

SÉRIE SUSTENTABILIDADE

JOSÉ GOLDEMBERG

COORDENADOR

9



**Antártica e
as Mudanças
Globais:
um desafio para a humanidade**

JEFFERSON CARDIA SIMÕES

CARLOS ALBERTO EIRAS GARCIA

HEITOR EVANGELISTA

LÚCIA DE SIQUEIRA CAMPOS

MAURÍCIO MAGALHÃES MATA

ULISSES FRANZ BREMER

Blucher

SÉRIE SUSTENTABILIDADE

Antártica e as Mudanças Globais

Blucher

SÉRIE SUSTENTABILIDADE

JOSÉ GOLDEMBERG

Coordenador

Antártica e as Mudanças Globais

um desafio para a humanidade

VOLUME 9

JEFFERSON CARDIA SIMÕES

CARLOS ALBERTO EIRAS GARCIA

HEITOR EVANGELISTA

LÚCIA DE SIQUEIRA CAMPOS

MAURÍCIO MAGALHÃES MATA

ULISSES FRANZ BREMER

Antártica e as mudanças globais
© 2011 Jefferson Cardia Simões
Carlos Alberto Eiras Garcia
Heitor Evangelista
Lúcia de Siqueira Campos
Maurício Magalhães Mata
Ulisses Franz Bremer

Editora Edgard Blücher Ltda.



Blucher

Rua Pedroso Alvarenga, 1.245, 4º andar
04531-012 – São Paulo – SP – Brasil
Tel.: 55 (11) 3078-5366
editora@blucher.com.br
www.blucher.com.br

Segundo Novo Acordo Ortográfico, conforme 5. ed.
do *Vocabulário Ortográfico da Língua Portuguesa*,
Academia Brasileira de Letras, março de 2009.

É proibida a reprodução total ou parcial por quais-
quer meios, sem autorização escrita da Editora.

Todos os direitos reservados pela
Editora Edgard Blücher Ltda.

Ficha catalográfica

Antártica e as mudanças globais: um
desafio para a humanidade: volume 9 / José
Goldemberg, coordenador. -- São Paulo:
Blucher 2011. -- (Série sustentabilidade)

Vários autores
ISBN 978-85-212-0635-4

1. Antártica 2. Meio ambiente - Preservação
3. Mudanças ambientais globais 4. Mudanças
climáticas globais 5. Regiões polares
I. Goldemberg, José. II. Série.

11.09941

CDD-550

Índices para catálogo sistemático:

1. Antártica: Mudanças climáticas e a preservação
ambiental: Ciências 550

Apresentação

Prof. José Goldemberg

Coordenador

O conceito de desenvolvimento sustentável formulado pela Comissão Brundtland tem origem na década de 1970, no século passado, que se caracterizou por um grande pessimismo sobre o futuro da civilização como a conhecemos. Nessa época, o Clube de Roma – principalmente por meio do livro *The limits to growth* [*Os limites do crescimento*] – analisou as consequências do rápido crescimento da população mundial sobre os recursos naturais finitos, como havia sido feito em 1798, por Thomas Malthus, em relação à produção de alimentos. O argumento é o de que a população mundial, a industrialização, a poluição e o esgotamento dos recursos naturais aumentavam exponencialmente, enquanto a disponibilidade dos recursos aumentaria linearmente. As previsões do Clube de Roma pareciam ser confirmadas com a “crise do petróleo de 1973”, em que o custo do produto aumentou cinco vezes, lançando o mundo em uma enorme crise financeira. Só mudanças drásticas no estilo de vida da população permitiriam evitar um colapso da civilização, segundo essas previsões.

A reação a essa visão pessimista veio da Organização das Nações Unidas que, em 1983, criou uma Comissão presidida pela Primeira Ministra da Noruega, Gro Brundtland, para analisar o problema. A solução proposta por essa Comissão em seu relatório final, datado de 1987, foi a de recomendar um padrão de uso de recursos naturais que atendessem às atuais necessidades da humanidade, preservando o meio ambien-

te, de modo que as futuras gerações poderiam também atender suas necessidades. Essa é uma visão mais otimista que a visão do Clube de Roma e foi entusiasticamente recebida.

Como consequência, a Convenção do Clima, a Convenção da Biodiversidade e a Agenda 21 foram adotadas no Rio de Janeiro, em 1992, com recomendações abrangentes sobre o novo tipo de desenvolvimento sustentável. A Agenda 21, em particular, teve uma enorme influência no mundo em todas as áreas, reforçando o movimento ambientalista.

Nesse panorama histórico e em ressonância com o momento que atravessamos, a Editora Blucher, em 2009, convidou pesquisadores nacionais para preparar análises do impacto do conceito de desenvolvimento sustentável no Brasil, e idealizou a *Série Sustentabilidade*, assim distribuída:

1. **População e Ambiente: desafios à sustentabilidade**
Daniel Joseph Hogan/Eduardo Marandola Jr./Ricardo Ojima
2. **Segurança e Alimento**
Bernadette D. G. M. Franco/Silvia M. Franciscato Cozzolino
3. **Espécies e Ecossistemas**
Fábio Olmos
4. **Energia e Desenvolvimento Sustentável**
José Goldemberg
5. **O Desafio da Sustentabilidade na Construção Civil**
Vahan Agopyan/Vanderley M. John
6. **Metrópoles e o Desafio Urbano Frente ao Meio Ambiente**
Marcelo de Andrade Roméro/Gilda Collet Bruna
7. **Sustentabilidade dos Oceanos**
Sônia Maria Flores Giancesella/Flávia Marisa Prado Saldanha-Corrêa
8. **Espaço**
José Carlos Neves Epiphânio/Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo/Luiz Augusto Toledo Machado
9. **Antártica e as Mudanças Globais: um desafio para a humanidade**
Jefferson Cardia Simões/Carlos Alberto Eiras Garcia/Heitor Evangelista/Lúcia de Siqueira Campos/Maurício Magalhães Mata/Ulisses Franz Bremer
10. **Energia Nuclear e Sustentabilidade**
Leonam dos Santos Guimarães/João Roberto Loureiro de Mattos

O objetivo da *Série Sustentabilidade* é analisar o que está sendo feito para evitar um crescimento populacional sem controle e uma industrialização predatória, em que a ênfase seja apenas o crescimento econômico, bem como o que pode ser feito para reduzir a poluição e os impactos ambientais em geral, aumentar a produção de alimentos sem destruir as florestas e evitar a exaustão dos recursos naturais por meio do uso de fontes de energia de outros produtos renováveis.

Este é um dos volumes da *Série Sustentabilidade*, resultado de esforços de uma equipe de renomados pesquisadores professores.

Referências bibliográficas

MATTHEWS, Donella H. et al. *The limits to growth*. New York: Universe Books, 1972.

WCED. *Our common future*. Report of the World Commission on Environment and Development. Oxford: Oxford University Press, 1987.

Prefácio

*Jefferson C. Simões
Carlos A. E. Garcia
Heitor Evangelista
Lúcia de Siqueira Campos
Maurício M. Mata
Ulisses F. Bremer*

O avanço do conhecimento científico ao longo dos últimos 30 anos mostrou que as regiões polares são tão importantes quanto o trópicos no sistema ambiental – e especificamente para o clima mundial. Essa conclusão não deveria ser inesperada, pois o sistema ambiental é único e indivisível, existindo um contínuo pela transferência de energia entre os trópicos e os polos através da circulação geral da atmosfera e oceanos. No entanto, talvez por ainda persistir o mito do país tropical isolado de processos ambientais que ocorrem em outras partes do planeta, o público brasileiro ainda discute pouco o papel da Antártica no seu cotidiano. Ao longo de seis capítulos mostramos as características especiais que fazem da Região Antártica uma das mais sensíveis às variações climáticas na escala global e as interligações com processos que ocorrem em latitudes menores, em especial na atmosfera e oceano da América do Sul.

É sempre relevante notar que a Antártica é o último continente intocado do planeta, o único que ficou na sua forma original existente antes da expansão do espaço ocupado pela humanidade. Exemplo de cooperação internacional ao longo dos últimos 50 anos, é a nossa última chance de trabalharmos em conjunto pela preservação ambiental do planeta. Se lá falharmos, teremos poucas chances de ter sucesso em outras regiões da nossa casa!

Agradecimentos

Todos os autores deste livro são pesquisadores do Programa Antártico Brasileiro (PROANTAR), assim, eles agradecem as instituições que têm apoiado a pesquisa brasileira naquele continente: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), Ministério do Meio Ambiente (MMA), Secretaria Interministerial para os Recursos do Mar (Secirm), Frente Parlamentar em Prol do Proantar.

A elaboração deste livro contou com o apoio do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia da Criosfera (J. C. Simões, H. Evangelista, M. M. Mata, U. F. Bremer) e do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia Antártico de Pesquisas Ambientais (L. S. Campos). Os autores agradecem o apoio e o financiamento dessas duas instituições.

As informações contidas em diversos capítulos resultam de muitos programas internacionais do *Scientific Committee on Antarctic Research* (SCAR) do Conselho Internacional para Ciências (ICSU) e que podem ser mais bem detalhados no site: www.scar.org e de nossas próprias pesquisas, incluindo do Ano Polar Internacional (2007-2009)

Os autores agradecem o apoio dos seguintes colegas que, em um momento ou outro, revisaram o texto ou contribuíram com as ilustrações deste volume: Alexandre S. de Alencar (UERJ), Antonio B. Pereira (Unipampa), Carlos Alberto de M. Barboza, Edson Rodrigues e equipe (Universidade Taubaté), Elaine Alves (UERJ), Emily C. Creasey, Erli Costa (UFRJ), Evandro Monteiro, Francisco E. Aquino (UFRGS), Gabriel S. C. Monteiro (USP), Helena P. Lavrado (UFRJ), Jéssica Saturno, José H. Muelbert (FURG), Julian Gutt e Werner Dimmler (Alfred-Wegener Institut für Polar- und Meeresforschung/Alemanha), Katrin Linse e Peter Convey (British Antarctic Survey), Manuela Bassoi (UFRJ), Márcio Cataldo G. da Silva (UERJ), Patrícia Baldasso (FURG), Priscila K. Lange, Rafael B. de Moura (UFRJ), Rafael Fortes e Suely Ferrari.

Conteúdo

1 O ambiente antártico: domínio de extremos, 15

1.1 Introdução: a área de interesse, 15

1.2 O cenário físico, 18

1.3 O papel das regiões polares no sistema climático global, 22

1.4 Frio, seco e ventoso: o clima da Antártida e a circulação atmosférica e oceânica, 23

2 A atmosfera antártica e os sinais das mudanças globais, 29

2.1 Introdução, 29

2.2 A camada de ozônio na Antártica, 32

2.2.1 A redução da camada de ozônio antártico, 33

2.2.2 Implicação da redução da camada de ozônio para a criosfera e a climatologia antártica, 36

2.3 Temperatura da atmosfera, precipitação e fenômenos ENOS, 37

2.4 Transporte de material particulado para a Antártica, 40

2.5 Poeira mineral, desertificação e ciclos biogeoquímicos na Antártica, 42

2.6 Detectando sinais das queimadas no continente antártico, 46

3 Oceano Austral e o clima, 53

- 3.1 Introdução, 53
- 3.2 Limites e topografia do Oceano Austral, 54
- 3.3 O papel ambiental do gelo marinho e dos icebergs no Oceano Austral, 55
- 3.4 Correntes oceânicas, 58
- 3.5 Frentes oceânicas, convergências e divergências no Oceano Austral, 59
- 3.6 Formação de águas profundas e de fundo no Oceano Austral, 60
- 3.7 Oceano Austral, Clima e CO₂, 62
- 3.8 O Oceano Austral e mudanças climáticas, 64

4 O papel do gelo Antártico no Sistema Climático, 69

- 4.1 Introdução, 69
- 4.2 A cobertura de gelo no continente Antártico, 72
- 4.3 O gelo marinho e o Oceano Austral, 80
- 4.4 O papel climático da massa de gelo planetário, 82
- 4.5 Respostas do gelo Antártico às variações ambientais recentes, 84
 - 4.5.1 O derretimento das massas de gelo e o impacto no nível médio do mar, 84
 - 4.5.2 O derretimento do gelo marinho ártico e antártico: dois cenários bem diferentes, 90
- 4.6 O registro das mudanças climáticas no passado a partir de testemunhos de gelo, 92

5 O *permafrost*, os criossolos e as mudanças climáticas, 103

5.1 Introdução, 103

5.2 Distribuição do *permafrost* no mundo, 105

5.3 Os criossolos, 106

5.3.1 Criossolos na antártica, 107

5.4 O papel ambiental do *permafrost*, 108

5.4.1 O *permafrost* e a camada ativa no ambiente periglacial antártico, 108

5.4.2 Formas e depósitos associados à camada ativa, 110

5.4.3 Conceito, condicionantes e processos periglaciais, 110

5.4.4 Relações geoecológicas do *permafrost* e dos criossolos, 111

5.5 Sinais de modificações recentes no *permafrost*, 114

5.5.1 Hidratos de metano, 115

6 A biodiversidade antártica: adaptações evolutivas e a sensibilidade às mudanças ambientais, 121

6.1 Introdução, 121

6.2 Biodiversidade antártica terrestre, 127

6.3 Organismos terrestres: adaptações evolutivas e respostas biológicas às mudanças ambientais, 132

6.4 Biodiversidade antártica marinha, 135

6.5 Organismos marinhos: adaptações evolutivas e respostas biológicas às mudanças ambientais, 143

6.6 Considerações finais, 153

7 O futuro: mudanças climáticas e a preservação ambiental da Antártica, 163

7.1 Introdução, 163

7.2 Principais mudanças ambientais e o futuro, 164

1 O ambiente antártico: domínio de extremos

Jefferson Cardia Simões

Centro Polar e Climático
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)
E-mail: jefferson.simoies@ufrgs.br

1.1 Introdução: a área de interesse

Iniciamos este capítulo com a definição da área geográfica abordada neste livro. Evidentemente, os limites são relativos, ainda mais que examinamos adiante as relações entre a região polar e latitudes menores, principalmente com o Atlântico Sul. Assim, como de praxe na literatura internacional atualizada, adotamos como limite da região de interesse a Zona da Frente Polar Antártica (antigamente chamada de Convergência Antártica). Essa zona é um limite oceanográfico que marca onde a água antártica fria e densa encontra e afunda por debaixo da água tépida e menos densa dos Oceanos Atlântico, Pacífico e Índico. Conforme pode ser observado na Figura 1.1, é uma linha circumpolar cuja posição média oscila entre 48 e 62°S, conforme a longitude, ou seja, sua posição média (58°S) está ao norte do Círculo Polar Antártico (66,5°S), e este limite muda ao longo das estações do ano, podendo atingir os 50°S no inverno. Tal limite tem também significado climatológico (coincide com a isoterma de 10 °C do mês mais quente do ano, fevereiro) e representa um limite biogeográfico, ocorrendo aí, por exemplo, mudanças bruscas na composição planctônica. No total, a Região Antártica cobre aproximadamente 45,6 milhões de quilômetros quadrados (ou quase 9% da superfície terrestre), e é constituída pelo Oceano Austral, que é formado pela conjunção das massas d'água das três grandes bacias oceânicas, e o continente propriamente dito, a Antártica¹ (Figura 1.2), com 13,8 milhões de quilômetros quadrados. Toda a Região Antártica é objeto deste livro.

¹ A maioria dos autores da língua portuguesa preferem o termo Antártica, no entanto o galicismo Antártida também é considerado correto.

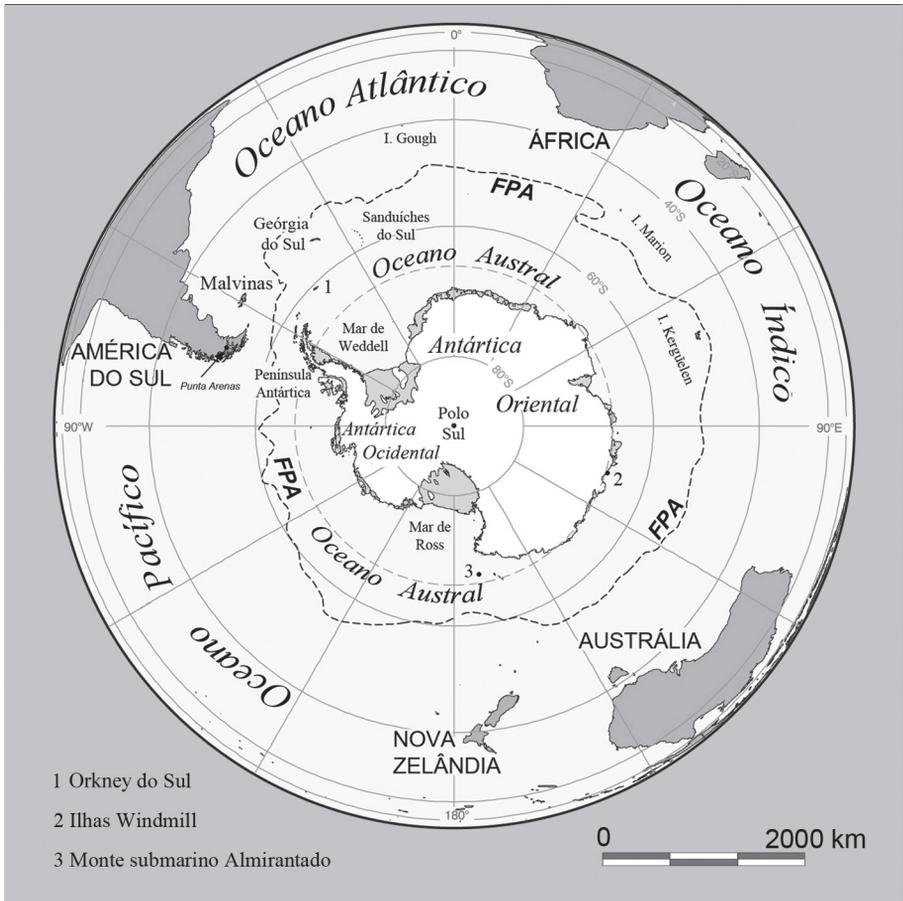


FIGURA 1.1 – Localização e limites da Região Antártica. FPA representa a posição média da Zona da Frente Polar Antártica. Note os pontos (1) ilhas Orkney do Sul, (2) ilhas Windmill, (3) monte submarino Almirantado e (4) Estação Antártica Comandante Ferraz (Brasil), citados em outras partes deste livro. Fonte: Landsat Image Mosaic of Antarctica (LIMA) – U.S. Geological Survey (<http://lima.usgs.gov/>).

Em suma, temos um continente circundado pela massa d'água, o que tem papel importante na definição das condições climáticas austrais, contrastando com o Ártico (uma bacia oceânica circundada pela maior massa continental do planeta, Eurásia e América do Norte).

Uma das dificuldades para se compreender a relevância ambiental da Região Antártica para a América do Sul encontra-se na falsa percepção de que trata-se de um continente isolado e periférico. Isso se deve ao uso de projeções cartográficas inadequadas para representação de uma região polar nos atlas tradicionais existentes na literatura brasileira. Assim, na Figura 1.3A apresentamos uma visão em perspectiva onde fica clara a proximidade da Região Antártica. Explicitamente, os

estados de Santa Catarina e do Rio Grande do Sul estão mais próximos da Região Antártica do que do norte da Região Amazônica. Já a Figura 1.3B coloca na mesma projeção e escala a área territorial do continente antártico e do Brasil. A dimensão continental do continente branco fica clara ao constatarmos que a Estação Antártica Comandante Ferraz (62°05'S, 058°24'O, Figura 1.2), na ilha Rei George, ao largo da Península Antártica, está quase a meia distância entre a cidade gaúcha do Chuí (3.177 km) e o Polo Sul geográfico (3.104 km)!

Ao finalizar esta introdução, cabe lembrar que não se deve confundir a Região Polar Antártica e o continente com os conceitos de polos, os quais são somente pontos na superfície terrestre. Por exemplo, o Polo Sul geográfico (latitude 90°S) é onde passa o eixo imaginário de rotação da terra e o Polo Sul magnético (em 2010 estava em 64,4°S, 137,3°E, no Oceano Austral) é para onde a agulha de uma bússola aponta e onde o campo magnético é em teoria vertical.

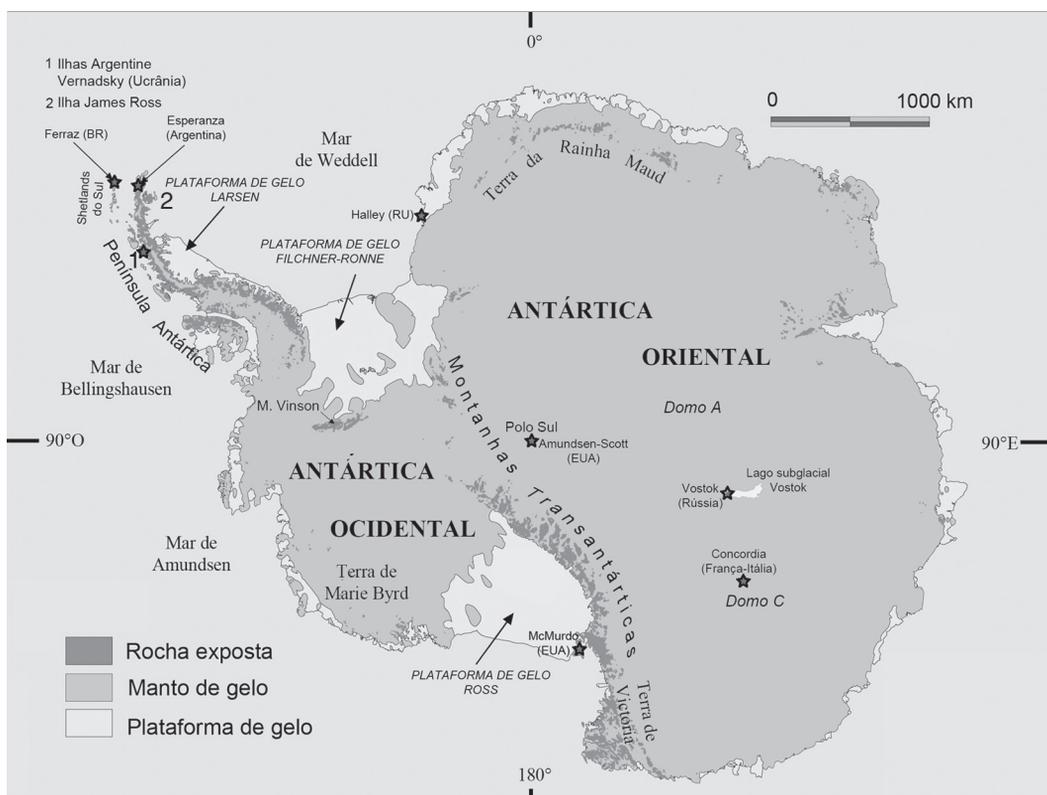


FIGURA 1.2 – Principais locais e estações científicas (estrelas) citadas neste volume. Note os pontos (1) Estação Vernadsky (Ucrânia) nas ilhas Argentinas e (2) a ilha James Ross.

Fonte: Landsat Image Mosaic of Antarctica (LIMA) - U.S. Geological Survey (<http://lima.usgs.gov/>).

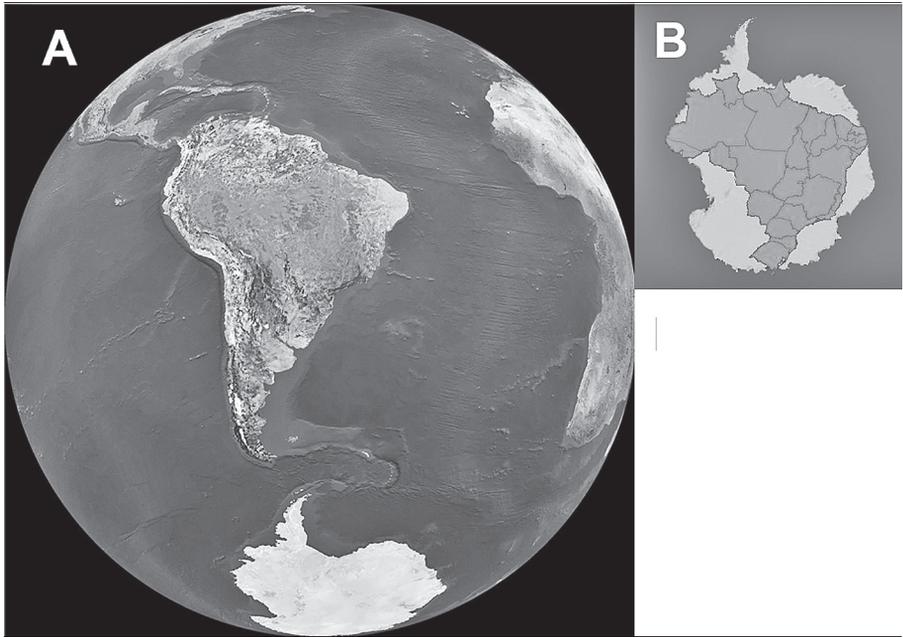


FIGURA 1.3 – Localização da Antártica em relação à América do Sul. A figura menor (B) compara a área territorial do Brasil (8,5 milhões de km^2) com aquela do continente antártico (13,8 milhões de km^2).
Fonte: Centro Polar e Climático, UFRGS.

1.2 O cenário físico

A Figura 1.2 mostra a forma quase circular do continente antártico e em grande parte ao sul do círculo polar. A exceção é a Península Antártica que se estende por mais de 1.300 km em direção à América do Sul, atingindo $63,2^\circ\text{S}$. A morfologia do continente reflete, antes de tudo, a presença do enorme manto de gelo antártico que cobre 99,7% do continente, concentra 90% da massa da criosfera² e que tem espessura média de 1.829 m. Os 25,4 milhões de quilômetros cúbicos de gelo antártico permitiria cobrir homogeneamente o território brasileiro (8,5 milhões de km^2) com uma camada de gelo de 2.988 m de espessura!

No que se convencionou chamar a parte este do continente (este e oeste não fazem sentido em um continente centrado aproximadamente

² Termo usado para se referir coletivamente a todo o gelo e neve existente na Terra e que, ainda hoje, cobre 10% de sua superfície. Os principais componentes são a cobertura de neve, o gelo de água doce em lagos e rios, o gelo marinho, as geleiras de montanha (ou altitude), os mantos de gelo da Antártica e da Groenlândia e o gelo no subsolo (*permafrost*). O prefixo “crio-”, o que significa glacial, frio ou gelado, é originário do grego.

no Polo Sul geográfico!), o manto de gelo da Antártica Oriental ultrapassa 4.050 m de altitude, e atinge 4.776 m de espessura máxima, escondendo o substrato rochoso de rochas antigas (> 600 Ma, milhões de anos atrás) que formam o estável escudo pré-cambriano, cuja geologia é análoga àquelas da América do Sul, África, Índia e Austrália. Algumas montanhas isoladas afloram aqui e ali no manto de gelo, formando verdadeiras ilhas de rocha (conhecidas pelo termo de origem inuit *nunatak*) no meio da imensidão de gelo que é espesso o suficiente para esconder uma cadeia de montanhas (Gamburtsev) de 3.000 m de altitude nas cercanias do Domo A (Figura 1.4). A maior parte do substrato rochoso da Antártica Oriental está acima do nível do mar e o manto de gelo termina no litoral como uma rampa íngreme ou um penhasco de gelo.

O limite da Antártica Ocidental e Oriental é a extensa (3.300 km) cadeia das Montanhas Transantárticas (Figuras 1.2 e 1.4), com 100 a 300 km de largura. Essa cadeia praticamente corta o continente desde a Terra de Victoria até a plataforma de gelo Filchner, e atinge 4.500 metros de altitude. Sua geologia é constituída por uma sequência de rochas sedimentares (arenitos, folhelhos e conglomerados) – do Paleozóico tardio ao Mesozóico médio (400 a 200 Ma) –, assentadas sobre granitos e gnaisses. Estratos de carvão permiano (299 a 251 Ma), fósseis de peixes e plantas, encontrados na sequência sedimentar, permitem a correlação com outras partes do Gondwana, inclusive com o sul do Brasil. A cadeia propriamente dita foi soerguida em um evento orogênico que iniciou há cerca de 50 Ma. Enormes geleiras cortam a cadeia quase transversalmente, descarregando gelo da Antártica Oriental na plataforma de gelo de Ross e em parte do manto de gelo da Antártica Ocidental.

Na Antártica Ocidental, grande parte do substrato rochoso está abaixo do nível do mar. Se todo o gelo fosse removido, teríamos um imenso arquipélago. Ou seja, a maioria do manto de gelo da Antártica Ocidental está assentado sobre um substrato que está bem abaixo do nível do mar (em média –800 m, Figura 1.4B). Essa característica tem papel relevante para hipóteses sobre o impacto de mudanças climáticas nessa parte da criosfera (veja Capítulo 4 deste volume). Essa parte do manto de gelo flui para os embaiamentos onde formam-se as plataformas de gelo de Ross e Filchner-Ronne ou diretamente para o mar de Amundsen (Figuras 1.2 e 1.4). Apesar da baixa altitude média do substrato, o ponto mais alto do continente, o Maciço Vinson (4.892 m) nas Montanhas Ellsworth, encontra-se aqui (Figura 1.2). Predominam

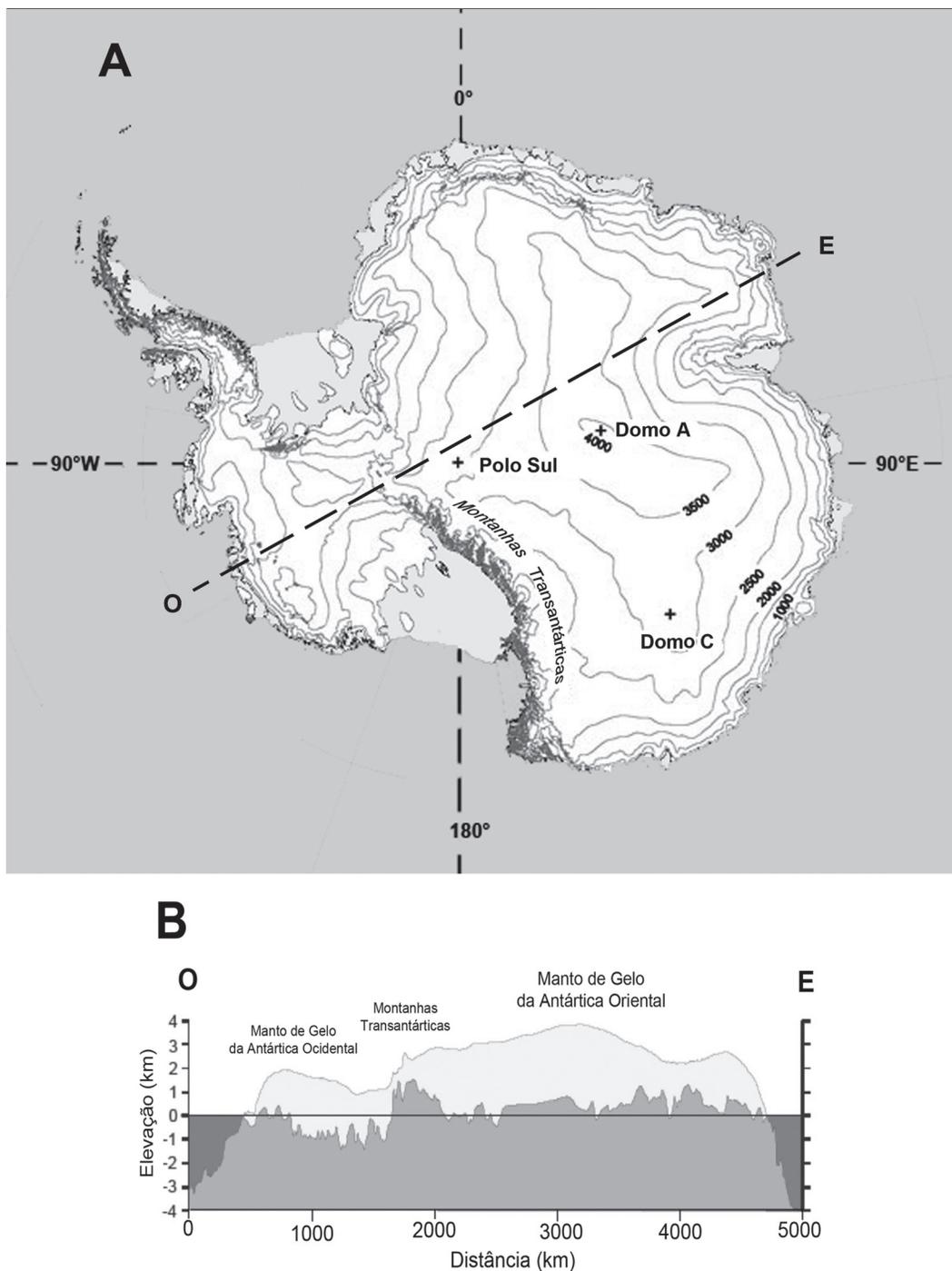


FIGURA 1.4 – Mapa do continente antártico (A), as curvas de nível estão espaçadas em 1.000 metros. Note a posição do Domo A (o local mais frio da Terra). O perfil na parte B da figura representa um corte Oeste – Este (identificado na figura A) e mostra o perfil da superfície de gelo e do substrato rochoso. Observe que o gelo frequentemente ultrapassa 3.000 m de espessura, muitas vezes o fundo rochoso está abaixo do nível médio do mar, principalmente na Antártica Ocidental.

rochas mesozóicas (251 Ma a 65 Ma) e cenozóicas (65 Ma ao presente) nessa parte do continente e que, em geral, tornam-se cada vez mais jovens a partir das Montanhas Transantárticas em direção ao mar de Amundsen. Mas mesmo essa tendência é somente geral, pois, em vários pontos, sequências rochosas mais antigas aparecem, a destacar os Montes Ellsworth, onde são encontradas rochas proterozóicas (2.500 a 542 Ma) e paleozóicas (542 a 245 Ma).

A geologicamente jovem região montanhosa da Península Antártica prorroga-se em direção à América do Sul. Geleiras de vale, íngremes, escorrem a partir de um platô coberto de gelo no topo da Península. Na costa ocidental, para o mar de Bellingshausen (Figura 1.2), essas geleiras terminam diretamente em fiordes onde liberam icebergs de tempo em tempo. Para o lado oriental, em direção ao mar de Weddell, elas coalescem formando a plataforma de gelo Larsen, a qual desde o início da década de 1990 mostra rápida retração (veja Capítulo 4). A Península Antártica é composta extensivamente por rochas vulcânicas e plutônicas de idade mesozóica e cenozóica. Grande parte do magmatismo, dobramento e soergimento na Península Antártica é relacionado à orogenia andina cenozóica.

Finalmente, vulcanismo ativo é observado na costa pacífica da Antártica, em uma linha que inicia na ilha de Ross (vulcão Erebus na proximidades da estação McMurdo, EUA, Figura 1.2), passa pelos vulcões subglaciais na Terra de Marie Byrd e continua na costa da Península Antártica (até a ilhas Deception e Bridgeman no arquipélago das Shetlands do Sul).

Em termos gerais, a distribuição das rochas na Antártica reflete, em grande parte, a amalgamação (cerca de 550 milhões de anos) e fragmentação (há 180 milhões de anos) do supercontinente de Gondwana (formada pela atuais América do Sul, África, Índia, Austrália e Nova Zelândia). O processo lento de separação da Antártica do resto da Gondwana culminará com a abertura completa da Passagem de Drake (em algum momento entre 25 e 30 milhões de anos atrás), que determinará a criação de uma circulação oceânica circumpolar levando à formação do manto de gelo e que, por sua vez, terá importantes consequências para o clima global (veja a próxima seção).

A plataforma continental da Antártica tem uma largura média de 200 km (podendo atingir 1.000 km no mares de Bellingshausen, Wed-

dell e Ross). Duas características morfológicas denotam o impacto do manto de gelo antártico sobre essa plataforma: 1) profundidade média entre 400 e 500 m, mais profunda do que a média mundial, refletindo as condições ambientais reinantes do auge da última Idade do Gelo (cerca de 18.000 anos atrás) quando o manto de gelo avançou sob essa parte da Antártica; e (2) em muitas partes, principalmente na Antártica Ocidental, a plataforma continental torna-se mais profunda conforme aproxima-se do continente, ao contrário das plataformas de outros continentes. Isso é consequência direta da carga isostática (peso) do presente manto de gelo sobre a crosta terrestre e tem importante papel na discussão sobre a resposta da Antártica a mudanças climáticas (veja o Capítulo 4 deste volume).

Cerca de 44% da costa continental termina em falésias de gelo que marcam as frentes da plataformas de gelo³. Estas são as partes flutuantes do manto de gelo, a espessura nelas varia entre 200 e 2.000 m e são fixas à costa. As plataformas de gelo têm, geralmente, grande extensão horizontal e superfície plana ou suavemente ondulada. As maiores, Filchner-Ronne e Ross (Figuras 1.2 e 1.4, veja seção 4.2) cobrem 439 e 510 mil quilômetros quadrados, respectivamente.

Ao redor do continente antártico existe um cinturão de mar congelado com 1 a 2 m de espessura. Sazonalmente, entre verão e inverno, a área desse cinturão expande de uma área mínima ao redor de 3,0 milhões de km² (em fevereiro) para 18 milhões de km² (no final de setembro) – veja Figura 3.2. Na sua extensão máxima, o mar congelado facilmente atinge 60°S, e avança até 55°S ao norte do mar de Weddell, mudando completamente o balanço energético do Oceano Austral, o que terá importantes implicações na circulação oceânica e no clima do hemisfério sul.

1.3 O papel das regiões polares no sistema climático global

Toda a circulação atmosférica e oceânica, e portanto o sistema climático, é forçado basicamente pelo transporte de energia daqueles regiões com balanço positivo (ou seja, que recebem mais energia solar do que per-

³ As plataformas de gelo são partes integrais do manto de gelo e formados de maneira idêntica (pela precipitação e acumulação de neve). Elas não devem ser confundidas o gelo marinho (ou banquisa) que é o mar congelado (veja capítulos 3 e 4).

dem de volta para o espaço) para os dois grandes sorvedouros de energia (ou seja, as regiões polares), que perdem mais energia para o espaço na forma de radiação infravermelha do que recebem do Sol como radiação curta ao longo de um ano. A curvatura da Terra e o ângulo de inclinação de seu eixo de rotação ($23,5^\circ$), em relação ao plano de órbita, explicam o baixo aporte médio de radiação ao longo do ano nas duas regiões polares. Mas, na Antártica, essa perda energética é intensificada pela alta altitude média do continente, 1.958 m, e a alta reflectância (ou albedo, refletindo 85% da radiação solar incidente) da superfície do continente (duas consequências diretas da presença do manto de gelo). Por tratar-se de um continente alto, o transporte de massas de ar para as latitudes maiores é dificultado (num claro contraste com o Ártico, onde tanto correntes atmosféricas e oceânicas amenas penetram a 80°N). Além disso, a expansão do mar congelado durante o inverno austral dificulta, ainda mais, a transferência de energia do mar para a atmosfera, tornando a superfície ainda mais fria. Como consequência, um local na Antártica é, em média, 40°C mais frio do que local similar na mesma latitude no Ártico. A presença desse enorme e frígido sorvedouro de energia resulta em um hemisfério sul mais frio e deslocamento do equador térmico em cerca de 5° para o norte do equador geográfico.

Essas poucas informações já apontam para a interdependência de todo o sistema climático, em que os processos, sua variabilidade e mudanças nas regiões que dissipam calor para o espaço (as regiões polares) é tão importante para o todo quanto aqueles que ocorrem nos trópicos (a fonte de calor).

1.4 Frio, seco e ventoso: o clima da Antártica e a circulação atmosférica e oceânica

A Figura 1.5 ilustra a distribuição, quase concêntrica, de temperatura média do ar na superfície do continente antártico. Note a grande diferença de temperatura entre a Antártica Marítima (a costa oeste da Península Antártica), onde as temperaturas médias anuais aproximam-se do 0°C , e o interior do continente onde as médias entre -25 e -45°C é a norma. No topo do platô do manto de gelo da Antártica Oriental, em decorrência da grande altitude, as temperaturas médias anuais caem abaixo dos -55°C . Foi nesse platô que foi registrada a temperatura mínima absoluta no planeta, $-89,2^\circ\text{C}$ em 21 de julho de 1983, na es-

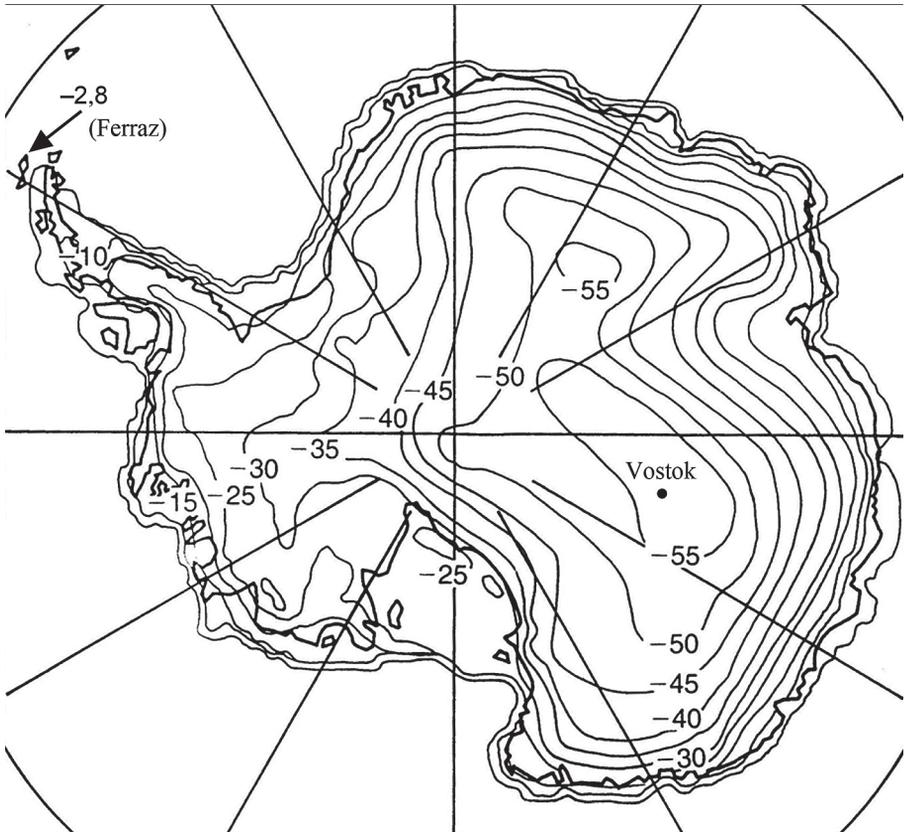


FIGURA 1.5 – Distribuição da temperatura média anual no continente antártico, isotermas em °C. Note a grande diferença de temperatura média entre a Península Antártica (canto superior esquerdo) e o platô do manto de gelo. A seta identifica a ilha Rei George, local da Estação Antártica Comandante Ferraz, onde a temperatura média anual alcança $-2,8^{\circ}\text{C}$.

Fonte: Connoley e Cattle (1994).

tação russa Vostok (Figura 1.2). Note que o lugar mais frio do planeta é o Domo A, onde recentemente os chineses instalaram uma estação científica de verão.

A maior parte da precipitação na Antártica cai como neve, apesar de ocorrer chuva em localidades da costa, durante o verão. É no litoral que ocorre a maior precipitação, onde sistemas de tempo meteorológico movendo-se de latitudes mais baixas sobre o Oceano Austral trazem umidade, aqui a precipitação anual pode chegar a 300–400 mm de equivalente d'água (a neve derretida em água para facilitar comparações). Excepcionalmente, na Antártica Marítima (no extremo norte da Península Antártica e nas ilhas Shetlands do Sul, Figuras 1.1 e 1.2), pode ocorrer precipitação anual de até 2.500 mm de água. No entanto,

em decorrência das baixíssimas temperaturas, da grande altitude e da extensão do continente, o interior da Antártica é um grande deserto. No platô antártico a precipitação pode ser menor do que 30 mm em um ano (ou seja, equivalente as partes mais áridas do deserto do Saara!). Uma grande parte da precipitação sobre o platô ocorre pela queda, quase contínua de cristais de gelo em um céu límpido, conhecida como “pó de diamante”. Como nunca ocorre derretimento da neve que precipita no interior do continente, ela se acumula através dos milênios, formando o manto de gelo e geleiras do continente

A distribuição de precipitação reflete, assim, como os campos de vento, a distribuição de pressão atmosférica no interior da Antártica e no seu entorno (a Região Antártica Marítima). De maneira simplificada, o campo de pressão médio da atmosfera, no nível médio do mar, consiste de um cinturão de centros de baixas pressões sobre o oceano, uma faixa circumpolar persistente de baixa pressão centrada em torno de 60–65°S, esse é o chamado cavado circumpolar. Na verdade, existem quatro a seis, bem destacados, centros de baixa pressão, os mais importantes nos mares de Ross, Bellingshausen, Weddell e Davis. A sucessão contínua de tempestades ciclônicas, vindas de oeste, torna a região do cavado circumpolar uma das áreas mais nebulosas do mundo, mas o clima é relativamente temperado, as temperaturas do ar à superfície raramente caem abaixo de -10 °C. A estação antártica brasileira Comandante Ferraz está sob esse cavado, e, portanto, sujeita a rápidas variações do tempo meteorológico. Mas essa situação não deve ser generalizada para o resto da Região Antártica.

Conforme se avança para o sul, em direção ao interior do continente, fica evidente um forte anticiclone permanente, isto é, um centro de alta pressão com valor médio de 1.040 hPa (quando corrigido ao nível médio do mar), principalmente no inverno. Como consequência, o tempo meteorológico no interior do manto de gelo é estável, com baixa precipitação ao longo do ano e ventos constantes, fracos e do interior para a costa no sentido anti-horário. No interior da Antártica formam-se também ventos catabáticos: – Em decorrência do extremo frio, o ar denso adjacente à superfície acelera e desce a encosta do manto de gelo. Na parte superior do manto de gelo, onde o declive é suave, esse vento raramente ultrapassa 18 km h⁻¹. Mas perto da costa, com o aumento da declividade da superfície do gelo, ventos de 70 km h⁻¹ são normais, e já foram observados, na costa da Antártica Oriental, catabáticos de até 327 km h⁻¹.

A Figura 1.6 ilustra a distribuição do vento médio (1.6A) e da circulação oceânica (1.6B) na Região Antártica e adjacências. Note o padrão concêntrico das duas circulações. Na faixa latitudinal entre 55 e 65°S predomina o vento no sentido horário (ou vento vindo de Oeste) e que conduz a Corrente Circumpolar Antártica (CCA) na superfície do Oceano Austral (Figura 1.6B). A CCA é a maior e mais rápida corrente e gira no sentido horário ao redor do globo sem nenhuma barreira terrestre. O gradiente de pressão entre a baixa na faixa subpolar e alta do interior do continente provoca ventos de leste ao longo da costa da Antártida e, junto, arrasta uma corrente costeira sobre a plataforma continental. No Capítulo 3 aprenderemos sobre os processos de formação da água de fundo dos oceanos, que, em grande parte, ocorre no Oceano Austral sob as plataformas de gelo e o gelo marinho, e que, portanto, ligam a circulação profunda e superficial dos oceanos. Essa ligação ocorre através das três massas de água que compõem o Oceano Austral: a Água Superficial Antártica, a Água Profunda Circumpolar e a Água Antártica de Fundo (Figura 3.3).

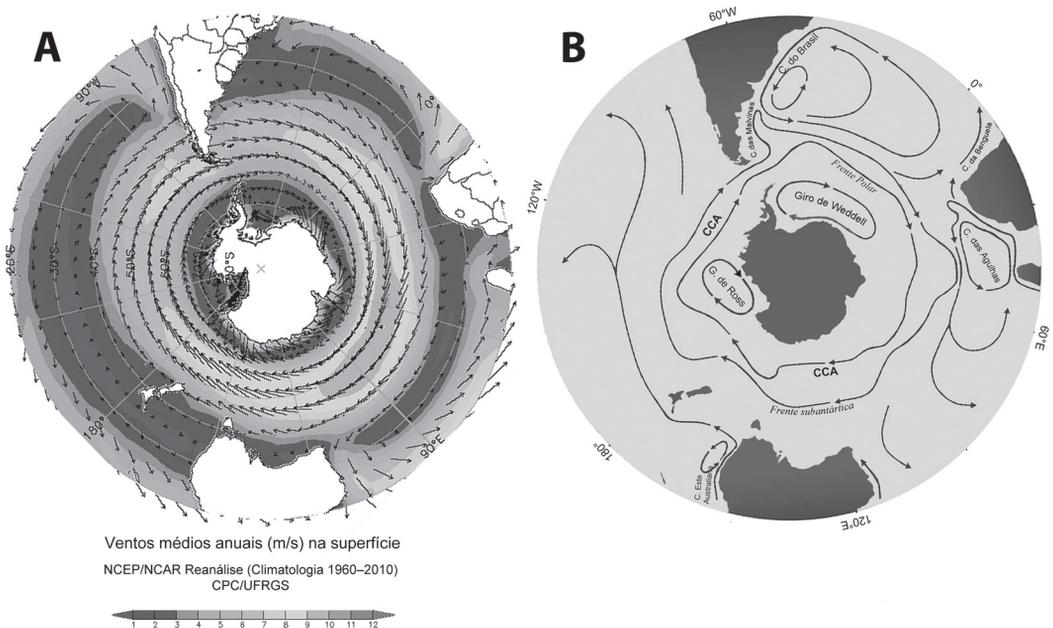


FIGURA 1.6 – Circulação atmosférica (A) e oceânica (B) superficial na Região Antártica e adjacências. Na parte A da figura, as setas representam os vetores de vento, quanto mais escura a imagem, maior a velocidade (note a escala abaixo da figura). Na parte B da figura, CCA significa Corrente Circumpolar Antártica. A figura B também identifica a posição média das principais frentes da CCA, a polar e subantártica. Correntes regionais como os giros dos mares de Weddell e Ross também são mostrados. Fonte: Centro Polar e Climático da UFRGS e Mayewski et al. (2009).

Bibliografia recomendada

CONNOLLEY, W. M.; CATTLE, H. The Antarctic climate of the UKMO Unified Model. *Antarctic Science*, v. 6, n. 1, p. 115–122, 1994.

HAMSON, J. D. E GORDON, J. E. 1998. *Antarctic Environments and Resources: a geographical perspective*. Harlow: Longman. 402 p.

MAYEWSKI, P. A. et al. State of the Antarctic and southern ocean climate system. *Reviews of Geophysics*, v. 47, RG1003, 38 p. doi:10.1029/2007RG000231, 2009.

RINTOUL, S. R., HUGHES, C. W.; OLBERS, D. 2001. The Antarctic Circumpolar Current system. In: Siedler, G. Church,; J. Gould, J. (Eds.) *Ocean circulation and climate; observing and modelling the global ocean. International Geophysics Series*, v. 77, p. 271-302, Academic Press.

Saiba mais por meio de páginas da Internet

<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/77645.html>

<http://www.scar.org/>

<http://usarc.usgs.gov/>