advanced Model*)

**ODV** – Programa *Ocean Data View*

## P

**P** – Plataforma

**PA** – Península Antártica

**PB** – Baía Prydz

**PBBW** – Água de Fundo da Baía Prydz

**PF** – Frente Polar (*Polar Front*)

**PFJ** – Jato Polar

**PFZ** – Zona da Frente Polar (*Polar Front Zone*)

**PET** – Depressão Princesa Elizabeth (*Princess Elizabeth Trough*)

## R

**RSBW** – Água de Fundo do Mar de Ross (*Ross Sea Bottom Water*)

**RSP** – Regime Subpolar (*Subpolar Regime*)

## S

**S** – Salinidade

**SACCF** – Frente Sul da ACC (*South ACC Front*)

**SAF** – Frente Subantártica (*Subantarctic Front*)

**SASSI** – Projeto “*Synoptic Antarctic Shelf-Slope Interactions*”

**SAM**– Modo Anular Sul (*Southern Annular Mode*)

**SAO**– Oscilação Semianual (*Semi-Annual Oscillation*)

**SAZ** – Zona Subantártica (*Subantarctic Zone*)

**SBDY**– Frente do Limite Sul da ACC (*Southern Boundary Front*)

**SEP** – Bacia Sudeste Pacífico (*Southeastern Pacific Basin*)

**SIC** – Concentração de gelo marinho (*Sea ice concentration*)

**SIT** – Espessura do gelo marinho (*Sea ice thickness*)

**SLP** – Pressão ao nível do mar (*sea level pressure*)

**SML** – Camada de mistura superficial (*Surface mixed layer*)

**SOA** – Banco de dados do projeto WOCE (*Southern Ocean Atlas*)

**SOS-Climate** – Projeto “*Southern Ocean Studies for Understanding Global-Climate Issues*”

**SR4**– Linha de repetição SR4 do programa WOCE

**SSM/I** – *Special Sensor Microwave/Imager*

**STF** – Frente Subtropical (*Subtropical Front*)

**STJ** – Jato subtropical

**SST** – Temperatura Superficial oceânica

**S<sub>TW</sub>** – Salinidade ponderada pelo Transporte de Volume (*Transport-weighted mean salinity*)

**SW** – Água de Plataforma (*Shelf Waters*)

**SWP** – Bacia Sudoeste Pacífico (*Southwestern Pacific Basin*)

## T

**T<sub>TW</sub>** – Temperatura ponderada pelo Transporte de Volume (*Transport-weighted mean temperature*)

**TS** - diagrama temperatura-salinidade, considerando a T<sub>TW</sub> e a S<sub>TW</sub>

## U

**UCDW** – Água Profunda Circumpolar Superior (*Upper Circumpolar Deep Water*)

## W

**WDW** – Água Profunda Cálida (*Warm Deep Water*)

**WF** – Frente de Weddell (*Weddell Front*)

**WOCE** – Experimento de Circulação dos Oceanos Globais (*World Ocean Circulation Experiment*)

**WOD05** – Banco de dados do *World Ocean Database 2005*

**WSDW** – Água Profunda do Mar de Weddell (*Weddell Sea Deep Water*)

**WSBW** – Água de Fundo do Mar de Weddell (*Weddell Sea Bottom Water*)

**WW** – Água de Inverno (*Winter Water*)

## DEMAIS ACRÔNIMOS, ABREVIÇÕES E SÍMBOLOS

$\theta$  – Temperatura Potencial

$\theta S$  – Diagrama Temperatura-Salinidade

$\theta SO$  – Diagrama Temperatura-Salinidade-Oxigênio dissolvido

## Resumo

A interação entre a variabilidade das águas-fonte (águas de plataforma e em níveis intermediários) da Água de Fundo Antártica (AABW) e a produção e exportação destas águas profundas nas margens continentais Antárticas foi investigada utilizando-se a simulação do modelo geral de circulação oceânica OCCAM 1/12°. A variabilidade sazonal e interanual dos transportes de volume da AABW foram investigadas para os setores regionais do oceano Austral. A produção e exportação da AABW variam, principalmente, em períodos de escalas interanuais com períodos dominantes de 2-4 anos. As variedades regionais da AABW simuladas pelo modelo foram identificadas, sendo suas taxas de exportação para os oceanos globais em concordância com estudos observacionais. O mar de Weddell é a principal área exportadora ao redor do continente, contribuindo com 63% da AABW para os oceanos globais. Os Setores Oceano Índico e Oceano Pacífico Oeste contribuem juntos com 28%, enquanto o Setor Mar de Ross contribui apenas com 9% da AABW exportada da região Antártica. As frentes de talude possuem um papel importante para a exportação lateral da AABW ao redor das margens continentais. As alterações sofridas pelas águas-fonte, *e.g.* devido a longos períodos de dessalinização ou aquecimento, afetam a produção e a exportação da AABW significativamente. Maiores volumes de exportação de AABW a partir dos mares de Weddell e Ross são associados com as condições climáticas de eventos de La Niña, marcados pela presença do Dipolo Antártico no campo de gelo marinho, pela intensificação da Corrente Circumpolar Antártica e pela desaceleração dos giros ciclônicos associados aos mares de Ross e Weddell. Períodos positivos do índice do Modo Anular Sul (SAM) atuam por modular a intensidade da produção e exportação da AABW. Durante períodos de máxima exportação da AABW a densidade das águas profundas exportadas é, em geral, mais densa que a média, mostrando o link entre os processos costeiros de plataforma com o oceano profundo.

**Palavras-chave:** AABW, margens Antárticas, Oceano Austral, La Niña, Dipolo Antártico, SAM.

## Abstract

This study focuses on the connections between the variability of Antarctic Bottom Water (AABW) source waters (shelf and intermediate waters) and deep water ( $\sigma^{\theta} > 28.26 \text{ kg m}^{-3}$ ) production and export around the Antarctic coastal margins. To achieve this main goal, we have used the  $1/12^{\circ}$  simulation of the OCCAM global ocean general circulation model, which was also used to estimate the seasonal and interannual variability of volume transports around the Antarctic continental margins. The production and export of AABW vary, mainly, at interannual and 2-4 years periods of variability. Regional AABW varieties simulated by the model were defined and investigated. Their export rates to the global oceans were in agreement with observational studies. The Weddell Sea is the main export area around the continent, exporting 63% of AABW to the global oceans. The Indian and Pacific Sectors of the Southern Ocean export together 28%, while the Ross Sea Sector contributes only with 9% of AABW. Moreover, our analysis reveals that the slope fronts have an important function to the export of AABW around the continent. AABW source waters changing due to long term periods of freshening and warming, significantly, affect the production and export of AABW from the regional seas. This study unveils that the large volume of AABW export from the Weddell and Ross Seas is associated with three factors: (i) La Niña conditions, marked by the presence of the Antarctic Dipole, (ii) the intensification of the Antarctic Circumpolar Current (ACC), and (iii) the weakening of the cyclonic Weddell and Ross gyres. A positive Southern Annular Mode (SAM) index acts to model the intensity of the AABW production and outflow. During periods of large volume of AABW export the deep waters are normally denser than the general mean, highlighting the links between the coastal / shelf processes and the deep ocean.

**Keywords:** AABW, Antarctic margins, Southern Ocean, La Niña, Antarctic Dipole, SAM.

## Prefácio

**D**urante a execução do IV Ano Polar Internacional (API<sup>1</sup>; 2007-2008), a comunidade científica internacional dedicou especial atenção ao estudo das regiões polares do globo. Diversos países contribuíram para a elaboração e execução de projetos conjuntos durante o API. O projeto denominado *Synoptic Antarctic Shelf-Slope Interactions Study* (SASSI<sup>2</sup>) ficou responsável pelos estudos dos processos físicos e interações existentes nas zonas de transição das margens do continente Antártico, ou seja, a região de quebra entre a plataforma e o talude continental. O projeto SASSI conduziu cruzeiros oceanográficos de estudos multidisciplinares ao longo das margens Antárticas com a contribuição de diversos países<sup>3</sup>, onde foram realizadas várias seções hidrográficas perpendiculares à zona de quebra de plataforma-talude continental. Além disso, os componentes do SASSI promoveram a colocação de fundeios oceanográficos em áreas específicas, propiciando uma amostragem *quasi* circumpolar e sinóptica.

---

<sup>1</sup> <http://www.ipy.org/>

<sup>2</sup> <http://sassi.tamu.edu/>

<sup>3</sup> Alemanha, Austrália, Brasil, China, Estados Unidos da América, Espanha, França, Itália, Japão, Noruega, Reino Unido, Rússia.

A contribuição brasileira para o projeto SASSI foi realizada pelo Grupo de Oceanografia de Altas Latitudes (GOAL<sup>4</sup>) através do projeto denominado *Southern Ocean Studies for understanding Global-Climatic Issues* (SOS-CLIMATE<sup>5</sup>). Três cruzeiros oceanográficos foram realizados na região do entorno da Península Antártica entre os meses de fevereiro e março de 2008, 2009 e 2010. Em 2009, duas atividades inéditas em águas Antárticas marcaram a oceanografia polar brasileira: (i) o lançamento de três fundeios no Estreito de Bransfield e (ii) a colocação de bóias marcadoras da deriva de icebergs. Além disso, estudos de modelagem oceânica e climática complementaram os esforços observacionais do GOAL, fornecendo resultados úteis tanto para a oceanografia observacional como para a modelagem oceânica e climática.

Em síntese, o estudo a seguir abordará os processos físicos ocasionados devido à interação entre os sistemas do oceano, da atmosfera e da criosfera, e presentes na zona de transição entre a plataforma continental e o talude continental ao redor das margens continentais Antárticas. Uma visão circumpolar do oceano Austral é necessária para uma melhor caracterização regional das relações e processos existentes entre as zonas oceânicas costeiras e profundas. Neste estudo, grande relevância é dada ao entendimento da variabilidade da formação e exportação de águas profundas e de fundo. Isto se deve ao papel principal destas águas na regulação do clima global, desempenhado através da célula profunda de circulação de revolvimento meridional.

---

<sup>4</sup> <http://www.goal.furg.br/>

<sup>5</sup> <http://www.goal.ocfis.furg.br/sos.php>

## Hipótese

**A**s alterações observadas nas propriedades das águas-fonte [e.g. [Jacobs et al. 2002](#), [Robertson et al. 2002](#), [Rintoul 2007](#), [Johnson 2009](#)] estão propagando seus sinais de variabilidade temporal para as águas profundas e de fundo do oceano adjacente, influenciando a produção e exportação da Água de Fundo Antártica durante as últimas décadas.

Com base na hipótese acima algumas questões relativas a produção e exportação da Água de Fundo Antártica necessitam de elucidação e serão discutidas total ou parcialmente no decorrer deste estudo: (i) Ocorre de forma circumpolar? (ii) Em que escalas temporais? (iii) Há conexão com o clima extrapolar? De modo mais amplo: como a variabilidade da dinâmica oceânica e das propriedades hidrográficas nas margens continentais Antárticas atua e influencia a formação e exportação das águas profundas e densas do oceano Austral?

## Capítulo I: Introdução

A execução do API voltou a atenção do mundo para as mudanças que estão sendo relatadas nas regiões polares do globo (e.g. aumento da temperatura atmosférica, aquecimento oceânico, alterações na formação de gelo marinho e perda de massa das geleiras), priorizando os estudos científicos no Ártico e na Antártica [e.g. [Mayewski et al. 2009](#), [Walsh 2009](#)]. Embora diversos estudos já tenham sido realizados nestas áreas e o recente e premiado relatório do *Intergovernmental Panel of Climate Changes* (IPCC) tenha relatado forte influência humana nas atuais e futuras alterações do clima, pouco ainda se sabe sobre as questões ligadas à variabilidade natural do sistema climático. Com isso, estudos quantitativos sobre os oceanos e, principalmente, aqueles relacionados às conexões existentes entre o sistema acoplado oceano, atmosfera e criosfera ainda necessitam de forte atenção por parte da comunidade científica internacional. Assim, as regiões polares do globo tornam-se elementos-chave para o atual entendimento das questões ligadas à variabilidade climática e às alterações globais.

O quarto relatório de validação (AR4) do IPCC [IPCC 2007] mostra que a atividade humana, através do lançamento de gases estufa na atmosfera, é uma das principais causas do aquecimento atmosférico global. Entretanto, sabe-se que períodos de variabilidade temporal que alternam entre fases de aquecimento e resfriamento (e.g. da temperatura atmosférica) podem ocorrer naturalmente em séries temporais de longo prazo (e.g. dezenas e/ou centenas de anos), que apresentem ou não uma tendência positiva. Isto se deve à variabilidade natural das forçantes do sistema climático, como por exemplo, a variabilidade associada à intensidade da radiação, explosões solares e erupções vulcânicas [Fyfe 2006]. Recentemente, Easterling & Wehner [2009] corroboraram as conclusões do AR4 a este respeito. Os autores mostraram ser naturalmente possível, que a variabilidade do sistema climático real produza longo período com tendências de resfriamento na temperatura atmosférica superficial, ou mesmo, indique a ausência de uma tendência significativa embutida em uma escala de longo período com tendência de aquecimento. Isto quer dizer que: em escalas temporais que podem variar entre interanuais e interdecadais, as mudanças na tendência das temperaturas superficiais da atmosfera, que são naturalmente induzidas por causas antrópicas, podem sim se sobrepor ao recente aquecimento reportado e prevalecer durante décadas.

Neste sentido e com o propósito de estimar possíveis mudanças futuras, Lean & Rind [2009] mostraram – decompondo a temperatura superficial atmosférica em componentes associadas ao El Niño-Oscilação Sul (ENSO; ver Capítulo VII para detalhes), atividades vulcânicas e solar, e influência antropogênica – que entre os anos de 2009 e 2014 a temperatura superficial global irá aumentar  $\sim 0.15 \pm 0.03$  °C (*i.e.* cerca de 50% superior às projeções do

IPCC). Para tal, consideram as projeções em ascensão devido às influências antropogênicas e às alterações na irradiância solar. Entretanto, devido ao declínio da atividade solar nos anos seguintes, os autores mostram que a temperatura em 2019 será apenas  $0.03 \pm 0.01$  °C superior que em 2014. Embora sejam apenas projeções, o estudo de [Lean & Rind \[2009\]](#) destaca que o clima irá continuar respondendo num futuro próximo aos mesmos fatores que influenciaram o mesmo num passado recente, e a resposta para estas mudanças poderá continuar de forma linear nas próximas décadas. Seguindo estas projeções, o primeiro sinal destas mudanças provavelmente ocorrerá em climas regionais e em regiões sensíveis a pequenas variações climáticas, onde se inclui as regiões polares do globo.

De fato, rápidas mudanças em escalas locais e regionais [[Vaughan et al. 2001](#), [2003](#), [Jacobs 2006](#), [Turner et al. 2009](#)] na temperatura atmosférica e oceânica [[Gille 2002](#), [Robertson et al. 2002](#), [Aoki et al. 2003](#), [Fahrbach et al. 2004](#), [Fyfe 2006](#)], no padrão do gelo marinho [[Fox & Cooper 1998](#), [Zwally et al. 2002](#)], no comportamento de glaciares e das plataformas de gelo [[Vaughan & Doake 1996](#), [Smith et al. 1999](#), [Scambos et al. 2003](#)] e, conseqüentemente, na salinidade e temperatura das águas profundas [[Aoki et al. 2005a](#), [Garcia & Mata 2005](#), [Rintoul 2007](#), [Johnson et al. 2008a](#), [Johnson 2009](#)] têm sido reportadas para a região Antártica – foco deste estudo. Estas alterações causam impacto regional a curto e longo prazo na biologia de espécies (e.g. plâncton marinho, aves e mamíferos marinhos [[Montes-Hugo 2009](#)]), além de impacto global a médio e longo prazo na circulação oceânica e no clima [[Johnson et al. 2008b](#)].

Sendo assim, uma melhor compreensão das mudanças locais e regionais reportadas para o oceano, atmosfera e criosfera ao redor do continente Antártico se torna importante e destaca-se, principalmente, devido ao significativo papel que as áreas polares (*i.e.* Ártico e Antártica) desempenham na formação de águas profundas e densas [Mantyla & Reid 1983, Reid 1994, Orsi *et al.* 1999]. Portanto, alterações nas taxas de formação e exportação destas águas irão influenciar conseqüentemente, a célula global de revolvimento meridional (*global ocean meridional overturning circulation*; MOC<sup>1</sup>). Esta é a principal responsável pelo transporte oceânico de massa e balanço de calor e sal entre as altas e baixas latitudes [Rahmstorf 2006, Lumpkin & Speer 2007], necessário para a regulação do clima global.

Na Antártica, o processo de formação das águas densas e profundas ocorre ao redor das margens continentais (*i.e.* região de transição ou zona de quebra entre a plataforma continental e o talude continental), muitas vezes designadas como os limites laterais dos oceanos. O processo de formação da Água de Fundo Antártica (AABW) é resultado da mistura de diferentes águas-fonte<sup>2</sup> [Gill 1973, Carmack & Foster 1975a, Foldvik *et al.* 1985], envolvendo principalmente: (i) a formação e derretimento do gelo marinho, (ii) a liberação de salmoura (*brine rejection*)<sup>3</sup> para as camadas de água inferiores, (iii) abertura e fechamento de polínias (*polynyas*)<sup>4</sup> costeiras, (iv) derretimento basal das

---

<sup>1</sup> O termo MOC refere-se aos termos circulação termohalina (*thermohaline circulation*) ou cinturão de transporte global (*global conveyor belt*), ambos amplamente utilizados pela comunidade científica. Entretanto, atualmente é uma forma mais completa de descrever o padrão global da circulação oceânica, pois considera também a parte mecânica da circulação dirigida pelo vento e não somente a circulação gerada por gradientes de densidade devido aos fluxos de calor e sal [Lumpkin & Speer 2007].

<sup>2</sup> As águas-fonte (*source water types*) são águas precursoras das massas d'água, que possuem propriedades físicas e químicas específicas presentes em áreas de formação de massas d'água.

<sup>3</sup> Durante o processo de formação do gelo marinho, à medida que as águas oceânicas começam a congelar, os sais dissolvidos nas mesmas são liberados para as camadas subjacentes.

<sup>4</sup> Polínias são áreas de águas abertas circundadas por gelo marinho. Ver Capítulo II para detalhes.

plataformas de gelo permanentes (*ice shelves*), (v) processos de convecção profunda e (vi) injeção de águas provenientes de camadas com profundidades inferiores ou advectadas localmente (*entrainment waters*<sup>5</sup>). Entretanto, o local em que ocorre a ventilação<sup>6</sup> das águas profundas em determinados períodos pode não corresponder exatamente à área de formação destas águas. Sendo assim, torna-se necessário entender os transportes laterais ao longo do talude continental e a ventilação direta do oceano profundo, através do fluxo descendente pelo talude continental [Hellmer & Beckmann 2001, Beckmann *unpublished*]. Neste sentido, os aspectos relativos à localização, taxas e trajetórias de espalhamento destas águas nos diversos mares regionais da Antártica tornam-se relevantes para o entendimento da contribuição do oceano Austral para a MOC.

O oceano Austral<sup>7</sup> (*i.e.* área oceânica definida neste trabalho entre latitudes superiores a 60°S e o continente Antártico) é uma área de difícil acesso durante os meses de inverno do Hemisfério Sul devido à grande extensão e densidade do gelo marinho formado (ver Capítulo II para detalhes), sendo o acesso somente possível através de navios quebra-gelo, o que torna as amostragens históricas fortemente tendenciosas para os períodos de verão austral. Da mesma forma, uma amostragem sinóptica de todo o oceano Austral é praticamente impossível devido às dificuldades em logística e operação. Por outro lado, é somente a partir dos dados observados que podemos validar as saídas de modelos climáticos e oceânicos, que resolvem de certo modo, as

---

<sup>5</sup> Termo que se refere à intrusão de águas de determinada camada de profundidade em outras, geralmente mais superficiais. Estas podem ser provenientes de camadas profundas da coluna d'água ou de outras camadas advectadas localmente.

<sup>6</sup> Termo que se refere à injeção de águas, que recentemente tiveram contato com a atmosfera, em camadas mais profundas do oceano.

<sup>7</sup> Ver Capítulo II para detalhes sobre a definição de oceano Austral.

questões de tendência sazonal e de sinopticidade dos dados. Além disso, a representação e/ou parametrização de algumas características e processos envolvendo o sistema acoplado oceano, atmosfera e criosfera (e.g. tipo e comprimento das forçantes atmosféricas, presença de plataformas de gelo permanentes, peculiaridades da topografia e linhas de costa, etc.) em modelos oceânicos ainda encontra-se em desenvolvimento e discussão pela comunidade científica [Beckmann unpublished]. Como exemplo, Kerr et al. [2009a] mostram que as massas de água profundas na região do mar de Weddell (ver Fig. II-1 – Cap. II) não estão sendo bem representadas no modelo oceânico analisado devido à ausência de representação dos processos que envolvem a criosfera (e.g. representação das plataformas de gelo e de seus fluxos associados). Diversos trabalhos e grupos de pesquisas estão atualmente tentando melhorar e solucionar estas questões [e.g. Losch et al. 2010]. Neste sentido, a utilização conjunta de saídas de modelos oceânicos e de dados reais observados torna-se imperativa nos estudos atuais. Sendo assim, este trabalho estuda as margens continentais Antárticas a partir de uma investigação sistemática das diferenças regionais e dos mecanismos físicos envolvidos na formação e exportação das águas profundas e densas, utilizando-se das saídas da simulação de um modelo de alta resolução espaço-temporal.

Na seção a seguir são indicados os objetivos propostos para o desenvolvimento deste trabalho. No capítulo seguinte (*Capítulo II – Oceano Austral*) é apresentada a área de estudo através de uma detalhada revisão bibliográfica. Além disso, é apresentada a divisão dos setores oceânicos do oceano Austral utilizados no decorrer do presente estudo. O Capítulo III (*Dados e Métodos*) abordará sobre os dados observados históricos, o modelo oceânico

escolhido e a simulação utilizada, além das metodologias e definições aplicadas no decorrer do estudo. Este é seguido pelo Capítulo IV (*Representação do modelo oceânico global OCCAM 1/12º*), que discute e valida a representação hidrográfica do oceano Austral obtida pela simulação do modelo oceânico utilizado. O Capítulo V (*Exportação e produção das águas profundas*) apresenta e discute os resultados referentes ao transporte de volume e as taxas de produção da AABW, destacando-se os seus principais aspectos de variabilidade anual e interanual. O Capítulo VI (*Variedades regionais da AABW e fluxos de exportação*) descreve as variedades regionais da AABW e indica o percentual de contribuição de cada variedade para o oceano global. Os resultados e discussões sobre as interações existentes entre a variabilidade temporal das águas-fonte (presentes em regiões costeiras de plataforma e profundidades intermediárias) e as taxas de exportação da AABW (representando as zonas profundas do oceano) são apresentados no Capítulo VII (*Variabilidade climática e os impactos na exportação da AABW*). O Capítulo VIII (*Conclusões*) apresenta: (i) um sumário do estudo, onde se destaca as principais conclusões encontradas, (ii) as perspectivas futuras para continuidade do estudo e (iii) as questões que ainda necessitam de atenção por parte da comunidade científica.

### **1.1. Objetivos**

Este estudo, com base na hipótese proposta, tem como meta compreender e explicar as questões específicas abaixo detalhadas. Os objetivos deste trabalho encontram-se no âmbito dos principais objetivos propostos pelos projetos SASSI e SOS-CLIMATE.

Objetivo geral:

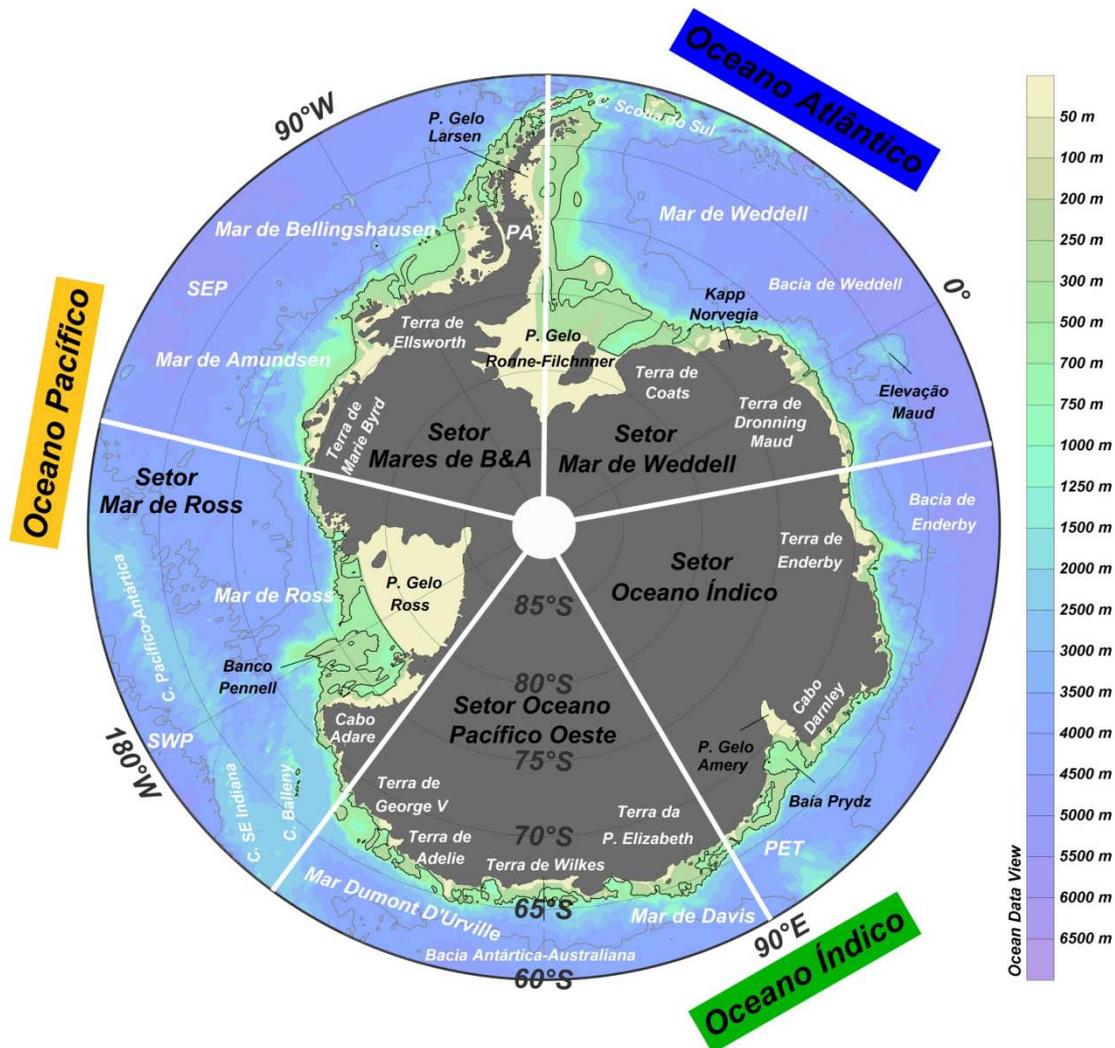
Investigar a formação e exportação das águas densas profundas nas margens Antárticas – região de conexão entre as zonas costeiras (*i.e.* plataforma continental e quebra de talude continental) e o oceano profundo.

Objetivos específicos:

- (i) Investigar como o modelo oceânico global de alta resolução espacial utilizado está representando as margens Antárticas;
- (ii) Investigar as diferenças regionais no oceano Austral nas taxas de formação e exportação das águas profundas;
- (iii) Estimar o transporte de águas densas profundas relacionadas à dinâmica das frentes de talude ao redor do continente Antártico;
- (iv) Investigar a transferência da variabilidade entre as águas-fonte de plataforma e em níveis de profundidade intermediária com as águas profundas e de fundo que formarão a AABW;
- (v) Elucidar sobre os principais modos climáticos que atuam na variabilidade da exportação das águas profundas e de fundo;
- (vi) Elucidar sobre os principais processos oceânicos que necessitam de parametrização e/ou uma melhor representação em futuras simulações oceânicas, de forma a aperfeiçoar a representação do oceano Austral e a formação de águas profundas e de fundo.

## Capítulo II: O oceano Austral

**A**o redor do continente Antártico e acima da Frente Subtropical (STF) encontra-se o oceano Austral, formado por diversos mares regionais conectados entre si pelo sistema da Corrente Circumpolar Antártica (ACC). Devido à ausência de barreiras geográficas circundando o continente ao norte, o oceano Austral é conectado livremente com todas as demais bacias oceânicas do globo. Desta forma, possui extrema importância no transporte de massa e organismos planctônicos marinhos, e nos fluxos de calor e sal entre os oceanos globais. A seguir é apresentada uma sucinta descrição de cada setor do oceano Austral considerado neste estudo (Fig. II-1). Destaca-se os aspectos regionais da hidrografia, circulação oceânica, concentração do gelo marinho, e as questões de variabilidade espaço-temporal intrínseca de cada setor. Devido às peculiaridades dos regimes costeiros e oceânicos, estes se referem, respectivamente, às zonas de plataforma e talude continental e ao oceano profundo com batimetria superior a 3000 m.



**Figura II-1.** Setores do oceano Austral (marcados pelas linhas brancas) delimitados neste estudo e seus principais mares regionais e regiões continentais e oceânicas. A batimetria [m] é apresentada em escala de cores. As linhas de cor preta e cinza referem-se, respectivamente, as isóbatas de 500 m e 4000 m. PA = Península Antártica, SWP = Bacia Sudoeste Pacífico, SEP = Bacia Sudeste Pacífico, PET = Depressão Princesa Elizabeth, P = Plataforma, C = Cordilheira.

## 2.1. Setores do oceano Austral

A Antártica é rodeada por três grandes bacias profundas: (i) bacia Weddell-Enderby, (ii) bacia Bellingshausen-Amundsen e (iii) bacia Antártica-Australiana. Os setores definidos para o oceano Austral (Fig. II-1) são baseados na subdivisão proposta inicialmente por Zwally *et al.* [2002] e utilizada recentemente por Cavalieri & Parkinson [2008] para caracterização da estrutura e variabilidade do gelo marinho na região, sendo estes: (i) Setor Mar

de Weddell – englobando o mar de Weddell entre 60°W e 20°E, (ii) Setor Oceano Índico – englobando desde a região leste da bacia de Enderby (20°E) até a zona do mar de Davis (90°E), (iii) Setor Oceano Pacífico Oeste – englobando a região do mar Dumont D'Urville entre 90°E e 160°E, (iv) Setor Mar de Ross – englobando a região do mar de Ross entre 160°E e 130°W, e (v) Setor Mares de Bellingshausen e Amundsen (B&A) – englobando a área dos mares de B&A entre 60°W e 130°W e a porção sul da Passagem de Drake próximo à Península Antártica. As principais frentes e correntes oceânicas do oceano Austral são brevemente descritas na subseção a seguir, enquanto que cada um dos setores acima definido é caracterizado hidrográfica e dinamicamente nas seções subsequentes.

## 2.2. Frentes e correntes do oceano Austral

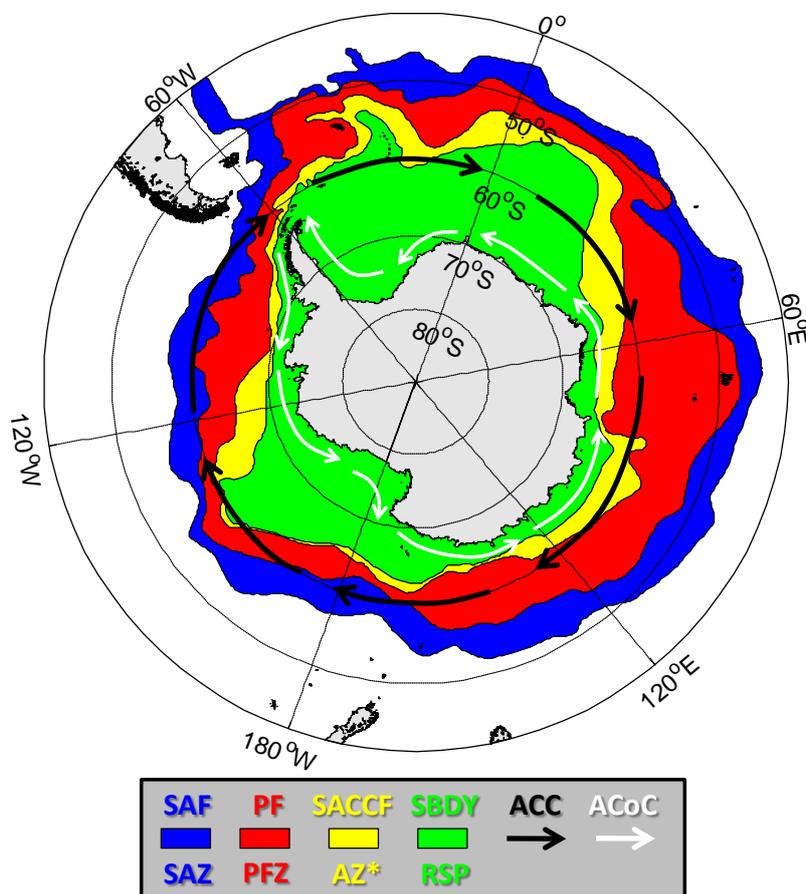
As frentes oceânicas são caracterizadas por acentuados gradientes horizontais das propriedades físico-químicas das águas (e.g. temperatura potencial ( $\theta$ ), salinidade (S), nutrientes, etc.), separando amplas áreas com diferentes massas de água ou diferentes estruturas verticais (estratificação). Estas ocorrem em diferentes escalas espaciais (*i.e.* de metros a milhares de quilômetros) e temporais (*i.e.* dias, persistência sazonal ou anual). A extensão vertical também é variável desde poucos metros até quilômetros. Vários fatores físicos podem formar tipos diversos de frentes, destacando-se: (i) frentes de correntes costeiras, estuarinas ou plumas, (ii) frentes de maré, (iii) frentes de quebra de plataforma e talude continental, (iv) frentes de ressurgência equatorial, costeira e topográfica, (v) frentes de correntes de contorno oeste e leste, (vi) frentes de convergência subtropical, (vi) frentes de margem de gelo

marinho, e (vii) frentes de massas de água [Belkin 2002, Belkin et al. 2009]. Recentemente, estudos sobre a camada limite atmosférica da região da Confluência Brasil-Malvinas (*i.e.* 30°S/45°S e 60°W/50°W) mostram a importância dos gradientes da temperatura superficial do mar para o entendimento dos processos acoplados oceano-atmosfera, sendo que a interação existente é consistente para outras regiões frontais dos oceanos globais [Pezzi et al. 2005, Pezzi et al. 2009].

As águas superficiais do oceano Austral (Fig. II-2) são separadas das águas relativamente quentes e salgadas da circulação subtropical a partir de um sistema de frentes oceânicas [Orsi et al. 1995]. Estas são caracterizadas basicamente por gradientes meridionais das propriedades físicas. Deacon [1937] denominou este limite hidrográfico como Convergência Subtropical, termo este recentemente alterado para Frente Subtropical (STF). A STF é marcada pela transição entre a Água Superficial Subantártica e a Água Superficial Subtropical, cujas características hidrográficas variam de 10°C para 12°C e 34.6 para 35 de salinidade em direção a baixas latitudes por volta de 100 m de profundidade. A STF encontra-se fora dos limites geográficos do oceano Austral (*i.e.* acima de 60°S) estabelecidos neste trabalho, não sendo mais discutida.

Ao sul da STF, uma das principais características dinâmicas do oceano Austral é a presença da ACC (Fig. II-2) dirigida pelos ventos de oeste (*westerlies winds*). Devido à distribuição dos continentes, a ACC é a única conexão existente entre todos os principais oceanos globais. Esta se move de oeste para leste ao redor do continente Antártico interagindo com diferentes massas de água ao longo de sua trajetória. A ACC carrega a Água Profunda

Circumpolar (CDW), massa de água mais volumosa do oceano Austral que se estende desde 200 m até profundidades de cerca de 4000 m em algumas regiões. A CDW é normalmente dividida entre: Água Profunda Circumpolar Superior (UCDW) – caracterizada por baixas concentrações de oxigênio dissolvido e alta concentração de nutrientes; e Água Profunda Circumpolar Inferior (LCDW) – caracterizada por salinidade elevada. A descrição das características físico-químicas da CDW será apresentada separadamente para cada setor.



**Figura II-2.** Principais zonas, correntes oceânicas e frentes do oceano Austral. A posição das frentes é baseada em Orsi *et al.* [1995]. AZ = Zona Antártica, ACC = Corrente Circumpolar Antártica, ACoC = Corrente Costeira Antártica, PF = Frente Polar, PFZ = Zona da Frente Polar, RSP = Região subpolar, SACCf = Frente Sul da ACC, SAF = Frente Sub-Antártica, SAZ = Zona Sub-Antártica, SBDY = Frente do Limite Sul da ACC. \*A AZ inclui também a RSP.

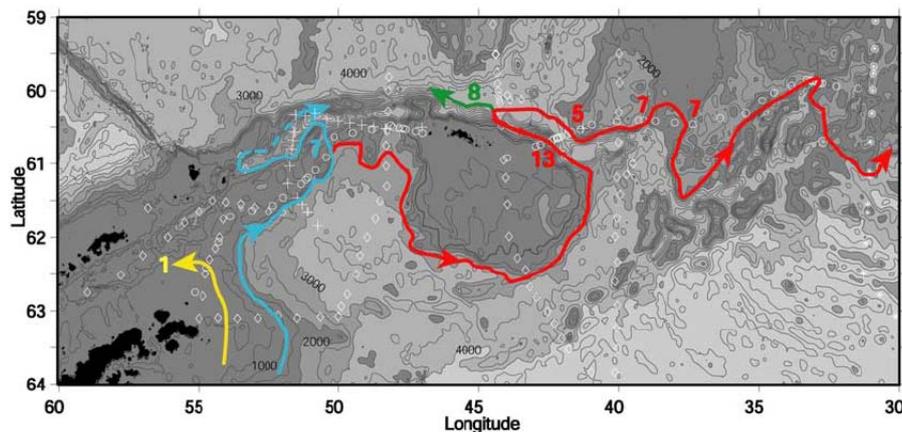
As frentes existentes entre o sistema da ACC e o regime subpolar (*i.e.* toda a região oceânica ao sul da ACC) do oceano Austral foram estudadas e detalhadas por Orsi *et al.* [1995], sendo estas de norte para sul (Fig. II-2): (i) Frente Subantártica (SAF), (ii) Frente Polar (PF), (iii) Frente Sul da ACC (SACCF), e (iv) Frente do Limite Sul da ACC (SBDY). As três primeiras são frentes profundas ocorrendo dentro do sistema da ACC. Estas frentes são caracterizadas por possuir amplos gradientes horizontais das propriedades e pronunciada inclinação das isopícnais em toda a coluna de água profunda, sendo encontradas normalmente em regiões com profundidade superior a 3500 m. Assim como a STF, a SAF também encontra-se fora dos limites do oceano Austral estabelecidos neste estudo. As principais zonas delimitadas pelas frentes oceânicas são: (i) Zona Subantártica (SAZ) entre a SAF e PF, (ii) Zona da Frente Polar (PFZ) entre a PF e SACCF e (iii) Zona Antártica (AZ) entre a SACCF e o continente. Dentro da AZ pode-se ainda distinguir entre o regime subpolar (RSP), região ao sul da SBDY, e a zona continental marcada pela circulação e transporte associado à Corrente Costeira Antártica (ACoC) e às frentes de talude (*slope fronts*).

Partindo do pólo, a SBDY é determinada como o limite mais ao sul do fluxo para leste da ACC, sendo esta definida como a extensão mais ao sul da UCDW caracterizada por valores mínimos de oxigênio,  $\theta > 1.5^{\circ}\text{C}$  e  $S > 34.5$ . Sendo assim, a ausência das características da UCDW constitui o limite da SBDY, marcando a extensão sul das águas encontradas unicamente no sistema da ACC e ausente no RSP. Além disso, a SBDY coincide com as observações dos limites norte dos giros ciclônicos dos mares de Weddell e Ross [Orsi *et al.* 1995]. A SACCF é definida como a frente mais ao sul da ACC

onde ainda é distinguível a presença da UCDW com  $\theta > 1.8^{\circ}\text{C}$ . Esta é a única frente que não é separada por massas de água superficiais distintas. A posição da PF é marcada pelo forte gradiente de temperatura mínima da Água Superficial Antártica (AASW), que diminui em direção ao norte. A posição da SAF é indicada pelo rápido afundamento em direção ao norte do núcleo mínimo de salinidade associado à Água Intermediária Antártica (AAIW), desde a superfície na PFZ ( $S < 34$ ) até profundidades maiores que 400 m na SAZ ( $S < 34.30$ ).

É no regime subpolar (Fig. II-2), que se observa a presença da ACoC. Os ventos de leste (*easterlies winds*) dirigem o fluxo circumpolar para oeste ao redor das margens continentais do oceano Austral entre a costa Antártica e o regime oceânico, sendo este dominado pelo transporte associado à ACoC e à Frente de Talude Antártico [ASF; [Jacobs 1991](#)]. A ACoC é caracterizada por um fluxo rápido e raso sobre a plataforma continental e próxima ao talude continental, geralmente associada à frente das plataformas de gelo [[Jacobs 1991](#)]. A ASF define o limite entre as águas frias e relativamente pouco salinas que preenchem a plataforma continental Antártica e as águas quentes e salinas presentes no regime oceânico em níveis intermediários [[Jacobs 1986](#), [1991](#)]. Esta é praticamente circumpolar seguindo a batimetria do talude continental. No mar de Weddell, encontra-se outra importante frente responsável pelo controle da dinâmica da exportação das águas desta região: a Frente de Weddell (WF; Fig. II-3). Esta foi caracterizada por [Heywood et al. \[2004\]](#) e marca o limite norte das águas características do interior do mar de Weddell e o limite sul da Confluência Weddell-Scotia [[Patterson & Sievers 1980](#)].

O padrão de ventos sobre o oceano Austral é responsável por determinar outra importante zona ao redor do continente Austral, além das frentes oceânicas já apresentadas. A região de transição entre os ventos médios predominantemente de oeste (*westerlies winds*) e leste (*easterlies winds*) é denominada como Divergência Antártica. Devido ao estresse do vento ser máximo nessa zona de transição, a Divergência Antártica é caracterizada por ser uma região de forte ressurgência das águas intermediárias e profundas. Esta ressurgência é normalmente interpretada como a área onde a temperatura superficial mínima é encontrada em regiões mais rasas. A Divergência Antártica é encontrada normalmente entre os limites da SAACF e da SBDY (Fig. II-1).

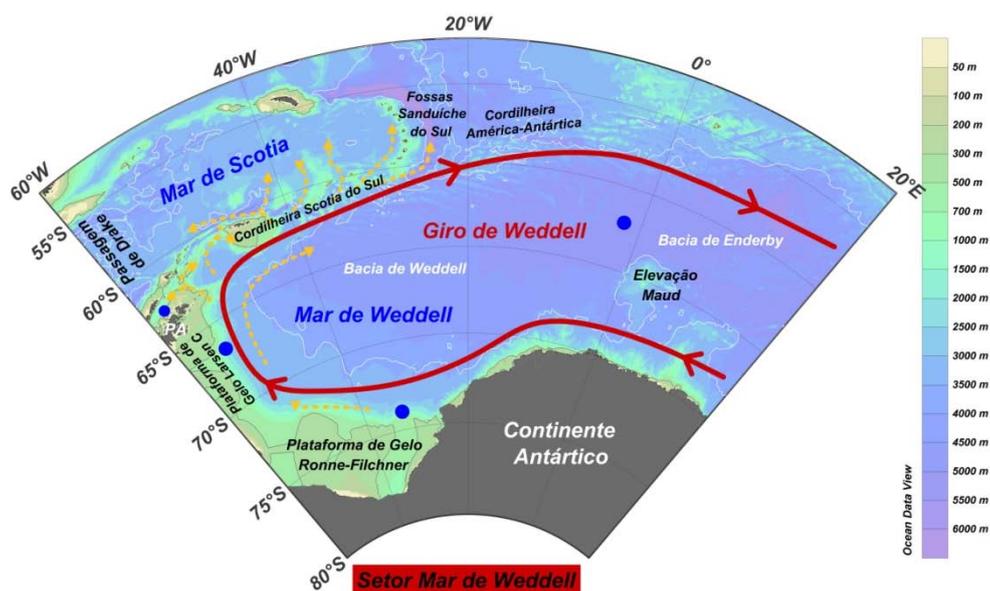


**Figura II-3.** Esquema das trajetórias da Corrente Costeira Antártica (ACoC; amarelo), Frente de Talude Antártico (ASF, azul) e Frente de Weddell (WF, vermelho) na região norte do mar de Weddell de acordo com [Heywood et al. \[2004\]](#).

### 2.3. Setor Mar de Weddell

O mar de Weddell estende-se desde a extremidade da Península Antártica até cerca de 20-30°W [[Gouretski & Danilov 1993](#), [Orsi et al. 1999](#)], englobando a bacia de Weddell e parte da bacia de Enderby (Fig. II-4). Possui uma circulação ciclônica, devido à presença de um centro de baixa pressão

atmosférica sobre o oceano, denominado Giro de Weddell [Deacon 1979]. O limite sul é marcado pela presença das plataformas de gelo permanentes Ronne e Filchner (Ronne-Filchner) e o limite norte pelo sistema da Cordilheira Scotia do Sul e América-Antártica. A figura II-4 mostra as principais regiões, o padrão da circulação superficial do Giro de Weddell e as principais trajetórias de saída e áreas de formação da AABW no Setor Mar de Weddell.



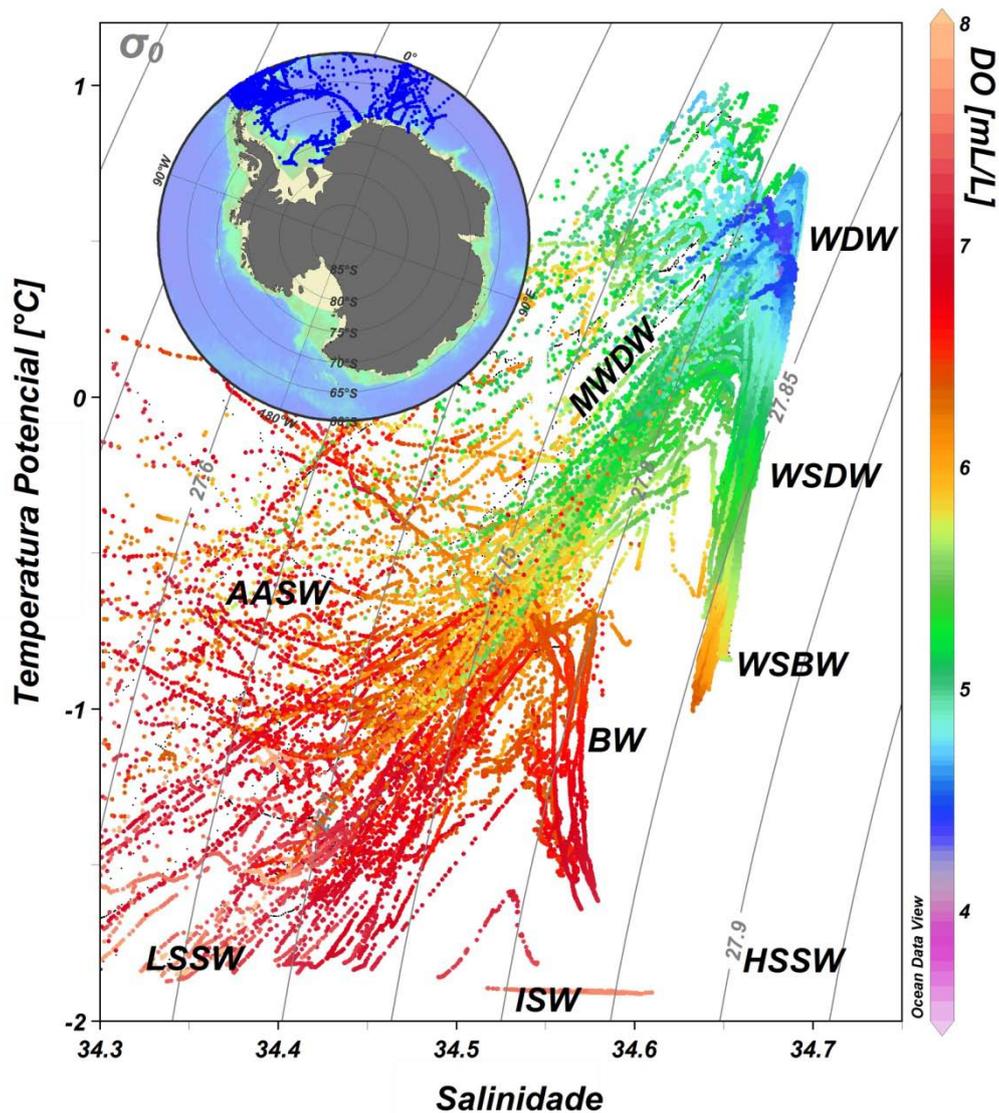
**Figura II-4.** Setor Mar de Weddell e suas principais regiões. O esquema do padrão de circulação superficial do Giro de Weddell (linha cheia vermelha) e das principais trajetórias de exportação das águas profundas e de fundo (linhas tracejadas amarelas) são baseados nos trabalhos de Gordon *et al.* [2001], von Gyldenfeldt *et al.* [2002] e Naveira Garabato *et al.* [2002a]. As principais áreas de formação da AABW são indicadas pelos círculos azuis de acordo com Hay [1993]. A batimetria [m] é mostrada em escala de cor. As linhas de cor cinza e branca correspondem, respectivamente, as isóbatas de 500 m e 4000 m. PA = Península Antártica.

No regime costeiro as principais massas de água encontradas são denominadas como Água de Plataforma (SW), cuja temperatura é próxima ao ponto de congelamento da água. Estas são subdivididas em Água de Plataforma de Alta Salinidade (HSSW), Água de Plataforma de Baixa Salinidade (LSSW) e Água de Plataforma de Gelo (ISW). A HSSW ( $\theta < -1.7^{\circ}\text{C}$ ;  $34.56 < S < 34.84$ ) é encontrada nas amplas plataformas continentais

localizadas na região oeste do mar de Weddell, enquanto a LSSW ( $\theta < -1.7^{\circ}\text{C}$ ;  $34.30 < S < 34.40$ ) está presente nas plataformas curtas da região leste (Fig. II-5). A ISW ( $\theta < -1.9^{\circ}\text{C}$ ;  $34.20 < S < 34.70$ ; Fig. II-5) formada na região sul do mar de Weddell ocorre devido às interações entre a HSSW e a LSSW com a parte basal da Plataforma de Gelo Ronne-Filchner.

No regime oceânico a AASW ( $\theta < 1^{\circ}\text{C}$ ;  $33.0 < S < 34.50$ ; Fig. II-5) é definida pela sua localização na coluna d'água (acima de 200 m) e não por valores fixos de  $\theta$  e  $S$ . Isto está relacionado com a alta variabilidade existente devido à diferença de aquecimento entre os meses de verão e inverno. No verão estas águas tornam-se relativamente mais quentes e menos salinas (devido à maior insolação nos pólos e ao derretimento do gelo marinho). Entretanto, as águas superficiais frias e mais salinas formadas por convecção no inverno persistem durante os meses de verão abaixo da camada superficial aquecida [Gordon & Huber 1984]. Esta água remanescente da camada de mistura mais profunda formada durante o inverno é denominada Água de Inverno (WW;  $\theta < -1.7^{\circ}\text{C}$ ;  $34.30 < S < 34.44$ ). Abaixo de 200 m de profundidade, a coluna d'água é preenchida em sua camada intermediária (entre 200-1500 m) pela Água Profunda Cálida (WDW;  $0 < \theta < 1^{\circ}\text{C}$ ;  $34.60 < S < 34.75$ ). A WDW é relativamente quente, salina e menos oxigenada (Fig. II-5) do que as demais massas de água da região. Isto se deve à origem da WDW, que é resultado da mistura entre a CDW, a WW e as camadas inferiores da AASW à medida que a CDW entra no mar de Weddell e segue a circulação do Giro de Weddell. Por sua vez, a CDW (basicamente formada pela LCDW que circula com a ACC) é oriunda da Água Profunda do Atlântico Norte [NADW; Mantyla & Reid 1983], o que marca seu sinal de alta salinidade. A WDW ainda pode sofrer

outros processos de mistura com a AASW, WW e a SW próximo das margens continentais. Desta interação origina-se a Água Profunda Cálida Modificada (MWDW;  $-1.7 < \theta < -0.7^{\circ}\text{C}$ ;  $34.40 < S < 34.60$ ; Fig. II-5), outra importante massa de água envolvida na formação da AABW [Foster & Carmack 1976a, Carmack & Foster 1975b, 1977].



**Figura II-5.** Diagrama temperatura potencial-salinidade-oxigênio dissolvido ( $\theta$ SO) para as águas com profundidade superior a 200 m das estações hidrográficas do Setor Mar de Weddell (figura inserida). Os dados são provenientes do conjunto de dados de CTD do WOD05 [Boyer *et al.* 2006]. As linhas de cor cinza indicam as superfícies isopicnais de densidade potencial com relação à superfície ( $\sigma_{\theta}$ ;  $\text{kg m}^{-3}$ ). A barra de cores indica a concentração de oxigênio dissolvido em mL/L. AASW = Água Superficial Antártica, BW = Água do Estreito de Bransfield, HSSW = Água de Plataforma de Alta Salinidade, ISW = Água de Plataforma de Gelo, LSSW = Água de Plataforma de Baixa Salinidade, MWDW = Água Profunda Cálida Modificada, WDW = Água Profunda Cálida, WSDW = Água Profunda do Mar de Weddell, e WSBW = Água de Fundo do Mar de Weddell.

Abaixo da WDW, o mar de Weddell é preenchido por duas variedades distintas da AABW: (i) Água Profunda do Mar de Weddell (WSDW;  $-0.7 < \theta < 0^{\circ}\text{C}$ ;  $34.62 < S < 34.68$ ; Fig. II-5) e (ii) Água de Fundo do Mar de Weddell (WSBW;  $\theta < -0.7^{\circ}\text{C}$ ;  $34.62 < S < 34.68$ ; Fig. II-5). A WSDW é menos densa do que a WSBW, que está localizada logo abaixo e em contato direto com o fundo oceânico. A WSBW é formada nas margens continentais noroeste e sul do mar de Weddell através da mistura entre a HSSW ou ISW com a WDW ou MWDW. A WSDW é resultado da mistura entre a WSBW e a WDW ou MWDW à medida que a SW desce o talude continental em função da alta densidade adquirida. Entretanto, diversos trabalhos [e.g. Meredith *et al.* 2000] reportam a formação direta da WSDW dependendo das características apresentadas pelas águas-fonte (*i.e.* SW e WDW) ou ainda sua direta renovação devido à entrada de águas profundas menos densas provenientes de outras regiões ao redor do continente.

Os dois processos principais de formação da WSBW são descritos em detalhes por Foster & Carmack [1976b] e Foldvik *et al.* [1985], cuja diferença principal reside na forma de resfriamento da HSSW e nas massas de água envolvidas. No processo descrito por Foster & Carmack [1976b], a HSSW torna-se mais fria e salina devido à intensificação no processo de formação de gelo, enquanto Foldvik *et al.* [1985] sugere que este resfriamento é ocasionado pelo derretimento líquido do gelo sob a calota da plataforma de gelo permanente. Os primeiros autores assumem a formação das águas de fundo através da mistura entre HSSW e MWDW, enquanto Foldvik *et al.* [1985] consideram a mistura entre ISW e WDW (ou MWDW). Em ambos os processos, a não linearidade da equação de estado da água do mar em baixas

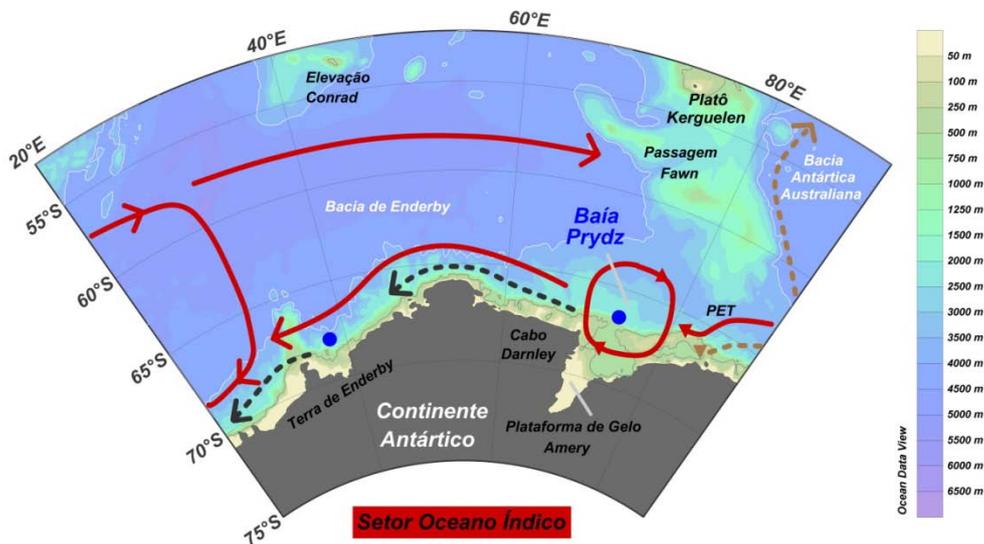
temperaturas é importante para a manutenção do movimento de subsidência (afundamento) da água [Fofonoff 1956].

As duas variedades de águas profundas densas encontradas no mar de Weddell contribuem para a ventilação das camadas profundas da AABW nas demais bacias oceânicas do Setor Atlântico do oceano Austral. Entretanto, a WSBW normalmente fica restrita dentro da bacia de Weddell pelo fato de ser mais densa, enquanto a WSDW é exportada mais facilmente através das fendas profundas da Cordilheira Scotia do Sul. A direta exportação da WSBW só ocorre através de fossas oceânicas bastante profundas [Carmack & Foster 1975a], como as Fossas Sanduíche do Sul (Fig. II-4) localizadas a leste do arco das Ilhas Sanduíche do Sul. A mistura com a WSDW também é outra forma de exportação da WSBW. Todos os índices termohalinos acima descritos para as massas de água do mar de Weddell são provenientes das definições compiladas por Robertson *et al.* [2002] e baseadas nos trabalhos de Carmack & Foster [1977], Meredith *et al.* [2000] e Weppernig *et al.* [1996].

#### **2.4. Setor Oceano Índico**

O Setor Oceano Índico engloba a maior parte da bacia Enderby (Fig. II-6), é limitado a leste pelo Platô Kerguelen e mais ao norte pela Cordilheira Sudoeste Indiana, que separa a bacia Enderby da bacia Crozet presente no oceano Índico. A circulação oceânica de larga escala é dominada pela presença da ACC ao norte e da ACoC ao sul, e pela presença da inflexão para sul do Giro de Weddell marcando a extremidade oeste do setor. A figura II-6 mostra as principais regiões, o padrão da circulação superficial da região, a

recirculação na Baía Prydz e as principais trajetórias de exportação e áreas de formação da AABW no Setor Oceano Índico.



**Figura II-6.** Setor Oceano Índico e suas principais regiões. O esquema do padrão de circulação superficial da região, da recirculação na Baía Prydz (linha cheia vermelha) e das principais trajetórias de saída das águas profundas e de fundo (linhas tracejadas) são baseados nos trabalhos de [Mantyla & Reid \[1995\]](#), [Wong et al. \[1998\]](#) e [Meredith et al. \[1999\]](#). As linhas tracejadas de cor cinza e marrom referem-se, respectivamente, as variedades regionais da AABW formada no Setor Oceano Índico e no Setor Oceano Pacífico Oeste. As principais áreas de formação da AABW são indicadas pelos círculos azuis de acordo com [Hay \[1993\]](#). A batimetria [m] é mostrada em escala de cor. As linhas de cor cinza e branca correspondem, respectivamente, as isóbatas de 500 m e 4000 m. PET = Depressão Princesa Elizabeth.

A presença do giro ciclônico na Baía Prydz foi evidenciado primeiramente por [Smith et al. \[1984\]](#) e sustentado por observações posteriores executadas por [Nunes Vaz & Lennon \[1996\]](#) e [Heywood et al. \[1999\]](#). O meandramento das frentes da ACC devido às peculiaridades topográficas da região (e.g. a presença do Platô Kerguelen) aproxima a SBDY do continente Antártico. Isto possui importantes implicações para os processos de formação da AABW no Setor Oceano Índico [[Orsi et al. 1995](#)], uma vez que a ACC carrega a CDW mais próxima das plataformas continentais. Com isso, a formação da AABW pode ser facilitada na região, sendo já evidenciada nas proximidades da Baía Prydz [[Jacobs & Georgi 1977](#), [Wong et al. 1998](#)].

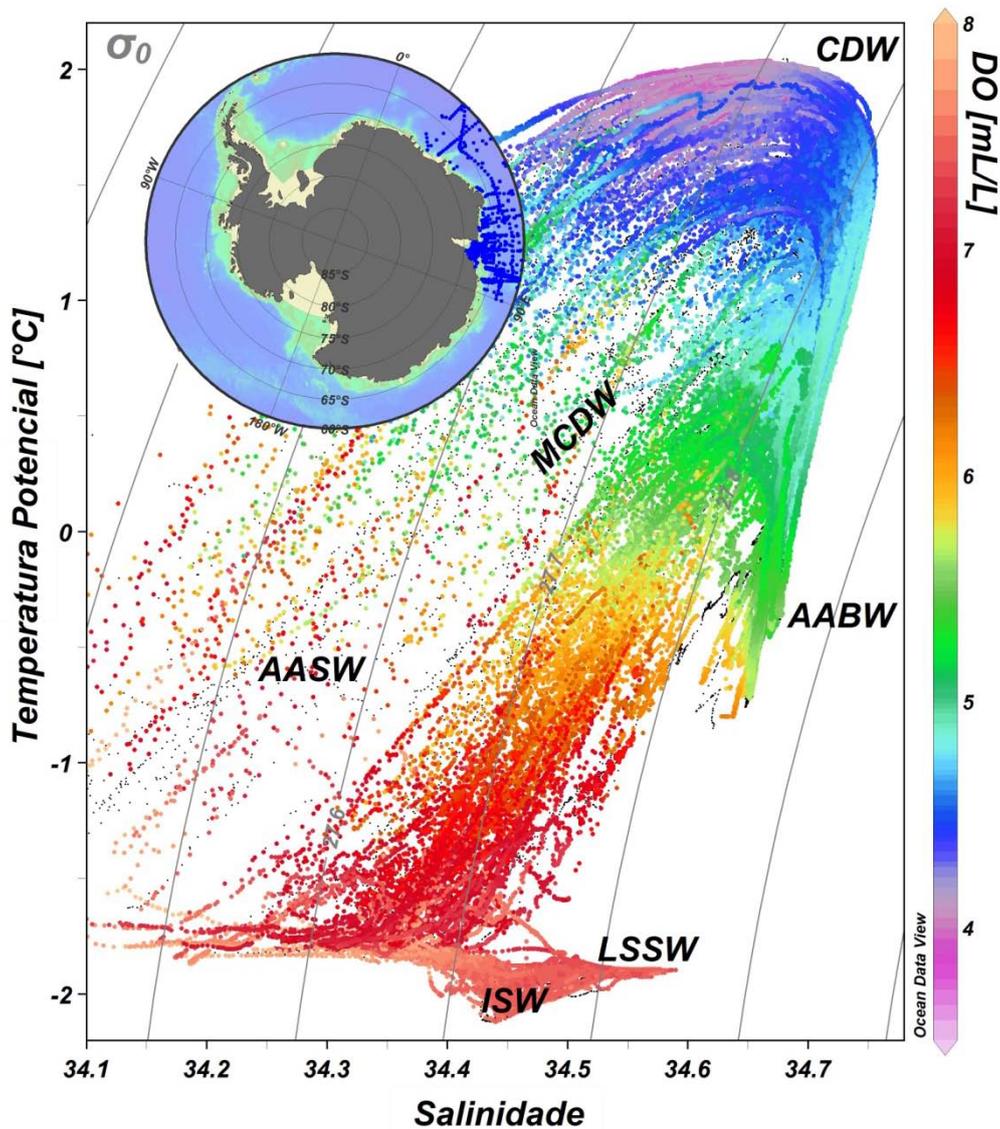
As plataformas continentais da região são preenchidas pela LSSW ( $\theta < -1.7^{\circ}\text{C}$ ;  $34.5 < S < 34.6$ ; Fig. II-7), relativamente mais salina que a LSSW encontrada no mar de Weddell. Contudo, não possui salinidade suficientemente elevada para ser denominada como HSSW (ausente na região). A formação da LSSW nesta região pode estar associada a dois processos: (i) rejeição de sal durante a formação de gelo marinho no inverno e consequente acumulação de uma água mais salina sobre as plataformas ou (ii) mistura direta das águas sobre as plataformas com a CDW, sendo a mistura resultante resfriada durante o inverno [Wong *et al.* 1998]. Nas proximidades da Plataforma de Gelo Amery (Fig. II-6) observa-se a presença da ISW ( $\theta < -2.0^{\circ}\text{C}$ ). A formação da ISW com temperaturas abaixo do ponto de congelamento (*supercooled*<sup>1</sup>) deve-se à interação com a base da Plataforma de Gelo Amery.

A AASW nesta região pode variar de 40 m dentro da Baía Prydz para cerca de 80 m no domínio oceânico durante o verão, e as suas características termohalinas dependem da estação do ano considerada. A WW ( $-1.9^{\circ}\text{C} < \theta < -1.5^{\circ}\text{C}$ ;  $34.2 < S < 34.5$ ), localizada abaixo da camada superficial, por sua vez, aumenta em espessura entre o domínio oceânico de 30 m para cerca de 300 m próximo à plataforma continental [Wong *et al.* 1998]. Entre aproximadamente 300 m e 3000 m de profundidade no domínio oceânico, a CDW é caracterizada pelo núcleo de temperatura e salinidade máximas, respectivamente, por  $0^{\circ}\text{C} <$

---

<sup>1</sup> Uma água super-resfriada (*supercooled*) origina-se da seguinte forma: assumindo uma massa de água salina e com temperatura próxima ao ponto de congelamento (*e.g.* HSSW) entrando abaixo de uma plataforma de gelo, quando esta entrar em contato com a parte basal da plataforma começa a ocorrer derretimento de gelo devido às trocas de calor. A água originada (*e.g.* ISW) é menos densa do que a água-fonte e ascende na coluna d'água. Devido ao efeito de diminuição da pressão, à medida que a água formada ascende na coluna d'água o ponto de congelamento aumenta e esta pode então adquirir temperaturas abaixo do ponto de congelamento ficando super-resfriadas.

$\theta < 2^{\circ}\text{C}$  e  $34.67 < S < 34.75$  (Fig. II-7). Sobre o talude continental, a interação da CDW com as águas superficiais e de plataforma produz a MCDW.



**Figura II-7.** Diagrama temperatura potencial-salinidade-oxigênio dissolvido ( $\theta$ SO) para as águas com profundidade superior a 200 m das estações hidrográficas do Setor Oceano Índico (figura inserida). Os dados são provenientes do conjunto de dados de CTD do WOD05 [Boyer *et al.* 2006]. As linhas de cor cinza indicam as superfícies isopicnais de densidade potencial com relação à superfície ( $\sigma_0$ ;  $\text{kg m}^{-3}$ ). A barra de cores indica a concentração de oxigênio dissolvido em mL/L. AABW = Água Antártica de Fundo, AASW = Água Superficial Antártica, CDW = Água Profunda Circumpolar, ISW = Água de Plataforma de Gelo, LSSW = Água de Plataforma de Baixa Salinidade, e MCDW = Água Profunda Circumpolar Modificada.

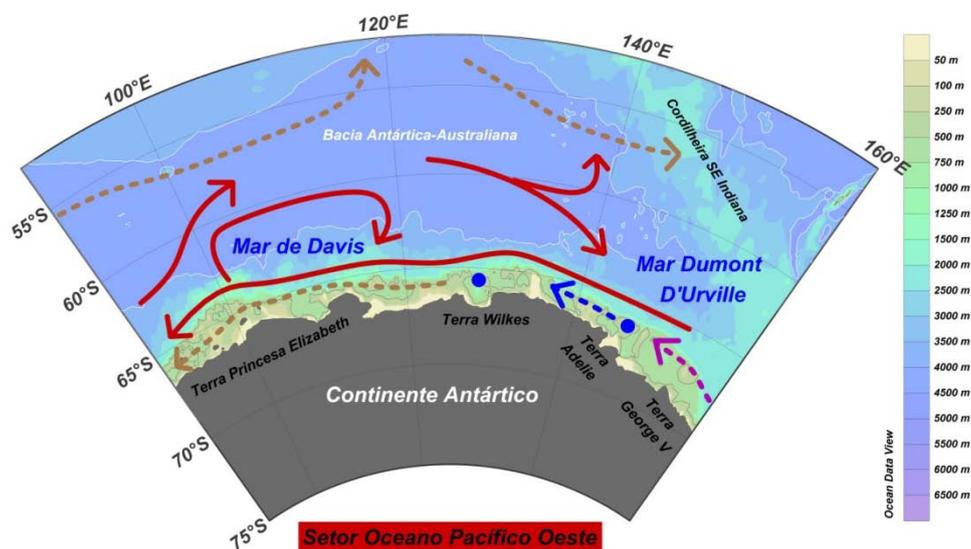
Estudos pretéritos [Middleton & Humphries 1989] identificaram a camada mais densa da MCDW sobre o talude continental, com  $\theta = 0^{\circ}\text{C}$  e  $S = 34.65$ , como sendo a Água de Fundo da Baía Prydz (PBBW). Entretanto, esta se

refere às águas menos densas que podem ser encontradas em profundidades intermediárias da região. A AABW ( $\theta < -0.3^{\circ}\text{C}$  e  $34.66 < S < 34.71$ ; Fig. II-7) regional, presente no domínio oceânico da Baía Prydz, possui uma espessura de aproximadamente 500 m e pode ser separada em duas variedades de acordo com a salinidade, *i.e.* variedade mais salina ( $S > 34.68$ ) e menos salina ( $S < 34.68$ ). Acreditava-se que a AABW presente no Setor Oceano Índico era advectada de outras regiões, sendo proveniente do mar de Weddell, do mar de Ross e da Terra de Adelie através da Depressão Princesa Elizabeth (PET). Entretanto, [Rintoul \[1998\]](#) mostrou que o sinal de alta salinidade da AABW formada no mar de Ross é erodido devido à mistura com a AABW formada na região da costa Adelie. Além disso, a salinidade da AABW encontrada nas proximidades da Baía Prydz é superior à salinidade das águas de fundo encontradas mais a leste da região [[Mantyla & Reid 1995](#)], indicando a formação local da AABW na região [[Wong et al. 1998](#)].

## 2.5. Setor Oceano Pacífico Oeste

O Setor Oceano Pacífico Oeste é limitado ao norte e a leste pelo braço sul da Cordilheira Sudoeste Indiana e a oeste pelo Platô Kerguelen e pela PET. No regime costeiro possui importantes plataformas de gelo. Entretanto, em comparação com as demais bacias oceânicas, possui as plataformas continentais mais estreitas do oceano Austral (Fig. II-8). A figura II-8 mostra as principais regiões, o padrão da circulação superficial da região e a recirculação ciclônica no mar de Davis, além das principais trajetórias de exportação e áreas de formação da AABW no Setor Oceano Pacífico Oeste.

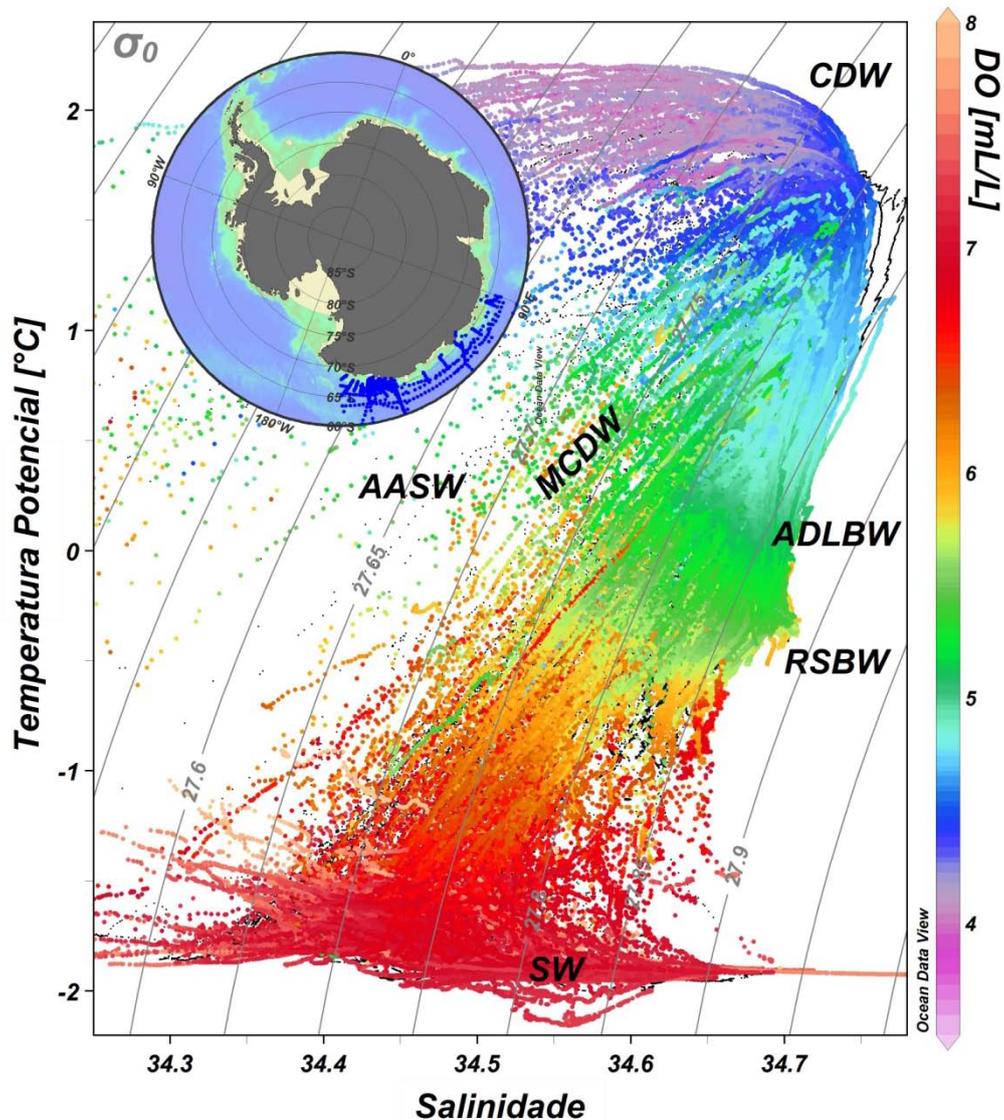
Assim como no Setor Oceano Índico, a aproximação da SBDY no Setor Oceano Pacífico Oeste em direção ao continente (Fig. II-8) favorece os processos de formação da AABW na região [Orsi *et al.* 1995]. De fato, diversas regiões neste setor são apontadas como áreas de formação da AABW (Fig. II-8), tais como: o mar de Davis [90°E-95°E; Treshnikov *et al.* 1973], a região da Plataforma de Gelo Shackleton [95°E-105°E; Gordon 1974], a região da costa Adelie [135°E-145°E; Gordon & Tchernia 1972], e entre 150°E-160°E na região da Terra George V [Carmack & Killworth 1978].



**Figura II-8.** Setor Oceano Pacífico Oeste e suas principais regiões. O esquema do padrão de circulação superficial da região (linha cheia vermelha) e das principais trajetórias de exportação das águas profundas e de fundo (linhas tracejadas) são baseados nos trabalhos de Rintoul [1998], Bindoff *et al.* [2000] e Williams *et al.* [2008]. As principais áreas de formação da Água de Fundo Antártica são indicadas pelos círculos azuis de acordo com Hay [1993]. As linhas tracejadas de cor marrom, azul e púrpura referem-se, respectivamente, as variedades regionais da AABW formada no Setor Oceano Pacífico Oeste, a variedade denominada ADLBW e a variedade mais densa da RSBW. A batimetria [m] é mostrada em escala de cor. As linhas de cor cinza e branca correspondem, respectivamente, as isóbatas de 500 m e 4000 m.

De acordo com Bindoff *et al.* [2000] a AASW na região é caracterizada por  $-2^{\circ}\text{C} < \theta < -1.84^{\circ}\text{C}$  e  $S > 34$ . A SW é caracterizada por  $\theta < -1.7^{\circ}\text{C}$  e  $S < 34.72$ . Na camada intermediária são encontradas a CDW ( $\theta > 1.8^{\circ}\text{C}$  e  $S$

~34.72) e a MCDW ( $\theta < 1.8^{\circ}\text{C}$  e  $S < 34.7$ ). Nas camadas profundas a AABW é caracterizada por  $-1.7^{\circ}\text{C} < \theta < 0^{\circ}\text{C}$  e  $34.65 < S < 34.72$  (Fig. II-9).



**Figura II-9.** Diagrama temperatura potencial-salinidade-oxigênio dissolvido ( $\theta$ SO) para as águas com profundidade superior a 200 m das estações hidrográficas do Setor Oceano Pacífico Oeste (figura inserida). Os dados são provenientes do conjunto de dados de CTD do WOD05 [Boyer et al. 2006]. As linhas de cor cinza indicam as superfícies isopicnais de densidade potencial com relação à superfície ( $\sigma_0$ ;  $\text{kg m}^{-3}$ ). A barra de cores indica a concentração de oxigênio dissolvido em mL/L. AASW = Água Superficial Antártica, ADLBW = Água de Fundo de Adelie, CDW = Água Profunda Circumpolar, MCDW = Água Profunda Circumpolar Modificada, SW = Água de Plataforma, e RSBW = Água de Fundo do Mar de Ross.

Diversas variedades locais e advectadas de outras áreas contribuem para a AABW encontrada na região. Duas variedades são mais importantes: (i)

uma relativamente salina e quente ( $\theta \sim -0.35^\circ\text{C}$  e  $S \sim 34.71$ ) proveniente do mar de Ross é encontrada na região leste do setor, e (ii) outra local relativamente fria e menos salina formada na região da costa Adelie ( $\theta \sim -0.55^\circ\text{C}$  e  $S \sim 34.66$ ). As duas variedades de AABW são denominadas, respectivamente, como Água de Fundo do Mar de Ross (RSBW) e Água de Fundo de Adelie (ADLBW). A ADLBW é a massa de água profunda dominante na bacia Antártica-Australiana abaixo da densidade neutra<sup>2</sup> ( $\gamma^n$ ) de  $28.27 \text{ kg m}^{-3}$ .

## 2.6. Setor Mar de Ross

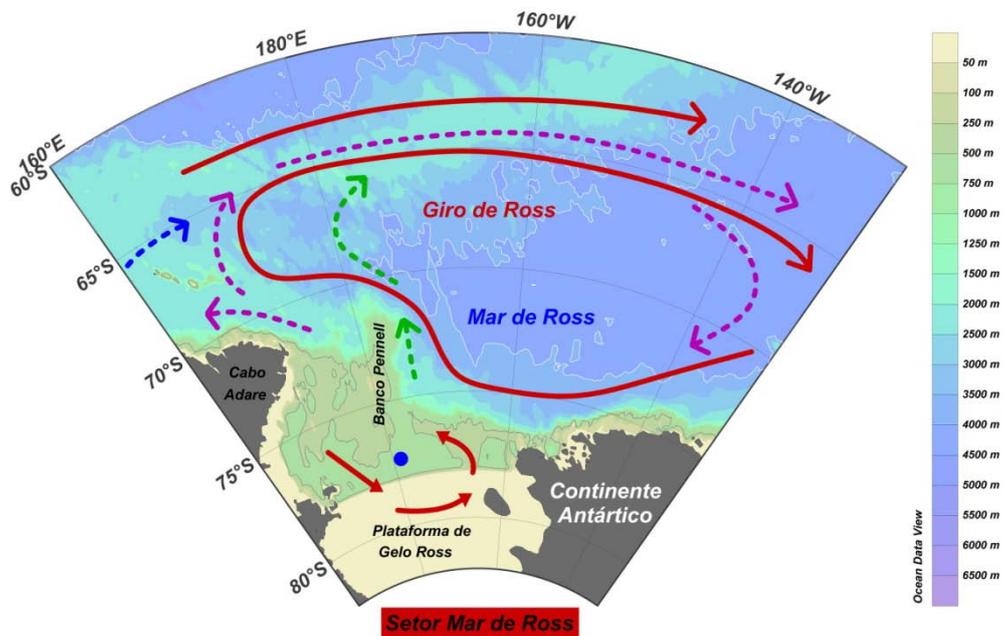
O Setor Mar de Ross é caracterizado pela presença do Giro de Ross – uma circulação ciclônica que se estende entre  $160^\circ\text{E}$  e  $140^\circ\text{W}$  (Fig. II-10). O mar de Ross é limitado a leste e a oeste, respectivamente, pelo Cabo Colbeck ( $158^\circ\text{W}$ ) e Cabo Adare ( $170^\circ\text{E}$ ). O limite sul é caracterizado pela presença da Plataforma de Gelo Ross ao redor de  $78.5^\circ\text{S}$ . A figura II-10 mostra as principais regiões, o padrão da circulação superficial da região, o Giro de Ross e as principais trajetórias de exportação e áreas de formação da AABW no Setor Mar de Ross.

A ampla Plataforma de Gelo Ross se estende sobre mais da metade da plataforma continental, com aproximadamente 250 m de espessura na sua margem norte [Jacobs 1989]. Entretanto, esta limita apenas a circulação das camadas oceânicas mais superficiais, enquanto as águas densas e profundas circulam livremente abaixo da plataforma de gelo flutuante. A região oeste central do mar de Ross (Fig. II-10) é caracterizada pela alternância entre

---

<sup>2</sup> Densidade Neutra – determinada a partir da temperatura, salinidade, pressão, latitude e longitude [Jackett & McDougall 1997]. Ver Capítulo III para detalhes.

elevações e depressões na batimetria local, sendo em alguns casos mais profundas do que a margem da plataforma continental. Sendo assim, a topografia de fundo nesta área é bastante irregular, estando as zonas profundas da plataforma (~500 m de profundidade) isoladas da costa por cânions submarinos de profundidades de até 1000 m.



**Figura II-10.** Setor Mar de Ross e suas principais regiões. O esquema do padrão de circulação superficial do Giro de Ross (linha cheia vermelha), da recirculação na Plataforma de Gelo Ross e das principais trajetórias de exportação das águas profunda e de fundo (linhas tracejadas) são baseados nos trabalhos de Reid [1997], Assmann *et al.* [2003] e Ozaki *et al.* [2009]. A principal área de formação da AABW é indicada pelo círculo azul de acordo com Hay [1993]. As linhas tracejadas de cor púrpura, verde e azul referem-se, respectivamente, as variedades regionais de maior e menor salinidade da RSBW e a variedade advectada do Setor Oceano Pacífico Oeste denominada ADLBW. A batimetria [m] é mostrada em escala de cor. As linhas de cor cinza e branca correspondem, respectivamente, as isóbatas de 500 m e 4000 m.

As SW da região geralmente são encontradas com temperaturas próximas ao ponto de congelamento ( $-1.95^{\circ}\text{C} < \theta < -1.75^{\circ}\text{C}$ ; Fig. II-11). A salinidade das plataformas a oeste é superior às salinidades encontradas a leste [Locarnini 1994]. Esta alta salinidade a oeste está associada à grande extensão de áreas de águas abertas (*i.e.* áreas de polínias livres de gelo marinho). Mesmo durante o inverno, as áreas de polínias permanecem, apesar

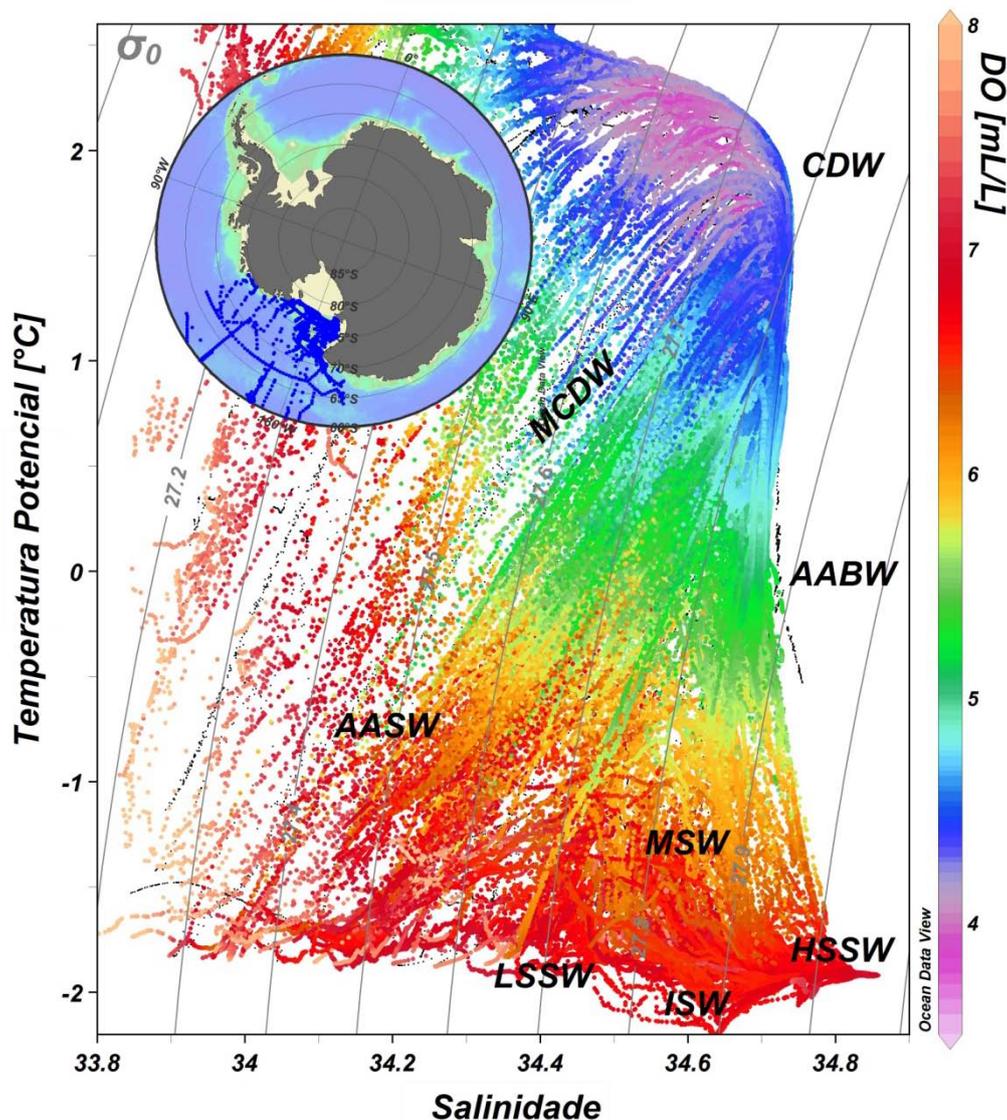
da alta produção de gelo marinho na região, devido aos fortes ventos catabáticos<sup>3</sup>, que removem o gelo marinho recém formado [Kurtz & Bromwich 1985]. A HSSW presente na região oeste possui uma salinidade entre  $34.75 < S < 35$  [Jacobs *et al.* 1985]. Recentemente, Orsi & Wiederwohl [2009] determinaram que a mistura entre as SW com a MCDW resultaria em uma Água de Plataforma Modificada (MSW), cujas características estariam entre os valores de suas águas-fonte. A ISW formada sobre a plataforma continental possui salinidade de  $\sim 34.7$  e temperatura de  $\sim -2.2^{\circ}\text{C}$  [Jacobs & Giulivi 1998]. A produção da ISW no mar de Ross é inferior à produção no mar de Weddell, provavelmente devido às plataformas de gelo permanentes mais finas. A espessura da Plataforma de Gelo Ross é de  $\sim 427$  m contra  $\sim 650$  m da Plataforma de Gelo Ronne-Filchner [Drewry *et al.* 1982].

As características das propriedades da AASW ( $\theta < -1.5^{\circ}\text{C}$  e  $S < 34.3$ ; Fig. II-11) no mar de Ross, assim como nos demais setores do oceano Austral, são extremamente variáveis geográfica e temporalmente [Jacobs *et al.* 1970, Orsi & Wiederwohl 2009], sendo aquecida nos meses do verão austral. A CDW, que ocupa as camadas intermediárias e profundas, possui temperatura superior a  $1.6^{\circ}\text{C}$  na margem norte do Giro de Ross. Dentro do regime subpolar, a CDW ocupa uma camada espessa da coluna d'água intermediária e profunda com temperatura de  $\sim 1.5^{\circ}\text{C}$ . Nas bordas da plataforma continental seu núcleo de temperatura máxima se eleva de 300-900 m para 200-800 m, com temperaturas de  $\sim 1^{\circ}\text{C}$  [Orsi & Wiederwohl 2009]. A salinidade da sua forma modificada, *i.e.* MCDW, é ligeiramente abaixo de  $\sim 34.7$  e sua temperatura máxima de  $\sim 0.9^{\circ}\text{C}$  [Jacobs & Giulivi 1998]. O regime costeiro sobre a

---

<sup>3</sup> Os ventos catabáticos (*katabatic winds*) se referem às massas de ar frias e densas que descendem das regiões montanhosas do continente por efeito de gradientes de densidade e pressão.

plataforma do mar de Ross é mais quente que no mar de Weddell em virtude das intrusões de MCDW e ao maior aquecimento do oceano superficial, que se encontra mais exposto com a atmosfera.



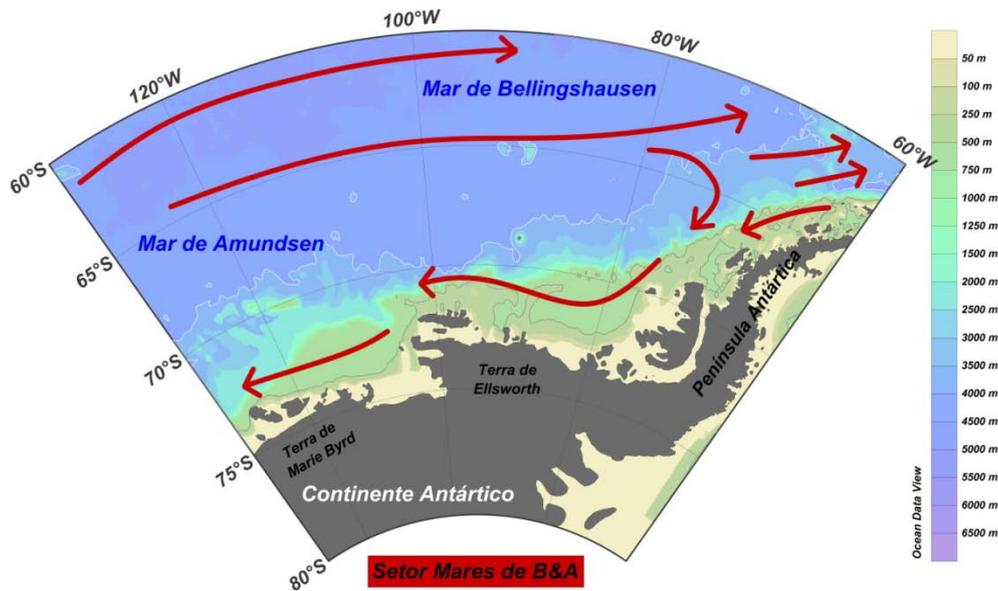
**Figura II-11.** Diagrama temperatura potencial-salinidade-oxigênio dissolvido ( $\theta$ SO) para as águas com profundidade superior a 200 m das estações hidrográficas do Setor Mar de Ross (figura inserida). Os dados são provenientes do conjunto de dados de CTD do WOD05 [Boyer *et al.* 2006]. As linhas de cor cinza indicam as superfícies isopicnais de densidade potencial com relação à superfície ( $\sigma_0$ ;  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ). A barra de cores indica a concentração de oxigênio dissolvido em mL/L. AABW = Água Antártica de Fundo, AASW = Água Superficial Antártica, CDW = Água Profunda Circumpolar, HSSW = Água de Plataforma de Alta Salinidade, ISW = Água de Plataforma de Gelo, LSSW = Água de Plataforma de Baixa Salinidade, MCDW = Água Profunda Circumpolar Modificada, e MSW = Água de Plataforma Modificada.

A AABW presente no mar de Ross é historicamente dividida em duas variedades distintas de RSBW, uma forma menos salina ( $S < 34.7$  e  $\theta \sim -0.1^\circ\text{C}$ )

e uma mais salina ( $S > 34.7$  e  $\theta \sim -0.7^{\circ}\text{C}$ ). A diferença na salinidade estaria associada com a sua área de formação, ou seja, a variedade menos salina oriunda da região central e leste e a variedade mais salina proveniente da região oeste do mar de Ross [Jacobs *et al.* 1970, Ozaki *et al.* 2009]. Entretanto, o recente estudo de Orsi & Wiederwohl [2009] mostra que, em algumas regiões de exportação, a variedade menos salina da RSBW não apresenta uma clara distinção no espaço  $\theta S$  quando comparada com a variedade mais densa da MCDW ( $28.20 < \gamma^n < 28.30 \text{ kg m}^{-3}$ ). A variedade mais salina da RSBW flui para oeste da sua área de formação, onde se mistura com as águas profundas e de fundo do Setor Oceano Pacífico Oeste (*i.e.* ADLBW). Ambas as variedades da RSBW irão contribuir para a produção global da AABW no oceano Austral [Orsi & Wiederwohl 2009].

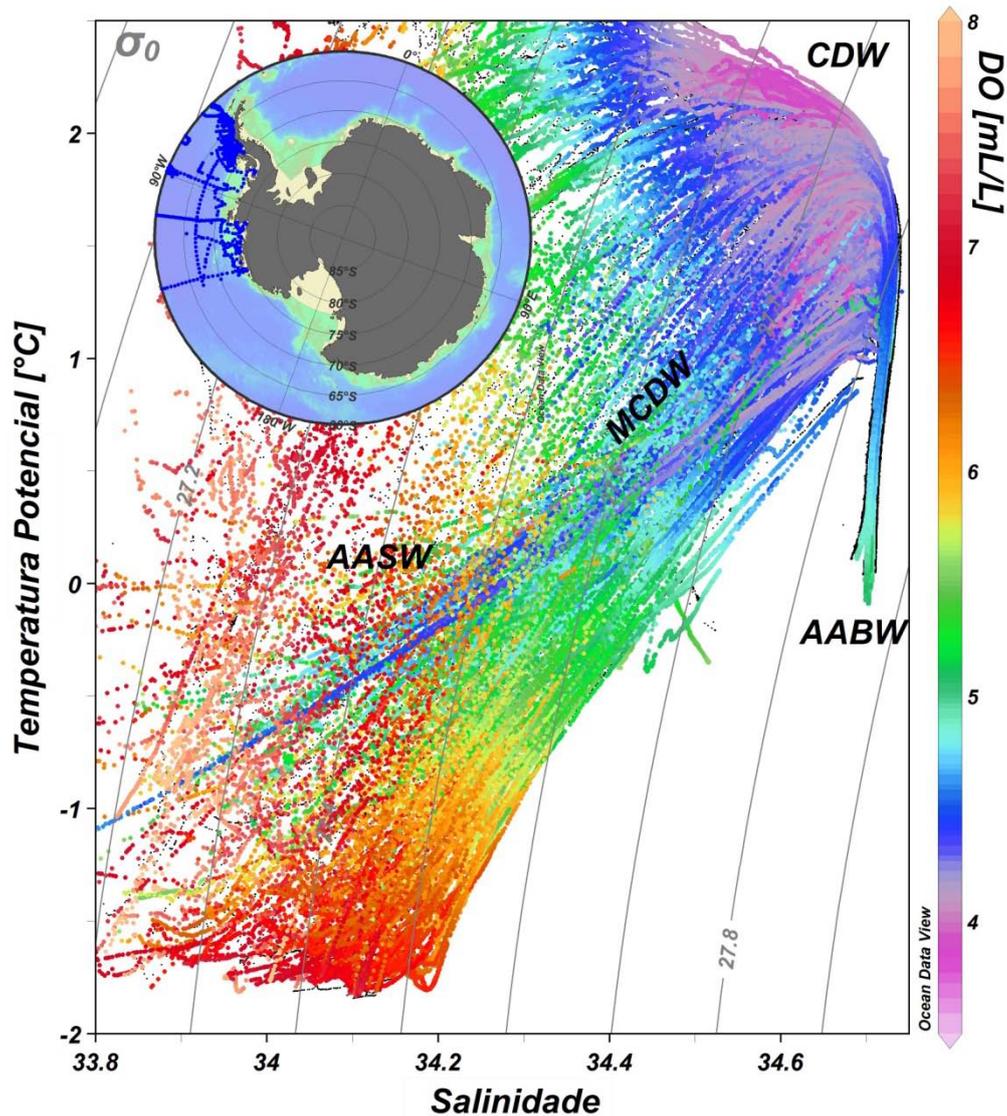
## 2.7. Setor Mares de Bellingshausen e Amundsen (B&A)

O Setor Mares de B&A compreendem uma grande área oceânica fortemente influenciada pelo sistema da ACC. Este é limitado a leste pelo estreitamento da Passagem de Drake e não possui limites geográficos ao norte e a oeste (Fig. II-12). Ao sul é marcado pela presença de diversos estreitos entre o continente e as ilhas da região. O mar de Bellingshausen e o mar de Amundsen são bastante similares em termos oceanográficos e fortemente diferentes dos demais mares regionais ao redor da Antártica. A figura II-12 mostra as principais regiões e o padrão da circulação superficial no Setor Mares de B&A.



**Figura II-12.** Setor Mares de Bellingshausen e Amundsen (B&A) e suas principais regiões. O esquema do padrão de circulação superficial (linha cheia vermelha) é baseado nos trabalhos de Reid [1989, 1994, 1997], Klinck *et al.* [2004] e Assmann *et al.* [2005]. A batimetria [m] é mostrada em escala de cor. As linhas de cor cinza e branca correspondem, respectivamente, as isóbatas de 500 m e 4000 m.

A principal massa de água presente no regime oceânico é a CDW ( $\theta > 1^{\circ}\text{C}$ ;  $S \sim 34.70$ ; Fig. II-13). A UCDW ( $1.5^{\circ}\text{C} < \theta < 2.0^{\circ}\text{C}$ ;  $34.6 < S < 34.75$ ) é encontrada entre 200 e 800 m de profundidade e possui um importante papel na hidrografia da região [Sievers & Nowlin 1984]. No regime costeiro, a plataforma continental é inteiramente preenchida pela forma modificada da UCDW ( $1.0^{\circ}\text{C} < \theta < 1.4^{\circ}\text{C}$ ;  $S \sim 34.60$ ) – aqui também denominada como MCDW – logo abaixo da sua mistura com a WW ( $\theta \sim -1.5^{\circ}\text{C}$ ;  $34.8 < S < 34.0$ ) e a AASW ( $-1.8 < \theta < 1.0^{\circ}\text{C}$ ;  $33.0 < S < 33.7$ ). A AASW é formada devido à interação com a atmosfera, enquanto a MCDW é originada da CDW (mais especificamente da UCDW) a partir da ACC, que flui afastada da quebra de plataforma com  $\theta$  variando entre  $1.6^{\circ}\text{C}$  e  $2.0^{\circ}\text{C}$ . As intrusões subsuperficiais de MCDW tendem a ocorrer em regiões específicas ao longo da plataforma oeste da Península Antártica [Hofmann & Klinck 1998, Klinck *et al.* 2004].



**Figura II-13.** Diagrama temperatura potencial-salinidade-oxigênio dissolvido ( $\theta$ SO) para as águas com profundidade superior a 200 m das estações hidrográficas do Setor Mares de B&A (figura inserida). Os dados são provenientes do conjunto de dados de CTD do WOD05 [Boyer *et al.* 2006]. As linhas de cor cinza indicam as superfícies isopicnais de densidade potencial com relação à superfície ( $\sigma_0$ ;  $\text{kg m}^{-3}$ ). A barra de cores indica a concentração de oxigênio dissolvido em mL/L. AABW = Água de Fundo Antártica, AASW = Água Superficial Antártica, CDW = Água Profunda Circumpolar, e MCDW = Água Profunda Circumpolar Modificada.

A leste do Giro de Ross, devido à extensão da ACC sobre o talude continental entre 55°W e 100°W (profundidade superior a 2500 m), o fluxo para leste da ACC é forçado na direção norte pela Península Antártica. Observações escassas na região do mar de Bellingshausen [Potter & Paren 1984, Talbot 1988] confirmam a ausência de SW, uma das águas-fonte para produção de AABW. Assim, a produção de AABW nesta região é bastante improvável. A

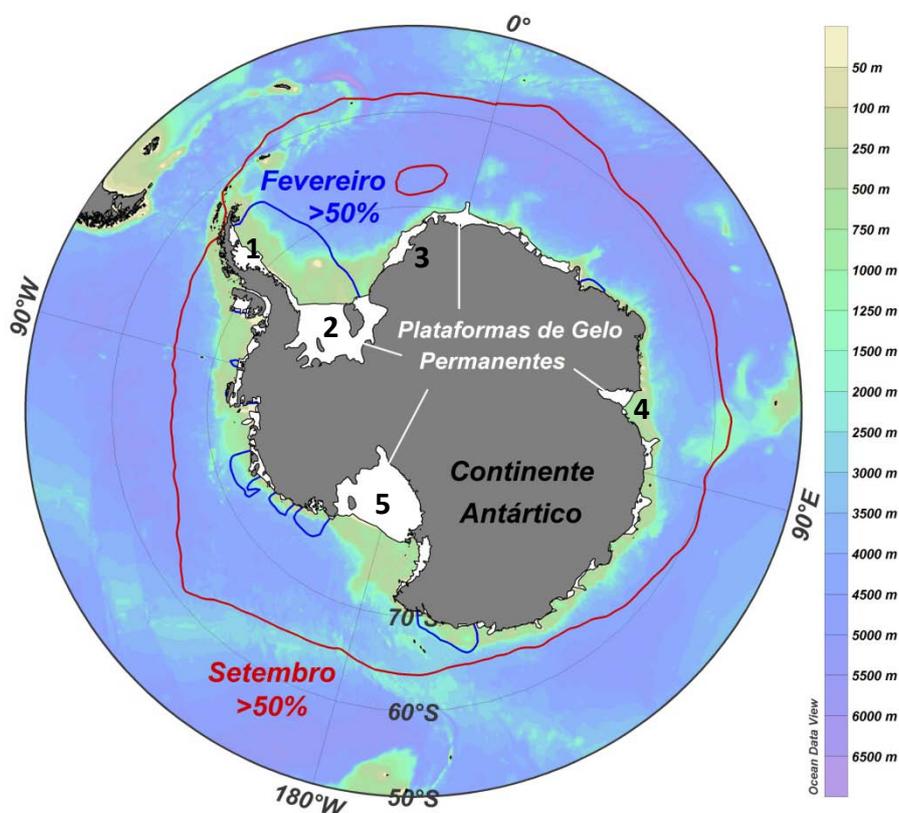
exata razão da não produção de SW densa não é conhecida, no entanto, pode estar relacionada às condições moderadas sobre a plataforma (*i.e.* ausência dos ventos catabáticos provenientes do continente) e ao balanço semelhante entre produção e derretimento do gelo marinho [Hofmann & Klinck 1998].

## 2.8. Gelo marinho e plataformas de gelo permanente

O gelo marinho Antártico e as plataformas de gelo permanentes ao redor do continente (Fig. II-14) possuem um papel fundamental na formação das massas de água densa devido, respectivamente, à liberação de salmoura para as camadas de água subjacente durante o processo de formação do gelo marinho e ao resfriamento das águas de plataforma devido ao derretimento da parte basal das plataformas de gelo permanentes. Estes processos são fundamentais para a formação das águas profundas e de fundo ao redor das margens Antárticas.

A média da extensão superficial do gelo marinho na Antártica varia tipicamente de  $4 \times 10^6$  km<sup>2</sup> no verão austral para cerca de  $21 \times 10^6$  km<sup>2</sup> durante o inverno [Carmack 1990], ou seja, cerca de 60% do oceano (Fig. II-14) ao sul da Convergência Antártica encontra-se coberto por gelo marinho no final do inverno, enquanto, somente cerca de 12% da mesma área fica coberta por gelo ao final do verão [Deacon 1982]. O gelo marinho que circunda o continente Antártico modula e é um dos responsáveis pela interação entre os processos atmosféricos e oceânicos [Venegas & Drinkwater 2001]. Tanto os processos dinâmicos como termodinâmicos associados ao gelo marinho são responsáveis pelas trocas entre o sistema ar-gelo-oceano, ou seja, atuando sobre a variabilidade climática Antártica. Os processos termodinâmicos

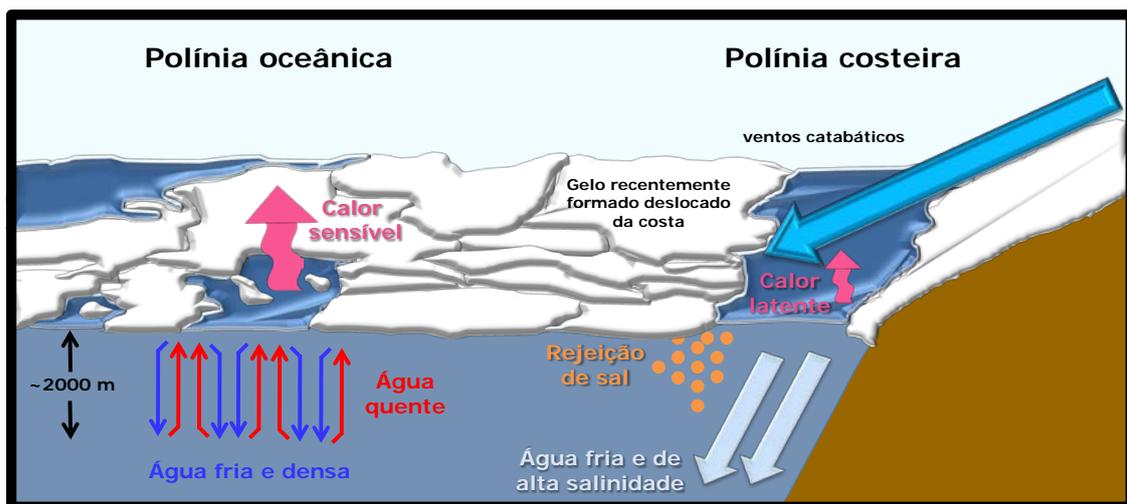
controlam a formação do gelo marinho, que recobre rapidamente as áreas de águas abertas (*open water regions*) devido às trocas de calor oceano-atmosfera. Por outro lado, os processos dinâmicos deslocam e reposicionam geograficamente o gelo marinho. Sendo assim, as aberturas e fechamentos da camada de gelo marinho, em resposta à variabilidade de seu movimento e formação, são responsáveis por regular as trocas de calor e momentum entre oceano e atmosfera.



**Figura II-14.** Climatologia mensal da área coberta por gelo marinho com concentração >50% de acordo com Zwally *et al.* [1983], mostrando os meses de concentração máxima (Setembro; linha vermelha) e mínima (Fevereiro; linha azul). A batimetria [m] é mostrada em escala de cor. Principais plataformas de gelo permanentes: 1 = Plataforma de Gelo Larsen, 2 = Plataforma de Gelo Ronne-Filchner, 3 = Plataforma de Gelo Fimbul, 4 = Plataforma de Gelo Amery e 5 = Plataforma de Gelo Ross.

As áreas de águas abertas são denominadas como *leads* e *polínias*. Denominam-se *leads* as áreas de águas abertas em forma de fendas entre diferentes placas de gelo marinho (*sea ice pack*). Por outro lado, as *polínias*

são áreas extensas de águas abertas (normalmente em forma circular) entre placas e/ou no interior de placas de gelo marinho, ou ainda entre a cobertura de gelo marinho e a costa do continente. O primeiro caso é denominado como polínias oceânicas e o segundo como polínias costeiras [Gordon & Comiso 1988; Fig. II-15]. As polínias oceânicas são formadas, normalmente, por processos termodinâmicos, como a ressurgência de águas intermediárias relativamente quentes, que derretem a camada de gelo marinho abrindo áreas oceânicas livres de gelo e diretamente em contato com a atmosfera (Fig. II-15). As polínias costeiras, por outro lado, são formadas por processos dinâmicos, como o deslocamento das placas de gelo marinho para fora da costa (*offshore*) relacionado aos ventos catabáticos oriundos do continente (Fig. II-15). Estas não apresentam características permanentes e mudam constantemente de forma e tamanho, entretanto, as taxas com que estas feições são formadas podem ser suficientemente altas para elevar a salinidade das águas de plataforma [Fahrbach *et al.* 1994a].



**Figura II-15.** Esquema dos mecanismos e processos envolvidos na formação das polínias costeiras e oceânicas.

A presença e a variabilidade destas regiões livres de cobertura de gelo marinho são fundamentais para os fluxos de calor entre o oceano e a atmosfera, que são responsáveis por determinar as taxas de formação do gelo marinho, que por sua vez determinará a concentração de sal liberado para as camadas oceânicas subjacentes. Portanto, são processos interligados que determinarão a densidade de águas precursoras das águas densas profundas e de fundo formadas no oceano Austral e intrinsecamente relacionado à variabilidade da formação (*i.e.* diferentes formas regionais, variação anual das propriedades físicas) e exportação das águas densas de fundo. Grandes polínias oceânicas foram observadas no centro do mar de Weddell durante os invernos austrais entre 1974 e 1976. A Polínia de Weddell (*Weddell Polynya*) e seus processos de formação foram fortemente estudados [Holland 2001a] e despertam interesse científico até aos dias atuais [*e.g.* Gordon *et al.* 2007]. Esta ocupou uma área superficial superior a  $0.3 \times 10^6 \text{ km}^2$  no centro do mar de Weddell [Kottmeier *et al.* 2003] e foi formada à medida que a formação do gelo marinho era inibida pela convecção oceânica, que injeta águas relativamente quentes de camadas mais profundas em camadas superficiais. Polínias menos persistentes e menores são observadas corriqueiramente nesta região devido à ressurgência ligada à interação com a topografia da Elevação Maud, o que não caracteriza a recorrência da Polínia de Weddell [Holland 2001b].

As plataformas de gelo permanentes (Fig. II-14) são extensões flutuantes dos glaciares continentais e possuem aproximadamente 200-1000 m de espessura, sendo formadas quando as condições morfológicas locais são favoráveis e a temperatura média superficial anual é de no mínimo  $-5^\circ\text{C}$  [van den Broeke *et al.* 2004]. Na Antártica, as plataformas de gelo permanentes

circundam cerca da metade da linha de costa e constituem aproximadamente 15% da capa de gelo [Jacobs *et al.* 1979].

No Setor Mar de Weddell, as principais plataformas de gelo permanente são: (i) Plataforma de Gelo Ronne-Filchner localizada ao sul do mar de Weddell [Nicholls 1997, Nicholls *et al.* 2009] e (ii) Plataforma de Gelo Larsen localizada no noroeste do mar de Weddell. Esta última sofreu um forte processo de desintegração no início dos anos 2000 [Scambos *et al.* 2000]. Outras plataformas menos extensas são encontradas entre o limite leste do Setor Mar de Weddell e o Oceano Índico. Neste último, a principal plataforma de gelo encontrada é a Plataforma de Gelo Amery [Wong *et al.* 1998], que forma ~200 km da linha de costa da Baía Prydz. No Setor Oceano Pacífico Oeste as plataformas são também pouco extensas, sendo as mais importantes a Plataforma de Gelo Shackleton (95°E-105°E) e aquelas localizadas entre a região da costa Adelie e da Terra George V [Bindoff *et al.* 2000]. Por outro lado, no Setor Mar de Ross a Plataforma de Gelo Ross [Drewry *et al.* 1982] é ampla e extremamente importante para a compreensão dos processos oceânicos da região [Jacobs *et al.* 1979].

## 2.9. Alterações do oceano Austral e da Antártica

Nos últimos anos diversos trabalhos [e.g. van den Broeke *et al.* 2004, Jacobs 2006] reportaram alterações e mudanças de longo prazo nas propriedades das massas de água do oceano Austral, na temperatura atmosférica da Antártica, nas plataformas de gelo permanentes e glaciares que circundam o continente e na cobertura do gelo marinho. A seguir, as principais

alterações reportadas para cada setor da região Antártica são brevemente elucidadas.

No Setor Mares de B&A, [Meredith & King \[2005\]](#) reportaram mudanças significantes de elevação ( $\sim 1^{\circ}\text{C}$ ) na temperatura superficial do oceano na região de plataforma oeste da Península Antártica, acompanhada por uma forte salinização da camada superficial da região. As temperaturas médias da atmosfera na região aumentaram em média  $\sim 3^{\circ}\text{C}$  desde 1951 [[Turner et al. 2005](#)], produzindo um profundo efeito nos glaciares da região. [Cook et al. \[2005\]](#) mostraram que a maioria dos glaciares retraíram entre 1945 e 2004 e que esta retração estaria sendo acelerada. De fato, [Shepherd et al. \[2002\]](#) já havia evidenciado uma rápida diminuição do gelo dos glaciares que drenam no mar de Amundsen entre 1991 e 2001, enquanto [Shepherd et al. \[2003\]](#) reportaram a retração e o colapso da Plataforma de Gelo Larsen no mar de Weddell entre 1992 e 2001. É no Setor Mares de B&A que se observa, também, forte decréscimo na concentração do gelo marinho entre os anos de 1979 e 2006 [[Zwally et al. 2002](#), [Cavalieri & Parkinson 2008](#)].

Considerando as mudanças temporais das massas de água do Setor Mar de Weddell, [Robertson et al. \[2002\]](#) identificaram uma tendência de aquecimento de  $\sim 0.012 \pm 0.007^{\circ}\text{C ano}^{-1}$  para a WDW na região de entrada no mar de Weddell entre 1975 e 2000, similar aos valores encontrados por [Smedsrud \[2005\]](#) na região do Meridiano de Greenwich entre 1977 e 2001. Por outro lado, [Farhbach et al. \[2004\]](#) mostra evidências de que este longo período de aquecimento da WDW estaria terminando. De fato, períodos alternados de aquecimento e resfriamento da WDW já foram reportados por [Gordon \[1982\]](#) durante a década de 1970 nesta região. A tendência de aquecimento da WDW

corroborar com os resultados de Gille [2002], que mostrou que entre a década de 50 e 90 as águas intermediárias entre 700 m e 1000 m do oceano Austral apresentaram uma tendência de aquecimento de  $0.01 \text{ }^\circ\text{C ano}^{-1}$ . Nenhuma tendência significativa foi encontrada por Robertson *et al.* [2002] para a WSDW e WSBW. Entretanto, Fahrbach *et al.* [1998] determinaram uma tendência de aquecimento de  $\sim 0.01 \text{ }^\circ\text{C ano}^{-1}$  para a WSBW no centro do mar de Weddell entre 1989 e 2005. Adicionalmente, Kerr [2006] e Kerr *et al.* [2009b] mostram um decréscimo de 20% na contribuição da WSBW para a mistura total das águas profundas na bacia de Weddell entre os anos de 1984-1998.

No Setor Oceano Pacífico Oeste, Aoki *et al.* [2005a] reportaram que as águas de fundo da bacia Antártica-Australiana ficaram mais frias ( $\sim 0.2^\circ\text{C}$ ) e menos salinas ( $\sim 0.03$ ) entre os anos de 1994 e 2003. Isto foi corroborado por Rintoul [2007], que destacou uma rápida dessalinização (*freshening*<sup>4</sup>) da AABW entre 1995 e 2005. Isto indica que as águas de fundo estariam ficando menos salinas em função das mudanças do balanço de água doce nas latitudes austrais e adquirindo rapidamente a assinatura das mudanças ocorridas no clima superficial. Por outro lado, Aoki *et al.* [2005b] reportaram um aumento de temperatura ( $0.030 \pm 0.015 \text{ }^\circ\text{C ano}^{-1}$ ) e salinidade ( $0.0022 \pm 0.0010 \text{ ano}^{-1}$ ) para a UCDW entre os Setores Oceano Índico e Oceano Pacífico Oeste entre a década de 50 e 90. Entretanto, os autores ressaltam que estas alterações podem ser explicadas apenas pela mistura da UCDW com águas superficiais mais quentes e menos salinas.

---

<sup>4</sup> O processo descrito como "*freshening*" na literatura científica internacional consiste na tendência de longo período em que a salinidade das massas de água de determinada região se torna menos salina. Entretanto, a respectiva massa de água oceânica não se torna doce, como a tradução literária do termo informa. Aqui se propõe a utilização do termo dessalinização para caracterização de tal processo e utilização na língua portuguesa.

No Setor Mar de Ross, [Jacobs et al. \[2002\]](#) reportaram uma dessalinização de longo período para as SW da região. Entretanto, as razões para a ocorrência de tal tendência ainda encontram-se em debate. [Assmann & Timmermann \[2005\]](#) mostraram evidências, a partir de resultados de modelagem numérica, que o processo de dessalinização reportado por [Jacobs et al. \[2002\]](#) pode ser devido a amostragem irregular da região. Por outro lado, [Rignot & Jacobs \[2002\]](#) sugeriram que um aumento na taxa de entrada de água doce, proveniente do derretimento basal das plataformas de gelo de regiões próximas ao mar de Ross, poderia explicar a dessalinização reportada na região. Adicionalmente, [Hellmer et al. \[2009\]](#) mostraram que a variabilidade decadal da salinidade da SW da região noroeste do mar de Weddell pode estar relacionada com as mudanças atmosféricas na periodicidade do Modo Anular Sul (SAM; ver Capítulo VII para detalhes).

Conforme esperado, as alterações descritas acima nas águas-fonte da AABW, em diferentes regiões do oceano Austral, de fato geram impactos nas propriedades das massas de água recentemente formadas e ventiladas ao redor do continente Antártico, como já constatado por [Aoki et al. \[2005a\]](#), [Johnson \[2009\]](#), [Ozaki et al. \[2009\]](#) e [Kerr et al. \[2009b\]](#).

## Capítulo III: Dados e Métodos

**E**ste estudo utilizou o modelo oceânico de circulação geral dos oceanos denominado *Ocean Circulation and Climate Advanced Modeling* (OCCAM<sup>1</sup>). A simulação do OCCAM utilizada possui uma elevada resolução espacial horizontal de 1/12°, com abrangência global e compreende um período de 17 anos. A simulação utilizada é descrita e detalhada a seguir, conjuntamente com as seções hidrográficas determinadas para as análises e cálculos das taxas de produção e exportação da AABW. As definições e os critérios empregados para delimitar as diferentes zonas oceânicas ao longo das margens continentais e para determinar a camada de água profunda também são apresentados a seguir. Detalham-se, ainda, as principais metodologias utilizadas para os cálculos de transporte de volume e para as análises da variabilidade temporal a partir das séries temporais obtidas. As principais técnicas empregadas foram: análise de correlação cruzada, elaboração de mapas de composição e transformada de ondeletas.

---

<sup>1</sup> <http://www.noc.soton.ac.uk/JRD/OCCAM/>

### 3.1. Dados históricos

Os dados observacionais utilizados neste estudo provêm do banco de dados históricos do *National Oceanographic Data Center* (NODC) dos EUA conhecido como *World Ocean Database 2005*<sup>2</sup> [WOD05; Boyer *et al.* 2006]. Apenas os dados físicos adquiridos através de sensores do sistema *Contuctivity-Temperature-Depth* (CTD<sup>3</sup>) foram utilizados, o que limita a disponibilidade temporal entre a década de 80 e o ano de 2005. Entretanto, foram excluídos os dados antigos e aqueles considerados espúrios, onde a precisão e a acurácia dos mesmos são considerados duvidosos. Além disso, utilizaram-se apenas os dados classificados como de boa qualidade pelo programa *Ocean Data View*<sup>4</sup> (ODV). Desta forma, este controle de qualidade prévio permitiu a identificação e exclusão de dados duvidosos considerando-se a precisão instrumental e/ou erros de medidas. Aos dados históricos foram adicionados os dados dos cruzeiros do GOAL, estendendo-se o período total de dados observados até o ano de 2009<sup>5</sup>. Os dados observados foram utilizados para: (i) elaboração de figuras características das regiões do oceano Austral (ver Capítulo II) e (ii) validação e comparação com os dados simulados pelo modelo OCCAM (ver Capítulo IV), ou seja, nenhuma análise foi executada no decorrer deste estudo diretamente a partir deste conjunto de dados.

---

<sup>2</sup> <http://www.nodc.noaa.gov/>

<sup>3</sup> O sistema CTD é uma ferramenta essencial para a aquisição de dados físicos das propriedades da água do mar. É constituído por um conjunto de pequenos sensores acoplados a um sistema metálico denominado Roseta (*Rosette*), onde garrafas de coleta de água do mar também se encontram fixadas.

<sup>4</sup> <http://odv.awi.de/>

<sup>5</sup> O banco de dados do GOAL engloba essencialmente as regiões noroeste do mar de Weddell e do Estreito de Bransfield, sendo que os anos utilizados foram 2003, 2004, 2005, 2008, 2009.

### 3.2. Modelo OCCAM

O modelo OCCAM [Coward & de Cuevas 2005] foi rodado no *National Oceanography Center, Southampton* (NOCS<sup>6</sup>). O OCCAM é um modelo oceânico da circulação global do tipo Bryan-Cox-Semtner [Bryan 1969, Semtner 1974, Cox 1984] acoplado a um modelo dinâmico-termodinâmico de gelo marinho [Aksenov 2002], sendo a termodinâmica baseada em Semtner [1976] e a dinâmica na reologia elástico-viscoso-plástica de Hunke & Dukowicz [1997]. Os processos termodinâmicos utilizam uma camada vertical para a neve e uma ou duas camadas verticais para gelo marinho fino ou espesso, respectivamente. O albedo do gelo é ajustado para 0.66. As plataformas de gelo permanentes não são representadas em suas configurações, assim como a parametrização dos fluxos associados. Neste estudo foram utilizadas as saídas mensais da simulação obtida com a versão *eddy-resolving*<sup>7</sup> de alta resolução espacial<sup>8</sup> (1/12°) do OCCAM, denominada rodada 401 (*run 401*). Existem 66 níveis verticais de profundidade, cujas espessuras aumentam de cerca de 5 m nas camadas superficiais para aproximadamente 210 m nas camadas profundas. A menor profundidade é de 2.5 m e a maior de 6365 m. A batimetria do modelo é construída de acordo com Smith & Sandwell [1997] e com o banco de dados *Digital Bathymetric Data Base 5-minute*<sup>9</sup> [DBDB5 1983]. Alguns cânions submarinos e outras feições topográficas relevantes em determinadas áreas oceânicas foram checadas e ajustadas manualmente [Coward & de Cuevas 2005].

---

<sup>6</sup> <http://www.noc.soton.ac.uk/>

<sup>7</sup> O modelo numérico tem resolução espacial suficiente para que os vórtices oceânicos (mesoescala) associados à região de estudo possam ser resolvidos.

<sup>8</sup> 1/12 avos de grau corresponde a distância aproximada de 9.25 km em latitude, 8.81 km em longitude a 60°S e 5.2 km em longitude a 65°S.

<sup>9</sup> [http://gcmd.nasa.gov/records/GCMD\\_DBDB5.html](http://gcmd.nasa.gov/records/GCMD_DBDB5.html)

A simulação foi inicializada utilizando a climatologia da temperatura potencial e salinidade do programa hidrográfico do WOCE [Gouretski & Jancke, 1996], com dados adicionais do oceano Ártico. O gelo marinho no oceano Austral foi ajustado para 1.5 m de espessura de gelo e 0.15 m de neve para todas as células ao sul de 65.25°S, com uma concentração de 99% em cada célula da grade afetada. O modelo oceânico utiliza uma grade Arakawa-B, onde o campo de velocidade horizontal é deslocado em relação aos pontos da grade. A mistura vertical é calculada através do modelo KPP (*K-Profile Parameterization*) de Large *et al.* [1994]. O esquema de mistura isopical baseia-se em Griffies *et al.* [1998], originalmente baseado em Pacanowski [1995] e adaptado por Pacanowski & Griffies [1998]. Os padrões de vento e as forçantes de fluxo de calor seguem os trabalhos prévios de Kalnay *et al.* [1996] e Large *et al.* [1997]<sup>10</sup>.

A simulação foi rodada durante 20 anos compreendendo o período entre 1984 e 2004, entretanto, os quatro primeiros anos foram excluídos das análises. Maiores detalhes sobre o modelo OCCAM podem ser encontrados em Webb *et al.* [1998], Coward & de Cuevas [2005] e nos manuais do modelo disponíveis *on-line*. Uma validação detalhada da simulação 401 do modelo OCCAM 1/12° com relação à representação das propriedades físicas e deficiências do modelo na região do mar de Weddell foi realizada por Renner *et al.* [2009]. Desta forma, as validações executadas neste estudo complementam o trabalho destes autores, considerando-se o escopo principal de análise das

---

<sup>10</sup> A forçante de *momentum* foi fornecida pela tensão do vento climatológica e posterior tensão do vento de 6 em 6 horas do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF). Os dados de entrada de 1985-2003 foram fornecidos pelo *National Center for Atmospheric Research* (NCAR) e são descritos em Large *et al.* [1997, Apêndice A]. As componentes zonal e meridional do vento a 10 m, de 6 em 6 horas, temperatura do ar a 2 m e umidade específica vêm da reanálise do *National Centers for Environmental Prediction* [NCEP; Kalnay *et al.* 1996].

séries temporais do transporte de volume das águas profundas do oceano Austral. Por fim, a escolha do modelo OCCAM deve-se basicamente à: (i) sua alta resolução espaço-temporal, (ii) livre disponibilização dos dados simulados e (iii) boa representatividade das camadas profundas do oceano.

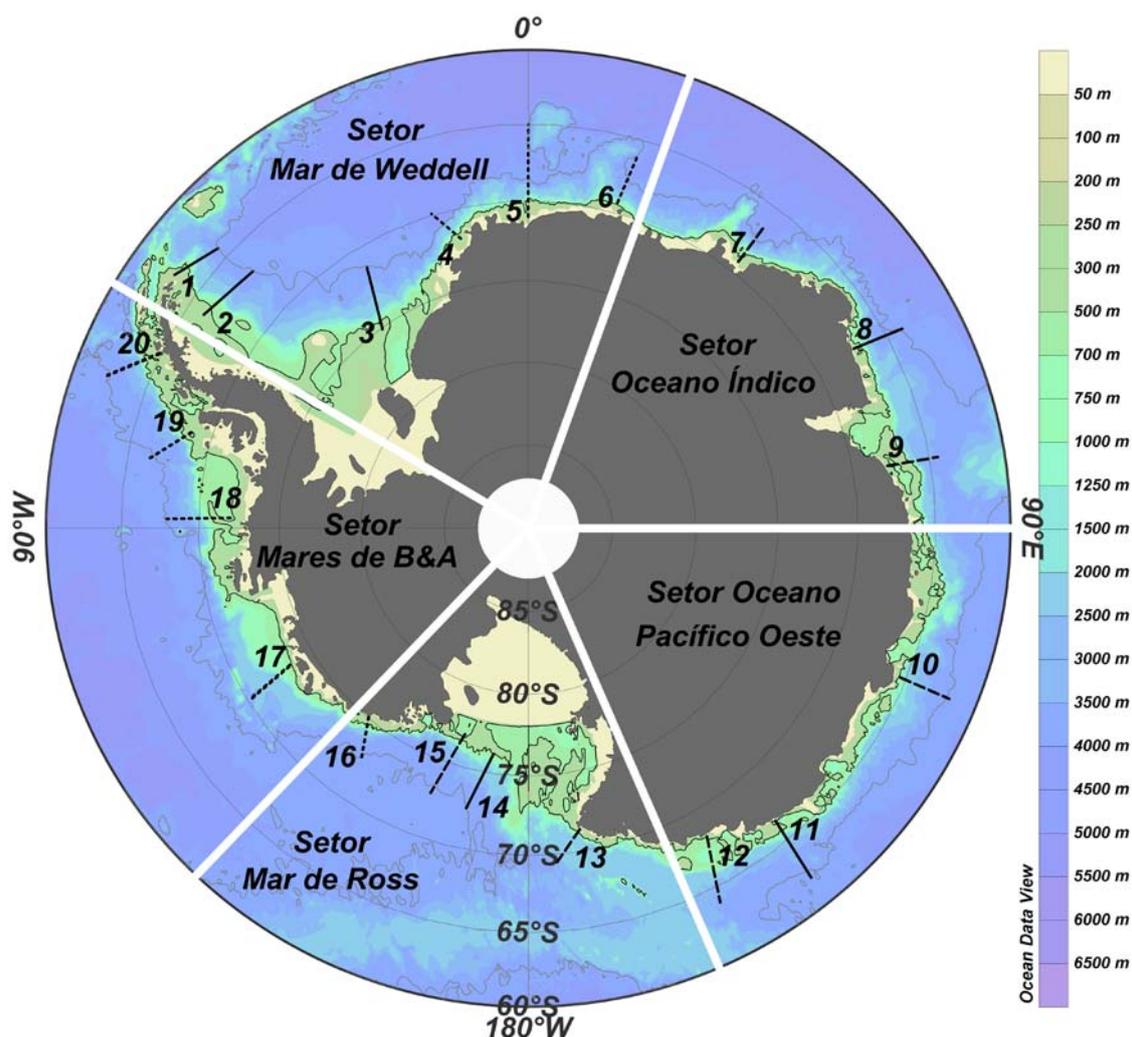
### **3.3. Seções hidrográficas simuladas**

As seções hidrográficas do modelo foram definidas da seguinte forma: (i) foram determinadas as posições iniciais e finais de latitude e longitude das seções transversais e paralelas às margens continentais (Tab. III-I e III-II) de acordo com [Baines & Condie \[1998\]](#) e [Hay \[1993\]](#), (ii) a extensão total da seção foi dividida em 50 partes (estações) de distâncias iguais, (iii) os pontos da grade do modelo mais próximos às posições latitude/longitude das estações foram selecionados para representar a seção hidrográfica simulada.

#### *3.3.1. Seções hidrográficas transversais às margens continentais*

Vinte seções hidrográficas, numeradas com algarismos arábicos de 1 a 20 e transversais à plataforma continental Antártica (Fig. III-1), foram selecionadas com base nos estudos de [Baines & Condie \[1998\]](#), para a determinação das taxas de exportação da AABW nos diferentes setores oceânicos. Os autores definem as margens antárticas em três tipos diferentes de acordo com a presença ou não do fluxo descendente (escoamento) de águas densas ao longo do talude continental. Estas podem ser: (i) Ativa – presença do escoamento de águas densas ocorrendo nos períodos de observação, (ii) Passiva – escoamento de águas densas não observado, contudo, as águas próximas ao término do talude continental indicam uma

origem proveniente das plataformas continentais, o que indica um fluxo descendente ocorrendo em períodos ou lugares próximos das observações, e  
 (iii) Nula – nenhuma evidência de fluxo descendente observada.



**Figura III-1.** Setores do oceano Austral delimitados pelas linhas brancas e seções hidrográficas selecionadas para análise da exportação da Água de Fundo Antártica. As seções representadas por linhas cheias, tracejadas e pontilhadas referem-se, respectivamente, às margens do tipo ativa, passiva e nula de acordo com [Baines & Condie \[1998\]](#) – ver texto para detalhes. Os números indicam o número correspondente de cada seção hidrográfica transversal às margens continentais descrita na Tabela III-I. A batimetria [m] é mostrada em escala de cor. A linha preta e cinza refere-se, respectivamente, às isóbatas de 500 m e 4000m.

Sendo assim, para cada setor do oceano Austral foram selecionadas seções hidrográficas representativas de áreas costeiras com margens ativas, passivas e nulas ao redor do continente Antártico. A presença dos três tipos de margens nem sempre ocorre concomitantemente no mesmo setor oceânico.

Desta forma, tentou-se selecionar, quando possível, os diferentes tipos de margens em cada setor oceânico e priorizaram-se aquelas seções onde o número de repetição temporal no banco de dados históricos do WOD05 era maior. A figura III-1 e a tabela III-I mostram, respectivamente, as seções hidrográficas transversais à quebra de plataforma e talude continental definidas para análise neste estudo e uma síntese da nomenclatura utilizada no decorrer do texto, bem como a classificação dos tipos de margens de acordo com o estudo de [Baines & Condie \[1998\]](#).

**Tabela III-I.** Nomenclatura e posição das seções hidrográficas transversais às margens continentais selecionadas para cada setor do oceano Austral.

Setor Oceânico	Seção N°	Nome da Seção	Latitude (°S) Inicial / Final	Longitude Inicial / Final	Classificação*
Setor Mar de Weddell	1	WOCE SR4 Oeste	63.10 / 64.23	54.16°W / 47.68°W	Ativa (46)
	2	Larsen	66.18 / 66.92	56.45°W / 46.70°W	Ativa (47)
	3	Filchner	75.10 / 71.30	36°W / 31.50°W	Ativa (53)
	4	Weddell Leste	71.90 / 69.90	13°W / 17°W	Nula (57)
	5	Greenwich	70 / 65	0°W / 0°W	Nula (n/a)
	6	Enderby Leste	69.10 / 66.40	15°E / 16°E	Nula (2)
Setor Oceano Índico	7	Índico Oeste	69.30 / 66.50	38°E / 37.80°E	Passiva (5)
	8	Índico Médio	67.30 / 63.90	60.90°E / 61.70°E	Ativa (7)
	9	Baía Prydz	67.90 / 64.60	80°E / 80°E	Passiva (8)
Setor Oceano Pacífico Oeste	10	Pacífico Oeste	65.40 / 61.90	112°E / 112.20°E	Passiva (11)
	11	Pacífico Médio	66.50 / 62.10	140°E / 141.20°E	Ativa (14)
	12	Pacífico Leste	67.70 / 64.7	147.2°E / 149.6°E	Passiva (17)
Setor Mar de Ross	13	Ross Oeste	71.58 / 69.52	170.37°E / 175.10°E	Passiva (23)
	14	Ross	76.2 / 72.6	171.30°W / 167.10°W	Ativa (25)
	15	Ross Médio	77 / 72.9	163°W / 159.90°W	Passiva (27)
	16	Ross Leste	75.10 / 72.70	140°W / 144.40°W	Nula (29)
Setor Mares de B&A	17	Amundsen Oeste	72.90 / 70.30	120°W / 121.60°W	Nula (31)
	18	Amundsen Leste	72 / 68	88°W / 88.5°W	Nula (35)
	19	Bellingshausen Oeste	68.70 / 66.50	74°W / 79.4°W	Nula (38)
	20	Bellingshausen Leste	64.90 / 62.30	64.6°W / 69.8°W	Nula (45)

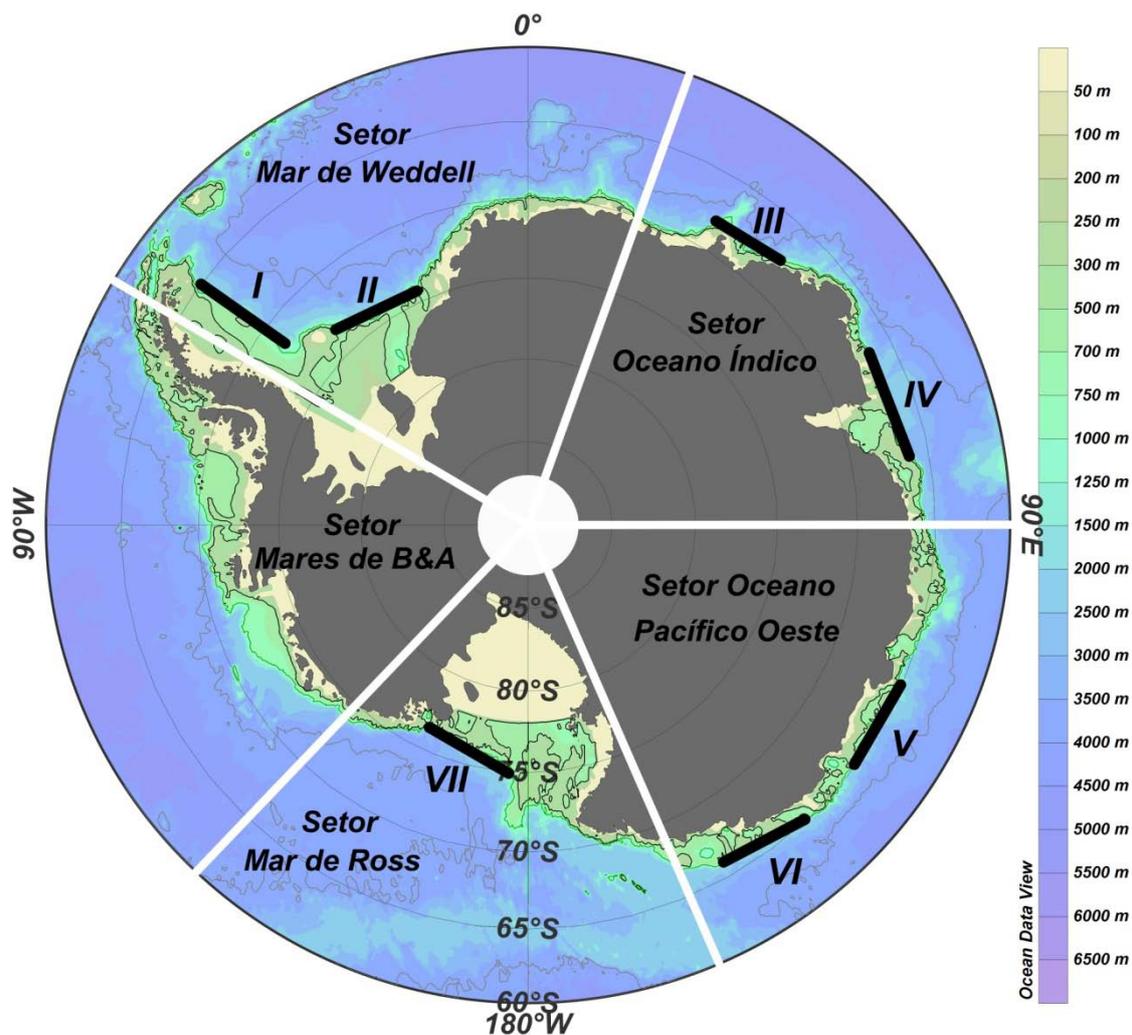
\*Número em parênteses referente ao número da seção correspondente em [Baines & Condie \[1998\]](#).

De modo geral, as seções iniciam-se na isóbata de 500 m e se prolongam até a isóbata de 4000 m. Exceção aplica-se às Seções 9, 12 e 13. Estas foram interrompidas ao atingir a isóbata de 3500 m devido à complexidade da batimetria na região e à grande distância da isóbata de 4000 m (em alguns casos com distâncias superiores a 10° de latitude). Algumas

adaptações foram realizadas na posição inicial e final de algumas seções comparativamente à posição original analisada por [Baines & Condie \[1998\]](#), e.g. (i) quando a distância entre as isóbatas de 500 m e 4000 m era inferior a 100 km (*i.e.* Seções 4 e 7), estendeu-se as seções até uma posição final em que a distância total atingisse ~300 km, (ii) quando a batimetria ao redor da seção mostrava-se muito rasa devido à presença de elevações e/ou bancos rasos (*i.e.* Seção 14), deslocou-se a seção para leste. A Seção 5 foi estendida até as proximidades da Elevação Maud.

### 3.3.2. Seções hidrográficas paralelas às margens continentais

Sete seções hidrográficas, numeradas em algarismos romanos de I a VII e paralelas à isóbata de 1000 m (Fig. III-2), foram selecionadas em áreas de formação da AABW. Estas áreas foram identificadas de acordo com a compilação realizada por [Hay \[1993\]](#), sendo este baseado no estudo de [Killworth \[1977\]](#). Exceção à adaptação realizada no mar de Ross, onde a seção não foi definida na isóbata de 500 m dentro da plataforma continental como sugerido por [Hay \[1993\]](#). A Seção IV, selecionada na zona da Baía de Prydz, foi incluída devido aos recentes trabalhos reportando sobre a produção da AABW nesta região [e.g. [Wong et al. 1998](#); [Yabuki et al. 2006](#)]. A figura III-2 e a tabela III-II mostram, respectivamente, as seções hidrográficas paralelas à quebra de plataforma e talude continental nas proximidades da isóbata de 1000 m definidas para análise da produção da AABW e uma síntese da nomenclatura utilizada no decorrer do texto.



**Figura III-2.** Setores do oceano Austral delimitados pelas linhas brancas e seções hidrográficas selecionadas para análise da produção da Água de Fundo Antártica. Os números indicam o número correspondente de cada seção hidrográfica paralela à batimetria de 1000 m descrita na Tabela III-II. A batimetria [m] é mostrada em escala de cor. A linha preta e cinza refere-se, respectivamente, às isóbatas de 500 m e 4000m.

**Tabela III-II.** Nomenclatura e posição das seções hidrográficas paralelas à isóbata de 1000 m selecionadas nas margens continentais de cada setor do oceano Austral.

Setor Oceânico	Seção N°	Nome da Seção	Latitude (°S) Inicial / Final	Longitude Inicial / Final
Setor Mar de Weddell	I	Zona Península Antártica	65 / 71.60	53.40°W / 53°W
	II	Zona Ronne-Filchner	73.40 / 74.30	44.30°W / 25.20°W
Setor Oceano Índico	III	Zona Terra de Enderby	67.60 / 68.10	43.30°E / 31.50°E
	IV	Zona Baía Prydz	66.30 / 66.60	79.70°E / 63°E
Setor Oceano Pacífico Oeste	V	Zona Terra de Wilkes	65.10 / 65.10	113.40°E / 126.50°E
	VI	Zona Terra de Adelie	65.10 / 66	137°E / 150.10°E
Setor Mar de Ross	VII	Zona Plataforma de Ross	74.90 / 76.40	175.60°E / 154.20°E

### 3.4. Definição de águas profundas

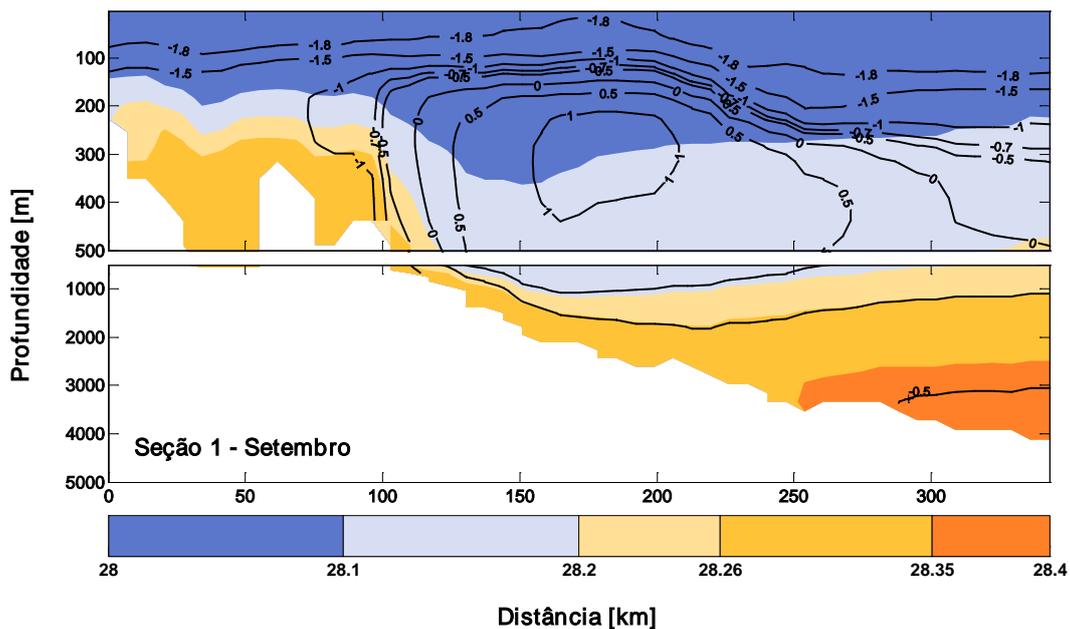
Utilizou-se o conceito de densidade neutra [ $\gamma^n$ ; [Jackett & McDougall 1997](#)] para determinar as superfícies isopícnais entre as diferentes massas de água. A  $\gamma^n$  é uma medida análoga às superfícies de densidade potencial e fornece uma maneira simples para a caracterização da densidade potencial dos oceanos. Esta é uma função da temperatura, salinidade, pressão, longitude e latitude. A dependência espacial da  $\gamma^n$  é obtida para construir superfícies precisas de densidade neutra a partir de banco de dados hidrográficos. O conjunto de dados global é obtido a partir da climatologia global de dados hidrográficos baseada em [Levitus \[1982\]](#), com pequenas modificações para assegurar a estabilidade e a correta representação das águas mais densas dos oceanos. A utilização das superfícies de densidade neutra possui uma acurácia maior do que as superfícies isopícnais normalmente utilizadas. As superfícies de densidade neutra são mais apropriadas para os cálculos e/ou análises executados a partir de modelos oceânicos. Maiores detalhes sobre o algoritmo de cálculo da densidade neutra poderão ser obtidos em [Jackett & McDougall \[1997\]](#).

Neste estudo as massas de água profunda e de fundo<sup>11</sup> de cada região não são diferenciadas entre si. Sendo assim, deste ponto em diante, exceto se outra definição seja esclarecida, a camada de água profunda é definida como aquela que compreende a coluna de água abaixo da  $\gamma^n$  de 28.26 kg m<sup>-3</sup>, ou seja, englobando tanto a camada profunda como a camada de fundo. No talude

---

<sup>11</sup> No oceano Austral, as massas de água que ocupam a camada profunda do oceano (> 1500 m de profundidade) são diferenciadas em águas profundas e de fundo devido às diferentes características hidrográficas e idade apresentadas. Sendo assim, costuma-se separar a coluna de água profunda em camada profunda e camada de fundo, sendo a última aquela que está em contato direto com o fundo oceânico.

continental e na zona oceânica profunda a superfície de  $\gamma^n = 28.26 \text{ kg m}^{-3}$  é equivalente à isoterma de  $0^\circ\text{C}$ , que se aproxima da profundidade de 1500 m (Fig. III-3). Esta camada da coluna de água engloba todas as variedades regionais da AABW [Orsi *et al.* 1999] apesar das diferenças entre os valores locais das propriedades físicas entre cada área fonte do oceano Austral [Whitworth *et al.* 1998]. Adicionalmente, engloba as águas densas exportadas do mar de Weddell [Naveira Garabato *et al.* 2002b] e encontradas na zona da Confluência Weddell-Scotia [Patterson & Sievers 1980]. Essa camada da coluna de água é bem representada pelo modelo OCCAM ao longo das margens continentais Antárticas.



**Figura III-3.** Climatologia do mês de Setembro do modelo OCCAM 1/12° para o campo de temperatura potencial ( $^\circ\text{C}$ ; isolinhas) e densidade neutra ( $\text{kg m}^{-3}$ ; barra de cores) da Seção 1 do mar de Weddell.

### 3.5. Definição das zonas oceânicas da margem continental Antártica a partir da Anomalia geopotencial

A anomalia geopotencial<sup>12</sup> foi calculada para cada ponto da malha, ao longo das seções selecionadas, utilizando-se os dados simulados de temperatura potencial e salinidade, e integrando-se com relação ao fundo oceânico. O gradiente da anomalia geopotencial foi calculado e utilizado para delimitar as zonas de transição entre as regiões de plataforma continental, talude continental e oceano profundo. A estrutura em forma de “M” presente no gradiente da anomalia geopotencial foi utilizado para definir a região de quebra entre a plataforma continental e o talude continental. O limite em direção ao oceano da plataforma continental foi estipulado como o local em que a estrutura “M” do gradiente de anomalia geopotencial começa a aumentar (e.g. Fig. IV-1a – Cap. IV). O término do talude continental foi definido de acordo com o mínimo no gradiente de anomalia geopotencial, o que corresponde aproximadamente a uma batimetria de 3500 m na maioria das seções. Esta padronização tornou-se necessária devido às diferenças na extensão total entre cada seção (Tab. III-I), permitindo uma melhor comparação entre os resultados, uma vez que, um critério robusto foi utilizado para delimitar as regiões de transição entre as zonas oceânicas rasas e profundas.

---

<sup>12</sup> A quantidade  $dw=Mgdz$  é a quantidade de trabalho realizado (*i.e.* ganho de energia potencial) para elevar uma massa  $M$  em uma distância vertical ( $dz$ ) contra a força de gravidade ( $g$ ; ignorando a fricção). Assim, a quantidade chamada de geopotencial ( $\Theta$ ) é tal que, a mudança de geopotencial ( $d\Theta$ ) sobre uma distância vertical  $dz$  é dada por  $d\Theta=gdz$  ( $J\ kg^{-1} = m^2s^{-2}$ ; *i.e.* ganho de energia potencial por unidade de massa). Integrando esta equação entre os níveis  $z_1$  e  $z_2$  e em termos do volume específico da água do mar (considerando a equação hidrostática) se obtém a anomalia geopotencial.

### 3.6. Cálculo do transporte de volume

Para o cálculo do transporte de volume ( $\phi$ ) utilizou-se as saídas mensais dos campos de velocidade perpendicular a seção hidrográfica. As saídas de velocidade foram rotacionadas para oeste (sentido anti-horário) com um ângulo  $\alpha$  de forma a obter as componentes da velocidade normal ( $v$ ) e paralela à seção hidrográfica (ou batimetria de fundo). Para cada par de estações hidrográficas multiplicou-se a componente da velocidade da corrente normal a seção pela área entre cada par de estações. Esta é obtida a partir da diferença de profundidade das camadas do modelo e da distância ( $\Delta x$ ) entre os pontos da grade (*i.e.* de cada estação). O transporte de volume foi integrado da superfície ( $\eta$ ) ao fundo ( $z$ ) para cada estação, onde

$$\phi = \Delta x \int_z^\eta v_\alpha dz . \quad (1)$$

Assim, valores positivos (negativos) de transporte de volume indicam fluxos de volume no sentido oeste/norte (leste/sul). O transporte de volume ( $\phi_c$ ) para cada seção foi obtido através da soma cumulativa dos valores de  $\phi$  ao longo da seção.

O transporte de volume é expresso em unidades de Sverdrup (Sv), sendo que  $1 \text{ Sv} \equiv 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Considerando-se apenas o transporte da camada profunda ( $\phi_b$ ) abaixo da superfície de  $\gamma^\sigma \geq 28.26 \text{ kg m}^{-3}$  ( $z_1$ ), a Eq. 1 é modificada de forma que:

$$\phi_b = \Delta x \int_z^{z_1} v_\alpha dz . \quad (2)$$

Da mesma forma, o volume cumulativo do transporte de volume da camada profunda ( $\phi_{bc}$ ) é dado pela soma cumulativa dos valores de  $\phi_b$  ao longo da seção.

### 3.7. Cálculo dos parâmetros médios e da temperatura e salinidade média ponderada pelo transporte de volume

Para a determinação do fluxo de transferência profundo da temperatura ( $T^{13}$ ) para  $\gamma^n = 28.26 \text{ kg m}^{-3}$ , foi determinada a temperatura média ponderada pelo transporte de volume ( $T_{TW}$ ) da camada profunda. Esta é dada por

$$T_{TW} = \int_z^{z_1} \phi_b T dz / \int_z^{z_1} \phi_{bc} dz . \quad (3)$$

Da mesma forma, determinou-se a salinidade média ponderada pelo transporte de volume ( $S_{TW}$ ) para determinação do fluxo de transferência profundo da salinidade ( $S$ ) para  $\gamma^n = 28.26 \text{ kg m}^{-3}$ , sendo que

$$S_{TW} = \int_z^{z_1} \phi_b S dz / \int_z^{z_1} \phi_{bc} dz . \quad (4)$$

Dado que o conceito de  $T_{TW}$  e  $S_{TW}$  somente é válido para fluxos unidirecionais, os valores de sinais opostos (*i.e.* negativo em geral) ao sentido principal do transporte de volume foram ajustados para zero para produzir resultados fisicamente significantes. Entretanto, valores de sinais opostos ao sentido principal do transporte de volume de fundo ocorrem, respectivamente, somente em 7.4% e 18% dos dados totais analisados das seções transversais e paralelas as margens continentais (Tab. III-III).

---

<sup>13</sup> O acrônimo T refere-se à temperatura potencial ( $\theta$ ) em todas as fórmulas descritas, sendo utilizado para evitar possíveis confusões.

**Tabela III-III.** Percentual de dados negativos (N) nas séries do transporte de volume da camada de fundo para cada seção hidrográfica e para cada setor do oceano Austral. O número total de dados de cada seção é igual a 204 (*i.e.* médias mensais para os 17 anos simulados).

Seção	N	% por Seção	% por Setor
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	0
4	6	3	0.25
5	0	0	0
6	0	0	0
7	3	1.5	0.5
8	54	26	9
9	22	11	4
10	0	0	0
11	83	40	14
12	24	12	4
13	16	8	2
14	6	3	0.7
15	10	5	1.2
16	18	9	2.2
I	4*	2	1
II	39	19	9.5
III	118	58	29
IV	48	24	12
V	3	1.5	0.7
VI	9	4	2.2

\*Valor referente aos dados positivos, visto que o fluxo principal nesta região tem sentido para leste.

Ao invés de uma simples média de temperatura e salinidade, os valores de  $T_{TW}$  e  $S_{TW}$  são mais representativos para a camada de água profunda considerada. Isto se deve ao fato de que a temperatura e salinidade das águas profundas são fortemente ponderadas nos locais de transporte máximo. Alterações do transporte de volume total não influenciam diretamente os cálculos de  $T_{TW}$  e  $S_{TW}$ , mas podem alterar o perfil do transporte [e.g. [Tillinger & Gordon 2010](#)].

A temperatura média ( $\bar{T}$ ), salinidade média ( $\bar{S}$ ), velocidade perpendicular média ( $\bar{v}$ ), densidade neutra média ( $\bar{\gamma}^n$ ) e o transporte de volume médio ( $\overline{\phi_{bc}}$ ) da camada profunda foram determinados de acordo com a equação

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_{(i)} ; \quad (5)$$

sendo que a incógnita  $A$  refere-se ao respectivo parâmetro, onde  $n$  é o número total de observações simuladas a partir da superfície de  $\gamma^n = 28.26 \text{ kg m}^{-3}$ . Para a construção das séries temporais dos parâmetros de cada seção hidrográfica foi utilizado o valor médio mensal obtido para cada parâmetro, de acordo com a equação:

$$\overline{A(t)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{A}_{(i)} ; \quad (6)$$

onde  $N$  corresponde aos valores médios de cada escala de tempo  $t_i$  (*i.e.* mês). Os valores médios dos parâmetros representativos de cada seção foram obtidos a partir da média (Eq. 7) dos valores médios mensais (Eq. 8).

A tendência das séries temporais foi obtida a partir de um ajuste linear de mínimos quadrados. Embora a investigação das tendências esteja fora do escopo deste trabalho, o teste estatístico *t-Student* foi aplicado para a verificação das tendências significativas ao longo do tempo (Apêndice I).

### 3.8. Diagrama de Taylor

Para a avaliação da representação das propriedades físicas na simulação do OCCAM 1/12<sup>o</sup> utilizou-se o diagrama de Taylor [Taylor 2001]. O diagrama de Taylor fornece um resumo estatístico conciso sobre como os padrões estatísticos se ajustam uns aos outros em termos da correlação ( $R$ ), da diferença centrada do erro médio quadrático ( $CRMSD$ ) e da razão de suas variâncias ( $\sigma_{norm}$ ). Desta forma, é possível uma análise do desempenho do modelo analisado em reproduzir a hidrografia observada nas margens

continentais. As equações dos parâmetros estatísticos são indicadas abaixo, sendo  $x$  referente aos dados observados e  $y$  aos dados simulados, a barra indicando as médias,  $N$  o número total de dados e  $\sigma$  o desvio padrão. Sendo assim:

$$R = \frac{\frac{1}{N}\sum((x-\bar{x})(y-\bar{y}))}{\sigma_x\sigma_y}; \quad (7)$$

$$CRMSD = \sqrt{\frac{1}{N}\sum((y-\bar{y})(x-\bar{x}))^2}; \text{ e} \quad (8)$$

$$\sigma_{\text{norm}} = \sigma_y/\sigma_x ; \quad (9)$$

sendo que,

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N}\sum(x-\bar{x})^2}; \text{ e} \quad (10)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{1}{N}\sum(y-\bar{y})^2}. \quad (11)$$

Devido à pouca amostragem de algumas regiões, tanto espacial como temporalmente, os dados do WOD05, dentro de um retângulo de 2° de longitude centrado sobre as seções de exportação, foram selecionados para comparação com a simulação do OCCAM 1/12°. Desta forma, foi possível elaborar uma climatologia para quase todas as seções de exportação analisadas. Foram exceções as áreas das Seções 15-18 e 20, que apresentavam uma amostragem insuficiente e, portanto, não foram utilizadas. Ressalta-se que, para a comparação da climatologia simulada com a climatologia observada, não foi levado em consideração o período de amostragem e que todos os dados disponíveis dentro da área de 2° x 2° foram ajustados para integrar a climatologia observada. Esta foi posteriormente utilizada para avaliação do modelo. Outras informações relativas à

interpretação do diagrama de Taylor e à representação hidrográfica nas margens continentais Antárticas são abordadas no Capítulo IV.

### 3.9. Análise de correlação cruzada

A análise de correlação cruzada foi realizada entre as séries temporais de anomalias do transporte cumulativo da camada profunda  $[x(t)]$  e as séries temporais de anomalias da temperatura potencial ou salinidade média  $[y(t)]$  determinada para as camadas de profundidade representativas das águas-fonte da AABW (ver Capítulo IV). O coeficiente de correlação entre as séries temporais é dado por:

$$r_{xy} = \frac{cov(x,y)}{s_x s_y}; \quad (12)$$

onde  $cov(x, y)$  é a covariância da amostra entre  $x(t_i)$  e  $y(t_i)$ , de forma que:

$$cov(x, y) = \frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n [(x(t_i) - \bar{x})(y(t_i) - \bar{y})]; \quad (13)$$

sendo a média temporal de  $x(t_i)$  dada pela equação

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x(t_i), \quad (14)$$

o desvio-padrão de  $x(t_i)$  igual a  $s_x$  e a variância representada por:

$$s_x^2 = \frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n [(x(t_i) - \bar{x})^2]. \quad (15)$$

Após a remoção do ciclo anual (*i.e.* médias mensais), da tendência linear da série temporal e da aplicação do filtro passa-baixa para remoção das frequências inferiores a 12 meses, assumimos que:

$$x'(t_i) = x(t_i) - \bar{x}; \quad (16)$$

sendo que  $x'$  representa a série de anomalia dos parâmetros. Assim, o coeficiente de correlação passa a ser representado por:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n [x'(t_i) y'(t_i)]}{[\sum_{i=1}^n (x'(t_i))^2]^{1/2} [\sum_{i=1}^n (y'(t_i))^2]^{1/2}} \cdot \quad (17)$$

O desvio padrão no denominador de  $r_{xy}$  (Eq. 17) normaliza a covariância, de forma que o coeficiente encontra-se entre -1 e 1. As séries são perfeitamente correlacionadas para  $r_{xy} = 1$  e anti-correlacionadas para  $r_{xy} = -1$ . Para  $r_{xy} = 0$  não existe relação linear entre as séries temporais, ou seja, as séries não são correlacionadas. Ressalta-se que as correlações não implicam necessariamente uma causa/efeito e fornecem apenas informação sobre associações entre as séries temporais em questão.

### 3.10. Espectros de ondeletas<sup>14</sup>

A transformada de ondeletas foi aplicada nas séries temporais do transporte de volume cumulativo das águas profundas. O ciclo anual e a tendência linear das séries temporais do transporte de volume foram removidos antes da aplicação da transformada de ondeletas. A remoção do ciclo anual foi realizada a partir da subtração das médias climatológicas mensais, permitindo investigar a variabilidade em outras frequências. A tendência linear das séries foi também removida, visto que esta poderia estar sendo originada devido à deriva do modelo e, desta forma, contaminando os períodos de variabilidade a serem investigados.

<sup>14</sup> A tradução para português do termo inglês "wavelets" ainda não possui uma forma padrão, podendo ser tanto ondeletas como ondaletas.

A análise de ondeletas possui certas vantagens sobre a transformada de Fourier (FT) utilizada na análise espectral e sobre as técnicas de janelamento da FT [Lau & Weng 1995]. Duas questões são solucionadas com a aplicação da transformada de ondeletas, comparativamente com a aplicação da FT e/ou técnicas de janelamento: (i) tratamento inconsistente para diferentes frequências e (ii) localização temporal da frequência. A análise do espectro de ondeletas revela não somente os modos dominantes de variabilidade, mas também como estes variam no tempo. Isto ocorre por que a transformada de ondeletas informa tanto a amplitude de qualquer sinal periódico da série temporal como a variação desta amplitude no tempo.

As ondeletas podem ser definidas como “pacotes” de ondas de duração finita e com uma frequência específica, que são usadas como uma “janela” para a análise da variância. A ondeleta mãe (*mother wavelet*) escolhida foi a função Morlet com comprimento de onda igual a 6 ( $\omega_0=6$ ), que consiste numa onda modulada pela função Gaussiana [Farge 1992]. A ondeleta mãe fornece o número de oscilações que será utilizado na análise. A escolha da função Morlet deve-se: (i) à sua maior aplicabilidade em outros estudos e (ii) ao melhor ajuste desta ondeleta às séries temporais analisadas [Torrence & Compo 1998]. As escalas usadas para a transformada de ondeletas foram:

(i) a menor escala ( $s_0$ ) resolvível, que é dada por:

$$s_0 = 2\delta t ; \tag{18}$$

onde  $\delta t$  equivale ao intervalo temporal (*i.e.* neste estudo 1/12 anos).

(ii) o comprimento da escala ( $\delta_j$ ) igual a 0.125 – *i.e.* espaçamento entre as escalas discretas. A escolha de pequenas escalas depende do comprimento do espaço espectral da função de ondeleta. Diferentes valores de  $\delta_j$  variando entre 0.1 e 0.5 foram testados na análise. Para a ondeleta de Morlet o máximo valor de  $\delta_j$  que permite uma amostragem adequada é de 0.5, sendo que valores menores fornecem uma melhor resolução [Torrence & Compo 1998], explicando o valor escolhido.

(iii) a máxima escala ( $J$ ) é dada por:

$$J = \delta_j - 1 \log_2 (N\delta t/s_0) ; \quad (19)$$

fornecendo um total de 54 escalas variando de 0.16 até 17 anos.

O cone de influência foi determinado baseado nos processos de ruído vermelho (*red-noise*) com coeficiente de defasagem (*lag-1*) igual a 0.72 [Gilman *et al.* 1963]. Este indica as regiões do espectro de ondeletas em que os efeitos de margem são considerados relevantes e/ou onde os resultados são relativamente duvidosos devido ao preenchimento final das séries temporais com zeros (*zero padding*). Os gráficos de ondeletas apresentados mostram os resultados da energia na forma de logaritmo de base 2. Maiores detalhes para a aplicação da transformada de ondeletas são obtidos em Torrence & Compo [1998]<sup>15</sup>.

### 3.11. Mapas de composição (*composite analysis*)

Para a elaboração dos mapas de composições, foram determinados os períodos em que ocorreram eventos de máximo e mínimo transporte de volume

---

<sup>15</sup> <http://paos.colorado.edu/research/wavelets/>

das águas profundas a partir das séries temporais de anomalias do transporte de volume das águas profundas. Os períodos de máximo e mínimo transporte correspondem, respectivamente, a um desvio padrão superior ou inferior à média. Desta forma, todos os meses da série temporal acima ou abaixo do desvio padrão foram utilizados para elaborar os mapas de composições médios para determinados parâmetros (*e.g.* concentração e espessura do gelo marinho, componentes zonal e meridional do estresse do vento). Os mapas de diferenças de composições correspondem à subtração (*i.e.* diferenças) entre os mapas de composições elaborados para os períodos de máximo e mínimo transporte de volume da AABW.

## Capítulo IV: Representação da simulação do modelo oceânico global OCCAM 1/12°

A validação das simulações obtidas por modelos oceânicos é uma difícil tarefa a ser executada. Isto se deve, muitas vezes, à escassez de medições hidrográficas para determinadas regiões oceânicas do globo. As regiões oceânicas profundas (profundidade > 3000 m) e o oceano Austral são dois típicos exemplos onde a amostragem espaço-temporal ainda não é satisfatória, mesmo com todos os atuais esforços da comunidade científica. As dificuldades ocorrem não somente devido às questões prioritárias de cada nação e/ou ao interesse científico na exploração de determinada região, mas também devido às dificuldades de acesso local e de logística (e.g. difícil navegação durante os meses de inverno devido à grande extensão latitudinal atingida pela cobertura de gelo marinho). A seguir, as seções hidrográficas simuladas e selecionadas para estudo são descritas e comparadas com os dados observados históricos disponíveis e com a literatura existente.

Espera-se, com esta análise, proporcionar uma medida da robustez do modelo OCCAM no que diz respeito à representação dos processos oceânicos e da hidrografia da margem continental Antártica, objeto principal deste estudo.

#### **4.1. Seções hidrográficas simuladas**

##### *4.1.1. Seções hidrográficas transversais às margens continentais*

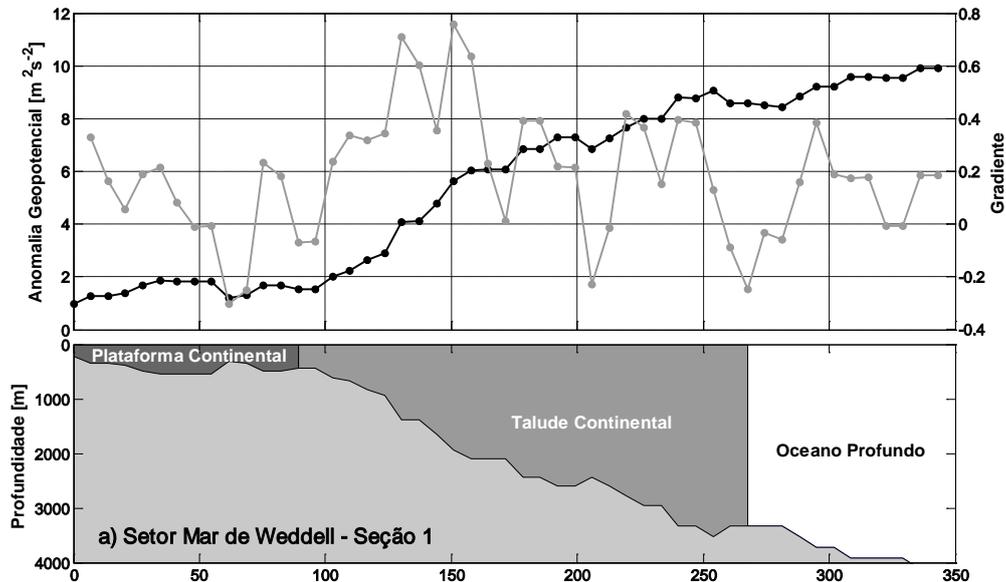
A figura IV-1 mostra o perfil batimétrico e a subdivisão em áreas de plataforma continental, talude continental e oceano profundo de todas as seções transversais às margens continentais Antárticas (Fig. III-1 – Cap. III). Estas são denominadas a partir deste ponto como seções de exportação<sup>1</sup> da AABW. A plataforma continental é definida como a continuação submersa da topografia e geologia visíveis do continente, o talude continental refere-se à inclinação que se segue à plataforma, e o oceano profundo é a zona oceânica sobre a planície abissal [Wright & Rothery 1998]. A região limite entre a plataforma e o talude continental marca a quebra da plataforma continental.

Dois tipos principais de quebra entre a plataforma continental e o talude continental (*shelf-break region*) são observados no entorno do continente Antártico: (i) plataformas continentais amplas com um declive suave ao longo do talude continental e (ii) plataformas continentais curtas seguidas por um abrupto declive do talude continental em direção ao oceano profundo. De modo geral, o primeiro caso se aplica às seções ao longo da costa leste da Península Antártica no Setor Mar de Weddell e no interior do Setor Mar de Ross (Fig. III-1 – Cap. III), enquanto, o segundo caso é observado nas seções na região leste

---

<sup>1</sup> Embora todas as seções transversais às margens continentais sejam referenciadas como seções de exportação, apenas as Seções 1, 10 e 13 (ver Fig. III-1 - Cap. III) referem-se às áreas de exportação para os oceanos globais. Para as demais seções, o termo seção de exportação refere-se a exportação lateral que ocorre ao longo das margens antárticas.

do Setor Mar de Weddell e nos Setores Oceano Índico e Oceano Pacífico Oeste (Fig. III-1 – Cap. III). A tabela IV-I sintetiza as características principais de cada seção hidrográfica e de cada zona oceânica, informando a extensão total das seções de exportação analisadas.



**Figura IV-1.** (a-t) Perfil batimétrico (cinza claro) representado pelo modelo OCCAM 1/12° e divisões das zonas oceânicas para as seções hidrográficas transversais às margens continentais Antárticas selecionadas nos respectivos setores do oceano Austral (Fig. III-1), conforme indicado. Painel superior: anomalia geopotencial (linha preta) e gradiente da anomalia geopotencial (linha cinza). Painel inferior: zonas diferenciadas de acordo com a coloração, *i.e.* plataforma continental (cinza escuro), talude continental (cinza) e oceano profundo (branco).

#### 4.1.2. Seções hidrográficas paralelas às margens continentais

A figura IV-2 mostra o perfil batimétrico de todas as seções paralelas à isóbata de 1000 m ao longo das margens continentais Antárticas (Fig. III-2 – Cap. III). Estas são denominadas a partir deste ponto como seções de produção da AABW. Os principais cânions submarinos, por onde ocorre o escoamento da AABW para as bacias regionais do oceano Austral, são indicados para cada seção de produção. A localização dos cânions submarinos é aproximada e baseada na carta batimétrica do oceano Austral N°5.18 (ver § na bibliografia), assim como, a nomenclatura de cada cânion utilizada.

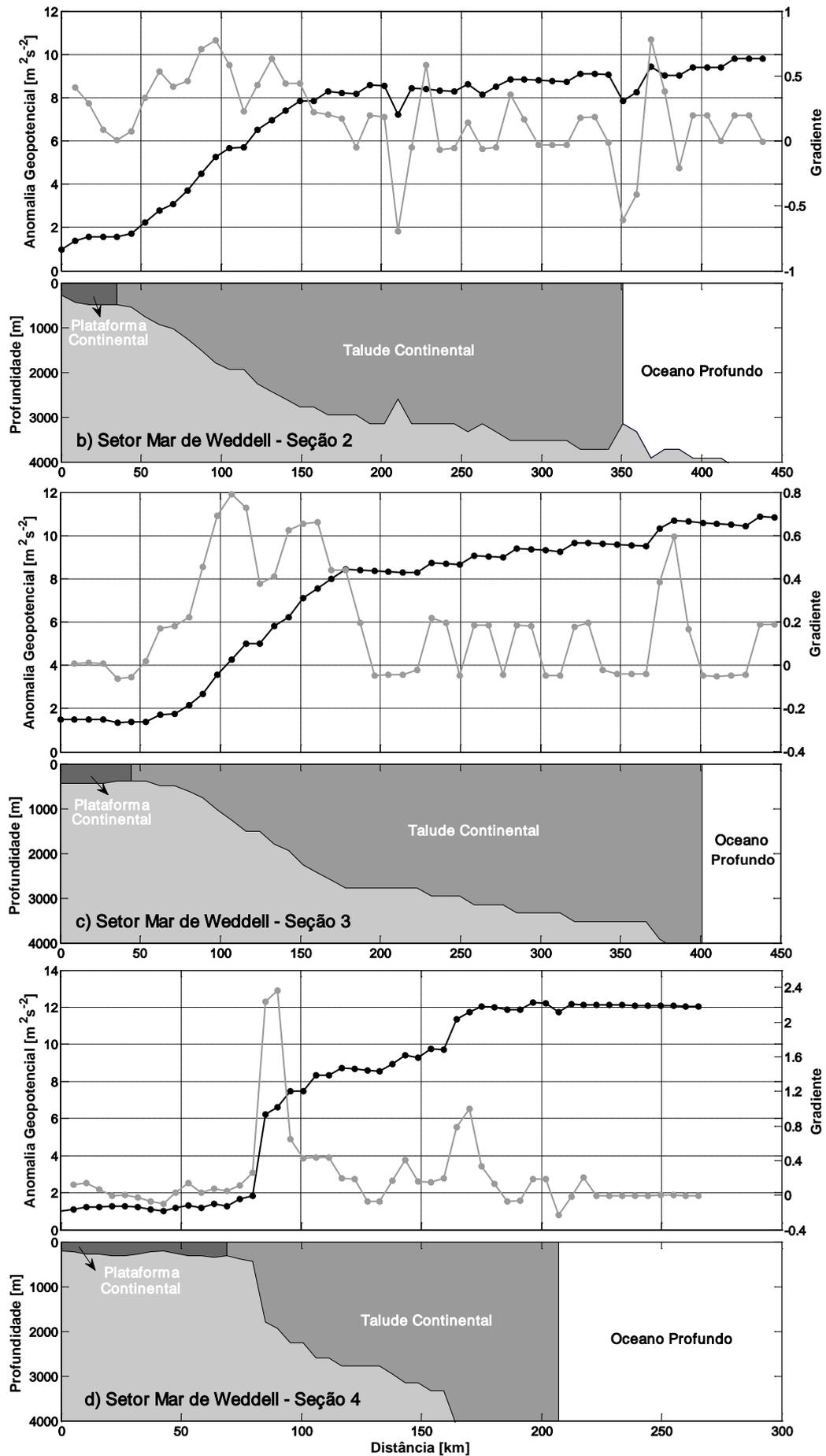


Figura IV-1. Continuação.

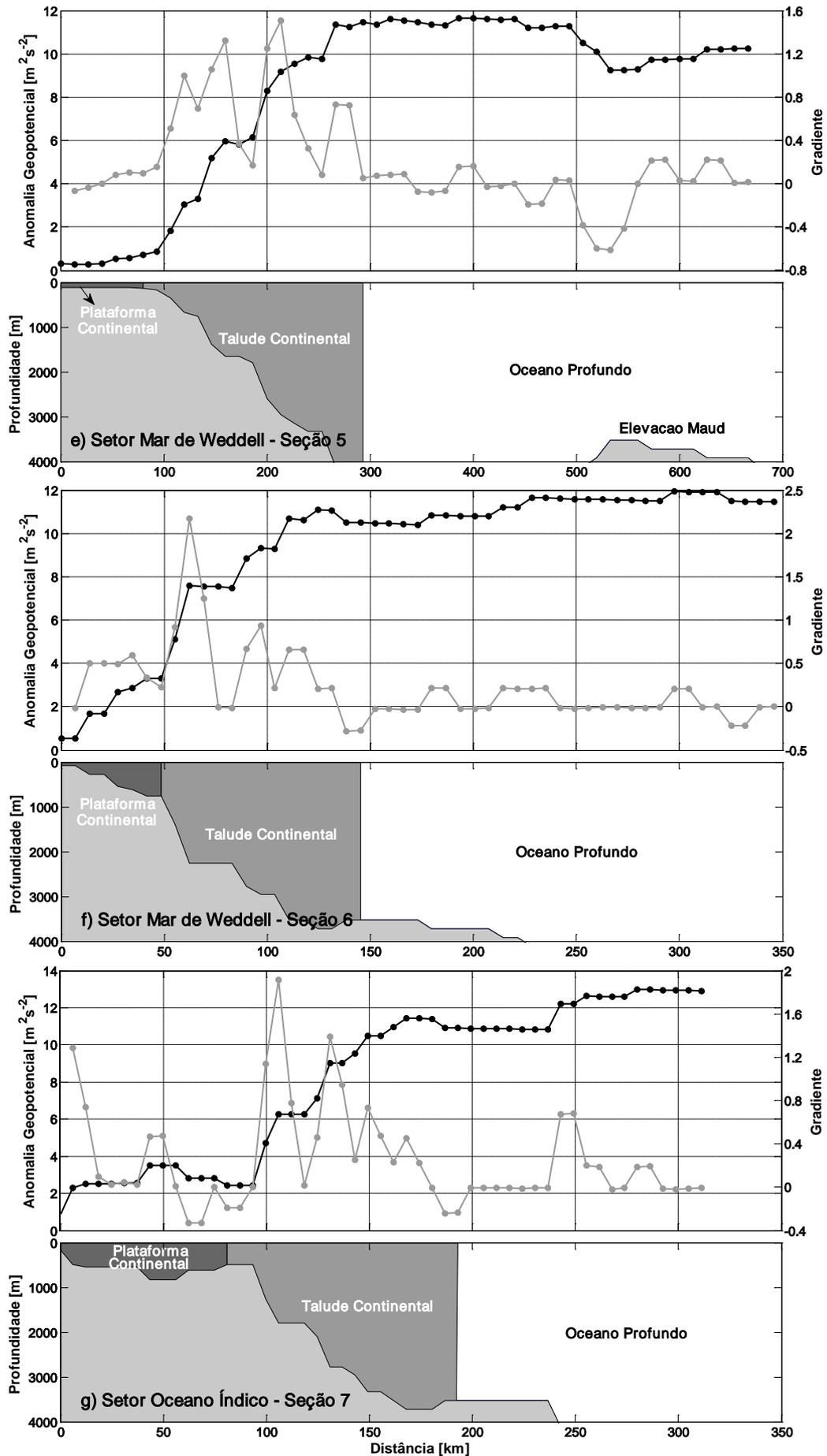


Figura IV-1. Continuação.

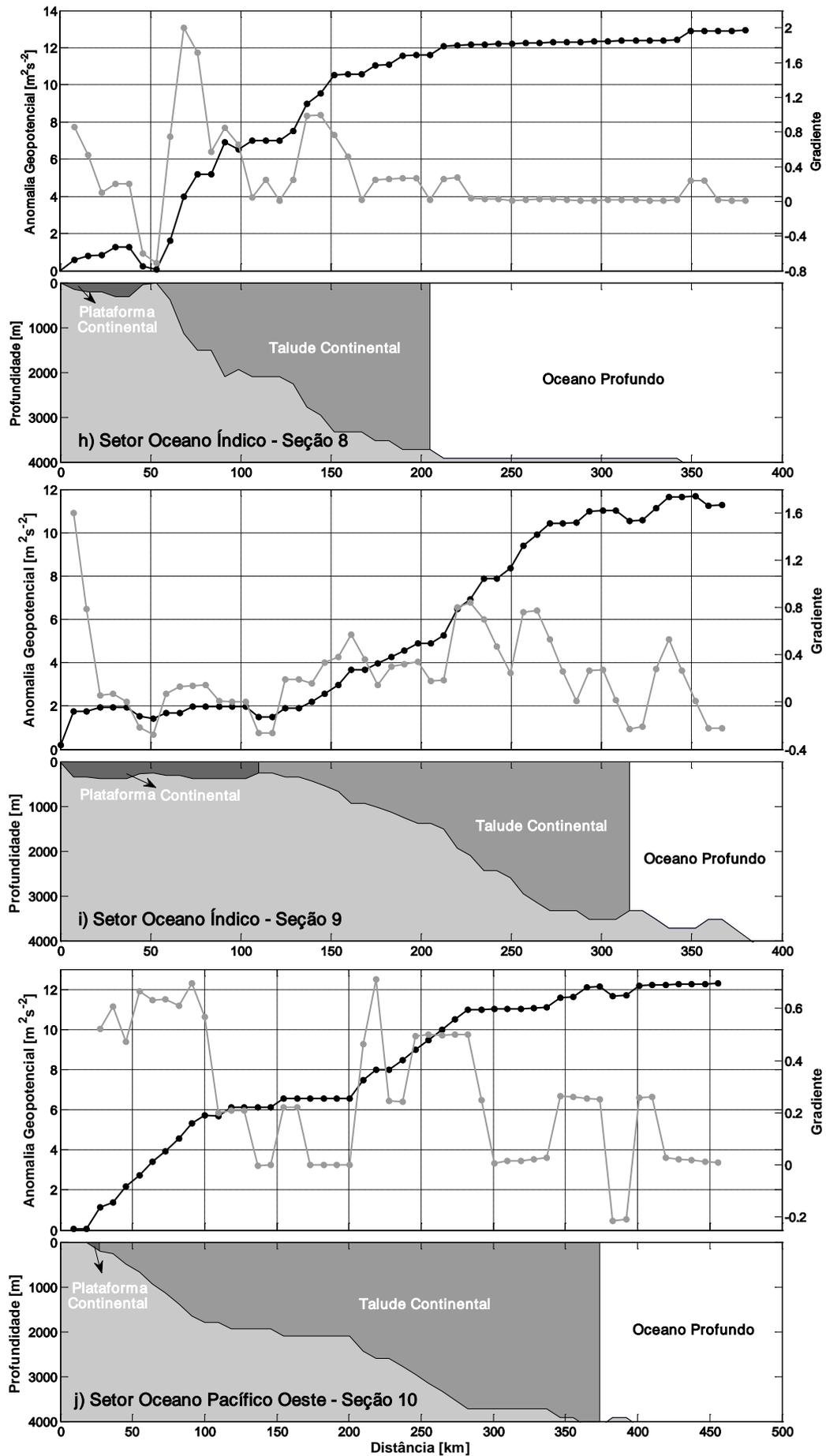


Figura IV-1. Continuação.

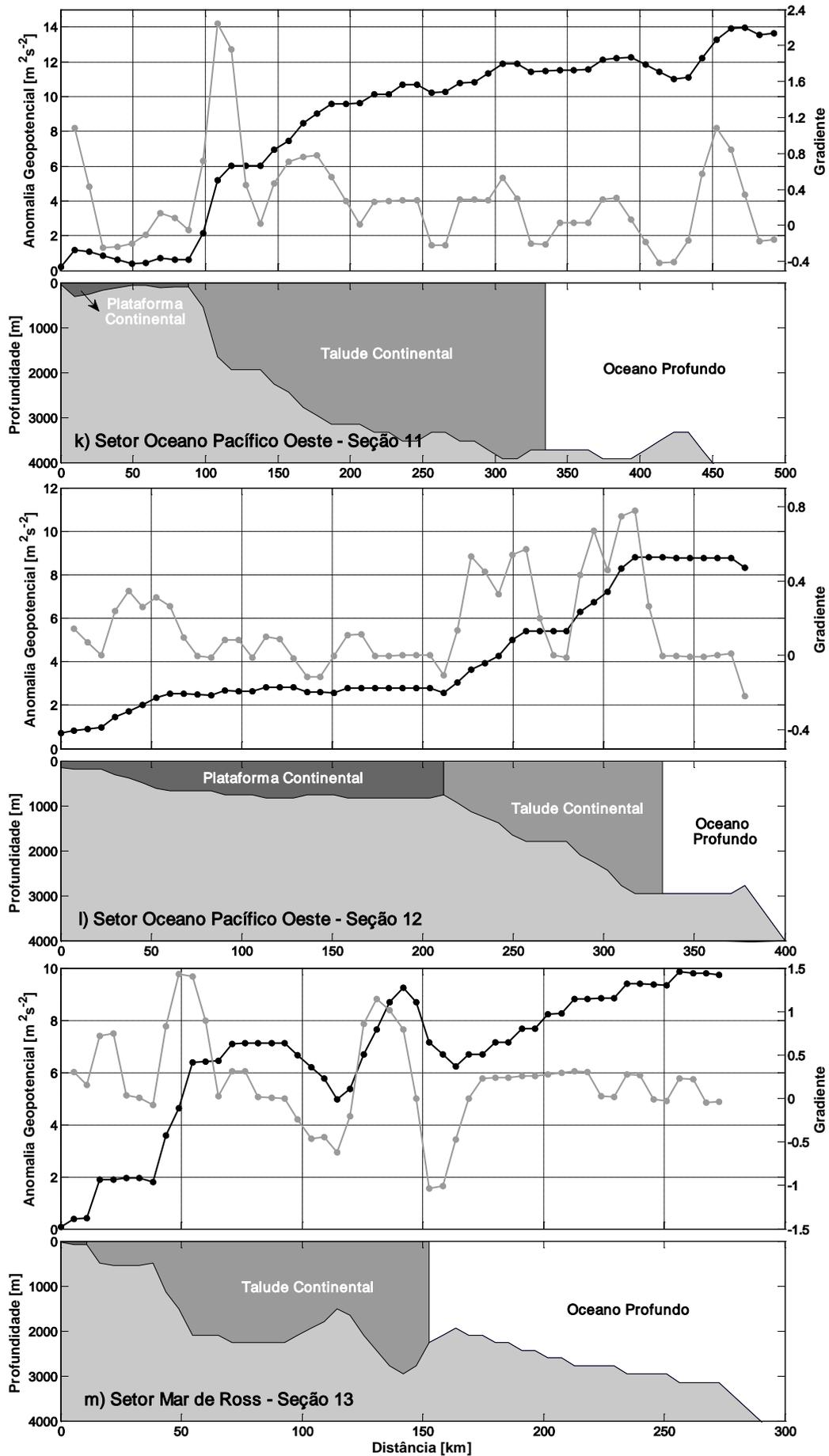


Figura IV-1. Continuação.

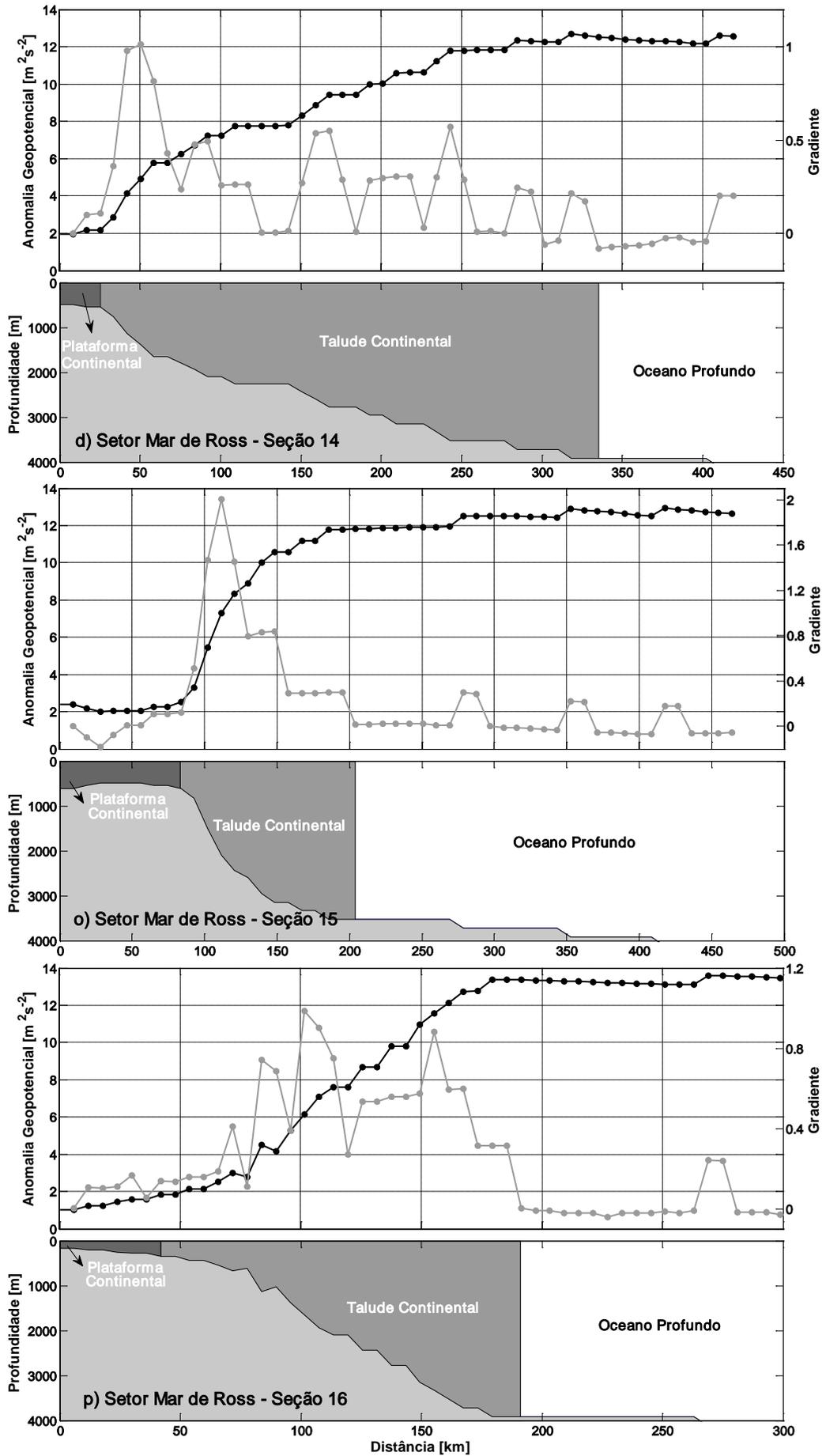


Figura IV-1. Continuação.

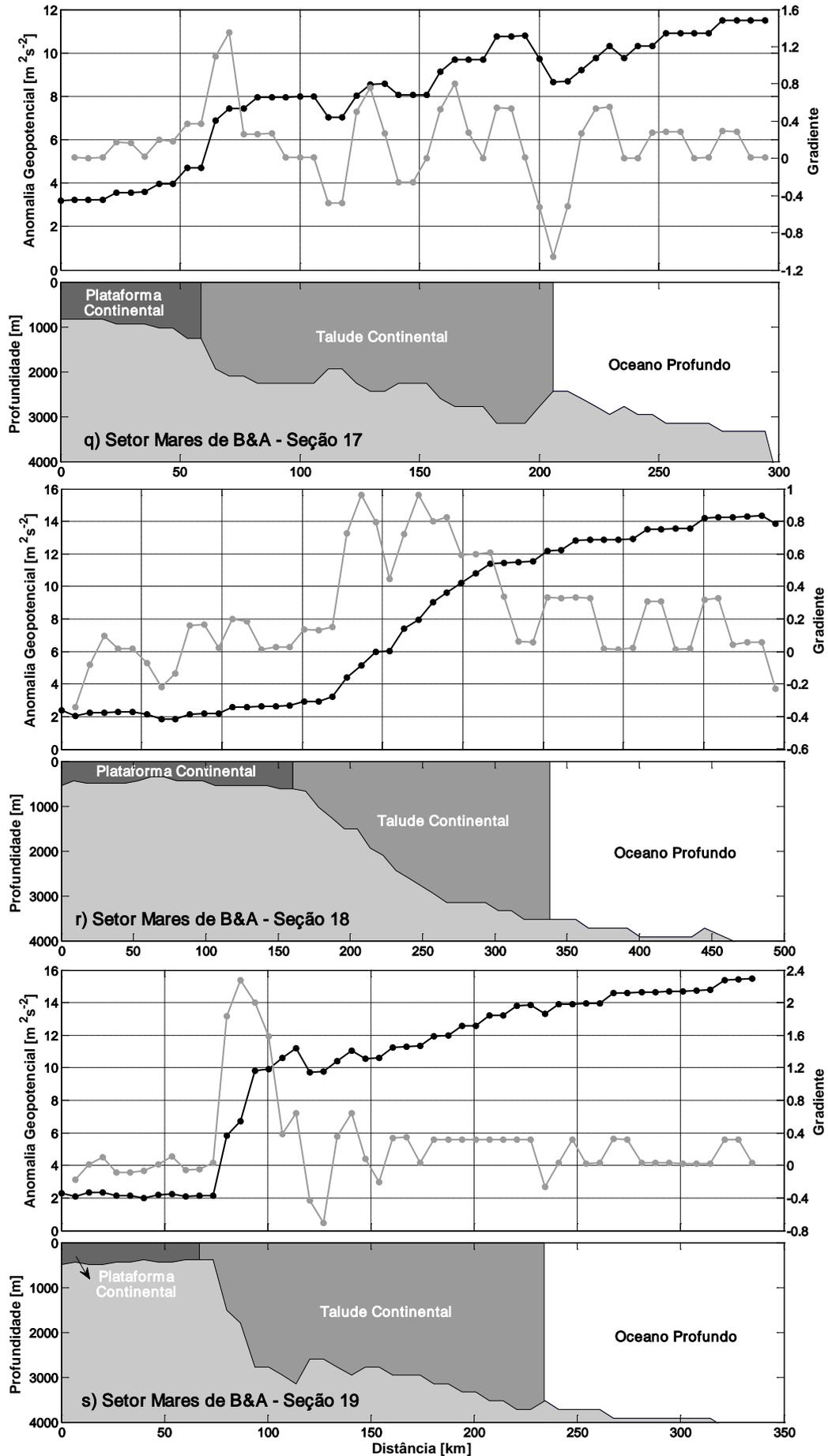


Figura IV-1. Continuação.

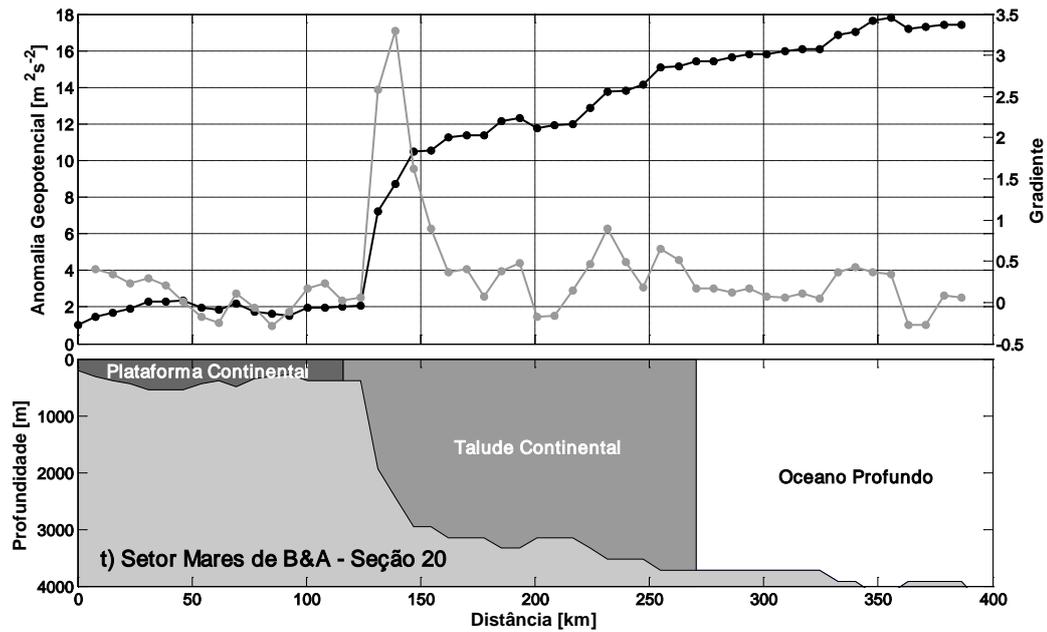


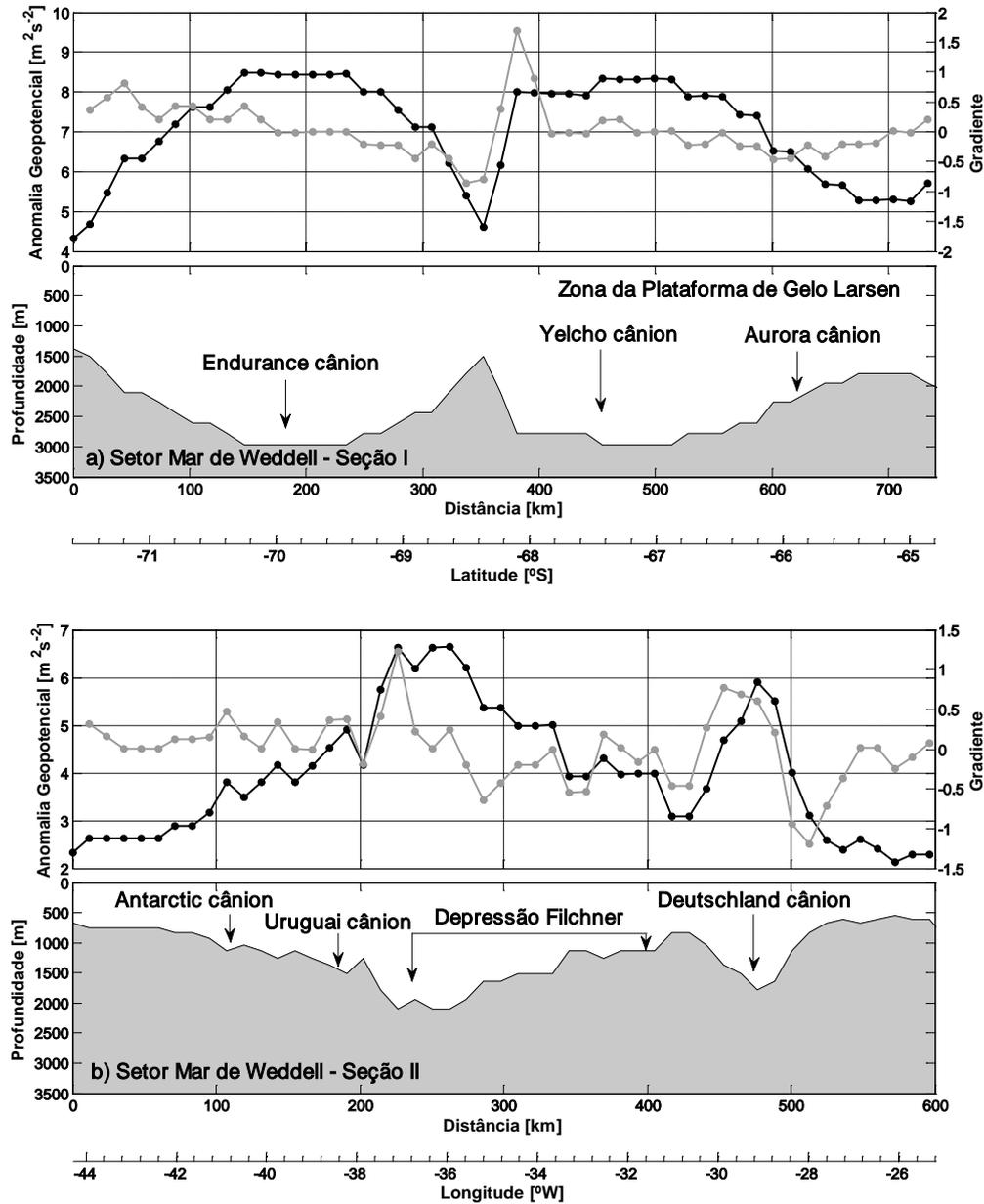
Figura IV-1. Continuação.

Tabela IV-I. Extensão total das zonas oceânicas das seções de exportação (i.e. 1-20) e produção (i.e. I-VII) simuladas pelo modelo OCCAM 1/12° e distância entre as estações da grade do modelo ao longo da seção.

Setor Oceânico	Seção N°	Extensão Plataforma Continental* [km]	Extensão Talude Continental [km]	Extensão Total [km]	Distância entre as estações [km]
Setor Mar de Weddell	1	89	178	343	6.87
	2	35	315	438	8.77
	3	44	356	446	8.92
	4	69	138	265	5.31
	5	80	213	666	13.33
	6	48	97	346	6.92
	I	**	**	734	14.67
Setor Oceano Índico	II	**	**	596	11.92
	7	81	112	311	6.22
	8	53	152	380	7.59
	9	110	201	367	7.33
	III	**	**	497	9.93
Setor Oceano Pacífico Oeste	IV	**	**	740	14.8
	10	27	374	456	9.11
	11	89	246	492	9.85
	12	211	120	350	7.0
Setor Mar de Ross	V	**	**	612	12.24
	13	11	142	273	5.46
	14	26	336	419	8.38
	15	83	121	464	9.28
	16	42	149	299	5.98
Setor Mares de B&A	VII	**	**	609	12.17
	17	59	147	294	5.88
	18	160	178	445	8.90
	19	67	167	334	6.69
	20	116	154	386	7.73

\*a extensão total da plataforma continental refere-se à posição inicial definida para a seção.

\*\*sem relação, seções de produção ao longo das margens continentais Antártica na isóbata de 1000 m.



**Figura IV-2.** (a-g) Perfil batimétrico (cinza claro) representado pelo modelo OCCAM 1/12° e principais cânions oceânicos presentes nas seções hidrográficas paralelas às margens continentais Antárticas selecionadas nos respectivos setores do oceano Austral (Fig. III-2), conforme indicado. Painel superior: anomalia geopotencial (linha preta) e gradiente da anomalia geopotencial (linha cinza). Painel inferior: batimetria de fundo.

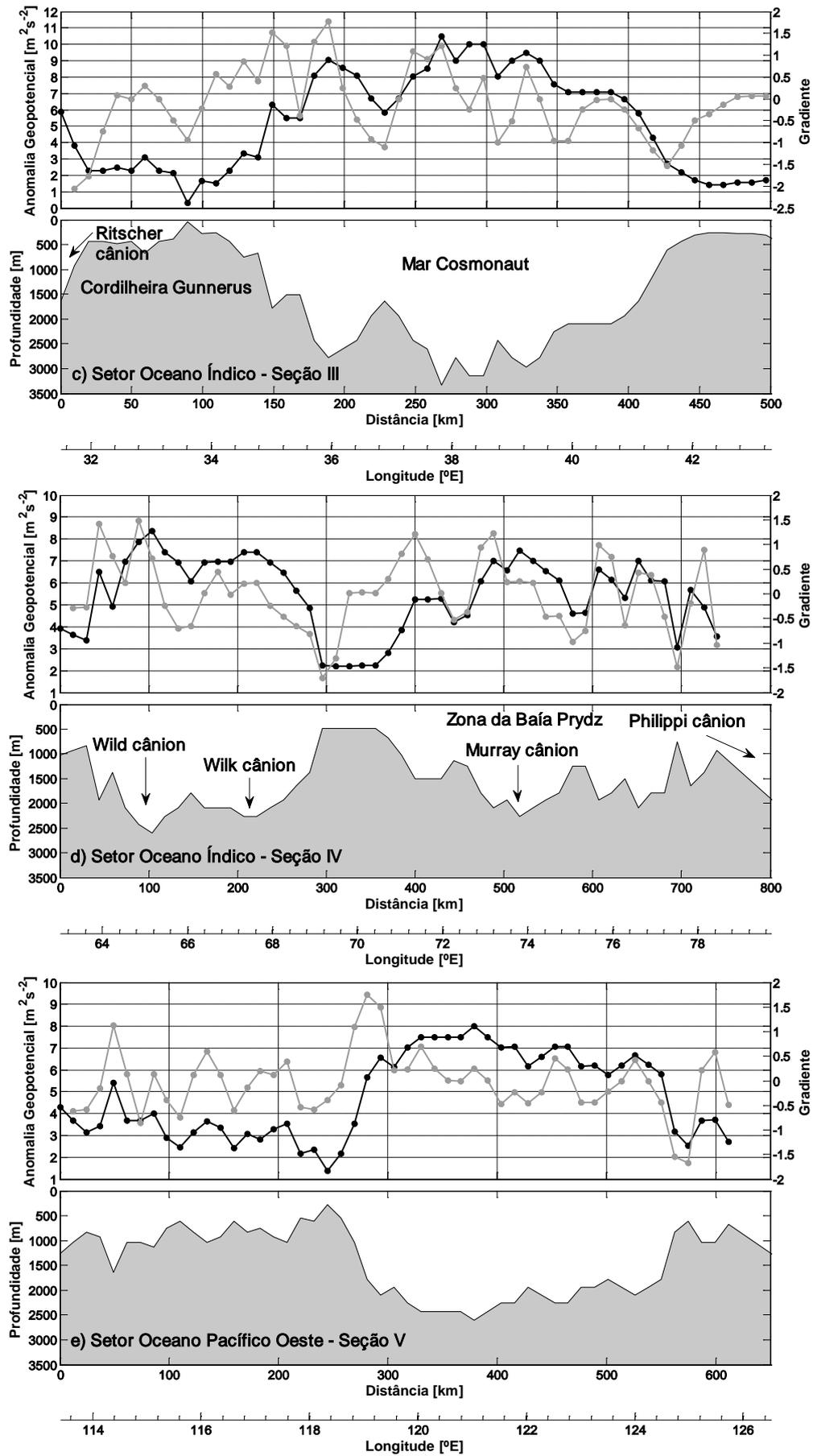


Figura IV-2. Continuação.

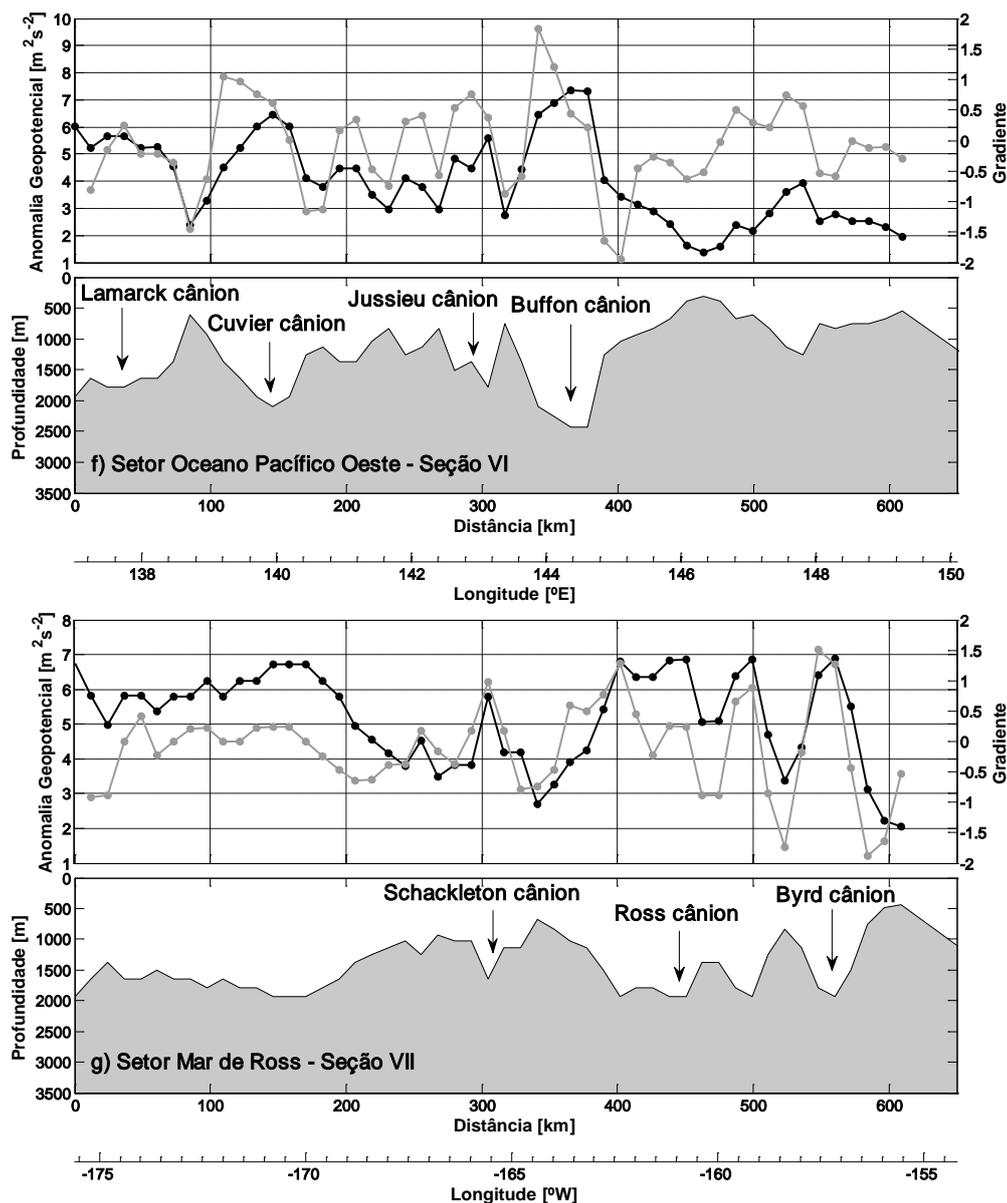


Figura IV-2. Continuação.

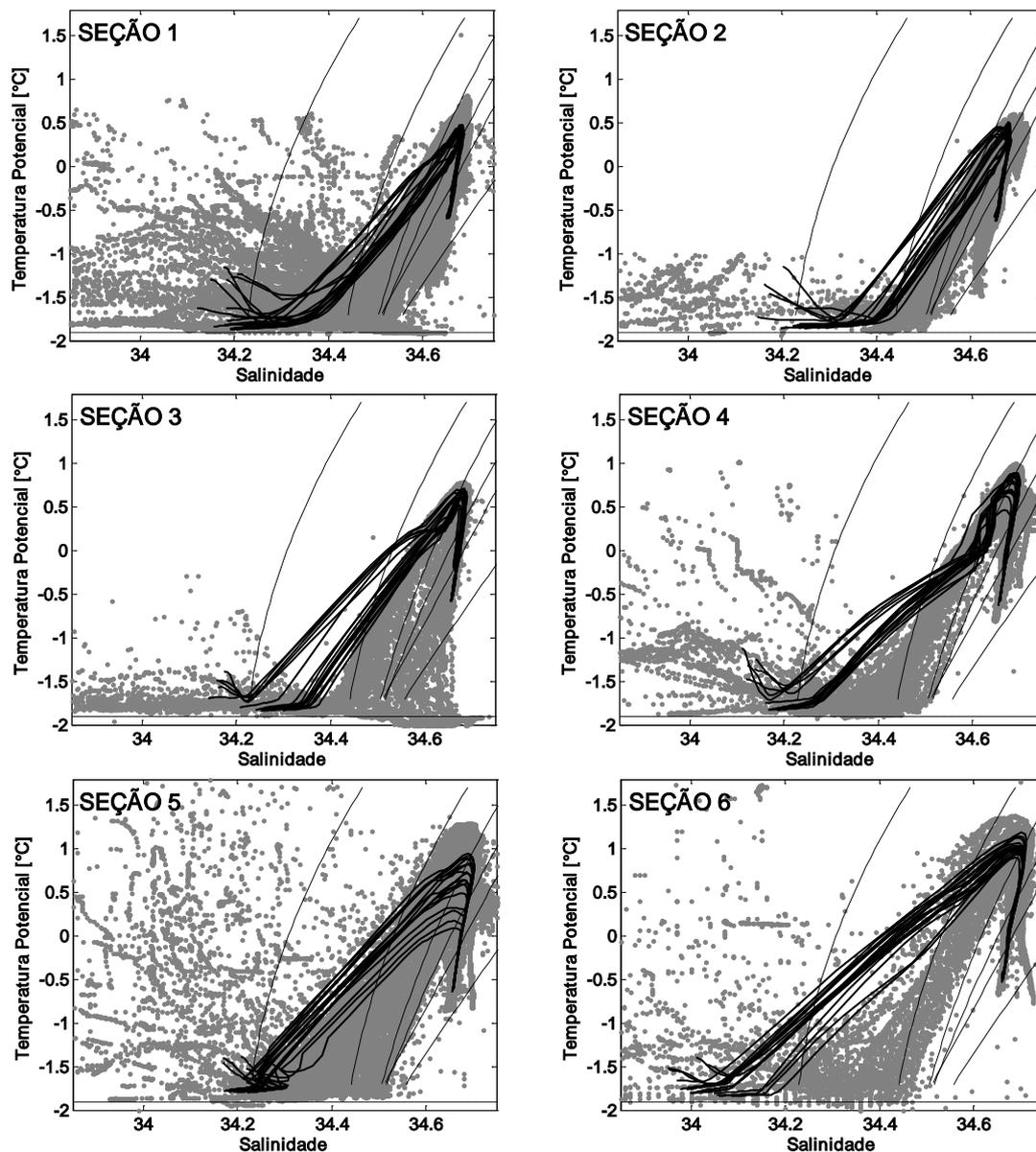
#### 4.2. Massas de água

Os diagramas temperatura potencial-salinidade ( $\theta S$ ) de cada seção hidrográfica (Fig. IV-3, IV-7 e IV-11) mostram como as massas de água regionais estão sendo representadas pelo modelo OCCAM ao longo das margens continentais Antárticas. De forma qualitativa, o padrão da hidrografia regional e da estrutura de massas de água das margens continentais ao redor do continente Antártico está sendo bem representado (Figs. IV-3, IV-7 e IV-11).

Os anos utilizados, referentes aos dados observados provenientes do WOD05 utilizados para a elaboração dos diagramas  $\theta S$  e para as comparações estatísticas nos diagramas de Taylor, são indicados no Apêndice II. As médias e os desvios das climatologias dos parâmetros observados e simulados são também mostrados no Apêndice II. Para a validação e comparação entre a hidrografia simulada e observada, as seguintes camadas da coluna d'água foram consideradas: (i) camada superficial com  $\gamma^n < 28 \text{ kg m}^{-3}$ , (ii) camada intermediária entre  $28.0 \leq \gamma^n < 28.26 \text{ kg m}^{-3}$  e (iii) camada profunda com  $\gamma^n \geq 28.26 \text{ kg m}^{-3}$ . Para esta validação, não se fez distinção entre as diferentes zonas oceânicas ao longo das margens continentais.

Antes da apresentação e discussão dos resultados, segue uma breve introdução sobre a interpretação do diagrama de Taylor.

O diagrama de Taylor tem por objetivo quantificar o quão próximo um campo de teste aproxima-se de um campo de referência [e.g. Renner *et al.* 2009]. No escopo deste trabalho, o campo de teste refere-se às propriedades simuladas pelo modelo OCCAM, enquanto o campo de referência se refere aos dados reais obtidos do WOD05. Os valores estatísticos são ilustrados em um gráfico em projeção polar (e.g. Fig. IV-4), onde “R” indica o valor de referência (*i.e.* aos dados observados) e os demais pontos os valores simulados. A distância radial a partir da origem nas abscissas  $x$  e  $y$  indica o desvio padrão. A posição azimutal indica o coeficiente de correlação entre os dois campos em comparação. As linhas tracejadas medem a distância a partir do ponto de referência, indicando o erro médio quadrático central (*i.e.* CRMSD).



**Figura IV-3.** Diagrama  $\theta S$  dos (pontos cinza) dados observados do WOD05 e das (linhas pretas) médias anuais simuladas pelo modelo OCCAM 1/12° no Setor Mar de Weddell para as seções de exportação indicadas. As linhas tracejadas referem-se respectivamente às isolinhas de densidade neutra de 27.8, 28, 28.1, 28.27 e 28.40  $\text{kg m}^{-3}$ . A linha pontilhada indica o ponto de congelamento da água do mar.

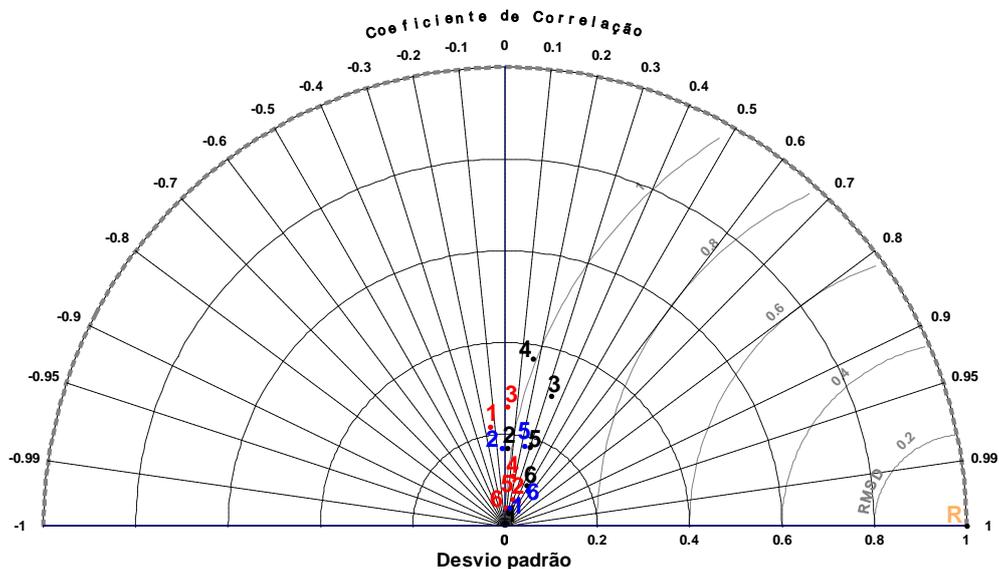
Os seguintes parâmetros hidrográficos foram comparados entre modelo e observação:  $\theta$ , S e  $\gamma^n$ . Devido às diferentes unidades de medida dos parâmetros hidrográficos considerados, os parâmetros estatísticos foram adimensionalizados para permitir que os mesmos fossem ilustrados em um único gráfico. Para normalizar os valores dos desvios simulados e observados,

estes foram divididos pelo valor correspondente dos desvios padrão observados. Desta forma, o coeficiente de correlação permanece inalterado e o valor de referência normalizado estará sempre centrado a uma unidade de distância no eixo da abscissa, uma vez que é normalizado por si mesmo.

Em outras palavras, podemos dizer que quanto melhor a correlação dos dados simulados comparados aos observados, mais próximos da abscissa  $x$  estarão os pontos referentes aos dados simulados. Da mesma forma, quanto melhor o desvio padrão (*i.e.* a variabilidade) se ajusta ao valor observado, mais próximo da linha circular de desvio padrão igual a 1 estarão os pontos referentes aos dados simulados. Os semicírculos referentes ao CRMSD mostram o quão bem os dados simulados se ajustam igualmente em relação à correlação e à variabilidade.

No Setor Mar de Weddell podemos observar a falta da representação das SW nas margens sul e noroeste da região (Fig. IV-3). Da mesma forma, as águas mais densas, que compõem a camada de fundo próximo ao fundo oceânico, também não são muito bem representadas. Por outro lado, a WDW e suas variedades modificadas, que se encontra em níveis intermediários, estão sendo satisfatoriamente simuladas pelo modelo. Os diagramas de Taylor para os parâmetros hidrográficos das seções do Setor Mar de Weddell nos permitem uma melhor avaliação da simulação. As águas superficiais (Fig. IV-4), conforme esperado e devido à sua alta variabilidade temporal, estão sendo comparativamente mal representadas em todas as seções. Nota-se que os valores hidrográficos estão sendo subestimados (ver Apêndice II). Desta forma, considerando que os valores de referência (*i.e.* observações) são tendenciosos

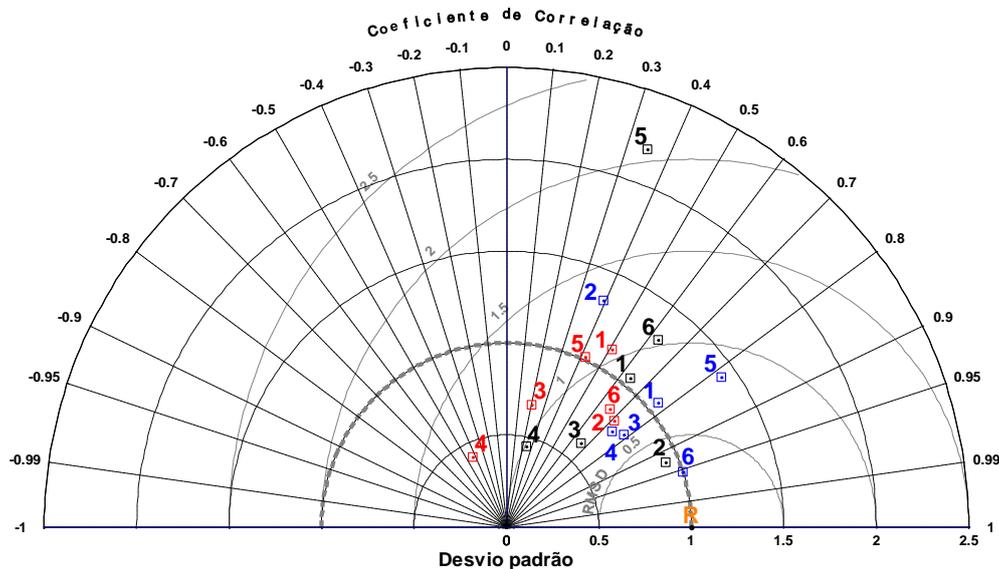
aos períodos de verão austral, não podemos retirar conclusões concretas sobre a representação das águas superficiais simuladas no Setor Mar de Weddell.



**Figura IV-4.** Padrões estatísticos descrevendo a climatologia da camada de água superficial ( $\gamma^n < 28 \text{ kg m}^{-3}$ ) simulada pelo modelo OCCAM 1/12° nas seções de exportação (indicadas pelos números) do Setor Mar de Weddell. Os pontos em vermelho, preto e azul referem-se, respectivamente, à temperatura potencial, salinidade e densidade neutra. As linhas serrilhadas, pontilhadas e tracejadas indicam, respectivamente, o coeficiente de correlação, o desvio padrão padronizado e o CRMSD. A linha tracejada cinza em destaque marca a região onde a variabilidade dos valores simulados melhor se ajusta aos observados. R = Referência. Para maiores detalhes ver o texto e o Apêndice II.

Em contrapartida, a camada intermediária e a variabilidade de suas propriedades estão sendo bem representadas pelo modelo (Fig. IV-5). Embora os valores de temperatura e salinidade apresentem um baixo coeficiente de correlação, nota-se claramente que a densidade desta camada se ajusta bem aos valores observados (Fig. IV-5) com coeficientes de correlação maior que 0.7 (exceto para a Seção 2). Ressalta-se, que a Seção 2 encontra-se nas proximidades da Plataforma de Gelo Larsen, que não é representada no modelo. Por outro lado, as águas amostradas e consideradas como os valores de referência nesta região sofrem influência de seus fluxos associados. Adicionalmente, esta região é extremamente pouco amostrada devido à dificuldade de se alcançar tal região, em oposição à região da Seção 1 que

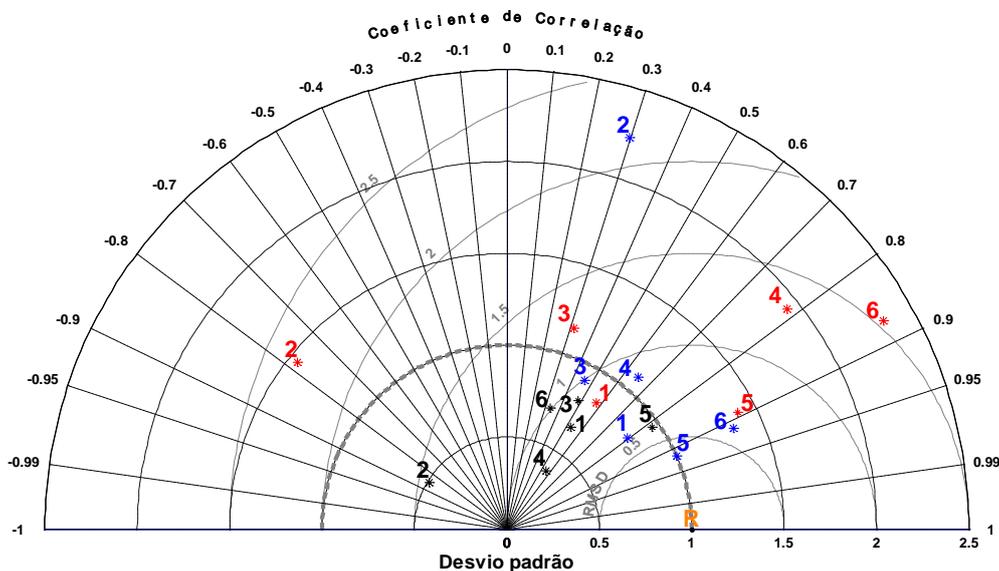
apresentou a melhor representação para todos os parâmetros. A Seção 1 é uma das regiões mais amostradas da região noroeste do mar de Weddell por representar a parte oeste da linha de repetição SR4 do programa *World Ocean Circulation Experiment* [WOCE; [Fahrbach et al. 2004](#), [Kerr et al. 2009b](#)].



**Figura IV-5.** Assim como a Fig. IV-4, sendo que para a camada de água intermediária ( $28.0 < \gamma^n < 28.26 \text{ kg m}^{-3}$ ).

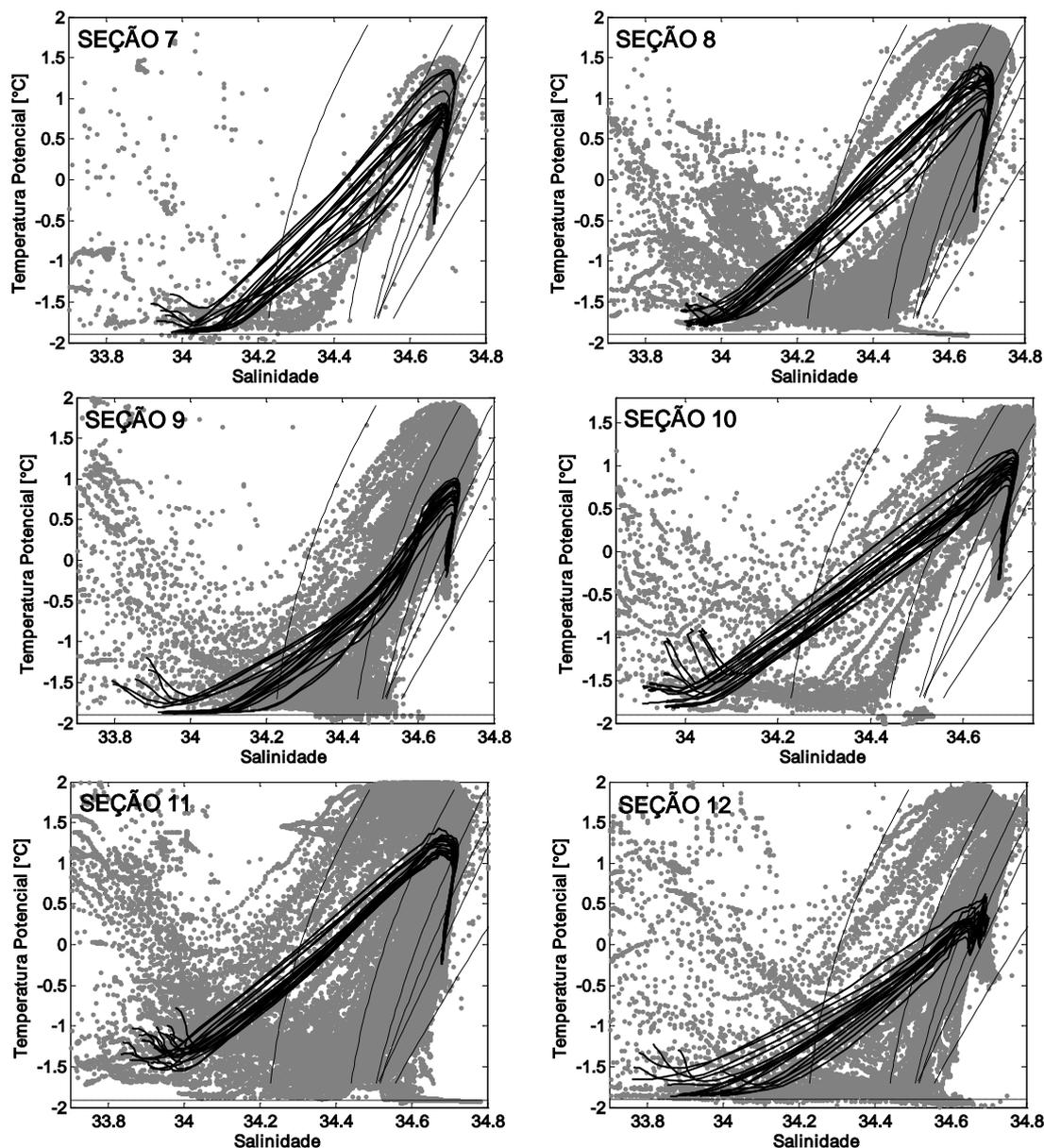
Assim como a camada intermediária (Fig. IV-5), a camada profunda (Fig. IV-6) também está sendo satisfatoriamente representada no modelo. Apesar dos valores de temperatura não corresponderem bem aos valores observados e da enorme subestimação dos valores de salinidade (ver Apêndice II), a densidade das águas profundas se ajusta bem aos valores observados (Fig. IV-6). A fraca representação dos valores absolutos de temperatura e salinidade deve-se, principalmente, à ausência da estreita camada de fundo próximo ao fundo oceânico. Entretanto, o bom ajuste da densidade, com coeficientes de correlação superior a 0.6 (Fig. IV-6), mostra que as águas profundas estão sendo bem simuladas. Sendo exceções as Seções 2 e 3, justamente aquelas regiões que são mais influenciadas pelos fluxos de água e sal provenientes das

plataformas de gelo permanentes das regiões sul e noroeste do mar de Weddell.



**Figura IV-6.** Assim como a Fig. IV-4, sendo que para a camada de água profunda ( $\gamma^n \geq 28.26 \text{ kg m}^{-3}$ ).

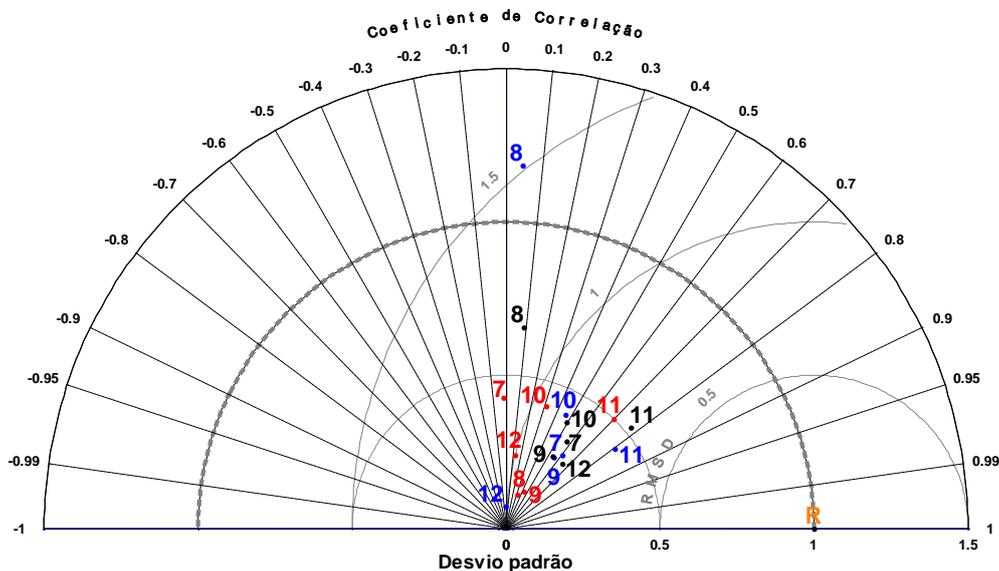
Os diagramas  $\theta S$  dos Setores Oceano Índico e Oceano Pacífico Sul mostram um bom ajuste ao padrão hidrográfico da região (Fig. IV-7). Assim como no mar de Weddell, os parâmetros hidrográficos das águas superficiais são subestimados (Fig. IV-8). Entretanto, mesmo com a melhor representação da variabilidade superficial, quando comparada às seções do mar de Weddell, as mesmas considerações anteriores devem ser avaliadas para este setor. A camada intermediária está sendo melhor simulada pelo modelo (Fig. IV-9), quando comparada com a camada intermediária do mar de Weddell. A dispersão no diagrama para os parâmetros hidrográficos é menor e o coeficiente de correlação, em geral, é superior a 0.8. Assim, conclui-se que tanto os valores absolutos quanto a variabilidade das águas intermediárias nestas regiões se aproximam mais da realidade. Sendo importante para a caracterização da região devido à aproximação das frentes da ACC nesta área do oceano Austral.



**Figura IV-7.** Diagrama  $\theta$ S dos (pontos cinza) dados observados do WOD05 e das (linhas pretas) médias anuais simuladas pelo modelo OCCAM 1/12° nos Setores Oceano Índico e Oceano Pacífico Sul para as seções de exportação indicadas. As linhas tracejadas referem-se respectivamente às isolinhas de densidade neutra de 27,8, 28, 28,1, 28,27 e 28,40  $\text{kg m}^{-3}$ . A linha pontilhada indica o ponto de congelamento da água do mar.

Com relação às águas de fundo, podem-se observar dois padrões de representação para a densidade das simulações (Fig. IV-10). Em geral, a salinidade é subestimada para todas as seções, sendo que a Seção 7 possui a melhor representação. Adicionalmente, a boa representação do campo de temperatura das Seções 8, 9 e 10 podem ser a causa da boa simulação da

densidade das Seções 7, 8 e 10, enquanto nas seções 9, 11 e 12 a densidade é também subestimada pelo modelo (Fig. IV-10).

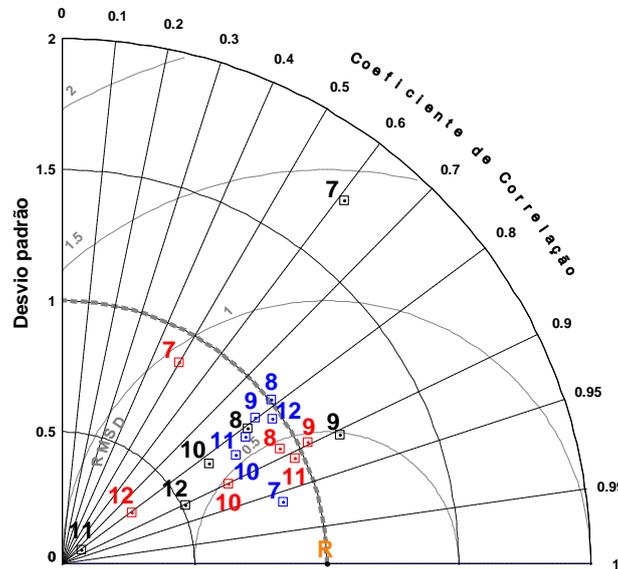


**Figura IV-8.** Padrões estatísticos descrevendo a climatologia da camada de água superficial ( $\gamma^n < 28 \text{ kg m}^{-3}$ ) simulada pelo modelo OCCAM 1/12° nas seções de exportação (indicadas pelos números) dos Setores Oceano Índico e Oceano Pacífico Oeste. Os pontos em vermelho, preto e azul referem-se, respectivamente, à temperatura potencial, salinidade e densidade neutra. As linhas serrilhadas, pontilhadas e tracejadas indicam, respectivamente, o coeficiente de correlação, o desvio padrão padronizado e o CRMSD. A linha tracejada cinza em destaque marca a região onde a variabilidade dos valores simulados melhor se ajusta aos observados. R = Referência. Para maiores detalhes ver o texto e o Apêndice II.

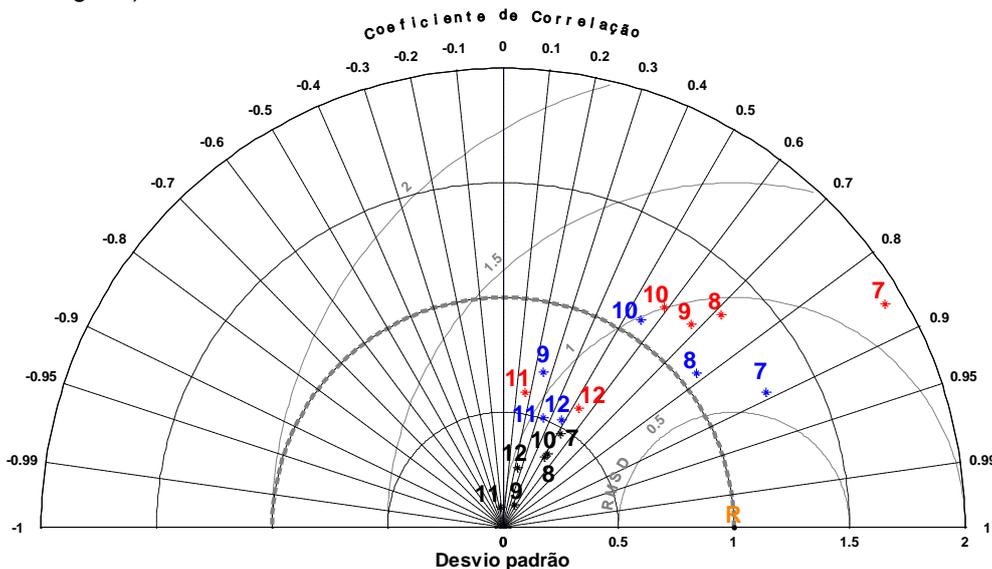
Assim como nos demais setores, nos Setores Mar de Ross e Mares de B&A os diagramas  $\theta S$  mostram que a estrutura de massas de água é bem representada (Fig. IV-11) pela simulação do OCCAM 1/12°. As mesmas conclusões dos outros setores do oceano Austral são consideradas para a camada superficial dos Setores Mar de Ross e Mares de B&A (Fig. IV-12). As camadas intermediárias também são bem simuladas pelo modelo nos dois setores (Fig. IV-12), comparativamente às demais regiões. Por outro lado, a camada profunda no mar de Ross é subestimada nas duas seções analisadas, enquanto uma boa representação é observada para os mares de B&A.

A boa representação da estrutura hidrográfica apresentada pelos diagramas  $\theta S$  (Fig. IV-3, IV-7 e IV-11) e as pequenas diferenças entre os

valores absolutos dos parâmetros médios (ver Apêndice II) mostram a robustez da simulação utilizada em representar a estrutura de massas de água nas margens continentais Antárticas.

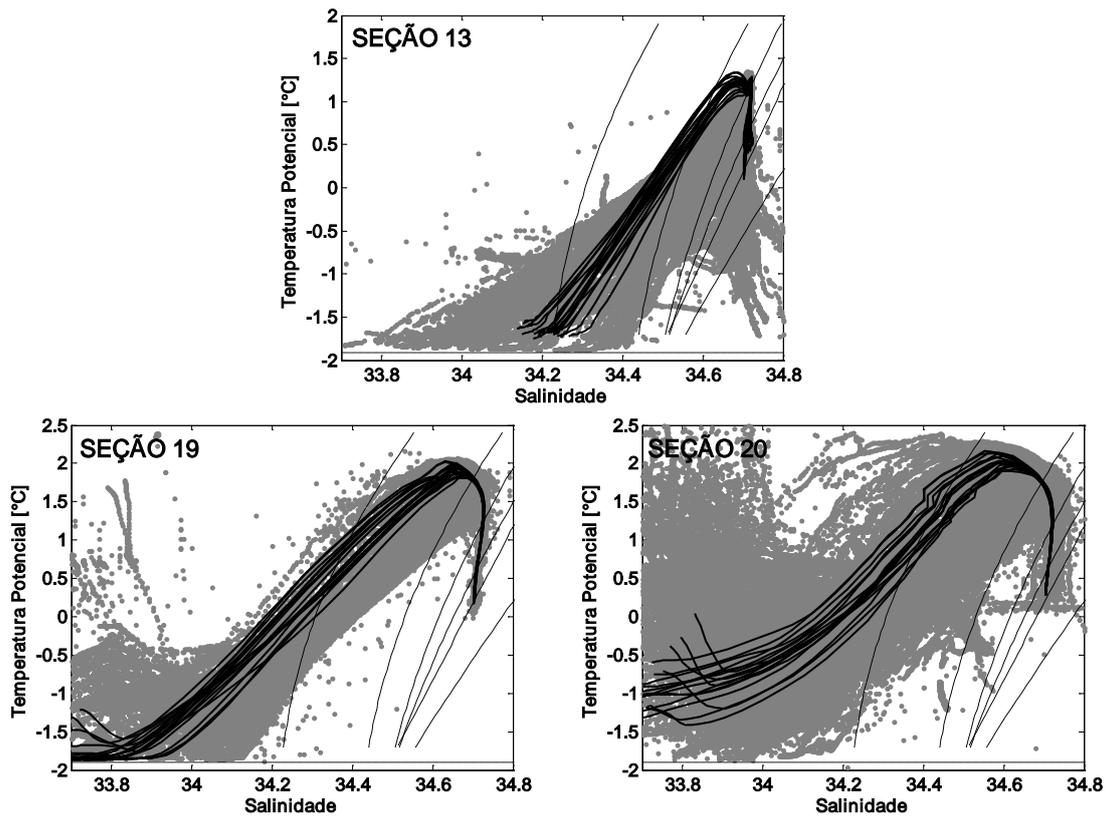


**Figura IV-9.** Assim como a Fig. IV-8, sendo que para a camada de água intermediária ( $28.6 < \gamma^n < 28.26 \text{ kg m}^{-3}$ ).

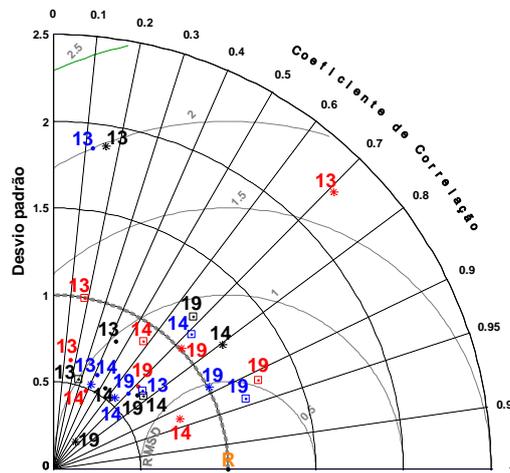


**Figura IV-10.** Assim como a Fig. IV-8, sendo que para a camada de água profunda ( $\gamma^n \geq 28.26 \text{ kg m}^{-3}$ ).

Adicionalmente, a análise dos diagramas de Taylor [Taylor 2001] revela informações quantitativas sobre os parâmetros hidrográficos simulados, através da comparação dos parâmetros estatísticos dos campos observados e simulados (Fig. IV-4-6, IV-8-10 e IV-12).



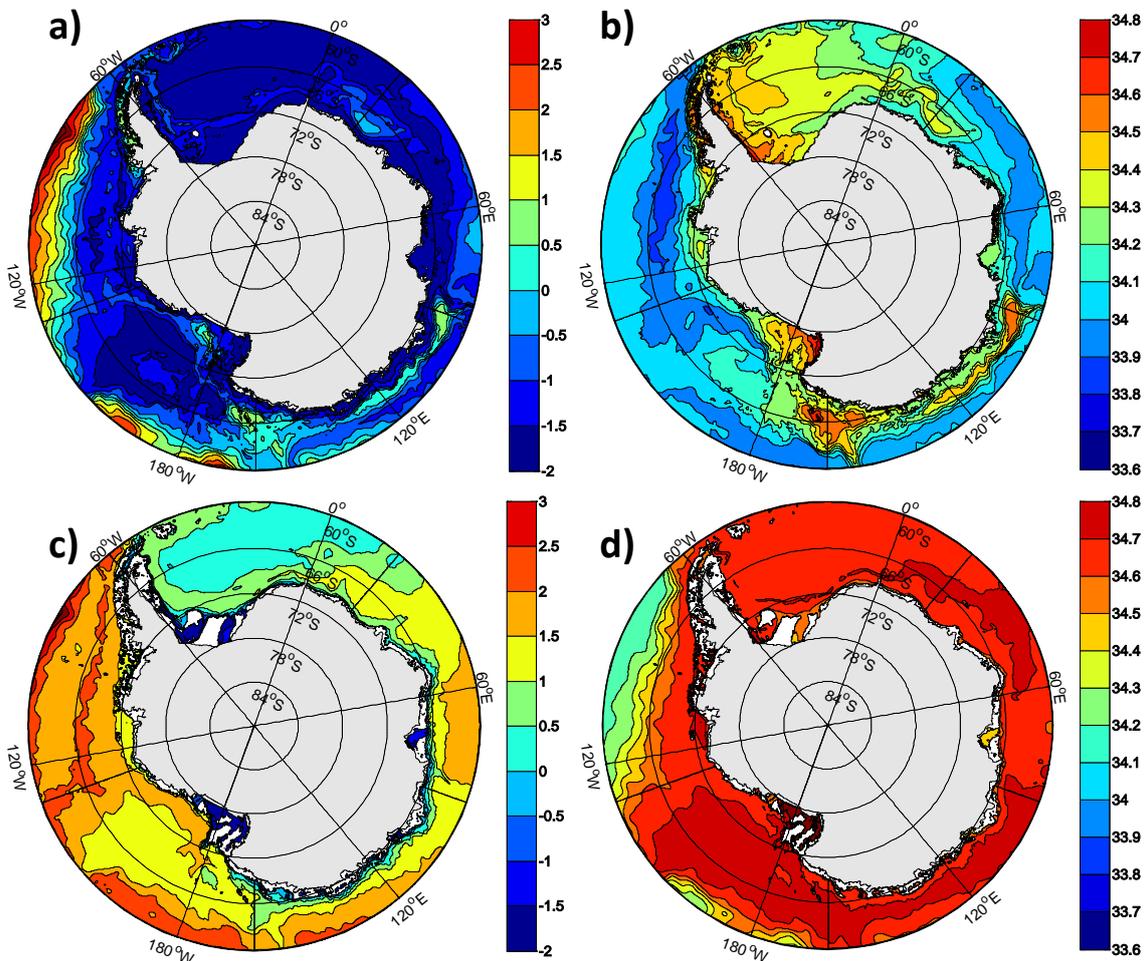
**Figura IV-11.** Diagrama  $\theta$ S dos (pontos cinza) dados observados do WOD05 e das (linhas pretas) médias anuais simuladas pelo modelo OCCAM 1/12° nos Setores Mar de Ross e Mares de B&A para as seções de exportação indicadas. As linhas tracejadas referem-se respectivamente às isolinhas de densidade neutra de 27.8, 28, 28.1, 28.27 e 28.40  $\text{kg m}^{-3}$ . A linha pontilhada indica o ponto de congelamento da água do mar.



**Figura IV-12.** Padrões estatísticos descrevendo a climatologia das camadas de água superficial ( $\gamma^n < 28 \text{ kg m}^{-3}$ ; pontos), água intermediária ( $28.0 \leq \gamma^n < 28.26 \text{ kg m}^{-3}$ ; quadrados) e água profunda ( $\gamma^n \geq 28.26 \text{ kg m}^{-3}$ ; estrelas) simulada pelo modelo OCCAM 1/12° nas seções de exportação (indicadas pelos números) dos Setores Mar de Ross e Mares de B&A. Os valores em vermelho, preto e azul referem-se, respectivamente, à temperatura potencial, salinidade e densidade neutra. As linhas serrilhadas, pontilhadas e tracejadas indicam, respectivamente, o coeficiente de correlação, o desvio padrão padronizado e o CRMSD. A linha tracejada cinza em destaque marca a região onde a variabilidade dos valores simulados melhor se ajusta aos observados. R = Referência. Para maiores detalhes ver o texto e o Apêndice II.

### 4.3. Camadas representativas das águas-fonte da AABW

A seguir são descritas as características simuladas pelo modelo OCCAM 1/12° para as camadas de águas-fonte da AABW, utilizadas nas análises de correlação (ver Capítulo VII para detalhes). A figura IV-13 mostra a representação climatológica dos campos de temperatura e salinidade para a camada de mistura superficial (SML) e para a camada intermediária (ILD) no modelo.



**Figura IV-13.** Climatologia média dos campos de (esquerda) temperatura potencial [°C] e (direita) salinidade, simulados pelo modelo OCCAM 1/12° na (a, b) camada de mistura superficial (SML) e na (c, d) camada intermediária (ILD).

A SML<sup>2</sup> foi determinada através das médias das camadas do modelo de profundidades entre ~100 m e ~150 m. A ILD<sup>3</sup> foi determinada através das médias das camadas do modelo de profundidades entre ~400 m e ~600 m. A SML representa as SW do regime costeiro e a mistura entre a AASW e as águas intermediárias do talude continental e do regime oceânico profundo (*i.e.* MWDW e MCDW). Adicionalmente, a ILD representa as variedades mais densas da SW presentes sobre as amplas plataformas continentais oeste e sudoeste dos mares de Weddell e Ross, assim como, o núcleo das águas intermediárias que atingem as margens continentais (*i.e.* WDW e CDW). Como exemplo, o núcleo de  $\theta$  máxima da WDW é encontrado em cerca de 500 m no mar de Weddell [Orsi *et al.* 1993].

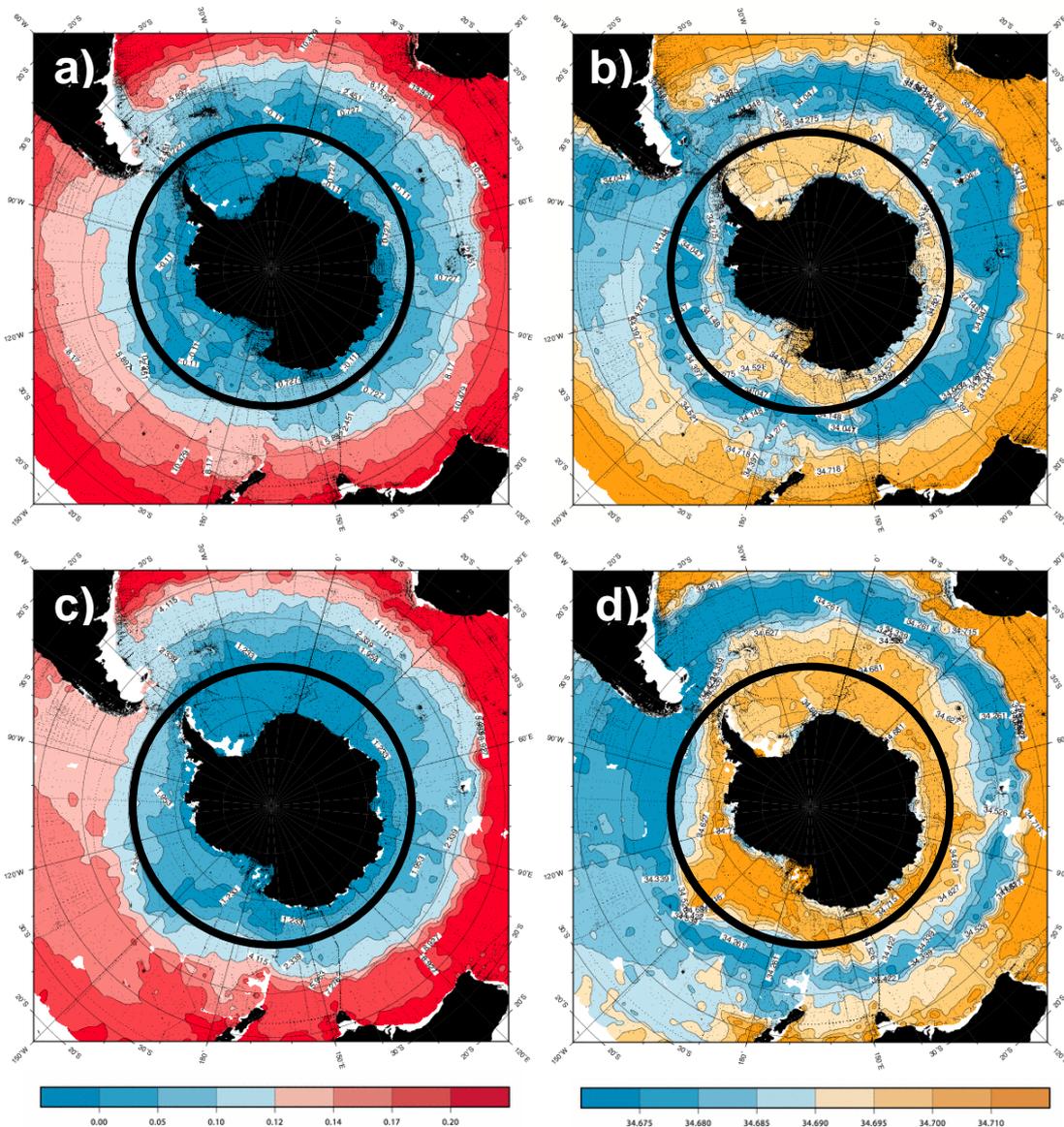
Na SML a temperatura é de ~-1.5°C no regime costeiro e no regime oceânico caracterizando, respectivamente, a SW e a WW. A temperatura aumenta ligeiramente para ~0°C sobre as margens continentais dos mares de Weddell e Ross (Fig. IV-13a), ocasionada devido à mistura com as águas intermediárias (*i.e.* WDW e CDW) que ressurgem sobre as margens continentais. As altas salinidades, que caracterizam as SW dos mares de Weddell e Ross, são observadas no regime costeiro Antártico (Fig. IV-13b). Os valores extremos de salinidade sobre a plataforma continental oeste do mar de Ross são observados também até ~90°E no mar de Davis (Fig. IV-13b), sugerindo uma advecção do mar de Ross e a ressurgência direta da CDW nas margens do Setor Oceano Pacífico Oeste. Desta forma, esta situação contribui para a alta salinidade na região (Fig. IV-13b). O regime oceânico do mar de

---

<sup>2</sup> Média das camadas do modelo de número 15 a 18, de profundidades aproximadas de 108 m, 120 m, 133 m e 148 m. Totalizando aproximadamente 40 m da coluna d'água.

<sup>3</sup> Média das camadas do modelo de número 28 a 31, de profundidades aproximadas de 438 m, 489 m, 545 m e 608 m. Totalizando aproximadamente 170 m da coluna d'água.

Weddell apresenta salinidade superficial superior àquelas encontradas no regime oceânico do Giro de Ross (Fig. IV-13b).



**Figura IV-14.** Climatologia média dos campos de (esquerda) temperatura potencial [°C] e (direita) salinidade, obtidos do banco de dados do WOCE SOA [Orsi & Whitworth 2007] na (a, b) camada de 150 m e (c, d) 500 m. Os círculos pretos delimitam a região do oceano Austral definida neste estudo (*i.e.* acima de 60°S).

Na ILD (*i.e.* média das camadas do modelo entre ~400 m e ~600 m) a temperatura é encontrada próxima ao ponto de congelamento nas proximidades da costa Antártica (Fig. IV-13c), aumentando ligeiramente em direção ao oceano aberto para temperaturas ao redor de 0°C sobre as margens

continentais. No regime oceânico, observa-se a forte influência da CDW com temperaturas  $>1^{\circ}\text{C}$  nos Setores Oceano Índico, Oceano Pacífico Oeste, Mar de Ross e Mares de B&A (Fig. IV-13c). No mar de Weddell, a CDW é resfriada à medida que esta entra no Giro de Weddell e segue a circulação ciclônica, caracterizando a WDW com temperaturas entre  $0^{\circ}\text{C}$  e  $0.5^{\circ}\text{C}$  (Fig. IV-13c). Os altos valores de salinidade na ILD mostram a influência da CDW e WDW (sendo esta menos salina devido às interações com as águas superficiais), respectivamente, dentro dos mares de Ross e Weddell (Fig. IV-13d).

Os campos de  $\theta$  e  $S$  das águas-fonte da AABW mostram que o regime oceânico simulado pelo modelo OCCAM 1/12° do mar de Weddell possui a SML e a ILD, respectivamente, mais salina e mais fria do que no mar de Ross. Por outro lado, ainda considerando os dados modelados, a ILD é mais salina no mar de Ross que no mar de Weddell. Propriedades similares são encontradas para a AASW e para a SW nas plataformas continentais sul e sudoeste. Embora com valores absolutos de  $\theta$  e  $S$  diferentes, quando comparados os campos das propriedades das simulações do modelo (Fig. IV-13) e da climatologia de observação (WOCE SOA<sup>4</sup>; Fig. IV-14) do banco de dados do oceano Austral do projeto WOCE [Orsi & Whitworth 2007], as principais feições hidrográficas de larga escala reportadas para a climatologia estão presentes na simulação do OCCAM 1/12°.

Neste momento, cabe ressaltar que a amostragem do programa WOCE é tendenciosa para os períodos de verão austral (*i.e.* com consequente subamostragem durante o inverno austral). Além disso, a Fig. IV-14 refere-se à média nas profundidades de 150 m e 500 m, impedindo uma comparação mais

---

<sup>4</sup> <http://woceatlas.tamu.edu/>

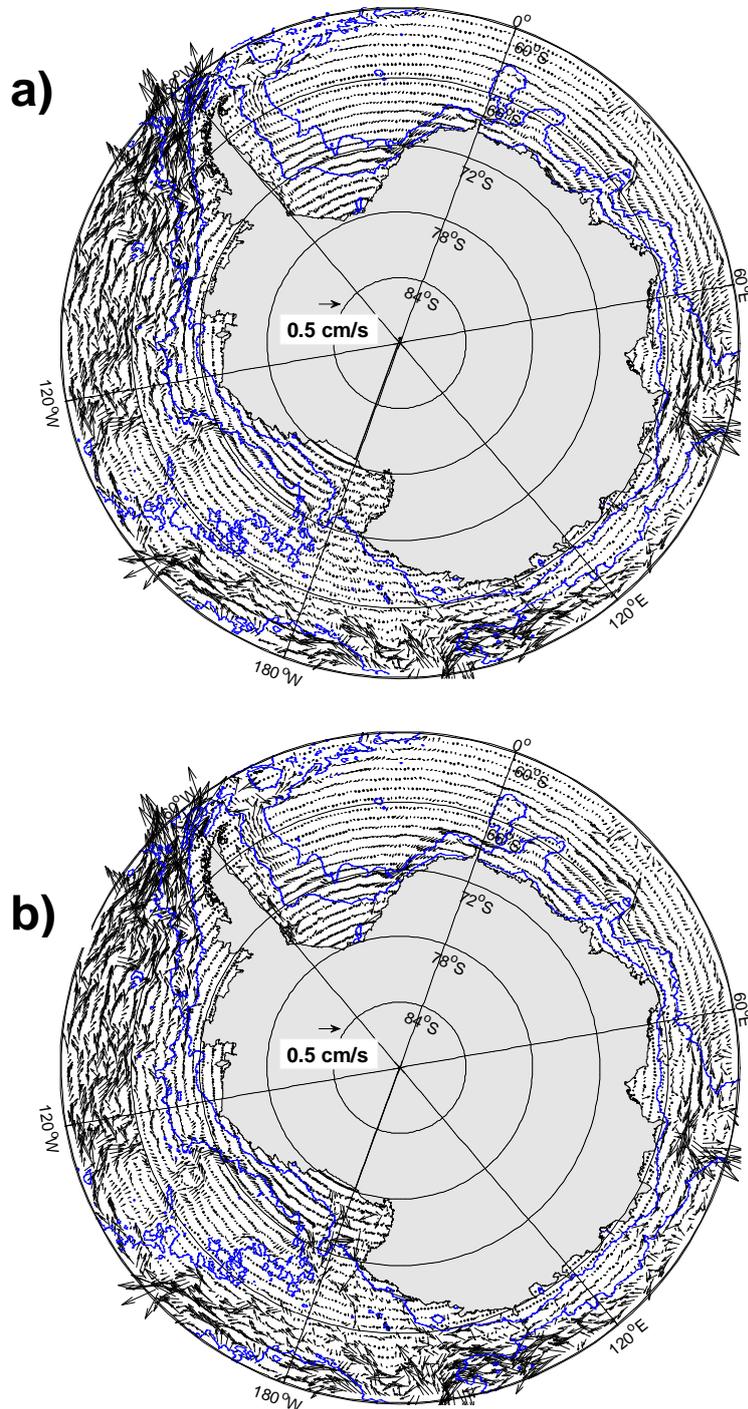
direta entre os valores absolutos das propriedades das águas da SML e ILD entre as figuras IV-13 e IV-14.

#### 4.4. Circulação oceânica

A circulação oceânica simulada pelo modelo OCCAM, de forma geral, representa bem a circulação circumpolar do oceano Austral. As feições dos giros ciclônicos da região do mar de Weddell e do mar de Ross são evidenciadas tanto na camada superficial como na camada intermediária (Fig. IV-15a e IV-15b). Além disso, as velocidades em níveis profundos nas principais zonas de exportação (*i.e.* noroeste do mar de Weddell e do mar de Ross, e a região leste do Platô Kerguelen) das águas profundas são intensificadas nas respectivas regiões (Fig. IV-15c). Para uma melhor visualização da representação da circulação oceânica nos diferentes mares regionais, as figuras IV-16 a IV-20 mostram em destaque a circulação oceânica representada na Fig. IV-15 para cada setor oceânico.

No Setor Mar de Weddell, nota-se a feição ciclônica do Giro de Weddell através da saída das águas da região na parte noroeste e a entrada em torno de 20°E-30°E. A ACoC é representada na região, fechando a circulação do giro ao sul. Nota-se também, que o modelo representa a recirculação das águas na bacia Powell em todos os níveis de profundidade (Fig. IV-16). No Setor Oceano Índico o modelo representa a circulação para oeste da ACoC e o fluxo principal da ACC para leste em torno de 60°S. Destaca-se a representação da entrada de águas profundas através da PET, e a intensificação das velocidades ao norte da Baía Prydz nas proximidades do Platô de Kerguelen (Fig. II-6). A

recirculação observada na Baía Prydz não é claramente representada no modelo (Fig. IV-17).



**Figura VI-15.** Circulação média [ $\text{cm s}^{-1}$ ] do oceano Austral para o período simulado pelo modelo OCCAM para a (a) SML, (b) a ILD e para (c) a profundidade aproximada de 2000 m. As linhas azuis marcam as batimetrias de 1000 m e 4000 m.

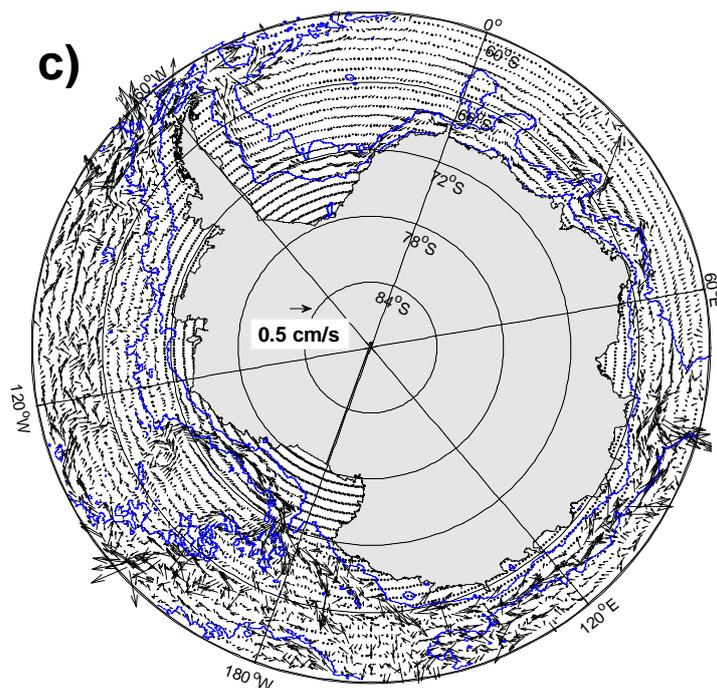


Figura IV-15. continuação.

Assim como no Setor Oceano Índico, no setor Oceano Pacífico Oeste a circulação da ACoC e da ACC são representadas. Observa-se a entrada das águas profundas provenientes do mar de Ross (Fig. IV-18c) e o deslocamento para norte das águas da ACC em níveis superficiais e intermediários devido à presença da Cordilheira Balleny (Fig. IV-18a e IV-18b). A batimetria do Setor Mar de Ross mostra-se mais complexa do que em outras regiões. Contudo, ambas as feições da ACoC e da ACC são representadas no modelo. Destaca-se a representação da extensão do Giro de Ross até ~150°E em níveis superficiais e intermediários (Fig. IV-19a e IV-19b) e a representação da entrada de águas provenientes do mar de Amundsen seguindo o fluxo da ACoC. A aproximação da ACC em direção ao continente é evidenciada através da intensificação das velocidades entre 60°S e 70°S no Setor Mares de B&A (Fig. IV-20). Por outro lado, a circulação da ACoC não é representada na região, sendo o fluxo dominante para leste.

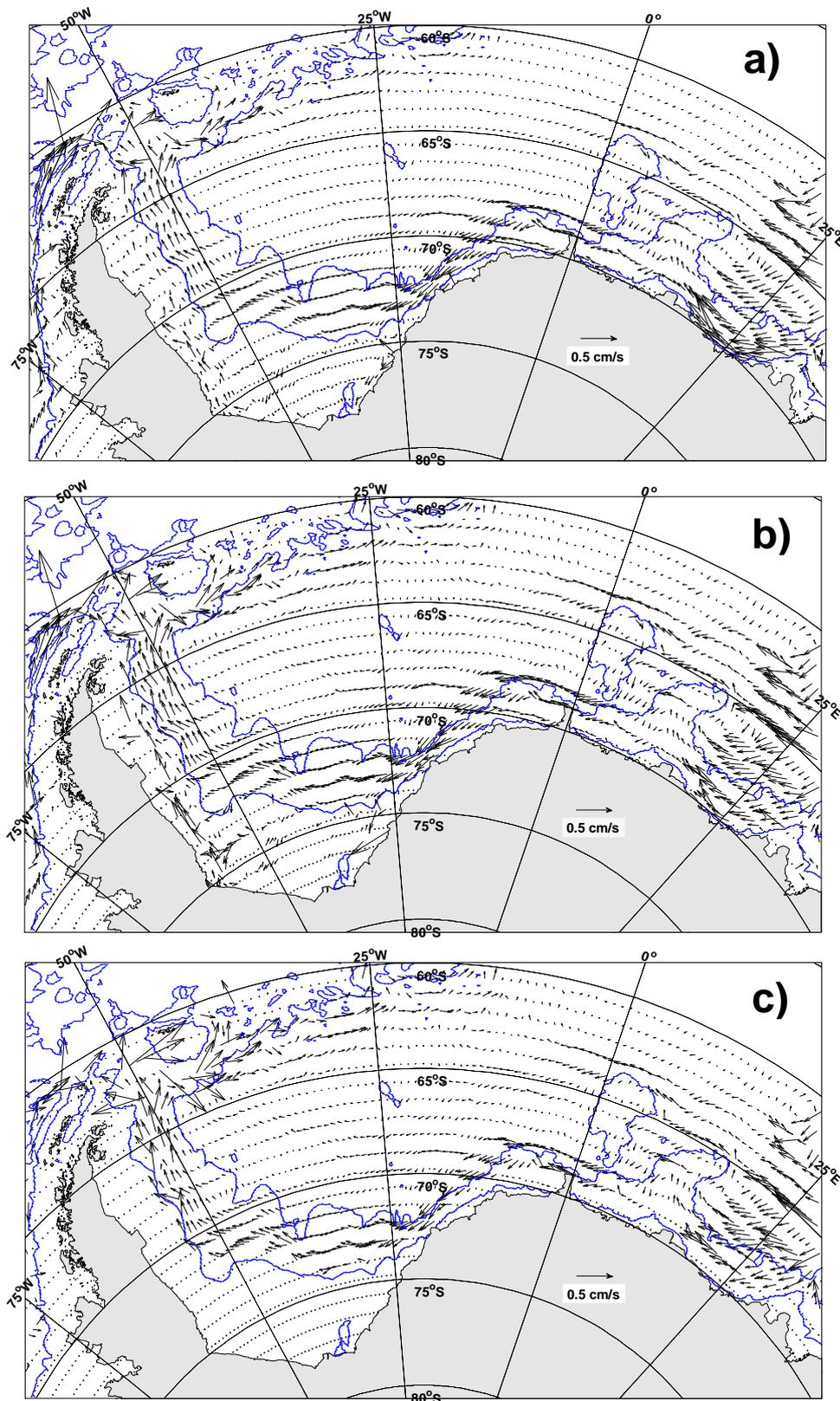
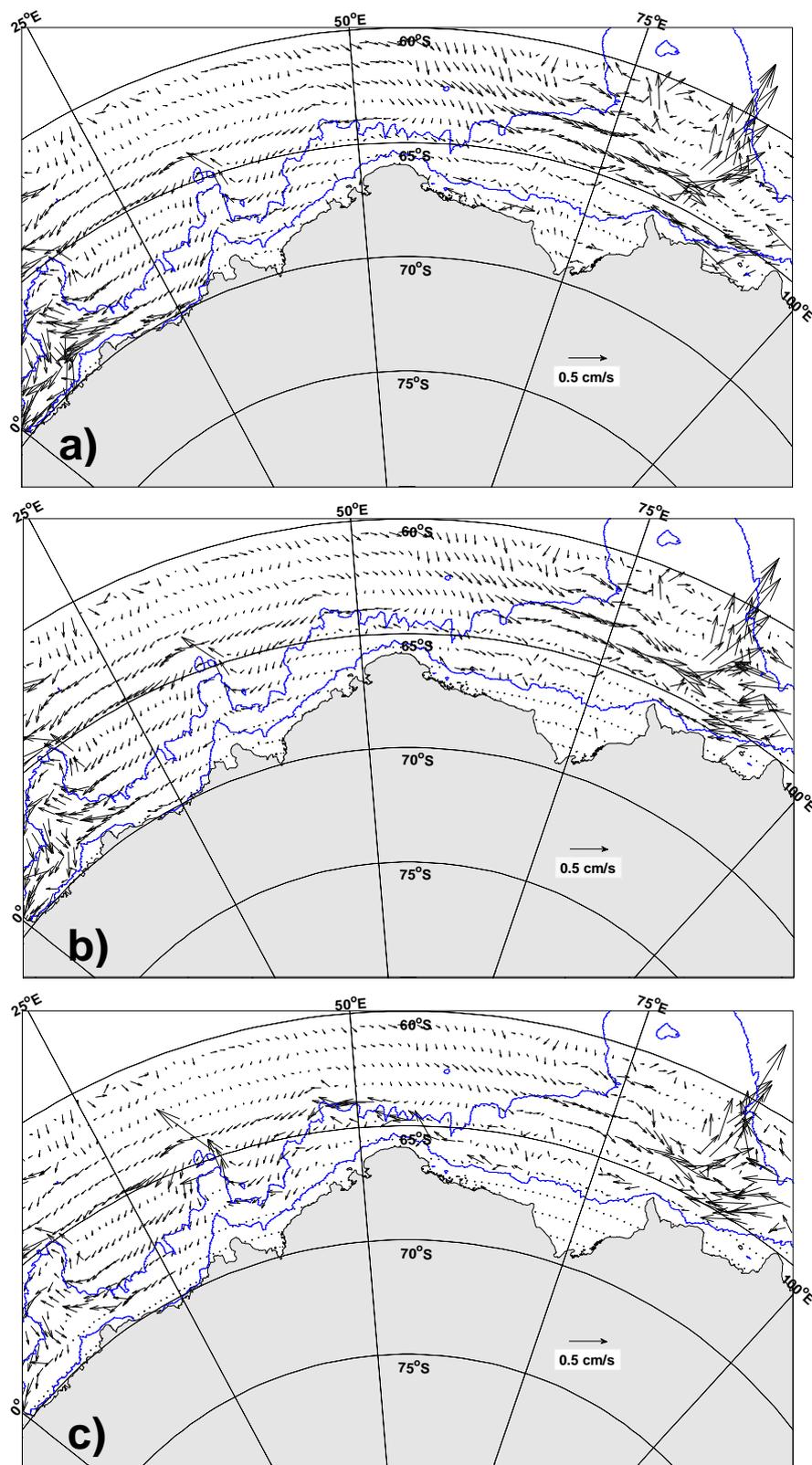
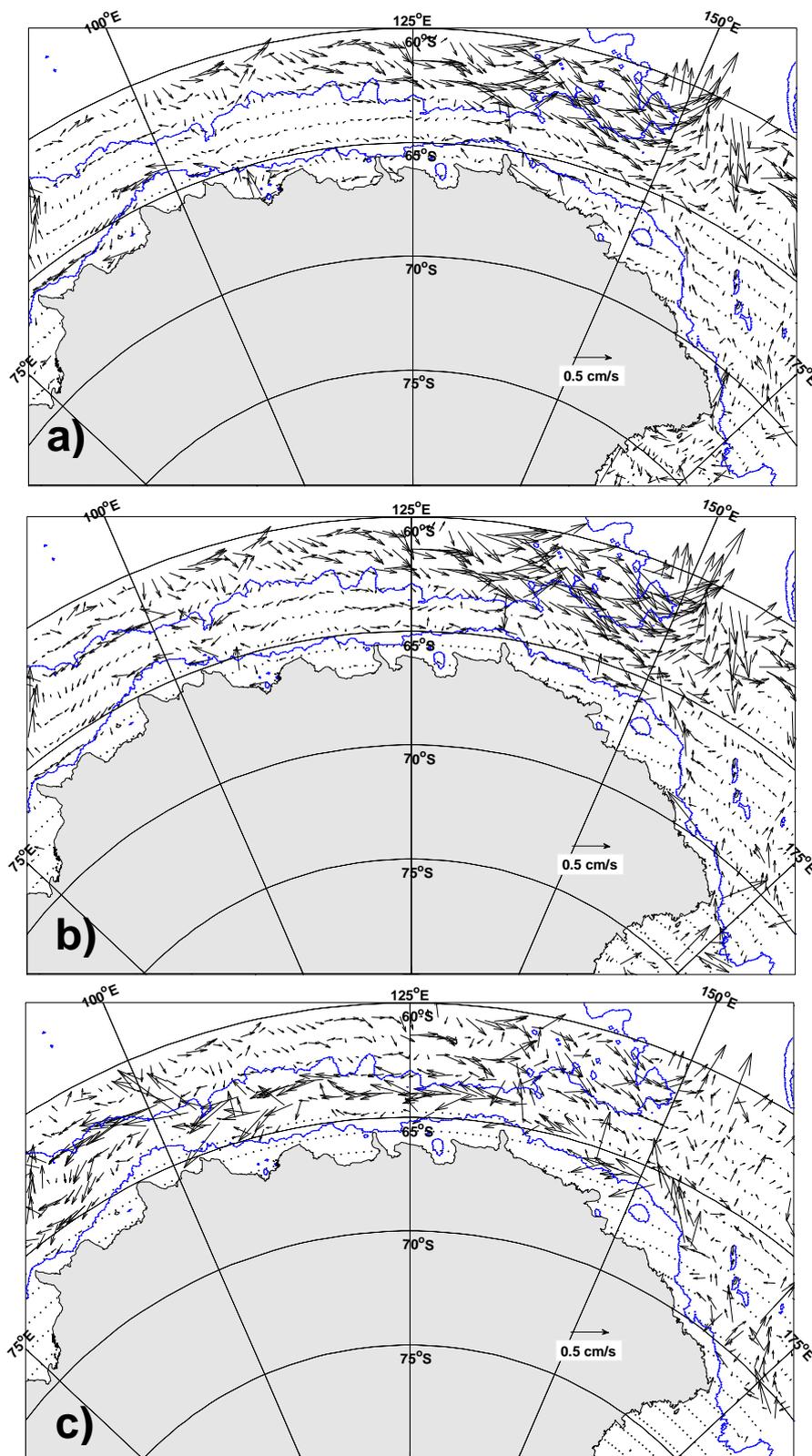


Figura IV-16. Assim como a Figura IV-15, sendo que mostrando um detalhe no Setor Mar de Weddell.



**Figura IV-17.** Assim como a Figura IV-15, sendo que mostrando um detalhe no Setor Oceano Índico.



**Figura IV-18.** Assim como a Figura IV-15, sendo que mostrando um detalhe no Setor Oceano Pacífico Oeste.

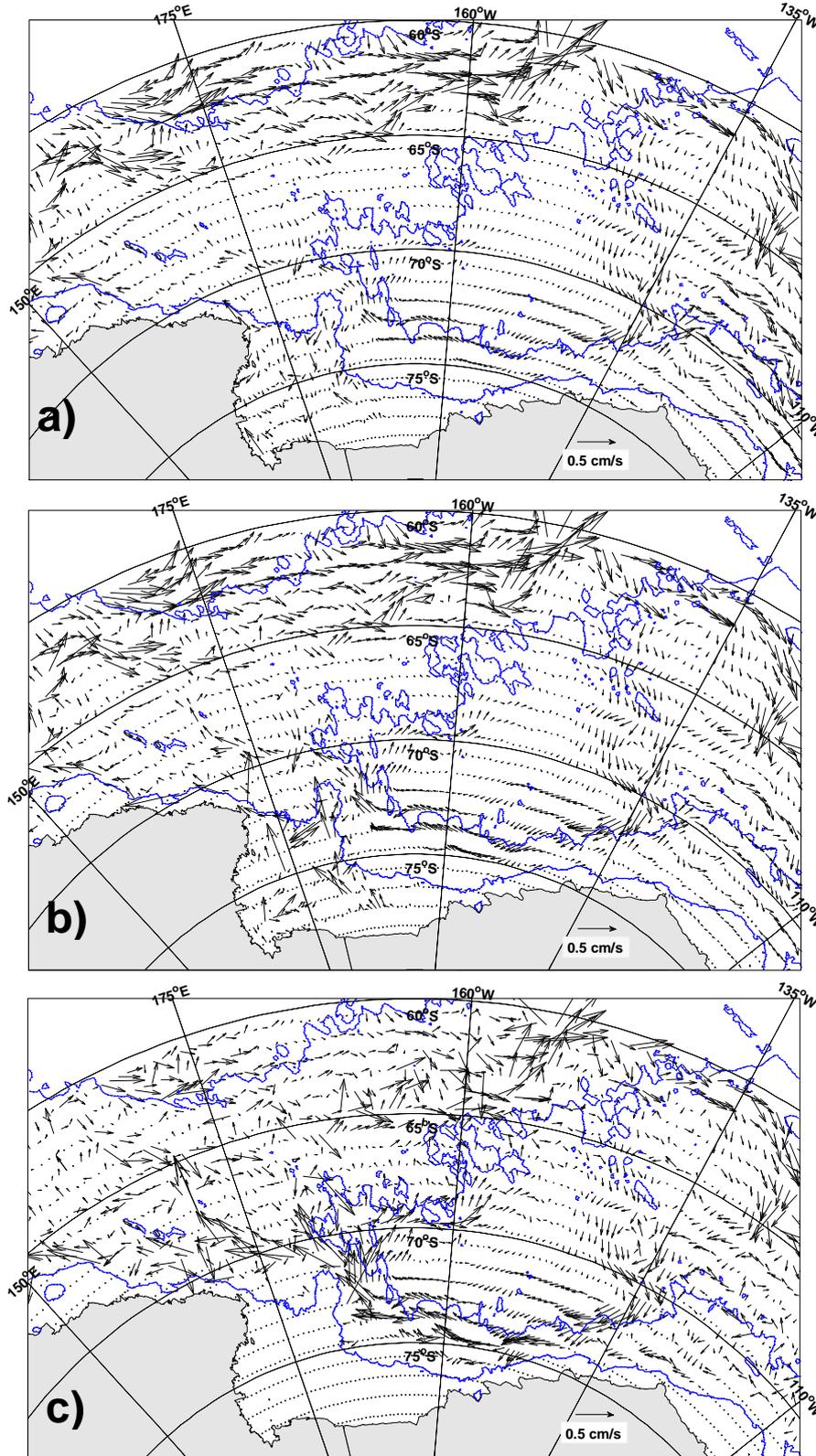


Figura IV-19. Assim como a Figura IV-15, sendo que mostrando um detalhe no Setor Mar de Ross.

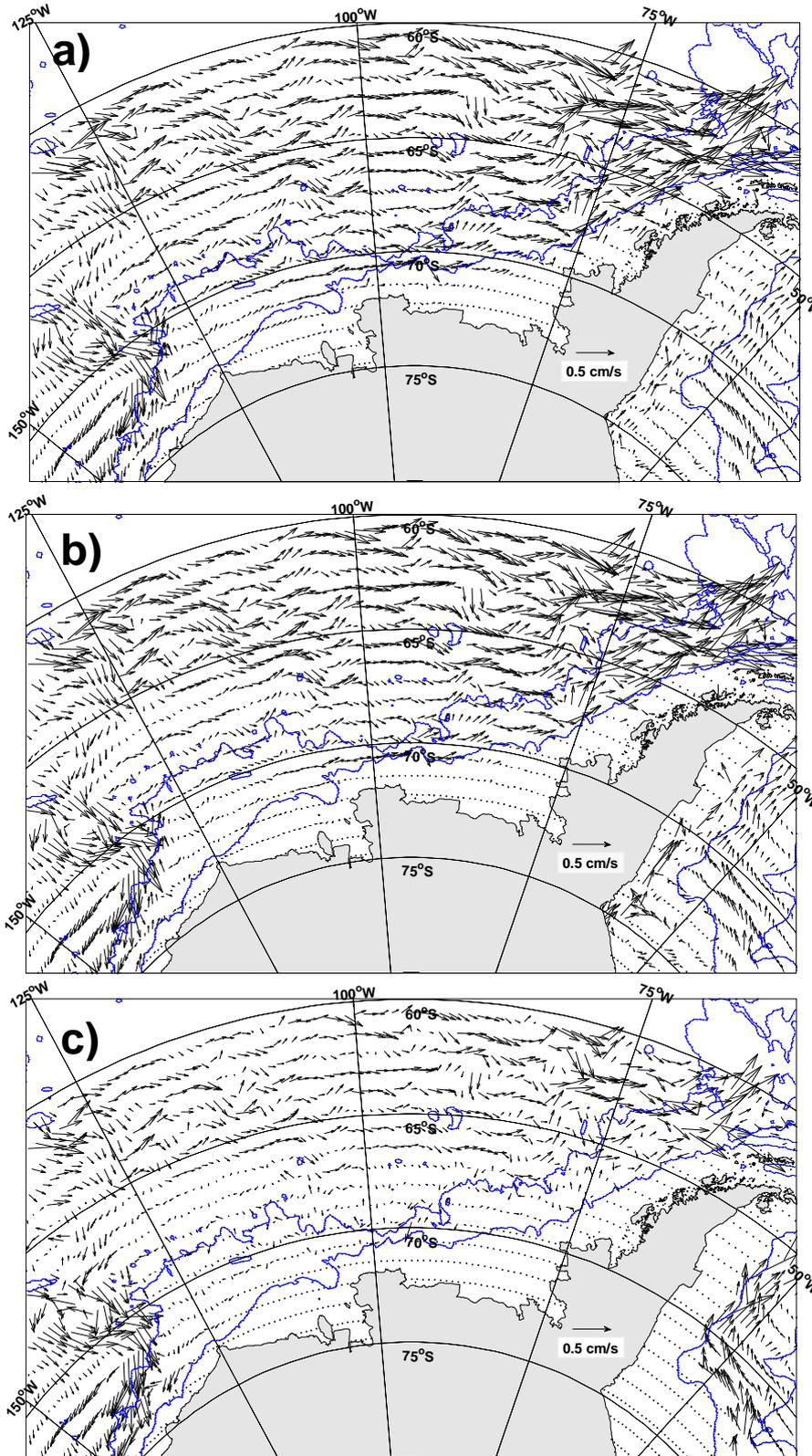


Figura IV-20. Assim como a Figura IV-15, sendo que mostrando um detalhe no Setor Mares de B&A.

Embora os padrões de circulação de meso e larga escala estejam sendo bem representados pelo modelo, Renner [2009] mostra que a velocidade média da circulação superficial e subsuperficial subestimada no Setor Mar de Weddell quando comparada com observações. A autora analisou as velocidades e correntes superficiais e mostrou que as fracas correntes simuladas pelo OCCAM 1/12° no mar de Weddell estão de acordo com a baixa diferença da altura superficial oceânica, o que indicaria que o Giro de Weddell simulado é relativamente mais fraco. Por outro lado, a análise de Renner [2009] evidencia que a intensificação em níveis profundos da ASF na simulação do OCCAM 1/12° é, provavelmente, resultante de uma produção de AABW mais realística dentre todos os modelos analisados em seu estudo. Isto se deve ao fato da formação da AABW nas margens continentais e do seu fluxo descendente sobre o talude continental nas margens oeste e sul do mar de Weddell [e.g. Muench & Gordon 1995, Baines & Condie 1998] serem responsáveis por maiores velocidades perpendiculares às seções definidas na região (*i.e.* Seção 1 e 2).

Renner [2009] ainda destaca que a falta de variabilidade sazonal das correntes superficiais e subsuperficiais no modelo está relacionada à extensiva cobertura de gelo marinho na região (ver a seção 4.5 a seguir). Desta forma, as altas concentrações de gelo marinho (inclusive no verão austral) previnem a influência sazonal dos campos de vento sobre o oceano superficial [e.g. Fahrbach *et al.* 1992, von Gyldenfeldt *et al.* 2002], estabilizando as correntes na região. Adicionalmente, Marson [2010] analisou a tendência e a variabilidade de longo período da ACoC simulada pelo OCCAM 1/12°. A autora mostrou que, em geral, tanto a evolução temporal quanto os campos médios

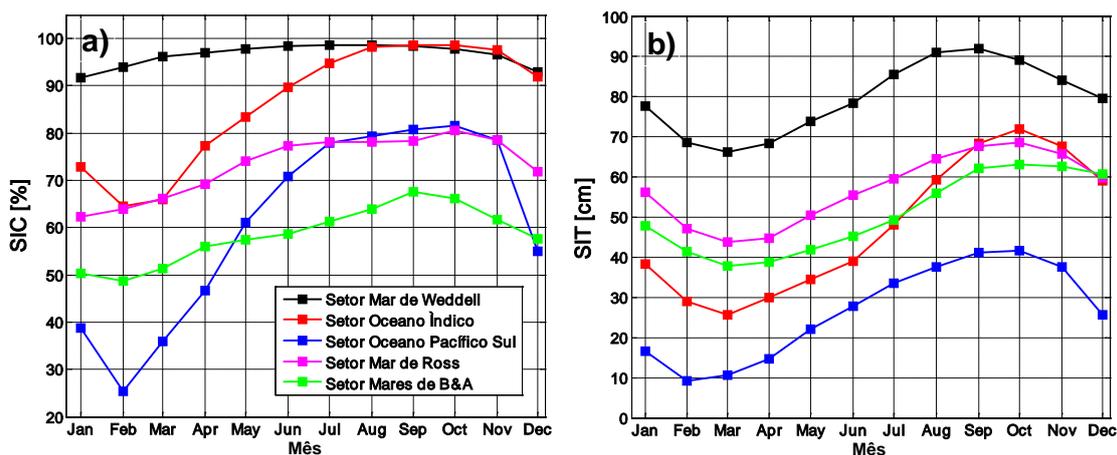
simulados de elevação do nível do mar correspondem ao observado em campo e ao descrito pela literatura. Ainda segundo a autora, os maiores erros de representação da circulação oceânica são encontrados na faixa costeira que abrange desde o mar de Amundsen até a extremidade da Península Antártica.

#### 4.5. Gelo marinho

A representação da concentração (SIC) e espessura (SIT) do gelo marinho simulados no modelo OCCAM 1/12° para cada setor do oceano Austral são apresentadas a seguir. A validação do modelo com dados reais não foi executada neste trabalho, visto que [Renner et al. \[2009\]](#) e [Marson \[2010\]](#) realizaram recentemente tais procedimentos. [Renner et al. \[2009\]](#) mostra que a simulação do OCCAM 1/12° superestima a extensão do gelo marinho no mar de Weddell durante o verão, quando comparada com a climatologia das imagens obtidas pelo sensor SSM/I (*Special Sensor Microwave/Imager*). [Marson \[2010\]](#) corrobora os resultados de [Renner et al. \[2009\]](#). Por outro lado, mostra que a variabilidade da cobertura de gelo marinho é bem representada pelo modelo apesar da superestimativa das concentrações, tanto em termos de cobertura como de sua duração.

No Setor Mar de Weddell, a climatologia mensal da SIC mostra concentrações máximas e mínimas nos meses de agosto e janeiro (Fig. IV-21a), ou seja, ocorre um mês antes das médias máximas (setembro) e mínimas (fevereiro) da climatologia observadas por [Cavalieri & Parkinson \[2008\]](#) entre os anos de 1979 e 2006. A climatologia mensal da SIT no modelo mostra concentrações máximas e mínimas nos meses de setembro e março (Fig. IV-21b). No Setor Oceano Índico, a climatologia mensal da SIC mostra

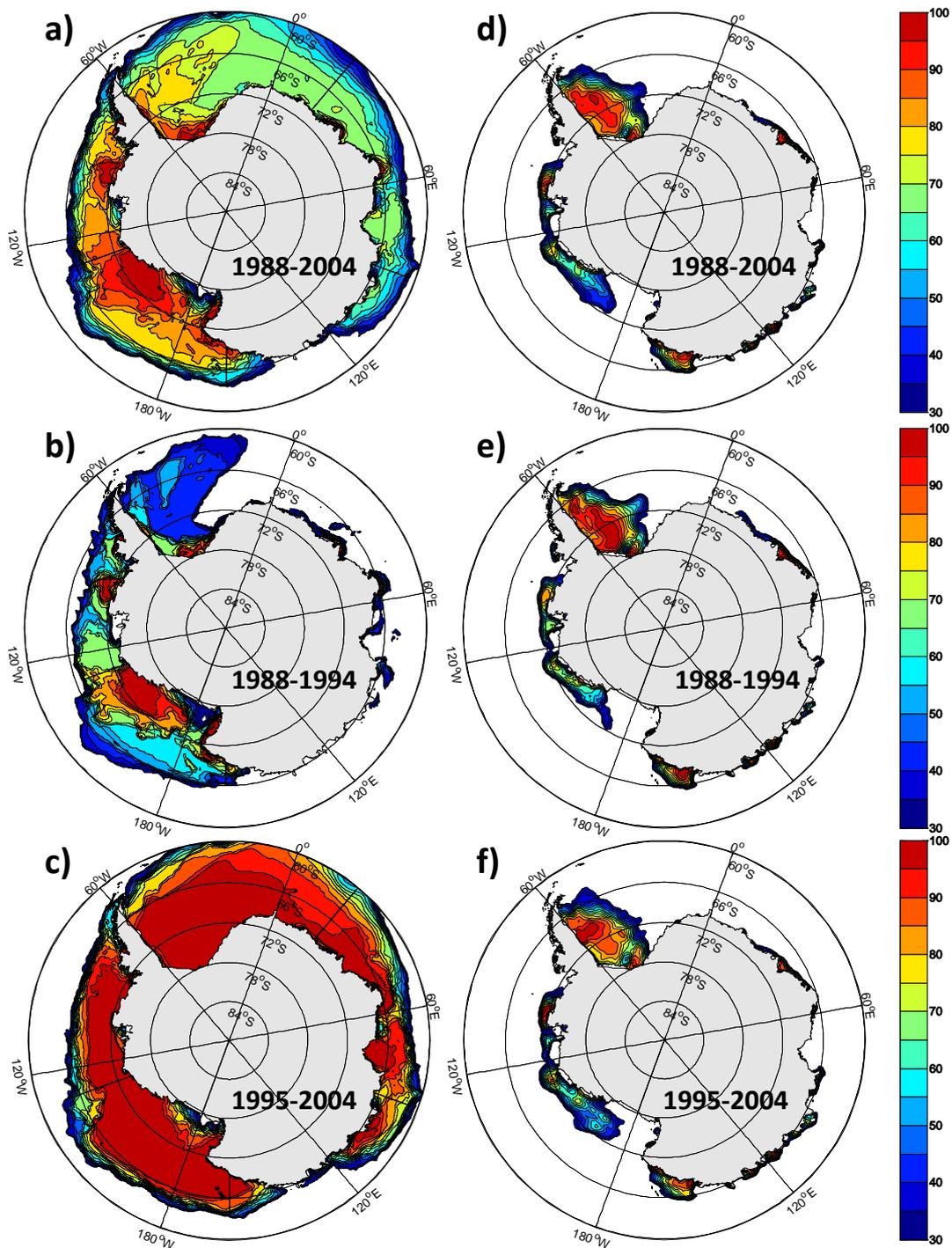
concentrações máximas e mínimas nos meses de setembro e fevereiro (Fig. IV-21a), enquanto a climatologia observada por Cavalieri & Parkinson [2008] mostra a extensão máxima em outubro e a mínima em fevereiro. A climatologia mensal da SIT no modelo mostra concentrações máximas e mínimas nos meses de outubro e março (Fig. IV-21b).



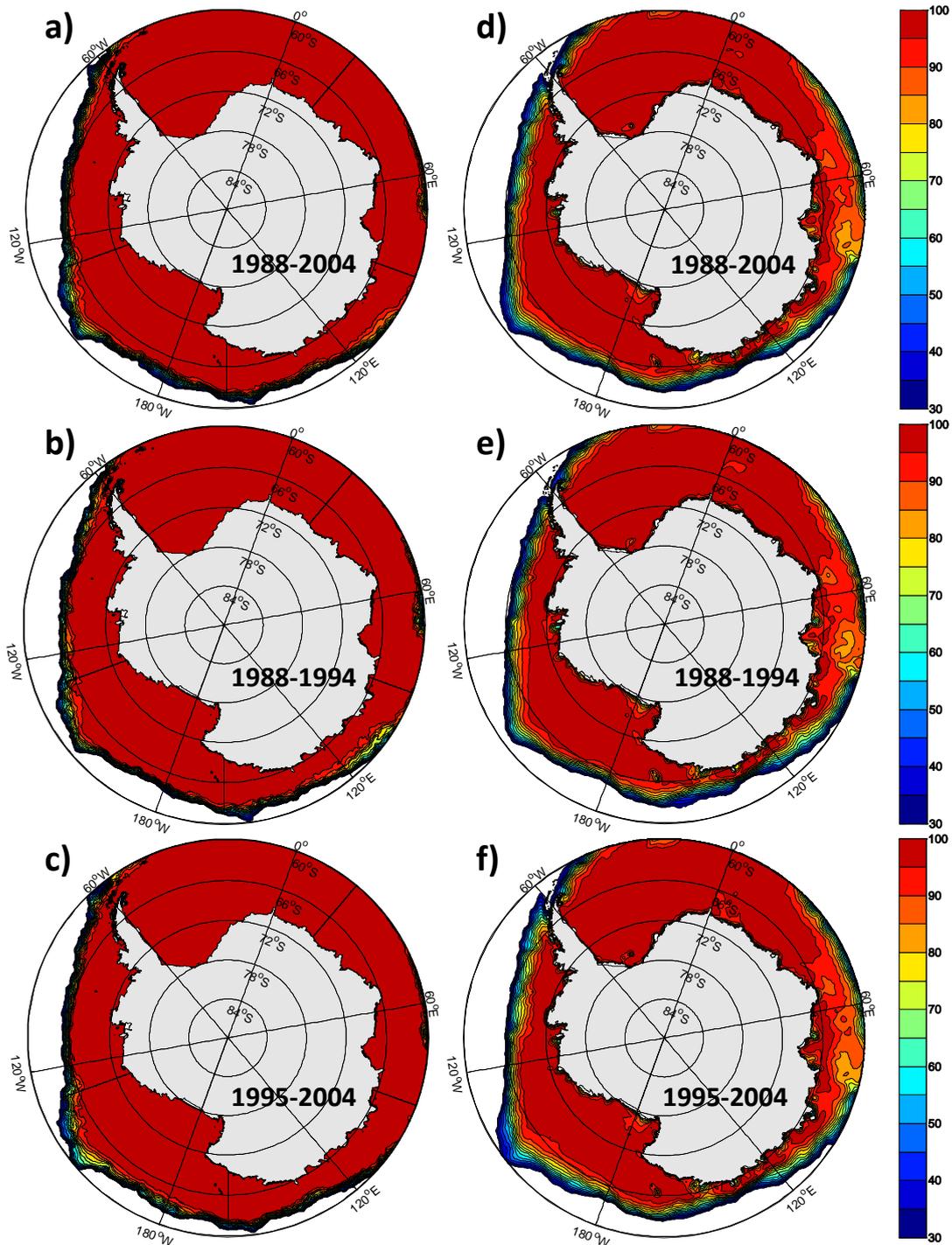
**Figura VI-21.** Média climatológica mensal da concentração (SIC; %) e espessura (SIT; cm) do gelo marinho para cada setor do oceano Austral.

No Setor Oceano Pacífico Oeste, a climatologia mensal da SIC mostra concentrações máximas e mínimas nos meses de setembro e fevereiro (Fig. IV-21a), cujos períodos se encontram de acordo com a climatologia observada por Cavalieri & Parkinson [2008]. A climatologia mensal da SIT no modelo mostra concentrações máximas e mínimas nos meses de outubro e fevereiro (Fig. IV-21b). No Setor Mar de Ross, a climatologia mensal da SIC mostra concentrações máximas e mínimas nos meses de outubro e janeiro (Fig. IV-21a), enquanto Cavalieri & Parkinson [2008] reportam os meses de outubro e fevereiro como aqueles de máxima e mínima extensão a partir da climatologia analisada. A climatologia mensal da SIT no modelo mostra concentrações máximas e mínimas nos meses de outubro e março (Fig. IV-21b). No Setor Mares de B&A, a climatologia mensal da SIC mostra concentrações máximas e

mínimas nos meses de setembro e fevereiro (Fig. IV-21a), corroborando com o estudo de Cavalieri & Parkinson [2008]. A climatologia mensal da SIT no modelo mostra concentrações máximas e mínimas nos meses de outubro e março (Fig. IV-21b).



**Figura IV-22.** Média climatológica da concentração de gelo marinho (SIC) para o mês de fevereiro dos períodos indicados para os dados do modelo OCCAM (a-c) e do sensor SSM/I (d-f) obtidos do *National Snow and Ice Data Center* (NSIDC).



**Figura IV-23.** Média climatológica da concentração de gelo marinho (SIC) para o mês de setembro dos períodos indicados para os dados do modelo OCCAM (a-c) e do sensor SSM/I (d-f) obtidos do *National Snow and Ice Data Center* (NSIDC).

Apesar dos períodos de máxima e mínima cobertura de gelo marinho no modelo diferir de no máximo um mês à frente ou atrás da climatologia do SSM/I para alguns setores, em geral, o ciclo anual da SIC representada pelo modelo

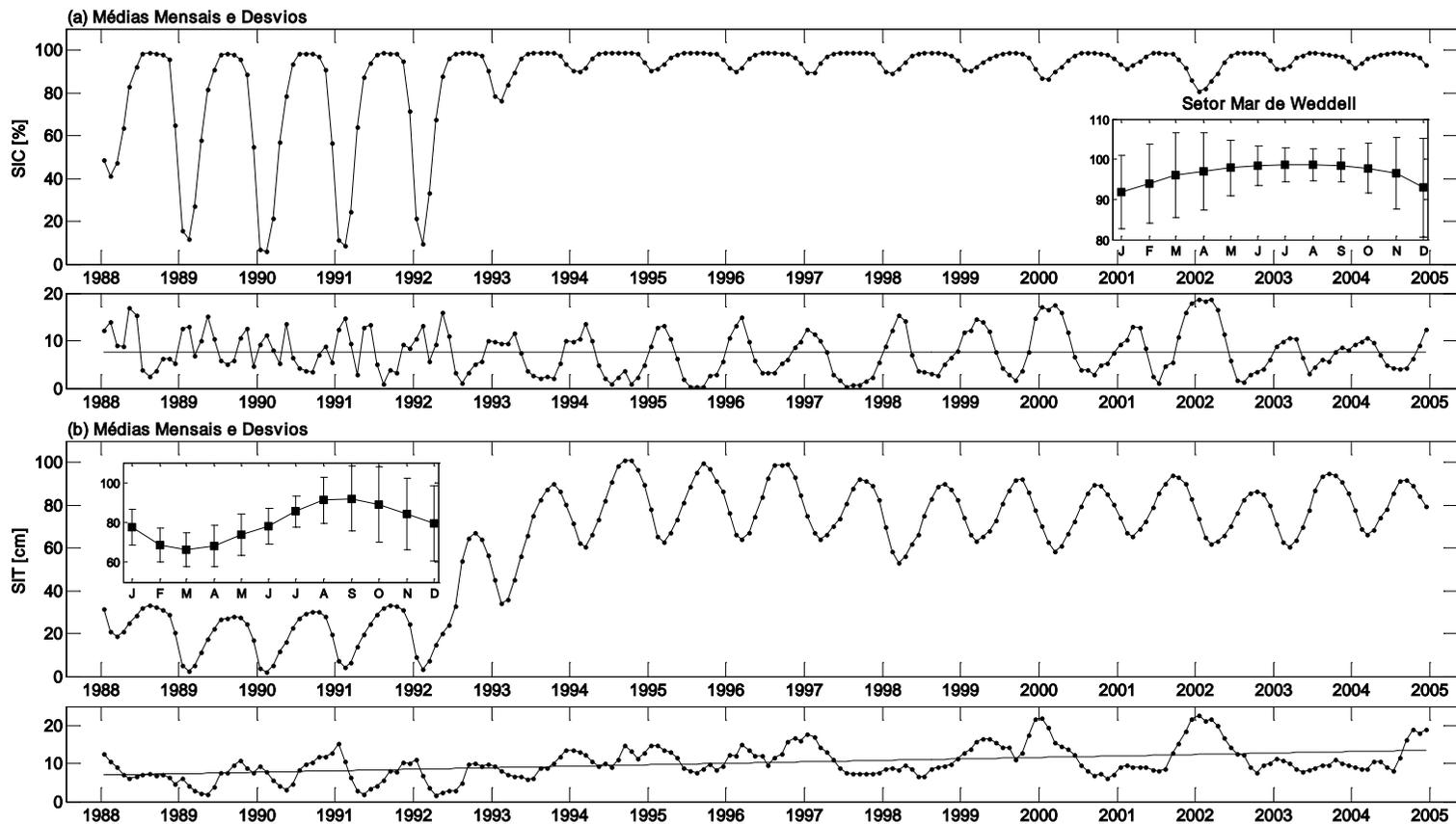
está em fase com a climatologia mensal reportada por [Cavalieri & Parkinson \[2008\]](#) para a extensão do gelo marinho.

A climatologia mensal da SIT no modelo mostra que os períodos de máxima e mínima espessura ocorrem em outubro e março, com algumas poucas exceções. Por outro lado, a variabilidade interanual do modelo é completamente diferente antes e após 1994 (Fig. IV-22 e IV-23). Como destacado por [Renner \*et al.\* \[2009\]](#), após 1994 as variações sazonais são pequenas e a concentração e extensão do gelo permanecem extremamente elevadas mesmo no verão na região do mar de Weddell (Fig. IV-24). Durante o inverno, as concentrações atingem o valor máximo permitido pelo modelo (*i.e.* 99%). Apenas na borda do gelo marinho e nas proximidades da extremidade da Península Antártica e das Ilhas Shetland do Sul a densidade da cobertura de gelo é menor [[Renner \*et al.\* 2009](#)].

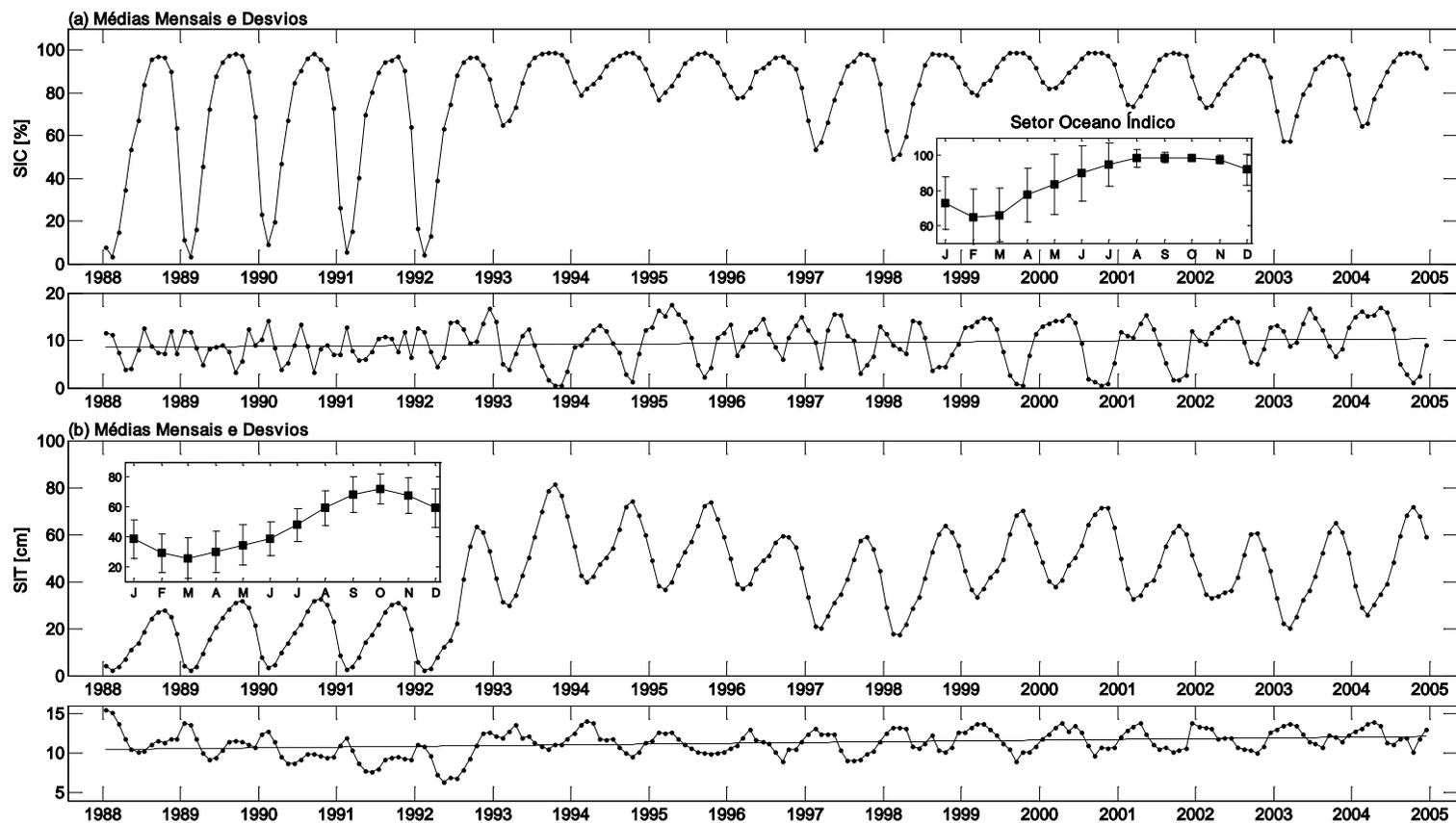
As figuras IV-22 e IV-23 mostram as comparações entre o modelo e os dados observados para os meses de máxima (setembro) e mínima (fevereiro) SIC. A SIC durante o verão é superestimada em todo o oceano Austral após 1994 (Fig. IV-22c), e não somente no mar de Weddell [*e.g.* [Renner \*et al.\* 2009](#)]. Não há nenhuma referência no manual do modelo de gelo [[Aksenov 2002](#)] que indique alguma alteração na simulação ao redor deste período. Antes de 1994, a representação do modelo de gelo aproximava-se mais da realidade (Fig. IV-22b). Por outro lado, o mesmo modelo super ou subestima tanto a concentração como a extensão do gelo marinho em diversos locais ao redor da Antártica. Sendo assim, a média geral da SIC para o verão austral é superestimada pelo modelo (Fig. IV-22a). No entanto, mesmo a SIC sendo superestimada, a maior concentração média da SIC encontra-se nas áreas

esperadas (e.g. leste da Península Antártica, oeste do mar de Ross e na região costeira do mar de Amundsen). Finalmente, a simulação média para o período de inverno não mostra diferenças significantes antes e depois de 1994 (Fig. IV-23). Neste caso, o modelo de gelo falha principalmente na representação dos valores absolutos da SIC nos Setores Oceano Índico e Oceano Pacífico Oeste; e nas bordas da extensão do gelo marinho.

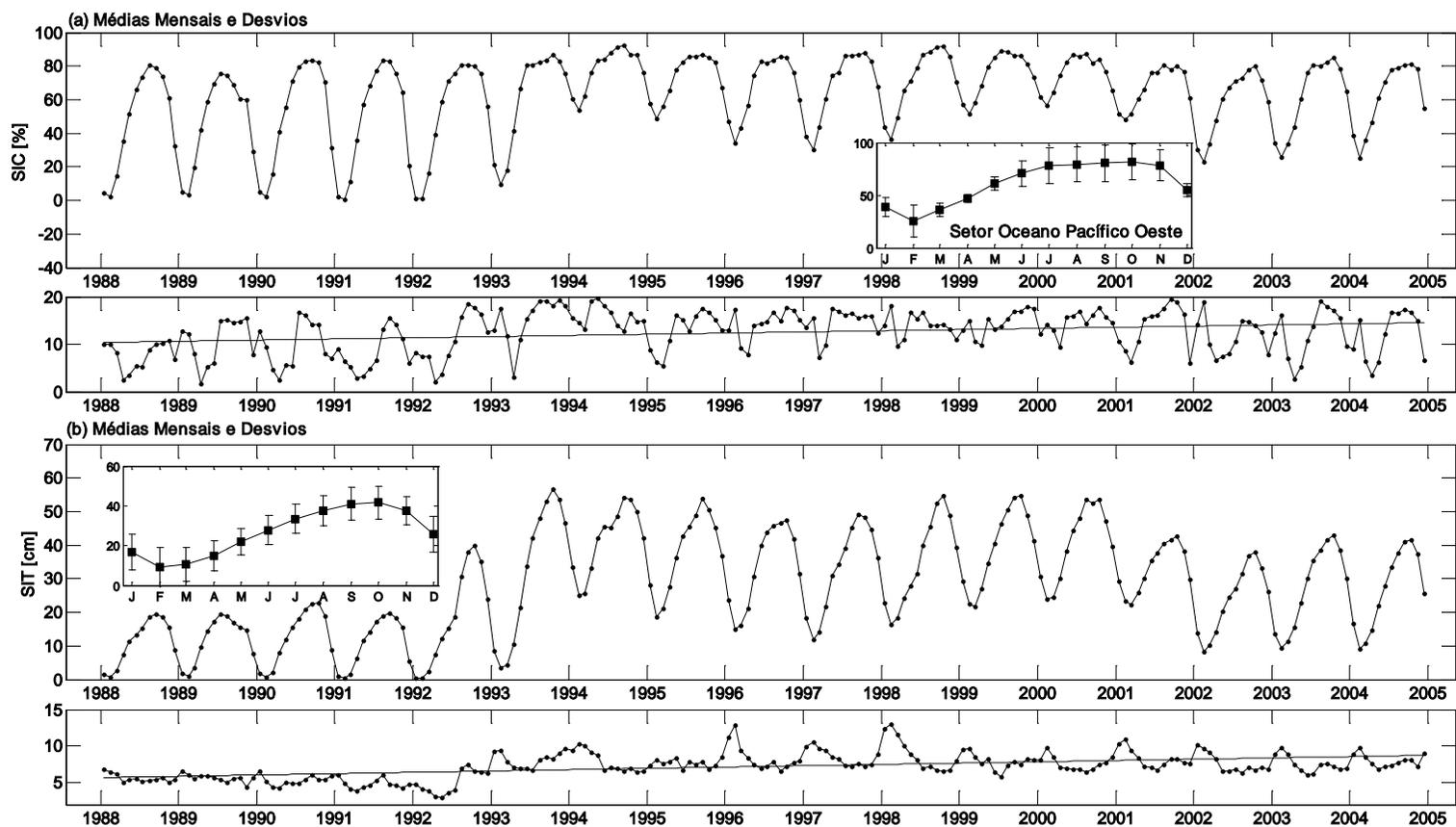
A observação das séries temporais das médias mensais da SIC dos setores do oceano Austral (Fig. IV-24 até IV-28) confirma que há, realmente, uma superestimação da cobertura do gelo marinho com valores próximos ao limite permitido na simulação durante os meses de verão. Entretanto, a diferença sazonal entre os meses de verão e inverno é mais acentuada nos Setores Mares B&A, Oceano Índico, Oceano Pacífico Oeste e Mar de Ross do que no Setor Mar de Weddell. A espessura do gelo marinho aumenta após 1994, provavelmente em função da superestimação da SIC no oceano Austral após este período. Em contrapartida, a análise das tendências significantes dos desvios temporais da SIC e da SIT (ver Apêndice I) mostram uma diminuição da concentração e espessura apenas no Setor Mares de B&A e um aumento para os demais setores, o que se encontra de acordo com as tendências de longo período reportadas por [Cavalieri & Parkinson \[2008\]](#) entre 1979 e 2006 a partir dos dados do SSM/I.



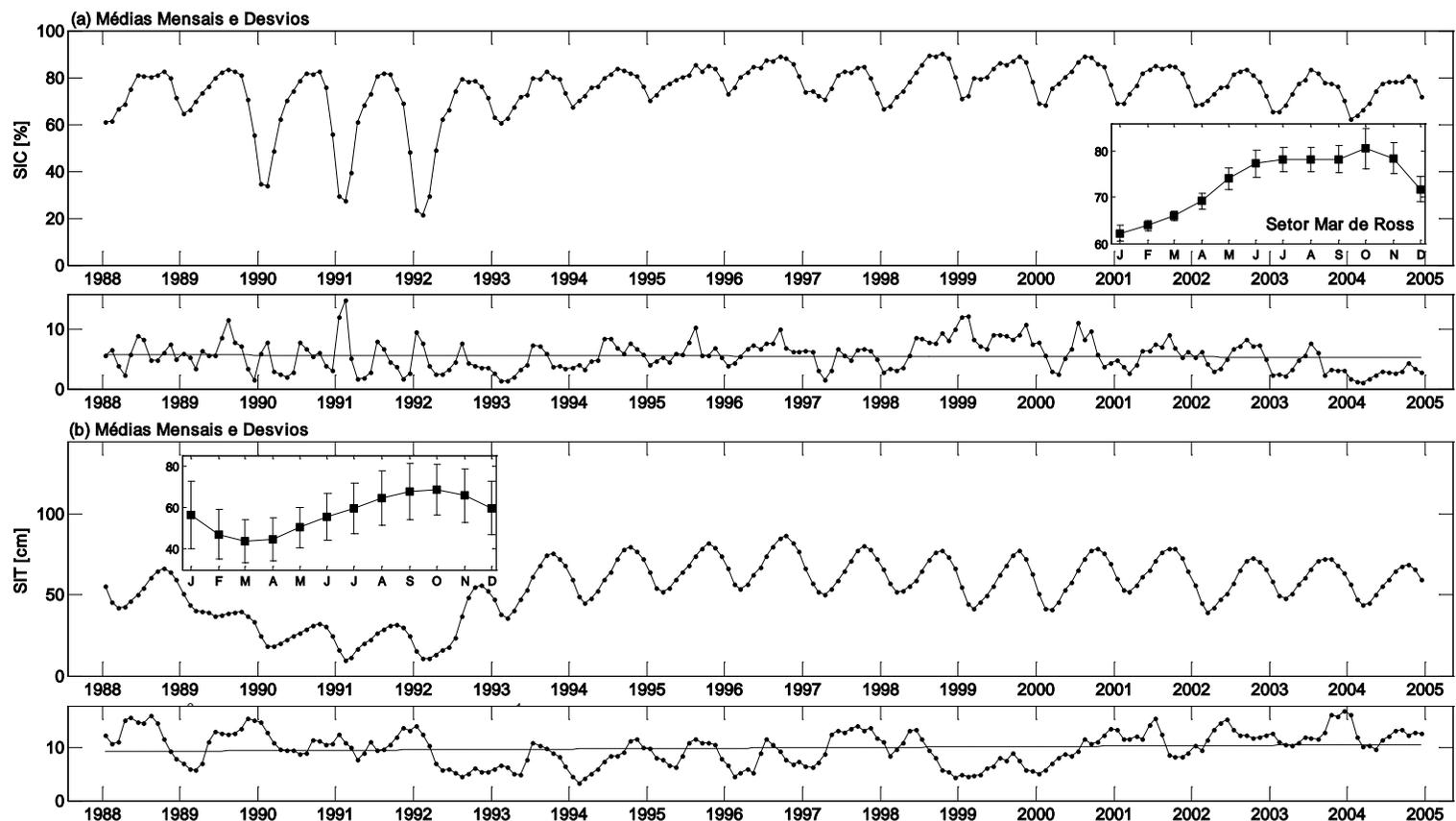
**Figura IV-24.** (painel superior) Médias mensais e (painel inferior) desvios da (a) concentração [%] e (b) espessura [cm] do gelo marinho no Setor Mar de Weddell. As figuras inseridas mostram a média climatológica mensal para todo o período de simulação do OCCAM 1/12°. As linhas tracejadas nos painéis inferiores mostram a tendência dos desvios.



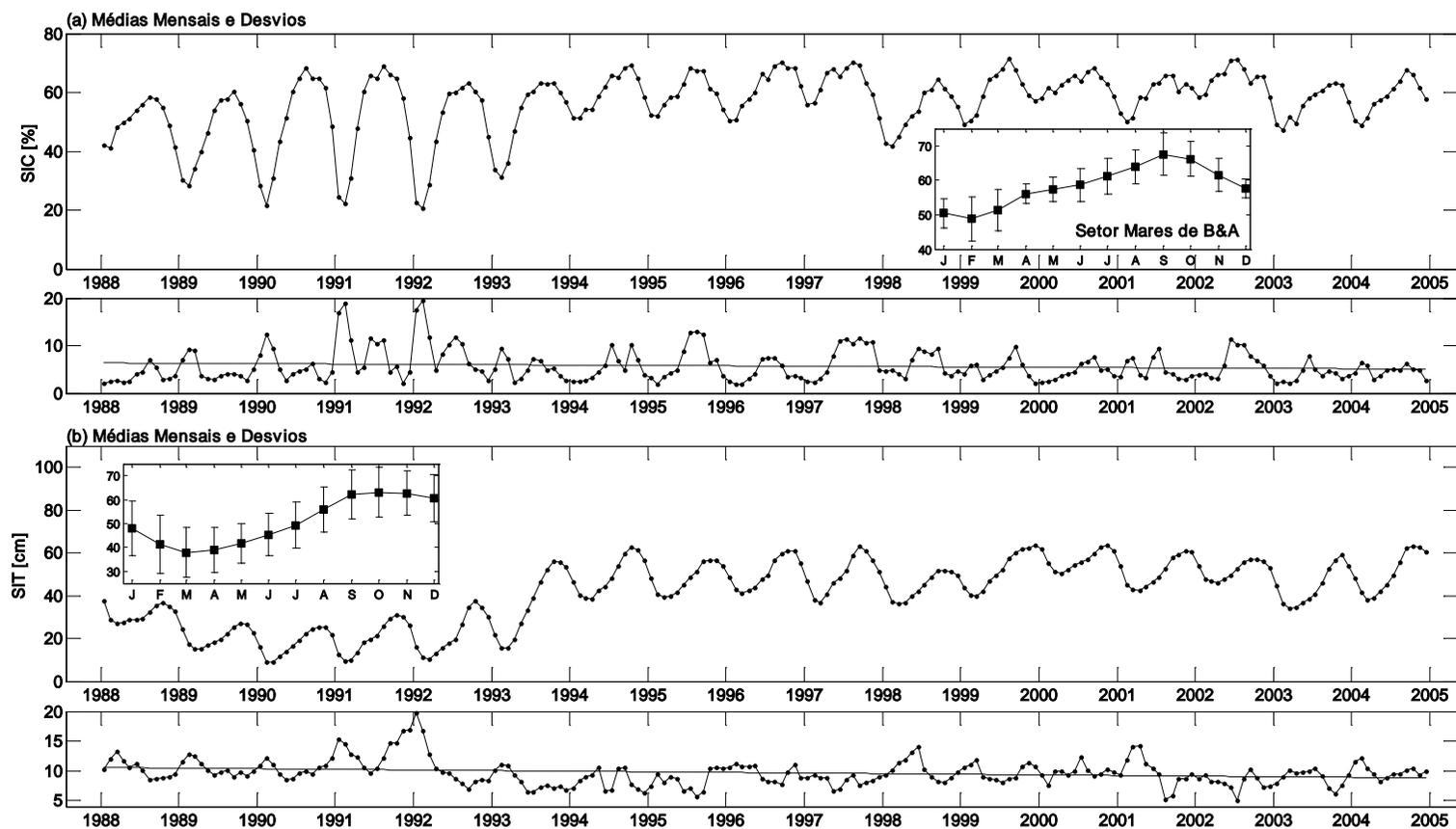
**Figura IV-25.** (painel superior) Médias mensais e (painel inferior) desvios da (a) concentração [%] e (b) espessura [cm] do gelo marinho no Setor Oceano Índico. As figuras inseridas mostram a média climatológica mensal para todo o período de simulação do OCCAM 1/12°. As linhas tracejadas nos painéis inferiores mostram a tendência dos desvios.



**Figura IV-26.** (painel superior) Médias mensais e (painel inferior) desvios da (a) concentração [%] e (b) espessura [cm] do gelo marinho no Setor Oceano Pacífico Oeste. As figuras inseridas mostram a média climatológica mensal para todo o período de simulação do OCCAM 1/12°. As linhas tracejadas nos painéis inferiores mostram a tendência dos desvios.



**Figura IV-27.** (painel superior) Médias mensais e (painel inferior) desvios da (a) concentração [%] e (b) espessura [cm] do gelo marinho no Setor Mar de Ross. As figuras inseridas mostram a média climatológica mensal para todo o período de simulação do OCCAM 1/12°. As linhas tracejadas nos painéis inferiores mostram a tendência dos desvios.



**Figura IV-28.** (painel superior) Médias mensais e (painel inferior) desvios da (a) concentração [%] e (b) espessura [cm] do gelo marinho no Setor Mares de B&A. As figuras inseridas mostram a média climatológica mensal para todo o período de simulação do OCCAM 1/12°. As linhas tracejadas nos painéis inferiores mostram a tendência dos desvios.

## Capítulo V: Produção e exportação das águas profundas

**N**este capítulo são investigadas as taxas de produção e de exportação da AABW representadas pelo modelo OCCAM, respectivamente, nas principais regiões de formação da AABW e ao redor das margens continentais de cada setor definido no oceano Austral. Os resultados médios obtidos do transporte de volume de toda a coluna d'água e somente das águas profundas (*i.e.*  $\gamma^n \geq 28.26 \text{ kg m}^{-3}$ ) são contrastados com aqueles reportados na literatura. A variabilidade interanual e o ciclo anual das séries temporais do transporte de volume das águas profundas são investigados. Uma validação da série temporal do transporte de volume da AABW simulado pelo modelo OCCAM foi realizada a partir da comparação com dados observados disponíveis da região noroeste do mar de Weddell, fornecendo uma maior confiabilidade para o uso das séries temporais de transporte de volume da AABW nas análises e inferências apresentadas nos capítulos seguintes.

### 5.1. Transporte de volume de toda a coluna d'água

O transporte de volume de toda a coluna d'água simulada pelo modelo OCCAM nos principais mares regionais do oceano Austral encontra-se, em geral, de acordo com as observações reportadas na literatura. A seguir, estes são comparados com os valores reportados na literatura em cada setor oceânico.

#### Setor Mar de Weddell

No Setor Mar de Weddell, o valor médio do transporte de volume total da coluna d'água obtido através da simulação do OCCAM (Tab. V-I) está de acordo com os valores reportados na literatura. O transporte de volume médio simulado para toda a coluna d'água encontrado na região noroeste do mar de Weddell, principal área de exportação das águas profundas, é de ~30 Sv para norte. Na região sul e leste do mar de Weddell o fluxo total para oeste decai para cerca de ~20 Sv. Próximo ao limite oeste do Giro de Weddell (*i.e.* Seção 6), o transporte de volume total apresenta um valor médio ligeiramente inferior (~12 Sv) aos reportados para as demais seções do Setor Mar de Weddell.

Os primeiros registros sobre o transporte do Giro de Weddell mostravam que este possuía uma forte componente barotrópica. [Carmack & Foster \[1975a\]](#) deduziram um transporte de 97 Sv para o giro a partir de séries curtas de correntes usadas para referenciar as medidas de velocidades geostróficas. Posteriormente, um valor aproximado de 76 Sv foi reportado por [Gordon \*et al.\* \[1981\]](#) a partir de campos de estresse do vento. Em oposição aos elevados transportes previamente reportados para o mar de Weddell, [Fahrbach \*et al.\*](#)

[1994b], usando medidores de corrente em uma seção cortando toda a extensão do Giro de Weddell entre a Península Antártica e o Kapp Noruegia, reportaram um transporte de  $29.5 \pm 9.5$  Sv. Valores similares (*i.e.*  $28.3 \pm 8.1$  Sv) foram encontrados por Muench & Gordon [1995] em uma seção hidrográfica cortando transversalmente a plataforma continental em  $68^{\circ}$ S. Em concordância, Gordon *et al.* [1993] estimaram um valor de  $\sim 40$  Sv para o transporte total da corrente de contorno oeste, usando a velocidade média da corrente de fundo de  $1.3 \text{ cm s}^{-1}$  como referência. Em outra estimativa, Yaremchuk *et al.* [1998] estimaram o transporte do Giro de Weddell em  $34 \pm 2$  Sv entre 1989-1992, através de um modelo inverso para análise de dados hidrográficos e de correntes.

Mais recentemente, Gordon *et al.* [2001] mostraram que o fluxo ciclônico na Bacia Powel (Fig. III-1 – Cap. III), região profunda ao norte da Seção WOCE SR4 Oeste, transporta um volume de  $18 \pm 6$  Sv. Em concordância, Naveira Garabato *et al.* [2002b] estimaram um transporte para norte de  $22 \pm 7$  Sv para toda a coluna d'água sobre a Cordilheira Scotia do Sul. Os transportes destes dois últimos estudos foram derivados a partir de perfiladores de correntes acústico LADCP (*Lowered Acoustic Doppler Current Profiler*). No entanto, o transporte decaiu para  $7 \pm 6$  Sv quando aplicado a dados não sinóticos e derivados a partir de um modelo inverso de caixa na região noroeste do mar de Weddell [Naveira Garabato *et al.* 2002b]. Conclui-se, portanto, que a região noroeste do mar de Weddell transporta um volume total que varia entre 20-40 Sv. Estes valores abrangem a média entre 20-30 Sv encontrada para o transporte de volume total simulado pelo modelo OCCAM na região.

No entanto, o transporte de volume médio total da coluna d'água encontrado no modelo OCCAM na região noroeste do Setor Mar de Weddell é relativamente inferior ao recente valor de  $46 \pm 8$  Sv reportado por [Thompson & Heywood \[2008\]](#). Os autores estimaram o transporte na mesma região da Seção WOCE SR4 Oeste durante o verão austral de 2007 na campanha do projeto *Antarctic Drift Experiment Link to Isobaths and Ecosystems* (ADELIE). A diferença principal comparada aos trabalhos pretéritos deve-se ao fato de que o projeto ADELIE resolveu o sistema de correntes frontais com maior acurácia do que estudos anteriores, derivando o transporte tanto a partir de dados de LADCP como através de uma alta resolução espacial entre as estações hidrográficas. Por outro lado, o transporte simulado pelo modelo OCCAM refere-se à média do transporte de volume considerando-se os 17 anos de simulação, enquanto que os valores observados são estimados a partir de períodos instantâneos (*i.e. snapshots* referentes à época de realização dos cruzeiros) ou a partir de séries temporais de curto período (*e.g.* < 3 anos). Sendo assim, os valores médios simulados estão sujeitos a incorporar: (i) variabilidade de curto período, (ii) tendências de longo período e (iii) situações de eventos extremos na exportação do volume total da coluna d'água.

Na região leste do mar Weddell ( $\sim 72^\circ\text{S}/15^\circ\text{W}$ ), [Heywood \*et al.\* \[1998\]](#) estimaram um transporte total para sudoeste de  $14 \pm 3$  Sv na base do talude continental, derivando o mesmo a partir de perfiladores acústicos de correntes ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*) e dados hidrográficos. Assim como a região noroeste do mar Weddell, o transporte de volume observado na região leste do mesmo por [Heywood \*et al.\* \[1998\]](#) está de acordo com a média dos valores médios (*i.e.*  $\sim 17$  Sv) encontrados entre as Seções Weddell Leste e

Enderby Leste (Tab. V-I). Os valores inferiores de transporte na Seção Enderby Leste (~12 Sv) corroboram com os resultados de Reid [1989, 1994], que mostram um transporte de ~10 Sv próximo à costa desta região, que delimita o contorno oeste do Giro de Weddell.

### Setor Oceano Índico

Considerando os dados simulados pelo OCCAM, o Setor Oceano Índico apresenta uma variação maior no transporte de volume de toda a coluna d'água entre as seções selecionadas ao longo da margem continental Antártica (Tab. V-I). Próximo ao limite com o Setor Mar de Weddell, o transporte de volume máximo simulado para a Seção Índico Oeste (*i.e.* ~11 Sv) equivale aos valores médios de ~12 Sv encontrados na região da Seção Enderby Leste. As demais seções apresentam um transporte de volume máximo ligeiramente inferior variando entre 5 e 8 Sv. Enquanto na Seção Índico Oeste o transporte médio de volume total da coluna d'água é de 7 Sv, na Seção Baía Prydz este valor decai para cerca de 2 Sv.

Reid [2003] mostra que o transporte de volume total da coluna d'água decai para aproximadamente zero, próximo da costa Antártica entre 40°E e 60°E. Isto se deve, principalmente, devido à extensão do Giro de Weddell até ~30°E e abaixo de 60°S, explicando os baixos valores (Tab. V-I) encontrados para a Seção Índico Médio e caracterizando a inversão no sentido do fluxo médio ( $-0.4 \pm 5.0$  Sv). Por outro lado, considerando a Seção Baía Prydz os valores simulados de ~2 Sv ( $2.1 \pm 6.1$  Sv) para oeste, com alta variabilidade, diferem bastante das estimativas realizadas a partir de observações. Speer & Forbes [1994] obtiveram um transporte total para leste de ~8 Sv, contudo não

consideraram em suas estimativas a componente barotrópica do fluxo. [Heywood et al. \[1999\]](#) estimaram um transporte absoluto para oeste de  $34 \pm 10$  Sv na região da PET entre  $62^\circ\text{S}$  e  $66^\circ\text{S}$ , diferindo fortemente do valor de 19 Sv para leste obtido pelos mesmos considerando o nível de referência profundo de 2000 dbar. Considerando somente a região ao sul da PET entre  $65^\circ\text{S}$  e  $66^\circ\text{S}$  (*i.e.* equivalente a Seção Baía Prydz), [Heywood et al. \[1999\]](#) determinaram um transporte total para oeste de  $45 \pm 6$  Sv para toda a coluna d'água. Por outro lado, quando considerado apenas o fluxo em torno de  $63^\circ\text{S}$ , [Heywood et al. \[1999\]](#) determinaram um transporte para oeste de  $16 \pm 4$  Sv para toda a coluna d'água. Este último valor é mais próximo aos valores máximos reportados pelo OCCAM ( $\sim 8$  Sv) na região, embora ainda bastante inferior ao valor mínimo observado ( $\sim 12$  Sv). Estas diferenças devem-se ao fato da seção amostrada por [Heywood et al. \[1999\]](#) encontrar-se ligeiramente a leste ( $\sim 5^\circ$ ) da Seção Baía Prydz e estender-se  $\sim 3^\circ$  ao norte. Além disso, a região é dinamicamente ativa devido à aproximação e ao meandramento da Frente Sul da ACC (SACCF) e da Frente do Limite Sul (SBDY; Fig. II-2 – Cap. II). Adicionalmente, a Seção Baía Prydz definida para análise, por sua vez, localiza-se próximo à inflexão para sul e oeste do Giro da Baía Prydz.

### Setor Oceano Pacífico Oeste

Assim como no Setor Oceano Índico, o transporte de volume de toda a coluna d'água simulado pelo OCCAM é bastante variável nas regiões selecionadas no Setor Oceano Pacífico Oeste (Tab. V-I). Na Seção Pacífico Oeste o transporte médio máximo para oeste é de  $\sim 16$  Sv. Este valor decresce